

---

---

**ЭЛЕКТРО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
СПРАВОЧНИК**

**3**

**КНИГА ВТОРАЯ**

---

---

**ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ**

---

---

# ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

В ТРЕХ ТОМАХ

Под общей редакцией профессоров Московского энергетического института  
В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, В. А. Лабунцова, И. Н. Орлова

(главный редактор), М. М. Соколова, А. М. Федосеева, А. Я. Шихина

и инж. И. В. Антика

7-е ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ТОМ 3

В двух книгах

Книга 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1988

ББК 31.2  
Э 45  
УДК 621.3 (035.5)

**Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3:**  
Э 45 В 2 кн. Кн. 2. Использование электрической энергии/  
Под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова  
(гл. ред.) и др. — 7-е изд., испр. и доп. — М.: Энерго-  
атомиздат, 1988. — 616 с.: ил.

ISBN 5-283-00493-7

Приведены сведения по электроснабжению промышленных пред-  
приятий, электроприводам, электротермии, электрическому освещению,  
электрическому транспорту, другим видам использования электроэнергии,  
радиопомехам.

Предыдущее, шестое издание этого тома справочника было выпу-  
щено в 1982 г

Для инженеров-электриков.

Э 2302010000-280 125-88  
051(01)-88

ББК 31.2

ISBN 5-283-00493-7 (Т. 3. Кн. 2)

ISBN 5-283-00568-2

© Энергоатомиздат, 1988

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Раздел 50.</i> Электропривод . . . . .	5	<i>Раздел 57.</i> Электрооборудование взры- воопасных производств . . . . .	340
<i>Раздел 51.</i> Автоматическое управление электроприводами . . . . .	42	<i>Раздел 58.</i> Электрический транспорт	365
<i>Раздел 52.</i> Электропривод общепро- мышленных механизмов . . . . .	118	<i>Раздел 59.</i> Электрооборудование ав- томобилей и тракторов . . . . .	460
<i>Раздел 53.</i> Электротермическое обору- дование . . . . .	151	<i>Раздел 60.</i> Источники вторичного элект- ропитания . . . . .	490
<i>Раздел 54.</i> Оборудование для электро- технологии . . . . .	201	<i>Раздел 61.</i> Электробытовые приборы	534
<i>Раздел 55.</i> Оборудование для электро- сварки . . . . .	265	<i>Раздел 62.</i> Электрические ручные и пе- реносные машины (электроинстру- мент) . . . . .	562
<i>Раздел 56.</i> Электрическое освещение . . . . .	286	<i>Раздел 63.</i> Индустриальные радиопомехи	574
		<i>Раздел 64.</i> Промышленные шумы . . . . .	610

### ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

#### Материал второй книги третьего тома подготовили:

- |   |  |
|---|--|
| <p>Раздел 50 — канд. техн. наук, доц. Л. А. Ильяшенко и канд. техн. наук, доц. В. В. Москаленко</p> <p>Раздел 51 — канд. техн. наук, проф. В. А. Елисеев и доктор техн. наук, проф. А. А. Сиротин (§ 51.1, 51.3, 51.4), канд. техн. наук, проф. В. А. Елисеев (§ 51.2, 51.5, 51.6—51.9), канд. техн. наук, проф. В. А. Елисеев и канд. техн. наук, доц. Г. А. Ромашко (§ 51.12), канд. техн. наук, доц. Л. А. Ильяшенко (§ 51.10) и доктор техн. наук, проф. А. А. Сиротин (§ 51.11)</p> <p>Раздел 52 — канд. техн. наук, доц. Л. Б. Масандилов и канд. техн. наук, доц. Ю. В. Рожанковский (§ 52.1, 52.2, 52.4), канд. техн. наук, доц. Л. Б. Масандилов (§ 52.3, 52.5, 52.6), канд. техн. наук, доц. Ю. В. Рожанковский (§ 52.7)</p> <p>Раздел 53 — канд. техн. наук, доц. Н. М. Некрасова (§ 53.1—53.4) и доктор техн. наук, проф. А. М. Кручинин (§ 53.5)</p> <p>Раздел 54 — доктор техн. наук, проф. <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">А. Л. Лившиц</span>, канд. техн. наук, с. н. с. М. С. Отто и канд. техн. наук, с. н. с. Б. Х. Мечетнер (§ 54.1, 54.2), канд. техн. наук, доц. И. П. Кужекин (§ 54.3, 54.4) и доктор техн. наук, проф. И. П. Верещагин (§ 54.5)</p> | <p>Раздел 55 — доктор техн. наук, проф. <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Н. А. Ольшанский</span> и канд. техн. наук, доц. Ф. В. Шубин</p> <p>Раздел 56 — доктор техн. наук, проф. В. В. Трембач</p> <p>Раздел 57 — инж. М. Д. Бершидский (§ 57.1—57.3, 57.7, 57.8) и инж. М. В. Хорунжий (§ 57.4—57.6)</p> <p>Раздел 58 — канд. техн. наук, доц. Т. И. Савина (§ 58.1), канд. техн. наук, доц. О. А. Коськин (§ 58.2—58.8, 58.10), доктор техн. наук, проф. В. И. Андерс (§ 58.9), канд. техн. наук, доц. Г. П. Долаберидзе (§ 58.11, 58.12), канд. техн. наук, доц. Н. А. Загайнов и канд. техн. наук, доц. Т. И. Савина (§ 58.13)</p> <p>Раздел 59 — канд. техн. наук, доц. П. А. Тыричев (§ 59.1), канд. техн. наук, доц. Ф. Ф. Галтеев (§ 59.2), канд. техн. наук, доц. В. А. Морозов (§ 59.3), канд. техн. наук, доц. Н. З. Мастяев (§ 59.4)</p> <p>Раздел 60 — доктор техн. наук, проф. В. А. Лабунцов (§ 60.1), канд. техн. наук, доц. А. Г. Поликарпов (§ 60.2, 60.3), канд. техн. наук, доц. Б. А. Глебов (§ 60.4) и канд. техн. наук, доц. Е. Ф. Сергиенко (§ 60.5)</p> <p>Раздел 61 — канд. техн. наук, с. н. с. В. Т. Гребениченко (§ 61.1—61.6), канд. техн. наук, доц. Л. Г. Ткачев (§ 61.7)</p> <p>Раздел 62 — инж. Б. М. Левин</p> <p>Раздел 63 — канд. техн. наук, с. н. с. Ю. В. Полозок и инж. <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">П. Г. Метельцин</span></p> <p>Раздел 64 — канд. техн. наук, проф. Н. В. Астахов</p> |
|---|--|

Материал соответствующих разделов просмотрен заведующими кафедрами МЭИ: докторами техн. наук, профессорами В. И. Андерсом, А. Е. Атаевым, Н. Ф. Ильинским, И. П. Копыловым, В. А. Лабунцовым, И. Н. Орловым, М. М. Соколовым.

Редактирование материалов книги осуществлено В. А. Лабунцовым и М. М. Соколовым.



## СОДЕРЖАНИЕ ПЕРВОГО ТОМА

### **Общие вопросы. Электротехнические материалы**

- Раздел 1.* Развитие электроэнергетики, электрификации и электротехнической промышленности  
*Раздел 2.* Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные  
*Раздел 3.* Основные сведения по электрофизике  
*Раздел 4.* Теоретические основы электротехники  
*Раздел 5.* Планирование, организация и автоматизация электротехнического эксперимента  
*Раздел 6.* Основы метрологии. Измерение электрических величин  
*Раздел 7.* Моделирование в электротехнике и электроэнергетике  
*Раздел 8.* Применение вычислительной техники в электротехнике и электроэнергетике

- Раздел 9.* Общие вопросы исполнения и надежности электротехнического оборудования  
*Раздел 10.* Основные правила оформления конструкторской документации  
*Раздел 11.* Экономическая эффективность новой техники  
*Раздел 12.* Безопасность электроустановок и электрооборудования  
*Раздел 13.* Электроизоляционные материалы  
*Раздел 14.* Полупроводниковые материалы  
*Раздел 15.* Проводниковые материалы  
*Раздел 16.* Магнитные материалы  
*Раздел 17.* Контроль качества электротехнических материалов и изделий

## СОДЕРЖАНИЕ ВТОРОГО ТОМА

### **Электротехнические изделия и устройства**

- Раздел 18.* Электрические кабели, провода и шины  
*Раздел 19.* Электроизоляционные конструкции и изоляторы  
*Раздел 20.* Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы  
*Раздел 21.* Резисторы, конденсаторы и реакторы  
*Раздел 22.* Трансформаторы и автотрансформаторы  
*Раздел 23.* Общие вопросы электрических машин  
*Раздел 24.* Проектирование электрических машин  
*Раздел 25.* Справочные данные по электрическим машинам

- Раздел 26.* Электрические машины автоматических устройств  
*Раздел 27.* Коммутационная и защитная аппаратура высокого напряжения  
*Раздел 28.* Трансформаторы тока и напряжения  
*Раздел 29.* Аппараты управления и распределительные устройства низкого напряжения  
*Раздел 30.* Реле защиты, автоматики и управления  
*Раздел 31.* Электромагниты и системы с постоянными магнитами  
*Раздел 32.* Вентильные преобразователи электрической энергии  
*Раздел 33.* Химические источники тока и их применение

## СОДЕРЖАНИЕ КНИГИ ПЕРВОЙ ТРЕТЬЕГО ТОМА

### **Производство и распределение электрической энергии**

- Раздел 34.* Электроэнергетические системы  
*Раздел 35.* Переходные процессы в электроэнергетических системах и особые режимы электроэнергетических систем  
*Раздел 36.* Электрические станции и подстанции (электрическая часть)  
*Раздел 37.* Распределительные устройства  
*Раздел 38.* Перенапряжения в электроэнергетических системах и защита от перенапряжений  
*Раздел 39.* Электрические сети высокого напряжения  
*Раздел 40.* Электропередачи переменного и постоянного тока  
*Раздел 41.* Конструкции воздушных и кабельных линий

- Раздел 42.* Автоматика в электроэнергетических системах  
*Раздел 43.* Автоматизация диспетчерского и технологического управления электроэнергетическими системами  
*Раздел 44.* Защита в электроэнергетических системах  
*Раздел 45.* Управление, контроль и сигнализация на электрических станциях и подстанциях  
*Раздел 46.* Электроснабжение городов и населенных пунктов  
*Раздел 47.* Электроснабжение сельского хозяйства  
*Раздел 48.* Электроснабжение промышленных предприятий и транспорта  
*Раздел 49.* Технико-экономические показатели в электроэнергетике. Вопросы оптимизации и проектирования

# Раздел 50

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

### СОДЕРЖАНИЕ

50.1. Основные обозначения и единицы величин . . . . .	5	шанного возбуждения (ДПТ СВ) (19). Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем (АД) и другими двигателями переменного тока (19). Энергетика электроприводов (23)	
50.2. Определение понятия «электропривод». Классификация электроприводов . . . . .	5	50.4. Расчет мощности двигателя . . . . .	25
50.3. Общие сведения об электроприводе	7	50.5. Принципы проектирования электроприводов . . . . .	27
Механика электропривода. Расчетные схемы механической части (7). Понятие регулирования координат электропривода. Способы и основные показатели регулирования (11). Электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) (13). Электропривод с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ) (18). Электропривод с двигателем постоянного тока сме-		50.6. Технические средства электропривода (силовая часть). Обобщенные технические данные и характеристики (29). Электродвигательное устройство (29). Передающее устройство (31)	29
		50.7. Технические данные серийных комплектов электроприводов . . . . .	32
		50.8. Примеры проектирования . . . . .	38
		Список литературы . . . . .	41

### 50.1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН

В автоматизированном электроприводе (ЭП) применяются обозначения механических величин, приведенные ниже:

- $l$  — длина, м
- $m$  — масса, кг
- $t$  — время, с
- $F$  — сила, Н
- $P$  — мощность, Вт
- $A$  — энергия, работа, Дж
- $v$  — скорость поступательного движения, м/с
- $a$  — ускорение поступательного движения, м/с<sup>2</sup>
- $M$  — вращающий момент, Н · м
- $\varphi$  — угловой путь, угол, рад
- $\omega$  — угловая скорость, рад/с
- $\varepsilon$  — угловое ускорение, рад/с<sup>2</sup>
- $J$  — момент инерции, кг · м<sup>2</sup>

Электрические и магнитные единицы см. в разд. 1.

### 50.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ЭЛЕКТРОПРИВОД». КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В соответствии с ГОСТ 16593-79 в области ЭП применяются следующие термины и определения понятий [50.1].

Электрическим приводом называют электромеханическую систему, состоящую из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Обобщенная структура ЭП показана на рис. 50.1, назначение компонентов и их реализация приведены в табл. 50.1. В отдельных случаях в этой системе могут отсутствовать преобразовательное и передаточное устройства.

Электроприводы разделяются на следующие виды:

по отношению числа электродвигательных установок и исполнительных органов рабочих машин:

*групповой*, обеспечивающий движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины;

*индивидуальный*, обеспечивающий движение одного исполнительного органа рабочей машины;

*взаимосвязанный*, состоящий из двух или нескольких электрически или механически связанных между собой электроприводов, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей, нагрузок или поло-

жения исполнительных органов рабочих машин. Взаимосвязанный ЭП выполняется как *многодвигательный*, электродвигательные устройства которого совместно работают на общий вал, и как электрический вал; обеспечивающий синхронное вращение двух или более электродвигателей, валы которых не имеют механической связи;

по характеру движения:

*вращательный*, электродвигательным устройством которого является вращающийся электродвигатель;

*линейный*, электродвигательным устройством которого является линейный электродвигатель;

по принципу действия электродвигательного устройства:

*непрерывного действия*, подвижные части

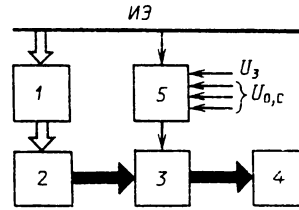


Рис. 50.1. Схема ЭП:

ИЭ – источник электроэнергии;  $U_3$  – задающий сигнал;  $U_{0,c}$  – сигналы обратной связи

электродвигательного устройства которого в установившемся режиме находятся в состоянии непрерывного движения;

*дискретный*, подвижные части электродви-

Таблица 50.1. Назначение и реализация компонентов электропривода

Номер позиции на рис. 50.1	Название	Назначение	Распространенные реализации	Прочие реализации
1	Преобразовательное устройство	Преобразование: рода тока (переменный в постоянный, постоянный в переменный); характера источника напряжения в источник тока и обратно; частоты; числа фаз; уровня напряжения (тока)	Электромашинный агрегат (двигатель-генератор); управляемый выпрямитель на полупроводниковых приборах (тиристорах, транзисторах); преобразователь частоты на полупроводниковых приборах; тиристорный (транзисторный) коммутатор	Индуктивно-емкостный преобразователь; магнитный усилитель
2	Электродвигательное устройство	Преобразование электрической энергии в механическую или механическую энергии в электрическую	Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым и фазным ротором; двигатель постоянного тока (коллекторный) с независимым, последовательным, смешанным возбуждением, с возбуждением от постоянных магнитов	Синхронный и шаговый электродвигатели с электромагнитным возбуждением, с возбуждением от постоянных магнитов, реактивные; линейные электродвигатели различных типов, линейно-поворотные, плоские, сферические
3	Передающее устройство	Передача механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу, преобразование вида движения, согласование скоростей, моментов, усилий	Редуктор; ремennая передача; электромагнитная муфта	Пара винт – гайка; кривошипно-шатунный механизм
4	Исполнительный орган	Осуществление производственных и технологических операций (обработка изделий, подъем и перемещение грузов и т. д.)	Шпиндель токарного станка; подвижной стол строгального станка; рабочие валки прокатного стана; крюк, грейфер механизмов подъема кранов; кабина, клеть или скип подъемников; рабочее колесо роторных экскаваторов; центрифуга; лента, цепь конвейера	Фреза фрезерного станка, винт нажимного устройства прокатного стана; тележка, мост механизмов передвижения кранов; ковш механизмов напора, тяги и подъема одноковшовых экскаваторов; крыльчатка насосов и вентиляторов и др.
5	Управляющее устройство	Управление преобразовательным, электродвигательным и передаточными устройствами	Релейно-контакторные схемы управления; регуляторы; усилители; управляющие вычислительные машины, микропроцессоры, программируемые контроллеры	Командоаппараты; логические схемы управления

гательного устройства которого в установившемся режиме находятся в состоянии дискретного движения;

по направлению вращения электродвигательного устройства:

*реверсивный*, обеспечивающий движение электродвигательного устройства в противоположных направлениях;

*нереверсивный*, имеющий только одно направление движения электродвигательного устройства;

по роду тока:

*постоянного тока*, имеющего электродвигательное устройство постоянного тока;

*переменного тока*, имеющего электродвигательное устройство переменного тока;

по виду первичного источника энергии:

*автономный*, потребляющий энергию от автономного источника;

*аккумуляторный*, представляющий собой автономный ЭП, источником энергии которого является аккумуляторная батарея;

*теплоэлектрический*, представляющий собой автономный ЭП, источником энергии которого является тепловой двигатель;

*дизель-электрический и турбоэлектрический*, являющиеся теплоэлектрическими приводами, источником энергии которых является дизель-генератор или турбогенератор;

по характеру изменения параметров:

*регулируемый*, параметры которого могут изменяться под воздействием управляющего устройства;

*нерегулируемый*, параметры которого изменяются только в результате возмущающих воздействий;

по виду преобразовательного устройства (УП):

*вентильный*, в преобразовательном устройстве которого применен вентильный УП. К нему относятся ионный ЭП – вентильный ЭП с ионным УП – и полупроводниковый с вентильно-полупроводниковым УП;

*тиристорный*, представляющий собой полупроводниковый ЭП, в силовых цепях УП которого применены тиристоры;

*транзисторный*, представляющий собой полупроводниковый ЭП, в силовых цепях УП которого применены транзисторы;

*система «управляемый выпрямитель – двигатель»*, являющаяся вентильным ЭП постоянного тока, в УП которого применен регулируемый выпрямитель или реверсивный преобразователь (регулируемый выпрямитель-инвертор);

*система «преобразователь частоты – двигатель»*, являющаяся вентильным ЭП переменного тока, в УП которого применен регулируемый преобразователь частоты;

*система «генератор – двигатель»*, представляющая собой регулируемый ЭП, в преобразовательном устройстве которого применен электромашинный преобразовательный агрегат;

по выполняемым операциям (функциям):

*неавтоматизированный и автоматизированный* с автоматическим регулированием параметров. Автоматизированный ЭП делится:

*программно-управляемый;*

*следящий*, который обрабатывает перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

*позиционный*, предназначенный для регулирования положения исполнительного органа рабочей машины;

*адаптивный*, автоматически избирающий структуру или параметры системы регулирования при изменении условий работы;

по виду связей с исполнительным органом рабочей машины:

*редукторный*, передаточное устройство которого содержит редуктор (в том числе и встроенный);

*безредукторный*, в передаточном устройстве которого отсутствует редуктор;

*маховиковый*, в состав которого входит маховик;

*электрогидравлический привод*, имеющий гидравлическое передаточное устройство.

### 50.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

#### Механика электропривода. Расчетные схемы механической части

Механическую часть ЭП образуют движущаяся часть электродвигательного устройства, передаточное устройство и исполнительный орган. В общем случае она представляет собой сложную систему элементов конечной жесткости с различными массами (сосредоточенными и распределенными) и скоростями движения, на которые воздействуют силы и моменты. Кроме того, кинематические цепи могут содержать воздушные зазоры.

Для анализа движения механической части ЭП осуществляется переход от реальной кинематической схемы к расчетной, в которой массы и моменты инерции движущихся элементов и их жесткости, а также силы и моменты, действующие на эти элементы, заменены эквивалентными величинами, приведенными к одной и той же скорости.

Условием соответствия получаемой расчетной схеме реальной механической части

ЭП является выполнение закона сохранения энергии.

Процесс перехода к расчетным схемам обычно называют приведением, а сами величины — приведенными. Обычно оказывается удобным и целесообразным осуществлять приведение к скорости электродвигательного устройства.

Приведение моментов инерции и масс элементов осуществляется с помощью формул

$$J_{\text{пр}k} = J_k/i_k^2; \quad J_{\text{пр}i} = m_i\rho_i^2;$$

механизм с вращающимися и поступательно движущимися элементами имеет суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + \sum_{k=1}^n J_{\text{пр}k} + \sum_{i=1}^m m_i\rho_i^2.$$

где  $J_k$  — момент инерции  $k$ -го вращающегося элемента, кг·м<sup>2</sup>;  $m_i$  — масса  $i$ -го поступательно движущегося элемента, кг;  $J_{\text{пр}k}$ ,  $J_{\text{пр}i}$  — приведенные (эквивалентные) моменты инерции соответственно  $k$ -го и  $i$ -го элементов, кг·м<sup>2</sup>;  $i_k = \omega/\omega_k$  — передаточное число кинематической цепи между валом электродвигателя и  $k$ -м элементом;  $\omega$ ,  $\omega_k$  — угловые скорости соответственно вала двигателя и  $k$ -го элемента, рад/с (в дальнейшем вместо термина «угловая скорость» употребляется термин «скорость»);  $\rho_i = v_i/\omega$  — радиус приведения поступательно движущегося  $i$ -го элемента к валу двигателя, м;  $v_i$  — скорость движения  $i$ -го элемента, м/с.

Приведение моментов и сил, приложенных к  $k$ -му или  $i$ -му элементу механической части ЭП (в том числе и к исполнительному органу), проводится по формулам:

при потоке энергии от двигателя к исполнительному органу

$$M_c = M_k/i_k\eta_k; \quad M_c = F_i\rho_i/\eta_i;$$

при обратном направлении потока энергии

$$M_c = M_k\eta_k/i_k; \quad M_c = F_i\eta_i\rho_i,$$

где  $M_k$  — момент, приложенный к  $k$ -му элементу, Н·м;  $F_i$  — сила, приложенная к  $i$ -му элементу, Н;  $M_c$  — приведенный (эквивалентный) момент сопротивления (статический момент), Н·м;  $\eta_k$ ,  $\eta_i$  — КПД кинематической цепи соответственно между  $k$ -м или  $i$ -м элементом и валом электродвигательного устройства.

Для упругих элементов в пределах закона Гука справедливы соотношения

$$M_y = c \Delta\varphi, \quad F_y = c \Delta l,$$

где  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta l$  — соответственно угловая или линейная деформация упругого элемента;  $M_y$ ,

$F_y$  — возникающие при деформации упругого элемента моменты или силы;  $c$  — коэффициент жесткости.

Для упругого стержня при его растяжении или сжатии коэффициент жесткости определяется как  $c = SE/l$ , Н/м, где  $l$  — длина стержня, м;  $S$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $E$  — модуль упругости растяжения и сжатия, Па.

Для вала при его кручении  $c = J_p G/l$ , Н·м, где  $l$  — длина стержня, м;  $J_p = \pi R^4/2$  — момент инерции поперечного сечения вала, м<sup>4</sup>;  $G$  — модуль упругости кручения, Па.

Приведение жесткости упругого элемента производится по формулам:

$c = c_k/i_k^2$  — для  $k$ -го упругого элемента с жесткостью  $c$  при кручении, Н·м;

$c = c_i\rho_i^2$  — для  $i$ -го упругого поступательно движущегося элемента с жесткостью  $c_i$  при растяжении и сжатии, Н·м.

Эквивалентная жесткость  $n$  упругих элементов с жесткостями  $c_1, c_2, \dots, c_n$  составляет при последовательном соединении

$$c_{\text{эв}} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 + \dots + 1/c_n};$$

при параллельном соединении

$$c_{\text{эв}} = c_1 + c_2 + \dots + c_n.$$

Податливостью упругого элемента называют величину, обратную жесткости:

$$e = 1/c.$$

Приведение углового  $\varphi_0$  и линейного  $\delta_0$  зазоров осуществляется по формулам

$$\varphi = \varphi_0 i_0 \quad \text{или} \quad \varphi = \delta_0/\rho_0,$$

где  $i_0$ ,  $\rho_0$  — передаточное число и радиус приведения кинематической схемы между валом двигателя и зазором;  $\varphi$  — приведенное значение зазора, рад.

С помощью приведенных расчетных схем механической части ЭП производится определение:

параметров установившегося движения ЭП;

устойчивости установившегося движения; характера протекания переходных (динамических) режимов движения.

Важным понятием при решении этих задач является понятие механических характеристик электродвигательного устройства (двигателя) и исполнительного органа  $\omega(M)$  и  $\omega(M_c)$  [или  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$ ], где  $M$  и  $M_c$  — моменты электродвигательного устройства и исполнительного органа. На рис. 50.2 и 50.3 показаны механические характеристики некоторых электродвигательных устройств и ис-



полнительных органов. Основным параметром механической характеристики является ее жесткость  $\beta$ , которая определяется как производная момента по скорости:

$$\beta = dM/d\omega; \quad \beta_c = dM_c/d\omega.$$

Жесткость характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения  $\beta = \text{const} < 0$ , последовательного возбуждения  $\beta = \text{var} < 0$ , синхронного  $\beta = \infty$ , асинхронного  $\beta = \text{var} \geq 0$ , жесткость характеристик исполнительных органов может быть положительной, отрицательной и равной нулю.

Большинство реальных кинематических схем механической части ЭП в результате выполнения операций приведения сводятся к одной из трех расчетных систем: одно-массовой, двухмассовой и трехмассовой.

**Одномассовая система**, или жесткое приведенное механическое звено, соответствует механической части без зазора, содержащей

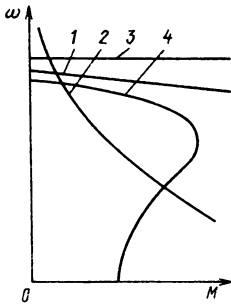


Рис. 50.2. Естественные механические характеристики:

1 – двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 2 – двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; 3 – синхронного двигателя; 4 – асинхронного двигателя

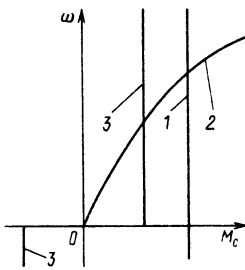


Рис. 50.3. Механические характеристики исполнительных органов:

1 – подъемников; 2 – вентиляторов, центробежных компрессоров и насосов; 3 – горизонтальных конвейеров и транспортеров

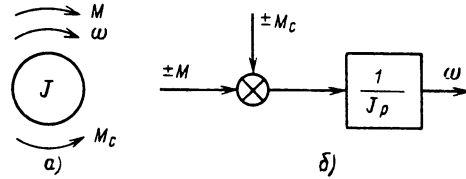


Рис. 50.4. Расчетная (а) и структурная (б) схемы одномассовой системы

абсолютно жесткие, недеформируемые элементы.

Расчетная схема одномассовой системы изображена на рис. 50.4, а, а ее движение описывается уравнением

$$\pm M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt},$$

где  $J = J_{дв} + J_{пр}$  – суммарный момент инерции;  $J_{дв}$  – момент инерции двигателя.

При  $J = \text{const}$  уравнение движения имеет вид

$$\pm M \mp M_c = J d\omega/dt.$$

Структурная схема, соответствующая этому уравнению, приведена на рис. 50.4, б.

При работе электродвигательного устройства в двигательном режиме  $M > 0$ , а при работе в генераторном режиме  $M < 0$ . Если  $M_c$  является моментом сопротивления, перед ним ставится отрицательный знак, а если движущим – положительный. Для наиболее характерного режима работы ЭП, когда двигатель создает движущий момент, а исполнительный орган – тормозящий, уравнение движения принимает вид

$$M - M_c = J d\omega/dt.$$

**Условие установившегося механического движения**

$$d\omega/dt = 0 \quad \text{или} \quad M = M_c.$$

Проверка этого условия осуществляется с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного органа, для чего они совмещаются на одной плоскости, как показано на рис. 50.5. Точки 1 и 2 пересечения этих характеристик соответствуют установившемуся (равновесному) движению механической системы, а координаты этих точек  $\omega_{уст1}$ ,  $M_c$ ,  $\omega_{уст2}$ ,  $M_c$  – параметры этого движения.

Установившееся движение будет устойчивым при  $\beta - \beta_c < 0$ .

В точке 2 пересечения этих характеристик имеет место неустойчивое движение, при котором  $\beta - \beta_c > 0$  и любое, даже самое малое

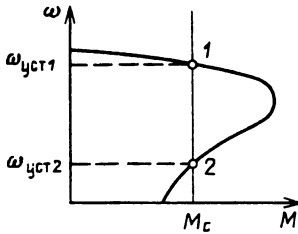


Рис. 50.5. Определение установившегося механического движения

отклонение скорости выводит систему из равновесного состояния. В точке 1 имеет место устойчивое движение.

**Неустановившийся (переходный) режим** будет иметь место при  $M \neq M_c$ , а его характер определяется видом зависимостей  $M(\omega)$ ,  $M_c(\omega)$ . Случаи переходных режимов при зависимости  $M_c$  от хода (пути) исполнительного органа или времени проанализированы в [50.10].

1.  $M = const$  и  $M_c = const$ . Изменение скорости во времени происходит в соответствии со следующей зависимостью:

$$\omega = \frac{M - M_c}{J} t + \omega_{нач}$$

где  $\omega_{нач}$  – начальное значение скорости при  $t = 0$ .

Эта зависимость получена путем интегрирования уравнения движения.

Механические характеристики для случая  $M > M_c$  приведены на рис. 50.6, а, график изменения скорости во времени  $\omega(t)$  – на рис. 50.6, б.

Время переходного процесса  $t_{п,п}$  при изменении скорости от  $\omega_{нач}$  до некоторого значения  $\omega_{кон}$  определяется по формуле

$$t_{п,п} = \frac{J(\omega_{кон} - \omega_{нач})}{M - M_c}$$

2. **Линейная зависимость  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$ .** Переходный процесс описывается в этом случае системой уравнений

$$M - M_c = J d\omega/dt;$$

$$M = M_k - \beta\omega;$$

$$M_c = M_{c0} - \beta_c\omega,$$

где  $M_k$ ,  $M_{c0}$  – соответственно моменты двигателя и исполнительного органа при  $\omega = 0$ .

Решение этой системы относительно скорости имеет вид:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-t/T_M},$$

где  $\omega_{уст} = (M_k - M_{c0})/(\beta + \beta_c)$  – установившееся значение скорости, рад/с;  $T_M = J/(\beta + \beta_c)$  – электро-механическая постоянная времени.

Выражение для изменения момента двигателя в функции времени имеет аналогичный вид:

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) e^{-t/T_M},$$

где  $M_{уст} = (\beta_c M_k + \beta M_{c0})/(\beta + \beta_c)$  – установившееся значение момента, Н·м.

Время  $t_{п,п}$  изменения скорости от  $\omega_{нач}$  до некоторого значения  $\omega_{кон}$  или момента от  $M_{нач}$  до  $M_{кон}$  определяется по формуле

$$t_{п,п} = T_M \ln \frac{\omega_{нач} - \omega_{уст}}{\omega_{кон} - \omega_{уст}} = T_M \ln \frac{M_{нач} - M_{уст}}{M_{кон} - M_{уст}}$$

Пример переходного процесса для случая  $M_c = M_{c0} = const$  ( $\beta_c = 0$ ) приведен на рис. 50.7.

Электро-механическая постоянная времени в этом случае определяется как  $T_M = J/\beta = J \Delta\omega/\Delta M$ , установившийся момент  $M_{уст} = M_{c0}$ , а установившаяся скорость  $\omega_{уст} = \omega_0 - M_{c0}/\beta$ , где  $\omega_0 = M_k/\beta$  – скорость, соответствующая точке пересечения механической характеристики двигателя с осью скорости (скорость идеального холостого хода двига-

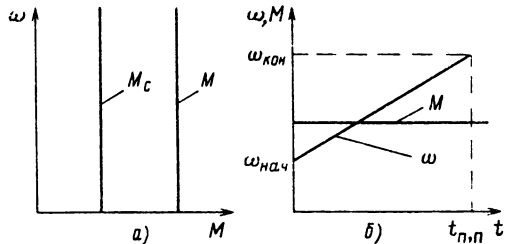


Рис. 50.6. Переходный процесс при  $M = const$ ,  $M_c = const$ ,  $M > M_c$ :

а – механические характеристики; б – графики скорости и момента

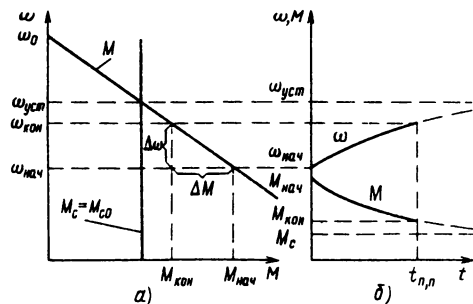


Рис. 50.7. Переходный процесс при линейных механических характеристиках:

а – механические характеристики двигателя и исполнительного органа; б – графики скорости и момента

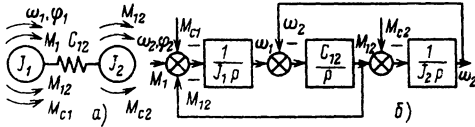


Рис. 50.8. Расчетная (а) и структурная (б) схемы двухмассовой системы

теля). Более подробно переходные процессы для этого случая рассмотрены в [50.2, 50.3].

3. *Нелинейные (произвольные) механические характеристики*  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$ . Для получения кривых переходного процесса  $\omega(t)$  и  $M(t)$  необходимо, как и ранее, выполнить интегрирование уравнения движения.

Если  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$  есть аналитически выраженные функции, то производится строгое математическое решение (интегрирование). Следует отметить, что получаемые в этом случае аналитические зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$  могут иметь достаточно сложный вид.

Если  $M(\omega)$  и  $M_c(\omega)$  заданы графически и не имеют строго аналитического выражения, то решение задачи может идти по одному из двух путей:

аппроксимации механических характеристик (или их отдельных участков) и затем интегрирования уравнения движения;

использования численных или графоаналитических методов интегрирования дифференциального уравнения движения. Анализ переходных процессов в одномассовой системе с нелинейными механическими характеристиками двигателя и исполнительного органа подробно рассмотрен в [50.2]. Целесообразно при решении таких задач использовать средства вычислительной техники.

**Многომассовые системы.** Расчетная схема двухмассовой системы без зазора с одним упругим невесомым элементом с жесткостью  $c_{12}$  показана на рис. 50.8, а. К такой схеме приводятся кинематические схемы ЭП, не содержащие существенных зазоров и имеющие один упругий элемент малой жесткости (длинный вал, длинный канат или трос в подъемных лебедках).

Система уравнений, описывающая движение в этой системе:

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 d\omega_1/dt;$$

$$M_{12} - M_{c2} = J_2 d\omega_2/dt;$$

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $M_1$ ,  $\omega_1$ ,  $J_1$  — соответственно момент, скорость и момент инерции первой массы (обычно двигателя и жестко связанных с ним

элементов кинематической цепи);  $M_{12}$ ,  $c_{12}$  — упругий момент и приведенная жесткость упругого элемента;  $\omega_2$ ,  $J_2$  — скорость и момент инерции второй массы (обычно исполнительного органа и жестко связанных с ним элементов кинематической цепи);  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — углы поворота первой и второй масс;  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$  — моменты сопротивления, приложенные к первой и второй массам.

Структурная схема двухмассовой системы показана на рис. 50.8, б. Переходные процессы в двухмассовой системе, в том числе в случае наличия зазора, вязкого трения и т. д., подробно рассмотрены в [50.2, 50.3].

К трехмассовой механической системе сводятся кинематические схемы, содержащие два упругих элемента малой жесткости. Расчетная схема трехмассовой системы, ее структурная схема и динамика рассмотрены в [50.3].

### Понятие регулирования координат электропривода.

#### Способы и основные показатели регулирования

При выполнении исполнительным органом технологических операций часто требуется регулирование его положения, скорости или ускорения движения, ограничения усилий на исполнительном органе и т. д. Кроме того, при работе самого ЭП обычно возникает необходимость в ограничении тепловых, коммутационных и механических нагрузок его элементов. Для решения этих задач требуется регулировать координаты (переменные) ЭП — скорость, момент, положение вала двигателя.

Возможны два способа регулирования координат — параметрический и с помощью обратных связей в замкнутых системах. Параметрический способ предусматривает получение искусственных механических характеристик с помощью изменения параметров двигателя или параметров его цепей. При использовании второго способа требуемые механические характеристики формируются с помощью различных обратных связей — по току, моменту, скорости, положению.

Регулирование координат в замкнутых системах ЭП производится при высоких требованиях к качеству регулирования координат — большом диапазоне, высокой точности и экономичности и т. д. В замкнутых системах ЭП чаще всего используют так называемый принцип регулирования по отклонению [50.5]. В некоторых случаях создаются и комбинированные замкнутые системы, в которых помимо принципа регулирования по отклонению используется принцип регулирования по возмущению (принцип компенсации). Замкнутая си-

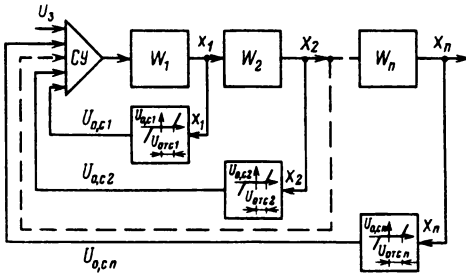


Рис. 50.9. Структурная схема ЭП с суммирующим усилителем

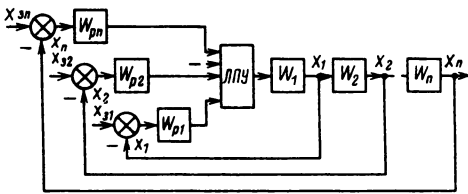


Рис. 50.10. Структурная схема ЭП с независимым регулированием координат

системы. Обратная связь в зависимости от передаточной функции  $W_{o,c1}, W_{o,c2}, \dots, W_{o,cn}$  может быть положительной, отрицательной, жесткой, гибкой, линейной или нелинейной. В данной схеме задающий сигнал  $U_3$  не определяет полностью заданного значения ни одной из координат и регулирование их не является независимым. До недавнего времени подобная структура являлась основной в регулируемом ЭП.

2. Структура независимого регулирования координат соответствует схеме рис. 50.10. Регулирование каждой координаты осуществляется с помощью отдельных регуляторов  $W_{p1}, W_{p2}, \dots, W_{pn}$ , и в каждый момент времени регулируется только одна из координат. Это обеспечивается логическим переключающим устройством ЛПУ, которое подключает ко входу системы выход того регулятора, воздействие которого в данный момент является определяющим. Структура не нашла широкого применения из-за сложности ЛПУ.

3. Структура с подчиненным регулированием координат изображена на рис. 50.11. Каждой регулируемой координате ЭП в этой системе соответствует свой регулятор, на вход которого подается сигнал обратной связи по этой координате. В результате образуется система из  $n$  концентрических контуров, в которой выходной сигнал второго регулятора является задающим сигналом для первого регулятора, выходной сигнал третьего – задающим для второго и т. д. Таким образом, регулирование координаты  $X_1$  подчинено регулированию координаты  $X_2$ , регулирование  $X_2$  – регулированию  $X_3$  и т. д.

Система позволяет производить настройку (оптимизацию) каждого внутреннего контура независимо от настройки внешнего, а также просто осуществлять ограничение координат путем ограничения выходного сигнала предыдущего контура. В силу отмеченных преимуществ и возможности использования стандартных элементов УБСР система подчиненного регулирования с последовательной коррекцией находит широкое применение.

Регулирование координат характеризуется рядом показателей.

стема ЭП строится, как правило по системе УП – Д, в которой чаще всего используются обратные связи по скорости, току и напряжению двигателя. Используемые обратные связи могут быть положительными и отрицательными, жесткими и гибкими, линейными и нелинейными [50.5]. В общем случае при регулировании нескольких координат замкнутая система ЭП строится по одной из трех структур [50.3]: 1) структуре с суммирующим усилителем; 2) структуре независимого регулирования координат; 3) структуре подчиненного регулирования координат.

1. Структура с суммирующим усилителем показана на рис. 50.9. Ее особенность заключается в наличии суммирующего усилителя СУ, который служит для суммирования сигналов обратных связей  $U_{o,c1}, U_{o,c2}, \dots, U_{o,cn}$  и увеличения общего коэффициента усиления

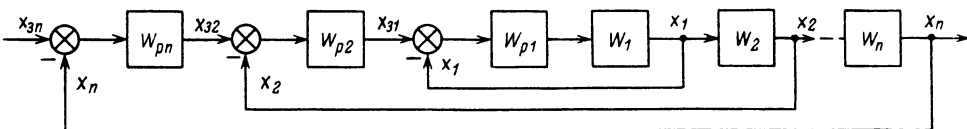


Рис. 50.11. Структурная схема ЭП с подчиненным регулированием координат

Диапазон регулирования характеризует возможные при данном способе пределы изменения координаты.

Точность регулирования определяется возможными отклонениями координаты от ее заданного значения под действием возмущающих факторов.

Экономичность регулирования определяется сопоставлением капитальных затрат и эксплуатационных расходов при использовании регулируемого ЭП с получаемым эффектом за счет повышения производительности и надежности работы производственной машины и улучшения качества продукции и выполняемых операций.

Плавность регулирования характеризуется числом значений регулируемого параметра, реализуемым в данном диапазоне.

Допустимая нагрузка при регулировании координат есть наибольший момент, который двигатель способен продолжительно развивать при работе на любой искусственной характеристике. Главным критерием при определении продолжительно допустимого момента является нагрев двигателя. Если допустить, что нагрев двигателя определяется лишь потерями в обмотках двигателя при протекании по ним тока, а теплоотдача двигателя не зависит от его скорости, то допустимым будет такой момент, при котором ток в обмотках равен номинальному  $I_{ном}$ . Так как момент любого двигателя пропорционален току  $I$  и потоку  $\Phi$ , то  $M_{доп} \equiv I_{ном}\Phi$ .

Таким образом, при определении допустимой нагрузки следует оценивать изменение магнитного потока  $\Phi$  и на этом основании судить о  $M_{доп}$ .

Подробнее показатели конкретных способов регулирования рассмотрены в [50.2, 50.3].

### Электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Основная схема включения приведена на рис. 50.12, а, где  $U$  – напряжение сети;  $OB$  – обмотка возбуждения;  $R_{я}$  – внутреннее сопротивление якорной цепи;  $R_{в}$  – сопротивление обмотки возбуждения;  $R_{д}$ ,  $R_{рег}$  – добавочный резистор в цепи якоря и регулировочный резистор в цепи возбуждения;  $I$ ,  $I_{в}$  – токи в цепях якоря и возбуждения.

Электромеханическая характеристика ДПТ НВ

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{я} + R_{д}}{k\Phi} I,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;  $k = pN/2\pi a$  – конструктивный коэффициент;  $p$  – число пар по-

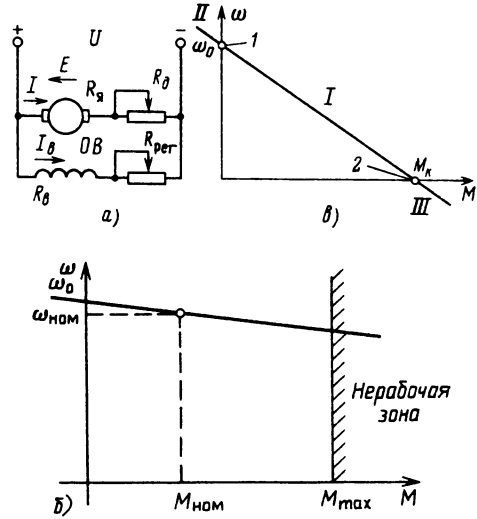


Рис. 50.12. Схема включения (а) и естественные механические характеристики (б, в) ДПТ НВ

люсов;  $N$  и  $a$  – числа активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря.

Механическая характеристика ДПТ НВ

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{я} + R_{д}}{(k\Phi)^2} M,$$

где  $M$  – электромагнитный момент.

Связь между током, моментом и магнитным потоком  $M = k\Phi I$ .

Связь между ЭДС, скоростью и потоком  $E = k\Phi\omega$ .

Естественная механическая характеристика, соответствующая  $U = U_{ном}$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ,  $R_{д} = 0$ , изображена на рис. 50.12, б.

При работе ДПТ НВ могут возникнуть следующие энергетические режимы работы (рис. 50.12, в):

участок I:  $M > 0$ ;  $\omega_0 > \omega > 0$  – двигательный режим;

точка 1:  $M = 0$ ;  $\omega_0 = U/k\Phi_{ном}$  – идеальный холостой ход (ХХ);

участок II:  $M < 0$ ;  $\omega > \omega_0$  – генераторный режим параллельно с сетью (режим рекуперативного торможения);

точка 2:  $M = M_k$ ;  $\omega = 0$  – режим короткого замыкания (КЗ);

участок III:  $M > M_k$ ;  $\omega < 0$  – генераторный режим последовательно с сетью (режим торможения противовключением).

Схема динамического торможения ДПТ НВ изображена на рис. 50.13, а. Выражения



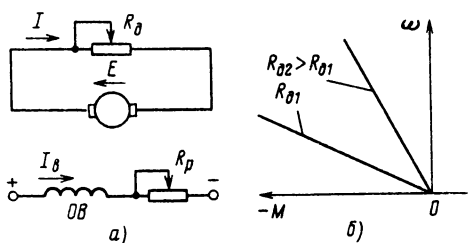


Рис. 50.13. Схема включения (а) и механические характеристики (б) ДПТ НВ при динамическом торможении

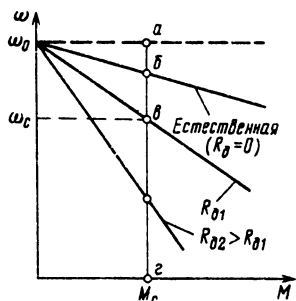


Рис. 50.14. Искусственные механические реостатные характеристики ДПТ НВ

для характеристик, получаемые при  $U = 0$ , имеют вид

$$\omega = - \frac{R_{я} + R_{д.т}}{k\Phi} I = - \frac{R_{я} + R_{д.т}}{(k\Phi)^2} M.$$

Механические характеристики ДПТ НВ при двух различных сопротивлениях динамического торможения  $R_{д.т}$  показаны на рис. 50.13, б. В схеме динамического торможения ДПТ НВ работает генератором независимо от сети.

Данные серийных ДПТ НВ приведены в разд. 25 и в [50.4].

Основные параметрические способы регулирования координат ЭП с ДПТ НВ связаны с воздействием на  $R_{д.т}$ ,  $\Phi$  и  $U$ .

**Регулирование скорости изменением  $R_{д.т}$  в цепи якоря.** На рис. 50.14 показаны искусственные механические реостатные характеристики, полученные при введении в цепь якоря  $R_{д.т}$ . Расчет сопротивления резистора  $R_{д.т}$ , при введении которого искусственная характеристика проходит через точку с координатами  $\omega_c, M_c$ , производится по формуле

$$R_{д.т*} = 1 - \frac{\omega_{с*} (1 - R_{я*})}{M_{с*}} - R_{я*},$$

где  $R_{д.т*} = R_{д.т}/R_{н.т}$ ;  $R_{я*} = R_{я}/R_{н.т}$ ;  $R_{н.т} = U_{ном}/I_{ном}$ ;  $\omega_{с*} = \omega_c/\omega_{ном}$ ;  $M_{с*} = M_c/M_{ном}$ .

К тому же результату приведет использование графического «метода отрезков» (рис. 50.14), в соответствии с которым справедливо следующее соотношение:

$$R_{д.т*} = R_{я*} (a\beta/a\beta - 1).$$

Требуемое для расчетов значение  $R_{я}$  берется из справочных данных или рассчитывается по следующей приближенной формуле:

$$R_{я} \approx 0.5 (1 - \eta_{ном}) U_{ном}/I_{ном},$$

где  $\eta_{ном}$  – номинальный КПД двигателя.

Для регулирования тока и момента ДПТ НВ при его пуске строится так называемая пусковая диаграмма, представляющая собой совокупность нескольких реостатных характеристик, на которых работает ДПТ НВ в процессе пуска (рис. 50.15). Если не заданы какие-либо специальные требования к пуску, то значения моментов выбираются в пределах

$$M_1 = (1,5 \div 2) M_{ном}; \quad M_2 = (1,1 \div 1,3) M_c.$$

Количество реостатных характеристик, которое должно являться целым числом, определяется по формуле

$$m = \frac{\lg (M_{ном} R_{н.т} / R_{я} M_1)}{\lg (M_1 / M_2)}.$$

Подбором  $M_1$  и  $M_2$  в указанных пределах обеспечивается целочисленное значение  $m$ . Расчет ступеней пускового резистора производится по указанным выше соотношениям. Более подробные сведения по построению и расчету пусковых диаграмм приведены в [50.2 – 50.4].

Сопротивление резистора, включаемого в цепь якоря для ограничения момента до требуемого (допустимого) уровня  $M_1$  при переводе ДПТ НВ в режим противовключения со скорости  $\omega_c$ , определяется по формуле

$$R_{д.п*} = 1 + \frac{\omega_{с*} (1 - R_{я*})}{M_1} - R_{я*},$$

где  $R_{д.п*} = R_{д.п}/R_{н.т}$ ;  $M_1* = M_1/M_{ном}$ .

Сопротивление резистора, включаемого в цепь якоря для ограничения момента до уровня  $M_1$  при переводе ДПТ НВ в режим динамического торможения со скорости  $\omega_c$ ,

$$R_{д.т*} = \frac{\omega_{с*} (1 - R_{я*})}{M_1*} - R_{я*},$$

где  $R_{д.т*} = R_{д.т}/R_{н.т}$ .

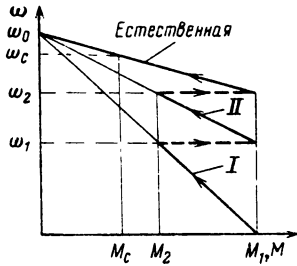


Рис. 50.15. Пусковая диаграмма ДПТ НВ

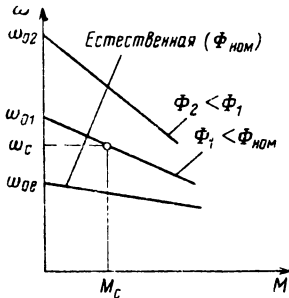


Рис. 50.16. Характеристики ДПТ НВ при уменьшении магнитного потока

Регулирование скорости изменением магнитного потока  $\Phi$  осуществляется обычно в сторону его уменьшения воздействием на ток возбуждения  $I_B$  с помощью резистора  $R_p$  (см. рис. 50.12, а). Получаемые искусственные характеристики показаны на рис. 50.16. Относительный магнитный поток  $\Phi_{1*} = \Phi_1/\Phi_{ном}$ , при котором механическая характеристика проходит через точку с координатами  $\omega_c, M_c$  при  $U = U_{ном}$ ;  $R_d = 0$ , определяется из выражения

$$\Phi_{1*} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4M_c \omega_c R_{я*} (1 - R_{я*})}}{2\omega_c (1 - R_{я*})}$$

Ток возбуждения  $I_{B1}$ , соответствующий  $\Phi_{1*}$ , находится с помощью универсальной кривой намагничивания (рис. 50.17) как  $I_{B1} = I_{B1*} (\Phi_{1*}) I_{B,ном}$ , а сопротивление резистора – по выражению

$$R_{p1} = U_{ном}/I_{B1} - R_B$$

Помимо использования  $R_p$  для регулирования тока возбуждения применяются отдельные источники постоянного напряжения.

Регулирование скорости изменением напряжения, подводимого к якорной цепи. Реализация этого способа требует применения УП того

или иного типа. Схема включения ДПТ НВ приведена на рис. 50.18, а. Уравнение механической характеристики при  $\Phi = \Phi_{ном}$  и  $R_d = 0$  имеет вид

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{E_n}{k\Phi_{ном}} - \frac{R_n + R_{я}}{k\Phi_{ном}} I \\ &= \frac{E_n}{k\Phi_{ном}} - \frac{R_n + R_{я}}{(k\Phi_{ном})^2} M, \end{aligned}$$

где  $E_n, R_n$  – соответственно ЭДС и внутреннее сопротивление УП.

Семейство характеристик ДПТ НВ, питаемого от электромашиного УП (система Г – Д), приведено на рис. 50.18, б.

При питании ДПТ НВ от вентильного УП выражение для механической характеристики приобретает вид

$$\omega = \frac{E_{п,м} \cos \alpha - \Delta U_B}{k\Phi_{ном}} - \frac{R_n + R_p + R_{я}}{(k\Phi_{ном})^2} M,$$

где  $E_{п,м}, \Delta U_B, R_n$  – соответственно максимальное значение ЭДС УП, падение напряжения на его вентилях и его эквивалентное внутрен-

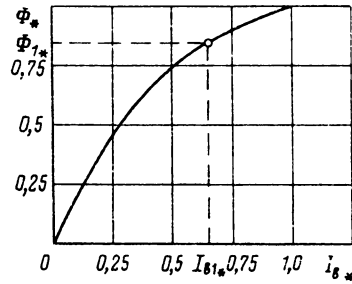


Рис. 50.17. Универсальная кривая намагничивания  $I_{B*} = I_B/I_{B,ном}$ ;  $\Phi_* = \Phi/\Phi_{ном}$

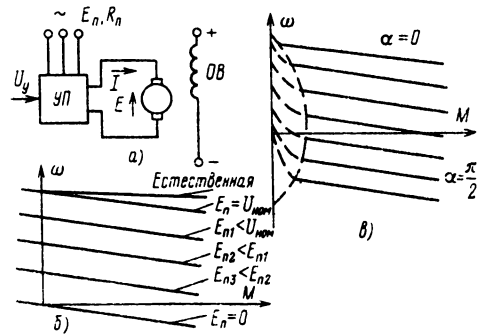


Рис. 50.18. Схема ЭП (а) и его характеристики при питании якоря ДПТ НВ от электромашиного (б) и вентильного (в) УП

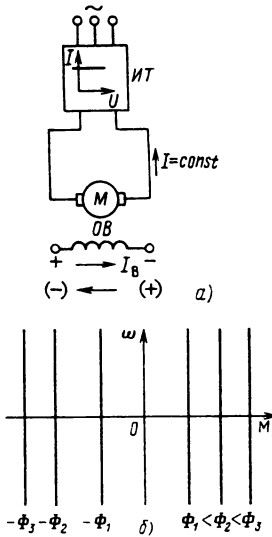


Рис. 50.19. Схема (а) и механические характеристики (б) ДПТ НВ при питании его якоря от источника тока

нее сопротивление;  $R_p$  – активное сопротивление обмоток сглаживающего реактора в цепи якоря;  $\alpha$  – угол управления вентилей УП.

Эквивалентное внутреннее сопротивление УП при наличии силового трансформатора определяется из выражения

$$R_{\text{н}} = 2R_1 + R_{y.p} + x_t m / 2\pi,$$

где  $R_{y.p}$  – сопротивление уравнительного реактора;  $m$  – число фаз выпрямления;  $R_1 = \Delta P_k / m I_1^2 k_{\text{тp}}^2$  – активное сопротивление обмотки трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока;  $x_t = u_{k\%} U_{1\phi} / 100 I_1 k_{\text{тp}}^2$  – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока;  $U_{1\phi}$ ,  $I_1$ ,  $k_{\text{тp}}$ ,  $u_{k\%}$ ,  $\Delta P_k$  – соответственно первичное фазовое напряжение и ток, коэффициент трансформации, напряжение КЗ и мощность потерь КЗ.

Характеристики ДПТ НВ при питании от нереверсивного вентильного УП показаны на рис. 50.18, в. Особенностью характеристик является наличие криволинейных участков, соответствующих режиму прерывистых токов УП.

Область прерывистых токов на рис. 50.18, в выделена пунктирной кривой, уравнение которой приведено в [50.2], где также подробно рассмотрены характеристики при использова-

нии реверсивных вентильных преобразователей при различных способах управления и особенности работы системы вентильный УП – ДПТ НВ. Данные серийных тиристорных УП постоянного тока приведены в разд. 32.

**Регулирование координат при питании якоря двигателя УП со свойствами источника тока.** Схема ЭП приведена на рис. 50.19, а, где  $IT$  – источник тока, обеспечивающий неизменный ток в цепи якоря  $I = const$ . Механические характеристики двигателя, выраженные которых имеет вид  $M = k\Phi I = k_1\Phi$ , изображены на рис. 50.19, б. Разомкнутая система  $IT$  – ДПТ НВ в соответствии с изображенными характеристиками обладает свойствами регулируемого по цепи возбуждения источника момента. Регулирование скорости в этой системе обеспечивается при введении обратных связей [50.8].

Помимо рассмотренных способов для регулирования координат используются импульсные способы, а также регулирование с помощью специальных схем включения ДПТ НВ, например схемы с шунтированием якоря. Все эти способы подробно рассмотрены в [50.2].

Замкнутые системы регулируемого ЭП рассмотрены в [50.3, 50.6, 50.5] и в разд. 51 настоящего справочника.

**Электромеханические переходные процессы в ЭП с ДПТ НВ. Формирование динамических характеристик.** Электромеханические переходные процессы обуславливаются механической и электромагнитной инерцией элементов привода. Электромагнитной инерцией обладают обмотки якоря и возбуждения ДПТ НВ, а также УП в системе УП – ДПТ НВ.

Электромеханические переходные процессы, связанные с управлением ДПТ НВ по его якорной цепи или с изменением момента сопротивления  $M_c$  на его валу при абсолютно жестких элементах механической части и  $\Phi = \Phi_{\text{ном}} = const$ , описываются следующей системой уравнений:

$$u = k\Phi_{\text{ном}}\omega + iR_{\text{я}} + L_{\text{я}} di/dt;$$

$$M - M_c = J d\omega/dt;$$

$$M = k\Phi_{\text{ном}}i,$$

где  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи, Гн.

Получаемое из этой системы исходное дифференциальное уравнение для скорости имеет вид

$$T_{\text{я}} T_{\text{м}} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_{\text{м}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{k\Phi_{\text{ном}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{ном}})^2} M_c - \frac{L_{\text{я}}}{(k\Phi_{\text{ном}})^2} \frac{dM_c}{dt},$$

где  $T_M = J\omega_0/M_k = JR_{я}/(k\Phi_{ном})^2$  – электро-механическая постоянная времени ЭП, с;  $T_я = L_{я}/R_{я}$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;  $L_{я}$  – индуктивность рассеяния якорной цепи, Гн, значение которой может быть определено по приближенной формуле Уманского – Лиивилля:

$$L_{я} = \gamma U_{ном}/p\omega_{ном}I_{ном},$$

где  $\gamma = 0,6$  для некомпенсированных и  $\gamma = 0,25$  для компенсированных ДПТ НВ.

При  $T_M > 4T_я$  решение дифференциального уравнения имеет вид

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_c R_{я}}{(k\Phi_{ном})^2} + C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t},$$

где  $C_1, C_2$  – константы;

$$\alpha_{1,2} = (1 \pm \sqrt{1 - 4T_я/T_M})/2T_я.$$

При  $T_M < 4T_я$

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_c R_{я}}{(k\Phi_{ном})^2} + e^{-\alpha t} (C_3 \cos \Omega t + C_4 \sin \Omega t),$$

где  $C_3, C_4$  – константы;  $\alpha = 1/(2T_я)$ ;

$$\Omega = (\sqrt{4T_я/T_M - 1})/2T_я.$$

Для определения констант  $C_1 - C_4$  используются начальные значения координат  $\omega_{нач}$  и  $(d\omega/dt)_{нач}$  в момент времени  $t = 0$ . Зависимость  $M(t)$  целесообразно получать подстановкой в уравнение  $M = M_c + J d\omega/dt$  найденной зависимости  $\omega(t)$ .

При применении инерционного УП, питающего якорь ДПТ НВ, к записанной выше системе уравнений добавляются уравнения УП. В частности, при представлении УП инер-

ционным звеном они имеют вид

$$k_n u_y = e_n + T_n de_n/dt;$$

$$u = e_n - iR_n,$$

где  $e_n, k_n, R_n, T_n$  – соответственно ЭДС, коэффициент усиления, внутреннее сопротивление и постоянная времени УП;  $u_y$  – управляющее напряжение на входе УП.

В результате порядок исходного дифференциального уравнения для скорости повышается до третьего и исследование динамики целесообразно уже вести с помощью известного из теории автоматического регулирования [50.5] генераторного метода на базе структурной схемы, изображенной на рис. 50.20, а, где обозначено:  $c = k\Phi_{ном}$ ;  $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_p + R_n$ ;  $L_{я\Sigma} = L_{я} + L_p$ ;  $T_я = L_{я\Sigma}/R_{я\Sigma}$ ;  $T_M = JR_{я\Sigma}/(k\Phi_{ном})^2$ .

Подробно переходные процессы в системе УП – ДПТ НВ, в том числе с тиристорным и электромашинным УП, рассматриваются в [50.2, 50.3, 50.6].

При управлении ДПТ НВ по цепи возбуждения к исходной системе уравнений добавляется дифференциальное уравнение цепи возбуждения

$$u_b = i_b R_b + w_b d\Phi/dt$$

и уравнение кривой намагничивания  $\Phi(I_b)$ , где  $w_b$  – число витков обмотки возбуждения.

Структурная схема объекта регулирования изображена на рис. 50.20, б, где  $T_b$  – постоянная времени обмотки возбуждения, определяемая с помощью кривой намагничивания (рис. 50.21) по формуле

$$T_b = \frac{2pw_b\sigma}{R_b} \frac{\Phi_{ном}}{i_{b,ном}} (1 - \mu),$$

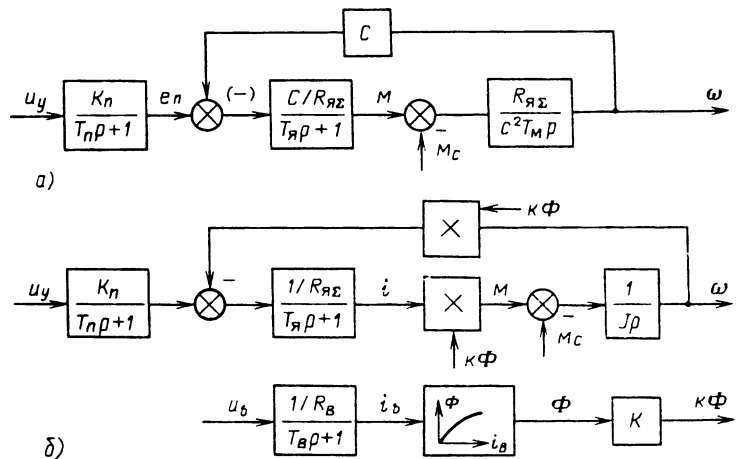


Рис. 50.20. Структурные схемы ЭП при: а – постоянном, б – переменном магнитном токе двигателя

где  $\sigma$  — коэффициент рассеяния, который обычно принимается равным 1,18;  $\mu = b(a + b)$  — коэффициент насыщения, определяемый из кривой намагничивания.

В общем случае получается система нелинейных уравнений из-за нелинейности кривой намагничивания и наличия в уравнениях произведений переменных, которую целесообразно решать с помощью графоаналитических и численных методов или ЭВМ. Подробно переходные процессы этого вида рассмотрены в [50.2, 50.3].

**Формирование (коррекция) переходных процессов в ЭП.** К регулированию координат ЭП в переходном процессе обычно предъявляется ряд требований по длительности переходных процессов, переуправлению координат, колебательности процесса, обеспечению заданных графиков скорости, ускорения, рывка и т. д. Наилучшим образом эти требования выполняются в системе УП—Д, в которой для этой цели могут быть использованы следующие способы:

1) включение в систему корректирующих звеньев и обратных связей, которые обеспечивают введение сигналов по производным и интегралам переменных, воздействий в функции внешних возмущений и их производных и т. д.

Эффективным аппаратом при этом являются частотные методы анализа и синтеза динамических систем, подробно рассмотренные в [50.3, 50.5, 50.6];

2) построение системы по структуре последовательной коррекции с подчиненным регулированием, в которой достигается оптимизация переходных процессов в ЭП.

Подробно этот способ рассматривается в [50.3];

3) формирование переходных процессов путем задания закона изменения напряжения на якоре двигателя с помощью задатчика интенсивности [50.3].

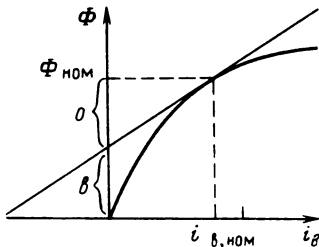


Рис. 50.21. К расчету постоянной времени обмотки возбуждения двигателя по кривой намагничивания

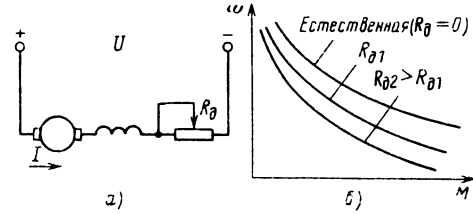


Рис. 50.22. Схема включения (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ

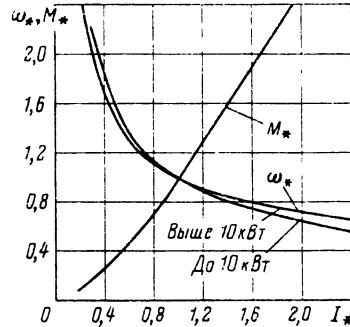


Рис. 50.23. Универсальные характеристики ДПТ ПВ

**Электропривод с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ)**

Основная схема включения ДПТ ПВ приведена на рис. 50.22, а; механические характеристики выражаются уравнениями

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{(R_a + R_b + R_d)}{k\Phi(I)} I;$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{R_a + R_b + R_d}{k^2\Phi^2(I)} M.$$

Механические характеристики двигателя изображены на рис. 50.22, б. Построение естественных характеристик  $\omega(I)$  и  $\omega(M)$  производится с помощью универсальных характеристик рис. 50.23, где  $\omega_* = \omega/\omega_{ном}$ ,  $M_* = M/M_{ном}$ ,  $I_* = I/I_{ном}$ . В основной схеме включения возможны режимы двигательный, короткого замыкания, генераторный последовательно с сетью (режим торможения противовключением).

Схемы динамического торможения с независимым возбуждением (см. рис. 50.13, а) и самовозбуждением (рис. 50.24, а) позволяют получить механические характеристики, изображенные на рис. 50.13, б и 50.24, б. Энерге-



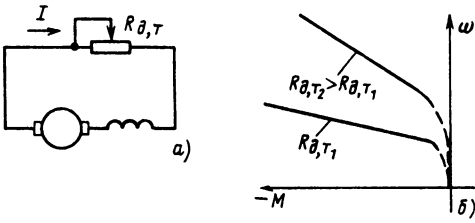


Рис. 50.24. Схема включения (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ при динамическом торможении с самовозбуждением

нительно редко, вопросы их анализа и синтеза рассмотрены в [50.9].

Электромеханические переходные процессы в электроприводе с ДПТ ПВ в общем случае описываются нелинейными дифференциальными и алгебраическими уравнениями, и всегда требуется учет нелинейной кривой намагничивания  $\Phi(I)$ . Поэтому для их расчета используются численные или графоаналитические методы с применением ЭВМ. Примеры расчетов переходных процессов с ДПТ ПВ содержатся в [50.4].

**Электропривод с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения (ДПТ СВ)**

Приводы этого вида применяются сравнительно редко, характеристики, свойства и способы регулирования ДПТ СВ рассмотрены в [50.2–50.4].

**Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем (АД) и другими двигателями переменного тока**

Основная схема включения АД с фазным ротором приведена на рис. 50.28, а; механическая характеристика выражается уравнением

$$M = \frac{2M_{max}(1 + as_k)}{s/s_k + s_k/s + 2as_k}$$

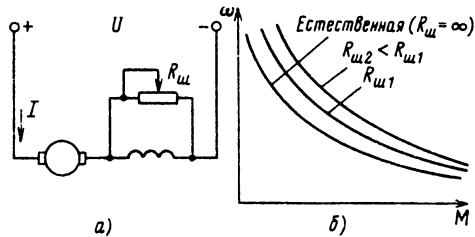


Рис. 50.25. Схема (а) и механические характеристики (б) ДПТ ПВ при уменьшении магнитного потока

тический режим работы ДПТ ПВ в этих схемах – генераторный независимо от сети.

Основные параметрические способы регулирования связаны с изменением  $R_d$ ,  $\Phi$  и  $U$ , а также с использованием схемы с шунтированием якоря.

Искусственные реостатные характеристики при  $R_d = var$  приведены на рис. 50.22, б. Порядок расчета характеристик и резисторов, а также построения пусковой диаграммы подробно рассмотрен в [50.4].

Изменение магнитного потока  $\Phi$  осуществляется с помощью схемы рис. 50.25, а; получаемые искусственные механические характеристики показаны на рис. 50.25, б, а их расчет приведен в [50.4].

Изменение напряжения осуществляется в схеме УП – ДПТ ПВ (рис. 50.26, а); получаемые механические характеристики приведены на рис. 50.26, б. Система УП – ДПТ ПВ применяется относительно редко, подробно ее статические и динамические характеристики рассмотрены в [50.9].

Схема с шунтированием якоря изображена на рис. 50.27, а, а соответствующие ей механические характеристики показаны на рис. 50.27, б. Расчет характеристик приведен в [50.4].

Замкнутые системы УП – ДПТ ПВ для регулирования координат используются отно-

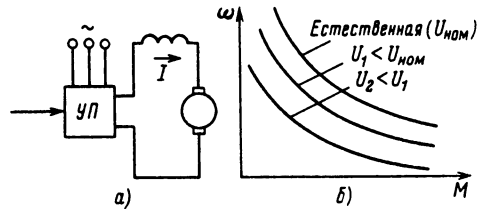


Рис. 50.26. Схема ЭП (а) и механические характеристики (б) при регулировании напряжения

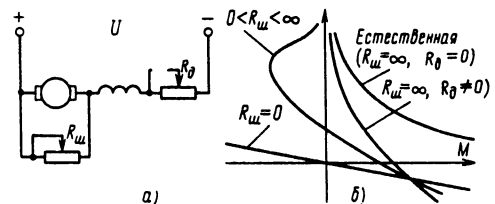


Рис. 50.27. Схема (а) и механические характеристики (б) при шунтировании якоря ДПТ ПВ

где

$$M_{max} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})}$$

– максимальный (критический) момент;

$$s_k = \pm \frac{R'_2 + R'_{2\lambda}}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}$$

– критическое скольжение [при этом в формулах для  $M_{max}$  и  $s_k$  знак «+» соответствует двигательному режиму ( $M_{maxД}$ ,  $s_{кД}$ ), знак «-» – генераторному ( $M_{maxГ}$ ,  $s_{кГ}$ )];  $x_k = x_1 + x'_2$  – индуктивное сопротивление КЗ;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R'_{2\lambda}$  – активные сопротивления статора, ротора и добавочное; штрихом обозначены приведенные значения роторных сопротивлений;  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$  – скорость идеального холостого хода (угловая скорость магнитного поля);  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  – скольжение АД;  $a = R_1/R'_2$  – расчетный коэффициент.

При  $R_1 \approx 0$  ( $a \approx 0$ )

$$M = \frac{2M_{max}}{s/s_k + s_k/s}$$

Естественная механическая характеристика АД приведена на рис. 50.28, б. При малых  $s$  механическая характеристика приближенно выражается уравнением прямой линии:

$$M \approx 2M_{max}s/s_k$$

При  $-\infty < s < 0$  ( $\omega > \omega_0$ ) АД работает генератором параллельно с сетью (рекуперативное торможение), при  $s = 0$  ( $\omega = \omega_0$ ) имеет место режим идеального ХХ, при  $0 < s < 1$  ( $0 < \omega < \omega_0$ ) – двигательный режим работы, при  $s = 1$  ( $\omega = 0$ ) – режим КЗ, при  $s > 1$  ( $\omega < 0$ ) АД работает генератором последовательно с сетью (торможение противовключением).

Схема динамического торможения АД приведена на рис. 50.29, а, механические характеристики АД при различных  $R_{2\lambda}$  и  $I_n$  показаны на рис. 50.29, б. Для ненасыщенной магнитной цепи

$$M = \frac{2M_{max}}{s/s_{к,Т} + s_{к,Т}/s}$$

где  $M_{max} = \frac{3(k_{сх}I_n x_\mu)^2}{2\omega_0(x'_2 + x_\mu)}$  – максимальный мо-

мент;  $s_{к,Т} = \frac{R'_2 + R'_{2\lambda}}{x'_2 + x_\mu}$  – критическое скольжение в режиме динамического торможения;  $s = \omega/\omega_0$  – текущее скольжение в режиме динамического торможения;  $x_\mu$  – реактивное сопротивление цепи намагничивания;  $I_n$  – подаваемый в статор постоянный ток;  $k_{сх}$  –

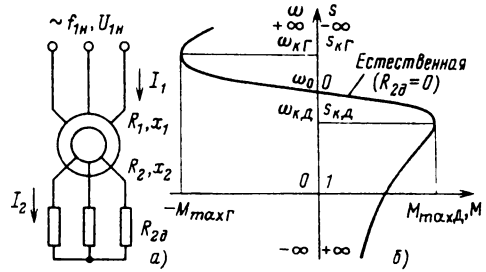


Рис. 50.28. Схема включения (а) и естественная механическая характеристика (б) АД

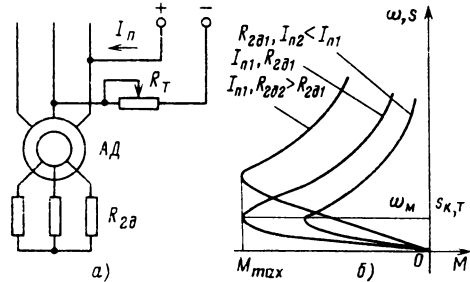


Рис. 50.29. Схема включения (а) и характеристики (б) АД при динамическом торможении

коэффициент, зависящий от схемы соединения обмотки статора.

Режим работы АД в этой схеме – генераторный независимо от сети переменного тока.

Подробно расчет характеристик и параметров цепей АД в режиме динамического торможения рассмотрен в [50.2].

Данные по АД содержатся в разд. 25 и в [50.4]

**Основные параметрические способы регулирования координат.** К числу наиболее распространенных относятся способы регулирования изменением добавочного активного сопротивления в цепи ротора  $R_{2\lambda}$ , частоты и напряжения, подводимого к цепи статора, а также числа пар полюсов магнитного поля АД. Помимо этого используются каскадные схемы включения АД, позволяющие полезно использовать выделяющиеся в цепи статора при регулировании скорости потери энергии, а также схемы с включением в цепь статора добавочных активных и реактивных сопротивлений. К числу специальных относятся способы импульсного регулирования [50.2–50.4].

Механические характеристики при  $R_{2\lambda} = \text{var}$  приведены на рис. 50.30. Сопротивление

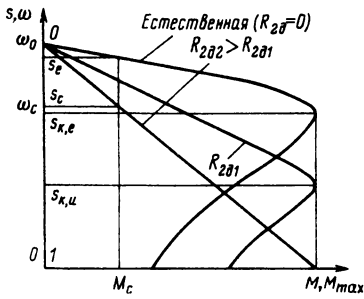


Рис. 50.30. Искусственные реактивные механические характеристики АД

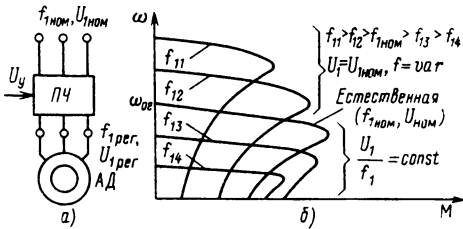


Рис. 50.31. Схема включения (а) и механические характеристики (б) АД при питании от ПЧ

резистора  $R_{2,12}$ , обеспечивающее прохождение характеристики через точку с координатами  $[\omega_c = \omega_0(1 - s_c), M_c]$ , определяют по формуле

$$R_{2,12} = (s_c/s_c - 1) R_2 = (s_{к,и}/s_{к,е} - 1) R_2,$$

где  $s_c$ ,  $s_e$ ,  $s_{к,и}$ ,  $s_{к,е}$  определяются из рис. 50.30:  $s_c$  — скольжение, соответствующее  $M_c$  на искусственной характеристике;  $s_e$  — то же, но на естественной характеристике;  $s_{к,е}$ ,  $s_{к,и}$  — критические скольжения естественной и искусственной характеристик.

Активное сопротивление фазы обмотки  $R_2$  берется из паспортных данных или определяется по приближенной формуле:

$$R_2 \approx E_{2к} s_{ном} / \sqrt{3} I_{2ном}.$$

Упрощенная пусковая диаграмма АД может быть построена и рассчитана по аналогии с ДПТ НВ. Другие, более точные способы ее построения и расчета рассмотрены в [50.4].

Регулирование изменением частоты питающего АД напряжения (частотное регулирование) предусматривает, как правило, одновременное изменение и этого напряжения.

Частотное регулирование осуществляется по структурной схеме рис. 50.31, а, где ПЧ — электромашинный или вентильный преобразователь частоты,  $f_{1пер}$ ,  $U_{1пер}$  — регулируемые

частота и напряжение,  $U_y$  — управляющий (задающий) сигнал. Соотношение между частотой и напряжением определяется видом механической характеристики исполнительного органа и подробно проанализировано в [50.2, 50.3]. При  $M_c = const$  это соотношение имеет вид  $U_{1пер}/f_{1пер} = const$ . Механические характеристики при частотном регулировании представлены на рис. 50.31, б. При частотах ниже номинальной, где может соблюдаться соотношение  $U_1/f_1 = const$ , критический момент  $M_k$  сохраняется примерно неизменным, за исключением области низких частот, где он несколько снижается. В области частот выше номинальных, где  $U_{1пер} = U_{1ном} = const$ , критический момент снижается с увеличением частоты.

Для формирования статических и динамических характеристик асинхронного ЭП с заданным высоким качеством также используется так называемое частотно-токовое управление, при котором в качестве управляющего воздействия принимается не напряжение, а ток обмотки статора. Контроль заданного значения тока осуществляется с помощью контура подчиненного регулирования тока.

Система ЭП, реализующая рассмотренный принцип, показана на рис. 50.32, а. Она содержит управляемый выпрямитель УВ с системой управления СУВ, автономный инвертор тока АИТ с системой управления СУИ, асинхронный двигатель АД, регулятор тока РТ, датчик тока статора ДТ, датчик скорости ДС, усилитель-ограничитель УО, функциональный

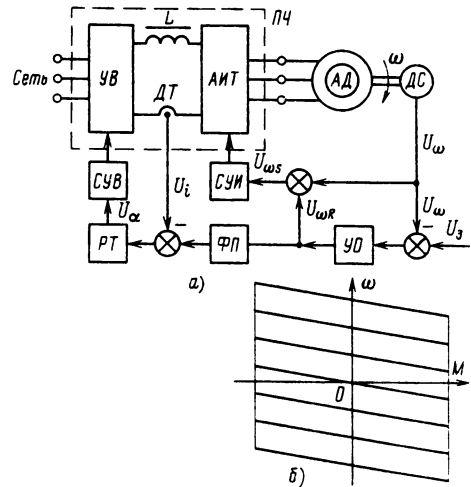


Рис. 50.32. Схема (а) и механические характеристики (б) при частотно-токовом управлении АД

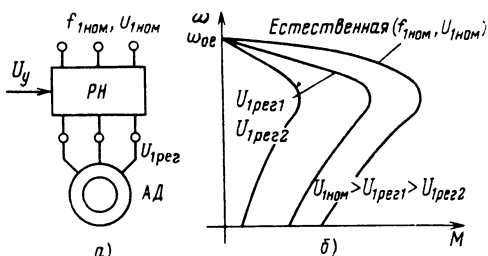


Рис. 50.33. Схема (а) и механические характеристики (б) АД при регулировании напряжения

преобразователь ФП. Задающий сигнал  $U_3$  определяет частоту переключения тиристорov АИТ, а следовательно, и частоту тока статора (характеристика задающего генератора предполагается линейной). После вычитания из задающего сигнала напряжения  $U_\omega$ , пропорционального скорости ротора, образуется сигнал  $U_{\omega R}$ , пропорциональной частоте скольжения ротора. Этот сигнал через функциональный преобразователь, реализующий один из законов связи между частотой скольжения и током статора, используется в качестве сигнала задания в контуре регулирования тока. Частота на выходе АИТ определяется напряжением  $U_{\omega S} = U_\omega + U_{\omega R}$ . Система настроена таким образом, что пока УО работает в линейной зоне, частота на выходе АИТ постоянная и не зависит от нагрузки ( $U_{\omega S} = U_3$ ). При достижении моментом нагрузки максимального значения ( $U_{\omega R} = U_{\omega R \max}$ ) УО входит в ограничение и АД работает с постоянной частотой скольжения, постоянным током и, следовательно, развивает постоянный момент. При переходе АД в генераторный режим АИТ переходит в режим выпрямителя, а УВ — в режим ведомого сетью инвертора, что обеспечивает генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть. На рис. 50.32, б показан примерный вид механических характеристик в рассмотренной системе.

Данные по серийным тиристорным ПЧ помещены в разд. 32. Более подробно статика и динамика частотно-регулируемого асинхронного ЭП рассмотрены в [50.2, 50.3, 50.11].

Регулирование скорости изменением напряжения осуществляется по принципиальной схеме рис. 50.33, а, где РН — регулятор напряжения. Получаемые механические характеристики (рис. 50.33, б) могут быть использованы для регулирования момента, а для регулирования скорости они мало пригодны. Регулирование скорости в системе РН — АД осу-

ществляется обычно в замкнутой системе с использованием обратной связи по скорости и асинхронного двигателя с фазным ротором. Подробно такие системы рассмотрены в [50.2, 50.3]. Данные по серийным тиристорным РН содержатся в разд. 32.

Регулирование координат (скорости) изменением числа пар полюсов магнитного поля АД предполагает использование короткозамкнутого АД с одной или двумя обмотками статора, каждая фаза которой состоит из двух одинаковых частей (полуобмоток). Такие АД, называемые обычно многоскоростными, при соединении полуобмоток статора треугольник — двойная звезда (рис. 50.34, а) или звезда — двойная звезда (рис. 50.35, а) имеют механические характеристики, изображенные соответственно на рис. 50.34, б и 50.35, б.

Остальные возможные способы регулирования координат (импульсные, в каскадных схемах включения, с помощью активных и индуктивных резисторов) подробно рассмотрены в [50.2, 50.3].

Регулирование координат в замкнутых системах производится по структурным схемам рис. 50.9–50.11 и подробно рассмотрено в [50.2, 50.3, 50.6, 50.5] и в разд. 51.

Электрохимические переходные процессы в ЭП с АД. Специфической особенностью динамики асинхронного ЭП является протекания

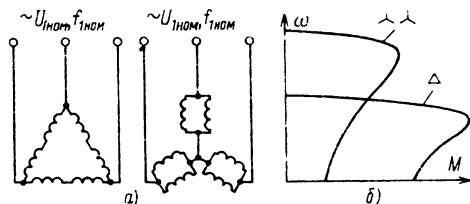


Рис. 50.34. Схемы (а) и механические характеристики (б) двухскоростного АД при соединении обмотки статора по схемам треугольник — двойная звезда

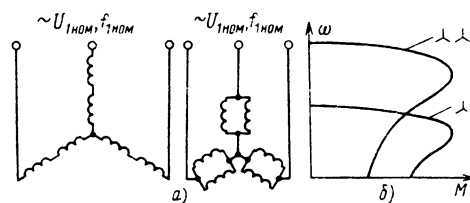


Рис. 50.35. Схемы (а) и механические характеристики (б) двухскоростного АД при соединении обмотки статора по схемам звезда — двойная звезда

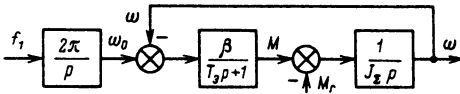


Рис. 50.36. Структурная схема АД при работе на линейном участке механической характеристики

ние сложных электромагнитных процессов в АД при его управлении, следствием которых является возникновение значительных колебаний электромагнитного момента АД [50.2, 50.3, 50.13]. В результате электромеханические переходные процессы в общем случае описываются сложной системой дифференциальных нелинейных уравнений, решение которых может быть выполнено лишь с помощью ЭВМ.

В случае работы АД на линейном участке характеристики при  $s < s_k$  электромеханические переходные процессы с достаточной степенью точности описываются системой уравнений

$$M + T_3 dM/dt = \beta (\omega_0 - \omega);$$

$$M - M_c = J_\Sigma d\omega/dt,$$

где  $T_3 = 1/\omega_0 p s_k$  — электромагнитная постоянная времени двигателя;  $\beta$  — жесткость характеристики.

Структурная схема ЭП, соответствующая этой системе уравнений, изображена на рис. 50.36.

Формирование переходных процессов в асинхронном ЭП может быть осуществлено по принципам, указанным для ДПТ НВ. Специфическая особенность формирования динамики применительно к асинхронному ЭП состоит в использовании тиристорных пускорегулирующих устройств (см. § 50.5), позволяющих снизить в переходных процессах колебания электромагнитного момента.

Характеристики и свойства ЭП с синхронным двигателем рассмотрены в [50.2, 50.3, 50.4, 50.14], с линейными двигателями — в [50.15, 50.16], с вентильным двигателем — в [50.17], с шаговыми двигателями — в [50.14].

### Энергетика электроприводов

**Определение потерь энергии и мощности в установившемся режиме.** Потери мощности в двигателе

$$\Delta P = k + v,$$

где  $k$  — постоянные потери, к которым относятся потери в стали, механические, вентиляционные, а также в большинстве случаев

и потери на возбуждение;  $v$  — переменные потери, которые определяются потерями в обмотках двигателей при протекании по ним изменяющегося в общем случае тока нагрузки.

Потери мощности в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}},$$

где  $P_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{\text{ном}}$  — номинальные мощность и КПД.

Номинальные переменные потери мощности  $U_{\text{ном}}$  для ДПТ НВ определяются как  $I_{\text{ном}}^2 R_{\text{я}}$ , для ДПТ ПВ — как  $I_{\text{ном}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})$ , для АД — как  $3I_{\text{ном}}^2 (R_1 + R_2) = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} (1 + R_1/R_2)$ .

Постоянные потери мощности

$$k = \Delta P_{\text{ном}} - v_{\text{ном}}.$$

Потери мощности при  $\beta$ -кратной постоянной нагрузке

$$\Delta P = k + v_{\text{ном}} \beta^2,$$

где  $\beta = I/I_{\text{ном}}$ .

Потери мощности при переменной нагрузке

$$\Delta P = k + v_{\text{ном}} \beta_{\text{эв}}^2,$$

где  $\beta_{\text{эв}} = I_{\text{эв}}/I_{\text{ном}}$ ;  $I_{\text{эв}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} I^2(t) dt}{t_{\text{ц}}}}$ ;  $t_{\text{ц}}$  — время цикла.

Потери мощности при регулировании скорости ДПТ НВ [50.33] с помощью резистора в цепи якоря

$$\Delta P_p = k_b + (k - k_b) \left( \frac{1 - s_p}{1 - s_{\text{ном}}} \right)^2 + U_{\text{ном}} \frac{s_p}{s_{\text{ном}}} M_{\text{с*}},$$

где  $k_b$  — потери в обмотке возбуждения;  $s_p = (\omega_0 - \omega_p)/\omega_0$ ;  $s_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}})/\omega_0$  — относительные перепады скорости двигателя на искусственной (регулируемой) и естественной характеристиках при моменте нагрузки  $M_c$ ;  $M_{\text{с*}}$  — относительный момент нагрузки.

Потери мощности при регулировании скорости ДПТ НВ изменением магнитного потока

$$\Delta P_p \approx k + v_{\text{ном}} \beta^2.$$

Потери мощности при регулировании скорости ДПТ НВ изменением напряжения на якоре

$$\Delta P_p = k_b + (k - k_b) \left( \frac{1 - s_p}{1 - s_{\text{ном}}} \right)^2 + M_{\text{с*}}^2 U_{\text{ном}}.$$



Потери мощности при регулировании скорости АД

$$\Delta P_p = k + v_{2ном} \left( \frac{R_1}{R_2'} M_{c*} + \frac{s_p}{s_{ном}} \right) M_{c*}.$$

Подробнее определение потерь мощности в регулируемом ЭП рассмотрено в [50.2].

Потери энергии за цикл работы

$$\Delta A_{ц} = \sum_1^m \Delta P_i t_i,$$

где  $\Delta P_i$  – потери мощности на  $i$ -м участке цикла;  $t_i$  – продолжительность  $i$ -го участка цикла

Мощность, потребляемая из сети при нагрузке,

$$P_{злi} = P_i / \eta(P_i),$$

где  $\eta(P_i)$  – КПД двигателя при мощности  $P_i$ ; эта зависимость для АД серии 4А приведена на рис. 50.48.

Расход энергии из сети за цикл работы

$$A_{ц} = \sum_1^m P_{злi} t_i.$$

Средневзвешенный КПД за цикл работы с переменной нагрузкой

$$\eta_{ц} = \frac{\sum_1^m P_i t_i}{\sum_1^m P_{злi} t_i} = \frac{\sum_1^m P_i t_i}{\sum_1^m (P_i + \Delta P_i) t_i}.$$

КПД регулируемого цикла  $\eta_{р,ц}$  для одинаковой разницы скоростей на любой паре двух соседних характеристик, одинакового времени работы на каждой характеристике и большого их числа определяется как

$$\eta_{р,ц} = \eta_{ном} (D + 1) / 2D,$$

где  $D$  – диапазон регулирования скорости.

Коэффициент мощности АД

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_p^2}},$$

где  $P_a, P_p$  – соответственно активная и реактивная мощности АД.

Изменение  $\cos \varphi$  в зависимости от загрузки АД серии 4А показано на рис. 50.49.

Полная реактивная мощность, потребляемая АД,

$$P_p \approx \frac{3U^2}{x_{\mu}} + 3(I_1^2 x_1 + I_2^2 x_2).$$

где  $x_{\mu}$  – реактивное сопротивление намагничивания.

Средневзвешенный  $\cos \varphi_{ц}$  за цикл работы

$$\cos \varphi_{ц} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_{ц}}},$$

где  $\text{tg} \varphi_{ц} = A_{р,ц} / A_{а,ц}$ ;  $A_{р,ц}$  и  $A_{а,ц}$  – соответственно полный расход реактивной и активной энергии за цикл.

Коэффициент мощности  $\chi$  системы УП – ДПТ

$$\chi = v \cos \varphi_1,$$

где  $v = I_1^{(1)} / I_1$  – коэффициент искажения;  $I_1^{(1)}$ ,  $I_1$  – действующее значение соответственно 1-й гармоники и всего потребляемого из сети тока;  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности относительно 1-й гармоники тока (коэффициент сдвига).

Коэффициент мощности  $\chi_p$  при регулировании скорости в системе УП – Д при характерном соотношении  $\cos \varphi_1 \approx \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол управления вентилями, определяется как

$$\chi_p = v \omega_{0p} / \omega_0,$$

где  $\omega_{0p}$ ,  $\omega_0$  – скорости идеального ХХ ДПТ при данном и нулевом углах регулирования.

При регулировании скорости вниз от номинальной при  $M_c = \text{const}$  и равной доле работы на каждой скорости за время цикла  $t_{ц}$  изменение средневзвешенного  $\chi_{ц}$  в зависимости от диапазона  $D$  характеризуется следующими данными:

$D$	...	1	2	4	10
$\chi_{ц}$	...	1	0,78	0,65	0,6

**Определение потерь энергии в переходных режимах.** Переменные потери энергии в якоре ДПТ или роторе АД при работе холостую ( $M_c = 0$ )

$$\Delta A_{20} = \frac{J \omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2),$$

где  $s_{нач}$ ,  $s_{кон}$  – начальное и конечное скольжения АД или начальный и конечный относительные перепады скорости ДПТ.

Переменные потери энергии в статоре АД

$$\Delta A_{10} = \frac{J \omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) \frac{R_1}{R_2'} = \Delta A_{20} \frac{R_1}{R_2'}$$

или

$$\Delta A_{10} = \int_0^{t_{н,п}} 3I_1^2(t) R_1 dt.$$

Суммарные потери в статоре и роторе  $\Delta A_{\Sigma 0} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20}$ .

Потери в якоре ДПТ и роторе АД:

при пуске и динамическом торможении вхолостую ( $s_{\text{нач}} = 1, s_{\text{кон}} = 0$ )

$$\Delta A_{20}^{\text{II}} = \Delta A_{20}^{\text{III T}} = J\omega_0^2/2;$$

при торможении противовключением ( $s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 1$ )

$$\Delta A_{20}^{\text{I n}} = 3J\omega_0^2/2;$$

при реверсе ( $s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 0$ )

$$\Delta A_{20}^{\text{P}} = 4J\omega_0^2/2.$$

Потери в якоре ДПТ и роторе АД при наличии на валу нагрузки ( $M_c \neq 0$ ) определяются по следующим приближенным формулам:

пуск

$$\Delta A_{2\text{II}}^{\text{II}} = \Delta A_{20} \frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} - M_c};$$

динамическое торможение

$$\Delta A_{2\text{II}}^{\text{I T}} = \Delta A_{20}^{\text{I T}} \frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} + M_c};$$

торможение противовключением

$$\Delta A_{2\text{II}}^{\text{I n}} = \Delta A_{20}^{\text{I n}} \frac{M_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}} + M_c},$$

где  $M_{\text{ср}}$  – средний момент двигателей в переходных процессах.

Потери в статоре АД находятся путем умножения потерь в роторе на отношение  $R_1/R_2$ .

Более подробно расчет потерь в переходных процессах под нагрузкой рассмотрен в [50.3].

**Способы снижения потерь энергии в переходных процессах.**

1. Снижение момента инерции ЭП достигается применением Д с уменьшенным моментом инерции, а также заменой, где это возможно, одного двигателя на два двигателя половинной мощности.

2. Изменение  $\omega_0$  в переходном процессе достигается: а) при использовании многоскоростного АД; б) в системе УП – ДПТ при использовании задатчика интенсивности движения. Например, в случае пуска Д при времени нарастания сигнала задатчика до номинального уровня  $t_{\text{II}} \gg T_{\text{M}}$  потери энергии уменьшаются в  $2T_{\text{M}}/(t_{\text{II}} + T_{\text{M}})$  раз, где  $T_{\text{M}}$  – механическая постоянная времени ЭП.

В системе Г – Д потери энергии в цепи якоря по сравнению с пуском на полное напряжение снижаются в  $T_{\text{M}}/(T_{\text{B}} + T_{\text{M}})$  раз, где

$T_{\text{B}}$  – постоянная времени цепи возбуждения генератора.

Подробнее определение потерь в системе УП – Д в переходных процессах рассмотрено в [50.3].

#### 50.4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Надежность работы ЭП и его экономичность зависят от правильного выбора мощности двигателя.

Завышение мощности двигателя по сравнению с нагрузкой приводит к излишним капитальным затратам, снижению КПД и коэффициента мощности ЭП. Превышение нагрузки на валу двигателя приводит к перегреву обмоток двигателя и преждевременному выходу его из строя.

В связи с этим одним из критериев выбора двигателя по мощности является температура его обмоток.

Второе условие выбора состоит в проверке способности двигателя работать в периоды максимальной нагрузки и при пуске его в ход.

**Нагрев и охлаждение двигателей.** При использовании простейшей одноступенчатой теории нагрева, которая рассматривает двигатель как однородное тело с одинаковой температурой во всех точках и теплоотдачей, пропорциональной перегреву  $\tau$ , нагрев и охлаждение двигателя проходит по экспоненциальному закону

$$\tau = \tau_{\text{уст}} + (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}})e^{-t/T},$$

где  $T = c/A$  – тепловая постоянная времени;  $c$ ;  $c$  – теплоемкость, Дж/°C;  $A$  – коэффициент теплоотдачи, Дж/(с·°C);  $\tau_{\text{уст}} = \Delta P/A$  – конечное (установившееся) значение превышения температуры, °C;  $\Delta P$  – мощность потерь в двигателе, Вт;  $\tau_{\text{нач}}$  – начальное значение превышения температуры, °C.

Выбор двигателя необходимо осуществлять таким образом, чтобы в процессе его эксплуатации соблюдалось условие  $\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{доп}}$ , где  $\tau_{\text{доп}}$  – допустимое превышение температуры для изоляции двигателя, которое определяется классом нагревостойкости последней:

$$\tau_{\text{доп}} = \Theta_{\text{доп}} - \Theta_0,$$

где  $\Theta_{\text{доп}}$  – предельно допустимая температура электроизоляционных материалов двигателя;  $\Theta_0$  – температура окружающей среды (обычно принимается  $\Theta_0 = 40^\circ\text{C}$ ). В случае постоянной нагрузки при ее длительности  $t_p > (3 \div 4) T$

$$\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{уст}} = \Delta P/A.$$

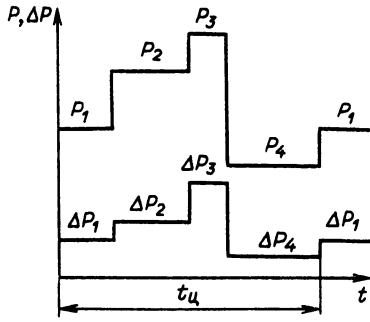


Рис. 50.37. Графики мощности и потерь мощности за цикл работы

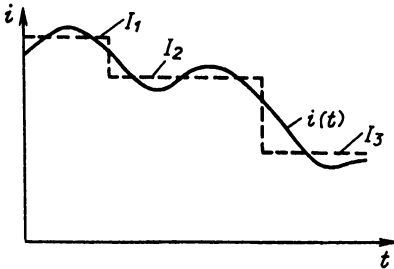


Рис. 50.38. Графики тока двигателя

Из-за сложности определения  $S$  и  $A$  и большой трудоемкости непосредственная проверка нагрева производится редко.

Чаще всего для оценки нагрева двигателя используются косвенные методы средних потерь и эквивалентных величин.

**Метод средних потерь** основан на том, что превышение температуры двигателя при неизменной теплоотдаче определяется средними потерями за цикл (рис. 50.37):

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / t_{\text{ц}}$$

где  $\Delta P_i$  — мощность потерь на  $i$ -м интервале;  $t_i$  — продолжительность  $i$ -го интервала;  $m$  — число интервалов в цикле.

Условие проверки двигателя по допустимому превышению температуры имеет вид

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}$$

где  $\Delta P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность потерь.

В случае возникновения затруднений с определением КПД в зависимости от нагрузки, а следовательно, и с определением средних потерь используют другие косвенные методы, основанные на эквивалентных по условиям

нагрева значениях тока главной цепи двигателя  $I_{\text{эк}}$ , момента  $M_{\text{эк}}$  и мощности  $P_{\text{эк}}$ .

**Метод эквивалентных величин.** Метод эквивалентного тока основан на предпосылке, что потери в электрической машине могут быть разделены на две составные части: не зависящие от нагрузки двигателя постоянные потери  $k$  и переменные потери, определяемые нагрузкой и активным сопротивлением главных цепей двигателя:

$$\Delta P_{\text{эк}} = k + RI_{\text{эк}}^2$$

Тогда, зная кривую  $i = f(t)$  (рис. 50.38),

имеем  $I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt}$  — эквивалентный среднеквадратичный ток двигателя, который для ступенчатого графика определяется выражением

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}$$

Условие проверки двигателя:  $I_{\text{эк}} \leq I_{\text{ном}}$ .

Метод эквивалентного тока применяется при наличии кривой тока  $i = f(t)$  и дает точную оценку при  $t_{\text{ц}} \ll T$ , неизменности постоянных потерь и активных сопротивлений в цепях двигателя.

**Метод эквивалентного момента** применяется для выбора двигателя, если известна нагрузочная диаграмма электропривода в виде зависимости  $M = f(t)$ . В этом случае, если  $R = \text{const}$  и  $\Phi = \text{const}$ , можно ввести понятие эквивалентного момента

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} M^2(t) dt}$$

Условие проверки двигателя:  $M_{\text{эк}} \leq M_{\text{ном}}$ , где  $M_{\text{ном}}$  — момент двигателя, соответствующий его номинальному режиму.

**Метод эквивалентной мощности** применяется для проверки двигателя, если известна нагрузочная диаграмма ЭП  $P = f(t)$ , а мощность, развиваемая двигателем, пропорциональна току. Последнее условие справедливо при  $\Phi = \text{const}$  и  $\omega = \text{const}$ , что позволяет ввести понятие эквивалентной мощности

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} P^2(t) dt}$$

Условие выбора двигателя по нагреву  $P_{\text{эк}} \leq P_{\text{ном}}$ , где  $P_{\text{ном}}$  — мощность, развиваемая двигателем в номинальном режиме.

В процессе работы ЭП может иметь место заметное ухудшение теплоотдачи, связанное со снижением скорости. В этом случае необходимо ввести коррективку в расчеты эквивалентных величин.

Подробно использование косвенных методов для оценки теплового состояния двигателей и выбор двигателей, работающих в различных режимах, рассмотрены в [50.2, 50.3, 50.6, 50.7].

## 50.5. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Проектирование ЭП в общем случае включает следующие этапы:

I. Постановка задачи, формулирование технического задания и требований к ЭП. Построение нагрузочных диаграмм и тахограмм исполнительного органа.

II. Определение мощности и предварительный выбор двигателя.

III. Построение нагрузочной диаграммы двигателя, проверка его по перегрузочной способности, условиям пуска и нагреву.

IV. Выбор способа управления двигателем и силового преобразователя.

V. Выбор системы ЭП на основании технико-экономических расчетов.

VI. Формирование статических и динамических характеристик ЭП в соответствии с требованиями техзадания, расчет и разработка схемы управления, обеспечивающей требуемые характеристики.

VII. Проверка результатов проектирования экспериментом или моделированием.

Рассмотрим кратко перечисленные выше этапы проектирования применительно к регулируемому ЭП.

I. Проектирование ЭП ведется на основании сформулированных в техническом задании исходных данных и требований к ЭП. К ним относятся:

данные по передаточному устройству (передаточное число или радиус привода, геометрические размеры элементов устройства и их масса). В самом общем случае задача проектирования ЭП может предусматривать и расчет оптимального по каким-либо критериям передаточного числа (см., например, [50.2]);

данные по циклу работы в виде нагрузочной диаграммы  $M_c(t)$  и тахограммы движения исполнительного органа  $\omega(t)$ , где  $M_c$  и  $\omega$  — приведенные к валу двигателя момент сопротивления и скорость исполнительного органа;

допустимые ускорение и замедление исполнительного органа;

диапазон, точность и плавность регулирования координат в установившемся режиме; качество регулирования координат в переходных процессах;

надежность (долговечность) систем ЭП, экономические показатели.

Обычно нагрузочная диаграмма  $M_c(t)$  и тахограмма  $\omega(t)$  рассчитываются и строятся для наиболее тяжелого или вероятного (усредненного) цикла работы исполнительного органа.

Расчетные формулы для моментов (мощности) нагрузки и тахограммы для типовых циклов наиболее распространенных рабочих машин приведены в [50.18–50.20], пример расчета и построения нагрузочной диаграммы приведен в § 50.7.

II. Выбор двигателя производится на основе нагрузочной диаграммы, с помощью которой вначале определяется среднеквадратичный (реже средний) момент нагрузки

$$M_{с\kappa} = \sqrt{\frac{\sum_1^m M_{ci}^2 t_i}{\sum_1^m t_i}},$$

где  $M_{ci}$  — момент статической нагрузки на  $i$ -м интервале цикла, общее число циклов равно  $m$ ;  $t_i$  — продолжительность  $i$ -го интервала.

Номинальный момент искомого двигателя

$$M_{ном} = k_d M_{с\kappa},$$

где  $k_d = 1,1 + 1,3$  — коэффициент, учитывающий динамические режимы двигателя.

Из тахограммы определяется основная скорость движения исполнительного органа и принимается за номинальную  $\omega_{ном}$  (подробнее о выборе основной скорости для регулируемого ЭП см. [50.2, 50.3]). Далее по  $M_{ном}$  и  $\omega_{ном}$  из каталогов выбирается двигатель, который при этом должен по своей конструкции соответствовать условиям окружающей среды и установки (монтажа) на рабочей машине, а также роду тока питающей сети.

Возможные конструктивные исполнения двигателей подробно рассмотрены в разд. 23 настоящего справочника.

Для исполнительных органов, работающих в основном в установившемся режиме и с нерегулируемой скоростью движения, выбор двигателя на этом заканчивается.

III. После предварительного выбора двигателя производится построение нагрузочной

диаграммы двигателя  $M(t)$  по уравнению

$$M = M_c \pm Jd\omega/dt,$$

где знак «+» относится к участкам разгона, а знак «-» — к участкам торможения двигателя;  $d\omega/dt$  — заданные ускорения или замедления привода. Пример расчета и построения нагрузочной диаграммы двигателя приведен в § 50.7.

Проверка перегрузочной способности двигателя сводится к проверке выполнения условия

$$M_{max} \leq M_{доп},$$

где  $M_{max}$  — максимальный момент двигателя по нагрузочной диаграмме;  $M_{доп}$  — допустимый по перегрузке момент двигателя.

Ниже приведены ориентировочные значения  $M_{доп}$  по отношению к номинальному моменту  $M_{ном}$  двигателей разных типов:

Тип двигателя	$M_{доп}/M_{ном}$
АД с фазным ротором . . . . .	2—2,5
АД обычные с короткозамкнутым ротором . . . . .	1,8—2
АД с повышенным скольжением и короткозамкнутым ротором . . . . .	2—3
Синхронные двигатели нормального исполнения . . . . .	2—2,5
ДПТ НВ обычные . . . . .	2—2,5

Проверка по условиям пуска производится дополнительно для АД с короткозамкнутым ротором, для нормального пуска должно выполняться неравенство  $M_{cmax} < M_n$ , где  $M_n$  — пусковой момент АД;  $M_{cmax}$  — макси-

Таблица 50.2

Тип двигателя	Способ регулирования	Направление регулирования от естественной характеристики	Средний диапазон регулирования скорости	Примерные области применения	Техническая реализация способа
ДПТ НВ	Изменением сопротивления в цепи якоря Изменением магнитного потока	Вниз	2	Механизмы кранов	Реостат в цепи якоря
		Вверх	4	Металлорежущие станки	Реостат в цепи возбуждения или регулируемый источник тока возбуждения
	Изменением напряжения	Вниз	100 и более	Металлорежущие станки, лифты, прокатные станы и другие механизмы, требующие больших диапазонов регулирования, плавности, точности и работающих значительное время в переходных процессах	Управляемый преобразователь напряжения
ДПТ ПВ	Изменением сопротивления Изменением магнитного потока	Вниз	3	Крановые механизмы, электрическая тяга То же	Реостат в цепи якоря Шунтирование обмотки возбуждения
		Вверх	3		
АД с короткозамкнутым ротором	Изменением частоты	Вверх и вниз	50 и более	Текстильные машины, рольганги, высокоскоростные механизмы, центрифуги	Преобразователь частоты
	Переключением числа пар полюсов	Вверх и вниз	4	Металлорежущие станки, прессы, лифты	Многоскоростной АД
АД с фазным ротором	Изменением сопротивления Изменением напряжения Введением и изменением дополнительной ЭДС в цепи ротора	Вниз	2	Механизмы кранов	Реостат в цепи ротора
		Вниз	3	Транспортеры, механизмы кранов	Регулятор напряжения статора
		Вниз	2	Турбомеханизмы большой мощности	Каскадные схемы

мально возможный момент сопротивления при пуске.

Проверка предварительно выбранных двигателей по нагреву рассмотрена в § 50.4.

IV. Ориентировочный выбор способа управления двигателем для регулируемого по скорости ЭП может быть произведен с помощью данных табл. 50.2.

Расчет регулировочных резисторов рассмотрен в § 50.3 и более подробно — в [50.2—50.4]. Выбор УП осуществляется по номинальному току и напряжению двигателя с учетом возможных перегрузок и цикла работы привода, по требуемому диапазону регулирования напряжения или частоты, а также с учетом характера движения привода (реверсивного или нереверсивного). Данные по силовым УП постоянного и переменного тока содержатся в разд. 32.

V. Окончательный выбор системы ЭП производится на основе технико-экономических расчетов. Подробно эти вопросы освещены в [50.21—50.23].

VI. Формирование требуемых статических и динамических характеристик и расчет элементов системы автоматизированного ЭП рассматриваются в разд. 51.

VII. Заключительный этап проектирования ЭП обычно предусматривает проверку результатов проектирования экспериментально либо методами физического или математического моделирования.

### 50.6. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДА (СИЛОВАЯ ЧАСТЬ). ОБОБЩЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Силовую часть ЭП образуют электродвигательное, преобразовательное и передаточное устройства.

#### Электродвигательное устройство

Обычно в качестве электродвигательного устройства используются двигатели переменного и постоянного тока, различающиеся по мощности, скорости, характеру движения, конструктивному исполнению, способам охлаждения и защиты от воздействия окружающей среды, статическим и динамическим характеристикам и т. д. К двигателям общего назначения средней мощности, наиболее широко используемым в промышленном ЭП, относятся АД серий А2 и 4А и ДПТ серий П и 2П. Сведения по их модификациям и другим сериям двигателей приводятся в разд. 25. Ниже даются некоторые обобщен-

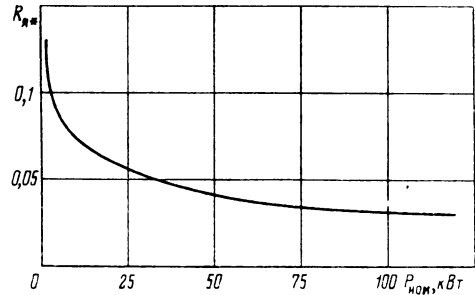


Рис. 50.39. Усредненная зависимость относительного сопротивления цепи якоря  $R_{я*} = R_{я}/R_{ном}$  от номинальной мощности двигателей серии П

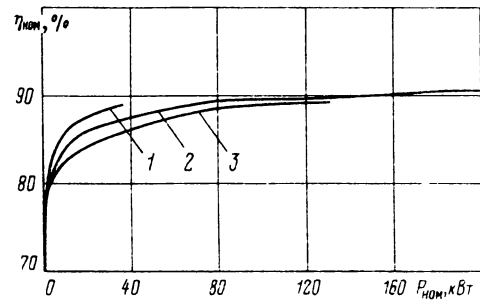


Рис. 50.40. Усредненные зависимости номинального КПД двигателей серий П и 2П от номинальной мощности:

1 — 2ПН,  $\omega_{ном} = 314$  рад/с; 2 — П,  $\omega_{ном} = 314,157$ ,

105 рад/с; 3 — 2ПН,  $\omega_{ном} = 105$  рад/с, 157 рад/с

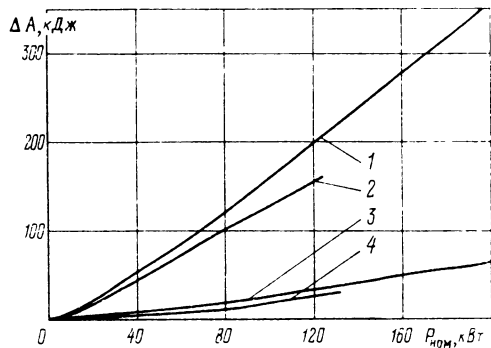


Рис. 50.41. Усредненные зависимости запаса кинетической энергии якоря двигателей серий П и 2ПН от номинальной мощности  $P_{ном}$ :  
1 — П,  $\omega_{ном} = 157$  рад/с; 2 — П,  $\omega_{ном} = 105$  рад/с;  
3 — 2ПН,  $\omega_{ном} = 157$  рад/с; 4 — 2ПН,  $\omega_{ном} = 105$  рад/с

ные данные основного исполнения двигателей этих серий. Усредненная зависимость относительного сопротивления цепи якоря  $R_{я*}$  от номинальной мощности  $P_{ном}$  при 20°C для двигателей серии П 1–11 габаритов на номинальные скорости от 314 до 78,5 рад/с и напряжение 220 В показана на рис. 50.39.

На рис. 50.40, 50.41 показаны усредненные зависимости номинального КПД  $\eta_{ном}$  и запаса кинетической энергии якоря  $\Delta A = J\omega_0^2/2$  от номинальной мощности  $P_{ном}$  для двигателей серии П на напряжении 220 В, наличие которых необходимо при оценке энергетических показателей работы ЭП.

Область возможных значений электромеханической постоянной времени  $T_M = JR_{я}/(k\Phi_{ном})^2$  двигателей серии П выделена штриховкой на рис. 50.42.

ДПТ новой серии 2П предназначены для ЭП с большим диапазоном регулирования скорости и для ЭП, использующих в первую очередь различные статические преобразователи. За счет рационального конструирования и применения новых материалов с высокой степенью их использования удалось по сравнению с серией П повысить мощность двигателей этой серии в 2–3 раза при тех же высотах осей вращения, уменьшить момент инерции якоря на 30–40%, удвоить срок службы, снизить уровень шума при работе. Двигатели имеют встроенный датчик скорости (тахогенератор) с коэффициентом усиления 0,33 В·с/рад.

Двигатели серии 2П допускают за счет улучшенной коммутации повышенные нагрузки по току и моменту и имеют несколько модификаций. Например, ДПТ серии 2ПН допускают ток  $(4 \div 8)I_{ном}$  и момент  $(4 \div 5)M_{ном}$  в течение 0,1–0,15 с.

На рис. 50.39 и 50.40 приведены соответственно значения номинального КПД ДПТ серии 2ПН на скорости 314, 157 и 105 рад/с (напряжение 220 В) и запаса кинетической энергии якоря. Значения  $T_M = JR_{я}/(k\Phi_{ном})^2$ , где сопротивление якорной цепи  $R_{я} \approx 0,5R_{ном}(1 - \eta_{ном})$ , для ДПТ серии 2ПН лежат в пределах заштрихованной области на рис. 50.42.

На рис. 50.43 приведены сравнительные механические характеристики различных модификаций короткозамкнутых АД.

Энергетические показатели АД серии А2 характеризуются зависимостями рис. 50.44–50.46, где соответственно приведены значения номинальных КПД  $\eta_{ном}$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ном}$  и запаса кинетической энергии ротора  $\Delta A$  для двигателей 1–9-го габаритов со скоростями идеального холостого хода  $\omega_0 = 314, 157$  и 105 рад/с. Значения  $T_M = J\omega_0/M_{кр}$ , где  $M_{кр}$  – максимальный (кри-

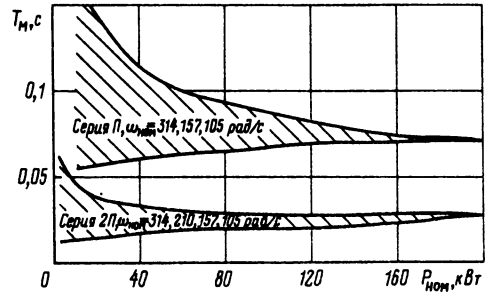


Рис. 50.42. Усредненные зависимости электро-механической постоянной времени  $T_M$  двигателей серии П и 2ПН от номинальной мощности

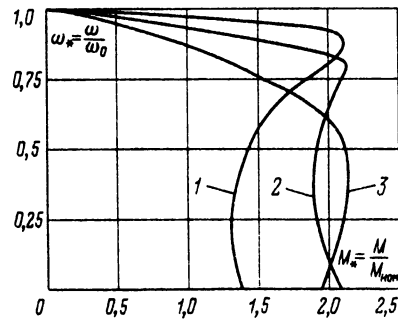


Рис. 50.43. Механические характеристики модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей:

1 – обычного исполнения; 2 – с повышенным пусковым моментом; 3 – с повышенным скольжением

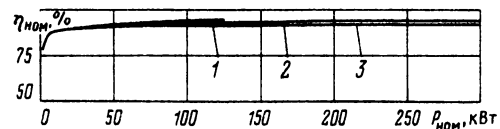


Рис. 50.44. Зависимости номинального КПД двигателей серий А2 и А4 от номинальной мощности  $P_{ном}$ :

1 – А2,  $\omega_0 = 314, 157, 105$  рад/с; 2 – А4,  $\omega_0 = 157, 105$  рад/с; 3 – А4,  $\omega_0 = 314$  рад/с

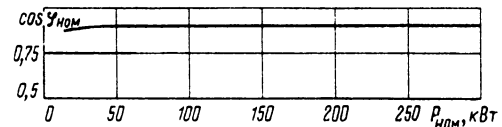


Рис. 50.45. Зависимость номинального коэффициента мощности  $\cos \varphi_{ном}$  двигателей серий А2 и А4 от номинальной мощности  $P_{ном}$  ( $\omega_0 = 314, 157, 105$  рад/с)

тический) момент, располагаются внутри заштрихованной области на рис. 50.47.

Энергетические показатели закрытых обдуваемых АД серии 4А – номинальные КПД  $\eta_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_{ном}$ , запас кинетической энергии ротора  $\Delta A$  – характеризуются зависимостями, приведенными на рис. 50.44 – 50.46. Для АД этой серии  $T_m$  лежит в пределах заштрихованной области на рис. 50.47.

Кривые на рис. 50.48 и 50.49 показывает изменение КПД и  $\cos \varphi$  АД серии 4А с синхронными угловыми скоростями от 314 до 78,5 рад/с при изменении мощности на их валу. Кривые рис. 50.48 соответствуют АД с номинальным КПД  $\eta_{ном} = 63, 70, 85$  и 93%; кривые рис. 50.49 – АД с номинальными коэффициентами мощности  $\cos \varphi_{ном} = 0,6; 0,7; 0,8$  и 0,9. При коэффициенте загрузки  $k_3 = 1$  ( $P = P_{ном}$ ) АД имеют номинальные  $\eta_{ном}$  и  $\cos \varphi_{ном}$ , при изменении мощности АД ( $k_3 \neq 1, P \neq P_{ном}$ ) эти показатели изменяются в соответствии с кривыми рис. 50.48 и 50.49.

### Передачное устройство

В качестве передачного устройства используются различные редукторы, передачи винт – гайка, кривошипно-шатунные механизмы, ременные, цепные, фрикционные передачи и т. д.

Ниже приведены ориентировочные значения КПД ряда передачных устройств при номинальной нагрузке.

Цилиндрическая передача:	$\eta_{ном}$
со шлифованными прямыми зубьями . . . . .	0,99
с нарезными прямыми зубьями с необработанными прямыми зубьями . . . . .	0,98
с косыми зубьями . . . . .	0,96
с шевронными зубьями . . . . .	0,97–0,98
Коническая зубчатая передача . . . . .	0,985
Червячная передача . . . . .	0,97–0,98
Ременная передача . . . . .	0,6–0,8
Клиноременная передача . . . . .	0,94–0,98
Цепная передача . . . . .	0,8–0,98
Фрикционная передача . . . . .	0,9
Цапфы опор:	
плохая смазка . . . . .	0,7–0,8
хорошая смазка . . . . .	0,94
кольцевая смазка . . . . .	0,97
шариковый подшипник . . . . .	0,98
Блоки . . . . .	0,99
Полиспасты . . . . .	0,96–0,97
Барaban цепной . . . . .	0,92–0,98
	0,97

При частичной нагрузке КПД передачи может быть приближенно определен по кривым рис. 50.50, где  $k_3 = M_c / M_{с,расч}$  – коэффициент загрузки передачи по моменту.

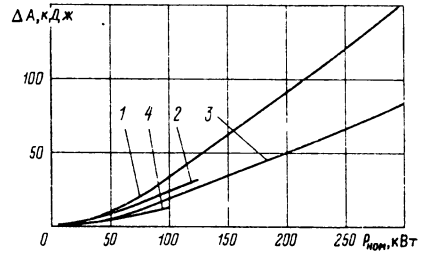


Рис. 50.46. Усредненная зависимость запаса кинематической энергии ротора двигателей серий А2 и 4А от номинальной мощности

$P_{ном}$ :  
 1 – 4А,  $\omega_0 = 314$  рад/с; 2 – А2,  $\omega_0 = 314$  рад/с;  
 3 – 4А,  $\omega_0 = 157, 105$  рад/с; 4 – А2,  $\omega_0 = 157, 105$  рад/с

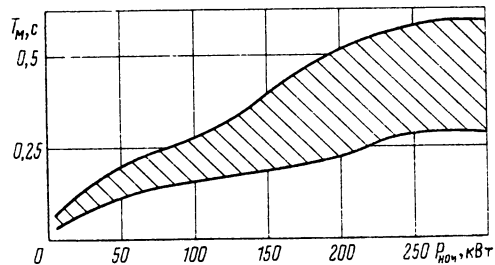


Рис. 50.47. Пределы изменения электромеханической постоянной времени  $T_m$  двигателей серий А2 и 4А в функции номинальной мощности  $P_{ном}$  для  $\omega_0 = 314, 157$  и 105 рад/с

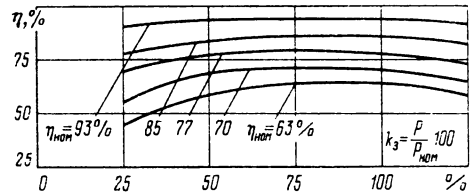


Рис. 50.48. Значения КПД двигателей серии 4А при различных коэффициентах загрузки по мощности  $k_3$  для  $\omega_0 = 314 \div 78,5$  рад/с

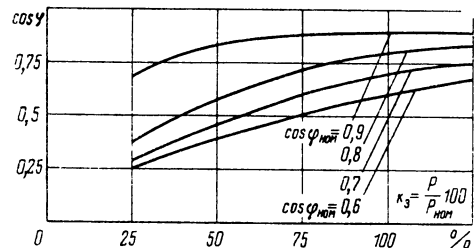


Рис. 50.49. Значения  $\cos \varphi$  двигателей серии 4А при различных коэффициентах загрузки по мощности  $k_3$  для  $\omega_0 = 314 \div 78,5$  рад/с



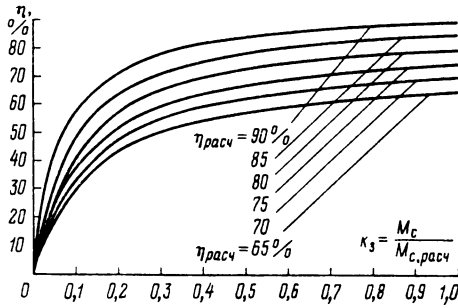


Рис. 50.50. Зависимость КПД зубчатых передач от коэффициента загрузки по моменту

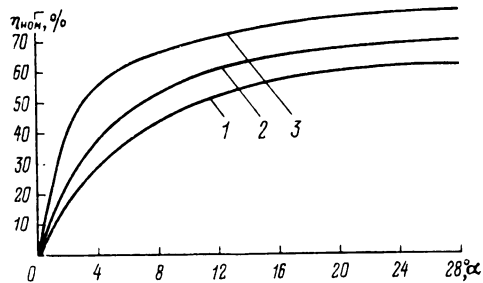


Рис. 50.51. Зависимость КПД червячной передачи от угла подъема нарезки:

1 — червяк и колеса чугунные необработанные смазанные; 2 — фрезерованный стальной червяк по бронзе, масляная ванна; 3 — тщательно выполненная конструкция в масляной ванне

Таблица 50.3. Редукторы общего назначения

Тип	Вид редуктора	Мощность быстроходного вала $P_6$ , кВт	Крутящий момент тихоходного вала $M_T$ , Н·м	Передаточное число $i$	Скорость быстроходного вала $\omega_6$ , рад/с	$\eta$
ЦУ	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	—	250—4000	2—6,3	—	0,98
Ц2У	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	—	250—4000	8—40	—	0,97
Ц2У-Н	То же с зацеплением Новикова	—	7000—50 000	8—50	52—157	0,97
Ц2Н	Цилиндрические трехступенчатые горизонтальные	—	1000—4000	45—200	—	0,96
Ц3У	Цилиндрические трехступенчатые горизонтальные	—	1000—4000	45—200	—	0,96
Ч	Червячные одноступенчатые универсальные	—	85—2000	8—80	52—157	0,41—0,94
Ч2	Червячные двухступенчатые универсальные	—	1300—2800	100—6300	157	0,16—0,75
РЦ1-150А	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	2,8—51	—	1,83—6,61	63—157	0,97
РЦД-400	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	6,4—39,7	—	10—40	73,5—157	0,96
РМ	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	2,6—106	—	8,23—48,57	63—157	0,96
КЦ1	Коническо-цилиндрические двухступенчатые	1,2—146	—	6,3—27,5	63—157	0,94
КЦ2	То же трехступенчатые	0,7—146	—	28,3—182	63—157	0,91
ВК	Цилиндрические трехступенчатые вертикальные	1—13,6	—	19,7—109,6	63—105	0,91

Кривые рис. 50.51 позволяют определить КПД червячной передачи  $\eta_{ч,п}$  в зависимости от угла подъема  $\alpha$  нарезки.

При расчете момента сопротивления  $M_c$ , создаваемого исполнительным органом ряда рабочих машин, необходимо располагать значениями коэффициентов трения скольжения и качения. Ниже приведены значения этих коэффициентов для некоторых поверхностей:

Соприкасающиеся поверхности	Коэффициент трения скольжения
Подшипники скольжения . . . . .	0,07—0,1
Шариковые и роликовые подшипники . . . . .	0,005—0,01
Подшипники из древлпастмасс . . . . .	0,01—0,02
Бандажи по рельсам . . . . .	0,15—0,2

Соприкасающиеся поверхности	Коэффициент трения качения, см
Необработанные колеса по рельсам . . . . .	0,1
Обработанные колеса по рельсам . . . . .	0,05

Основные данные редукторов общего назначения [50.25, 50.34, 50.35] приведены в табл. 50.3.

## 50.7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СЕРИЙНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Отечественная электропромышленность серийно выпускает широкую номенклатуру комплектных ЭП, которые включают в себя

тиристорный УП, устройства согласования с сетью, коммутационную и защитную аппаратуру, систему управления и регулирования ЭП, электродвигатель с датчиком скорости и источник питания цепи возбуждения. Основные технические данные некоторых выпускаемых комплектных ЭП приведены в табл. 50.4.

В табл. 50.5 и 50.6 приведены данные комплектных ЭП серии ЭТ6 с ДПТ серии

2П (Б) и ЭТУ 3601, широко используемые для ЭП механизмов станков и других машин общего назначения.

В табл. 50.7 приведены данные комплектных ЭП серии КТЭ, разработанной для механизмов общего назначения и металлургической промышленности.

В табл. 50.8 приведены данные комплектных ЭП переменного тока, предназначенных для различных отраслей народного хозяйства.

Таблица 50.4 Комплектные электроприводы

Тип	Мощность, кВт	Номинальная скорость, рад/с	Диапазон регулирования скорости	Комплектность	
				Двигатель	Преобразовательные устройства
ЭПУ1-2П	0,75–11	105	20 000	ПБ2П, 2П, 4П	Трансформатор, блок управления
ЭПУ1-2Д	1,5–37		1000	2ПРШ, ПО2П, ПБВ	Трансформатор, блок управления, реактор
ЭПБ-1		50–100	10 000	ЧС с датчиками скорости и положения	Блок питания, блок регулирования; силовой трансформатор, магнитный пускатель
ЭТ-3	1,15–24	78,5–314	400	ПБСТ, 2П	Тиристорный УП, реактор, задатчик скорости
ЭТ-3И	0,18–1,9	104,7–314	1000	ПБСТ, ПСТ, 2ПБ, ПБВ, ДК1	Блок регулирования, реакторы, задатчик скорости
ЭТ-1	0,09–1,8	78,5–314	50	ПБС, 2П, 2ПБ, ПС, ЭП1	Блок регулирования, реактор, два задатчика скорости
ЭТРП	1,6–30	78,5–348	400	2П	Тиристорный УП, реакторы, блок управления
ПРП	0,15–0,5	105	1000	ДК1	Трансформатор, транзисторный УП, реактор
ЭШИР1	0,18–1,5	105	1000 30 000	ПБС(Т), ПБВ, 2П, ДК1	Трансформатор, тиристорный УП, реактор
ЭТУ 7801	15–180	52,5–157	1000	Бесколлекторный	

Таблица 50.5. Комплектные ЭП серии ЭТ6 с двигателями серии 2П(Б)

Тип	Двигатель									Трансформатор			Габариты (L × B × H), м
	U <sub>ном</sub> , кВт	P <sub>ном</sub> , кВт	I <sub>ном</sub> , А	n <sub>ном</sub> , об/мин	R <sub>я</sub> , Ом	R <sub>д.п.</sub> , Ом	L <sub>я</sub> , мГн	J, кг·м <sup>2</sup>	η <sub>ном</sub> , %	m, кг	S, кВ·А	m, кг	
ЭТ6-Р-11-6	1,1	13,8	750	0,564	0,336	13	0,037	64	91	6	63	0,36 × 0,2 × × 0,29	
	2,0	21,4	3000	0,103	0,11	1,8	0,017	81	61	6	63		
	2,1	23,1	800	0,235	0,151	7,1	0,083	77	147	6	63		
	2,4	26,1	1600	0,185	0,148	4,2	0,037	76,5	91	6	63		
ЭТ6-Р-11-8	3,2	34,2	1600	0,12	0,089	2,9	0,047	82	101	8	75		
	3,4	36,2	800	0,121	0,071	4,2	0,2	80,5	219	8	75		
ЭТ6-Р-11-11	3,7	40,3	2240	0,104	0,059	2,4	0,037	79,5	91	11	90	0,36 × 0,23 × × 0,31	
	4,2	44,2	1500	0,081	0,056	2,6	0,083	83,5	147	11	90		
	4,5	47,3	1000	0,084	0,056	3,1	0,2	82,5	219	11	90		
ЭТ6-Р-11-14	5,3	54,7	1600	0,044	0,031	1,6	0,1	85,5	165	14	115	0,38 × 0,25 × × 0,36	

Продолжение табл. 50.5

Тип	Двигатель										Трансформатор		
	$U_{ном},$ В	$P_{ном},$ кВт	$I_{ном},$ А	$n_{ном},$ об/мин	$R_{я},$ Ом	$R_{д.п.},$ Ом	$L_{я},$ мГн	$J,$ кг·м <sup>2</sup>	$\eta_{ном},$ %	$m,$ кг	$S,$ кВ·А	$m,$ кг	Габариты ( $L \times B \times H$ ), м
ЭТ6-Р-11-19	220	5,6	29,2	1000	0,26	0,183	10,2	0,229	84,	240	14	115	0,38 × 0,26 × × 0,66
		6,0	30,7	2120	0,145	0,101	4,5	0,083	86,5	147	14	115	
		7,1	36,3	1500	0,15	0,092	5,5	0,2	86,5	219	19	155	
		8	40,6	950	0,125	0,08	5,3	0,3	87,5	331	19	155	
		8,1	41,7	3350	0,044	0,031	1,6	0,1	86,5	165	19	155	
ЭТ6-Р-11-25		9,5	48,1	2240	0,084	0,056	3,1	0,2	88	219	25	174	0,38 × 0,86 × × 0,4
		11	55,6	2240	0,065	0,044	2,6	0,229	89	240	25	174	
		11	56,2	1500	0,083	0,053	3,7	0,3	88,5	331	25	174	

Примечания: 1. ЭП тиристорный шестипульсный (ЭТ6) предназначен для регулирования частоты вращения ДПТ в большом диапазоне (до 10000:1) и используется в качестве ЭП подачи металлорежущих станков и других механизмов.

2. ЭП выполняется в реверсивном (Р) исполнении с ДПТ 2П (ЭТ6-Р-11), ПБСТ (ЭТ6-Р-12) и в реверсивном исполнении с гарантийными параметрами динамики (С) с ДПТ ПГТ (ЭТ6-С-13) и ПБВ (ЭТ6-С-14).

3. Напряжение питающей сети 380 В

4. Схема выпрямления шестифазная однополупериодная встречно-параллельная.

5. Шкаф управления с УП для всей серии имеет один габаритный размер 0,4 × 0,2 × 0,3 (м). Масса шкафа УП 16 кг.

6. Для питания УП используются трансформаторы серии ТС шести типоразмеров ( $U_2$  – 104 или 208 В). Предполагается переход серии на трансформаторы ТС четырех типоразмеров ( $i_k\% = 2\%$ )

$S, \text{кВ} \cdot \text{А}$      $\Delta P_k, \text{Вт}$

6,3	175
10	220
16	340
25	380

7. Полное обозначение ЭП имеет следующий вид: ЭТ6-Р-11-25/220–200/1500 У4, где 25 – мощность трансформатора, В·А; 220 – напряжение двигателя, В; 200 – типоразмер двигателя; 1500 – частота вращения двигателя, об/мин; У4 – климатическое исполнение.

Таблица 50.6. Электроприводы комплекты тиристорные постоянного тока ЭТУ 3601

Тиристорный УП				Трансформатор			Сглаживающий реактор			
Тип	$I_{ном},$ А	$U_{ном},$ В	Мас- са, кг	Габаритные размеры, м	Тип	$S,$ кВ·А	$U_2,$ В	Тип	$I_{ном},$ А	$L,$ мГн
БТУ 3601-36	40	115	18,5	0,4 × 0,25 × × 0,26	ТСП-10/07-74	10	105	ДС-50/0,6	50	0,6
		ТСЗП-10/07-74			16	205				
		ТСП-16/07-74								
		ТСЗП-16/07-74								
	460		Отсутствует	–	–					
БТУ 3601-40	100	115	18,5	0,4 × 0,25 × × 0,26	ТСП-16/07-74	16	105	ДС-100/0,2	100	0,2
		ТСЗП-16/07-74			25	205				
		ТСП-25/07-74								
		ТСЗП-25/07-74								
	460		Отсутствует	–	–					

Продолжение табл. 50.6

Тиристорный УП				Трансформатор			Сглаживающий реактор			
Тип	$I_{ном}$ , А	$U_{ном}$ , В	Масса, кг	Габаритные размеры, м	Тип	$S$ , кВ·А	$U_2$ , В	Тип	$I_{ном}$ , А	$L$ , мГн
БТУ 3601-43	200	115	48.5	$0,4 \times 0,25 \times 0,5$	ТСП-25/07-74	25	105	-	-	-
		ТСЗП-25/07-74								
		230			ТСЗР-63/0,200	-	205			
		460			-	-	-			

Примечания: 1. В состав ЭП входят:  
ДПТ типа ПБВ, ГП, ПБСТ, ПГТ;  
тиристорный УП БТУ 3601;  
трехфазный силовой согласующий трансформатор типа ТС или трехфазный токоограничивающий реактор,

источник питания обмотки возбуждения;

автоматический выключатель;

сглаживающий реактор (по индивидуальному заказу).

В комплект поставки двигатель и трансформатор не входят и выбираются заказчиком.

2. Напряжение сети при трансформаторном и реакторном исполнении 380 В.

3. Параметры трансформаторов задаются при соединении обмоток  $\Delta/\Delta$ .

4. Трансформаторы имеют дополнительную обмотку собственных нужд ( $S = 0,7$  кВ·А).

5. Схема выпрямления трехфазная мостовая реверсивная.

6. Тиристорные УП всех типов, кроме трансформаторного, имеют реакторное исполнение.

Таблица 50.8. Электроприводы серии ЭКТ 2

Тип	Выходные параметры								Габаритные размеры, м			
	$U_{ном}$ , В	$I_{ном}$ , А	$P_{ном}$ , кВт·А	$I_{ном}$ , Гц	Рабочий диапазон изменения $f$ , Гц	$\eta$	$\cos \phi$	$\alpha = \frac{I_{max}}{I_{ном}}$	Масса $m$ , кг	Длина	Ширина	Высота
ЭКТ 2 25/380-50 УХЛ4	380	25	16,5	50	5-60	0,9	0,83	2	300	0,6	0,4	2,320
ЭКТ 2 25/380-200 УХЛ4		25	16,5	200	15-240	0,85	0,83	2,4	320	0,6	0,4	2,320
ЭКТ 2 63/380-50 УХЛ4		63	41,5	50	5-60	0,92	0,83	2,4	700	0,8	0,8	2,340
ЭКТ 2Р 63/380-200 УХЛ4		63	41,5	200	15-290	0,9	0,83	3,2	720	0,8	0,8	2,340
ЭКТ 2 160/380-50 УХЛ4		160	105	50	5-60	0,95	0,88	2,8	740	0,8	0,8	2,340
ЭКТ 2Р 160/380-50 УХЛ4		160	105	50	5-60	0,95	0,88	2,8	750	0,8	0,8	2,340
ЭКТ 2Р 160/380-200 УХЛ4		160	105	200	15-240	0,91	0,88	2,8	1200	1,400	0,8	2,700
ЭКТ 2Р 250/380-200 УХЛ4		250	165	200	15-240	0,92	0,83	3	1350	1,600	0,8	2,700
ЭКТ 2 400/380-50 УХЛ4		400	263,5	50	5-60	0,96	0,88	2,5	1500	1,800	0,8	2,700

Примечания: 1. ЭП выполнен на базе преобразователей частоты со звеном постоянного тока

2. ЭП выполнен реверсивным и используется без датчика скорости с серийными трехфазными асинхронным короткозамкнутым и синхронным реактивным двигателями.

3. Питаящая сеть преобразователя частоты трехфазная при  $U_{ном} = 380$  В,  $I_{ном} = 50$  Гц.

4. Допустимая нагрузка составляет 150% номинального тока при продолжительности 120 с.

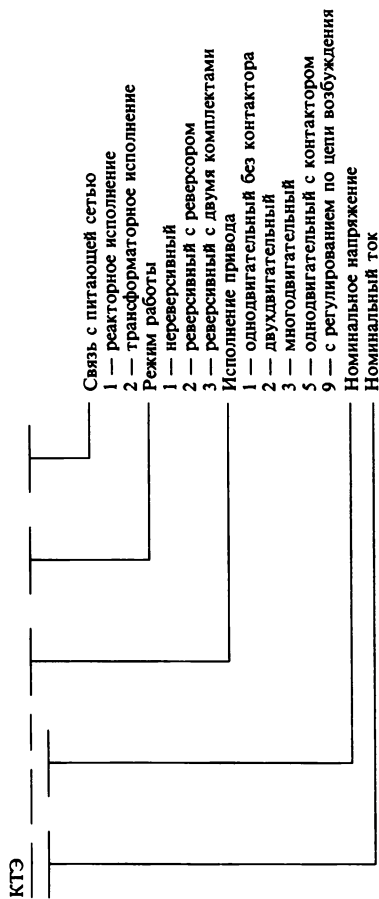
5. Диапазон изменения напряжения составляет 0-380 В

6.  $I_{max}$  - максимальное мгновенное значение тока нагрузки.

Таблица 50.7. Комплекты тиристорные ЭП серии КТЭ (постоянного тока)

I <sub>ном.</sub> А	Номинальное напряжение, В		cos φ при α = 0	Исполнение	Силовой трансформатор (нп)	Реактор с лагивающий		Масса, кг	Габаритные размеры, м		Количество шкафов, шт	Примерная цена, тыс. руб				
	сети	преобразователя				Тип	Индуктивность, мГн		Длина	Ширина						
25			0,82	Реакторное	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	470	0,6	0,6	1	6-7,5				
50			0,82					470	0,6	0,6	1					
100			0,82					490	0,6(1,2)	0,6	1(2)					
200			0,82					600	1,0	0,6	1					
320			0,82					965	2,4(3)	0,6	3(4)					
500			0,85					990	2,4(3)	0,6	3(4)					
800			0,85					1285	4(4,6)	0,8	4(5)					
1000			0,85					1360	4(4,6)	0,8	4(5)					
25	220	230	0,8					Трансформаторное	ТСП-10/07-74 У4 ТСП-16/07-74 У4 ТСП-25/07-74 У4 ТСП-63/07-74 У4 ТСП-100/07-74 У4 ТСП-160/07-74 У4 ТСЗП-400/10-У3 ТСЗП-630/10-У3	Отсутствует	630		0,8	0,8	1	12-13
50			0,8								670		0,8	0,8	1	
100			0,8	770	1,0(1,2)	0,8	1(2)									
200			0,8	960	1,0	0,8	1									
320			0,8	1620	2,4(3)	0,8	3(4)									
500			0,82	1665	2,4	0,8	3(4)									
800			0,82	3000	6(6,6)	1,2	4(5)									
1000			0,82	3020	6(6,6)	1,2	4(5)									
1600			0,82	6030	7-8,6	1,2	4-7									
25			0,88	Реакторное	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует				470	0,6	0,6	1	8,1	
50			0,85					470	0,6	0,6	1					
100			0,88					490	0,6	0,6	1					
200			0,88					600	1,0	0,6	1					
320			0,88					965	2,4(3)	0,6	3(4)					
500			0,87					965	2,4(3)	0,6	3(4)					
800			0,86					1285	4(4,6)	0,6	4(5)					
1000			0,86					1360	4(4,6)	0,8	4(5)					
500	400	460	—					Трансформаторное	ТСЗП-400/10 У3 ТСЗП-630/10 У3 ТСЗП-630/10 У3 ТСЗП-1000/10 У3	0,6 0,35 0,6	2590 4395 4470 7080	4,8(5,4)	1,2	4(5)		—
800			0,6									6(6,8)	—	4(5)		—
1000			0,35	6,2(6,8)	—	4(5)	17									
1600			0,6	7,2 ÷ 8,8	—	5-7	26									
500	600	660	0,85	Трансформаторное	ТСЗП-400/10 У3 ТСЗП-630/10 У3 ТСЗП-1000/10 У3 ТНЗП-1600/10 У3	0,75 0,6 0,35 0,6	2590 4395 5515 11830	5(5,6)	1,2	4(5)	—					
800			—					6,2(6,8)	—	4(5)	—					
1000			—					6,4(7)	—	4(5)	—					
1600			—					8,8(9,4)	—	5-7	26					

Примечания: 1. Комплектные тиристорные ЭП (КТЭ) имеют следующую структуру обозначения:



2. Охлаждение преобразователей — естественное воздушное.
3. Допустимые токовые перегрузки и их продолжительность  $I_{max}/I_{ном} = 1,5$  (120 с); 1,75 (60 с); 2 (15 с); 2,25 (10 с).
4. Диапазон регулирования выпрямленного напряжения — от 0 до 100% для нереверсивных и 100–0–100% для реверсивных схем.
5. Электропривод имеет различные исполнения по виду основного регулируемого параметра: напряжения, скорости (однозонное и двухзонное), положения, мощности и натяжения
6. Схема ИФУ обеспечивает линейную характеристику  $\alpha = f(U_d)$  во всем диапазоне изменения угла (исключая  $170^\circ$ ) при изменении управляющего сигнала от  $+8$  до  $-8$  В (ток управления — не более 5 мА).
7. Встроенный тиристорный возбудитель имеет следующие основные выходные параметры:
  - в УП до 200 А  $U_{в,ном} = 230$  В,  $I_{в,ном} = 5$  А;
  - в УП от 320–800 А  $U_{в,ном} = 230$  В,  $I_{в,ном} = 16$  А;
  - в УП от 1000–1600 А  $U_{в,ном} = 460$  В,  $I_{в,ном} = 50$  В.
8. В трансформаторах кроме силовой обмотки имеется обмотка для питания потребителей собственных нужд мощностью 7 или 10 кВ·А.
9. Высота стандартных шкафов составляет от 2,5 до 2,75 м. Шкаф КТЭ имеет стандартные габаритные размеры  $0,6 \times 0,6 \times 2,2$  м для большинства типоразмеров.

### 50.8. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В настоящем параграфе на конкретных примерах рассмотрены некоторые типовые вопросы, которые обычно возникают при проектировании несложных ЭП производственных механизмов: определение мощности и выбор электродвигателя, проверка его по нагреву для заданного цикла работы производственного механизма, выбор УП для управления двигателем. При проектировании сложных систем автоматизированного ЭП таких производственных механизмов, как прокатные станы, металлорежущие станки, подъемно-транспортные механизмы и т. д., необходимо использование специальной литературы, например [50.18 – 50.20, 50.33, 50.36].

**Пример 1.** Определить мощность приводного электродвигателя поршневого насоса, который подает воду на высоту  $H = 60$  м с расходом  $Q = 0,02$  м<sup>3</sup>/с. Горизонтальная длина магистрали  $l = 1200$  м при диаметре труб  $d = 135$  мм, магистраль содержит две заслонки, два вентиля и четыре колена в 90° с радиусом закругления  $R = 500$  мм. КПД насоса  $\eta_{\text{ном}} = 81\%$ , КПД механической передачи от двигателя к насосу  $\eta_{\text{м,п}} = 95\%$ . Режим работы насоса продолжительный.

Мощность двигателя, кВт, для насоса определяется по формуле

$$P = \frac{Q\gamma g(H + \Delta H)}{1000\eta_{\text{ном}}\eta_{\text{м,п}}},$$

где  $\Delta H$  – падение напора в элементах магистрали, м;  $\gamma$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Как следует из рассмотрения этой формулы, основная задача при определении мощности ЭП связана с определением падения напора в элементах магистрали  $\Delta H$ . Это падение складывается из падения напора в самой магистрали  $\Delta H_{\text{м}}$ , падения напора в ее коленах  $\Delta H_{\text{к}}$  и падений напора в заслонках  $\Delta H_{\text{з}}$  и вентилях  $\Delta H_{\text{в}}$ :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{м}} + \Delta H_{\text{к}} + \Delta H_{\text{з}} + \Delta H_{\text{в}}.$$

Падение напора в магистрали определяется по формуле

$$\Delta H_{\text{м}} = av^{1,75}/d^{1,25},$$

где  $a = 0,00074$  для новых чугунных труб;  $a = 0,00092$  для чугунных труб, бывших в употреблении;  $v$  – скорость воды:

$$v = \frac{Q}{s} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,02}{3,14 \cdot 0,135^2} = 1,4 \text{ м/с.}$$

Следовательно,

$$\Delta H_{\text{м}} = 0,00092 \cdot 1200 \cdot 1,4^{1,75} / 0,135^{1,25} = 24,37 \text{ м.}$$

Падение напора в коленах, заслонках и вентилях находится по формуле  $\Delta H_i = k_i v^2 / 2g$ , где  $k_i$  определяется типом арматуры.

Для колен при  $d/R = 135/500 = 0,27$  имеем  $k_{\text{к}} = 0,155$  и падение напора для четырех колен ( $n = 4$ )

$$\Delta H_{\text{к}} = k_{\text{к}} \frac{v^2}{2g} n = 0,155 \frac{1,4^2}{2 \cdot 9,81} 4 = 0,062 \text{ м.}$$

Для вентилях  $k_{\text{в}} = 0,49$ , и при двух вентилях падение напора  $\Delta H_{\text{в}} = 0,49 \cdot 1,4^2 \cdot 2 / 2 \cdot 9,81 = 0,384$  м.

Для заслонок  $k_{\text{з}} = 0,063$ , и при двух заслонках  $\Delta H_{\text{з}} = 0,063 \cdot 1,4^2 \cdot 2 / 2 \cdot 9,81 = 0,013$  м.

Суммарное падение напора

$$\Delta H = 24,37 + 0,062 + 0,013 + 0,384 = 24,83 \text{ м.}$$

Требуемая мощность приводного двигателя

$$P = \frac{0,02 \cdot 10^3 \cdot 9,81 (60 + 24,83)}{1000 \cdot 0,81 \cdot 0,95} = 21,63 \text{ кВт.}$$

**Пример 2.** Спроектировать ЭП ленточного транспортера, производительность которого  $Q$  должна изменяться от 10 до 100 т/ч (от 2,8 до 28 кг/с). Скорость движения ленты  $v = 0,5$  м/с, высота подъема транспортируемого материала  $H = 12$  м, длина пути перемещаемого материала  $L = 50$  м. Диаметр ведущего барабана  $D = 0,51$  м, передаточное число редуктора  $i = 50$ , КПД редуктора  $\eta_{\text{р}} = 0,85$ . ЭП устанавливается в запыленном помещении, режим работы конвейера длительный, напряжение питающей трехфазной сети 380 В.

Мощность двигателя для привода ленточного транспортера определяется по формуле

$$P = \frac{k_3 Q g}{1000 \eta_{\text{р}}} (cL + H),$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент запаса;  $c$  – опытный коэффициент, определяемый по табл. 50.9 в зависимости от длины  $L$  и производительности  $Q$  конвейера.

Таблица 50.9

L, м	Q, т/ч (кг/с)					
	10(2,8)	20(5,6)	50(14)	100(28)	200(56)	400(112)
10	2	1,4	0,92	0,67	0,5	0,37
50	0,66	0,5	0,35	0,27	0,22	0,18
125	0,35	0,28	0,21	0,17	0,14	0,12

Пользуясь данными табл. 50.9, определяем мощность двигателя для максимальной производительности:

$$P = \frac{1,2 \cdot 28 \cdot 9,81}{1000 \cdot 0,85} (0,27 \cdot 50 + 15) = 9,9 \text{ кВт.}$$

Скорость ведущего барабана

$$\omega_6 = 2v/D_6 = 2 \cdot 0,5/0,51 = 1,96 \text{ рад/с.}$$

Скорость вала двигателя

$$\omega = \omega_6 i = 1,96 \cdot 50 = 98 \text{ рад/с} = 936 \text{ об/мин.}$$

Учитывая тяжелые условия работы ЭП, ориентируемся на использование короткозамкнутого АД. Для рассчитанных мощности и скорости из серии 4А может быть использован закрытый обдуваемый двигатель типа 4А160 6У3 со следующими паспортными данными:  $P_{\text{ном}} = 11 \text{ кВт}$ ,  $\omega_{\text{ном}} = 102 \text{ рад/с}$ , КПД = 86,0%,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,86$ ,  $I_{\text{ном}} = 22,6 \text{ А}$  при  $U_c = 380 \text{ В}$ .

Изменение производительности конвейера обеспечим за счет регулирования скорости АД, для чего используем статический тиристорный УП частоты. Ориентируясь на серию ЭКТ 2 (см. табл. 50.8), выбираем агрегат типа ЭКТ 2 25/380-50 УХЛЧ со следующими паспортными данными:  $P_{\text{ном}} = 16,5 \text{ кВт}$ ,  $I_{\text{ном}} = 25 \text{ А}$ , масса 300 кг. Использование регулируемого частотного асинхронного ЭП обеспечивает экономичное изменение производительности транспортера.

**Пример 3.** Проверить на нагрев двигатель постоянного тока независимого возбуждения типа Д22, приводящего в движение тележку мостового крана. Кинематическая схема механизма передвижения тележки изображена на рис. 50.52, где обозначено: Д – двигатель, Т – тормоз, М – муфты, Р – редуктор, ХВ – ходовой вал, ХК – ходовые колеса.

Данные мостового крана и тележки: масса полезного груза  $m_r = 5000 \text{ кг}$ , масса тележки  $m_t = 1820 \text{ кг}$ , скорость движения тележки  $v_t = 0,75 \text{ м/с}$ , радиус ходового колеса  $R_{x,k} = 0,275 \text{ м}$ , диаметр цапфы ходового колеса  $d_{ц} = 0,08 \text{ м}$ , передаточное число редуктора  $i = 41,34$ , КПД передачи при полной нагрузке  $\eta_{п} = 0,85$ , момент инерции муфты с тормозом на валу двигателя  $J_{м,т} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , момент инерции ходового вала с муфтами и ходовыми колесами  $J_{х,в} = 1,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; длина пролета моста  $L = 24 \text{ м}$ .

Расчетный цикл работы тележки: движение на расстояние  $l_p = L/2 = 12 \text{ м}$  в одну сторону с полным грузом и в другую сторону без груза, количество циклов в час  $N = 30$ .

Данные двигателя Д22:  $P_{\text{ном}} = 4,8 \text{ кВт}$  при

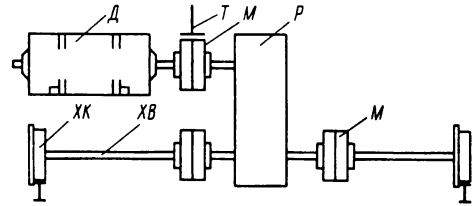


Рис. 50.52. Кинематическая схема механизма передвижения тележки крана

$P_B = 40\%$ ;  $\omega_{\text{ном}} = 120 \text{ рад/с}$ ;  $I_{\text{ном}} = 26 \text{ А}$ ;  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ;  $J_{\text{дв}} = 0,155 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Для проверки двигателя на нагрев следует рассчитать и построить нагрузочную диаграмму, т. е. зависимость момента двигателя в функции времени  $M(t)$ .

Нагрузочная диаграмма включает участки переходных режимов двигателя (пуск, торможение), установившегося движения и пауз.

Момент статического сопротивления при движении тележки с грузом рассчитывается по формуле

$$M_{с,г} = \frac{k_p g (m_r + m_t) (\mu_c d_{ц} / 2 + f_k)}{\eta_{пг}}$$

где  $\mu_c$  – коэффициент трения скольжения (см. с. 32);  $f_k$  – коэффициент трения качения (см. с. 32);  $k_p$  – коэффициент, учитывающий трение реборд ходовых колес о рельсы, обычно  $k_p = 2 \div 2,5$ .

Подставляя в формулу численные значения, находим

$$M_{с,г} = \frac{2,25 \cdot 9,81 (5000 + 1820) (0,1 \cdot 0,04 + 0,001)}{0,85 \cdot 41,34} = 21,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент статического сопротивления при движении тележки без груза

$$M_{с0} = \frac{k_p g m_t (\mu_c d_{ц} / 2 + f_k)}{\eta_{п0} i};$$

$$M_{с0} = \frac{2,25 \cdot 9,81 \cdot 1820 (0,1 \cdot 0,04 + 0,001)}{0,7 \cdot 41,34} = 6,4 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

где  $\eta_{п0} = 0,7$  находится по кривым рис. 50.50 для

$$k_3 = m_t / (m_r + m_t) = 0,27.$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции тележки с грузом

$$J_{\Sigma г} = J_{дв} + J_{м,т} + \frac{J_{х,в}}{i^2} + (m_r + m_t) \left( \frac{v_t}{\omega} \right)^2 =$$



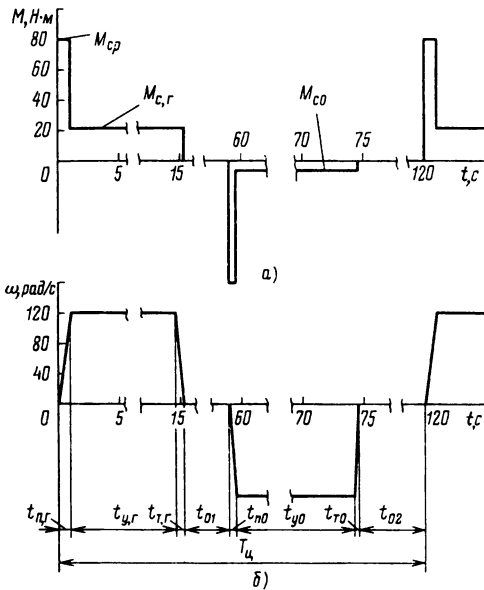


Рис. 50.53. Нагрузочная диаграмма (а) и тахограмма (б) двигателя тележки

$$= 0,155 + 0,1 + \frac{1,6}{41,34^2} + (5000 + 1820) \left( \frac{0,75}{120} \right)^2 = 0,522 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции тележки без груза

$$J_{\Sigma 0} = J_{\text{дв}} + J_{\text{м,г}} + \frac{J_{\text{х,в}}}{i^2} + m_{\text{т}} \left( \frac{v_{\text{т}}}{\omega} \right)^2 = 0,155 + 0,1 + \frac{1,6}{41,34^2} + 1820 \left( \frac{0,75}{120} \right)^2 = 0,327 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Принимая средний момент двигателя  $M_{\text{ср}}$  во время пуска неизменным и равным  $2M_{\text{ном}}$ , определяем время пуска тележки с грузом  $t_{\text{п,г}}$  и без груза  $t_{\text{п0}}$  до номинальной скорости:

$$t_{\text{п,г}} = \frac{J_{\Sigma 1} \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ср}} - M_{\text{с,г}}} = \frac{J_{\Sigma 1} \omega_{\text{ном}}}{2M_{\text{ном}} - M_{\text{с,г}}} = \frac{0,522 \cdot 120}{80 - 21,4} = 1,07 \text{ с};$$

$$t_{\text{п0}} = \frac{J_{\Sigma 0} \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ср}} - M_{\text{с0}}} = \frac{0,327 \cdot 120}{80 - 6,4} = 0,53 \text{ с}.$$

Путь, проходимый тележкой при разгоне

до полной скорости с грузом ( $l_{\text{п,г}}$ ) и без него,

$$l_{\text{п,г}} = v_{\text{ном}} t_{\text{п,г}} / 2 = 0,75 \cdot 1,07 / 2 = 0,4 \text{ м};$$

$$l_{\text{п0}} = v_{\text{ном}} t_{\text{п0}} / 2 = 0,75 \cdot 0,53 / 2 = 0,2 \text{ м}.$$

Принимая, что торможение тележки осуществляется с помощью механического тормоза с моментом  $M_{\text{т}} = 2M_{\text{ном}}$ , рассчитываем время торможения тележки с полной скорости с грузом ( $t_{\text{т,г}}$ ) и без груза ( $t_{\text{т0}}$ ):

$$t_{\text{т,г}} = \frac{J_{\Sigma 1} \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{т}} + M_{\text{с,г}}} = \frac{0,522 \cdot 120}{80 + 21,4} = 0,62 \text{ с};$$

$$t_{\text{т0}} = \frac{J_{\Sigma 0} \omega_{\text{ном}}}{M_{\text{т}} + M_{\text{с0}}} = \frac{0,327 \cdot 120}{80 + 6,4} = 0,45 \text{ с}.$$

Путь, проходимый тележкой при торможении с грузом и без груза,

$$l_{\text{т,г}} = v_{\text{ном}} t_{\text{т,г}} / 2 = 0,75 \cdot 0,62 / 2 = 0,23 \text{ м};$$

$$l_{\text{т0}} = v_{\text{ном}} t_{\text{т0}} / 2 = 0,75 \cdot 0,45 / 2 = 0,17 \text{ м}.$$

Путь, проходимый тележкой при установившемся движении с грузом и без груза,

$$l_{\text{y,г}} = l_{\text{п}} - l_{\text{п,г}} - l_{\text{т,г}} = 12 - 0,4 - 0,23 = 11,37 \text{ м};$$

$$l_{\text{y0}} = l_{\text{п}} - l_{\text{п0}} - l_{\text{т0}} = 12 - 0,2 - 0,17 = 11,63 \text{ м}.$$

Время установившегося движения тележки с грузом и без груза:

$$t_{\text{y,г}} = l_{\text{y,г}} / v_{\text{ном}} = 11,37 / 0,75 = 15,2 \text{ с};$$

$$t_{\text{y0}} = l_{\text{y0}} / v_{\text{ном}} = 11,64 / 0,75 = 15,5 \text{ с}.$$

Общее время одного цикла работы тележки

$$T_{\text{ц}} = \frac{3600}{N} = \frac{3600}{30} = 120 \text{ с}.$$

Время пауз в одном цикле составляет

$$t_0 = T_{\text{ц}} - t_{\text{y,г}} - t_{\text{y0}} - t_{\text{п,г}} - t_{\text{п0}} - t_{\text{т,г}} - t_{\text{т0}} = 120 - 15,2 - 15,5 - 1,07 - 0,53 - 0,62 - 0,45 = 86,63 \text{ с}.$$

Относительная расчетная продолжительность включения двигателя

$$ПВ_{\text{р}} = \frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{ц}}} 100\% = \frac{T_{\text{ц}} - t_0}{T_{\text{ц}}} 100\% = \frac{33,37}{120} 100\% = 28\%.$$

Нагрузочная диаграмма двигателя, соответствующая полученным данным, приведена на рис. 50.53. Рассчитываем с ее помощью эквивалентный момент двигателя  $M_{\text{з,к,р}}$  за время его работы в расчетном цикле с  $ПВ_{\text{р}} = 28\%$ , учтя также ухудшение теплоотдачи двигателя в переходных процессах с помощью

коэффициента ухудшения теплоотдачи  $\beta = 0,5$ :

$$M_{\text{эк,р}} = \sqrt{\frac{M_{\text{ср}t_{\text{п,г}}}^2 + M_{\text{ср}t_{\text{п0}}}^2 + M_{\text{с,г}t_{\text{y,г}}}^2 + M_{\text{с0}t_{\text{y0}}}^2}{\beta(t_{\text{п,г}} + t_{\text{п0}}) + t_{\text{y,г}} + t_{\text{y0}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{80^2 \cdot 1,07 + 80^2 \cdot 0,53 + 21,4^2 \cdot 15,2 + 6,4^2 \cdot 15,5}{0,5(1,07 + 0,53) + 15,2 + 15,5}} =$$

$$= 15,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пересчитаем  $M_{\text{эк,р}}$  на стандартное  $PB_{\text{ст}} = 40\%$ :

$$M_{\text{эк,ст}} = M_{\text{эк,р}} \sqrt{\frac{PB_{\text{р}}}{PB_{\text{ст}}}} = 15,8 \sqrt{\frac{28}{40}} = 13,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Так как  $M_{\text{эк,ст}} = 13,2 \text{ Н} \cdot \text{м} < 40 \text{ Н} \cdot \text{м} = M_{\text{ном}}$ , двигатель по нагреву проходит с большим запасом. Тем самым данный привод тележки может работать и в более напряженном цикле или же в нем может быть использован двигатель меньшей мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 50.1. ГОСТ 16593-79. Электроприводы. Термины и определения.
- 50.2 Основы автоматизированного электропривода/М. Г. Чиликин, М. М. Соколов, В. М. Терехов, А. В. Шинянский. М. Энергия, 1972. 568 с.
- 50.3 Ключев В. И. Теория электропривода. Учебник для вузов М Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
- 50.4 Вешневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе М Энергия 1977. 432 с.
- 50.5 Справочник по автоматизированному электроприводе/Под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского М Энергоатомиздат, 1983 616 с.
- 50.6 Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода – 6-е изд. М Энергия, 1981. 376 с.
- 50.7 Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод Учебник для вузов М Энергоатомиздат, 1986 416 с.
- 50.8 Ильинский Н. Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом М Энергоиздат, 1981. 144 с.
- 50.9 Каган В. Г., Лебедев Г. В., Малинин Л. И. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения М Энергия, 1971. 96 с.
- 50.10 Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами М Высшая школа, 1979. 318 с.
- 50.11 Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М Энергия 1974 328 с.
- 50.12 Юревич Е. И. Теория автоматического управления Л Энергия, 1975. 416 с.
- 50.13 Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе М М Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон М Энергия, 1967 200 с.
- 50.14 Дискретный электропривод с шаговыми двигателями/Под общ. ред. М. Г. Чиликина М.: Энергия, 1971 624 с.
- 50.15 Соколов М. М., Сорокин Л. К. Электропривод с линейными асинхронными двигателями. М Энергия, 1974 136 с.
- 50.16 Свечарник Д. В. Линейный электропривод М Энергия, 1979. 152 с.
- 50.17 Михалев А. С., Миловзоров В. П. Следящие системы с бесконтактными двигателями постоянного тока М Энергия, 1979. 160 с.
- 50.18 Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства М Высшая школа, 1977. 391 с.
- 50.19 Сандлер А. С. Электропривод и автоматизация станков М Высшая школа, 1972. 440 с.
- 50.20 Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов М Энергия, 1980 360 с.
- 50.21 Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений М Экономика, 1977. 8 с.
- 50.22 Чернухин А. А., Флаксерман Ю. Н. Экономика энергетики СССР – 4-е изд. М Энергоатомиздат, 1985. 16 с.
- 50.23 Рипс Я. А., Савельев Б. А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. М Энергия, 1972. 248 с.
- 50.24 Ивоботенко Б. А., Ильинский Н. Ф., Копылов И. П. Планирование эксперимента в электромеханике М Энергия, 1975. 184 с.
- 50.25 Краузе Г. Н., Крутилин Н. Д., Сычко С. А. Редукторы. Справочное пособие. Л Машиностроение, 1972 144 с.
- 50.26 Комплексные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков/Под ред. А. Д. Поздеева. М Энергия, 1980 288 с.
- 50.27 Асинхронные двигатели серии 4А Справочник/А Э Кравчин, М. М Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
- 50.28 Номенклатура изделий силовой преобразовательной техники. Запорожье. ПО «Преобразователь». 1979. 72 с.
- 50.29. Силовые полупроводниковые преобразователи в металлургии. Справочник Под ред. С. Р. Резинского М. Металлургия, 1976. 184 с.
- 50.30 Справочник по преобразовательной технике/Под ред. И. М Чиженко. Киев: Техника, 1978. 447 с.
- 50.31. Каталоги 05.03.29 – 74. М.: Информэлектро 1974
- 50.32 Сводный каталог Информэлектро. вып 1 Регулируемый электропривод, 1974.
- 50.33. Борисов Ю. М., Соколов М. М. Электрооборудование подъемно-транспортных машин. М. Машиностроение, 1971 376 с.
- 50.34 Редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения. Справочник/Л С Бойко, А. З. Высоцкий, Э. Н. Галиченко и др. М. Машиностроение, 1984 247 с.
- 50.35 Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин Минск. Высшая школа, 1983. 350 с.
- 50.36 Капунов Ю. Д., Елисеев В. А., Ильяшенко Л. А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок М. Высшая школа, 1979. 359 с.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### СОДЕРЖАНИЕ

Условные буквенные обозначения элементов СУ ЭП, принятые в разделе	42			
51.1. Определение и классификация систем автоматического управления электроприводами . . . . .	43			
51.2. Электрические схемы систем автоматического управления электроприводами . . . . .	43			
51.3. Элементы систем автоматического управления электроприводами и их выбор . . . . .	44			
51.4. Основные требования, предъявляемые к системам автоматического управления электроприводами . . . . .	44			
51.5. Релейные системы автоматического управления электроприводами . . . . .	44			
51.6. Системы автоматического управления регулируемого электропривода Общие положения (48). Системы управления регулируемых электроприводов постоянного тока с суммирующим усилителем (48). Системы управления регулируемых электроприводов постоянного тока с подчиненным регулированием координат (53). Комплексные электроприводы постоянного тока. Электроприводы унифицированные трехфазные и однофазные серий ЭПУ1 и ЭПУ2 (62). Электроприводы серии ЭПУ1 (62). Электропривод ЭПУ1-2П (63). Электропривод ЭПУ1-2Д (двухзонный) (69). Комплексные тиристорные электроприводы постоянного тока серии КТЭ (71). Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями (75). Система управления электропривода постоянного тока с силовым источником тока (77). Цифро-аналоговые системы управления скоростью электропривода постоянного тока (79). Системы управления электроприводов переменного то-				
		ка (80). Асинхронный электропривод с тиристорной станцией управления ТСУ-2 (83). Асинхронный электропривод с преобразователем частоты типа ЭКТ-20 (84). Комплексный асинхронный электропривод типа «Размер 2М-5-2» (85). Комплексный тиристорный электропривод переменного тока серии ЭПБ1 и ЭПБ2 (86)		
		51.7. Системы управления позиционных и следящих электроприводов. Системы управления позиционного электропривода (87). Аналоговая система регулирования положения (87). Цифро-аналоговая система регулирования положения (88). Системы управления следящего электропривода (88). Аналоговая система управления следящего электропривода с суммирующим усилителем (91). Аналоговые СУ СЭП с подчиненным регулированием координат (92). Цифровые системы управления следящего электропривода (93)		
		51.8. Системы программного управления электроприводами (93). Определение и классификация систем программного управления (93). Системы числового программного управления (95)		
		51.9. Системы адаптивного управления электроприводами . . . . .	97	
		51.10. Микропроцессорные системы управления электроприводами . . . . .	99	
		51.11. Системы управления производственных комплексов и гибких автоматизированных производств. Гибкие производственные комплексы (ГПК) (105). Гибкие автоматизированные производства (ГАП) (107)		
		51.12. Принципы проектирования систем автоматического управления электроприводами . . . . .	108	
		Список литературы . . . . .	116	

### УСЛОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУ ЭП, ПРИНЯТЫЕ В РАЗДЕЛЕ

М – электрические/двигатели постоянного тока (с обмоткой возбуждения LM) ДПТ и переменного тока: асинхронные АД и синхронные СД	ТПЧ (UZ) – тиристорный преобразователь частоты
П (U) – преобразовательное устройство ЭП (преобразователь переменного напряжения в постоянное)	И (UZ), ИН (UZV), ИТ (UZA) – инвертор, инверторы напряжения и тока
ПЯ (UM), ПВ (UL) – преобразователи цепей якоря и возбуждения ДПТ	Вп (U) – выпрямитель
ТПЯ (UM), ТПВ (UL) – то же тиристорные преобразователи (ТП)	СИФУ (AU) – система импульсно-фазового управления (СИФУ)
ИЕП (UAM), ИТ (UAM) – индуктивно-емкостной преобразователь, источник тока	СИФУЯ (AUM), СИФУВ (AUL) – СИФУ ТП цепей якоря и возбуждения ДПТ
ТПН (UV) – тиристорный преобразователь напряжения (переменного в переменное)	СУВ (AUU), СУИ (AUZ) – система управления (СИФУ) выпрямителя и инвертора
	УФС (AU) – устройство фазосмещения
	ТС (TM), ТУ (TC), ТН (TV), ТТ (TA), ТВ (TL) – трансформаторы силовой и управления; напря-

жения, тока, питания преобразователя возбуждения

L – реактор

PC (AR), PT (AA), PH (AV), PЭ (AE) – регуляторы скорости, тока, напряжения и ЭДС

РТЯ (AAM), РТВ (AAL) – регуляторы тока цепей якоря и возбуждения ДПТ

РМП (РФ) – регулятор магнитного потока

ЗС (SR), ЗП (SQ), ЗИ (SJ) – задатчики скорости, положения, интенсивности

ЗИС (SJR), ЗИТ (SJA) – задатчики интенсивности скорости и тока

ЦЗС (SRZ) – цифровой задатчик скорости

ДС (BR), ДТ (UA), ДН (UV), ДЭ (UE), ДП (UQ), ТД (UT) – датчики скорости (тахогенератор), тока, напряжения, ЭДС, положения и температуры

ДПВ (UVS), ДСВ (UVS) – датчики проводимости (или состояния) вентилей (тиристоров)

ИДС (BRF), ЦДС (BRZ) – импульсный и цифровой датчики скорости

ИДП (BQF), ЦДП (BQZ) – импульсный и цифровой датчики положения

УО (AS), БУ (AS), БР (AS) – управляющий орган, блок управления, блок регулирования

БУК (ASK) – блок управления бесконтактными ключами

У (A) – усилитель

С (AW) – сумматор

Сл (S) – селектор

ФП (AU) – функциональный преобразователь

ФПЭ (AUE), ФПП (AUQ) – функциональные преобразователи ЭДС и положения

ФЧС (UFS), ФЧВ (UFR) – формирователи частоты скольжения и частоты вращения

ФЗТ (USA), ФАТ (UAA) – формирователи задания и амплитуды тока;

ФЧВ (UFY) – фазочувствительный выпрямитель;

ЦАП (UZY), АЦП (UYZ) – преобразователи: цифро-аналоговый и аналого-цифровой

ЦИ (AJZ) – цифровой интегратор

БС (AM), БП (AG), БЗ (AF), БТО (AAF), БПК (AGC) – блоки: силовой, питания, защиты, токоограничения и подзаряда конденсаторов

КУ (AD), АЗ (AD), НЗ (AH), ЗО (AF) – корректирующее устройство и звенья: аperiodическое, нелинейное, ограничения

ЛУ (AD) – логическое устройство

УС (AS) – устройство согласования

УВ (AU) – устройство ввода

МУ (AX), ДУ (AP) – множительное и делительное устройства

Ф (F) – фильтр

РИ (AZ) – распределитель импульсов

РЭ (AK) – релейный элемент

ПХ (SA) – переключатель характеристик

ТК (K) – транзисторный ключ

Р<sub>с</sub> (RM), Р<sub>и</sub> (RC) – редукторы силовой и измерительный

## 51.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Автоматическое управление электроприводами (ЭП) сводится к выполнению системами управления электропривода (СУ ЭП) заданного исполнительному органу рабочей машины (ИОРМ) режима работы без непосредственного участия оператора.

СУ ЭП представляет собой автоматизированный ЭП с управляемым преобразовательным устройством, обеспечивающий управление движением ИОРМ в переходных и установившихся режимах в соответствии с заданным алгоритмом управления.

СУ ЭП классифицируются следующим образом.

*Релейные СУ ЭП.* Они осуществляют управление процессами пуска, реверсирования и торможения двигателей постоянного и переменного тока при питании их от сети с неизменным напряжением.

*Регулируемые СУ ЭП (СУ РЭП).* Они осуществляют стабилизацию скорости и момента с заданной точностью в установившихся и переходных режимах при действии возмущающих воздействий.

*Следящие СУ ЭП (СУ СЭП).* Они представляют собой замкнутую динамическую систему управления, отрабатывающую произвольный закон задания положения с допустимой погрешностью. Сюда же относятся позиционные ЭП (СУ ПЭП), являющиеся частным случаем следящих, когда отрабатывается постоянное заданное положение с заданной погрешностью.

*Программно-регулируемые СУ ЭП,* называемые программными СПУ ЭП. Они обеспечивают управление индивидуального или группового ЭП по заданной программе.

*Адаптивные СУ ЭП (СУ АЭП).* Они осуществляют управление с учетом заранее неизвестных изменений параметров ЭП при изменениях внешних возмущающих воздействий.

## 51.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Автоматизированный ЭП, представляющий собой электромеханическую систему, включает в себя комплекс связанных между собой механических и электротехнических устройств. Весь этот комплекс устройств, их элементов и связей между ними изображается на чертежах в виде схем, представ-

ляющих собой графические конструкторские документы (см. разд. 10). Виды и типы схем установлены ГОСТ 2.701-76 и СТ СЭВ 527-77. По виду устройств схемы разделяются на электрические, гидравлические, пневматические, кинематические и др. Электрические схемы по типу (назначению) разделяются на структурные, функциональные, принципиальные, эквивалентные, соединений, подключений, расположения и др. Правила выполнения схем регламентируются ГОСТ 2.702-75 и СТ СЭВ 158-75 (см. § 10.4). Каждому устройству, их элементам и функциональным частям, входящим в схему, присваивается буквенно-цифровое позиционное обозначение согласно ГОСТ 2.710-81 (см. § 10.4). Электротехнические устройства и их элементы в электрических схемах изображаются условными графическими обозначениями согласно различным ГОСТ (см. § 10.5 и [51.2]).

### 51.3. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ И ИХ ВЫБОР

Элементы, из которых состоят СУ ЭП, весьма разнообразны. К ним относятся электрические машины (см. разд. 25, 26), трансформаторы (разд. 22), полупроводниковые преобразователи (разд. 32), электромашинные, магнитные и полупроводниковые усилители (разд. 26, 32), датчики (разд. 29), тахогенераторы (разд. 26), электрические аппараты (разд. 29, 30), бесконтактные логические элементы серии «Логика И» [51.7], микросхемы типа К511, К155 и др. [51.1], а также элементы универсальной блочной системы регулирования: аналоговые УБСР-АИ и дискретные УБСР-ДИ [51.2, 51.9, 51.33] и комплекс технических микропроцессорных средств МикроДАТ [51.53].

### 51.4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИСТЕМАМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Техническое задание на ЭП включает:

- а) технологические режимы работы объекта управления, определяющие режим работы и мощность электродвигателя, преобразователя и других устройств СУ ЭП;
- б) род тока и напряжение питания ЭП;
- в) тип двигателя, преобразователя и системы управления;
- г) статические (диапазон регулирования, жесткость механической характеристики) и динамические (характер процесса, быстродей-

ствие и перерегулирование) показатели автоматического регулирования скорости при заданных возмущениях;

д) энергетические показатели ЭП (КПД и  $\cos \varphi$ );

е) климатические условия работы, окружающую среду и др.

При проектировании СУ ЭП к ним предъявляются следующие требования:

- 1) простота, гибкость и удобство управления;
- 2) высокая надежность систем управления;
- 3) наличие защиты, сигнализации и индикации, возможность диагностики неисправностей;
- 4) удобство монтажа, эксплуатации и ремонта;
- 5) минимальные массогабаритные и экономические показатели;
- 6) требования охраны труда, включающие безопасность обслуживания и противопожарные мероприятия.

### 51.5. РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Релейные СУ ЭП осуществляют управление процессами пуска, реверса и торможения двигателей постоянного и переменного тока при питании их обмоток от питающих сетей с постоянным напряжением. Схемы релейных СУ ЭП выполняются с контактными (реле, контакторы) и бесконтактными (логические элементы) электрическими аппаратами. Обычно схемы с контактными аппаратами составляются из типовых узлов, обеспечивающих управление скоростью и моментом двигателей по принципам времени, скорости, тока и пути. Аппараты управления и преимущественная область применения принципов управления, их достоинства и недостатки приведены в табл. 51.1.

В электрических схемах релейных СУ ЭП используются также типовые узлы электрической защиты, обеспечивающие нулевую, максимально- и минимально-токовую, тепловую, путевую и специальную защиты, повышающие надежность работы схем и исключающие выход из строя электрического оборудования в аварийных ситуациях.

Релейные системы управления двигателями постоянного и переменного тока с контактными электрическими аппаратами выпускаются в виде станций управления, представляющих собой объединенное общей конструкцией комплектное устройство, предназначенное для дистанционного автоматического управле-

Таблица 51.1. Принципы управления ЭП и области их применения

Принцип	Аппаратура управления	Достоинства	Недостатки	Преимущественная область применения
Времени	Реле времени. электромагнитные РЭВ-800, РЭВ-80, пневматические РКВ, полупроводниковые ВЛ, герконовые РВГ, РС-30	1. Простота, надежность 2. Примерное постоянство времени пуска и торможения даже при значительном изменении $M_c$ , $J$ , $U_{сети}$ и $\Theta$	Возрастание толчков пускового тока и момента при возрастании $M_c$ и $J$	Пуск и динамическое торможение
Скорости (частоты вращения)	Реле напряжения РЭВ-820, РЭВ-301, РП-20, РП-21, РП-23, реле контроля скорости РКСМ	Простота, дешевизна, малые массы и габаритные размеры	1. Трудность настройки контакторов ускорения на разные напряжения втягивания 2. Зависимость времени пуска и торможения от $M_c$ , $J$ , $U_{сети}$ и $\Theta$ 3. Возможность задержки процесса пуска на промежуточной ступени и перегрев резисторов	Торможение двигателей постоянного и переменного тока. Синхронизация синхронных двигателей
Тока	Реле тока РЭ-70, РЭ-530, РЭ-570, РЭВ-830, РЭВ-870, РЭВ-302	Поддержание тока и момента при пуске и торможении на определенном уровне	1. Невозможность обеспечения постоянства времени пуска и торможения при колебаниях $M_c$ , $J$ , $U_{сети}$ 2. Возможность задержки процесса пуска на промежуточной ступени и перегрев резисторов	Ослабление и усиление магнитного потока ДПТ при стабилизации тока. Синхронизация синхронных двигателей
Пути	Путевые и конечные выключатели типов ВК, БВК, МП, ВП, ВПБ и др.	Простота	Сравнительно невысокая точность	—

ния какой-либо электрической установкой с элементарной первичной защитой. Электротехнической промышленностью выпускаются нормализованные серии станций управления общего применения: станции управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутыми и фазными роторами, многоскоростными асинхронными двигателями, синхронными двигателями и двигателями постоянного тока [51.5, 51.6]. Кроме станций управления общего применения выпускаются серии специализированных станций управления ЭП для металлургической, металлообрабатывающей, электротехнической, бумажной, полиграфической, текстильной, химической, горнодобывающей и нефтяной отраслей промышленности, станции управления энергетическими установками и ЭП подъемно-транспортных устройств и др.

За последнее время типовые узлы и схемы релейного управления ЭП переменного и постоянного тока не претерпевают изменений

[см. 51.1–51.4] и в настоящем издании справочника не приводятся.

Релейные схемы с контактными аппаратами в свое время получили широкое распространение для управления многодвигательными ЭП рабочих машин различных технологических установок. Однако невысокая надежность работы таких схем и ограниченный срок службы электромагнитных реле привели к использованию в СУ ЭП ИОРМ бесконтактных логических элементов.

Схемы релейных СУ ЭП с бесконтактными логическими элементами могут составляться из типовых узлов [51.7] или с использованием различных методов логического синтеза [51.8]. Для создания таких схем могут использоваться логические элементы серии «Логика И» [51.7], построенные на микросхемах К511, или микросхемы К155 и др.

Однако использование в электрических схемах ЭП отдельных бесконтактных элемен-

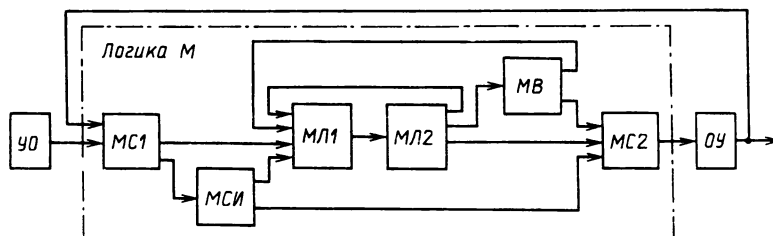


Рис. 51.1. Структурная схема модульной логики серии М

тов или микросхем и создание на их основе СУ ЭП вызывает определенные трудности на предприятиях, изготавливающих серийные установки. Для этих целей используются комплектные бесконтактные устройства управления серии «Логика М» и программируемые контроллеры.

Матричная логика серии М [51.10] — это устройство жесткой логики. Она позволяет создавать схемы управления средней сложности с числом входов от 20 до 100 и выходов не более 10 для металлорежущих станков и других механизмов.

Конструктивно устройство выполнено в виде встраиваемой в нормализованные станции управления стандартизованной кассеты БУК-6, в которой размещены платы унифицированных модулей. Модули выполнены на микроэлектронной элементной базе помехоустойчивых интегральных микросхем серии К511. Тип логики — отрицательная. Структурная схема устройства «Логика М» показана на рис. 51.1.

Логика включает в себя: модули согласования МС1, МС2; модули логики МЛ1, МЛ2; модули времени МВ; модуль счета импульсов МСИ. Кроме того, в логике имеются модули согласования МС22, МС23, МС24; модуль логики (МЛ); модули времени МВ1 и МВ2; модуль-коммутатор (МК); модуль стабилизации напряжения ключевой (МСК); модуль удлинительный (МУ) и модуль связи (МСв).

Модули МС1, МС22 обеспечивают согласование по уровням с управляющими органами УО и гальваническую развязку входных сигналов с напряжением — 12, 24 и 110 В. Они выполнены на герконовых реле РПГ-6 и имеют 8, 16 или 32 входа. Модули МС2, МС23, МС24 обеспечивают согласование по уровням с объектом управления ОУ, гальваническую развязку и усиление по мощности выходных сигналов до — 24 и 110 В, 0,2 А (МС2); ~220 В, 2А (МС22); — 24 В, 1,25 А и ~220 В, 0,2 А (МС23); — 24 и 110 В, 4 и 2 А (МС24)\*. Они выполнены на герконовых реле

\* Знаки — и ~ показывают постоянный и переменный ток.

РПГ-2 (МС2), РПГ8 (МС23), РПГ2 и ключах на симисторах ТС-2-25 (МС22) и РПГ-5 и симисторах Т10-25-5 (МС24). Они имеют восемь, четыре или два выхода. Модули логики представляют собой программируемые диодные матрицы с системой печатных и навесных шин, между которыми для составления схем запаиваются диоды. Они реализуют логические операции И, НЕ, И — НЕ (МЛ1), ИЛИ (МЛ2) и И, ИЛИ, НЕ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ, ПАМЯТЬ (МЛ) и позволяют получить 42 конъюнкции 16 входных сигналов (МЛ1) и 16 дизъюнкции 42 входных сигналов (МЛ2). Модули времени реализуют выдержки времени от 0,2 до 6 с с разбросом  $\pm 10\%$  (МВ1) и от 0,01 до 2000 с с разбросом  $\pm 2\%$ . МВ1 имеет восемь идентичных каналов, а МВ2 — два канала. МСИ осуществляет счет импульсов от 1 до  $10^5$  и имеет два канала. МК коммутирует 32 входа на один выход. МСК обеспечивает стабилизированное напряжение 15 В с точностью  $\pm 5\%$  при токе нагрузки от 0,2 до 2,5 А. МУ позволяет вынуть любой модуль из кассеты для нахождения неисправностей. МСв обеспечивает связь между кассетами.

Входными устройствами логики являются органы управления УО в виде кнопок и ключей управления, конечных выключателей и других устройств, а выходными — объекты управления ОУ, контакторы, тиристорные преобразователи и электрические двигатели.

Для выполнения бесконтактных схем управления наибольшее применение находят программируемые контроллеры (командо-аппараты) (ПК) [51.11, 51.12], позволяющие автоматизировать наиболее часто встречающиеся в промышленности комбинационные и последовательные процессы. ПК представляет собой специализированную управляющую мини-ЭВМ с устройствами входа и выхода, осуществляющую логические функции управления, записанные в виде программы, введенной в память ЭВМ. ПК относится к перепрограммируемой логике, позволяющей быстро заменить программу, что представляет большой интерес для промышленности. ПК подключается к объекту управления

Таблица 51.2. Программируемые контроллеры

Тип ПК	Страна-разработчик	Количество входов-выходов	Разрядность, бит	Объем памяти пользователя, К слов	Время сканирования 1К логических инструкций, мс	Язык программирования*	Возможность объединения в сеть
Ш9101 ПК1. ПК2	СССР	1024, 256	12, 8	4, 16	20	РКС	Нет
МБ 57.(01 – 03) (ПК32, ПК64, ПК128) Б96-01 КПБ 11-05	СССР	32, 64, 128	8	4	6	РКС	Есть
	СССР СССР	256 1024	4 8	4 64	4 12	РКС, СБА РКС, Мнемокод	Нет Есть
NS-915, NS-205	ЧССР	256, 512	16, 9	4, 23	6, 10	РКС СБА	Нет, Есть Нет
Программа-700, Программа-1024 LPA-512 PLC-2/30 TUC	НРБ	128, 1024	4	8, 16	25, 5	СБА	Есть
	СФРЮ США Япония	512 1024 1024	8 16 16	8 16 8	5 5 5	РКС РКС РКС	Есть Есть Есть
SIMATIK C-5 IPC620-30	ФРГ	16 – 1024	8 – 32	8 – 64	1 – 6	STEP5	Есть
	ФРГ, США Франция	1024 1024	16 16	16 8	5 4	РКС	Есть
SMC-500	Франция	1024	16	8	4	РКС	Есть

\* РКС – релейно-контактные символы; СБА – символы булевой алгебры.

каналами связи и работает с ним в непосредственном взаимодействии в реальном масштабе времени. Такая система управления (рис. 51.2) включает в себя программируемый контроллер ПК, входные и выходные устройства ВУ, устройства силовой автоматики УСА и источники питания ИП. ПК содержит центральное процессорное устройство ЦПУ, обеспечивающее хранение и реализацию управляющей программы, устройства сопряжения с входами  $УС_{вх}$  и выходами  $УС_{вых}$ , осуществляющие согласование параметров электрических внешних и внутренних цепей устрой-

ства, и автономный источник питания АИП. Входными устройствами являются командные органы КО и датчики индикации состояния объекта управления Д, выходными – исполнительные элементы управления ИЭУ и сигнализации ИЭС и электрические двигатели ЭД.

ПК характеризуется числом входов и выходов, определяющих, с одной стороны, возможности использования ПК, а с другой – его габаритные размеры и стоимость. Поэтому ПК выпускается на 64, 128, 256 и 1024 входов-выходов с напряжениями 220 и 110 В переменного тока и 110 и 24 В постоянного.

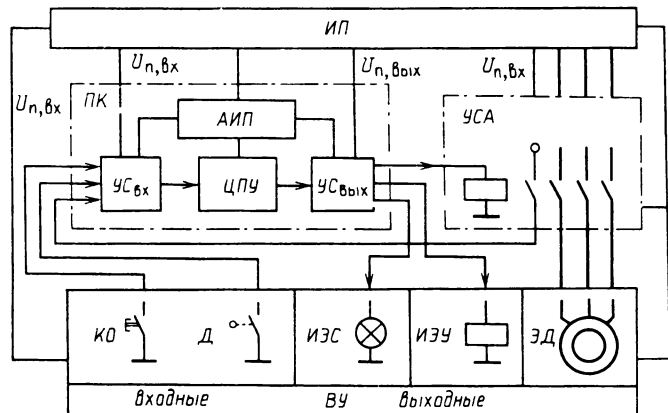


Рис. 51.2. Упрощенная структурная схема системы управления с программируемым контроллером



Структура ПК организуется по блочно-модульному принципу, что позволяет выбирать конкретный комплект модулей в зависимости от характеристик автоматизируемого объекта — от простых схем управления до сложных систем комплексного управления оборудованием с решением задач технической диагностики, неисправностей и т. п.

В СССР выпускаются ПК типа МБ 57 (микроДАТ) (см. § 51.10) [51.13] и Ш9101 (ПК-1) [51.14] разработки Минприбора и ВНИИЭлектропривода, используются ПК социалистических стран и разнообразных зарубежных фирм (табл. 51.2) [51.54].

Для реализации схем управления может использоваться стандартная мини-ЭВМ (см. § 51.10), что, однако, может оказаться нецелесообразным по экономическим соображениям.

## 51.6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### Общие положения

Системы управления регулируемого электропривода (СУ РЭП) обеспечивают стабилизацию скорости и момента двигателя с заданной точностью. Они выполняются в виде замкнутых систем с питанием электрических двигателей от управляемых преобразователей напряжения и частоты, получивших название УП—Д. Такие системы обеспечивают стабилизацию скорости как основной регулируемой координаты ЭП с высокой точностью — до 0,1—0,001 %. Стабилизация момента используется для ограничения тока двигателя в динамических и статических режимах.

Системы стабилизации скорости и момента подразделяются по роду тока или типу двигателя и преобразователя на системы—ЭП постоянного и переменного тока, по принципу действия — на непрерывные (аналоговые) и дискретные (цифровые), по принципу регулирования — на статические и астатические, по структуре — на системы с суммирующим усилителем и с подчиненным регулированием координат.

В качестве управляемых преобразователей для ЭП используются вентильные преобразователи с транзисторами и тиристорами. Наибольшее распространение получили тиристорные ЭП, включающие тиристорные реверсивные преобразователи (см. разд. 32) и двигатели. Тиристорные преобразователи очень широко применяются в ЭП всех отраслей промышленности для питания якорей и обмоток возбуждения двигателей и генераторов постоян-

ного тока и для питания двигателей переменного тока (частотные преобразователи и преобразователи переменного напряжения).

### Системы управления регулируемых электроприводов постоянного тока с суммирующим усилителем

В системах с суммирующим усилителем обеспечивается стабилизация скорости и момента с помощью непрерывных и задержанных обратных связей (ОС). Стабилизация скорости осуществляется в замкнутых системах с отрицательными обратными связями (ООС) по скорости, напряжению и ЭДС двигателя и с положительной (ПОС) по току якоря двигателя (рис. 51.3, а), где  $M$ ,  $LM$  — якорь и обмотка возбуждения двигателя постоянного тока;  $P(U)$  — преобразователь;  $Y(A)$  — суммирующий усилитель;  $3C(SR)$  — датчик скорости;  $ДН(UV)$ ,  $ДТ(UA)$ ,  $ДС(BR)$  — датчики напряжения, тока и скорости;  $U_{3c}$ ,  $u_y$ ,  $u_{y.n}$ ,  $u_n$ ,  $u_T$ ,  $u_3$ ,  $u_c$  — напряжения задания скорости, управления системы и преобразователя и обратных связей по напряжению, току, ЭДС, скорости.

Электромеханическая характеристика (ЭМХ)  $\omega = f(I)$  систем стабилизации скорости рассчитывается по уравнению, записанному для системы условно при действии всех ОС:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_{3c} k_y k_n k_d}{1 + (k_c k_d + k_3 + k_n) k_y k_n} -$$

$$- \frac{IR k_d (1 + k_n R_d - k_T) \frac{k_y k_n}{R}}{1 + (k_c k_d + k_3 + k_n) k_y k_n},$$

где  $k_y = u_{y.n}/u_y$ ,  $k_n = e_n/u_{y.n}$ ,  $k_d = 1/k\Phi$  — коэффициенты усиления усилителя, преобразователя и передачи двигателя;  $k_c = u_c/\omega$ ,  $k_3 = u_3/e_d$ ,  $k_n = u_n/u_d$ ,  $k_T = u_T/i$  — коэффициенты ОС по скорости, ЭДС, напряжению и току двигателя;  $R$ ,  $R_d$  — сопротивления цепи якоря П—Д и цепи якоря двигателя;  $e_n$ ,  $e_d$  — ЭДС преобразователя и двигателя;  $k$ ,  $\Phi$  — конструктивный коэффициент и магнитный поток двигателя.

Из общего уравнения можно получить уравнение ЭМХ при действии любой конкретной ОС, приняв равными нулю коэффициенты других связей.

Характеристики ОС приведены в табл. 51.3. Динамические режимы системы стабилизации скорости двигателя оцениваются с помощью эквивалентной структурной схемы

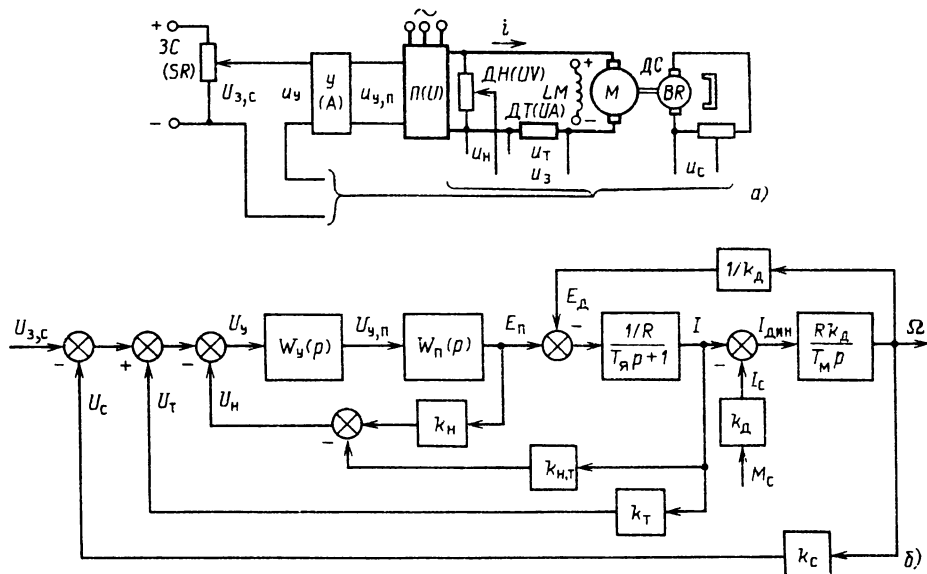


Рис. 51.3. Система стабилизации скорости двигателя постоянного тока с суммирующим усилителем:  
 а – функциональная схема; б – эквивалентная структурная схема

Таблица 51.3. Характеристики обратных связей

Обратная связь	Статизм стабилизации скорости $\delta$	Достоинство	Недостаток	Применение
Отрицательная по скорости	Возможно $\delta = 0$ в пределе при $k_y \rightarrow \infty$ , когда $\omega = \omega_0$	Высокая точность стабилизации скорости	Наличие тахогенератора	Широкое
Отрицательная по напряжению	$\delta \geq \delta_c$ , так как в пределе при $k_y \rightarrow \infty$ $\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c$ , где $\delta_c$ , $\Delta\omega_c$ – статизм и перепад скорости на естественной ЭМХ двигателя	Простота изменения напряжения	Невысокая точность стабилизации скорости	Малое при невысоких требованиях стабилизации скорости
Положительная по току	Возможно $\delta = 0$ при $k_y = R/\lambda_T k_{II}$ , но только при $k_{II} = \text{const}$	Простота изменения тока	Зависимость точности стабилизации скорости от нелинейности характеристики преобразователя $\lambda_e$ не обеспечивает стабилизацию скорости при колебаниях напряжения питающей сети	В чистом виде не применяется
Отрицательная по ЭДС	$0 < \delta < \delta_c$ из-за неучета действия реакции якоря и изменения переходного сопротивления щеток двигателя	Сравнительная простота изменения ЭДС	Невысокая точность стабилизации скорости	Применяется при невысоких требованиях стабилизации скорости и невысоких диапазонах регулирования скорости

(рис. 51.3, б), составленной при действии условно ОС по скорости, напряжению и току, где  $U_{3,c}$ ,  $U_y$ ,  $U_{y,n}$ ,  $U_c$ ,  $U_n$ ,  $U_T$  — изображения напряжений задания скорости, управления системы и преобразователя, ОС по скорости, напряжению и току;  $E_n$ ,  $E_d$ ,  $I$ ,  $I_c$ ,  $I_{дин}$ ,  $\Omega$ ,  $M_c$  — изображения ЭДС преобразователя и двигателя, тока двигателя (полного, статического, динамического), скорости и статического момента;  $k_{н,т} = k_n R_n$  — коэффициент ОС по напряжению (токовая составляющая);  $R_n$  — сопротивление силовой цепи П.

Из структурной схемы получена передаточная функция системы

$$W_c(p) = \frac{\Omega}{U_{3,c} - W_{M_c}(p) M_c(p)} = \frac{k_y k_n k_d}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где  $W_{M_c}(p) = (b_2 p^2 + b_1 p + b_0) / (k_y k_n k_d)$  — передаточная функция звена преобразования статического момента, вынесенного на вход системы (показано штриховой линией).

Дифференциальное уравнение скорости

$$a_3 \frac{d^3 \omega}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \omega}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_0 \omega =$$

$$= k_y k_n k_d U_{3,c} - \left( b_2 \frac{d^2 M_c}{dt^2} + b_1 \frac{dM_c}{dt} + b_0 M_c \right),$$

где  $U_{3,c}$  — напряжение задания скорости (задающее воздействие);  $M_c$  — статический момент (возмущающее воздействие).

Дифференциальное уравнение тока

$$a_3 \frac{d^3 i}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i}{dt^2} + a_1 \frac{di}{dt} + a_0 i = k_y k_n \frac{T_m}{R} \frac{dU_{3,c}}{dt} + c_1 \frac{dM_c}{dt} + c_0 M_c.$$

Коэффициенты уравнения для систем каждой ОС приведены в табл. 51.4, в которой дополнительно применены следующие обозначения:  $T_n$ ,  $T_y = L/R$ ,  $T_m = J R k_d^2$ ,  $T_{я,д} = L_d/R_d$  — постоянные времени: преобразователя, электромагнитная и электромеханическая ЭП и электромагнитная двигателя;  $L$ ,  $L_d$  — индуктивности цепи якоря П—Д и цепи якоря двигателя;  $J$  — момент инерции ЭП.

При наличии упругого звена в передающем механизме ЭП между двигателем и механизмом дифференциальное уравнение скорости получает следующий вид:

$$a_5 \frac{d^5 \omega_2}{dt^5} + a_4 \frac{d^4 \omega_2}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 \omega_2}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \omega_2}{dt^2} +$$

Таблица 51.4. Коэффициенты дифференциальных уравнений систем стабилизации скорости и тока

Коэффициент	Вид ОС		
	Отрицательная и положительная по скорости	Отрицательная и положительная по напряжению	Отрицательная и положительная по току
$a_3$	$T_n T_y T_m$	$T_n T_y T_m$	$T_n T_y T_m$
$a_2$	$(T_n + T_y) T_m$	$T_n + T_y + k_n k_y k_n \frac{R_d}{R} T_{я,д}$	$(T_n + T_y) T_m$
$a_1^*$	$T_n + T_m$	$T_n + \left( 1 + k_n k_y k_n \frac{R_d}{R} T_{я,д} \right) T_m$	$T_n + \left( 1 \pm \frac{k_T k_y k_n}{R} \right) T_m$
$a_0^*$	$1 \pm k_c k_y k_n k_d$	$1 \pm k_n k_y k_n$	1
$b_2$	$R k_d^2 T_n T_y$	$R k_d^2 T_n T_y$	$R k_d^2 T_n T_y$
$b_1$	$R k_d^2 (T_n + T_y)$	$R k_d^2 \left( T_n + T_y + k_n k_y k_n \frac{R_d}{R} T_{я,д} \right)$	$R k_d^2 (T_n + T_y)$
$b_0^*$	$R k_d^2$	$R k_d^2 (1 \pm k_n k_y k_n)$	$R k_d^2 \left( 1 \pm \frac{k_T k_y k_n}{R} \right)$
$c_1$	$k_d T_n$	$k_d T_n$	$k_d T_n$
$c_0^*$	$k_d (1 \pm k_c k_y k_n k_d)$	$k_d (1 \pm k_n k_y k_n)$	$k_d$

\* Знак минус принимается для положительной связи, а плюс — для отрицательной.

Таблица 51.5. Значения коэффициентов дифференциального уравнения скорости при наличии упругости в передающем устройстве ЭП

Коэффициент	Вид ОС		
	Отрицательная по скорости	Отрицательная по напряжению	Отрицательная и положительная по току
$a_5$	$\frac{J_2}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$
$a_4$	$\frac{J_2}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}} + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} T_{\text{яД}}) T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$
$a_3$	$\frac{J_2}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{М}}) + \gamma T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} [T_{\Pi} + T_{\text{М}}(1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}})] + \gamma T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} \left[ T_{\Pi} + T_{\text{М}} \left( 1 \mp \frac{k_{\text{r}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}}{R} \right) \right] + \gamma T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$
$a_2$	$\frac{J_2}{c} (1 + k_{\text{c}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} k_{\text{д}}) + \gamma (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} (1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}) + \gamma (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$	$\frac{J_2}{c} + \gamma (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$
$a_1$	$T_{\Pi} + \gamma T_{\text{М}}$	$T_{\Pi} + \gamma T_{\text{М}} (1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}})$	$T_{\Pi} + \gamma T_{\text{М}} \left( 1 \mp \frac{k_{\text{r}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}}{R} \right)$
$a_0$	$1 + k_{\text{c}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} k_{\text{д}}$	$1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}$	1
$b_2$	$R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$	$R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$	$R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$
$b_1$	$R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}})$	$R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}} + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} T_{\text{яД}})$	$R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}})$
$b_0$	$R k_{\text{д}}^2$	$R k_{\text{д}}^2 (1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}})$	$R k_{\text{д}}^2 \left( 1 \mp \frac{k_{\text{r}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}}{R} \right)$
$q_4$	$\frac{1}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{1}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$	$\frac{1}{c} T_{\Pi} T_{\text{я}} T_{\text{М}}$
$q_3$	$\frac{1}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$	$\frac{1}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}} + T_{\text{яД}}) T_{\text{М}}$	$\frac{1}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{я}}) T_{\text{М}}$
$q_2$	$\frac{1}{c} (T_{\Pi} + T_{\text{М}}) + R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$	$\frac{1}{c} [T_{\Pi} + T_{\text{М}}(1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}})] + R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$	$\frac{1}{c} \left[ T_{\Pi} + T_{\text{М}} \left( 1 \mp \frac{k_{\text{r}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}}{R} \right) \right] + R k_{\text{д}}^2 T_{\Pi} T_{\text{я}}$
$q_1$	$\frac{1}{c} (1 + k_{\text{c}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} k_{\text{д}}) + R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}})$	$\frac{1}{c} (1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}) + R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}} + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}} T_{\text{яД}})$	$\frac{1}{c} + R k_{\text{д}}^2 (T_{\Pi} + T_{\text{я}})$
$q_0$	$R k_{\text{д}}^2$	$R k_{\text{д}}^2 (1 + k_{\text{H}} k_{\text{y}} k_{\text{п}})$	$R k_{\text{д}}^2 \left( 1 \pm \frac{k_{\text{r}} k_{\text{y}} k_{\text{п}}}{R} \right)$

$$\begin{aligned}
 &+ a_1 \frac{d\omega_2}{dt} + a_0 \omega_2 = k_{\text{y}} k_{\text{п}} k_{\text{д}} U_{3,\text{с}} - b_2 \frac{d^2 M_{\text{с1}}}{dt^2} + \\
 &+ b_1 \frac{dM_{\text{с1}}}{dt} + b_0 M_{\text{с1}} - q_4 \frac{d^4 M_{\text{с2}}}{dt^4} + q_3 \frac{d^3 M_{\text{с2}}}{dt^3} + \\
 &+ q_2 \frac{d^2 M_{\text{с2}}}{dt^2} + q_1 \frac{dM_{\text{с2}}}{dt} + q_0 M_{\text{с2}},
 \end{aligned}$$

где  $M_{\text{с1}}$ ,  $M_{\text{с2}}$  — моменты нагрузки на валах

двигателя и исполнительного органа рабочей машины.

Значения коэффициентов при этом приведены в табл. 51.5, где  $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$  — отношение масс;  $c$  — коэффициент жесткости упругого элемента;  $T_{\text{М}} = J_1 R k_{\text{д}}^2$ .

Стабилизация момента (тока) двигателя обеспечивается в СУ ЭП с задержанной отри-

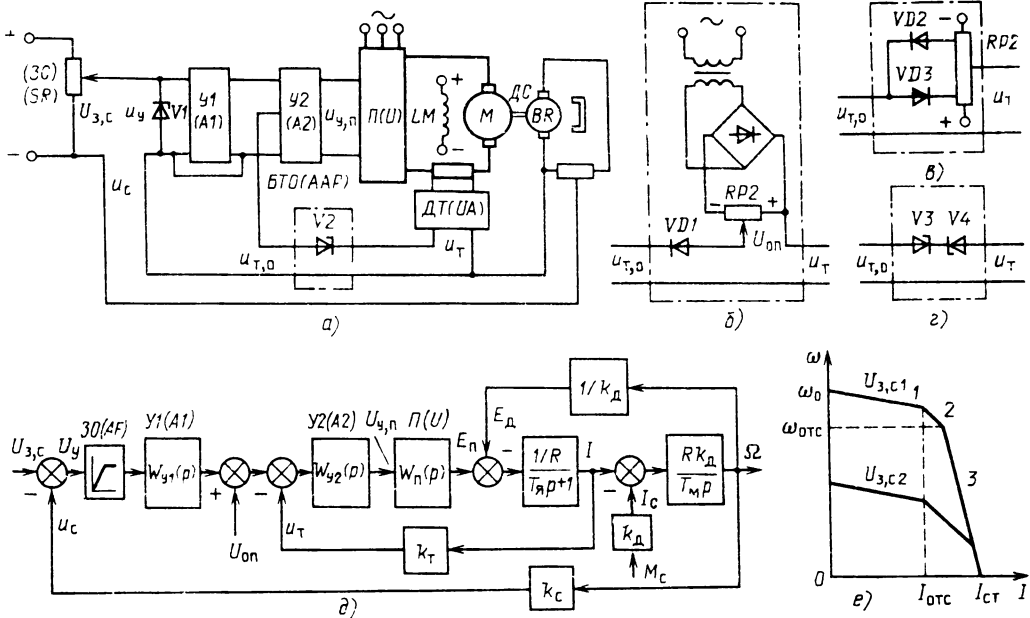


Рис. 51.4. Система стабилизации скорости и момента (тока) двигателя постоянного тока: а – функциональная схема; б – з – узлы, обеспечивающие опорное напряжение; д – эквивалентная структурная схема; е – электромеханические характеристики

цательной ОС по току двигателя (с отсечкой) (рис. 51.4) или с положительной ОС по скорости или ЭДС двигателя [51.16]. Задержанная ОС по току осуществляется блоком токовой отсечки БТО (AAF) (рис. 51.4, а), который выполняется с регулируемым значением опорного напряжения  $U_{оп}$  в виде источника опорного напряжения и диода VD1 (рис. 51.4, б), или диодов VD2, VD3 в реверсивном ЭП (рис. 51.4, в), или с постоянным значением  $U_{оп}$ , обеспечиваемым стабилитроном V2 в неревверсивном ЭП (рис. 51.4, а) и стабилитронами V3, V4 в реверсивном (рис. 51.4, з).

Задержанная отрицательная ОС по току подается на вход системы [51.3, 51.17]. При использовании операционных усилителей она подается на усилитель Y2 (A2) (рис. 51.4, а).

ОС, использующиеся для стабилизации скорости, выполняются также задержанными, что облегчает работу токовой отсечки и обеспечивает в динамических режимах постоянство ускорений и замедлений. Такая задержка осуществляется с помощью ограничения сигнала управления (рис. 51.4, а) стабилитроном V1 (или диодом), включенным на входе Y1 (A1), или ограничения выходного напряжения Y1 (A1). Отсечка по скорости (связь по скорости перестает действовать) наступает при  $\omega_{отс} = (U_{3,с} - U_{V1})/k_c$ . ЭМХ такого ЭП

(рис. 51.4, е) имеет два или три участка в зависимости от значений тока и скорости отсечки  $I_{отс}$  и  $\omega_{отс}$ . Стабилизация момента осуществляется при изменении тока от тока отсечки до тока стопорения.

Регулирование скорости обеспечивается изменением  $U_{3,с}$  (например,  $U_{3,с1}$ ,  $U_{3,с2}$ ). Расчет ЭМХ на участках 1 и 2 производится, как в схеме рис. 51.3, а уравнение ЭМХ на участке 3 в режиме стабилизации момента (тока) двигателя имеет вид

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = (U_{V1}k_{y1} + U_{оп})k_{y2}k_nk_d - IRk_d[1 + k_Tk_{y2}k_n/R].$$

Динамические режимы в таких системах оцениваются с помощью эквивалентной структурной схемы (рис. 51.4, д), где ограничение показано звеном ограничения 30 (AF).

Передаточная функция системы на участке стабилизации момента (тока)

$$W(p) = \frac{\Omega}{U_{V1}k_{y1} + U_{оп} - W_{M_c}(p)M_c(p)} = \frac{k_{y2}k_nk_d}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}.$$

Дифференциальное уравнение скорости на

участке стабилизации момента (тока)

$$a_3 \frac{d^3 \omega}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \omega}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_0 \omega = k_{y2} k_n k_d (U_{V1} k_{y1} + U_{on}) - \left( b_2 \frac{d^2 M_c}{dt^2} + b_1 \frac{dM_c}{dt} + b_0 M_c \right).$$

Дифференциальное уравнение тока на участке стабилизации момента (тока)

$$a_3 \frac{d^3 i}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i}{dt^2} + a_1 \frac{di}{dt} + a_0 i = c_1 \frac{dM_c}{dt} + c_0 M_c.$$

Коэффициенты  $a-c$  принимаются из табл. 51.4 для ООС по току двигателя.

В быстродействующих тиристорных ЭП, имеющих малую индуктивность в якорной цепи двигателя, для ограничения тока и стабилизации момента двигателя в динамических режимах применяются системы с упреждающим токоограничением, действующим в функции скорости или ЭДС двигателя. В этих системах стабилизация скорости осуществляется с помощью ООС по скорости, а стабилизация момента (тока) – с помощью ПОС по скорости или ЭДС двигателя [51.2, 51.16].

Требуемое качество переходных процессов в СУ РЭП с суммирующим усилителем обеспечивается с помощью пассивных последовательных и параллельных корректирующих устройств [51.16, 51.56].

**Системы управления регулируемых электроприводов постоянного тока с подчиненным регулированием координат**

В тиристорных ЭП большое распространение получили многоконтурные системы управления с подчиненным регулированием координат (см. рис. 50.11) [51.15, 51.2]. В таких системах настройка контуров и выбор типа регулятора осуществляются по техническому (модульному) (ТО) и симметричному (СО) оптимумам. При ТО принимаются передаточные функции:

регулятора

$$W_{рег n}(p) = \frac{1}{2^n T_{\mu p}} \frac{1}{W_{кн}(p)} \frac{k_{o,cn-1}}{k_{o,cn}};$$

разомкнутого оптимизируемого контура (упрощенная)

$$W_{опт, p n}(p) = 1/[2^n T_{\mu p} (2^{n-1} T_{\mu p} + 1)];$$

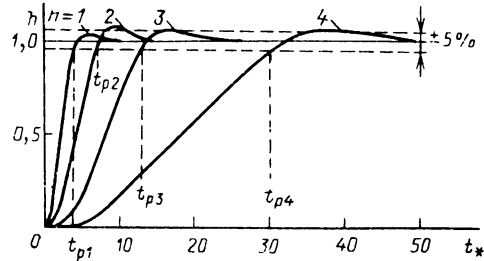


Рис. 51.5. Переходные процессы в системе управления с подчиненным регулированием координат

замкнутого оптимизируемого контура (упрощенная)

$$W_{опт, n}(p) = 1/\{[2^n T_{\mu p} (2^{n-1} T_{\mu p} + 1) + 1] k_{o, cn}\},$$

где  $n$  – номер контура;  $T_{\mu}$  – сумма малых некомпенсируемых постоянных времени системы;  $W_{кн}(p)$  – передаточная функция компенсируемой части  $n$ -го контура;  $k_{o, cn-1}$ ,  $k_{o, cn}$  – коэффициенты ОС  $n-1$ -го и  $n$ -го контуров регулирования.

Использование упрощенных передаточных функций, полученных при пренебрежении в полиноме знаменателя членами с порядком выше второго, позволяет упростить настройку и анализ СУ РЭП при достаточной инженерной точности.

Переходные функции для  $n=1 \div 4$  при единичном сигнале задания координаты контура приведены в табл. 51.6. Построенные по ним переходные процессы в относительном времени  $t_* = 1/T_{\mu}$  (рис. 51.5) показывают, что для таких СУ РЭП обеспечивается затухающий колебательный процесс с малыми перерегулированиями  $\sigma$ , но с увеличением номера контура резко (в  $2^{n-1}$  раз) снижается быстродействие системы.

При настройке на СО передаточные функции регулятора, разомкнутого и замкнутого оптимизированных контуров принимаются по их передаточным функциям при настройке на ТО, умноженных на  $(2^{n+1} T_{\mu p} + 1)/(2^{n+1} T_{\mu p})$ , т. е.

$$W_{рег n}(p)(CO) = W_{рег n}(p)(TO) \frac{2^{n+1} T_{\mu p} + 1}{2^{n+1} T_{\mu p}};$$

$$W_{опт, p n}(p)(CO) = W_{опт, p n}(p)(TO) \frac{2^{n+1} T_{\mu p} + 1}{2^{n+1} T_{\mu p}};$$

$$W_{опт n}(p)(CO) = W_{опт n}(p)(TO) \frac{2^{n+1} T_{\mu p} + 1}{2^{n+1} T_{\mu p}}.$$

Таблица 51.6. Передаточные и переходные функции оптимизируемого контура

№ контура <i>n</i>	Передаточная функция оптимизируемого контура (полная) $W(p)$	Переходная функция оптимизируемого контура $h(t_*)$	Время регулирования $t_p$	Перерегулирование $\sigma$ , %
1	$\frac{1/k_{0,c1}}{2T_{\mu p}(T_{\mu p} + 1) + 1}$	$1 - e^{-t_*/2} \left( \cos \frac{t_*}{2} + \sin \frac{t_*}{2} \right)$	$4,1 T_{\mu}$	4,3
2	$\frac{1/k_{0,c2}}{4T_{\mu p}[2T_{\mu p}(T_{\mu p} + 1) + 1] + 1}$	$1 - e^{-t_*/2} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-t_*/4} \sin \left( \sqrt{3} \frac{t_*}{4} \right)$	$7 T_{\mu}$	8,0
3	$\frac{1/k_{0,c3}}{8T_{\mu p}\{4T_{\mu p}[2T_{\mu p}(T_{\mu p} + 1) + 1] + 1\} + 1}$	$1 - e^{-t_*/4} \left[ \left( 1 - \frac{t_*}{4} \right) \cos \frac{t_*}{4} + \left( 2 + \frac{t_*}{4} \right) \sin \frac{t_*}{4} \right]$	$13,6 T_{\mu}$	6,2
4	$\frac{1/k_{0,c4}}{16T_{\mu p}\{8T_{\mu p}\{4T_{\mu p}[2T_{\mu p} \times (T_{\mu p} + 1) + 1] + 1\} + 1\} + 1}$	$1 - e^{-t_*/4} + e^{-1,5t_*/16} \times \left[ -2,41 \sin \left( 0,442 \frac{t_*}{4} \right) + 0,166 \cos \left( 0,442 \frac{t_*}{4} \right) \right] + e^{-1,12t_*/4} \times \left[ -0,042 \sin \left( 1,31 \frac{t_*}{4} \right) - 0,166 \cos \left( 1,31 \frac{t_*}{4} \right) \right]$	$30,4 T_{\mu}$	5,2

Таблица 51.7. Вид и параметры регуляторов

Вид регулятора	Электрическая схема регулятора	Передаточная функция регулятора	Соотношения
П		$k$	$k = R_{0,c}/R_{\delta x}$
И		$1/Tp$	$T = R_{\delta x} C_{0,c}$
ПИ		$\frac{k(T_{0,c}p + 1)}{T_{0,c}p} = k + \frac{k}{T_{0,c}p}$	$k = R_{0,c}/R_{\delta x}; T_{0,c} = R_{0,c}C_{0,c}$
ПИД		$\frac{k(T_{0,c}p + 1)(T_{\delta x}p + 1)}{T_{0,c}p} = \frac{k(T_{0,c} + T_{\delta x})}{T_{0,c}} + \frac{k}{T_{0,c}p} + \frac{kT_{\delta x}p}{1}$	$T_{\delta x} = R_{\delta x}C_{\delta x}$

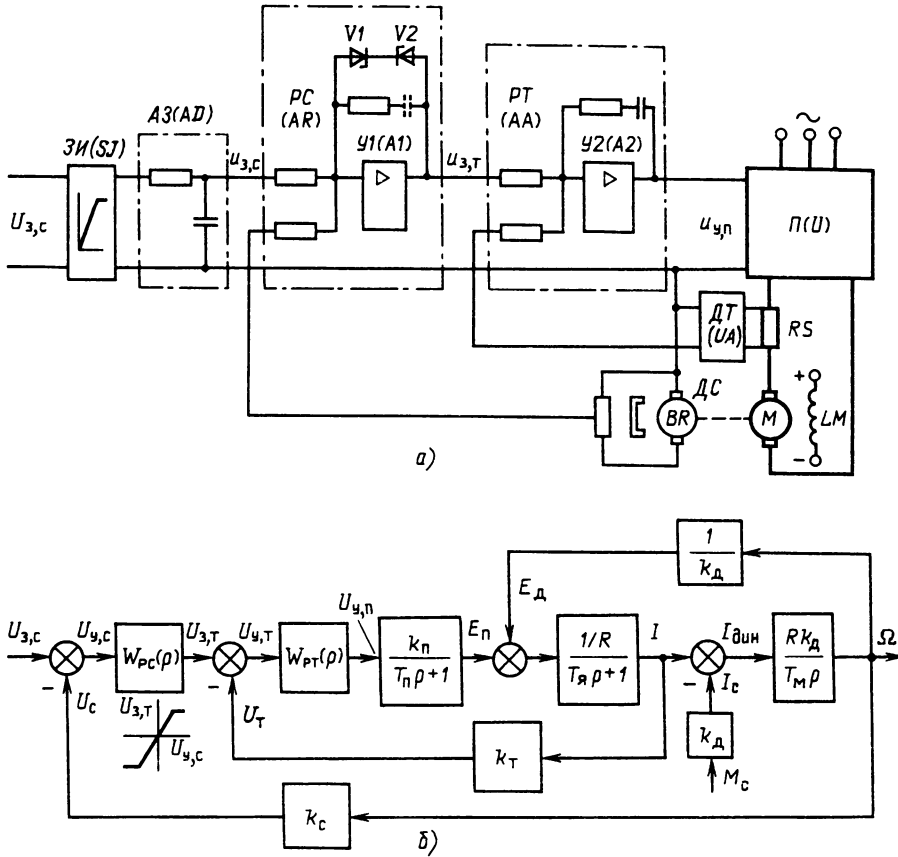


Рис. 51.6. Система управления тиристорного ЭП постоянного тока с однозонным регулированием скорости:  
 а – функциональная схема, б – эквивалентная структурная схема

Такая настройка в ЭП обеспечивает астатическое регулирование и высокое быстродействие при обработке возмущающих воздействий, но динамический процесс при скачкообразных изменениях управляющих воздействий происходит с большим перерегулированием, достигающим до 53%. Здесь требуется применение аperiодических звеньев или задатчиков интенсивности, обеспечивающих плавное нарастание входного сигнала.

В системах управления с подчиненным регулированием координат используются пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы. Они выполняются на операционном усилителе, параметры которого можно выбрать по табл. 51.7.

В тиристорных ЭП постоянного тока системы управления скоростью обычно строятся

двухконтурными с внутренним контуром тока (КТ) и внешним контуром скорости (КС) или контурами напряжения (КН) и ЭДС (КЭ). В системах управления ТВ–Г–Д применяются трехконтурные системы управления с контурами напряжения, тока и скорости. В ЭП с двухзонным регулированием скорости дополнительно применяются контуры магнитного потока (тока возбуждения) (КП) и ЭДС (КЭ) двигателя.

В системах с подчиненным регулированием координат ток двигателя в динамических и установившихся режимах ограничивается допустимым значением за счет снижения сигнала задания КТ  $u_{3,т}$ , осуществляемого ограничением выходного напряжения КС или КН и КЭ.

Система управления тиристорного ЭП (ТП–Д) с однозонным регулированием скорости выполняется двухконтурной с КТ и КС



(рис. 51.6, а). Она содержит: *M, LM* – якорь и обмотку возбуждения ДПТ; *П(U)* – тиристорный преобразователь напряжения (ТП); *PC(AR), PT(AA)* – регуляторы скорости и тока, с операционными усилителями *У1(A1)* и *У2(A2)*; *ДС(BR), ДТ(UA)* – датчики скорости и тока с шунтом *RS*; *A3(AD)* – апериодическое звено; *ЗИ(SJ)* – задатчик интенсивности.

РС принимается с ограничением выходного напряжения, осуществляемого с помощью стабилизаторов *VI* и *V2*, что ограничивает напряжение задания тока  $u_{3,т}$  и соответственно ток двигателя.

В эквивалентной структурной схеме системы (рис. 51.6, б) ТП принимается инерционным с малой некомпенсируемой постоянной времени  $T_M = T_n$ . Настройка КТ при задающем воздействии производится по ТО и принимается ПИ-РТ с передаточной функцией  $W_{РТ}(p)_{ТО}$  при  $n = 1$ , определяемой при пренебрежении действием ОС по ЭДС двигателя. Передаточная функция оптимизированного КТ и переходная функция тока принимаются по табл. 51.6 для контура 1. Переходный процесс тока  $i_* = i/I_{уст} = h(t_*)$ , где  $I_{уст} = u_{3,т}/k_T$ , при единичном скачке задающего напряжения контура ( $u_{3,т} = 1$  В) имеет колебательный характер с перерегулированием  $\sigma = 4,3\%$  и  $t_p = 4,1 T_n$  (см. рис. 51.5 и табл. 51.6 при  $n = 1$ ). Он используется для настройки контура при неподвижном двигателе и отключенной его обмотке возбуждения.

КС может настраиваться на ТО или СО. При настройке на ТО получается однократно интегрирующая система, в которой принима-

ется П-РС с передаточной функцией  $W_{рег n}(p)_{ТО}$  при  $n = 1$ , определяемой при задающем воздействии ( $M_c = 0$ ), когда не действует токоограничение. Передаточная функция оптимизированного КС по задающему воздействию и переходная функция скорости принимаются по табл. 51.6 для контура 2. Переходный процесс скорости  $\omega_* = \omega/\omega_{уст} = h(t_*)$ , где  $\omega_{уст} = \omega_0 = U_{3,с}/k_c$ , при единичном скачке задания скорости ( $U_{3,с} = 1$  В) имеет колебательный характер  $\sigma = 8\%$  и  $t_p = 7 T_n$  и приведен на рис. 51.7, а (кривая 1) (см. рис. 51.5 и табл. 51.6 при  $n = 2$ ).

При этом передаточная функция СУ ЭП по задающему воздействию относительно тока  $W_{т,опт}(p) = I/U_{3,с} = [(Rk_d T_M)/2T_n] W_{опт КС}(p)_{ТО}$  и уравнение переходного процесса тока

$$i_* = i/(I_k T_M/T_n) = \frac{1}{2} e^{-t_*^2/2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} e^{-t_*/4} \left( \sin \frac{\sqrt{3}}{4} t_* - \sqrt{3} \cos \frac{\sqrt{3}}{4} t_* \right),$$

где  $I_k = \omega_0/Rk_d$ . График переходного процесса  $i_* = f(t_*)$  приведен на рис. 51.7, а (кривая 2).

ЭМХ в такой системе при стабилизации скорости – статическая:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_p 4T_n/T_M$$

со статизмом, определяемым статическим падением скорости в разомкнутой системе  $\Delta\omega_p = IRk_d$  и отношением  $4T_n/T_M$ .

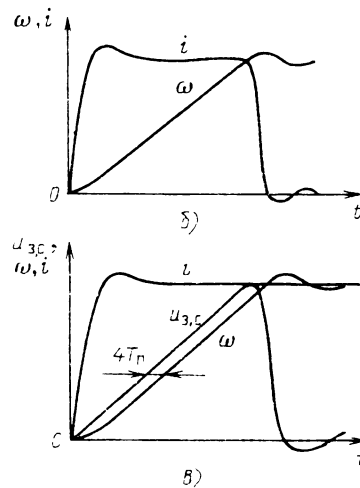
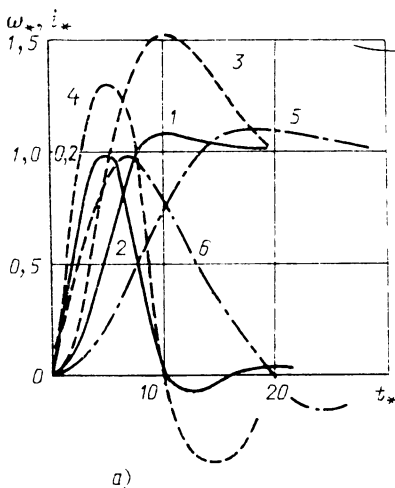


Рис. 51.7. Переходные процессы скорости и тока при задающих воздействиях: а – в линейной СУ ЭП; б – при ограничении тока якоря двигателя; в – с задатчиком интенсивности

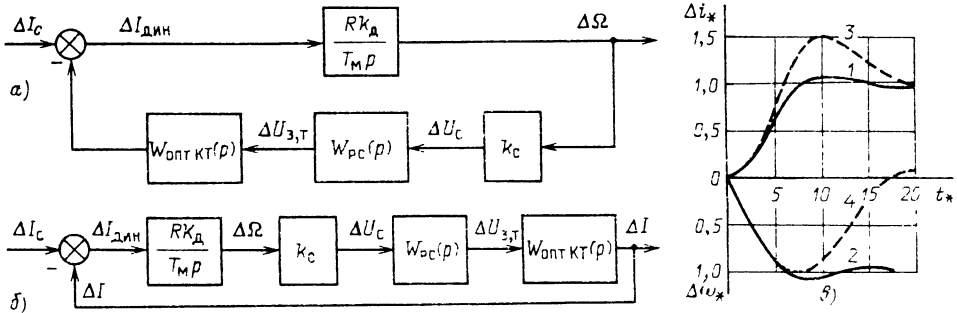


Рис. 51.8. Эквивалентные структурные схемы СУ ЭП при ударном приложении нагрузки с воздействием (а, б) (а – на скорость; б – на ток); переходные процессы тока и скорости (в)

При настройке КС на СО получается двукратно интегрирующая система, в которой принимается ПИ–РС с передаточной функцией  $W_{пер, n}(p)_{\lambda_{ТО}}$  при  $n = 2$ , определяемой при задающем воздействии ( $M_c = 0$ ), когда не действует токоограничение. Передаточная функция КС по задающему воздействию  $W_{опт КС}(p)_{\lambda_{СО}} = W_{опт, n}(p)_{\lambda_{СО}}$  при  $n = 2$ . Уравнение переходного процесса скорости имеет вид

$$\omega_* = \omega / \omega_{уст} = 1 - e^{-t_*/4} \left[ \left( \frac{t_*}{4} - 2 \right) \sin \frac{t_*}{4} + \left( 1 + \frac{3}{4} t_* \right) \cos \frac{t_*}{4} \right].$$

График переходного процесса изображен штриховой линией на рис. 51.7, а (кривая 3). Процесс колебательный форсированный с  $\sigma = 53\%$ .

Передаточная функция СУ ЭП по задающему воздействию относительно тока в такой системе

$$W'_{т, опт}(p) = I / U_{3, c} = Rk_d T_m p W_{опт КС}(p)_{\lambda_{СО}}.$$

Уравнение переходного процесса тока

$$i_* = i / (I_k T_m / T_n) = \frac{1}{2} e^{-t_*/4} \left[ \frac{t_*}{4} \cos \frac{t_*}{4} + \left( \frac{t_*}{2} - 1 \right) \sin \frac{t_*}{4} \right].$$

График тока изображен на рис. 51.7, а штриховой линией (кривая 4).

Для исключения форсирующего действия ПИ–РС на вход системы включается аperiодическое звено АЗ (АД) (см. рис. 51.6, а) с передаточной функцией  $W_{АЗ}(p) = 1 / (8T_n p + 1)$ . Тогда передаточная функция скорости получает вид как в трехконтурной системе. Переходный процесс скорости колебательный с  $\sigma = 6,2\%$

и  $t_p = 13,6 T_n$  (рис. 51.7, а, штрихпунктирная кривая 5).

Уравнение тока при этом имеет вид

$$i_* = \frac{i}{I_k T_m / T_n} = \frac{1}{4} e^{-t_*/4} \left[ \left( 1 - \frac{t_*}{2} \right) \cos \frac{t_*}{4} + 2 \sin \frac{t_*}{4} \right].$$

График тока изображен на рис. 51.7, а штрихпунктирной линией (кривая 6).

При ограничении тока двигателя с помощью РС система обеспечивает постоянство тока и ускорения (рис. 51.7, б). Для изменения требуемого ускорения ( $\epsilon_{тp} = d\omega/dt$ ) в таких системах применяется задатчик интенсивности ЗИ (З) (см. рис. 51.6, а), обеспечивающий требуемый темп нарастания  $U_{3, c}$ . При этом скорость изменяется по закону

$$\omega(t) = \epsilon_{тp} \left\{ t - 4T_n + 2T_n \left[ e^{-t/2T_n} + e^{-t/4T_n} \left( \cos \frac{\sqrt{3}}{4T_n} t + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\sqrt{3}}{4T_n} t \right) \right] \right\},$$

а при затухании экспоненциальных составляющих – по закону

$$\omega(t) = \epsilon_{тp} (t - 4T_n).$$

Графики переходных процессов  $u_{3, c}(t)$ ,  $i(t)$  и  $\omega(t)$  показаны на рис. 51.7, в.

При возмущающих воздействиях по нагрузке эквивалентные структурные схемы системы при  $\Delta U_{3, c} = 0$  приведены на рис. 51.8.

В однократно интегрирующей системе с П–РС передаточные функции СУ ЭП по возмущающему воздействию относительно тока и скорости равны

$$W_T(p) = \Delta I / \Delta I_c = 1 / \{ 4T_n p [ 2T_n p (T_n p + 1) + 1 ] \};$$

$$W_c(p) = \Delta\Omega/\Delta I_c = -Rk_d \frac{4T_n}{T_m} \frac{2T_n p (T_n p + 1)}{4T_n p [2T_n p (T_n p + 1) + 1] + 1}.$$

При ударном приложении нагрузки на величину  $\Delta M_c$  им соответствуют уравнения переходных процессов изменения тока и скорости

$$\Delta i_* = \frac{\Delta i}{\Delta I_c} = 1 - e^{-t_*/2} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-t_*/4} \sin \frac{\sqrt{3}}{4} t_*;$$

$$\Delta \omega_* = \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_c} = 1 - \frac{1}{2} e^{-t_*/2} - \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-t_*/4} \left( \sin \frac{\sqrt{3}}{4} t_* + \sqrt{3} \cos \frac{\sqrt{3}}{4} t_* \right),$$

где  $\Delta \omega_c = Rk_d \frac{4T_n}{T_m} \Delta I_c$  — статический перепад скорости, соответствующий изменению тока  $\Delta I_c$ .

Графики скорости и тока приведены на рис. 51.8, в (кривые 1 и 2). Они имеют оптимальный характер, потому что система, оптимизированная по задающему воздействию, оптимизирована и по возмущающему воздействию. Ток двигателя при возмущающем воздействии по нагрузке изменяется по тому же закону, что и скорость двигателя при задающем воздействии с  $\sigma = 8\%$  и  $t_p = 7T_n$ . Система статическая по нагрузке ( $\Delta \omega = \Delta \omega_{уст}$ ).

В двукратноинтегрирующей системе с ПИ-РС передаточные функции СУ ЭП по возмущающему воздействию относительно тока и скорости равны

$$W'_T(p) = \frac{\Delta I}{\Delta I_c} = \frac{8T_n p + 1}{8T_n p \{4T_n p [2T_n p (T_n p + 1) + 1] + 1\} + 1};$$

$$W'_c(p) = \frac{\Delta \Omega}{\Delta I_c} = Rk_1 \frac{8T_n}{T_n} \times \frac{4T_n p [2T_n p (T_n p + 1) + 1] + 1}{8T_n p \{4T_n p [2T_n p (T_n p + 1) + 1] + 1\} + 1}.$$

Им соответствуют уравнения переходных процессов тока и скорости

$$\Delta i_* = \frac{\Delta i}{\Delta I_c 4T_n/T_n} = 1 - e^{-t_*/4} \left[ \left( \frac{t_*}{2} - 2 \right) \sin \frac{t_*}{4} + \left( 1 + \frac{2}{3} t_* \right) \cos \frac{t_*}{4} \right];$$

$$\Delta \omega_* = \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_c} = e^{-t_*/4} \left[ \left( 1,5 + \frac{t_*}{8} \right) \sin \frac{t_*}{4} - \frac{t_*}{4} \cos \frac{t_*}{4} \right].$$

Графики переходных процессов тока и скорости показаны на рис. 51.8, в штриховыми линиями (кривые 3 и 4). Система астатическая по нагрузке ( $\Delta \omega = 0$ ). Ток изменяется с перерегулированием  $\sigma = 53\%$ , как скорость при задающем воздействии. Аперриодическое звено на входе системы, так же как и задатчик интенсивности (см. рис. 51.7), позволяет при возмущающих воздействиях по нагрузке получить оптимальные переходные процессы тока.

Для улучшения динамических свойств СУ РЭП в режиме прерывистых токов ЭП, когда резко увеличивается эквивалентное сопротивление цепи якоря двигателя ( $R'_{як} \rightarrow \infty$  при токе якоря двигателя равном нулю), используется внутренний КН преобразователя (рис. 51.9) с П-РН и коэффициентом передачи  $k_{РН}$ . ОС по напряжению (или ЭДС преобразователя) выполняется с фильтром, постоянная времени которого  $T_\phi = T_r$ . В режиме непрерывного тока передаточная функция КН по задающему воздействию

$$W_{КН}(p) = \frac{k_{РН} k_{и} (T_\phi p + 1)}{\left[ \frac{T_n T_\phi p^2}{1 + k_n k_{РН} k_n} + \frac{(T_n + T_\phi) p}{1 + k_n k_{РН} k_n} + 1 \right] (1 + k_n k_{РН} k_n)}.$$

Принимая  $T'_\mu = (T_n + T_\phi)/(1 + k_n k_{РН} k_n)$  и пренебрегая членом  $T_n T_\phi p^2/(1 + k_n k_{РН} k_n)$ ,  $W_{КН}(p)$  аппроксимируют выражением

$$W'_{КН}(p) = \frac{k_{РН} k_{и} (T_\phi p + 1)}{(T'_\mu p + 1) k_n k_{РН} k_n + 1}.$$

При этом принимается И-РТ с передаточной функцией

$$W_{РТ}(p) = \frac{Rk_n}{2T'_\mu p k_T} \text{ при } \frac{k_{РН} k_{и}}{1 + k_n k_{РН} k_n} \approx \frac{1}{k_n},$$

где  $R$  — сопротивление цепи якоря двигателя в режиме непрерывного тока.

В режиме прерывистого тока при  $i_a = 0$  ОС по напряжению оказывается включенной на ЭДС двигателя (см. штриховую линию на рис. 51.9). Ввиду медленного изменения ЭДС двигателя по сравнению с напряжением преобразователя ОС по напряжению как бы замыкается и поэтому постоянная интегрирования РТ уменьшается в  $k_{РН}$  раз.

Если необходимо, чтобы динамические свойства ЭП в режиме прерывистого тока были такими же, как в режиме непрерывных токов, то

$$k_{РН} = R'_{як}/(Rk_n k_n) \approx R'_{як}/R$$

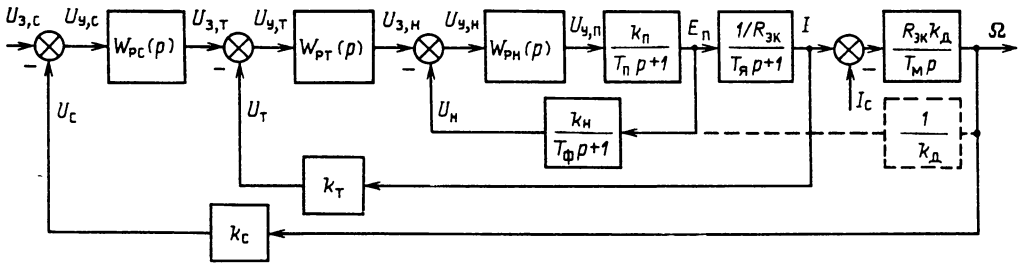


Рис. 51.9. Эквивалентная структурная схема системы ТП – Д при работе в режиме прерывистых токов

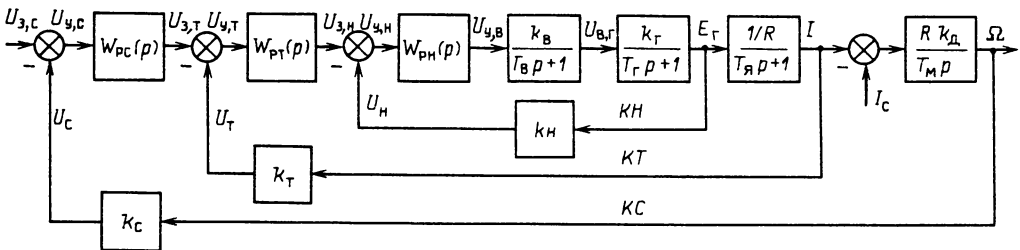


Рис. 51.10. Эквивалентная структурная схема системы ТВ – Г – Д

и из условия оптимизации контура тока по ТО находится

$$W_{PT}(p) \frac{k_{PH}k_nk_t}{R'_3(T'_\mu p + 1)} = \frac{1}{2T'_\mu p(T'_\mu p + 1)},$$

при передаточной функции цепи якоря двигателя и ТП в режиме прерывистых токов

$$W_n(p) = k_n/[R'_3k(T'_\mu p + 1)].$$

Поскольку  $R'_{3k}$  – переменное,  $k_{PH}$  выбирают исходя из среднего значения соотношения  $R'_{3k}/R$  и соображений устойчивости системы к субгармоническим колебаниям и принимают  $k_{PH} = 4 \div 5$ .

В ЭП, работающих в режимах непрерывного и прерывистого токов и особенно в тиристорных ЭП с отдельным управлением группами вентилях ТП, где режим прерывистых токов возникает при малых нагрузках и при смене направления тока, для улучшения динамических свойств систем применяют адаптивные регуляторы тока с переключающейся структурой с ПИ-РТ на И-РТ с частотой и скважностью тока в прерывистом режиме (см. § 51.9) [51.17] или используют нелинейный регулятор тока, в котором увеличение  $R'_{3k}$  в режиме прерывистых токов компенсируется повышением коэффициента усиления РГ [51.19, 51.20] (см. рис. 51.17).

Система ТВ–Г–Д выполняется трехконтурной с КН, КТ и КС. Она содержит также

PH (AV), PT(AA) и PC (AR) (рис. 51.10). При настройке контуров на ТО при  $T_\mu = T_b$  принимаются ПИ–РН, ПИ–РТ и П–РС с передаточными функциями

$$W_{PH}(p) = \left( \frac{T_r}{2T_b} + \frac{1}{2T_b p} \right) \frac{1}{k_b k_t k_n};$$

$$W_{PT}(p) = \left( \frac{T_r}{4T_b} + \frac{1}{4T_b p} \right) R \frac{k_n}{k_t};$$

$$W_{PC}(p) = \frac{T_m}{8T_b R k_d} \frac{k_t}{k_c}.$$

Передаточные функции оптимизированных КН, КТ и КС при задающих и возмущающих воздействиях можно получить по табл. 51.6 соответственно для первого, второго и третьего контуров при  $T_\mu = T_b$ ,  $k_{o,c1} = k_n$ ,  $k_{o,c2} = k_t$  и  $k_{o,c3} = k_c$ . Переходные функции напряжения, тока и скорости принимаются по табл. 51.6, а графики переходных процессов имеют вид графиков, приведенных на рис. 51.5 соответственно при  $n = 1, 2$  и  $3$ .

Время переходного процесса скорости в системе ТВ–Г–Д по сравнению с системой ТП–Д увеличивается в 2 раза из-за применения третьего контура, а также в 2 раза повышается статизм ЭМХ, уравнение которой

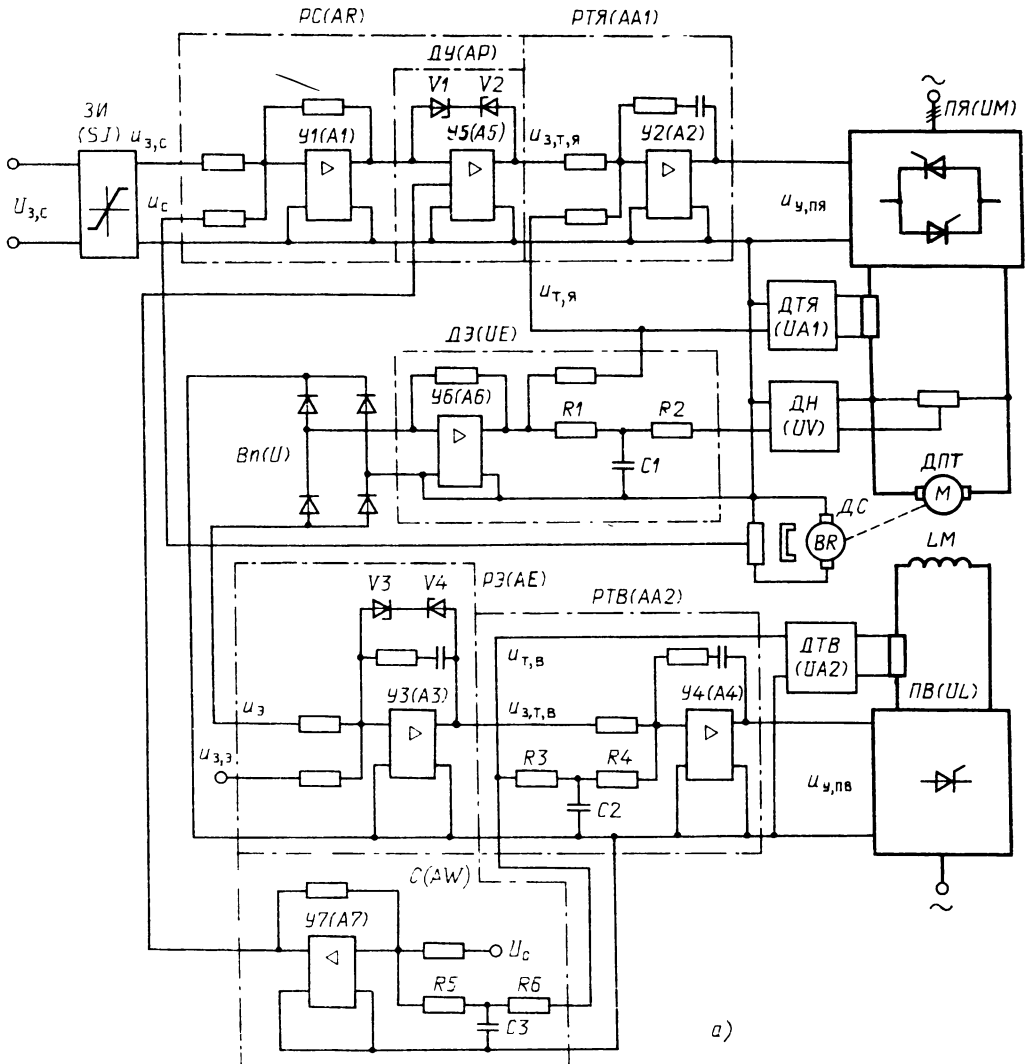
имеет вид

$$\omega = \frac{U_{3,c}}{k_c} - IRk_d \frac{8T_v}{T_m} = \omega_0 - \Delta\omega_p \frac{8T_v}{T_m}$$

При использовании ПИ-РС с апериодическим звеном на входе системы получается астатическая ЭМХ, время переходного процесса повышается еще в 2 раза ( $t_p = 30,4 T_v$ ), а при применении задатчика интенсивности время может еще увеличиться. Поэтому такая система применяется в ЭП, требующих высокой точности стабилизации скорости в установившихся режимах и не требующих высокого быстродействия в динамических.

Для двухзонного регулирования скорости используются двухконтурная система регули-

рования напряжения якоря двигателя с КТ якоря и КС и двухконтурная система регулирования напряжения обмотки возбуждения (магнитного потока) с КТ возбуждения и КЭ двигателя (рис. 51.11, а). Она содержит: ДПТ (М, LM) – двигатель постоянного тока независимого возбуждения; ПЯ (UM), ПВ (UL) – преобразователи напряжений якоря и обмотки возбуждения; РС (AR), РТЯ (AA1), РЭ (AE), РТВ (AA2) – регуляторы скорости, тока якоря, ЭДС и тока возбуждения ДПТ, выполненные на операционных усилителях У1 (A1) – У4 (A4); ДС (BR), ДТЯ (UA1), ДН (UV), ДЭ (UE), ДТВ (UA2) – датчики скорости, тока якоря, напряжения, ЭДС и тока возбуждения с фильтрами, выполненными на



а)

резисторах  $R1 - R6$  и конденсаторах  $C1 - C3$ ;  $ЗИ (SJ)$  — датчик интенсивности;  $Bn (U)$  — выпрямитель, выделяющий модуль сигнала ОС по ЭДС при реверсивном ТПЯ;  $C (AW)$  — суммирующее устройство с усилителем  $У7 (A7)$ , формирующее сигнал, пропорциональный магнитному потоку;  $ДУ (AP)$  — делительное устройство, выполненное на усилителе  $У5 (A5)$ , изменяющее настройку РС при изменении магнитного потока ДПТ. РС и РЭ выполнены с ограничением своих выходных напряжений стабилитронами  $V1 - V4$ , что обеспечивает ограничение напряжений задания токов якоря  $u_{3,т,я}$  и возбуждения  $u_{3,т,в}$  и напряжений управлений ПЯ  $u_{y,п,я}$ , ПВ  $u_{y,п,в}$  и соответственно токов якоря и возбуждения ДПТ.

Система выполнена с зависимым принципом управления скоростью во второй зоне, осуществляемым в функции ЭДС двигателя с помощью КЭ и РЭ. Датчик скорости (на схеме не показан) обеспечивает напряжение задания скорости  $U_{3,с}$ . Напряжение задания ЭДС  $U_{3,э} = \text{const}$  определяет номинальное значение магнитного потока. В первой зоне регулирования скорости при ЭДС двигателя ниже номинального значения ( $E_d < E_{д,ном}$ ) напряжение ОС по ЭДС  $u_3 < U_{3,э}$ , выходное напряжение РЭ  $u_{3,т,в}$  ограничено и определяет номинальное значение магнитного потока. Во второй зоне, когда  $E_d > E_{д,ном}$  и  $u_3 > U_{3,э}$ , РЭ выходит из ограничения и снижает  $u_{3,т,в}$ , а значит, и магнитный поток двигателя.

Пуск двигателя до основной скорости происходит при номинальном значении магнитного потока, так как  $E_d < E_{д,ном}$ , а во вто-

рой зоне при  $E_d \geq E_{д,ном}$  магнитный поток начинает ослабляться, определяя заданную скорость.

Эквивалентная структурная схема системы приведена на рис. 51.11, б. В ней канал управления напряжением якоря ДПТ такой же, как в однозонном ЭП (см. рис. 51.6, б). В канале управления напряжением возбуждения ТПВ принят инерционный с коэффициентом усиления  $k_{пв}$  и постоянной времени  $T_{пв}$ . Цепь обмотки возбуждения двигателя изображена с передаточными функциями  $W_{в1}(p)$  и  $W_{в2}(p)$ , позволяющими выделить сигнал тока возбуждения  $I_{в}$ , где  $R_{в}$ ,  $T_{в}$  — сопротивление и постоянная времени цепи обмотки возбуждения двигателя;  $T_{в,т} \approx 0,1T_{в}$  — постоянная времени контура вихревых токов; ОС по току возбуждения и ЭДС двигателя инерционные с коэффициентами передачи  $k_{т,в}$ ,  $k_n$  и постоянными времени  $T_{э,т}$  и  $T_{э,д} = L_{д}/R_{д}$ . На рис. 51.11, б дополнительно обозначено:  $U_{y,с}$ ,  $U_{y,т,я}$ ,  $U_{y,э}$ ,  $U_{y,т,в}$  — изображения напряжений управлений КС, КТ якоря, КЭ и КТ возбуждения.

Настройка контуров канала якоря двигателя производится так же, как в системе с однозонным регулированием скорости (см. рис. 51.6). В связи с изменением магнитного потока двигателя обеспечивается оптимальная настройка РС, для чего ДУ производит деление выходного сигнала РС на сигнал, пропорциональный текущему значению магнитного потока.

Настройка контуров канала возбуждения двигателя производится на ТО. Принимается

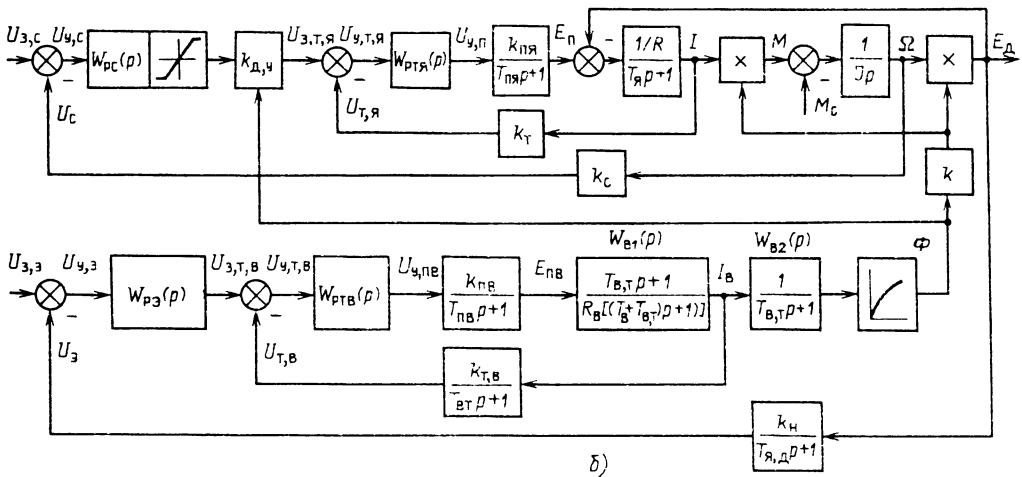


Рис. 51.11. Система управления тиристорного ЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости:

а — функциональная схема, б — эквивалентная структурная схема (индексы, содержащие букву «я», означают принадлежность к каналу якоря, букву «в» — к каналу возбуждения)

ПИ–РТВ при  $T_{ув} = T_{пв}$  с передаточной функцией

$$W_{РТВ}(p) = \frac{R_v [(T_v + T_{в,т})p + 1]}{2T_{пв}pk_{пв}k_{т,в}}$$

В контуре ЭДС принимается ПИ–РЭ с передаточной функцией

$$W_{РЭ}(p) = \frac{(T_{я,д}p + 1)k_{т,в}}{4T_{пв}pk_{в}k_{н}}$$

где  $k_v = \Delta e_d / \Delta I_v = k_{ф}k_{\omega \text{ ном}}$  – передаточный коэффициент цепи возбуждения.

Переходные процессы тока возбуждения и магнитного потока двигателя оптимальные. Они представляются переходными функциями из табл. 51.6 для первого и второго контуров. Графики переходных процессов принимаются из рис. 51.5 при  $n = 1$  и 2.

При построении аналоговых систем управления ЭП с подчиненным регулированием координат используются аналоговые элементы УБСР–АИ [51.2, 51.33].

#### Комплектные электроприводы постоянного тока.

#### Электроприводы унифицированные трехфазные и однофазные серий ЭПУ1 и ЭПУ2 (табл. 50.4)

Электроприводы выпускаются нескольких модификаций в виде неререверсивного (ЭПУ1(2)-1) и реверсивного (ЭПУ1(2)-2) исполнений [51.19, 51.20, 51.57]. Они предназначены для механизмов подачи металлорежущих станков и промышленных роботов (модификация П – с высокомоментными и другими двигателями и диапазоном регулирования скорости  $D = 10000$ )

(ЭПУ1) и  $D = 2000$  (ЭПУ2) и для механизмов главного движения (модификация Д – двухзонный с обратной связью по скорости,  $D = 1000$ , в том числе при изменении магнитного потока  $D_{\phi} = 5$ ). Для механизмов с однозонным регулированием скорости используются модификации М с обратной связью по скорости с диапазоном  $D = 1000$  и Е с обратной связью по ЭДС с диапазоном  $D = 20$ .

#### Электроприводы серии ЭПУ1 (рис. 51.12–51.18)

Силовые схемы ТП для питания якоря двигателя ТПЯ (УМ) (рис. 51.12) выполняются по трехфазной мостовой схеме с силовыми оптронными тиристорами на токи до 100 А и силовыми тиристорами на токи 200, 400, 630 А с одним комплектом вентиля для неререверсивного ЭП и двумя для реверсивного. ЭП выполняются с трансформаторным питанием с трех- и двухобмоточными трансформаторами Т (рис. 51.12, а, б) с выпрямленным напряжением соответственно 115 и 230 В и с токоограничивающими реакторами L (рис. 51.12, в) с выпрямленным напряжением 230 В и при напряжении сети 220 В. В якорной цепи для высокомоментных двигателей предусмотрен сглаживающий реактор L1. Выпрямитель Вн(У) для обмотки возбуждения двигателя выполняется по одно- и трехфазным схемам выпрямления с диодами. В двухзонных ЭП используется ТП возбуждения ТПВ(УЛ). Он выполняется по однофазной мостовой полупроводимой схеме с двумя оптронными тиристорами и двумя диодами (на токи ЭП до 100 А) и по однофазной управляемой схеме с четырьмя оптронными тиристорами и защитным тиристором (на токи ЭП 200, 400 и 630 А).

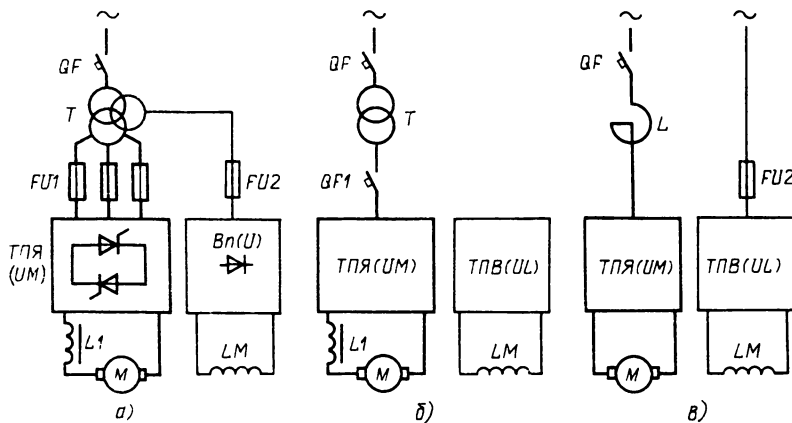


Рис. 51.12. Схемы питания двигателей ЭП серии ЭПУ1:

а – с трехобмоточным трансформатором, б – с двухобмоточным трансформатором, в – с реактором

Максимально-токовая защита ЭП с двигателем на токи до 100 А производится плавкими предохранителями *FU1*, а выше 100 А – автоматическим выключателем *QF1*. Выключатель *QF*, обеспечивающий защиту трансформатора, в комплект поставки ЭП не входит. Защита *ТПВ(UL)* производится плавкими предохранителями *FU2*.

### Электропривод ЭПУ1-2П

На рис. 51.13, *a* приведена функциональная электрическая схема СУ ЭП ЭПУ1-2П. Она содержит: *M, LM* – ДПТ со встроенным тахогенератором *BR*; *ТПЯ(UM)* – реверсивный ТП напряжения цепи якоря двигателя с трехфазной системой импульсно-фазового управления *СИФУ(AU)*; *T* – согласующий силовой трансформатор; *L* – сглаживающий реактор (используется при необходимости); *Bn(U)* – выпрямитель для питания обмотки возбуждения двигателя, подключаемый при  $U_B = 110$  В к третьей обмотке *T* и при  $U_B = 220$  В – к двум фазам силовой вторичной обмотки *T* (см. рис. 51.12, *a, б*), при применении двигателя с возбуждением от постоянных магнитов *Bn* не используется; *ЗС(SR)* – датчик скорости.

Система управления ЭП одноконтурная с ПИ-РС и ООС по току. Она содержит: *РС(AR)* – регулятор скорости; *УЗТ(AUF)* –

узел зависимого токоограничения; *НЗ(АН)* – нелинейное звено; *ФПЭ(AUE)* – функциональный преобразователь ЭДС двигателя; *ПХ(SA)* – переключатель характеристик; *ЛУ(AD)* – логическое устройство; *УО(AS)* – управляющий орган; *БЗ(AF)* – блок защиты; *ДТ(UA)*, *ДПВ(UVS)* – датчики тока и проводимости вентилей (тиристоров).

На вход *РС* подается напряжение задания скорости  $U_{з,с}$  с *ЗС* или с аналогового выхода устройства числового программного управления *УЧПУ* через *R2*, напряжение ООС по скорости  $u_c$  с тахогенератора *BR* через *R4*, *R5* и напряжение установки нуля скорости двигателя с резистора *R3*.  $U_{з,с}$  подается разной полярности для реверсирования двигателя. Это обеспечивают реле *K1* («вперед») и *K2* («назад»), контакты которых подают напряжение к *ЗС* соответствующей полярности и через *БЗ* деблокируют *РС*. В ЭП принят ПИ-РС с ограничением выходного напряжения  $U_{PC}$  резистором *R8*, что обеспечивает ограничение максимального значения выпрямленного напряжения преобразователя  $U_{d,max} = E + I_{max}R$ , определяющего максимальную уставку тока якоря двигателя  $I_{max} = (U_d - E)/R$ .

С выхода *РС* напряжения  $u_{PC}$  поступает на *НЗ*, которое подает напряжение управления током двигателя  $u_{ч,т}$  на *ПХ* и сигнал задания

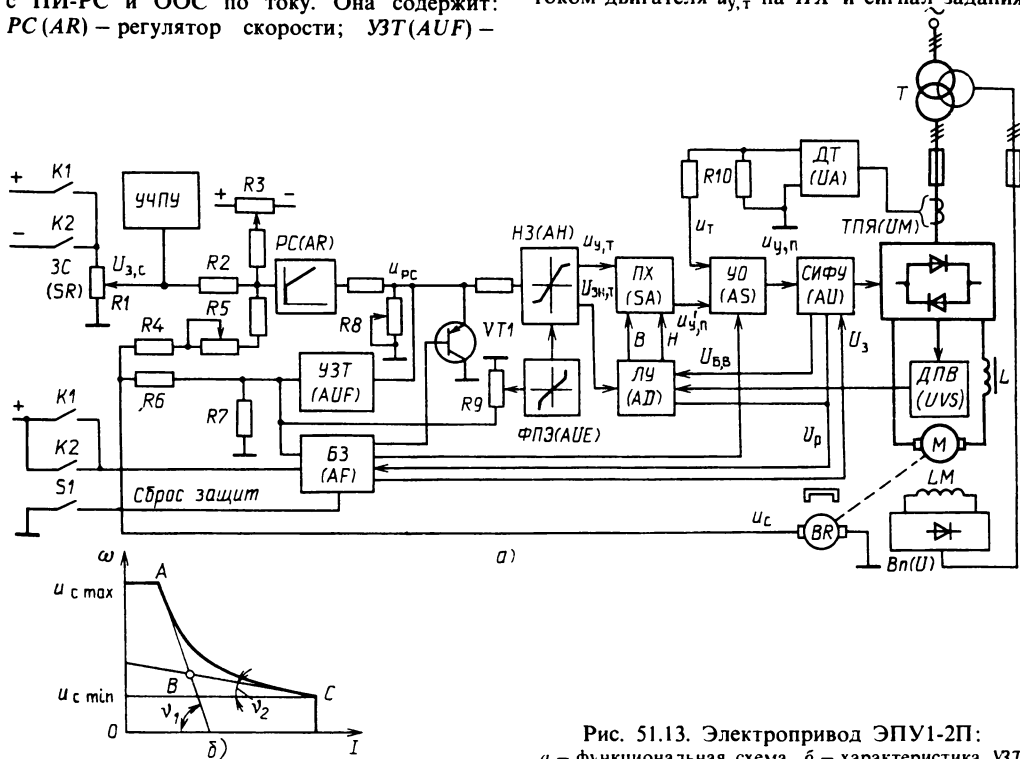


Рис. 51.13. Электропривод ЭПУ1-2П: *a* – функциональная схема, *б* – характеристика *УЗТ*



направления тока  $u_{3,н,т}$  (направление вращения двигателя) на ЛУ.

В ЭП осуществляется зависимое нелинейное токоограничение с помощью УЗТ, обеспечивающего снижение уставки тока ограничения в функции скорости (напряжения  $u_c$ , поступающего с ВР через делитель R6, R7). В основу такого токоограничения положена нелинейная зависимость допустимой перегрузки двигателя по току от его скорости (рис. 51.13, б), которая аппроксимируется двумя прямыми АВ и ВС с регулируемой точкой перегиба В за счет настройки углов  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Ограничение максимально возможного выброса тока при пуске двигателя обеспечивает ФПЭ, включенный в цепь положительной обратной связи по скорости, формирующей переходный процесс скорости двигателя. Сигнал ФПЭ подан на НЗ, на выходе которого формируется напряжение управления ТПЯ  $u_{y,п} = k_{НЗ}u_{рс} + u_3$ , где  $k_{НЗ}$  — коэффициент усиления НЗ;  $u_3$  — сигнал ПОС по скорости, пропорциональный ЭДС двигателя и сформированный ФПЭ. ФПЭ имеет арксинусную характеристику  $\left( U_{ФПЭ} = \arcsin \frac{E_d}{E_{d0}} \right)$ , с помощью

которой формируется напряжение управления преобразователя  $u_{y,п}$ , точно компенсирующее изменение ЭДС преобразователя, имеющего нелинейную характеристику ( $E_{п} = E_{п0} \sin \alpha$ ). Поэтому в переходных процессах ток двигателя, равный  $I = (E_{п} - E_d)/R$ , поддерживается постоянным независимо от скорости.

В схеме значение  $u_3$  выставляется резистором R9 так, чтобы среднее значение  $u_{рс}$  при номинальной скорости двигателя на холостом ходу было близким к нулю. Тогда  $u_{рс}$  становится пропорциональным только току двигателя и поэтому ограничение его уровня резистором R8 обеспечивает ограничение максимального выпрямленного напряжения, которое определяет максимальное значение тока якоря двигателя.

При правильной настройке  $u_3$  диаграмма тока двигателя при пуске близка к прямоугольной. При недокомпенсации ( $u_3$  мало) с ростом скорости ток спадает, а при перекомпенсации ( $u_3$  велико) ток растет.

НЗ и ФПЭ с резистором R9 образуют адаптивное устройство линеаризации характеристик ТПЯ в режиме прерывистого тока. НЗ имеет нелинейную характеристику и представляет собой усилитель с переменным коэффициентом усиления, который при малом сигнале управления повышает коэффициент усиления СУ ЭП, компенсируя этим повышенные эквивалентного сопротивления цепи якоря

$R'_3$  в режиме прерывистых токов. При этом НЗ имеет характеристику, обратную характеристике ТПЯ в режиме прерывистого тока, т. е. коэффициент усиления НЗ ( $k_{НЗ}$ ) обратно пропорционален коэффициенту усиления ТПЯ ( $k_{пя}$ ), а коэффициент передачи ФПЭ имеет зависимость  $k_{ФПЭ} = \arcsin (E_d/E_{d,ном})$ , что компенсирует действие внутренней ООС по ЭДС двигателя  $E_d$ . С помощью такого адаптивного устройства обеспечивается постоянство коэффициента усиления ТПЯ в режимах прерывистого и непрерывного токов.

ТПЯ управляется от трехканальной СИФУ, сигнал управления на которую подается от УО, где устанавливаются углы управления  $\alpha_{нач}$ ,  $\alpha_{min}$ ,  $\alpha_{max}$  и сигнал управления суммируется с сигналом ООС по току, поданным через резистор R10. Для согласования реверсивного управляющего сигнала НЗ с нереверсивной регулировочной характеристикой УО служит ПХ, управляемый ЛУ. ЛУ обеспечивает раздельное управление катодной и анодной группами ТПЯ. Оно осуществляет выбор нужной группы в зависимости от знака  $U_{3,с}$ , определяющего направление (знак) тока двигателя  $U_{3,т}$ , переключает группы на бестоковом интервале по сигналу ДПВ, обеспечивая переключение импульсов управления с одной группы тиристоров на другую сигналом разрешения  $U_p$  и формирует задержки по времени в момент снятия импульсов с работающей ранее группы и подачи их на вступающую в работу группу.

Конструктивно элементы ЭП расположены на трех платах с печатным монтажом, установленных в стандартной кассете БУК-6 и соединенных с общей схемой разъединительными клеммными соединителями. На платах расположены силовые элементы ТПЯ (силовая плата), элементы СУ ТПЯ: СИФУ, УО, ЛУ, ФИВ (плата управления ПУ1), элементы РС, НЗ, ПХ, УЗТ, ФПЭ, элементы защиты БЗ и элементы датчиков ДТ и ДПВ (плата управления ПУ2).

ТПЯ (рис. 51.14) представляет собой два трехфазных управляемых выпрямительных моста, включенных встречно-параллельно и работающих по принципу раздельного управления. Каждый мост выполнен на оптронных тиристорных модулях VS1.1 — VS6.1, VS1.2 — VS6.2 типа МТОГО, установленных на общий охладитель. Для защиты тиристоров от перенапряжений использованы цепи РС. Для повышения помехоустойчивости управляющий переход тиристора шунтируется резисторами (4,7 кОм). Для защиты тиристоров от перегрева в охладитель ТПЯ встроены терморезистор (6,8 кОм).

СИФУ ТПЯ (рис. 51.15, а) состоит из трех формирователей импульсов  $\Phi И1 - \Phi И3$  и усилителей импульсов  $УИа, УИх, УИб, УИу, УИс, УИз$ . Каждый  $\Phi И$  включает в себя:  $\Phi$  – фильтр;  $ПЭ1, ПЭ2$  – пороговые элементы;  $\Phi СИ$  – формирователь синхронизирующих импульсов;  $ГПН$  – генератор пилообразного напряжения;  $НО$  – нуль-орган;  $T - RS$  – триггер;  $\Phi ДИ$  – формирователь длительности импульсов;  $ВУ$  – входные устройства ТПЯ, подающие импульсы на тиристоры групп «вперед» (В) и «назад» (Н);  $ИСН$  – источник синхронизирующего напряжения.

Схемы  $\Phi И1 - \Phi И3$  идентичны. Схема  $\Phi И1$  с УО приведена на рис. 51.15, б. В ней использованы следующие элементы:  $\Phi - R4, R5, C1$ ;  $ПЭ1 - VT1, VT2$ ;  $ПЭ2 - VT3, VT4$ ;  $\Phi СИ$  – микросхема  $D1 (D1.1 - D1.4)$ ;  $ГПН - VT5, C2$ , микросхема  $A1.1$ ;  $НО$  – микросхема  $A1.2$ ;  $T$  – микросхема  $D2 (D2.1 - D2.4)$ ;  $\Phi ДИ - VT6, C4$ . УИ выполнены на транзисторах ( $VT7, VT8$ ), нагрузкой которых являются светоизлучающие диоды оптронных тиристоров ТПЯ (см. рис. 51.14) или обмотки импульсных трансформаторов в ВУ ТПЯ с обычными тиристорами на токи 200–630 А.

Схема работает следующим образом (рис. 51.15, в). Синхронизирующее фазное напряжение  $u_{\text{синх}}$ , поступающее от  $ИСН$ , сдвигается фильтром на  $30^\circ$  и далее разнополярные  $ПЭ1$  и  $ПЭ2$  преобразуют его в противофазные прямоугольные импульсы [коллекторы  $VT2$  (к) и  $VT4$  (к)], длительность которых определяет зону регулирования импульсов для фазы а и х и составляет  $176^\circ$ , что исключает одновременную выдачу управляющих импульсов в двух противофазных вентилей выпрямительного моста. При сигнале 0 на входе  $ПЭ1$  и  $ПЭ2$  в момент перехода синусоидального напряжения через нуль, на выходе  $\Phi СИ$  (выход  $D1.2, D1.3$ ) формируется синхроимпульс (сигнал 1), который отпирает транзистор  $VT5$  и этим осуществляет разряд интегрирующего конденсатора  $C2$  в  $ГПН$  до нуля. В момент исчезновения синхроимпульса напряжение на выходе  $ГПН$  начинает снова линейно нарастать от нуля примерно до 9 В. Момент превышения напряжения  $ГПН$  над напряжением управления  $u_{\text{уп}}$ , поступающего с УО, фиксируется  $НО$ , который изменяет свое состояние с 1 на 0. При этом переключается триггер  $T$  и на его выходе появляется сигнал 0, который вызывает появление на выходе  $\Phi ДИ$  управляющего импульса, длительность которого, определяемая цепью  $R6, C4$ , составляет не более  $10^\circ$ . Этот импульс поступает на вход одного из усилителей  $УИа (VT7)$  или  $УИх (VT8)$  в соответствии с сигналом  $ПЭ1$  или  $ПЭ2$  (выходы  $D1.1$  и  $D1.4$ ). На вход УИ поступает

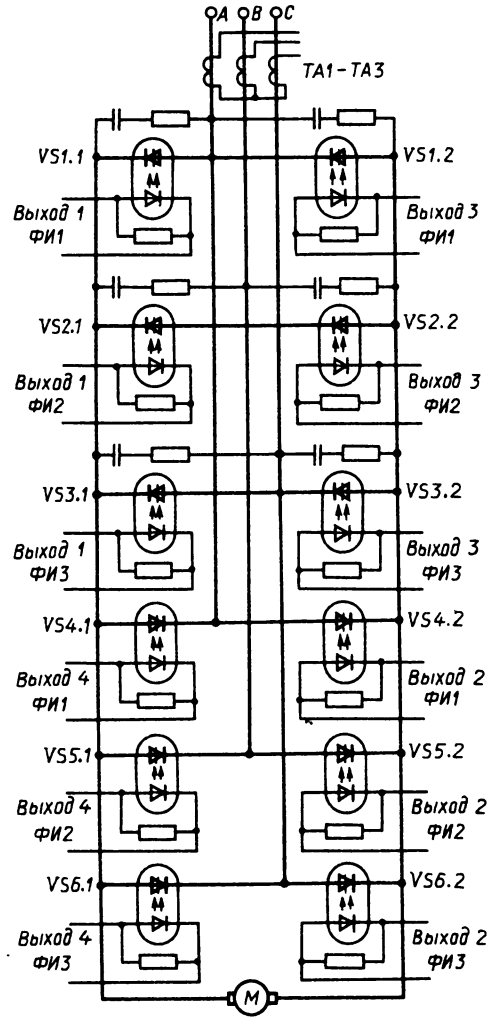


Рис. 51.14. Схема силовых цепей ТПЯ ЭП ЭПУ1-2П

импульс и с другого  $\Phi И$ , сдвинутый относительно первого на  $60^\circ$ . Эти сдвинутые импульсы, усиленные УИ, поступают через светоизлучающие диоды оптронных тиристоров на управляющие электроды катодной и анодной групп ТПЯ.

Триггер  $T$  сохраняет свое состояние до тех пор, пока с  $\Phi СИ$  на его другой вход не поступит следующий синхроимпульс. Триггер может подготовиться к выдаче импульса и сигналом с ЛУ [пропадание и последующее появление разрешающего напряжения выдачи импульсов  $u_p$  (см. рис. 51.13, а)].

СИФУ обеспечивает линейную регулировочную характеристику  $\alpha = f(u_{y,n})$  (рис. 51.15, з).

Напряжение управления  $u_{y,n}$  на ФИ подается от УО (микросхема А2.2), который служит для согласования выхода канала регулирования с входом СИФУ, а также для установки начального угла регулирования  $\alpha_{нач} = 120^\circ$  (резистором R1) и для ограничения минимального  $\alpha_{min}$  (R2) и максимального  $\alpha_{max}$  (R3) значений углов. Сигнал управления на УО поступает от ПХ (см. рис. 51.13, а).

Логическое устройство ЛУ (рис. 51.16, а) содержит два нуля-органа: НО1 (А1.1) и НО2 (А1.2); триггеры заданного ТЗН (D1.2, D1.3) и истинного ТИН (D2.2, D2.3) направлений тока якоря двигателя; элементы И-НЕ на входах триггеров ТЗН (D1.1, D1.4) и ТИН (D2.1, D2.4) и на их выходах (D3.1 – D3.3); элементы задержки на переключение (D3.4, C1, R1) и транзисторные ключи КН «назад» (VT1, VT2) и КВ «вперед» (VT3, VT4) с выходами Н1, Н2, В1, В2. Работает ЛУ следующим образом.

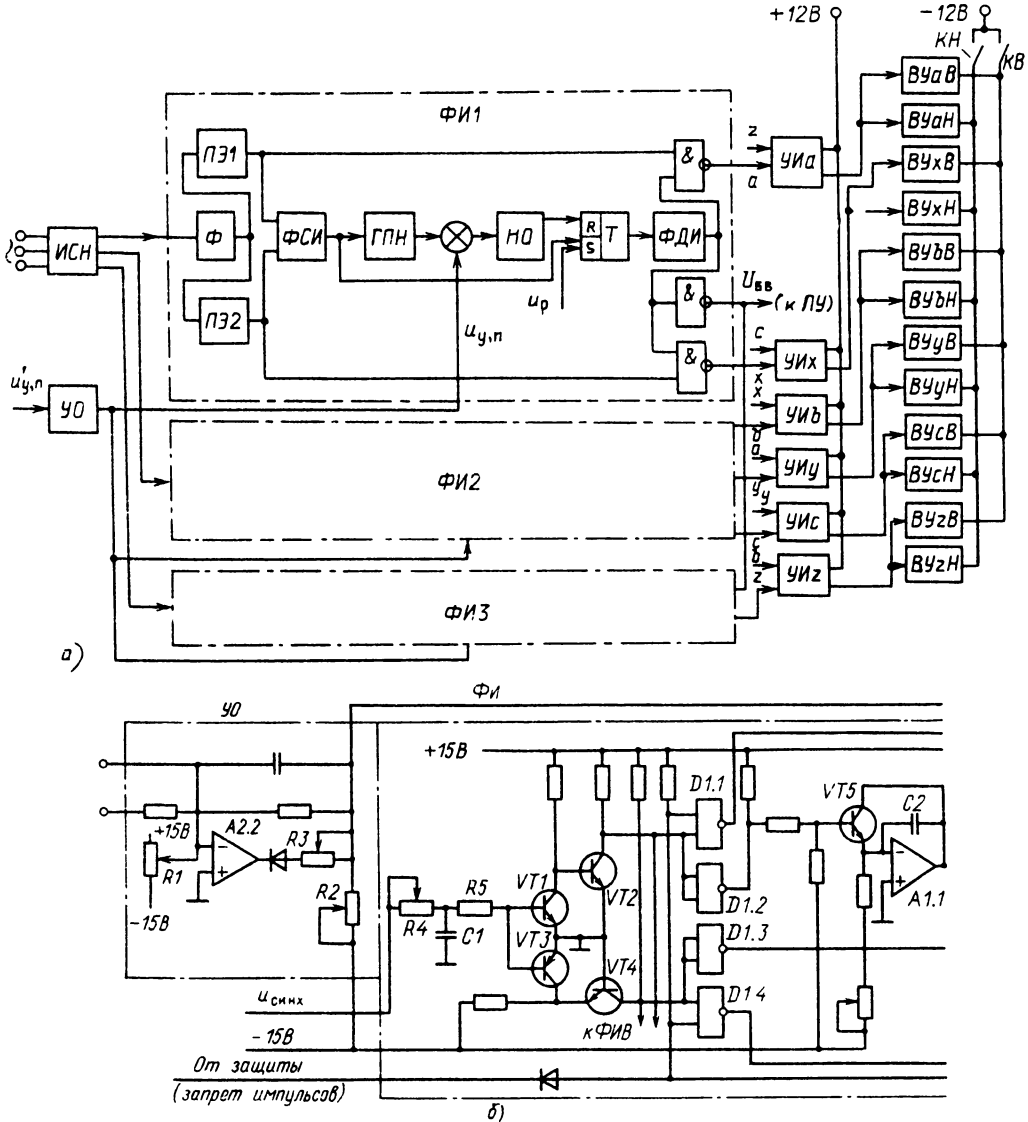


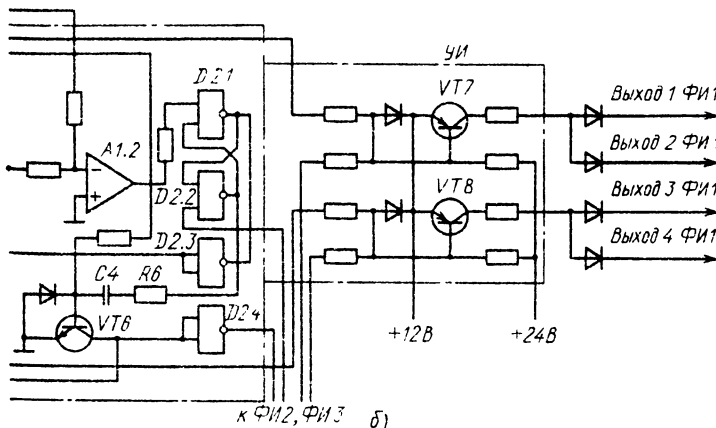
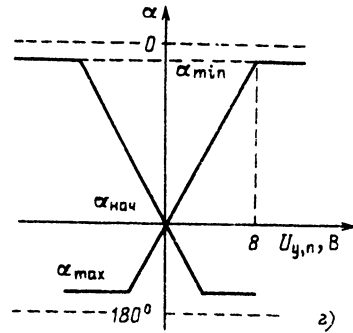
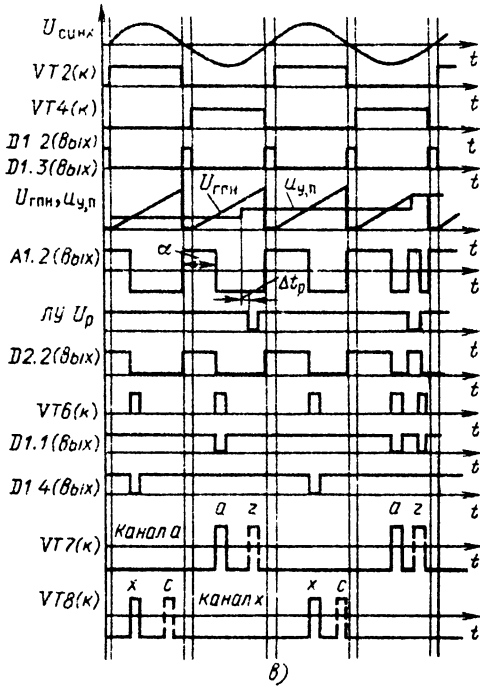
Рис. 51.15. СИФУ ТПЯ ЭПУ1-2П:

а – функциональная схема, б – принципиальная схема; в – диаграммы напряжений; з – регулировочные характеристики

Сигнал  $u_{3,н,т}$  с промежуточного выхода *H3* поступает на инвертирующий вход *HO1*, который устанавливается в состояние 1 или 0 соответственно при отрицательном или положительном сигнале  $u_{3,н,т}$ . Если на блокирующем входе *BB* имеется сигнал 1 от ДПВ, то элементы И *D1.1, D1.4* пропускают сигнал *HO1* на *T3H*. При этом элементы *D2.1, D2.4* при наличии на их общем входе сигнала 1 переводят *ТИН* в положение, соответствующее *T3H*. Выходы триггеров подключены к элементам

*D3.1, D3.3*, управляющими транзисторными ключами *КН* и *КВ*, которые разрешают подачу управляющих импульсов на группы тиристоров *ТПЯ* «назад» или «вперед» (выходы *H1, B1*) и осуществляют управление *ПХ* на входе *УО* (выходы *H2, B2*).

При наличии управляющих импульсов и тока в силовой цепи с ДПВ на блокирующий вход *BB* поступает сигнал 0, запрещающий прохождение сигнала с выхода *HO1* на вход *T3H* до исчезновения тока на тиристорах. При этом *T3H* и *ТИН* остаются в первоначальном состоянии, т. е. находятся в положении выбранного направления. При реверсировании сигнала  $u_{3,н,т}$  реверсируется сигнал на выходе *HO1*. При этом управляющий сигнал  $u'_{y,п}$  с выхода *ПХ* (см. рис. 51.13, а) меняет знаки и углы регулирования становятся равными  $\alpha_{max}$ . Ток в силовой цепи начинает спадать, и как только он достигнет нуля, с ДПВ на вход *BB* поступит сигнал 1, разрешающий *HO1* и *HO2* через элементы *D1.1, D1.4* и перевести *T3H* в новое состояние. На выходе *D3.1, D3.3* появляются сигналы 1, ключ *КН* выключается.



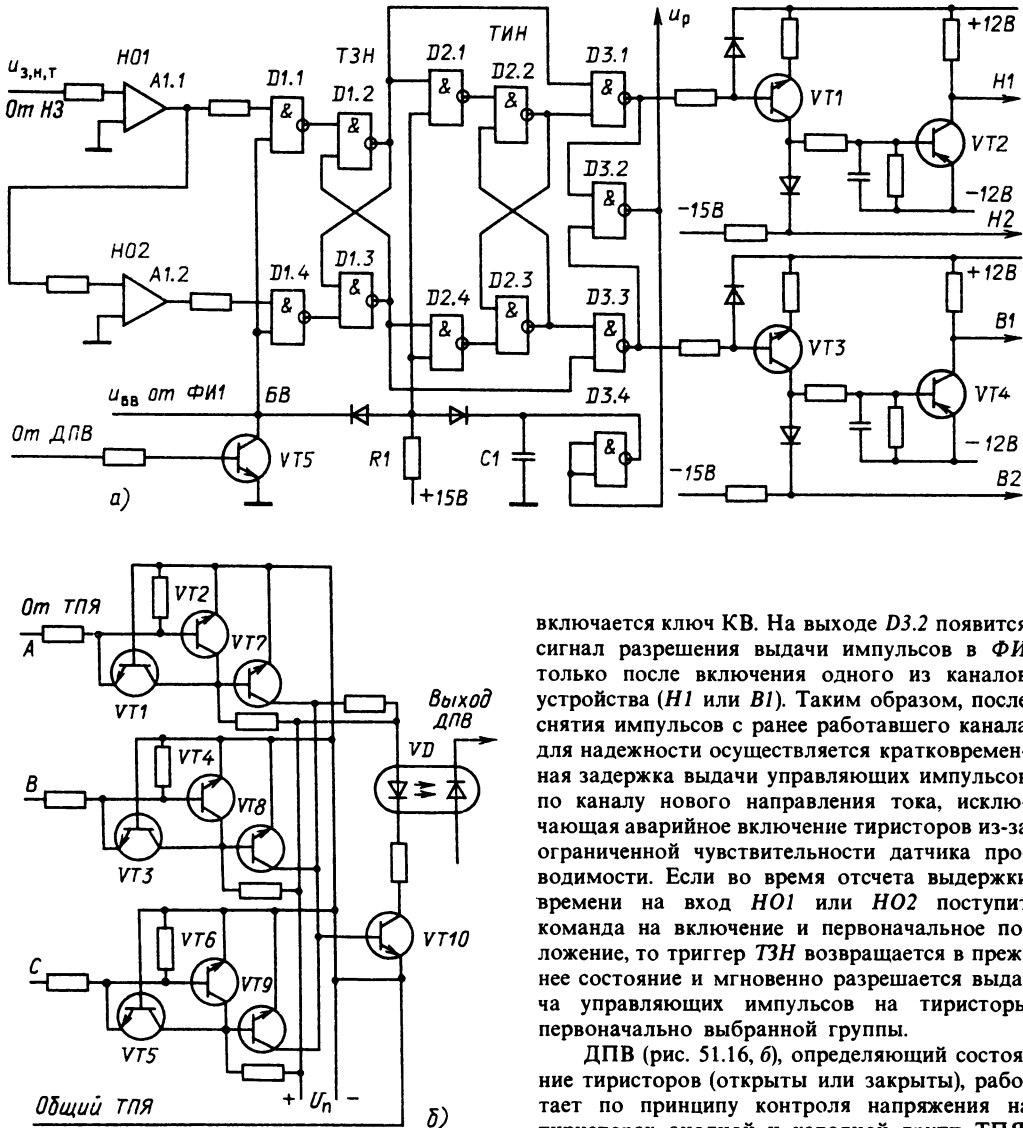


Рис. 51.16. Функциональная схема:  
 а) — логического устройства, б) — датчика проводимости вентилей

Одновременно с выхода  $D3.2$  снимается сигнал разрешения выдачи импульсов и запрещается выдача импульсов  $\Phi И$ , начинается отсчет выдержки времени на приведение триггеров в новое состояние: на выходе  $D3.4$  появляется сигнал 1, конденсатор  $C1$  начинает заряжаться и при достижении на нем напряжения, соответствующего уровню 1, элементы  $D2.1$ ,  $D2.4$  переводят триггер  $ТИН$  в положение, соответствующее триггеру  $ТЗН$ . После этого

включается ключ  $КВ$ . На выходе  $D3.2$  появится сигнал разрешения выдачи импульсов в  $\Phi И$  только после включения одного из каналов устройства ( $H1$  или  $B1$ ). Таким образом, после снятия импульсов с ранее работавшего канала для надежности осуществляется кратковременная задержка выдачи управляющих импульсов по каналу нового направления тока, исключая аварийное включение тиристоров из-за ограниченной чувствительности датчика проводимости. Если во время отсчета выдержки времени на вход  $HO1$  или  $HO2$  поступит команда на включение и первоначальное положение, то триггер  $ТЗН$  возвращается в прежнее состояние и мгновенно разрешается выдача управляющих импульсов на тиристоры первоначально выбранной группы.

ДПВ (рис. 51.16, б), определяющий состояние тиристоров (открыты или закрыты), работает по принципу контроля напряжения на тиристорах анодной и катодной групп ТПЯ. Он состоит из трех двуполярных нуль-органов (НО) соответственно на транзисторах  $VT1 - VT2$ ,  $VT3 - VT4$ ,  $VT5 - VT6$ , схем ИЛИ на транзисторах  $VT7 - VT9$ , транзисторного ключа  $VT10$  и узла развязки, выполненного на оптопаре  $VD$ . При проводящем состоянии хотя бы одного из тиристоров ТПЯ соответствующие транзисторы двуполярных НО закрыты, а транзистор ИЛИ в этой цепи открыт. При этом  $VT10$  закрыт и оптопара  $VD$  находится в непроводящем состоянии, запрещая переключение ЛУ. При закрытых тиристорах всех трех плеч преобразователя транзисторы НО открыты,  $VT7 - VT9$  закрыты,  $VT10$  от-

крыт, светоизлучающий диод оптопары VD включен и оптопара пропускает сигнал на выход ДПВ, разрешающий переключение ЛУ.

В ЭП предусмотрены следующие электрические защиты: нулевая от исчезновения напряжения силовой цепи (питающей сети) и от снижения напряжения цепи управления; максимально-токовая от коротких замыканий; время-токовая от перегрузки двигателя; температурная от перегрева двигателя и от перегрева преобразователя, от обрыва цепи тахогенератора; от неправильного чередования фаз сети управления; от блокирования регулятора скорости и сигнала задания.

При срабатывании соответствующей защиты БЗ транзистором VT1 (см. рис. 51.13, а) осуществляет блокирование выхода РС, в УО обеспечивает максимальный угол управления  $\alpha_{max}$  и в СИФУ сигналом  $U_3$  запрещает подачу управляющих импульсов на тиристоры ТПЯ, а также зажигает светоизлучающий диод, сигнализирующий о работе защиты (на схеме не показан).

**Электропривод ЭПУ1-2Д (двухзонный)**

В состав ЭПУ1-2Д входят (рис. 51.17): М, LM – ДПТ независимого возбуждения со встроеным тахогенератором BR; ТПЯ (UM) –

реверсивный ТП напряжения цепи якоря ДПТ с трехканальной СИФУ (AUM); ТПВ (UL) – неререверсивный однофазный ТП напряжения цепи возбуждения двигателя с СИФУВ (AUL); L1, L2 – сетевые токоограничивающие реакторы (могут использоваться силовые трансформаторы); ЗС (SR) – задатчик скорости. Система управления ЭП содержит два канала регулирования скорости двигателя: канал регулирования напряжения якоря и канал регулирования магнитного потока и ЭДС двигателя.

Канал регулирования напряжения якоря двигателя аналогичен ЭПУ1-2П (см. рис. 51.13, а). Отличие заключается в использовании ПОС с ФПЭ не по скорости, а по напряжению, сигнал которой снимается с датчика напряжения ДН (UV), потому что при двухзонном регулировании скорости ЭДС двигателя зависит не только от его скорости, но и от магнитного потока. Принимается ОС не по ЭДС, а по напряжению потому, что с учетом ОС по току, поданной на УО, сигнал на входе СИФУА (AUM) содержит составляющую, пропорциональную ЭДС. Такое решение упростило схему.

Канал регулирования напряжения на обмотке возбуждения двигателя выполнен с двух-

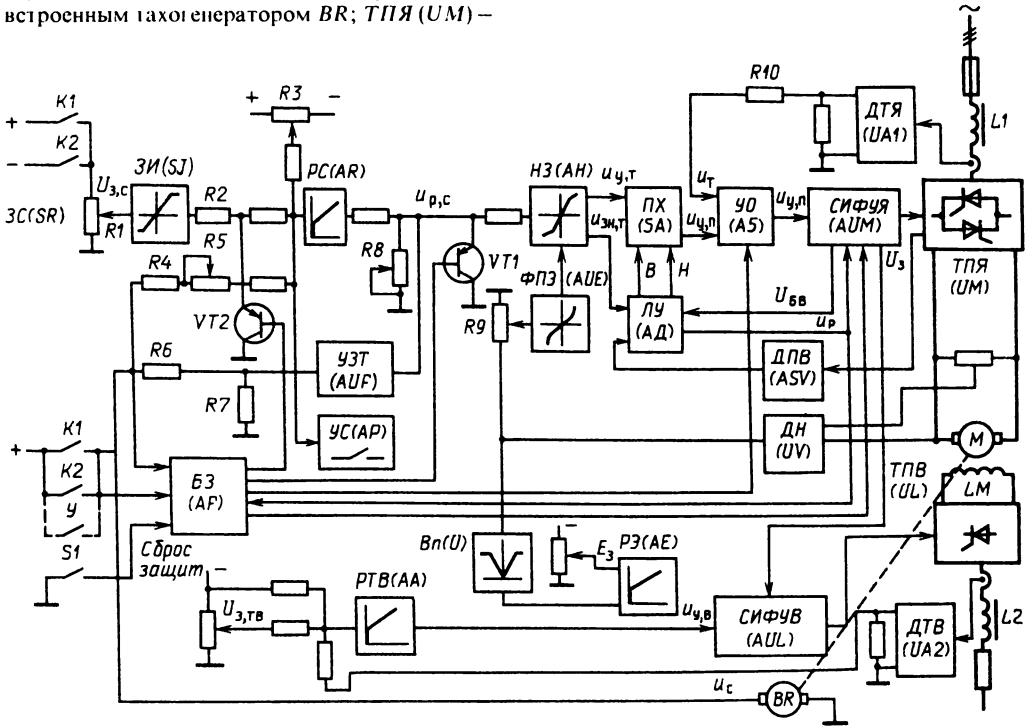


Рис 51.17. Функциональная схема двухзонного ЭП серии ЭПУ1-2Д

контурной системой регулирования с КТ возбуждения и КЭ двигателя. Он содержит: РТВ (АА) – ПИ-регулятор и ДТВ (UА2) – датчик тока возбуждения; РЭ (АЕ) – ПИ-регулятор ЭДС; ДН (UV) – датчик напряжения и Вп (U) – выпрямитель (устройство выделения модуля сигнала ОС по напряжению). РТВ и РЭ обеспечивают постоянство соответственно тока возбуждения и ЭДС двигателя. РЭ подает сигнал на СИФУВ.

Электропривод выполнен с зависимым от напряжения двигателя принципом управления скорости с задатчиком скорости ЗС (SR) и обеспечивает регулирование скорости в первой зоне изменением якоря при постоянном магнитном потоке и во второй зоне – изменением магнитного потока при постоянной ЭДС двигателя.

Запуск двигателя, как и в ЭПУ1-2П, осуществляется с помощью реле К1 и К2 и с УЧПУ. В системе управления имеется датчик

интенсивности ЗИ (SJ), который используется при необходимости. УЗТ (АUF) уменьшает уставку токоограничения для улучшения коммутации двигателя при ослаблении магнитного потока.

ТПЯ и СИФУЯ в двухзонном ЭП выполнены, как в ЭПУ1-2П (см. рис. 51.14 и 51.15).

ТПВ выполнен по однофазной мостовой полууправляемой схеме (рис. 51.18, а) с оптронными тиристорами VS7.1, VS7.2 типа МТО2-25 и диодами VD1.1 – VD1.2 типа МД2-25 (для ЭП на токи до 100 А) и по однофазной мостовой управляемой схеме (рис. 51.18, б) с оптронными тиристорами VS7.1 – VS8.2 (МТО2-25) и защитным шунтирующим тиристором VS9 типа Т122-25 (на токи ЭП 200, 400 и 630 А). (Тиристоры VS1 – VS6 находятся в ТПЯ на рис. 51.13.)

СИФУВ (АUL), содержащая формирователь импульсов возбуждения (ФИБ)

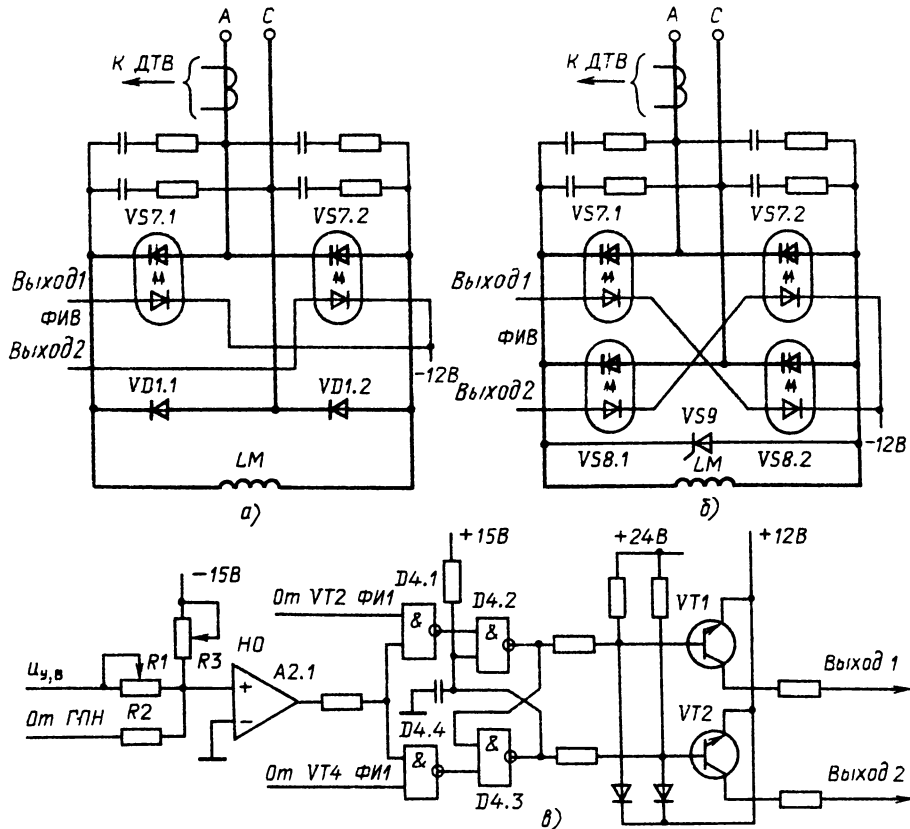


Рис. 51.18. Тиристорный преобразователь цепи возбуждения двигателя ЭП ЭПУ1-2Д: а, б – схемы силовых цепей; в – схема СИФУ (ФИБ); г – диаграмма напряжений ФИБ; «вых» обозначает напряжение на выходе элемента, к – на коллекторе транзистора

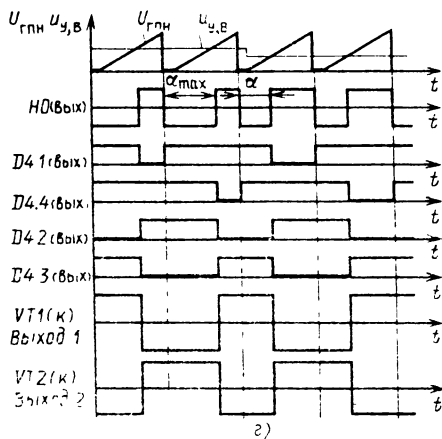


Рис. 51.18.

(рис. 51.18, в), формирует управляющие импульсы тиристорных ТПВ. ФИВ работает совместно с ФИ1 (СИФУЯ) и включает в себя следующие функциональные узлы: нуль-орган  $HO$  (A2.1); RS-триггер ( $D4.2$ ,  $D4.3$ ); элементы И ( $D4.1$ ,  $D4.4$ ) и усилители импульсов ( $VT1$ ,  $VT2$ ). На вход  $HO$  поступают: положительный сигнал управления  $u_{у,в}$  через резистор  $R1$ ; положительный сигнал ГПН с ФИ1 через резистор  $R2$  и отрицательный сигнал смещения  $U_{см}$  от источника питания через резистор  $R3$ . В момент превышения линейно нарастающего напряжения ГПН над алгебраической суммой сигналов  $u_{\Sigma} = U_{см} - u_{у,в}$   $HO$  изменяет свое состояние, что вызывает переключение RS-триггера и усилителей импульсов. Диаграмма напряжений ФИВ приведена на рис. 51.18, з. Длительность выходных импульсов ФИВ составляет  $180^\circ$ , что необходимо для надежной работы ТПВ.

Максимальный угол регулирования  $\alpha_{в,мах}$  устанавливается резистором  $R3$ , минимальный  $\alpha_{в,мин} - R1$ .

В ЭПУ1-2Д применяется электрическая защита, как в ЭПУ1-2П, и дополнительно к ЭПУ1-2П имеются защиты: от обрыва цепи обмотки возбуждения; от превышения максимальной скорости; от перенапряжения на обмотке якоря двигателя. При этом БЗ (AF) (см. рис. 51.17) дополнительно транзистором  $VT2$  блокирует сигнал задания скорости на входе РС.

В ЭП имеется узел соответствия УС (AP), выявляющий соответствие скорости двигателя заданному значению и служащий для согласования работы ЭП главного движения и подачи.

### Комплектные тиристорные электроприводы постоянного тока серии КТЭ (рис. 51.19–51.23, табл. 50.7)

Комплектные тиристорные ЭП серии КТЭ с естественным воздушным охлаждением предназначены для потребителей постоянного тока, требующих автоматизированного регулирования скорости, положения вала, мощности, выпрямленного напряжения, ЭДС двигателя и натяжения материала. Они используются в металлургической и других отраслях народного хозяйства [51.21]. Электроприводы выпускаются одно-, двух- и многодвигательными с однозонным и двухзонным регулированием скорости, неререверсивные и реверсивные с реверсом как по цепи якоря, так и по цепи обмотки возбуждения. Они используются как возбудители для системы Г–Д.

Электроприводы включают в себя: нерегулируемые и регулируемые, неререверсивные и реверсивные ТП с СИФУ; силовые питающие трансформаторы или токоограничивающий реактор в цепи выпрямленного тока; системы автоматического регулирования скорости (АСР), положения, мощности, натяжения, без регулирования и с плавным зависимым регулированием магнитного потока; источники питания обмоток возбуждения двигателей и тахогенераторов, электромагнитного тормоза и электронных устройств системы управления; устройство аварийного динамического торможения; устройство защиты и сигнализации; силовую коммутационную и защитную аппаратуру в цепях переменного и постоянного тока, аппаратуру управления.

Силовые схемы ЭП имеют различные исполнения в зависимости от типа и мощности ЭП. На рис. 51.19 приведена силовая схема цепи якоря двигателя реверсивного ЭП. Питание ЭП осуществляется от сети переменного тока напряжением 220, 380 В или 6 и 10 кВ с использованием силовых трансформаторов Тили токоограничивающих реакторов  $L1 - L3$ , применяемых для малых по мощности ЭП с токами до 500 А включительно при питании от сети с напряжениями 220 и 380 В и напряжениями ТП 230 и 460 В.

ТП выполнены по трехфазной мостовой схеме выпрямления с одним мостом (тиристоры  $VS1 - VS6$ ) в неререверсивном ЭП и встречно-параллельным соединением двух выпрямленных мостов (тиристоры  $VS1 - VS6$  и  $VS7 - VS12$ ) в реверсивном. В ТП на токи до 500 А включительно в мосте используется шесть тиристоров, а при токах 800 А и выше в каждое плечо моста включаются до четырех тиристоров параллельно с использованием делителей тока.



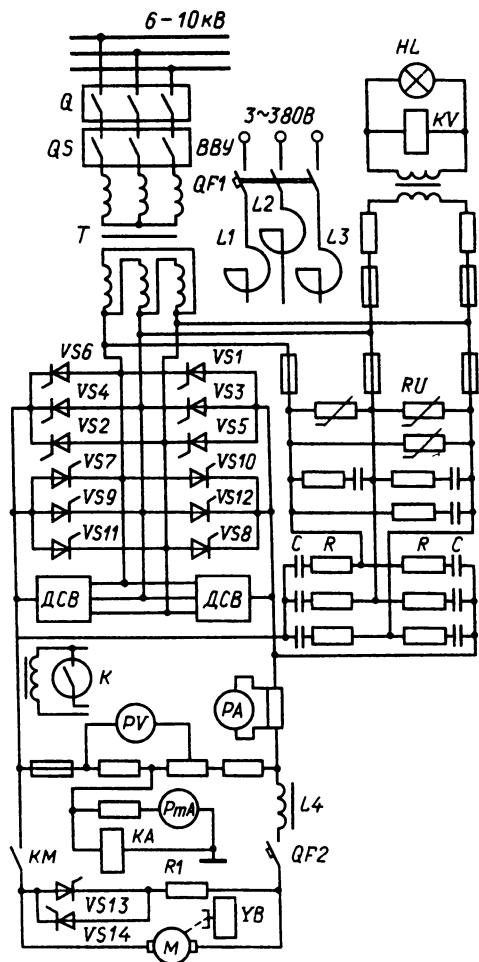


Рис. 51.19. Схема силовых цепей ЭП серии КТЭ

Система управления ТП содержит: СИФУ с выходными каскадами, гальваническими развязками, системами раздельного управления (РУ), питания и контроля (на схеме не показано). СИФУ построена по вертикальному принципу с пилообразным опорным напряжением. Она имеет линейную регулировочную характеристику  $\alpha(U_{y,n})$  (рис. 51.20) с полным диапазоном изменения угла управления не менее  $170^\circ$  при изменении напряжения управления от  $+10$  до  $-10$  В и тока управления не более 5 А. Диапазон изменения угла регулирования составляет  $\alpha_{\min} = 5 \div 90^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 90 \div 175^\circ$ . Начальный угол согласования может изменяться от  $60$  до  $130^\circ$ . Дрейф регулировочной характеристики составляет не более  $\pm 4^\circ$  во всем диапазоне изменения температур, асимметрия

управляющих импульсов во всем диапазоне управления не превышает  $\pm 3^\circ$ .

Реверсивные ТП выполняются с раздельным управлением выпрямительными комплектами, переключение которых осуществляется РУ с временем реверса тока не более 30 мс во время бестоковой паузы, не превышающей 7 мс. РУ содержит логическое переключающее устройство ЛПУ и датчики состояния вентилей (ДСВ) (см. рис. 51.19). ЛПУ имеет комбинированный алгоритм управления, по которому в режиме прерывистого тока комплекты подключаются попеременно (режим сканирования), а в режиме непрерывного тока включается только комплект заданного направления. ДСВ контролируют напряжения на тиристорах и выдают сигналы о запирании отдельно анодной и катодной групп тиристоров. В ЭП на токи выше 500 А в цепи выпрямленного тока устанавливается сглаживающий реактор  $L_4$ .

Подключаются ЭП к сети низкого напряжения 220 и 380 В вводными автоматическими выключателями  $QF1$ , а к сети высокого напряжения 6 или 10 кВ — через вводное высоковольтное устройство  $ВВУ$  с разъединителями  $QS$  и масляный выключатель  $Q$ . В цепи выпрямленного тока устанавливаются защитные автоматические выключатели  $QF2$  (двухполюсные при токах 500 А включительно и однополюсные до трех в параллель при токах выше 800 А). Для механизмов, требующих частых наладок, выпускаются ЭП с линейным контактором  $KM$  в цепи выпрямленного тока, обеспечивающим видимый разрыв цепи по требованиям техники безопасности.

В ЭП применяются нулевая защита (реле  $KV$ ), отключающая  $QF1$  или через  $ВВУ$  выключатель  $Q$ , максимально-токовая защита ( $QF1$ ,  $QF2$  и герконовые реле  $K$ , устанавливаемые в цепях постоянного и переменного

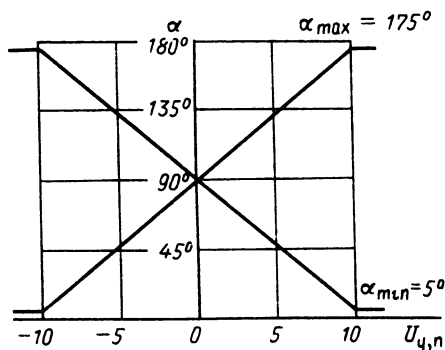


Рис. 51.20. Регулировочные характеристики СИФУ ТП ЭП серии КТЭ

тока), осуществляется контроль состояния изоляции (реле *КА*, воздействующее на систему сигнализации, и миллиамперметр *РmA*). В ТП на токи 800 А и выше при параллельном соединении тиристоров в их цепях устанавливаются быстродействующие плавкие предохранители. От перенапряжений тиристоры защищены цепочками *RC* и варисторами *RU*.

В ЭП имеется аварийное динамическое торможение двигателя (тиристоры *VS13, VS14, R1*). Для механизмов, требующих фиксации положения при остановке, используется электромагнитный тормоз *УВ*.

Питание обмотки возбуждения двигателей (рис. 51.21) осуществляется от трехфазных мостовых неревверсивных и реверсивных ТП (тиристоры *VS1 – VS6*) с такими же СИФУ, как в ТПЯ. Питание ТП осуществляется от сети низкого напряжения через согласующие питающие трансформаторы *T* (возможны варианты непосредственного питания от сети через токоограничивающие реакторы). Подключение к сети осуществляется автоматическим выключателем *QF*, осуществляющим максимально-токовую защиту. Тиристоры защищены цепочками *RC*. Обмотка возбуждения от перенапряжений защищена резисторами *R*, включенными последовательно-параллельно при больших мощностях двигателях. Реле *KV* используется для нулевой защиты.

Автоматическая система регулирования (АСР) в ЭКТ выпускается 24 видов в зависимости от необходимости ее использования. Разработаны АСР: скорости, ЭДС, положения, мощности, напряжения и др. с управлением одно-, двух- и многодвигательными (до 10 и 20 двигателей) ЭП с однозонным и двухзон-

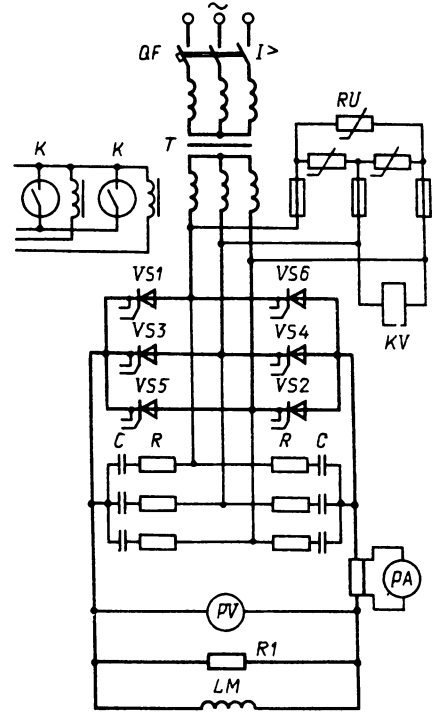


Рис. 51.21. Схема питания обмотки возбуждения двигателей ЭП серии КТЭ

ным регулированием скорости, с реверсом в цепях якоря и возбуждения двигателя, для системы Г–Д, аналоговые и цифровые.

АСР построены по принципу подчиненного регулирования. На рис. 51.22 приведена

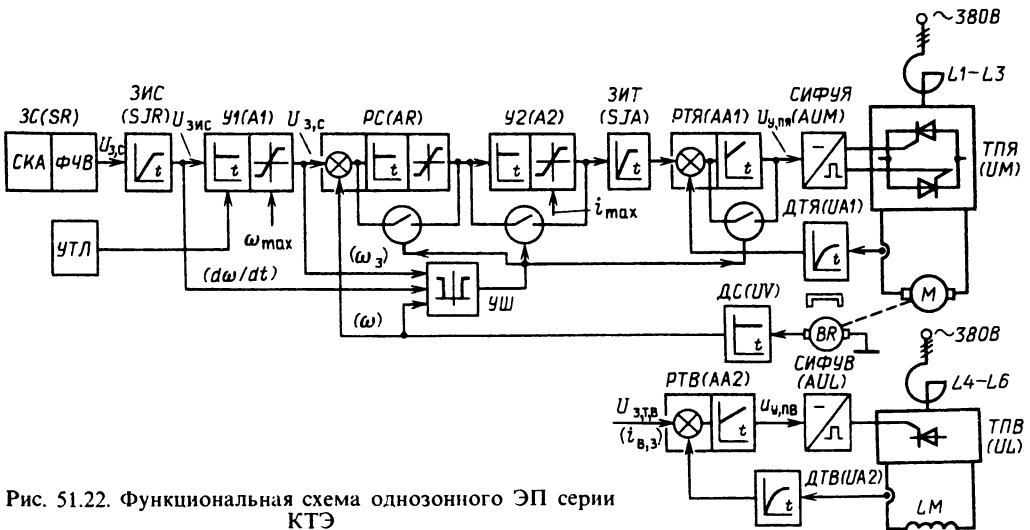


Рис. 51.22. Функциональная схема однозонного ЭП серии КТЭ



чик скорости, в котором могут использоваться СКА и ФЧВ или ступенчатый задатчик; РЭ (АЕ), РМП (АФ) – регуляторы ЭДС и магнитного потока двигателя; ДЭ (УЕ) – датчик ЭДС; Вп (У) – выпрямитель (выделитель модуля); ФП (УФ) – функциональный преобразователь; УОТТ (АУФ) – устройство ограничения тока и темпа изменения скорости; МУ (АХ), ДУ (АР) – множительное и делительное устройства (МДУ).

В серии КТЭ разработаны двухзонные АСР скорости без линеаризации и с линеаризацией динамических характеристик контуров регулирования скорости и ЭДС при значительном (более чем в 2 раза) ослаблении магнитного потока двигателя. В качестве таких устройств используются МДУ, включенные после РЭ и РС и корректирующие их коэффициенты усиления в зависимости от магнитного потока. В АСР скорости без линеаризации МУ и ДУ отсутствуют.

АСР скорости в цепи канала якоря двигателя аналогична АСР, приведенной на рис. 51.22. Для регулирования скорости двигателя изменением его тока возбуждения используется типовая двухпозиционная система независимого регулирования тока возбуждения (см. рис. 51.11) с контурами регулирования магнитного потока двигателя с ПИ – РМП и контуром ЭДС с ПИ – РЭ. Преобразование тока возбуждения в магнитный поток  $\Phi$  производится ФП с характеристикой в виде кривой намагничивания двигателя.

Изменение максимальных уставок заданного тока  $i_{max}$  и темпа изменения скорости ( $d\omega/dt$ ) в зависимости от магнитного потока обеспечивает УОТТ.

Система защиты в КТЭ обеспечивает нулевую, максимально-токовую (см. рис. 51.19 и 51.21), минимально-токовую защиту в обмотках возбуждения двигателя и тахогенератора, защиту от превышения токов якоря и возбуждения, напряжения на якоре и скорости их допустимых значений, от перегрева подшипников и неисправности маслосмазки двигателя (для ЭП при токах выше 200 А) и др. При аварийных режимах защита отключает ЭП от питающей сети.

При срабатывании защиты во всех случаях выдается дифференцированный световой сигнал сигнализации первой неисправности с заминанием каждого сигнала.

#### **Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями (табл. 50.4)**

Выпускаются ЭП с широтно-импульсными преобразователями (ШИП – Д), питаю-

щиеся от сети переменного тока через неуправляемый выпрямитель. Они используются в металлорежущих станках, промышленных роботах, кузнечно-прессовом оборудовании и в других механизмах, оснащенных системой ЧПУ.

Такие ЭП более быстродействующие, чем ЭП с управляемыми выпрямителями (ТП – Д) (полоса пропускания до 200 – 250 Гц), обеспечивают высокие диапазоны регулирования скорости (до 10 000 и выше) с высокой плавностью вращения двигателя, имеют меньшие потери и более высокий коэффициент мощности [51.22]. Последней разработкой является трехкоординатный ЭП типа ЭШИМ-1, предназначенный в первую очередь для ЭП механизмов роботов. В состав ЭП (рис. 51.24, а) входят: Т – питающий трансформатор; БП (АГ) – блок питания; БР (АС) – блок регулирования с системой управления; М, ЛМ – ДПТ независимого возбуждения с встроенным тахогенератором ВР (в двигателе могут быть встроены или пристроены датчик пути и механический тормоз); QF – автоматический выключатель; РС (АР), РТ (АА) – регуляторы скорости с усилителем УЗ (АЗ) и тока; ДТ (УА) – датчик тока; КМ – магнитный пускатель с приставкой (на рисунке не показан); Л1.1 – Л1.4 – сглаживающие реакторы.

Основным элементом ЭП является БР. Он осуществляет импульсную модуляцию напряжения питания двигателя. БР обеспечивает работу одной управляемой координаты механизма в замкнутой по скорости СУ ЭП. Он содержит: ТК1 – ТК4 – транзисторные ключи с блоками управления БУК1 – БУК4; VD1 – VD4 – обратный мост (шунтирующие диоды) и блок управления с системой регулирования.

В ЭП применен трехобмоточный питающий трансформатор с двумя вторичными обмотками, служащими для раздельного питания силовой части ЭП и СУ.

БР выполняется на токи 16 и 40 А, обеспечивает работу от одного до трех БР (при одной-трех координатах управления). Он содержит силовой трехфазный выпрямитель со сглаживающим фильтром, разрядники для ограничения перенапряжений, возникающих при торможении двигателя или со стороны питающей сети, и для обеспечения аварийного торможения двигателей любой координаты; устройство защитного отключения при авариях в БР и источник питания цепей управления, обеспечивающий стабилизированное переменное напряжение прямоугольной формы 24 В, 5 кГц и стабилизированное постоянное напряжение 48 В, в состав которого входят выпрямитель с фильтром, импульсный стабилизатор

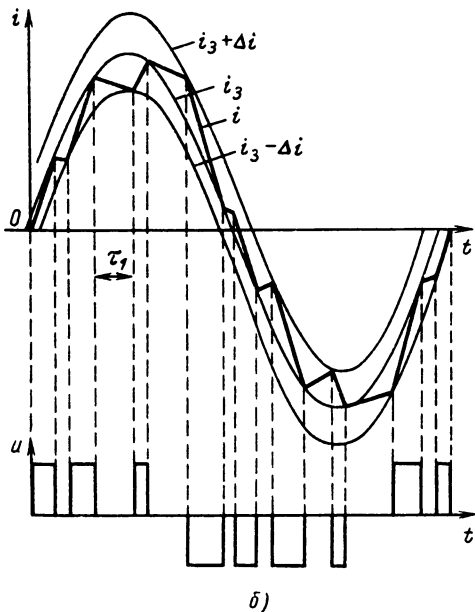
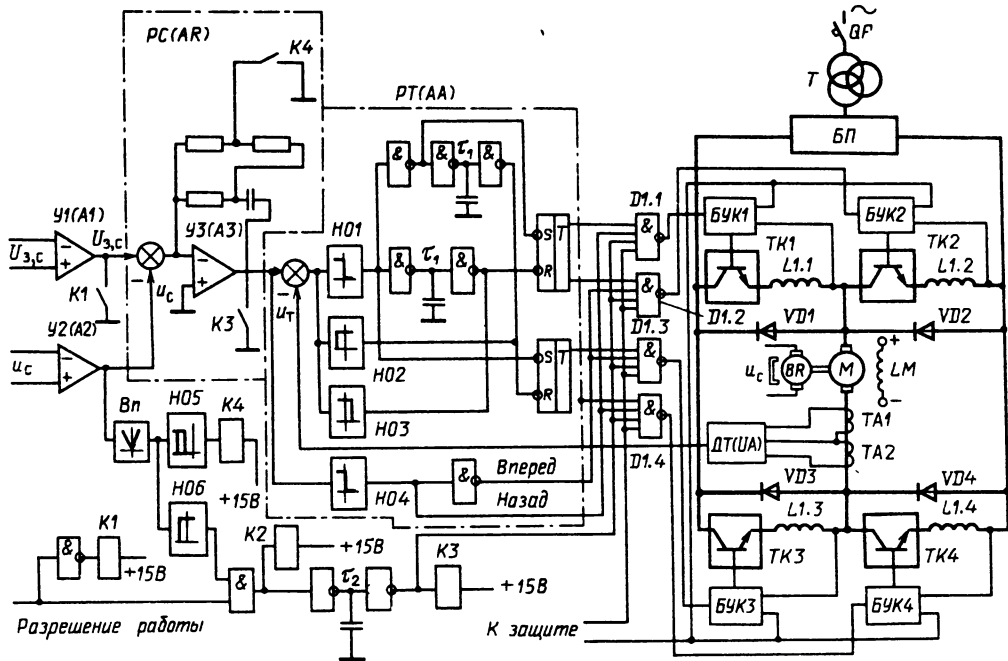


Рис. 51.24. Быстродействующий ЭП постоянного тока типа ЭШИМ-1:  
 а – функциональная схема; б – диаграмма формирования тока

напряжения и высокочастотный генератор (на схеме не показан).

Сигналы задания скорости  $U_{3,c}$  и ОС по скорости  $u_c$  подаются на вход РС через бу-

а)

ферные дифференциальные усилители  $U1(A1)$  и  $U2(A2)$ , уменьшающие уровень помех и формирующие нормированные сигналы задания  $u_{3,c}$  и ОС  $u_c$ , равные 10 В при максимальной скорости.

СУ ЭП двухконтурная с ПИ-РС и релейным РТ. РС выполнен с перестраиваемой в функции скорости коррекцией. При достижении скорости двигателя примерно  $0,25\omega_{max}$  контакт реле  $K4$  размыкается, что вызывает увеличение постоянной времени интегральной части и уменьшение коэффициента усиления пропорциональной части РС примерно в 3 раза.

Управление реле  $K4$  осуществляет  $H05$  в функции однополярного выходного сигнала  $U2$ , обеспечиваемого выпрямителем  $Вп$ . Нуль-орган  $H06$  переключается при скорости, близкой к нулю, и управляет работой реле  $K2$  и  $K3$ , из которых  $K2$  включает тормоз, растормаживающий двигатель, и  $K3$  разблокирует РС.

Релейный РТ, выполненный на нуль-органах  $H01 - H03$  с RS-триггерами, через элементы И  $D1.1 - D1.4$  и оптронные гальванические развязки в  $БУК1 - БУК4$  управляет силовыми транзисторными ключами  $TK1 - TK4$ , создающими следующие режимы работы: режим 2 (P2) – включены ключи  $TK1$  и  $TK4$  или  $TK2$  и  $TK3$  в зависимости от полярности задания

тока; режим 1 (P1) – включен один из ключей  $TK1$  или  $TK3$ , ток двигателя течет через открытый ключ и один из диодов обратного моста; режим 0 (P0) – выключены все транзисторные ключи, ток двигателя течет через диоды обратного моста в источник постоянного напряжения. Режимы работы выбираются  $HO1 - HO3$ .

Нуль-орган  $HO4$ , на вход которого подается сигнал задания тока, задает направление тока якоря двигателя.

РТ работает следующим образом. На вход  $HO1 - HO3$  поступает разность напряжений задания тока  $u_{3,T}$  и напряжения ОС по току якоря двигателя  $u_T$ , снимаемого с безынерционного датчика тока  $DT(UA)$ , определяющая ток задания  $i_i$  и текущее значение тока  $i$  (рис. 51.24, б). На входы  $HO2$  и  $HO3$  подаются также положительное и отрицательное смещение, определяющие пороги срабатывания этих НО и соответственно нижнюю ( $i_i - \Delta i$ ) и верхнюю ( $i_i + \Delta i$ ) границы возможных значений тока якоря. При  $\Delta u_i = u_{3,T} - u_T > 0$  и  $u_{3,T} > 0$  на выходе  $HO1$  будет логический 0, а на выходах  $HO2$  и  $HO3 - 1$ . Это обуславливает включение ключа  $TK3$  и через выдержку времени  $\tau_1$  включение ключа  $TK2$ . При этом ток якоря увеличивается, и когда он превысит заданное значение тока, на выходе  $HO1$  появится сигнал 1. Это приведет к отключению ключа  $TK2$  и закорачиванию зажимов двигателя через диод  $VD1$  и открытый ключ  $TK2$ . Ток якоря начинает уменьшаться, и как только он станет меньше заданного, на выходе  $HO1$  появится сигнал 0 и начнется отсчет выдержки времени  $\tau_1$ , после окончания которой снова включится ключ  $TK2$  и начнется новое нарастание тока якоря двигателя. Далее процесс повторится.

Если после отключения ключа  $TK2$  ток якоря двигателя продолжает нарастать (это возможно при работе двигателя в тормозном режиме) и на выходе  $HO1$  продолжает существовать сигнал 1, начинается отсчет выдержки времени  $\tau'_1$ , по окончании которой произойдет отключение ключа  $TK3$ , ток якоря двигателя начинает течь по диодам обратного моста  $VD1 - VD4$  встречно напряжению источника силового питания, форсированно уменьшаясь.

Уменьшение тока будет происходить до тех пор, пока ток не окажется меньше заданного, после чего снова включится ключ  $TK3$  и т. д.

В БР имеются защиты аварийная (нулевая, максимально-токовая и защита от несоответствия заданной скорости) и технологическая (время-токовая защита ДПТ и тепловая защита БП, БР и двигателя).

### Система управления электропривода постоянного тока с силовым источником тока

Электропривод постоянного тока с управляемым моментом содержит источник питания, обладающий свойствами источника тока (ИТ), и двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Такие ЭП называют системами источник тока – двигатель (ИТ–Д) [51.23]. В качестве ИТ может использоваться неуправляемый трехфазный индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП) с выпрямителем на выходе (см. рис. 51.25, а). Принцип действия ИЕП основан на явлении резонанса напряжений в цепях  $LC$ , при котором ток в нагрузке не зависит от ее сопротивления и определяется линейным напряжением питающей сети и сопротивлением реактивных элементов ( $x_L = x_C$ ).

Электропривод, выполненный по системе ИТ–Д, обладает свойствами «источника момента», управление которым осуществляется изменением тока возбуждения двигателя (магнитного потока), поскольку при  $I_{я} = \text{const}$  момент двигателя  $M = k\Phi I_{я} = k_{\Phi} \Phi$ .

Система ИТ–Д, замкнутая по скорости, ЭДС или току возбуждения двигателя, обеспечивает стабилизацию этих координат при изменении нагрузки. Упрощенная электрическая принципиальная схема двухдвигательного нереверсивного ЭП, выполненного по системе ИТ–Д, приведена на рис. 51.25, а [51.24]. Она разработана для трансформирующих устройств технологических линий кабельного производства.

На схеме обозначено:  $M1, LM1, M2, LM2$  – ДПТ независимого возбуждения; ИЕП ( $UM$ ) – ИЕП с диодами  $VD1 - VD6$ ; БУ ( $AS$ ) – блок управления возбуждением двигателей  $M1$  и  $M2$ , включающий две идентичные системы. На рис. 51.25, а показана одна система, в которой  $ТПВ(UL)$  – ТП возбуждения с оптронами тиристорами  $VS1 - VS4$ ;  $PЭ1(AK1) - PЭ3(AK3)$  – релейные элементы, каждый из которых включает в себя усилители  $У1(A1) - У3(A3)$ , работающие в релейном режиме, транзисторы  $VT1 - VT3$  и светоизлучающие диоды оптронов  $VD8 - VD10$ ;  $VT4$  – транзистор, осуществляющий с фотодиодами оптронов логическую функцию ИЛИ;  $VT5$  – транзистор, работающий как бесконтактный ключ, обеспечивающий подачу сигналов управления на силовые оптронные тиристоры  $VS1 - VS4$ ;  $ЗС(SR), ЗЭ(SE), ЗМ(SM)$  – задатчики скорости, ЭДС и момента двигателя с напряжениями задания  $U_{3,с}, U_{3,з}$  и  $U_{3,м}$ ;  $ДС1(BR1), ДС2(BR2), ДН(UV), ДТ(UA)$  – датчики скорости, напряжения (ЭДС) и тока возбуждения;  $КМ1,$



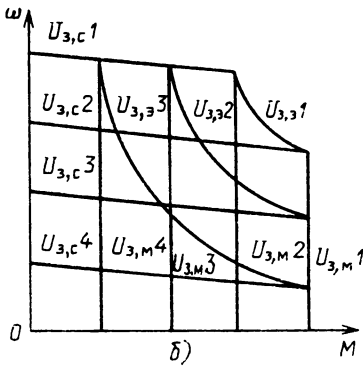


Рис. 51.25.

ния может применяться при регулировании момента двигателя в диапазоне  $D_M = 20$  с точностью стабилизации 10% и максимальном моменте до  $(1,2 \div 1,3) M_{ном}$ . Все ОС выполнены релейными, благодаря чему обеспечивается схемная простота и высокая надежность работы системы. Механические характеристики ЭП показаны на рис. 51.25, б.

Пуск двигателя осуществляется по цепи возбуждения подачей сигнала задания регулируемой координаты скорости, ЭДС или тока возбуждения при установке двух других задатчиков в положения, обеспечивающие ограничение этих величин.

В схеме предусмотрены электрические защиты: нулевая ( $KM1$  и  $KM2$ , отключающий БУ), максимальнотоквая ( $QF$  и предохранители), от превышения напряжения ИЕП ( $VSS$ ,  $VD7$ ), от перенапряжений на тиристорах  $TПВ$  (цепи  $RC$ ) и от превышения скорости ( $KV1$ ,  $KV2$ ).

#### Цифро-аналоговые системы управления скоростью электропривода постоянного тока

Цифровые СУ ЭП позволяют обеспечить высокие диапазоны регулирования скорости при очень высокой статической точности, достигающей 0,01–0,001%, которую не могут дать ЭП с СУ непрерывного действия. Основное их применение связано с использованием ЭВМ (см. § 51.10). Наибольшее применение находят цифро-аналоговые СУ ЭП, сочетающие положительные свойства аналоговых и цифровых систем. Цифро-аналоговые СУ ЭП строятся по структуре подчиненного регулирования координат, в которой основной (внешний) контур управления выполняется цифровым, а подчиненный (внутренний) — аналоговым. Цифровые устройства обеспечивают высокую точность

регулирования и облегчают процесс настройки и работы благодаря точному измерению и индикации регулируемой величины — скорости. Аналоговые устройства являются выходными и обеспечивают хорошее качество переходных процессов.

Функциональная схема цифро-аналоговой СУ ЭП [51.26, 51.27] приведена на рис. 51.26, а. Система содержит аналоговую и цифровую части. В аналоговую часть входят:  $M$  — двигатель;  $P(U)$  — ТП;  $PC(ARY)$ ,  $PT(AAY)$  — аналоговые регуляторы скорости и тока;  $ДС(BR)$ ,  $ДТ(UA)$  — аналоговые датчики скорости (тахогенератор) и тока; в цифровую входят:  $ЦЗС(SRZ)$  — цифровой задатчик скорости;  $ЦЗИ(SJZ)$  — цифровой задатчик интенсивности;  $ДЧ(AF)$  — управляемый делитель частоты;  $ЦАП(UZY)$  — цифро-аналоговый преобразователь;  $ЦИ(AJZ)$  — цифровой интегратор;  $ГЧ(GF)$  — генератор частоты;  $ИДС(BRF)$  — импульсный датчик скорости.

Аналоговая часть СУ ЭП выполнена в виде двухконтурной системы подчиненного регулирования с КТ и КС с аналоговыми П-РС и ПИ-РТ и аналоговыми датчиками тока  $ДТ$  и скорости  $ДС$ .  $PC$  принят комбинированным, как ПИ-регулятор с пропорциональной аналоговой частью и интегральной цифровой. Цифровая часть обеспечивается цифровым интегратором  $ЦИ$  с импульсным датчиком скорости  $ИДС$ .

Задание скорости подается на обе части  $PC$  — аналоговую и цифровую. Оно обеспечивается  $УВВ$  и  $ЦЗИ$  в виде чисел  $N_{3,с}$  и  $N'_{3,с}$ . Число  $N'_{3,с}$  с помощью  $ЦАП$  преобразуется в аналоговый сигнал задания скорости  $u_{3,с}$ , который подается на  $PC$ . Одновременно число  $N'_{3,с}$  через  $ДЧ$  определяет частоту следования импульсов задания скорости  $f_3$ , которые получают из импульсов эталонной частоты  $f_{эт}$ , задаваемых высокостабильным кварцевым генератором  $ГЧ$ . Цифровой интегратор выполнен на основе реверсивного счетчика, на суммирующий вход которого поступают импульсы сигнала задания скорости с частотой  $f_3$ , а на вычитающий — импульсы ОС с  $ИДС$  с частотой  $f_c$ . Заполнение счетчика происходит под воздействием разности этих частот  $\Delta f = \pm (f_3 - f_c)$ . Число, записанное в счетчике и определяющее рассогласование скорости, интегрируется цифровым интегратором и затем с помощью  $ЦАП$ , расположенного в  $ЦИ$ , преобразуется в аналоговый интегральный сигнал рассогласования скорости

$$u_{ц.и.} \text{ равный } u_{ц.и.} = q \int_0^{\infty} \Delta f dt, \text{ где } q - \text{ дискрета}$$

квантования выходного сигнала цифрового интегратора.



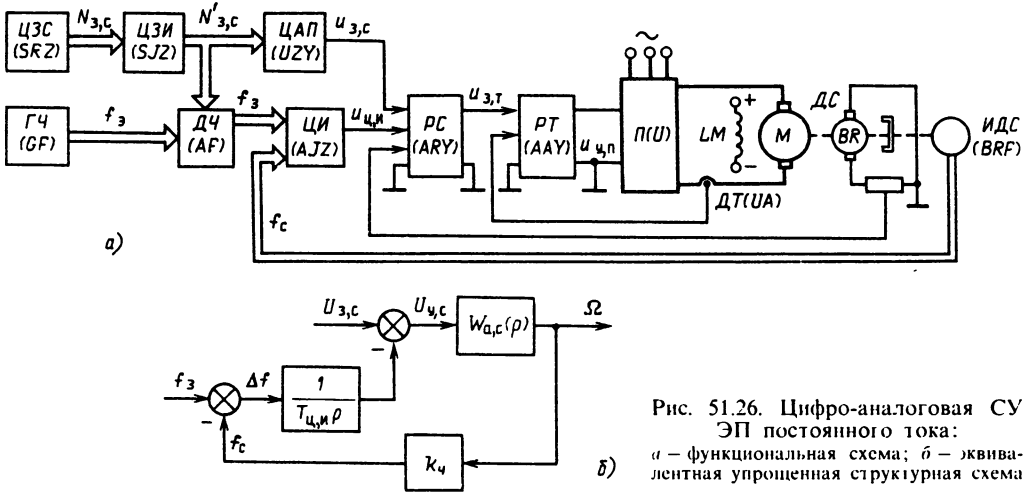


Рис. 51.26. Цифро-аналоговая СУ ЭП постоянного тока:  
 а – функциональная схема; б – эквивалентная упрощенная структурная схема

Этот сигнал подается на РС, где, складываясь с  $U_{3,c}$ , обеспечивает повышение или снижение скорости двигателя. Далее система работает как аналоговая.

Устройства регулирования цифро-аналоговых систем принимаются из унифицированной серии регуляторов: УБСР-ДИ – цифровые и УБСР-АИ – аналоговые [51.2, 51.9, 51.33], микроДАТ [51.53].

Анализ и синтез приведенной цифро-аналоговой СУ ЭП можно проводить по упрощенной эквивалентной структурной схеме (рис. 51.26, б) линеаризованной системы, в которой приняты следующие обозначения:  $k_c, k_1, k_ч$  – коэффициенты обратных связей по скорости, току и частоте следования импульсов с ИДС;  $T_{ц,и}$  – постоянная интегрирования ЦИ;  $W_{а,с}(p)$  – передаточная функция аналоговой части СУ ЭП, настроенной на технический оптимум, равная

$$W_{а,с}(p) = \Omega / (U_{3,c} - U_{ц,и}) = 1 / \{4T_{\mu}p [2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1] + 1\} k_c.$$

Линеаризация системы произведена при пренебрежении дискретизацией ЦИ, что возможно при высоком быстродействии процессов цифрового интегрирования по сравнению с процессами в аналоговой части системы.

Передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$W_c(p) = \frac{\Omega}{f_3(p)} = \frac{(k_{ц,и}/p) W_{а,с}(p)}{1 + (k_ч/T_{ц,и}p) W_{а,с}(p)} =$$

$$= \frac{1/k_ч}{[(k_c/k_ч) T_{ц,и}] p \{4T_{\mu}p [2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) + 1] + 1\} + 1}$$

При  $(k_c/k_ч) T_{ц,и} = 8T_{\mu}$  получается передаточная функция двукратно интегрирующей системы, настроенной на СО, в которой передаточная функция ПИ – РС с учетом аналоговой части цифрового интегратора равна

$$W_{PC}(p) = \frac{T_{\mu}k_1}{2T_{\mu}Rk_{д}k_c} \frac{T_{PC}p + 1}{T_{PC}},$$

где  $T_{PC}$  – постоянная времени РС, равная  $T_{PC} = (k_c/k_ч)/T_{ц,и}$ , а  $T_{ц,и}$  – постоянная времени линеаризованного ЦИ.

При  $T_{PC} = 4T_{\mu}$  цифро-аналоговая система подобна аналоговой с ПИ – РС. Эта схожесть указывает на то, что переходные процессы в цифро-аналоговой системе регулирования скорости близки к переходным процессам в соответствующей ей аналоговой системе. Наличие же цифровой части обеспечивает более высокую точность стабилизации скорости.

Имеются разнообразные способы построения цифровых СУ ЭП [51.26, 51.27]. Существуют СУ ЭП с цифровым КС и аналоговым КТ, а также с цифровыми КС и КТ с прямым цифровым управлением тиристорным преобразователем ЭП от ЭВМ (см. § 51.10).

### Системы управления электроприводов переменного тока

В ЭП переменного тока питание АД и СД осуществляется от управляемых преобразователей напряжения и частоты. В качестве преобразователей напряжения используются

Рис. 51.27. Асинхронный ЭП с тиристорной станцией управления ТСУ-2:  
 а – функциональная схема; б – механические характеристики

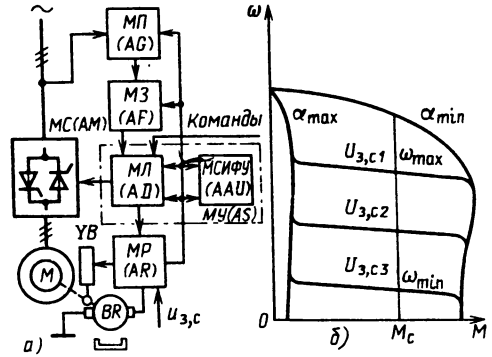
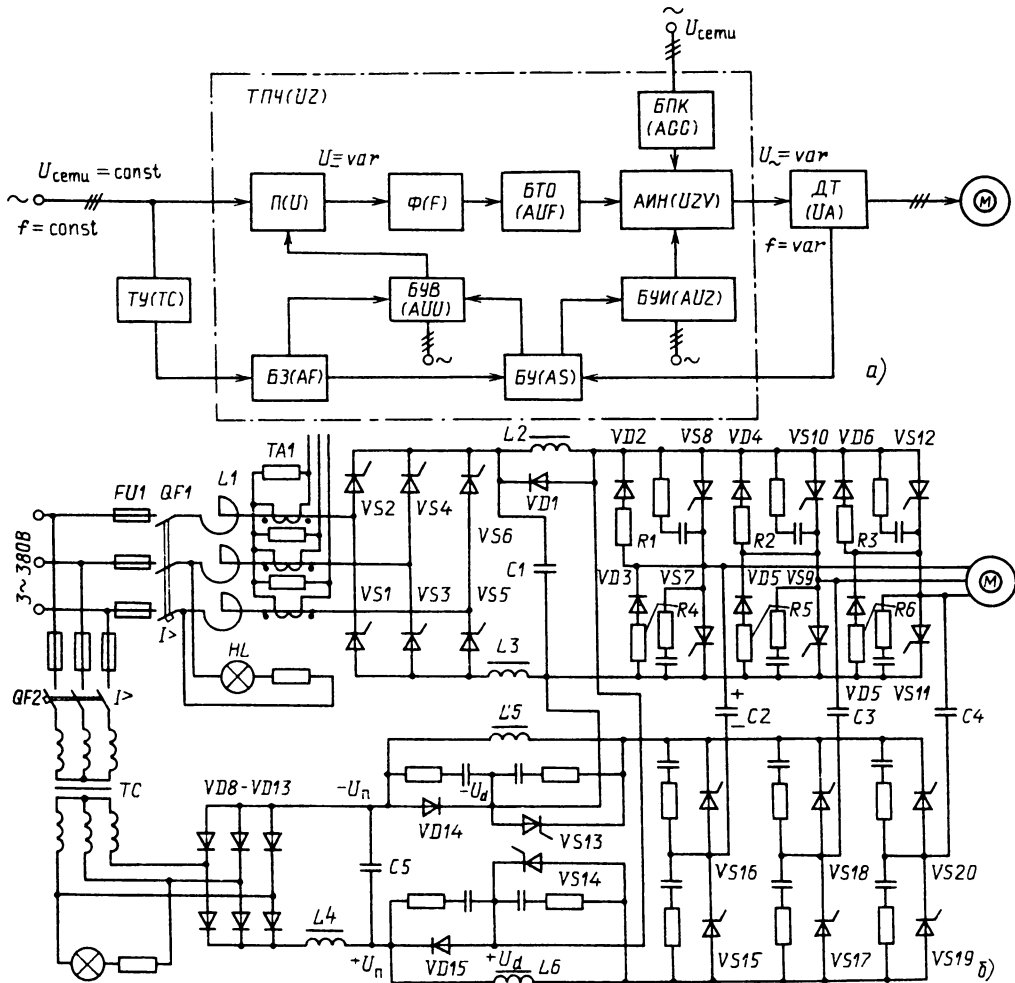


Рис. 51.28. Асинхронный ЭП типа ЭКТ-20.  
 а – функциональная схема, б – механические характеристики



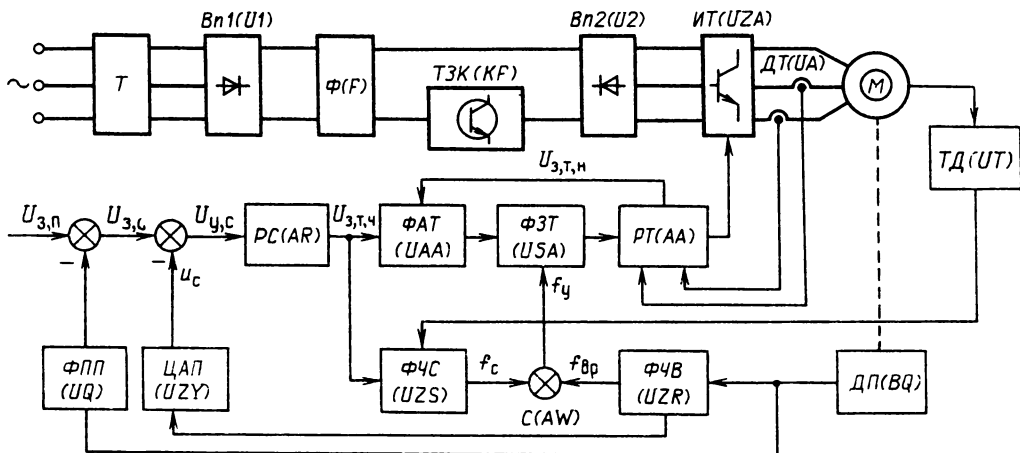
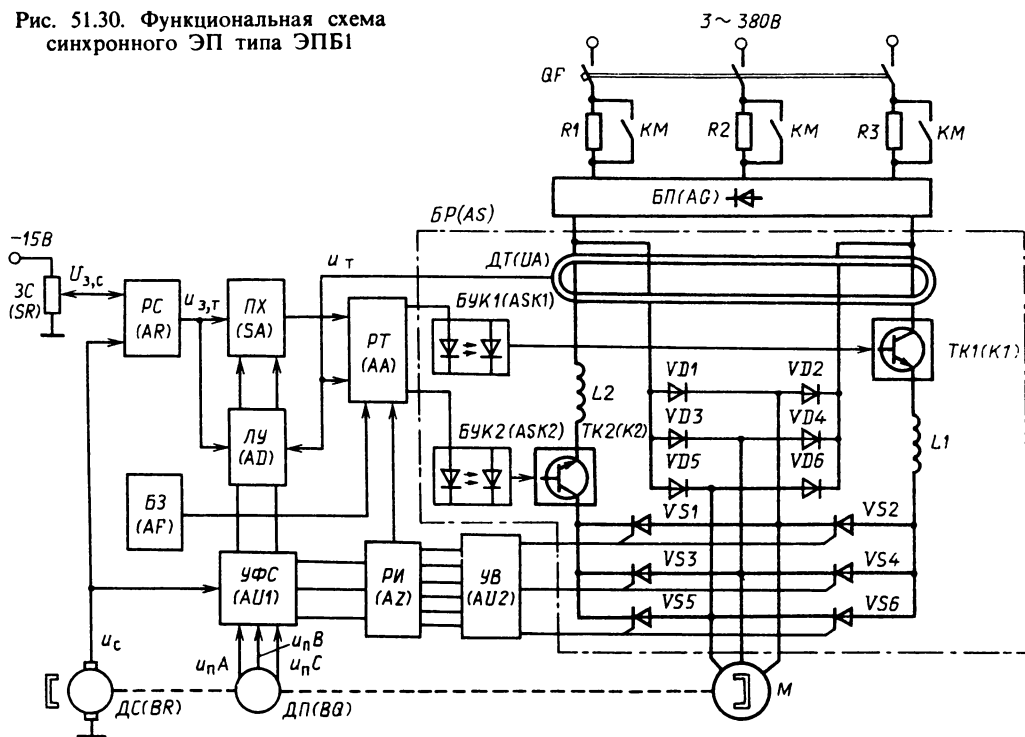


Рис. 51.29. Функциональная схема асинхронного ЭП типа «Размер 2М-5-2»

Рис. 51.30. Функциональная схема синхронного ЭП типа ЭПБ1



тиристорные преобразователи (ТПН), регулирующие напряжение с помощью тиристорных коммутирующих однофазных элементов (ТКЭ) с различными схемами включения тиристорных диодов [51.28]. Наибольшее распространение получили ТКЭ с двумя тиристорами,

включенными по встречно-параллельной схеме. Такие ТКЭ осуществляют бесконтактную коммутацию цепей обмоток статора и ротора АД и регулируют подводимое к ним напряжение. Управление ТКЭ производится от СИФУ, обеспечивающей подачу импульсов на требу-

мые тиристоры. Электроприводы, выполненные по системе ТПН – АД, выпускаются комплектно (см. рис. 51.27).

В качестве преобразователей частоты (ПЧ) используются ПЧ с непосредственной связью (НПЧ) и с промежуточным звеном постоянного тока. НПЧ представляет собой реверсивный ТП постоянного тока с нулевой схемой выпрямления и со специальной СИФУ, осуществляющей регулирование напряжения с переменной частотой. НПЧ обеспечивает низкую частоту регулирования: порядка 10–12 Гц для трехфазных схем выпрямления и 15–20 Гц для шестифазных при частоте питающей сети 50 Гц. Они имеют относительно низкий коэффициент мощности. ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (см. рис. 51.28) позволяют регулировать частоту в широких диапазонах – от нескольких тысяч герц до сотых долей герца независимо от частоты питающей сети [51.31–51.33]. Системы ТПЧ – АД выпускаются комплектно (см. табл. 50.8 и рис. 51.28 и 51.29) и изготавливаются индивидуально [51.33].

Системы управления синхронных ЭП выполняются замкнутыми с быстродействующими автоматическими регуляторами возбуждения АРВ типа ТЕ8 и КТУ [51.2] с питанием обмотки статора от сети. Они обеспечивают постоянство скорости и стабилизацию параметров питающей сети системы электропитания. При необходимости регулирования скорости и момента применяются системы с ПЧ, осуществляющие регулирование частоты и напряжения питания СД. Такие системы обеспечивают двухзонное регулирование скорости – как вниз, так и вверх от синхронной скорости. При необходимости высоких быстродействий используются замкнутые системы с управлением ПЧ в функции положения ротора или результирующего вектора потокоцепления с векторным управлением [51.34]. Синхронные ЭП выпускаются комплектно [51.34, 51.35, 51.59] (см. табл. 50.4 и рис. 51.30) и изготавливаются индивидуально [51.32, 51.36].

#### Асинхронный электропривод с тиристорной станцией управления ТСУ-2

Станции типа ТСУ-2 являются станциями второго поколения, призванными заменить ранее выпускаемые станции типа ПТУ и ТСУР [51.28]. Системы управления станций выполнены на микросхемах. Станции предназначены для управления асинхронными ЭП металлургического производства и других отраслей промышленности и сельского хозяйства. Например

станция ТСУ-2КЛ обеспечивает регулирование скорости асинхронного ЭП вентиляторов в установках микроклимата сельскохозяйственных производственных помещений.

Станции ТСУ-2 выпускаются в неревверсивном и реверсивном исполнениях. Они имеют восемь модификаций по выполняемым функциям с обеспечением прямого или управляемого пуска двигателя, регулирования скорости, динамического и механического торможений; шесть модификаций по номинальному току станции на токи 4, 10, 25, 63, 100, 250 А и четыре модификации по виду электрической защиты.

Электрическая функциональная схема станции ТСУ-2 приведена на рис. 51.27, а: М – АД; УВ – электромеханический тормоз; ВР – тахогенератор постоянного тока; модули: МС (АМ) – силовой, МУ (АС) – управления, МР (АР) – режима, МЗ (АФ) – защиты и МП (АГ) – питания.

В МС расположены силовые блоки и трансформаторы тока для защиты и контроля станции. Силовые блоки на токи 4 и 10 А выполнены на тиристорных оптопарах, а на токи 25–250 А – на таблеточных тиристорах типа Т9. Тиристоры включены встречно-параллельно по три или пять пар в зависимости от исполнения станции. Блоки на токи 4 и 10 А снабжены автоматическими выключателями.

МУ включает в себя модули логики МЛ (АД) и модули СИФУ [МСИФУ (ААУ)]. МЛ обеспечивает управление силовыми тиристорами в соответствии с командами управления МСИФУ и МЗ. В зависимости от модификации станции МЛ разные. Они управляют подачей и снятием напряжения с АД при пуске и остановке, переводом его в режим динамического торможения с управлением в функции времени, наложением механического тормоза, реверсированием с промежуточным динамическим торможением. Управление МЛ может осуществляться аналоговыми и импульсными сигналами. МСИФУ могут содержать СИФУ двух видов: одноканальную синхронную, предназначенную для станций, обеспечивающих плавный пуск, регулирование скорости и регулируемое динамическое торможение ЭП с невысоким быстродействием, и синхронную аналого-цифровую СИФУ – для станций, обеспечивающих регулирование скорости и динамическое торможение ЭП с высоким быстродействием.

МР обеспечивает управление ЭП в установившихся и динамических режимах, а также включает и отключает УВ. В состав МР входит блок питания УВ и три платы:

реле, плавного пуска и регулятора ОС. Питание на электромагнит  $YB$  подается контактами реле по сигналу  $MЛ$ . Устройство платы плавного пуска формирует закон управления во времени для разгона  $M$  до номинальной скорости с различной интенсивностью. Устройство платы регулятора связи обеспечивает стабилизацию скорости при изменении нагрузки со статизмом, не превышающим 10% во всем диапазоне регулирования скорости, равном 1:10.

$MЗ$  обеспечивает нулевую защиту АД от работы на пониженном напряжении и в двухфазном режиме, максимально-токовую защиту станции и АД от токов КЗ и время-токовую защиту от перегрузки АД. При снижении напряжения ниже  $0,75U_{ном}$  или обрыве фазы в оперативную память  $MЗ$  поступают сигналы с  $MП$ , по которым  $MЛ$  отключает силовые тиристоры, снимая напряжение питания с обмотки статора АД, включает тиристоры, образующие выпрямитель, и переводит АД в режим динамического торможения с последующей остановкой.

Сигналы для токовых защит поступают с датчика тока ( $ДТ$ ), выполненного с тремя трансформаторами тока, включенными в каждую фазу питающего напряжения  $M$ , и схемой выпрямления, конструктивно размещенными в силовых блоках. Если сигнал с  $ДТ$  превысит уставку максимально-токовой защиты, то срабатывает пороговый элемент этой защиты, сигнал с которого поступает в долговременную память  $MЗ$  и через  $MЛ$  отключает силовые тиристоры. Если сигнал с  $ДТ$  превысит уставку время-токовой защиты, то срабатывает пороговый элемент этой защиты. При этом имеющийся в устройстве защиты счетчик начинает суммировать импульсы, поступающие с выхода формирования время-токовой характеристики, соответствующей тепловой характеристике  $M$ . При заполнении счетчика сигнал с его выхода поступает в долговременную память и через  $MЛ$  отключает силовые тиристоры.

Силовые тиристоры защищают также от перенапряжений цепями  $RC$ , конденсаторами и варисторами.  $MП$  обеспечивает напряжение питания для всех остальных модулей станции. Механические характеристики ЭП при  $U_{3,с1} - U_{3,с3}$  приведены на рис. 51.27,6.

Конструктивно станции ТСУ-2 выполняются в виде подвесного или встраиваемого блока с одно- или двусторонним обслуживанием, в котором устанавливаются различные в зависимости от модификации станции модули. На лицевой панели станции расположены органы управления, настройки и индикации.

### Асинхронный электропривод с преобразователем частоты типа ЭКТ-20 (табл. 50.8)

Электропривод (рис. 51.28,а) содержит:  $M$  – АД; ТПЧ ( $UZ$ ) – тиристорный преобразователь частоты, в силовую схему которого входят:  $Π(U)$  – трехфазный мостовой регулируемый выпрямитель (преобразователь напряжения) со звеном постоянного тока; АИН ( $UZV$ ) – автономный инвертор напряжения,  $Φ(F)$  – фильтр; БПК ( $AGC$ ) – блок подзаряда конденсаторов; БТО ( $AUF$ ) – узел силового токоограничения; ДТ ( $UA$ ) – датчик тока.

Схема управления ТПЧ содержит: БУВ ( $AUU$ ), БУИ ( $AUZ$ ) – блоки систем управления выпрямителем и инвертором; БУ ( $AS$ ) – блок управления, осуществляющий раздельное регулирование амплитуды и частоты выходного напряжения и обеспечивающий требуемое соотношение между ними; БЗ ( $AF$ ) – блок защиты, обеспечивающий отключение и автоматическое повторное включение (АПВ) при срыве инвертора, отключение при исчезновении фазы питающего напряжения, АПВ при кратковременном исчезновении напряжения питающей сети, максимально-токовую защиту, отключение ЭП при перегрузках.

Замкнутая система ЭП построена по принципу сравнения задающего сигнала, пропорционального частоте, с сигналом ОС и, по внутренней ЭДС двигателя.

Принципиальная силовая схема ТПЧ приведена на рис. 51.28,б. ТПЧ подключается к сети автоматическим выключателем  $QF1$  через токоограничивающие реакторы  $L1$ .  $Π$  выполнен на тиристорах  $VS1 - VS6$ . Реактор  $L2$  и конденсатор  $C1$  выполняют роль фильтра в звене постоянного тока. Кроме того, конденсатор  $C1$  является конденсатором реактивной мощности нагрузки, повышающим общий коэффициент мощности ЭП.

В ТПЧ используется автономный инвертор напряжения с пофазной коммутацией, коммутирующее устройство которого служит для попеременного запираания тиристоров двух вентиляльных плеч, относящихся к одной фазе инвертора. Схема автономного инвертора содержит: мост основных тиристоров ( $VS7 - VS12$ ); мост коммутирующих тиристоров ( $VS15 - VS20$ ); разделительные диоды  $VD14$ ,  $VD15$ , развязывающие источник основного питания  $U_d$  со вспомогательным источником  $U_n$ ; мост обратных диодов ( $VD2 - VD7$ ) с резисторами  $R1 - R6$ ; коммутирующие реакторы  $L5$ ,  $L6$ ; коммутирующие конденсаторы  $C2 - C4$ ; тиристоры подзаряда  $VS13$ ,  $VS14$ .

При включении основных тиристоров  $VS8$ ,

$VS10$  и  $VS11$  коммутирующий конденсатор  $C2$  заряжен до напряжения источника питания  $U_d$  с указанной на схеме полярностью. Ток нагрузки протекает к тиристорам  $VS8$ ,  $VS10$ , фазам двигателя и тиристор  $VS11$ . Импульсы управления подаются одновременно на один рабочий и один коммутирующий тиристор. Например, для того чтобы запереть рабочий тиристор  $VS8$ , импульсы управления подаются на коммутирующий тиристор  $VS15$  и одновременно на рабочий тиристор  $VS7$ . Коммутирующий конденсатор  $C2$ , разряжаясь, гасит ток в тиристоре  $VS8$  и далее перезаряжается по цепи  $C2$  – резистор  $R1$  – обратный диод  $VD2$  – разделительный диод  $VD15$  – индуктивность  $L6$  – коммутирующий тиристор  $VS15$  –  $C2$ . После окончания перезаряда конденсатора  $C2$  включается рабочий тиристор  $VS7$ . Ток фазы замыкается через обратный диод  $VD2$ , уменьшаясь до нуля, и при перемене знака переходит в тиристор  $VS7$ .

В схеме при снижении  $U_d$  и увеличении тока устойчивость коммутации падает. Независимость напряжения на коммутирующем конденсаторе от напряжения питания можно обеспечить, применяя подзаряд конденсатора от посторонних источников ( $U_n$ ) через тиристоры подзаряда ( $VS13$ ,  $VS14$ ) после окончания коммутации тока в основных тиристорах.

Поэтому для обеспечения постоянной коммутационной способности инвертора при регулировании амплитуды и частоты выходного напряжения в преобразователе применяется источник подзаряда коммутирующих конденсаторов, состоящий из неуправляемого (или полуправляемого) выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме (диоды  $VD8$ – $VD13$ ). Напряжение на его выходе фильтруется Т-образным фильтром  $L4$  и  $C5$ . Источник подзаряда включается в сеть переменного напряжения через трансформатор  $TC$  и автомат  $QF2$ .

При включении тиристора  $VS7$  одновременно с ним подается импульс на включение тиристора подзаряда  $VS13$  и на повторно коммутирующий тиристор  $VS15$ . Подзаряд происходит по цепи  $+U_n$ – $L6$ – $VS15$ – $C2$ – $VS7$ – $VS13$ – $L5$ – $(-U_n)$ . Для ограничения тока при разряде энергии емкости фильтра в схеме используется силовое токоограничение, осуществляемое сглаживающим реактором  $L2$ , зашунтированным встречно-включенным диодом  $VD1$ , и в зависимости от типа преобразователя – разрядным устройством (на схеме не показано).

В схеме ЭП осуществляется максимально-токовая защита ( $QF1$ ,  $QF2$ ,  $FU1$ ,  $FU2$ ). Защита тиристоров рабочих, коммутирующих, подзаря-

да и разделительных диодов от перенапряжений осуществляется цепями  $RC$ . Сигнализация обеспечивается лампой  $HL$ .

ТПЧ типа ЭКТ предназначены для частотного регулирования скорости АД с короткозамкнутым ротором в реверсивном и нереверсивном ЭП общепромышленных механизмов. Система управления обеспечивает регулирование амплитуды и частоты выходного напряжения в соответствии со следующими законами регулирования:  $U/f = \text{const}$  – для многодвигательного ЭП и  $E/f = \text{const}$  для индивидуального ЭП с возможностью обеспечения двухзонного регулирования с точностью регулирования напряжения до 2% в номинальном режиме. В ЭП типа ЭКТ используются АД типов ВАО, 4А, АО2, А2 и др.

#### Комплектный асинхронный электропривод типа «Размер 2М-5-2»

Асинхронный ЭП «Размер 2М-5-2» предназначен для работы в системах автоматического регулирования скорости электродвигателей в ЭП подач металлорежущих станков и промышленных роботах с системами ЧПУ [51.34].

Электропривод имеет систему управления ТПЧ-АД с частотно-токовым векторным управлением. Он обеспечивает глубокое регулирование скорости ( $D = 10000$ ). В состав ЭП (рис. 51.29) входят:  $M$  – АД с короткозамкнутым ротором с встроенными датчиками углового положения ротора ДП ( $BQ$ ) и температуры ТД ( $UT$ ); ИТ ( $UZA$ ) – транзисторный инвертор тока;  $Vn2$  ( $U2$ ) – обратный мост;  $TЗК$  ( $KF$ ) – транзисторный защитный ключ;  $\Phi$  ( $F$ ) – фильтр звена постоянного тока;  $Vn1$  ( $U1$ ) – неуправляемый выпрямитель;  $T$  – пигающий трансформатор;  $PC$  ( $AR$ ),  $PT$  ( $AA$ ) – регуляторы скорости и тока;  $DT$  ( $UA$ ) – датчик фазных токов АД;  $\PhiЗТ$  ( $USA$ ),  $\PhiАТ$  ( $UAA$ ) – формирователи задания и амплитуды и фазы фазных токов АД;  $\PhiЧС$  ( $UZS$ ),  $\PhiЧВ$  ( $UZR$ ) – формирователи частот скольжения и вращения;  $C$  ( $AW$ ) – сумматор и формирователь импульсов управления;  $\PhiПП$  ( $UQ$ ) – формирователь сигнала положения;  $ЦАП$  ( $UZY$ ) – цифро-аналоговый преобразователь.

Система управления ЭП двухконтурная с ПИ  $PC$  и трехфазным релейным  $PT$ . Скорость двигателя определяется задающим напряжением  $U_{з.с.}$  Стабилизацию скорости осуществляет обратная связь по скорости, сигнал которой снимается с ДП через  $\PhiЧВ$ .

Выходной сигнал  $PC$ , являясь сигналом

задания тока  $U_{3,т,ч}$ , определяет ток и частоту тока двигателя. Он проходит по двум каналам. В первом канале с помощью ФАТ вырабатывается сигнал, определяющий амплитуду и фазу тока статора АД. На первый канал подается также сигнал  $U_{3,т,ч}$ , обуславливающий ток намагничивания и соответственно магнитный поток двигателя. Во втором канале сигнал  $U_{3,т,ч}$  с помощью ФЧС превращается в сигнал задания частоты тока (частоты скольжения  $f_c$ ), который, складываясь с сигналом ОС по скорости в виде частоты вращения  $f_{вр}$ , получаемой с ФЧВ, создает сигнал  $U_4(f_y)$ , определяющий частоту тока статора. Оба канала формируют заданную синусоидальную кривую тока статора заданной амплитуды и частоты. На вход РТ также поступают сигналы ОС по току статора от ДТ. В нуль-органе РТ сравниваются мгновенные значения заданного и фактического токов статора. ОС по угловому положению ротора осуществляется с помощью ДП, выполненного в виде «фазовращателя». Изменение фазы его выходного сигнала преобразуется в ФПП в импульсные сигналы, пропорциональные угловому перемещению ротора.

ИТ представляет собой трехфазную мостовую схему с питанием от звена постоянного тока, работающую на частоте коммутации  $f = 3$  кГц. Каждая фаза моста содержит по два силовых прерывателя, которые поочередно подключают вывод обмотки АД к положительному либо к отрицательному полюсу звена постоянного тока. Переключение происходит с указанной частотой, управление последовательностью переключений осуществляется РТ. Ключи трехфазного мостового инвертора или прерыватели состоят из нескольких параллельно включенных транзисторов, управляющего транзистора, соединенного с основными по схеме составного транзистора, и вентиля обратного моста.

Электропривод обеспечивает работу с номинальными моментами двигателей от 7 до 47 Н·м во всех квадрантах механических характеристик. В ЭП имеется быстродействующая защита силовых транзисторов ИТ от перегрузки (более 60 А) с помощью ТЗК. Кроме того, предусмотрена защита от перегрева, от недопустимого превышения или снижения напряжения источников питания. При исчезновении напряжения сети обеспечивается аварийное торможение двигателя.

#### Комплектный тиристорный электропривод переменного тока серий ЭПБ1 и ЭПБ2

Электроприводы ЭПБ (см. табл. 50.4) предназначены для одно-, двух- и трех-

координатных механизмов подач металлорежущих станков, промышленных роботов и других механизмов, требующих широкого диапазона регулирования скорости [51.35, 51.58]. Электропривод построен по системе ТПЧ-СД с частотно-токовым управлением. Он обеспечивает высокое быстродействие и малые уровни шума и электромагнитных потерь в двигателе. В состав ЭПБ1 (рис. 51.30) входят: М – бесколлекторный СД с возбуждением от постоянных магнитов в роторе с пристроенными тахогенератором BR и датчиком углового положения ротора ДП (BQ) (в состав двигателя дополнительно могут входить встроены тормоз, терморезисторы и пристроенный оптронный датчик пути); БР (AS) – блок регулирования; БП (AG) – блок питания (питание ЭП может осуществляться через силовой трансформатор и без трансформатора); QF – автоматический выключатель; R1 – R3 – токоограничивающие резисторы; KM – контактор (магнитный пускатель).

В БР входят: трехфазный тиристорный автономный инвертор тока с тиристорами VS1 – VS6; обратный трехфазный диодный мост VD1 – VD6, переводящий энергию двигателя в сглаживающий фильтр БП; силовые транзисторные ключи TK1 (K1), TK2 (K2) с их блоками управления БУК1 (ASK1) и БУК2 (ASK2); датчик тока ДТ (UA) с магнитным суммированием токов инвертора и обратного моста; L1, L2 – реакторы, обеспечивающие безопасный режим работы транзисторных ключей.

БП обеспечивает работу от одного до трех БР. В его состав входят: трехфазный силовой выпрямитель; высоковольтный сглаживающий фильтр; разрядник, ограничивающий перенапряжение в силовой цепи при переходе энергии из двигателя в сглаживающий фильтр, трансформатор питания системы управления; трехфазные выпрямители с 12 однофазными выпрямительными мостами, обеспечивающими напряжение  $\pm 24$  В и стабилизированное напряжение  $\pm 15$  В для питания цепей управления.

Инвертор тока осуществляет питание двигателя и обеспечивает регулирование частоты напряжения на двигателе и ток в фазах обмотки статора в соответствии с требуемой скоростью и моментом двигателя. Инвертор тока вместе с датчиком положения ДП (BQ) выполняет роль коллектора (как в двигателе постоянного тока).

Система управления ЭП – двухконтурная с ПИ-РС и безынерционным релейным РТ. Для согласования реверсивного сигнала задания тока  $u_{3,т}$  с неревверсивным сигналом датчика тока  $u_t$  используется переключатель характе-

ристик  $PX$  ( $SA$ ), управляемый логическим устройством  $ЛУ$ .

$PT$  через оптронные гальванические развязки, имеющиеся в БУК, управляет силовыми транзисторными ключами  $TK1$  и  $TK2$ , создающими режимы работы ЭП: режим 2 ( $P2$ ) – включены ключи  $TK1$  и  $TK2$ , ток течет от источника постоянного напряжения (силовой выпрямитель в  $BP$ ) через  $UA$ ,  $L1$ ,  $L2$ ,  $TK1$ ,  $TK2$ , тиристоры  $VS1 - VS6$  и две фазы двигателя; режим 1 ( $P1$ ) – включен один из ключей  $TK1$  или  $TK2$ , ток фаз двигателя замыкается через тиристор, открытый ключ, реактор ( $L1$  или  $L2$ ), один из диодов обратного моста и  $DT$ ; режим 0 ( $P0$ ) – выключены оба ключа  $TK1$  и  $TK2$ , ток из двигателя течет через диоды обратного моста и  $DT$  в источник постоянного напряжения.

Продолжительность режимов работы выбирается нуль-органами режимов  $P1$  и  $P0$ , имеющимися в  $PT$ , и обеспечивается выдержками времени, определяющими минимальные длительности режимов  $P0$ ,  $P1$ ,  $P2$  и максимальную длительность режима  $P1$ . Ток двигателя формируется, как в ЭШИМ-1 (см. рис. 51.24, б).

Вводные устройства  $UB$  служат для управления тиристорами инвертора, осуществляющими коммутацию тока в фазах двигателя, которая обеспечивается распределителем импульсов  $PI$  в функции сигналов датчика положения ротора  $ДП$ .  $ДП$  вырабатывает трехфазное напряжение  $U_{пА}$ ,  $U_{пВ}$ ,  $U_{пС}$ , являющееся опорным напряжением в устройстве фазосмещения  $УФС$ , где с ним складывается напряжение  $U_c$ .

Устройство фазосмещения  $УФС$  устанавливает оптимальный угол регулирования тириستоров в функции скорости двигателя и сдвигает выходные сигналы для двигательного режима работы ЭП в функции скорости в сторону опережения на угол  $\beta$  от 0 до  $\pi/3$ , начиная со скорости более  $0,5\omega_{max}$ . Для тормозного режима работы входные сигналы передаются без сдвига. Кроме того, в  $PI$  предусмотрена возможность установки фиксированного начального угла  $\beta = \pi/6$  для двигательного режима и  $\beta_{нач} = -\pi/6$  для тормозного.

В ЭП предусмотрены следующие электрические защиты: нулевая от снижения напряжений управления +24 и 115 В, максимально-токовая; защиты от перегрева  $BP$  и двигателя; от прекращения вентиляции и обрыва возбуждения тахогенератора. Имеется блокировка от ползучей скорости двигателя. Защиты размещены в блоке защит  $B3$ .

## 51.7. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫХ И СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

### Системы управления позиционного электропривода

Автоматические системы регулирования положения обеспечивают точное позиционирование исполнительного органа рабочей машины (ИОРМ) в заданных точках пути по дискретным сигналам датчиков положения (конечных выключателей) или при непрерывном автоматическом регулировании положения по отклонению от заданного значения. Автоматическое регулирование положения по отклонению от заданного значения обеспечивается с помощью систем непрерывного (аналогового) и дискретного (цифрового) управления с подчиненным регулированием координат ЭП.

### Аналоговая система регулирования положения

На рис. 51.31, а приведена функциональная схема непрерывной системы управления положением ЭП:  $M$  ( $LM$ ) – ДПТ независимого возбуждения;  $P$  ( $U$ ) – тиристорный преобразователь напряжения, подключаемый к сети переменного тока непосредственно или через силовой трансформатор (см. § 51.6);  $PT$  ( $AA$ ),  $PC$  ( $AR$ ),  $PP$  ( $AQ$ ),  $DT$  ( $UA$ ),  $ДС$  ( $BR$ ),  $ДП$  ( $BQ$ ) – регуляторы и датчики тока, скорости и положения;  $ФЧВ$  ( $UFY$ ) – фазочувствительный выпрямитель;  $BC$ ,  $BE$  – сельсины датчик (задатчик) и приемник. На входе  $СУ$  ПЭП суммируются сигнал задания положения  $\theta_3$  и сигнал  $OC$   $\theta_n$ , пропорциональный действительному положению механизма. Этот сигнал обеспечивается  $ДП$ , в качестве которого используются линейные, например индуктивные, датчики при линейном перемещении или угловые (сельсины или вращающиеся трансформаторы) при угловом перемещении. На вход  $РП$  поступает сигнал рассогласования по положению, равный  $\Delta u_n = k_{ФЧВ} u_{\Delta\theta}$ , и вырабатывается сигнал задания скорости  $u_{3,c}$ .

$РП$  учитывает не только рассогласование между заданным и истинным положениями, но и знак этого рассогласования. Поэтому при использовании датчиков угловых перемещений (сельсинов или вращающихся трансформаторов) в схеме применяются также  $ФЧВ$  и дополнительные усилители.

$СУ$  ПЭП обеспечивает регулирование тока, скорости и положения.  $КТ$  и  $КС$  настраиваются так же, как в системе регулирования скорости (см. рис. 51.6). При настройке конту-



ра положения в позиционном ЭП, обеспечивающем различные перемещения, рассматриваются три вида перемещения: малое (М), среднее (С) и большое (Б). При малом перемещении (рис. 51.31, б), когда скорость двигателя  $\omega$  не достигает рабочей номинальной скорости ( $\omega < \omega_{р,ном}$ ) и ток не достигает значения тока ограничения  $I_{огр}$ , система линейна. В этом случае контур положения настраивается на ТО и принимается П РП с передаточной функцией, определяющей его коэффициент усиления:

$$W_{РП}(p) = k_{РП} = k_c / (8T_\mu k_{оп}),$$

где  $k_c$ ,  $k_{оп} = 1/k_p$  – коэффициенты ОС по скорости и положению;  $T_\mu$  – малая некомпенсированная постоянная времени, принятая при настройке КТ и КС;  $k_p$  – передаточное отношение редуктора  $Pи$  ( $RC$ ) ( $k_{оп} = 1$  при отсутствии редуктора).

Такой РП обеспечивает оптимальный переходный процесс (см. рис. 51.5 при  $n = 3$ ) с  $\sigma = 6,2\%$  и  $t_p = 13,6T_\mu$ . Точность позиционирования определяется статической погрешностью, равной при  $\omega = 0$  и настройке на ТО

$$\Delta\theta_{ст} = 32T_\mu^2 (Rk_d^2 / T_\mu) M_c = 32T_\mu^2 M_c / J,$$

где  $J$  – момент инерции ЭП.

При больших значениях  $M_c$  погрешность  $\Delta\theta_{ст}$  оказывается большой и по якорю неподвижного двигателя может протекать большой ток.

Поэтому РП настраивается на среднее перемещение, когда  $\omega = \omega_{р,ном}$  и  $i = I_{огр}$  (рис. 51.31, в). В этом случае

$$k_{РП} = (2k_c \varepsilon_{тmax}) / (k_{оп} \omega_{р,ном}),$$

где  $\varepsilon_{тmax} = (M_{max} + M_c) / J$  – максимальное замедление при торможении двигателя;  $M_{max} = I_{огр} / k_d$  – максимальный момент двигателя.

Однако при такой настройке точное позиционирование обеспечивается только при среднем расчетном перемещении (С), а при малом (М) и большом (Б) оно обеспечивается соответственно с дотягиванием и перерегулированием. Это видно на фазовых траекториях напряжения ОС по скорости  $u_c$  в функции перемещения  $\Delta\theta$ , наложенных на характеристику РП (см. рис. 51.31, д).

Для того чтобы при любых перемещениях обеспечивалось точное позиционирование (рис. 51.31, е), применяют параболический РП с коэффициентом усиления, обратно пропорциональным скорости движения при торможении:

$$k_{РП} = \frac{\varepsilon_{тmax} k_c}{\omega_t k_{оп}} = \frac{\varepsilon_{тmax} k_c}{\sqrt{2\varepsilon_{тmax} \Delta\theta} k_{оп}},$$

где  $\omega_t = \sqrt{2\varepsilon_{тmax} \Delta\theta}$  – начальная скорость двигателя при торможении, и начальным линейным участком с  $k_{РП} = k_c / (8T_\mu k_{оп})$ .

### Цифро-аналоговая система регулирования положения

При высоких точностях позиционирования для регулирования положения используется цифро-аналоговая система управления, функциональная схема которой приведена на рис. 51.32. Схема содержит аналоговую часть системы с такими же элементами, как и при регулировании скорости (см. рис. 51.26), но с добавлением аналоговой части регулятора положения  $РП$  ( $AQ$ ) и цифровой, в которую входят:  $УВЗ$  ( $SQZ$ ) – устройство ввода задания положения;  $СУ$  ( $AW$ ) – арифметическое суммирующее устройство;  $ЦАП$  ( $UZU$ ) – цифро-аналоговый преобразователь кода в напряжение;  $ДПЦ$  ( $BQZ$ ) – многоразрядный цифровой датчик положения;  $ПК$  ( $UZZ$ ) – преобразователь кода числа положения механизма в параллельный двоичный код.

В цифровой части системы осуществляет задание требуемого положения, контроль его действительного значения и выделение сигнала рассогласования по положению. Все это производится цифровым способом. Задание положения механизма, обеспечиваемое  $УВЗ$  в виде числа  $N_{з,п}$  в параллельном двоичном коде, подается на один из входов сумматора  $СУ$ , на второй вход которого поступает число  $N_p$  (также в параллельном двоичном коде), соответствующее действительному положению механизма, полученное от цифрового датчика положения  $ДПЦ$  и преобразованное в  $ПК$  в двоичный код. Код рассогласования  $\Delta N_p$ , вычисленный сумматором  $СУ$ , преобразуется в  $ЦАП$  в напряжение рассогласования  $\Delta u_p$ , которое подается на аналоговую часть регулятора положения  $РП$ .

Цифро-аналоговая система регулирования положения, так же как система регулирования скорости, обеспечивает хорошие динамические показатели ЭП, обуславливаемые ее аналоговой частью, и высокую точность регулирования (до 0,001 %) за счет ее цифровой части.

Цифровая часть системы может выполняться с использованием ЭВМ (см. § 51.10).

### Системы управления следящего электропривода

Система управления следящего ЭП ( $СУ$   $СЭП$ ) – замкнутая динамическая система, обрабатывающая произвольно изменяющийся

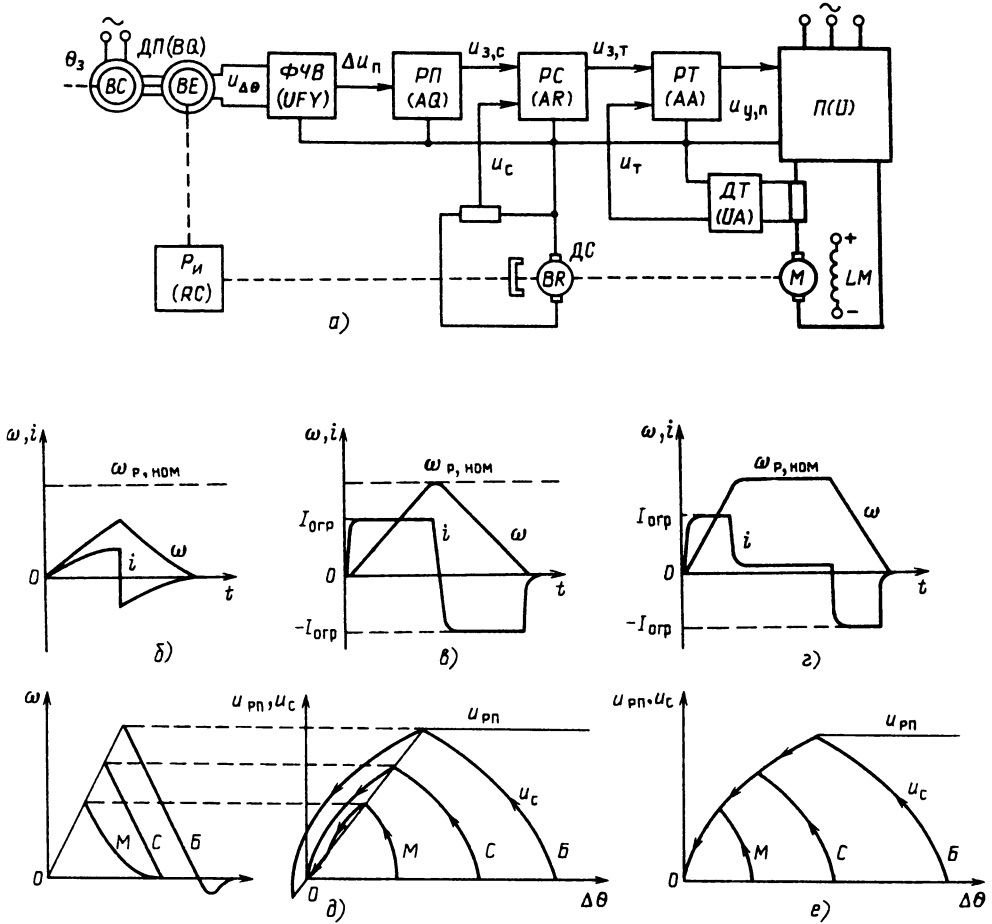


Рис. 51.31. Аналоговая система управления позиционного ЭП:  
 а – функциональная схема, б–г – изменение скорости и тока при малом (б), среднем (в) и большом (г) перемещениях; д, е – изменение скорости при линейной (д) и параболической (е) характеристиках регулятора положения

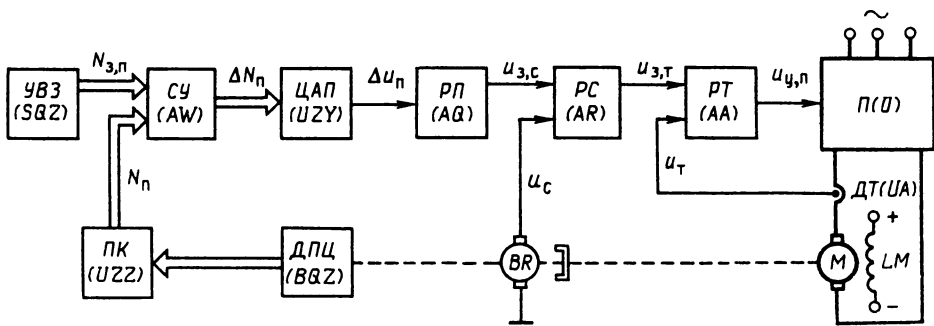


Рис. 51.32. Функциональная схема цифрово-аналоговой системы управления позиционного ЭП

входной сигнал и обеспечивающая движение ИОРМ согласно этому сигналу.

СУ СЭП производственных механизмов подразделяются по роду тока на системы постоянного и переменного тока, по структуре — на системы с суммирующим усилителем и подчиненным регулированием координат, по принципу действия — на аналоговые, цифровые и комбинированные.

Структура СУ СЭП та же, что и система управления позиционного ЭП при произвольно изменяющемся входном сигнале задания. Обобщенная функциональная схема СУ СЭП показана на рис. 51.33, где обозначено: ЗП (SQ) — задатчик перемещения, обеспечивающий требуемый алгоритм управления движением ИОРМ и содержащий ЭП с преобразователем П2 (U2), двигателем М2 и системой управления СУ ЭП2; С1 (AW1) — измеритель рассогласования перемещения; ИОРМ — сумматор, содержащий датчики (BC) и приемники (BE) грубого (BC1, BE1) и точного (BC2, BE2) отсчетов угловых (или линейных) перемещений, включенные через измерительные редукторы Рn1 (RC1) — Рn4 (RC4); С1 (S) — селектор грубого и точного отсчетов; С2 (AW2) — С5 (AW5) — сумматоры; ФЧВ (UFY) — фазочувствительный выпрямитель; КУ1 (AD1) — КУ3 (AD3), BR1 — BR2 — последовательные и параллельные корректирующие устройства, содержащие дифференциаторы и тахогенераторы; РЭП — регулируемый ЭП со своей системой управления СУ ЭП1, преобразователем П1 (U1), двигателем М1 и передающим устройством Рс (RM).

На вход СУ СЭП подается задающее воздействие в виде углового  $\theta_3$  или линейного  $S_3$  перемещения, обеспечиваемое с помощью ЭП требуемый алгоритм управления перемещением ИОРМ. На РЭП всегда действуют

внешние (изменение нагрузки) и внутренние (помехи, изменение параметров и др.) возмущающие воздействия, вызывающие отклонения регулируемой координаты от заданного алгоритма управления. СУ СЭП замкнута главной ОС по перемещению ИОРМ. Внутренние корректирующие сигналы и связи по первым и вторым производным от  $\theta_3$  и  $\theta_{\text{вых}}$  суммируются на входе и выходе ФЧВ в зависимости от использования тахогенераторов переменного или постоянного тока. После ФЧВ может быть включено последовательное корректирующее устройство КУ1 в виде дифференциатора, обеспечивающего дополнительно к сигналу рассогласования ее первую производную. Дифференциатор может быть совмещен с ФЧВ. Используется также связь по току двигателя как связь по ускорению.

Измерители рассогласования выполняются аналоговыми на потенциометрах, сельсинах и синусно-косинусных вращающихся трансформаторах (СКВТ) с точностью отработки рассогласования у потенциометров (0,2–0,6)%, у сельсинов (0,25–1)° и у вращающихся трансформаторов — единиц угловых минут, различные цифровые измерители рассогласования (импульсные датчики положения) выполняются с точностью отработки до 0,001%.

Устройствами, обеспечивающими преобразование сигнала рассогласования по положению ИОРМ  $\Delta\theta$  в напряжение управления ЭП  $u_y = u\Delta\theta$ , обычно являются сами измерительные устройства. При использовании сельсинов и СКВТ в ПУ входят ФЧВ, преобразующие сигналы переменного тока определенной фазы в сигналы постоянного тока соответствующей ей полярности.

В качестве РЭП используются быстродействующие транзисторные и тиристорные ЭП постоянного тока типа ЭШИМ и ЭПУ с

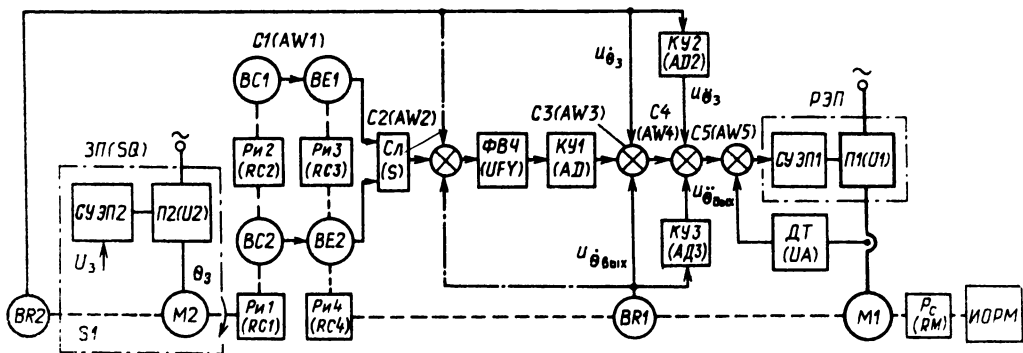


Рис. 51.33. Обобщенная функциональная схема системы управления следящего ЭП

высокомоментными двигателями серий ПБВ и ДПМ и переменного тока типа «Размер» с двигателями серии 4А.

Питание элементов СУ СЭП осуществляется от индивидуальных источников постоянного тока и от промышленных сетей с частотой 50 Гц. Маломощные ЭП питаются от источников с частотой 400 Гц. Измерительные и преобразующие устройства и промежуточные усилители питаются преимущественно от источников переменного тока с частотой 400 Гц. Это уменьшает габаритные размеры и снижает инерционность этих устройств.

Для обеспечения требуемого быстродействия и точности обработки рассогласования в СУ СЭП используются параллельные и последовательные корректирующие устройства, обеспечивающие сигналы управления по первой и второй производным от выходного и входного сигналов и первую производную рассогласования.

Для повышения точности обработки рассогласования используются двухотсчетные измерительные устройства.

Следящие ЭП комплектно не выпускаются, они изготавливаются индивидуально с использованием комплектных РЭП. Ниже приводятся примеры некоторых следящих ЭП.

#### Аналоговая система управления следящего электропривода с суммирующим усилителем

Функциональная схема СУ СЭП приведена на рис. 51.34, а, где  $M$ ,  $LM$  – ДПТ независимо возбуждения;  $ВТД$  ( $ТС$ ),  $ВТП$  ( $ТЕ$ ) – вращающиеся трансформаторы (датчик и приемник);  $T1$ ,  $T3$  – трансформаторы питающие,  $T2$  – входной;  $ФЧВ$  ( $УФV$ ) на  $VT1 - VT8$  – фазочувствительный выпрямитель;  $У(A)$  – усилитель;  $П(U)$  – ТП;  $P_c$  ( $RM$ );  $P_n$  ( $RC$ ) – редукторы силовой и измерительный.

В качестве измерителей рассогласования используются СКВТ. Сигнал задания  $\theta_3$  поступает от задатчика  $ТС$ , а сигнал обратной связи  $\theta_{вых}$  – от приемника  $ТЕ$ , измеритель рассогласования обеспечивает сигнал управления  $u_{\Delta\theta}$ , пропорциональный рассогласованию. Этот сигнал подается на ключевой ФЧВ, где фаза сигнала переменного тока преобразуется в полярность постоянного тока. Усилитель  $У$  может быть усилителем постоянного тока, а может работать по схеме модулятор – усилитель переменного тока – демодулятор. Далее сигнал подается на тиристорный ЭП, который содержит СУ ЭП, СИФУ, устройство токоограничения (на рисунке не показаны), преобразователь  $П$  и двигатель постоянного тока  $M$ , обрабатывающий задан-

ное перемещение механизма через  $P_c$ ; СКВТ (приемник  $ТЕ$ ) соединен с ИОРМ через  $P_n$ . Его соединение может быть осуществлено непосредственно от вала двигателя. В СУ СЭП используется параллельное корректирующее устройство ( $KУ$ )  $R1$ ,  $R2$ ,  $C1$ ,  $C2$  и может использоваться последовательная коррекция в виде ключевого дифференциатора, обеспечивающего сигнал рассогласования и его производную.

Синтез и анализ такой СУ СЭП может производиться по эквивалентной структурной схеме (рис. 51.34, б), в которой обозначено:  $\Delta\theta(p) = \theta_3(p) - \theta_{вых}(p)$  – изображение рассогласования по положению;  $U_{\Delta\theta}$ ,  $U_y$ ,  $U_{y,n}$  – изображения сигналов рассогласования, управления, управления преобразователя;  $E_{II}$ ,  $\Omega$  – изображения ЭДС преобразователя и скорости двигателя;  $k_{и,г}$ ,  $k_{ФЧВ}$ ,  $k_y$ ,  $k_k$ ,  $k_n$ ,  $k_l$  – коэффициенты передачи и усиления измерительного элемента, ФЧВ, усилителя, КУ, преобразователя и двигателя;  $T_k$  – постоянная времени КУ;  $J$  – момент инерции ЭП;  $R$  – суммарное сопротивление якорной цепи преобразователя и двигателя. Для упрощения анализа принято  $T_n = 0$  и  $T_я = 0$ .

Дифференциальное уравнение такой СУ СЭП при заводке с постоянной скоростью задания  $\omega_3$  имеет вид

$$J \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + (F + F_{доп}) \frac{d \Delta\theta}{dt} + k \Delta\theta = F \omega_3 + M_c.$$

КУ изменяет коэффициент затухания  $F$  на значение  $F_{доп} = k_{и,г} k_{ФЧВ} k_y k_n k_k T_k / (R k_d^2)$ , обеспечивая требуемый переходный процесс  $\Delta\theta = f(t)$ .

В установившемся режиме с постоянной скоростью заводки  $\omega_3$  СУ СЭП обрабатывает рассогласование по положению со скоростной  $\Delta\theta_{ск}$  и статической  $\Delta\theta_{ст}$  погрешностями

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{ск} + \Delta\theta_{ст} = F \omega_3 / k + M_c / k,$$

где  $k = k_{и,г} k_{ФЧВ} k_y k_n k_k / (R k_d^2)$  – коэффициент передачи СУ СЭП.

Скорость обработки задания  $\omega_3$  и соответствующая ей скоростная погрешность определяют добротность СУ СЭП по скорости, равную

$$k_{ск} = \omega_3 / \Delta\theta_{ск} = k / F$$

и пропорциональную коэффициенту усиления, который может быть увеличен за счет повышения  $k_y$ .

При линейно нарастающей скорости задания  $\omega_3 = \varepsilon_{max} t$  с максимальным ускорением оценивается добротность СУ СЭП по ускорению

$$k_{ук} = \varepsilon_{max} / \Delta\theta_{ск}.$$

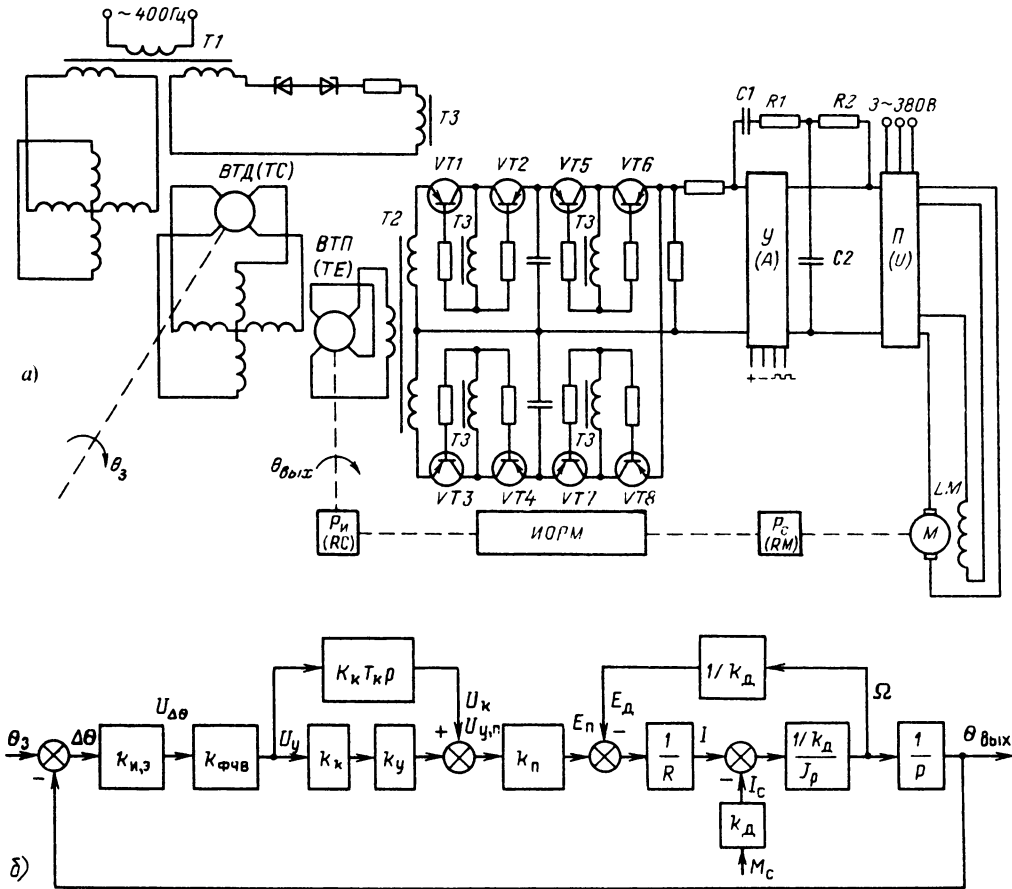


Рис. 51.34. Аналоговая система управления следящего ЭП:  
 а – функциональная схема, б – эквивалентная структурная схема

**Аналоговые СУ СЭП с подчиненным регулированием координат**

СУ СЭП с подчиненным регулированием координат – трехконтурная система с КТ, КС и КП для управления позиционным ЭП (см. рис. 51.31), в которой  $\theta_3$  изменяется по требуемому алгоритму. Такую СУ СЭП рассматривают как линейную, так как она работает с малыми рассогласованиями, все ее элементы работают на линейных участках своих характеристик и ток двигателя не достигает значений ограничения. При настройке контуров такой СУ СЭП на технический оптимум принимаются ПИ-РТ, П-РС и П-РП.

Анализ такой СУ СЭП проводится по эквивалентной структурной схеме (рис. 51.35), в которой КТ изображен упрощенной передаточной функцией  $W_{0,KT}(p) = 1/(2T_\mu p + 1) k_l k_d$  и  $M_c$  вынесен на вход КС.

Дифференциальное уравнение такой СУ СЭП

$$\Delta\theta(p) = \{\theta_3(p)[4T_\mu p(2T_\mu p + 1) + 1] + M_c(p)4T_\mu p(2T_\mu p + 1)Rk_d^2/T_m p\}/k_c.$$

В установившемся режиме с равномерной завожкой СУ СЭП обрабатывает рассогласование по положению со скоростной и статической погрешностями

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{ск} + \Delta\theta_{ст} = 8T_\mu \omega_3 + 8T_\mu Rk_d^2 M_c.$$

Тогда добротность СУ СЭП по скорости

$$k_{ск} = \omega_3 / \Delta\theta_{ск} = 1/8T_\mu$$

и при  $T_\mu = 0,01$  с  $k_{ск} = 12,5$ , что слишком мало.

Следовательно, СУ СЭП с подчиненным регулированием координат обладает ограниченными возможностями.

При настройке контура положения на СО

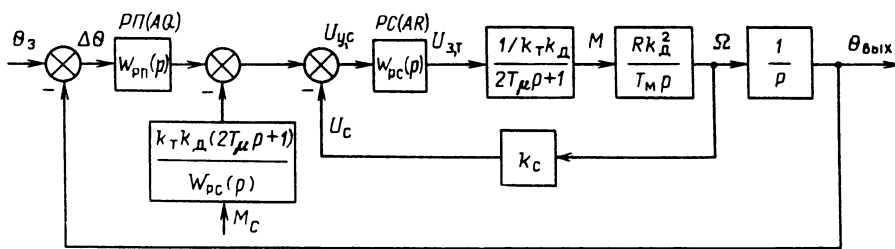


Рис 51.35. Эквивалентная расчетная структурная схема системы управления следящего ЭП с подчиненным регулированием координат

и использовании ПИ-РП получается СУ СЭП со статизмом второго порядка и ее добротность по скорости повышается до значения (при  $T_\mu = 0,01$  с)  $k_{\text{ск}} = 1/(16,8T_\mu^2) = 78 \text{ с}^{-1}$ . При использовании ПИД-РП добротность по скорости СУ СЭП повышается еще в 2 раза до значения  $k_{\text{ск}} = 156 \text{ с}^{-1}$ .

Для повышения добротности СУ СЭП с подчиненным регулированием координат и ее точностных показателей применяется комбинированное управление [51.16], при котором в канал регулирования СУ СЭП наряду с заданием перемещения  $\theta_3$  вводятся его первая  $\dot{\theta}_3$  и вторая  $\ddot{\theta}_3$  производные (см. рис. 51.33) с передаточной функцией  $W_k(p) = (T_m/k_{\text{рс}})p^2 + p$ . Введение только первой производной  $\dot{\theta}_3$  обеспечивает работу СУ СЭП с астатизмом второго порядка по задающему воздействию и позволяет исключить скоростную погрешность и повысить добротность по скорости. Введение первой  $\dot{\theta}_3$  и второй  $\ddot{\theta}_3$  производных обеспечивает работу СУ СЭП с астатизмом третьего порядка по задающему воздействию, при котором отсутствуют погрешности по углу, скорости и ускорению.

#### Цифровые системы управления следящего электропривода

В цифровых СУ СЭП используются цифровые устройства или ЭВМ. Такие системы обеспечивают задание, контроль отработки перемещения и выработку сигнала управления в цифровом коде с последующим преобразованием его в непрерывные сигналы управления ЭП.

СУ СЭП бывают как цифро-аналоговые, так и цифровые. Такие системы выполняются как системы регулирования положения (см. рис. 51.32 и § 51.10), в которых цифровые сигналы задания  $N_{\theta_3}$  изменяются по требуемому алгоритму управления, а скачкообразное их изменение, используемое в системах управления положением, является частным случаем работы СУ СЭП.

Основные достоинства цифровых СУ СЭП определяются возможностями используемой цифровой техники. Это высокая точность, высокая помехозащищенность, возможность реализации сложных алгоритмов управления с помощью ЭВМ и простая возможность организации цифровой индикации работы ЭП.

Цифро-аналоговые СУ СЭП позволяют обеспечить высокую статическую точность регулирования перемещения – порядка 0,01 – 0,001 %, присущую цифровым устройствам, и хорошие динамические показатели, т. е. высокое быстродействие с хорошим качеством переходного процесса за счет аналоговой части. Статическая точность цифровых систем определяется шагом квантования по времени, минимальное значение которого ограничено точностью измерения параметра регулирования и точностью преобразования его значений в цифровую форму.

Применение цифровых СУ СЭП быстро увеличивается в связи с развитием ЭВМ и созданием микро-ЭВМ и микропроцессоров, позволяющих реализовать цифро-аналоговые и цифровые системы с прямым управлением ЭП (см. § 51.10).

## 51.8. СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

### Определение и классификация систем программного управления

Системами программного управления (СПУ) являются системы автоматического управления движением рабочей машины или ее отдельного исполнительного органа в соответствии с заданной управляющей программой.

В настоящее время СПУ выполняются с числовым заданием программы и называются системами числового программного управления (ЧПУ). ЧПУ используется в станкостроении и определяется по ГОСТ 20523-80,

в котором управляющее устройство в ЧПУ называется устройством ЧПУ (УЧПУ), а система, определяемая как совокупность функционально-взаимосвязанных и взаимодействующих технологических и программных средств, обеспечивающих ЧПУ, — системой ЧПУ (СЧПУ).

В соответствии с международной классификацией СЧПУ по уровню технических возможностей делятся на следующие классы:

NC (Numerical Control) — с покадровым считыванием программы при обработке каждой заготовки;

SNC (Stored Numerical Control) — с однократным считыванием программы перед обработкой партии одинаковых заготовок;

CNC (Computer Numerical Control) — с мини-ЭВМ (микропроцессором);

DNC (Direct Numerical Control) — группами станков от одной ЭВМ;

HNC (Handled Numerical Control) — оперативные с ручным набором программ на пульте управления.

Ранее были распространены СЧПУ класса NC, аналоговые, импульсные, кодовые, выполненные на аппаратных средствах. Теперь выпускаются СЧПУ нового поколения со встроенными мини-ЭВМ класса CNC и оперативные СЧПУ класса HNC.

По назначению СЧПУ разделяются на цикловые, позиционные и контурные.

Цикловые СЧПУ, или системы с цикловым программным управлением ЦПУ, осуществляют управление одним или несколькими ИОРМ, обеспечивающими требуемый технологический цикл, т. е. определенную обычно повторяющуюся последовательность действия отдельных ИОРМ или группы машин. Последовательность действия определяется управляющей программой, задаваемой обычно в виде простых дискретных команд на включение и отключение ЭП, приводящих в движение ИОРМ. Системы ЦПУ выполняются в основном разомкнутыми, а наличие датчиков положения, фиксирующих положение исполнительных органов и дающих команды на включение и отключение ЭП, рассматриваются как квазиобратные связи.

Управляющие программы в системах ЦПУ выполняются в виде жесткой неизменяемой и изменяемой программ. Жесткая неизменяемая управляющая программа задается в виде определенной схемы электроавтоматики, включение и отключение управляющих элементов которой производится по времени, пути или по технологической готовности ИОРМ. В свое время широкое распространение получили релейно-контакторные схемы и схемы бес-

контактные, выполненные на логических элементах «Логика Т», замененных впоследствии элементами «Логика И» [51.7]. Для задания таких программ используются устройства с матричной «Логикой М» (см. § 51.6).

Цикловые СЧПУ с жесткой изменяемой управляющей программой выполняются с программируемыми контроллерами (см. § 51.6).

Наиболее характерно деление СЧПУ на позиционные и контурные СЧПУ металлорежущими станками, где согласно ГОСТ 20523-80 позиционное ЧПУ определяется как числовое программное управление станком, при котором перемещение его рабочих органов происходит в заданные точки, причем траектории перемещения не задаются. Позиционные СЧПУ используются не только для управления движением в металлорежущих станках, но и в любых рабочих машинах, исполнительный орган которых требует перемещения с позиционированием. В таких системах важна точность установки заданного конечного положения исполнительного органа, а не траектория его перемещения.

Контурные СЧПУ определяются как системы числового программного управления станком (любой рабочей машины), при котором перемещение его исполнительных органов происходит по заданной траектории и с заданной скоростью для получения необходимого контура обработки (движения по контуру). Такие СЧПУ осуществляют управление перемещением ИОРМ с непрерывно изменяющейся информацией управления, сигналы которой являются функциями времени, скорости, пути или любого другого параметра. Характерной особенностью контурных СЧПУ является непрерывная координация движений исполнительного органа в каждый момент времени как по пути, так и по скорости.

Позиционные и контурные СЧПУ специально не выпускаются. Они выполняются на СЧПУ классов CNC или HNC с заданием соответствующей программы. Позиционные СЧПУ строятся на базе позиционных, а контурные — на базе следящих систем управления (см. § 51.7).

Появление самоприспосабливающихся адаптивных систем расширило классификацию ЧПУ по числу потоков информации. Появилось адаптивное ЧПУ (АЧПУ), определяемое как числовое программное управление, при котором обеспечивается автоматическое приспособление процесса обработки заготовки к изменяющимся условиям обработки по определенным критериям. Поэтому в СЧПУ появились дополнительные потоки информации, кроме основных, определяемых управляющей программой и главной обратной связью.

### Системы числового программного управления

Устройства ЧПУ являются специализированными вычислительными управляющими машинами, предназначенными для выполнения заданных алгоритмов. Они выполняются с импульсным числовым способом ввода программ (информации) для каждой из управляемых координат.

Программа в СЧПУ задается в закодированной форме. Кодирование выполняется для уменьшения числа передаваемых символов и длины перфоленты, увеличения помехозащищенности передачи и уменьшения трудоемкости при изготовлении программ. Кодовая запись ведется на перфокартах, магнитных или перфорированных лентах или, наконец, выдается управляющими вычислительными машинами. Программа, заданная на программно-носителе, превращается в функцию времени при помощи лентопротяжных или других считывающих устройств.

ЧПУ производит декодирование программной информации и ее преобразование для управления выходными устройствами, обеспечивающими отработку механических перемещений, заданных программой для всех координат СПУ.

Кроме уже отмеченного применения управляющих машин в работе ЧПУ большую роль играют различные вычислительные устройства (ВУ). Программы изготавливаются часто с применением ЭВМ или специальных аналоговых машин. Кроме того, ВУ выполняют расчеты поправок к программам (на радиус инструмента, на материал и т. д.) и на вычисление оптимальных режимов рабочих органов. Поэтому ВУ являются одной из основных частей СПУ вообще и особенно СЧПУ.

Процесс ЧПУ при обработке одной детали можно разделить на два этапа. Сначала готовится технологическая информация. Ее преобразуют, кодируют и заносят на перфоленту (1-й этап). Устройство ЧПУ станка преобразует сигналы программы в сигналы, управляющие ЭП, и автоматически управляет процессом обработки деталей (2-й этап).

На рис. 51.36 показана структурная схема СЧПУ класса NC, где обозначено: ПН — программноноситель; БВП — блок воспроизведения программы, содержащий ВУ — вводное устройство; ФСУ — фотосчитывающее устройство; УВ — устройство ввода, обеспечивающее усиление и формирование сигналов программы; БКП — блок контроля программы, обеспечивающий контроль программы по модулю на четность; БЗП — блок запоминания программы,

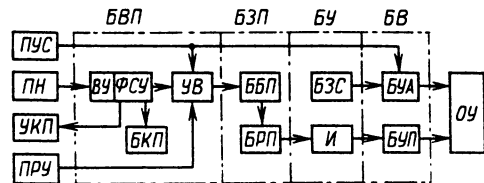


Рис. 51.36. Структурная схема системы ЧПУ типа NC

содержащий: блоки буферной БВП и рабочей БРП памяти; блоки управления БУ с интерполятором И и блоком задания скорости БЗС; БВ — блоки вывода: БУП — блок управления ЭП и БУА — блок управления электроавтоматикой станка; ПРУ, ПУС — пульты ручного управления программой и управления станком; УКП — устройство контроля правильности отработки программы, содержащее цифровую индикацию; ОУ — объект управления.

Программа записывается на бумажной ленте шириной 25,4 мм, информация на которой кодируется двумя сигналами 1 и 0 в буквенно-цифровом коде ISO — 7 bit согласно рекомендациям, разработанным международной организацией стандартов ISO (International Standards Organisation) [51.39]. Для буквенной информации используются буквы латинского алфавита, означающие перемещения и различные вспомогательные и технологические команды. Числовая информация записывается в двоично-десятичном коде 8—4—2—1 в виде двух-, трех- и четырехразрядных двоичных чисел.

Считывание информации с ленты производится ФСУ отдельными кадрами. Считав один кадр информации, СЧПУ дешифрует ее и закладывает в буферную память. В это время идет отработка информации предыдущего кадра с использованием рабочей памяти. По мере того как рабочая память освобождается, в нее переводится информация из буферной памяти. Эта операция обеспечивает непрерывность рабочего процесса в управляемом объекте. Интерполятор превращает информацию, поступающую из БРП, в унитарный код, т. е. непрерывную последовательность импульсов управления, которые БУП подаются на ЭП, обеспечивающий перемещение рабочего органа станка в соответствии с количеством поступающих импульсов.

В качестве ЭП в СЧПУ используются следящие ЭП постоянного тока (см. § 51.7), для управления которыми в БУП используются ЦАП и шаговые ЭП, для которых



БУП усиливает и распределяет импульсы по обмоткам ШД.

При использовании шагового ЭП используются простые разомкнутые импульсно-шаговые СЧПУ с шаговыми двигателями (ШД), функциональная схема одной координаты которой приведена на рис. 51.37. Импульсы программы из интерполятора УЧПУ в унитарном коде поступают по двум информационным каналам, определяющим направление движения ИОРМ «Вперед» (+) и «Назад» (-), в усилитель-формирователь УФ, где усиливаются и формируются в импульсы требуемых длительности и формы с крутыми фронтами. Далее импульсы управления поступают в распределитель импульсов РИ, усиливаются усилителями мощности УМ и распределяются по обмоткам ШД. В качестве ШД в ЧПУ на металлорежущих станках используется двигатель типа ШД5Д-1М с гидроусилителем [51.40]. В принципе в СЧПУ могут использоваться любые ШД.

РИ служит для преобразования импульсов управления в многоканальную систему напряжений питания ШД. Схем РИ существует много. Они построены на основе реверсивных счетных кольцевых схем. В последнее время в связи с развитием микроэлектроники РИ выполняются на интегральных микросхемах, построенных на основе сдвиговых регистров и счетчиков с дешифраторами. Усилители мощности УМ выполняются на транзисторах [51.42].

СЧПУ класса CNC выполняются с применением микро-ЭВМ и получают наибольшее развитие. Структурная схема такой СЧПУ приведена на рис. 51.38, где обозначено: ПН – программноноситель; БВП – блок воспроизведения программ; ПРУ, ПУС – пульты ручного управления и управления станком; ЭВМ – микро-ЭВМ, содержащая: МП – микропроцессор, ПЗУ, ОЗУ – постоянное и оперативное запоминающие устройства, УВВ1 – УВВ4 – устройства ввода и вывода, Т – таймер; ЭА – электроавтоматика станка; ЭП – электроприводы; ДОС – датчики обратных связей; ОУ – объект управления (ИОРМ).

Управляющая программа вводится с ПН или с ПРУ через БВП в ЭВМ через согласующее устройство ввода УВВ1 и подается в

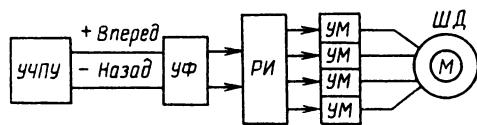


Рис. 51.37. Функциональная схема одной координаты импульсно-шаговой системы ЧПУ

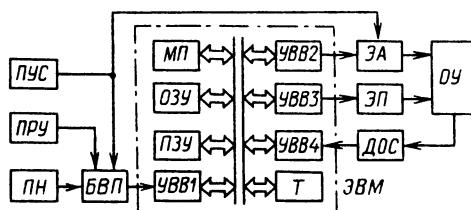


Рис. 51.38. Структурная схема СЧПУ типа CNC с микро-ЭВМ

ПЗУ и ОЗУ. В ПЗУ хранятся постоянные части программы и необходимые константы, используемые для декодирования числовой информации, интерполирования и вычислений. В ОЗУ вводятся управляющие программы, текущие значения параметров, информация для коррекции траекторий перемещений ИОРМ и др. Все управления осуществляет МП. Связь микро-ЭВМ с ИОРМ производится через УВВ2 – УВВ4.

Применение микро-ЭВМ обусловило коренные изменения структуры СЧПУ и появление оперативных систем (ГОСТ 23086-80) класса CNC непосредственно у рабочей машины (станка). Структура таких СЧПУ соответствует структуре ЭВМ с вычислительным процессорным устройством, блоками памяти и ввода-вывода. При этом переработка исходной информации управляющих программ ведется в соответствии с программами функционирования, по которым формируются команды на исполнительные ЭП и электроавтоматику станка.

Таблица 51 8

Тип СЧПУ	Мини-ЭВМ	Область применения
2С85	«Электроника 60»	Токарные, карусельные, зубофрезерные станки
2С42	«Электроника 60»	Кругло- и внутришлифовальные, заточные станки
2Р22	«Электроника 60»	Токарные станки
2Р32	«Электроника 60»	Сверлильно-фрезерно-расточные станки
2М32	«Электроника 60»	Круглошлифовальные станки
2М43(22)	«Электроника 60»	Электроэрозионные (лазерные) станки
НЦ-31	«Электроника НЦ-31»	Токарные станки, кузнечно-прессовое оборудование
МС2101	«Электроника 60»	Токарные, сверлильно-фрезерно-расточные станки, многооперационные обрабатывающие центры
3С140	Набор 1801	То же

СЧПУ типа ОСУ (CNC) позволяет резко расширить функциональные возможности программного управления и ввести новые функции, такие как хранение программы, ее редактирование непосредственно на рабочем месте, широкая система диагностики, индикация на дисплее, диалоговые общения с оператором, возможность изменения функций станка и его электроавтоматики программным способом в процессе эксплуатации.

Поэтому все разработки СЧПУ основываются на применении микропроцессоров и микро-ЭВМ. Данные по выпускаемым СЧПУ приведены в табл. 51.8.

### 51.9. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Системы управления адаптивного ЭП (СУ АЭП) – это замкнутые динамические системы управления, учитывающие изменение характеристик ЭП или объекта управления в динамических и установившихся режимах работы и автоматически избирающие структуру и параметры за счет информации, получаемой в процессе работы объекта. СУ АЭП – это такие системы управления, в которых управляющие воздействия или алгоритмы управления автоматически изменяются с целью осуществления лучшего в каком-либо смысле управления объектом.

На рис. 51.39, а представлена простейшая структурная схема СУ АЭП с меняющимися характеристиками и неполной информацией об объекте ОУ, позволяющая описать принцип работы такой системы управления. В схеме обозначено: УУ – управляющее устройство; ОУ – объект управления; УА – устройство адаптации;  $x$ ,  $y$  – входной и выходной сигналы;  $u$ ,  $v$  – сигналы управления;  $f$  – возмущающие воздействия (помехи).

Данная система имеет заданный критерий качества и должна заставить объект управле-

ния работать так, чтобы выполнялся экстремум критерия качества.

В адаптивной системе основная роль принадлежит устройству адаптации УА, которое получает сигналы входа  $x$  и выхода  $y$ , а также сигнал управления объектами. Эти сигналы могут иметь высокую размерность и служат для подсчета значений критерия качества. УА вырабатывает сигнал  $v$ , который также может иметь высокую размерность и управляет УУ таким образом, чтобы при определенных значениях сигнала  $x$ , при обратной связи по  $y$  и при любой сложности возмущений  $f$  получать в каждый момент времени в объекте отработку с экстремальным значением показателя качества (производительности, себестоимости и др.).

СУ АЭП разделяются на самонастраивающиеся и самоорганизующиеся. В самонастраивающихся системах устройство адаптации на основе собранной информации о входных  $x$ , выходных  $y$  и управляющих  $u$  сигналах подает команды в УУ на изменение уставок или параметров регуляторов таким образом, чтобы получить заданную целевую функцию управления. В самоорганизующихся системах наряду с этим производится изменение структуры системы, чтобы лучше осуществить цель управления.

В зависимости от информации об ЭП и объекте управления самонастраивающиеся системы бывают двух видов: беспоисковые и поисковые. В беспоисковых адаптивных системах создается эталонная модель объекта, обеспечивающая работу системы с требуемым показателем качества. В поисковых адаптивных системах информация об объекте неполная и заранее не известна, а должна быть получена в процессе работы.

В беспоисковых СУ АЭП достижение требуемого показателя качества осуществляется с помощью эталонной модели (ЭМ) объекта управления. Такая модель создается на основе

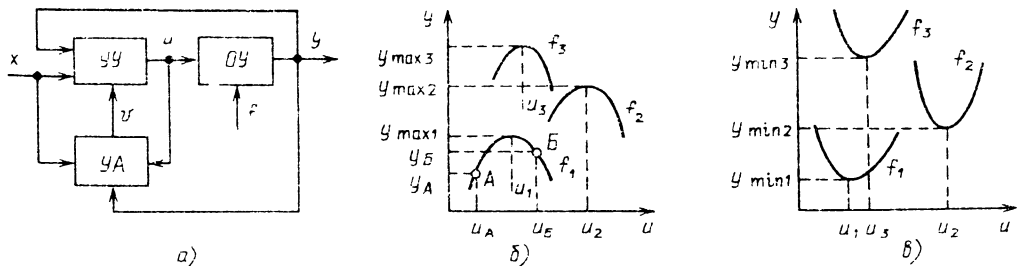


Рис 51.39. Система управления адаптивного ЭП.  
 а – структурная схема, б, в – характеристики объекта управления

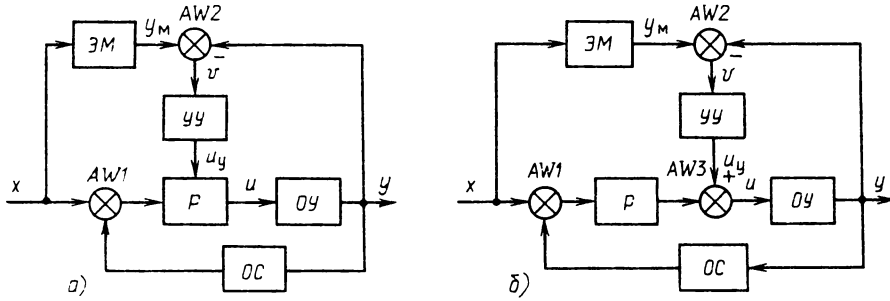


Рис. 51.40. Бесписковые системы управления адаптивного ЭП с эталонной моделью: а – с параметрической самонастройкой; б – с сигнальной самонастройкой

заранее известной информации об объекте и включается в адаптивную систему управления, как показано на рис. 51.40, а, б [51.37]. Эталонная модель ЭМ здесь выполняет функции корректирующего устройства, по сигналам которого устройство управления УУ изменяет характеристики системы нужным образом. В процессе работы системы выходные сигналы модели  $y_m$  и объекта  $y$ , характеризующие соответственно показатели качества модели и объекта, сравниваются вычислителем критерия соответствия ВКС модели объекту. При отклонении сигнала объекта  $y$  от сигнала модели  $y_m$  ВКС вырабатывает соответствующее воздействие  $v$ , пропорциональное отклонению  $y$  от  $y_m$ , и подает его на УУ, которое в свою очередь подает соответствующий сигнал  $u$  на регулятор (рис. 51.40, а) или на вход системы управления объектом (рис. 51.40, б). В первом случае при изменении параметров регулятора СУ АЭП осуществляет параметрическую самонастройку, а во втором – когда вырабатывается сигнал коррекции на систему управления – сигнальную самонастройку.

Примерами систем с параметрической самонастройкой являются системы ТП–Д с адаптивным регулятором тока, которые выполняются с использованием нелинейного звена, как в ЭП типа ЭПУ (см. § 51.7) [51.19], или с регулятором с переключаемой структурой в режимах непрерывного и прерывистого токов ЭП [51.17]. Примером систем с сигнальной самонастройкой являются системы, работающие с ЭМ с наблюдающими устройствами [51.17, 51.21, 51.44, 51.45].

В поисковых СУ АЭП достижение требуемого показателя качества осуществляется с помощью автоматического поиска. Такие системы часто осуществляют поиск максимальных (рис. 51.39, б) или минимальных (рис. 51.39, в) значений выходной величины объекта  $y$  согласно характеристике объекта, изменяющейся в процессе работы под воздействием возмуща-

ющих воздействий  $f$ . Поиск осуществляется за счет изменения сигнала управления  $u$ , который при характеристиках объекта, показанных на рис. 51.39, б, должен возрастать, если при увеличении его на  $\Delta u$  получается приращение сигнала  $y$  на

$$\Delta y = y(u_A + \Delta u_A) - y(u_A) > 0,$$

и снижаться, если

$$\Delta y = y(u_B + \Delta u_B) - y(u_B) < 0,$$

и, наоборот, снижаться и возрастать при характеристиках рис. 51.39, в.

Примером поисковой СУ АЭП может служить система поиска минимального (оптимального) значения тока статора АД в системе ЭП ТПН–АД, при котором потери в АД оказываются минимальными, а КПД – максимальным [51.28]. Регулируемой координатой АД как объекта управления является ток статора  $I_1$ , управляющей – напряжение питания двигателя  $U_1$ , а возмущающей – момент нагрузки на валу двигателя  $M_c$ . В этом случае применяется поисковая экстремальная СУ

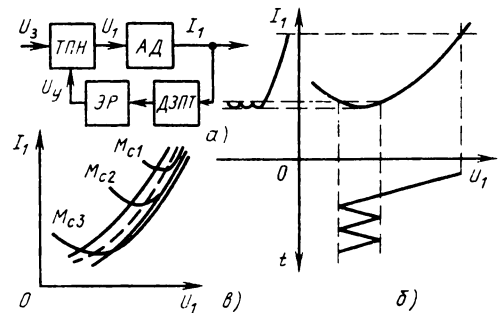


Рис. 51.41. Поисковая экстремальная система адаптивного асинхронного ЭП: а – функциональная схема; б – принцип поиска минимума тока статора АД; в – принцип субоптимального адаптивного управления

АЭП (рис. 51.41, а), осуществляющая поиск экстремального значения тока  $I_{1min}$ , как показано на рис. 51.41, б.

В таких СУ АЭП применяется также субоптимальное управление, потому что все минимальные значения тока  $I_{1min}$  при разных нагрузках лежат на одной регулировочной зависимости  $I_{1min} = f(U_1)$  (рис. 51.41, в). Такая зависимость обеспечивается в СУ ЭП при регулировании тока с положительной обратной связью по току и нелинейной зависимостью коэффициента усиления от напряжения, обеспечиваемой функциональным преобразователем [51.46]. Такие СУ АЭП адаптивного асинхронного электропривода позволяют повышать его энергетические показатели и снижать потери электроэнергии при разных нагрузках на валу двигателя.

### 51.10. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Микропроцессоры (МП) и разрабатываемые на их основе специальные вычислители, программируемые контроллеры и микро-ЭВМ позволяют шире использовать цифровые принципы управления в автоматизированном ЭП.

МП – программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления ими построенное, как правило, на одной или нескольких БИС.

Микропроцессорные средства позволяют расширить функциональные возможности систем ЭП, облегчают реализацию сложных законов адаптивного и оптимального управления. Использование МП позволяет одновременно выполнять ряд других функций, таких как программируемая проверка номинальных режимов, контроль предельных значений сигналов, диагностика и поиск неисправностей, выбор управляющих алгоритмов и т. д.

СУ ЭП с управляющими МП-средствами имеют следующие отличительные особенности от аналоговых систем: законы управления реализуются в виде алгоритмов, выполняемых с помощью аппаратных и программных средств; обрабатываются дискретные во времени (квантованные по амплитуде) сигналы, которые осуществляются АЦП и ЦАП.

В отличие от цифровых систем с жесткой логикой МП-системы управления ЭП обеспечивают большую гибкость в процессе работы за счет быстрого перехода с одной программы на другую. Каждая из программ записывается в память МП-системы. МП одинаково хорошо

Таблица 51.9 Основные технические характеристики однокристальных микропроцессоров

БИС	Технология изготовления	Разрядность, бит	Тактовая частота, МГц	Количество регистров РОН	Мощность потребления, мВт	Число команд
KP580ИК80А	n-МДП	8	2,5	6	750	78
K1810BM86	p-МОП	16	5,0	4	1700	35
K1801BM1	p-МОП	16	5,0	8	1000	64
K1801BM2	p-МОП	16	10	8	1700	74

Примечания 1. МП K1801BM1 и K1801BM2 программно не совместимы с МП KP580ИК80А и K1810BM86.

2. МП K1810BM86 и K1801BM2 имеют команды перемножения и деления.

работают как в линейных, так и в нелинейных системах управления.

МП-средства автоматизированных систем ЭП. МП с фиксированной системой команд имеют следующие отличительные признаки: разрядность обрабатываемого слова, тактовую частоту, количество регистров общего назначения (РОН), число команд, потребляемую мощность. В табл. 51.9 приведены данные отечественных однокристальных МП.

Микропроцессор является базовым элементом МП-комплектов, в состав которых входят различные по функциональным задачам БИС. Так, МП-комплект KP580 имеет в своем наборе восемь БИС.

Микро-ЭВМ содержит интерфейс ввода – вывода, состоящий из МП, полупроводниковой памяти и при необходимости – пульта управления и источников электропитания, объединенных общей несущей конструкцией.

Встраиваемая микро-ЭВМ не имеет индивидуального пульта управления, источника электропитания и предназначена для конструктивного встраивания в вычислительную или управляющую МП-систему.

Одноплата микро-ЭВМ – это встраиваемая микро-ЭВМ, выполненная в виде МП-модуля, построенного на основе одной печатной платы.

Однокристальная микро-ЭВМ выполнена в виде одной БИС.

На основе МП-средств выпускаются универсальные микро-ЭВМ, программируемые контроллеры, которые широко используются в автоматизированном ЭП. Однокристальные микро-ЭВМ являются наиболее перспективными при проектировании МП-систем управления (табл. 51.10), так как выполняют широкий набор логических и арифметических операций и позволяют в 5–10 раз уменьшить число необходимых микросхем.

Таблица 51 10. Основные технические характеристики однокристалльных микро-ЭВМ

Наименование БИС микро-ЭВМ	Технология изготовления	Разрядность	Объем памяти на кристалле (бит)		Число команд	Длительность командного цикла, мкс	Тактовая частота, МГц	Напряжение питания, В
			ПЗУ	ОЗУ				
K1814	p-МОП	4	1024×8	64×4	43	20	0,3	-9
K1820	n-МОП	4	1024×8	64×4	49	4	1,6	+5
K1816	n-МОП	8	1024×8	64×4	96	2,5	6	+5

Основные технические данные одноплатной микро-ЭВМ

	Микро-ЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д»	Микроконтроллер «Электроника С5-41»
Система команд . . . . .	Микро-ЭВМ «Электроника 60»	К1801ВМ1
Микропроцессор . . . . .	K1801ВМ1	K1801ВМ1
Быстродействие (разряд – разряд), операций/с . . . . .	500 · 10 <sup>3</sup>	500 · 10 <sup>3</sup>
Объем памяти, Кбайт		
ОЗУ (адресуемая)	64	2
ПЗУ (пользователя)	8	8

В АСУ ТП, станках с ЧПУ, сложных ЭП различных производственных механизмов находят применение одноплатные микро-ЭВМ и программируемые контроллеры.

Для обработки цифровой информации в АСУ ТП, в системах сбора, подготовки и обработки данных предназначена микро-ЭВМ «Электроника-60». Программная совместимость микро-ЭВМ с ЭВМ СМ-3 и СМ-4 позволяют значительно расширить ее вычислительные возможности.

Конструктивно микро-ЭВМ «Электроника 60» оформлена в виде блока размером 520×388×100 мм, к которому подключаются составные части (платы) вычислительной системы. Все платы ЭВМ выполнены в виде законченных модулей, которые связаны и сообщаются друг с другом через единый канал обмена информацией – канал ЭВМ (рис. 51.42).

Технические данные микро-ЭВМ «Электроника 60»

Быстродействие, операции/с . . . . .	250 · 10 <sup>3</sup>
Разрядность . . . . .	16
Количество команд . . . . .	81
Количество методов адресации . . . . .	8
Число регистров общего назначения . . . . .	8
Время выполнения команд, мкс	
с фиксированной запятой . . . . .	До 8
расширенной арифметики, не более . . . . .	90
с плавающей запятой, не более . . . . .	360
Объем памяти ОЗУ, Кбайт . . . . .	64

Микропроцессорные программируемые контроллеры диспетчеризации, автоматики, телемеханики – микроДАТ. Для уменьшения затрат времени и средств при создании устройств

управления ЭП или техническим процессом необходимо унифицировать компоненты МП-систем управления и расширить их номенклатуру. Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем КТС ЛИУС-2 (торговая марка микроДАТ) является удобным для применения в автоматизированном ЭП [51.53]. МикроДАТ обладает широкой номенклатурой компоновочных изделий (более 200 элементов, выполняющих различные функции), которая позволяет реализовать различные структуры СУ ЭП.

Агрегатирование предусматривает компоновку из ограниченного набора унифицированных частей разнообразных объектно-ориентированных изделий (блоков, приборов, устройств и комплексов). При этом агрегатные модули, выбранные в необходимом наборе и сочетании, соединяют в соответствии с рекомендованными (типовыми) структурами (рис. 51.43). Основой структурной унификации является система общих шин – многопроводная внутрислобочная интерфейсная магистраль (ИМ) в типовом компоновочном каркасе. Для объектно-ориентированных устройств рекомендованы аналогичные структуры с многопроводной межблочной ИМ в типовом компоновочном шкафу. Средства ввода – вывода, обработки, передачи и отображения информации реализованы на базе 8-разрядного МП.

В состав комплекса микроДАТ входят программируемые контроллеры, предназначенные для управления оборудованием массового

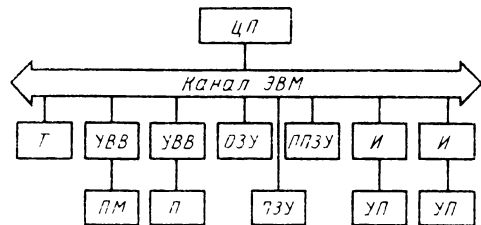


Рис. 51.42. Структурная схема микро-ЭВМ «Электроника-60»:

ЦП – центральный процессор, УВВ – устройство ввода – вывода, Т – таймер, И – интерфейс, УП – устройство пользователя, П – перфоратор, ПМ – печатающая машина

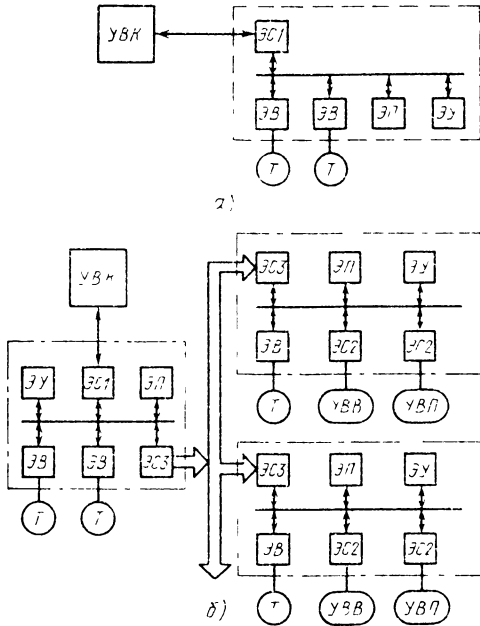


Рис. 51.43. Структуры МП-систем управления на базе комплекса микроДАТ:

*а* – однопроцессорная, *б* – многопроцессорная. Элементы: ЭС1 – ЭС3 – связи, ЭВ – ввола. ЭУ – управления, ЭП – памяти Устройства УВК – ввола контроллера. УВП – внешней памяти, УВВ – ввола – ввола: Т – таймер

мирования и отладки. Внешний вид контроллера представлен на рис. 51.44.

Технические данные контроллера микроДАТ

	МБ 57 01	МБ 57 02	МБ 57.03
Микропроцессор	КР580ИК80А		
Разрядность	8	8	8
Потребляемая мощность, Вт	65	80	100
Габариты, мм.			
длина . . . . .	322	482	682
ширина . . . . .	245	245	245
высота . . . . .	266	266	266
Масса, кг . . . . .	13	16	22
Время выполнения операций, мкс:			
опроса ввола . . . . .	7	7	7
логических, не более . . . . .	10	10	10
арифметических . . . . .	200	200	200

**Микропроцессорное управление ЭП постоянного тока.** В ЭП постоянного тока МП системы используются в основном для стабилизации скорости и отработки заданного перемещения (точное позиционирование).

Цифровое регулирование скорости с применением МП средств осуществляется, как правило, двумя путями: 1) аналого-цифровым управлением, в котором регулятор тока – аналогового типа, а регулятор скорости – с применением микро-ЭВМ; 2) прямым цифровым управлением, в котором на МП-средства возложены функции контроля вплоть до выработки управляющих импульсов тиристорных преобразователей.

ЭП с МП-управлением с цифровым РС (рис. 51.45) имеет ДПТ *М*, ТП (*УМ*), КТ с датчиком тока *ДТ(УА)* и аналоговым *РТ*, цифровым *КС* с цифровым датчиком скорости *ЦДС (ВРZ)*, счетчиком импульсов *Сч*, микро-ЭВМ, устройством связи с объектом *УВВ* и цифро-аналоговым преобразователем *ЦАП (УZY)*.

производства (металлургическим, машиностроительным, кузнечно-прессовым и т. д.) Контроллер, выполненный на базе МП КР580ИК80А, построен по модульному принципу и предусматривает 32, 64 или 128 входов-выходов, приборы ввола программ, програм-

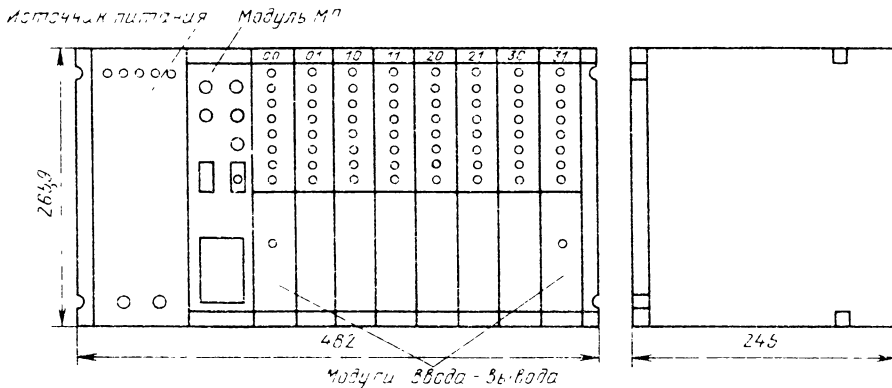


Рис. 51.44. Внешний вид контроллера, выполненного на МП КР 580ИК80А

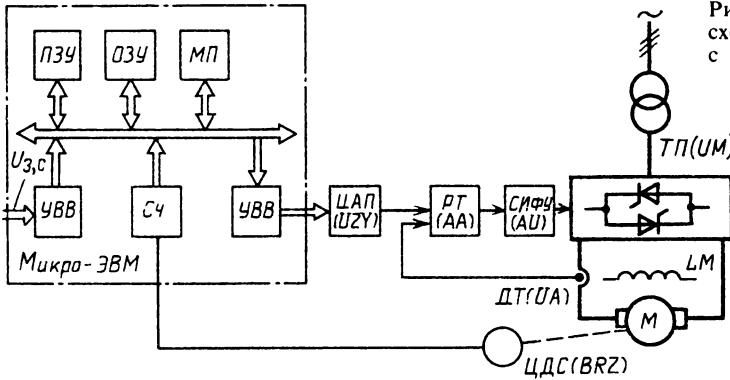


Рис. 51.45. Функциональная схема ЭП с МП-управлением с цифровым регулятором скорости

Микро-ЭВМ позволяет программным путем реализовать различные структуры РС, в том числе П, ПИ и ПИД-типа, с переменными коэффициентами для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих выходного параметра. Программным путем легко обеспечивается задание различных законов управления с высокой точностью регулирования, предусматривается адаптация параметров регулятора в случае изменения магнитного потока двигателя или других параметров системы.

Такие системы обеспечивают возможность задания частоты вращения до 1 об/мин и высокую статическую точность — до 0,1–0,001% стабилизации скорости с высокими динамическими свойствами.

Система с прямым цифровым управлением (рис. 51.46) предусматривает управление ЭП

от ЭВМ, включая организацию формирования управляющих импульсов на тиристоры или силовые транзисторы. В схеме можно выделить следующие основные узлы: генератор импульсов *ГИ*, устройство синхронизации *Синх*, датчики полного и прерывистого токов *ДПТ* и *ДПрТ*, цифровой датчик скорости *ЦДС (ВРЗ)* и счетчик для измерения частоты вращения *Сч*, таймер *Т* и устройство задания скорости. *ГИ* может быть реализован программным или аппаратным способом. В МП-систему вносятся программа регулирования частоты вращения с ПИ-регулятором, выполняемая через каждые 10 мс, и программы регулирования тока, предусматривающие изменение направления протекания тока и логического переключения *УМ*. Программа регулирования тока повторяется через каждые 1 мс и предусматривает режим прерывистых токов.

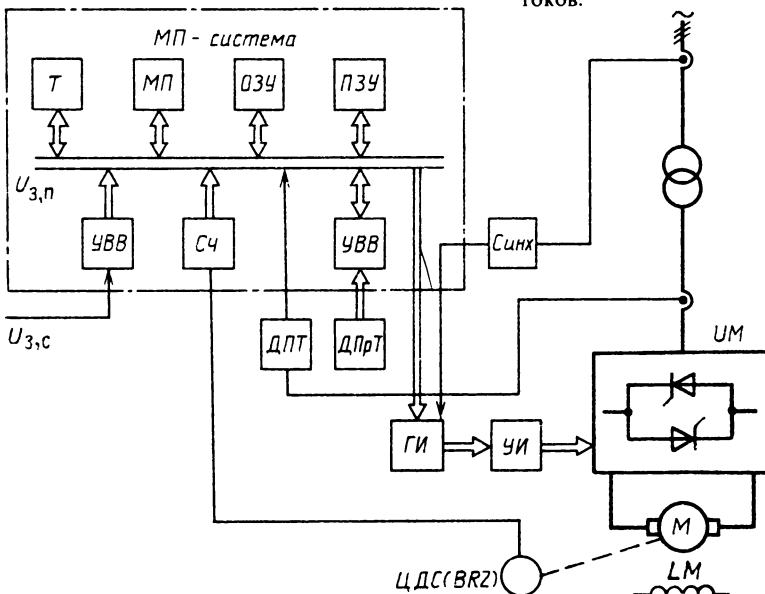


Рис. 51.46. Функциональная схема ЭП с прямым цифровым управлением скоростью от ЭВМ

Системы ЭП постоянного тока с МП-регулируемым используют алгоритмы управления, основанные на принципе подчиненного регулирования. Регулирование частоты вращения реализуется программным образом с использованием ПИ- или ПИД-закона регулирования. Регулирование тока в непрерывном режиме – по ПИ-закону, а в режиме прерывистого тока используются методы нелинейной коррекции в функции тока якорной цепи или в функции длительности протекания тока.

Позиционная система ЭП (рис. 51.47) использует цифро-аналоговое управление тиристорным преобразователем напряжения. Двигатель  $M$  получает питание от  $ТП(U)$ . Схема содержит аналоговую часть, состоящую из аналогового КТ с регулятором тока  $РТ$  и КС с регулятором скорости  $РС$ .

Цифровая часть системы выполнена с использованием МП-системы и состоит из следующих элементов: цифрового датчика положения ЦДП ( $BQZ$ ), цифро-аналогового преобразователя ЦАП, микропроцессора МП, памяти (ОЗУ и ПЗУ), устройств связи с объектом УСО, счетчика импульсов Сч.

В МП-системе осуществляется сравнение заданного положения с требуемым, контроль его действительного значения и вычисление сигнала рассогласования по положению, программируется функциональная схема регулятора положения. В ПЗУ МП-системы записывается несколько возможных структур регулятора положения (линейная, параболическая, параболическая с линейной частью в зоне малых перемещений и т. д.) и в зависимости от

выбранной программы на вход ЦАП выдается требуемое задание на скорость ЭП.

МП-система регулирования положения совместно с аналоговой частью регулирования скорости обеспечивает высокие динамические показатели ЭП и высокую точность позиционирования (до 0,001 %).

**Микропроцессорное управление ЭП переменного тока.** Система ТПН – АД выполняется либо с прямым цифровым управлением (СИФУ реализуется программным путем), либо с СИФУ, реализованной аппаратным способом. Принципиальная схема разомкнутой системы ТПН – АД с прямым цифровым управлением от ЭВМ (рис. 51.48) имеет МП-систему, тиристорный преобразователь напряжения ТПН, АД ( $M$ ), таймер  $T$ , имеющий два счетчика, датчик состояния сети ДСС и усилитель управляющих сигналов  $У$ . В рассматриваемой схеме МП-система выполняет функции СИФУ.

Синхронизация работы СИФУ происходит путем сравнения сигнала текущего состояния сети с соответствующим сигналом из блока данных ПЗУ. При совпадении сигналов (в двоичной форме) МП заносит в первый счетчик таймера начальное число, которое определяет амплитуду пилообразного сигнала, и второй счетчик начинает формировать этот сигнал  $U_{\alpha_{оп}}$ . Затем МП производит опрос  $U_{\alpha_{оп}}$ ,  $U_{\alpha_3}$  и сравнение этих углов.

Как только будет  $U_{\alpha_{оп}} \leq U_{\alpha_3}$ , МП выводит управляющий сигнал на тиристоры, которые включаются при  $\alpha = \alpha_3$ .

**Частотное управление АД.** МП в ЭП с частотным преобразованием электрической

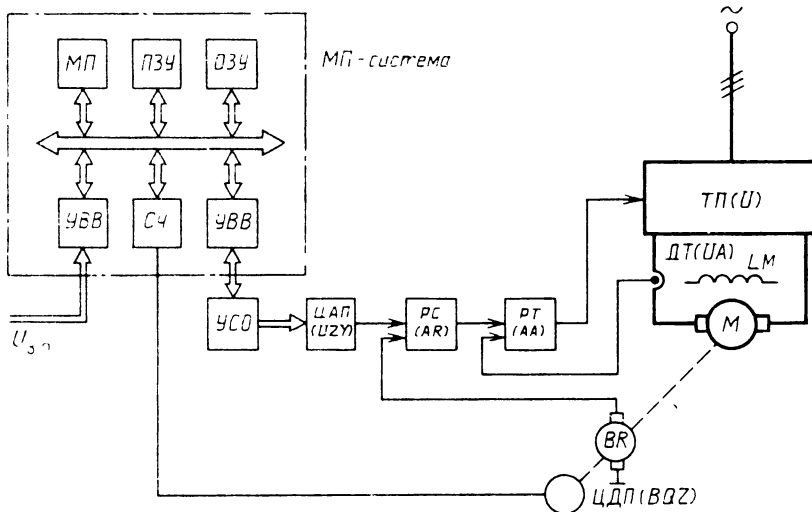


Рис. 51.47. Функциональная схема цифро-аналоговой системы позиционного ЭП с цифровым управлением положением от ЭВМ



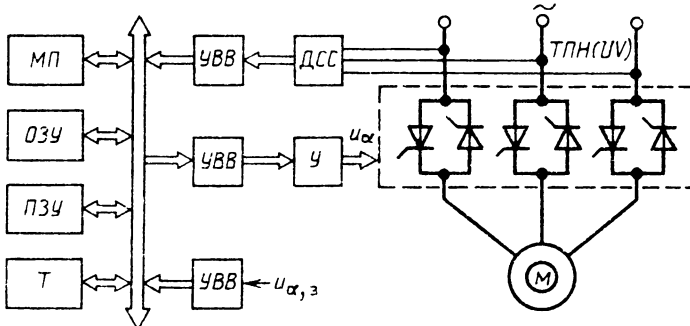


Рис. 51.48. Функциональная схема разомкнутой системы асинхронного ЭП ТПН – АД с прямым цифровым управлением от ЭВМ

энергии используется в разомкнутых и замкнутых системах управления.

В разомкнутой системе (рис. 51.49, а) на МП-систему в зависимости от задающего сигнала возлагаются функции выбора из ПЗУ очередной управляющей информации и выдачи ее на силовой преобразователь.

В замкнутых системах регулирования МП позволяет реализовать программным путем сложные законы управления и многоконтурное цифровое регулирование при минимальных аппаратных средствах. В схеме рис. 51.49, б МП сравнивает фактическую и заданную скорости и использует рассогласование для регулирования выходной частоты преобразователя для питания АД. В более сложных системах асинхронного ЭП, обеспечивающих высокое качество регулирования, МП вычисляют требуемую частоту преобразователя, учитывая не только погрешность по скорости, но и ОС по току. При этом обеспечивается режим управляемого скольжения, дающий возможность двигателю работать либо с максимальным моментом, либо с КПД и  $\cos \phi$  от нуля до максимальной скорости в различных режимах.

В ЭП с частотным управлением на МП-систему можно возложить следующие функции:

1) формирование и выдачу управляющих сигналов в зависимости от сигналов задания и обратных связей. Наличие специальных программ позволяет осуществлять адаптивное регулирование ЭП;

2) обработку информации. Аналоговые сигналы преобразуются в цифровые в АЦП, а дискретно изменяющиеся импульсы различных датчиков МП считает, сдвигает и преобразует в цифровые данные, удобные для обработки в параллельном коде;

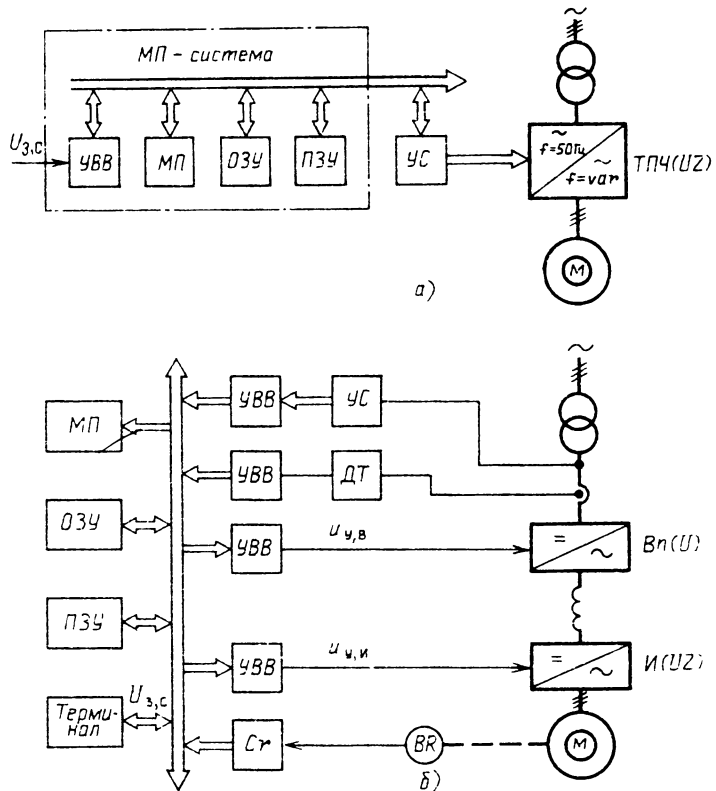


Рис. 51.49. Функциональная схема разомкнутой (а) и замкнутой (б) МП системы асинхронного ЭП с частотным управлением скоростью

3) синхронизацию (согласование по времени) с помощью программируемого таймера, управляемого МП;

4) контроль и защиту. Программным путем осуществляется непрерывный контроль основных переменных и в случае превышения контролируемых величин допустимых пределов МП вырабатывает сигналы на отключение ЭП или перевод его в другой режим работы;

5) диагностику системы ЭП при наличии специальных программ.

### 51.11. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

#### Гибкие производственные комплексы (ГПК)

ГПК называется группа производственного оборудования с высокой степенью автоматизации, предназначенного для обработки различных изделий, выпускаемых малыми и средними партиями.

Общая цель введения в производство ГПК состоит в резкой интенсификации работы промышленности и сельского хозяйства, повышении производительности и обеспечении высокого качества продукции.

В машиностроении высокоэффективными автоматизированными объектами являются металлорежущие станки с ЧПУ и современными автоматизированными ЭП. Эти станки допускают быструю перестройку технологии при изменении выпускаемой продукции, благодаря чему они нашли широкое применение в мелкосерийном производстве.

Объединение современных металлообрабатывающих станков, содержащих ЧПУ, с транспортно-накопительными, контрольными и сигнальными устройствами и роботами с управлением от ЭВМ и составляет ГПК в машиностроении.

При объединении станков в ГПК изменяются их механические устройства. Станки оснащают магазинами инструментов с роботами-манипуляторами, позволяющими осуществлять автоматическую смену инструмента, и спутниками для закрепления и транспортирования изделий.

На рис. 51.50 показана упрощенная функциональная схема ГПК для небольшой номенклатуры обрабатываемых изделий, где С — станки с ЧПУ; АТС — автоматизированная транспортная система, подающая заготовки на станки и удаляющая готовые изделия; Склад — накопитель заготовок, в том числе на спутниках; центральная ЭВМ.

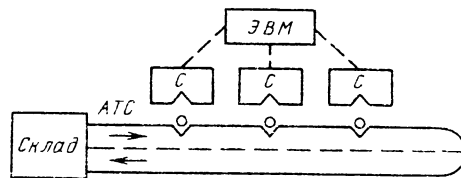


Рис. 51.50. Упрощенная функциональная схема ГПК

С увеличением номенклатуры обрабатываемых изделий и требований к гибкости комплексов функциональные схемы ГПК могут быть более сложными. Высокая гибкость предполагает возможность выполнения множества работ по задаваемым ЭВМ программам, по автоматической смене инструмента, по подготовке спутников с изделиями, по применению роботов и т. п. Поэтому необходимо иметь автоматизированные участки технологической подготовки производства новых изделий, в том числе инструментов, управляющих программ и др. Нужно готовить необходимую документацию, например сменно-суточные задания на производство и поставку деталей как внутри, так и вне комплекса и т. п.

Основой современного автоматического управления ГПК являются управляющие вычислительные комплексы (УВК). Обычно в каждом УВК имеются устройства наладки инструмента, находящиеся вне станков, и измерительные машины, автоматически измеряющие размеры обрабатываемых изделий.

Управление таким ГПК с перестраиваемой технологией осуществляется от центральной ЭВМ, являющейся подсистемой АСУП и системой более высокого уровня по отношению к СЧПУ станков и других работающих с ними устройств. Основная задача этой ЭВМ сводится к обеспечению максимальной и равномерной загрузки станков и «наблюдение» за ходом обработки изделий, контроля и ввода коррекции в работу станков. Она рассчитывает управляющие программы, которые хранятся в памяти микро-ЭВМ СЧПУ станков.

Еще более высоким уровнем автоматического управления можно считать обеспеченные учета, планирования и диспетчеризации работы производственного комплекса. Этот уровень по существу является уровнем АСУ цеха или предприятия и реализуется при помощи более мощной ЭВМ.

Описанная АСУ, имеющая несколько уровней и включающая частично задачи автоматизации административного управления, называется гибкой интегрированной системой.

Она является основой современных методов автоматизации различных областей производственного процесса, обеспечивающих получение необходимых изделий с наименьшими затратами труда и средств за минимальное время и при минимальной численности персонала. Пример такой системы показан на рис. 51.51.

Наиболее сложной и трудоемкой задачей при создании гибкой интегрированной системы является разработка ее программного обеспечения (ПО). Очень важно при создании ПО выбирать станки и остальные устройства ГПК однотипными для всех ГПК объекта управления и предусматривать возможности разви-

тия данной АСУ. Основным методом работы ПО является моделирование объекта управления и его узлов. Так, например, информация о том, в каких ячейках накопителя находятся заданные детали, хранится в оперативной памяти УВК, которая моделирует этот накопитель. Обычно такие модели хранятся на магнитных дисках и по мере необходимости вызываются в оперативную память.

Особое значение имеют вопросы надежности и долговечности, а также живучести систем управления УВК, включая средства контроля, самопроверки и диагностики.

Важно, что при аварии на объекте управления АСУ вводит необходимые коррективы

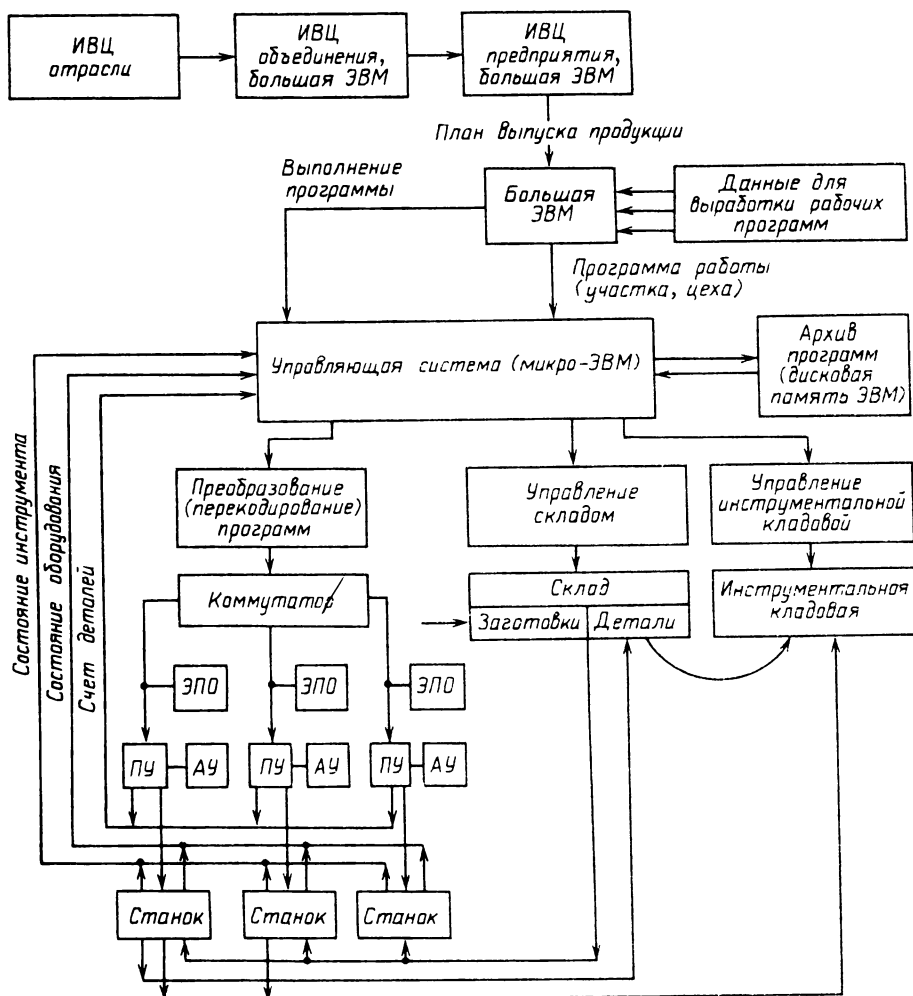


Рис. 51.51. Схема гибкой интегрированной АСУ:

ИВЦ – информационно-вычислительный центр; ЭПО – элемент программного обеспечения; узлы ПУ – программного управления, АУ – автоматического управления

в технологический процесс и адаптируется к изменившейся обстановке. Иногда, при необходимости, в УВК вводят резервирование с использованием дополнительных МП элементов.

В промышленности разных стран наблюдаются большие различия в ГПК, которые различаются по моделям станков, по числу станков с ЧПУ и без ЧПУ, входящих в один ГПК, по номенклатуре изделий, по их габаритным размерам, массам и назначению. Различаются также системы подачи изделий на станки и удаления готовых изделий и системы инструментального обеспечения (СИО). Сведения о некоторых отечественных ГПК приведены в табл. 51.11.

Выпускаемый в СССР многономенклатурный ГПК АЛП-3-1 состоит из однотипных станков с ЧПУ, управляемых от ЭВМ. Он имеет высокую производительность при обработке разнообразных корпусных деталей из алюминиевых сплавов. Его внедрение снизило трудоемкость механической обработки корпусных деталей в 2 раза. Число занятых станков с ЧПУ уменьшилось также в 2 раза. Коэффициент сменности увеличился с 1,3 до 2,0. Загрузка станков возросла с 0,4 до 0,9. Годовая экономия достигла 200 тыс. руб.

### Гибкие автоматизированные производства (ГАП)

Гибким автоматизированным производством (ГАП) называется производственная единица (участок, цех, завод), в котором работа всех компонентов (технологического оборудования, транспортных и складских систем, участков комплектования программ, инструментов, приспособлений, заготовок и т. п.) синхронизируется как единое целое системой управления, обеспечивающей быструю перестройку технологии производства (обработки) при смене выпускаемой продукции.

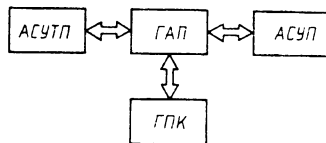


Рис. 51.52. Функциональная схема гибкого автоматизированного производства

Составными частями ГАП (рис. 51.52) являются ГПК, АСУП и АСУП. Каждый ГПК включает группу станков и других машин с высокой автоматизацией и одну или несколько ЭВМ с системой ПО для всего производства. АСУП – автоматизированная человеко-машинная система управления технологическими процессами, включающая системы автоматического проектирования (САПР) технологии, инструментов и приспособлений, управляющих программ и др. АСУП – автоматизированная человеко-машинная система управления производством всего предприятия.

Эта схема является общей не только для машиностроительных промышленных производств, но и для литейных, сварочных и др.

Следует подчеркнуть, что современные ГПК вместе с АСУП и АСУП превращают обычное производство в ГАП, работающее по «безлюдной» технологии. При этом повышаются экономичность, производительность и качество выпускаемой продукции и снижаются оборотные средства, требующиеся для производства. В каждое ГАП входит автоматизированная часть, изготавливающая средства оснащения производства, которые нельзя получить со стороны.

Это достигается максимальной степенью автоматизации производства и высокой надежностью и долговечностью оборудования и ЭВМ. ПО должно предусматривать нужный набор диагностических программ для обслуживания и ликвидации нарушений рабочего цикла.

Таблица 51.11. Основные сведения о станках с ГПК

Модель	Число станков	Типы станков (количество)	Размеры изготавливаемых изделий, мм	Номенклатура изделий, шт	Подача деталей в АТС	Наличие СИО
АСК-10	6	Многооперационные с ЧПУ (1)	750 × 600 × 550	Широкая	В таре	Нет
АЛП-3-1	2	То же	250 × 250 × 250			
АЛП-3-2	8	Станки с ЧПУ (3), многооперационные пятикоординатные (4), многооперационные шестикоординатные (3); для глубокого сверления (1)	250 × 250 × 250	70	То же	То же

Диспетчер, работающий на центральном пункте управления, должен быстро принимать меры, устраняющие влияние неисправностей.

Основные условия для получения высокой гибкости ГАП:

1) связь всех частей технологического оборудования в единый комплекс с помощью транспортно-складских систем и автоматизированных участков комплектования изделий;

2) встраивание МП в технологическое оборудование;

3) приближение мини- и микро-ЭВМ к видеотерминалам к рабочим местам;

4) объединение МП и ЭВМ в вычислительную сеть промышленного назначения;

5) повышение производительности оборудования и человеческого труда на основе автоматизации и комплексирования;

6) изменение модульного состава всех элементов;

7) синхронизация работы всех компонентов от ЭВМ;

8) программирование технологий, управления и технологических средств.

Действующие в СССР и зарубежные ГАП пока выполняют перечисленные условия неполностью. Многие из них еще не имеют автоматизированных участков подготовки производства. Автоматическая диагностика и адаптивность управления особенно при сбоях еще несовершенны.

ГПК и ГАП с автоматическим управлением от ЭВМ являются крупным шагом вперед в развитии комплексной автоматизации всех отраслей промышленности и сельского хозяйства

Комплексной автоматизацией производственных процессов, как известно, называется такая система, при которой технологические и сопутствующие им процессы превращения исходных материалов в готовые изделия выполняются автоматически действующей системой машин без приложения физического и умственного труда человека в производстве.

## 51.12. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Проектирование СУ ЭП является отдельным этапом проектирования ЭП (см. § 50.4). После выбора системы управления ЭП на основании технико-экономических расчетов следует рассмотреть следующие этапы проектирования:

1) выбор типа СУ ЭП и определение его параметров:

а) выбор обратных связей, определение их коэффициентов, выбор датчиков;

б) определение параметров элементов системы, настройку регуляторов, выбор элементов;

2) формирование электромеханических (механических) характеристик (ЭМХ) ЭП с замкнутой СУ:

а) определение задающих напряжений, обеспечивающих ЭМХ в заданном диапазоне регулирования скорости и ограничений тока (момента);

б) анализ ЭМХ;

3) формирование динамических характеристик ЭП:

а) анализ СУ ЭП, определение вида корректирующих устройств и определение их параметров;

б) анализ динамических режимов ЭП;

4) разработку принципиальной электрической схемы управления и схем электрических соединений и подключений:

а) выбор способа разработки принципиальной электрической схемы;

б) составление схемы;

в) определение параметров элементов схемы и их выбора;

г) расположение элементов на панели и на объекте управления;

д) выбор способа и составление схем электрических соединений и подключений;

5) проверку надежности (долговечности) СУ ЭП.

При выборе типа СУ ЭП решается вопрос о выборе СУ с суммирующим усилителем или с подчиненным регулированием координат и соответственно выбираются ОС, определяются их коэффициенты и выбираются датчики ОС (см. § 51.6, табл. 51.3).

В СУ ЭП с суммирующим усилителем определяется необходимый коэффициент усиления усилителя исходя из требуемых значений статизма ЭМХ (см. § 51.6) и выбирается усилитель (см. разд 20). В СУ ЭП с подчиненным регулированием координат выбирают регуляторы исходя из требуемых динамических режимов и производится их настройка (определение параметров элементов  $R$  и  $C$ ) (см. § 51.6, табл. 51.7).

При формировании статических ЭМХ ЭП решается вопрос о формировании участков ЭМХ при стабилизации скорости и стабилизации момента (тока). Для участков стабилизации скорости определяются значения задающих напряжений (обычно максимальные и минимальные), обеспечивающих ЭМХ в заданном диапазоне регулирования скорости. На участках стабилизации момента (тока) определяются значения напряжений узлов ограниче-

ний и рассчитываются параметры этих узлов. Расчет ЭМХ при линейной характеристике преобразователя производят по уравнениям (см. § 51.7) при постоянном значении коэффициента усиления преобразователя, а при нелинейной характеристике производят расчет с учетом этой нелинейности, при котором задаются значениями напряжения управления, определяют соответствующие им ЭДС преобразователя по его характеристике и решают систему следующих линейных уравнений (см. § 51.6) в системе с суммирующим усилителем:

$$u_y = (U_{3c} - k_c \omega) k_y - k_I (I - I_{отс});$$

$$E_n = (\omega/k_d) + IR.$$

в системе с подчиненным регулированием координат

$$u_y = [(U_{3c} - k_c \omega) k_{PC}]_{огр} - k_I I;$$

$$E_n = (\omega/k_d) + IR.$$

Формирование динамических характеристик ЭП производится с помощью последовательных, параллельных и комбинированных (последовательно-параллельных) пассивных и активных корректирующих устройств, синтез схем и параметров которых производится различными методами. Реальные СУ ЭП содержат устройства с нелинейными характеристиками. Для упрощения синтеза, а впоследствии и анализа нелинейные СУ ЭП прежде всего стремятся линеаризовать, превратив их в линеаризованные, подчиняющиеся принципу суперпозиции и описываемые дифференциальными или разностными уравнениями для непрерывных и дискретных систем, записанных в классической или операторной форме. Здесь кроме простейшей линеаризации используются также методы гармонической, статистической и комбинированной линеаризаций [51.56], которые приводят к упрощениям линеаризованных СУ ЭП, но не обязательно к линейным системам.

Линеаризация характеристик системы производится с учетом возможных режимов работы преобразователя и двигателя на определенных участках их характеристик. Иногда, например, в течение всего динамического режима параметры системы изменяются незначительно и их изменениями вполне можно пренебречь, не уменьшая точности расчетов.

Часто линеаризация характеристик звеньев системы производится по участкам (кусочно-линейная аппроксимация), на каждом из которых система считается линейной.

Синтез корректирующих устройств осуществляется различными методами. В СУ ЭП с суммирующим усилителем наибольшее распространение получил метод логарифмических

амплитудно-частотных характеристик ЛАЧХ [51.38]. В СУ ЭП с модальным управлением используется метод стандартных коэффициентов с использованием малых ЭВМ, позволяющий выбирать параметры линеаризованных систем, обеспечивающие максимальное быстродействие и высокое качество переходных процессов (с 5%-ным перерегулированием и без него) [51.17]. В СУ ЭП с дифференциальным уравнением не выше третьего порядка для синтеза можно использовать диаграмму Вышнеградского [51.18].

В СУ ЭП с подчиненным регулированием координат синтез регуляторов обычно осуществляется классическим методом с настройкой на ТО и СО (см. § 51.7) [51.15] или используются методы настройки, предложенные в [51.20].

Синтез корректирующих устройств СУ ЭП может также проводиться с помощью аналоговых и цифровых ЭВМ.

При кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик звеньев СУ ЭП ее синтез проводится на всех линейных участках и принимается корректирующее устройство, удовлетворяющее требованиям всех участков характеристик системы.

В нелинейных СУ ЭП используются нелинейные методы, например, если нелинейную систему можно разделить на линейную часть и безынерционный нелинейный элемент, то наличие автоколебаний и их амплитуда и частота проверяются с помощью метода гармонического баланса [51.56]. Устойчивость и характер процесса нелинейной СУ ЭП можно определить методом фазовой плоскости [51.56].

Анализ динамических режимов линейных (линеаризованных) СУ ЭП производится с помощью дифференциальных уравнений, составленных по звеньям системы или по передаточной функции, полученной из эквивалентной структурной схемы (см. § 51.7). Решение дифференциальных уравнений невысокого порядка (не выше третьего) может производиться классическим или операторным методом [51.2].

При высоких порядках уравнений, описывающих линейную СУ ЭП, целесообразнее пользоваться частотным методом расчета переходных процессов, не требующим нахождения корней характеристического уравнения [51.56], или использовать ЭВМ.

При применении кусочно-линейной аппроксимации нелинейной характеристики для каждого прямолинейного участка составляется свое линейное дифференциальное уравнение, постоянные интегрирования которого находятся из начальных условий на каждом участке, и результаты расчетов для каждого участка соединяются (припасовываются). Этот

метод повышает точность расчетов, но требует больших затрат времени.

Если в системе имеется хотя бы звено с существенно нелинейной характеристикой, такие СУ ЭП являются нелинейными, и для исследования динамических свойств систем, переходные процессы которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, применяются графоаналитические методы, например метод фазовой плоскости (канонических полигонов), позволяющий решить дифференциальное уравнение второго порядка с любым количеством нелинейностей, или метод конечных приращений с применением малых ЭВМ, позволяющий решить дифференциальное уравнение любого порядка с любыми нелинейностями. В последнее время основное применение находят методы анализа динамических режимов СУ ЭП с применением ЭВМ, позволяющие проводить расчеты в диалоговом режиме с дисплеем.

Для нелинейных, многомерных задач анализа СУ ЭП, обеспечивающих оптимальное и экстремальное управления, рекомендуются методы вариационного исчисления [51.56], в том числе формула Эйлера, принцип максимума Понтрягина и динамическое программирование (Беллмана).

**Пример 51.1.** Определить коэффициент усиления суммирующего усилителя в системе УП-Д с ООС по скорости, обеспечивающей регулирование скорости двигателя в диапазоне  $D = 100$  со статизмом, не превышающим 5% ( $\delta_s = 0,05$ ), при изменении нагрузки от нуля до номинальной.

Дано: двигатель типа ПБСТ.  $P = 1,5$  кВт;  $I_{ном} = 16$  А;  $\omega_{ном} = 230$  рад/с;  $R_1 = 0,53$  Ом;  $k_2 = 2,17$  рад/(с·В); преобразователь с  $R_n = 1,02$  Ом.

Предварительно определяется заданный перепад скорости на нижней ЭМХ:

$$\Delta\omega_s = \delta_s \omega_{ном} \approx \delta_s \frac{\omega_{ном}}{D(1 - \delta_s)} =$$

$$= 0,05 \frac{230}{100(1 - 0,05)} = 0,12 \text{ рад/с.}$$

Перепад скорости в разомкнутой системе

$$\Delta\omega_p = I_{ном}(R_2 + R_n) = 16(0,53 + 1,02) \cdot 2,17 =$$

$$= 53,8 \text{ рад/с.}$$

Определяется необходимый коэффициент усиления разомкнутой СУ ЭП:

$$k_{необх} = \frac{\Delta\omega_p}{\Delta\omega_{за.л}} = \frac{53,8}{0,12} - 1 = 448.$$

Коэффициент ОС по скорости  $k_c$  может быть принят из условия ограничения задаю-

щего напряжения, равного, например,  $U_{3c} = 10$  В:

$$k_c = \frac{U_{3c, max}}{\omega_{0 max}} \frac{k_{необх}}{1 + k_{необх}} =$$

$$= \frac{10}{230} \frac{448}{1 + 448} = 0,0434 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Принимается  $k_c = 0,044$  В·с/рад.

При коэффициенте усиления реального преобразователя, равном  $k_n = 22,5$ , следует включить в систему ЭП суммирующий усилитель с коэффициентом усиления не менее

$$k_y = \frac{k_{необх}}{k_c k_n k_d} = \frac{448}{0,044 \cdot 22,5 \cdot 2,17} = 208.$$

**Пример 51.2.** Рассчитать ЭМХ двигателя, питающегося от преобразователя, имеющего нелинейную характеристику (рис. 51.53), в системе с ООС по скорости при  $\omega_0 = 31,4$  рад/с, при известных коэффициентах усиления усилителя  $k_y = 10$ , передачи двигателя  $k_d = 1,52$  рад/(В·с), ОС по скорости  $k_c = 0,027$  В·с/рад и сопротивлении цепи якоря двигателя с преобразователем  $R = 4,36$  Ом.

Определяется задающее напряжение при идеальном холостом ходе (см. § 51.6):

$$U_{3c} = \frac{\omega_0}{k_y k_n k_d} (1 + k_c k_y k_n k_d) =$$

$$= \frac{31,4}{10 \cdot 15 \cdot 1,52} (1 + 0,027 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 1,52) = 1 \text{ В.}$$

Значение  $k_n$  находится по характеристике преобразователя по его ЭДС, соответствующей угловой скорости  $\omega_0 = 31,4$  рад/с:

$$E_{п0} = \frac{\omega_0}{k_d} = \frac{31,4}{1,52} = 20,66 \text{ В.}$$

При  $E_{п0} = 20,66$  В  $U_{y,п0} = 1,375$  В и тогда  $k_n = 20,6/1,375 = 15$ .

Для расчета точек ЭМХ задаются напряжением управления преобразователя, например  $U_{y,н} = 1,7$  В, определяют ЭДС преобразователя по его характеристике ( $E_n = 33$  В) и из урав-

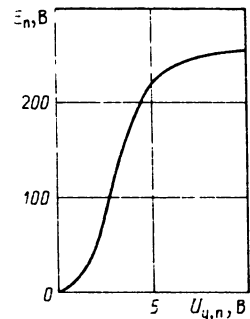


Рис. 51.53. Характеристика преобразователя ЭП постоянного тока

нения напряжения управления

$$U_y = U_{y.n}/k_y = U_{3.c} - k_c \omega = \\ = U_{3.c} - k_c k_d (E_n - IR)$$

определяют ток двигателя:

$$I = \frac{U_{y.n}/k_y - U_{3.c} + k_c k_d E_n}{k_c k_d R} = \\ = \frac{1,7/10 - 1 + 0,027 \cdot 1,52 \cdot 33}{0,027 \cdot 1,52 \cdot 4,36} = 2,92 \text{ А.}$$

Определяют угловую скорость двигателя:

$$\omega = k_d (E_n - IR) = 1,52 (33 - 2,92 \cdot 4,36) = \\ = 30,81 \text{ рад/с.}$$

Аналогично рассчитываются остальные точки электромеханической характеристики.

**Пример 51.3.** Провести синтез параметров корректирующих цепей (первых производных по скорости и току), введенных в систему управления ЭП ООС по скорости (см. рис. 51.3, а), исходя из требуемого качества переходного процесса, подобного настройке системы на ТО.

Дано: коэффициенты:  $k_n = 24,3$ ;  $k_y = 26$ ;  $k_d = 1,515 \text{ рад/(В} \cdot \text{с)}$ ;  $T_c = 0,063 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ ; постоянные времени:  $T_n = 0,01 \text{ с}$ ;  $T_r = 0,1 \text{ с}$ ;  $T_m = JRk_d^2 = 0,073 \text{ с}$ ;  $R = 1,28 \text{ Ом}$ ; момент инерции ЭП  $J = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Синтез проводится с помощью нормированных коэффициентов по теореме Вышнеградского. Для рассматриваемой системы управления характеристический полином имеет вид

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

При использовании корректирующих связей по первым производным по скорости и току с коэффициентами  $k'_c$  и  $k'_t$  напряжение управления системы при задающем воздействии имеет вид

$$u_y = U_3 - k_c \omega - k'_c p \omega - k'_t p i.$$

Тогда коэффициенты характеристического полинома (см. табл. 51.6) равны

$$a_3 = T_n T_r T_m = 0,01 \cdot 0,1 \cdot 0,073 = 0,000073 \text{ с}^3;$$

$$a_2 = (T_n T_r) T_m + k_y k_n \frac{T_m}{R} k'_t = \\ = (0,01 + 0,1) \cdot 0,073 + 26 \cdot 24,3 \frac{0,073}{1,28} k'_t = \\ = 0,0081 + 36,25 k'_t; \\ a_1 = T_n + T_m + k_y k_n k_d k'_c = \\ = 0,01 + 0,073 + 26 \cdot 24,3 \cdot 1,515 k'_c = \\ = 0,083 + 957,2 k'_c;$$

$$a_0 = 1 + k_c k_y k_n k_d =$$

$$= 1 + 0,063 \cdot 26 \cdot 24,5 \cdot 1,515 = 61,3.$$

Используя нормированное уравнение системы ЭП [51.18]

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0$$

с коэффициентами  $A = a_2/\sqrt[3]{a_3 a_0}$  и  $B = a_1/\sqrt[3]{a_3 a_0^2}$  и принимая  $A = B = 2$ , что соответствует настройке системы на ТО, получаем требуемые значения коэффициентов  $a_2$  и  $a_1$ :

$$a_2 = A \sqrt[3]{a_3 a_0} = 2 \sqrt[3]{(0,000073) \cdot 61,3} = 0,014;$$

$$a_1 = B \sqrt[3]{a_3 a_0^2} = 2 \sqrt[3]{0,000073 \cdot 61,3^2} = 1,3.$$

Тогда, решая уравнения

$$a_2 = 0,014 = 0,0081 + 136,25 k'_t;$$

$$a_1 = 1,3 = 0,083 + 957,2 k'_c,$$

получаем  $k'_c = 0,0013 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$  и  $k'_t = 0,00017 \text{ В/А}$ .

**Пример 51.4.** Выбрать параметры регуляторов РТ и РС для однократно интегрирующей системы ТП–Д с подчиненным регулированием тока (см. рис. 51.3б, а) при настройке КТ и КС по техническому optimumу ( $a_c = a_t = 2$ ).

Дано: двигатель типа 2ПБК-250/146-2,  $P_{ном} = 3300 \text{ кВт}$ ;  $U_{ном} = 630 \text{ В}$ ;  $I_{ном} = 5,65 \text{ кА}$ ;  $I_{ст} = 11,3 \text{ кА}$ ;  $\omega_{ном} = 5,25 \text{ рад/с}$ ;  $k_d = 0,009 \text{ рад/(В} \cdot \text{с)}$ ;  $J = 67,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Система ТП–Д; сопротивление якорной цепи  $R = 0,13 \text{ Ом}$ ; постоянные времени: преобразователя  $T_n = 0,01 \text{ с}$ , якорной цепи  $T_r = 0,13 \text{ с}$ ; коэффициенты: шунта якорной цепи  $k_{ш} = U_{ш}/I_{ш} = 0,037 \text{ В/А}$ , датчика тока  $k_{д.т} = U_{д.т}/U_{ш} = 28,8$ ;  $k_n = 35$ .

Записывается передаточная функция ПИ–РТ (см. § 51.6):

$$W_{РТ}(p) = \frac{R(T_r p + 1)}{a_t T_{ш} p k_n k_t} = \\ = \frac{k(T_{о.т} p + 1)}{T_{о.т} p} = \frac{R_{о.т} C_{о.т} p + 1}{R_{3.т} C_{о.т} p},$$

где  $R_{3.т}$ ,  $R_{о.т}$  – резисторы входной цепи (задания) и ОС РТ;  $C_{о.т}$  – конденсатор ОС РТ.

После подставления в нее коэффициента ОС по току  $k_t = k_{ш} k_{д.т} R_{3.т}/R_t$  ( $R_t$  – резистор ОС по току) получим при  $R_{о.т} C_{о.т} = T_r$  (принимая  $C_{о.т} = 1 \text{ мкФ}$  и  $T_{ш} = T_n$ )

$$R_{о.т} = \frac{T_r}{C_{о.т}} = \frac{0,13}{1 \cdot 10^{-6}} = 130 \text{ кОм};$$

$$R_t = \frac{a_t T_{ш} k_{ш} k_{д.т} k_n}{R C_{о.т}} =$$



$$= \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,037 \cdot 28,8 \cdot 35}{0,13 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 5,8 \text{ МОм.}$$

Записывается в установившемся режиме уравнение

$$U_{3, \tau \max} - k_1 I_{\text{стоп}} = 0,$$

после подстановки в которое выражения  $k_1$  получим

$$R_{3, \tau} = \frac{U_{3, \tau \max} R_{\tau}}{I_{\text{стоп}} k_{\text{ш}} k_{\text{д.т}}} = \frac{10 \cdot 166 \cdot 10^3 \cdot 35}{11300 \cdot 0,037 \cdot 28,8} = 4,7 \text{ кОм.}$$

Для КС записывается уравнение

$$U_{3, c \max} - k_c \omega_{\max} = 0.$$

Подставляя  $k_c = k_{11} R_{3, c} / R_c$ , получим сопротивление резистора ОС по скорости:

$$R_c = \frac{R_{3, c \omega_{\max}} k_{\tau 1}}{U_{3, c \max}} = \frac{90 \cdot 10^3 \cdot 5,25 \cdot 1,9}{10} = 90 \text{ кОм,}$$

где принимается  $U_{3, c \max} = 10 \text{ В}$  и резистор входной цепи задания РС  $R_{3, c} = 90 \text{ кОм}$  (обычно  $R_{3, c} = 80 \div 100 \text{ кОм}$ ).

Передаточная функция П-РС

$$W_{\text{РС}}(p) = \frac{J k_{\tau} k_{\lambda}}{a_c a_{\tau} T_{\mu} k_c} = k_{\text{РС}} = \frac{R_{0, c}}{R_{3, c}}$$

где  $R_{0, c}$  — резистор ОС РС.

Подставляя  $k_c = k_{\tau 1} R_{3, c} / R_c$ , получаем

$$R_{0, c} = \frac{J k_{\tau} k_{\lambda} R_c}{a_c a_{\tau} T_{\mu} k_{\tau 1}} = \frac{67,5 \cdot 0,00088 \cdot 0,009 \cdot 90 \cdot 10^3}{2 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot 1,9} = 633 \text{ Ом,}$$

где  $k_{\tau} = k_{\text{ш}} k_{\text{д.т}} R_{3, \tau} / R_{\tau} = 0,037 \cdot 28,8 \cdot 136 / 166 \times 10^3 = 0,00088 \text{ В/А}$ .

**Пример 51.5.** Рассчитать переходные процессы изменения скорости и тока при пуске двигателя без нагрузки в ЭП (см. рис. 51.6, а) с П-РС и задатчиком интенсивности.

Дано:  $U_{3, c} = 0,5 \text{ В}$ ; коэффициенты усиления: регулятора скорости  $k_{\text{РС}} = 38,1$ , преобразователя  $k_{\tau 1} = 35,0$ ; коэффициент двигателя  $c = 0,88 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ . Напряжение ограничения регулятора скорости  $U_{\text{РС max}} = 10 \text{ В}$ ; постоянные времени: задатчика интенсивности  $T_{3, \text{и}} = 0,001 \text{ с}$ , регулятора тока  $T_{\text{РТ}} = 0,1 \text{ с}$ , преобразователя  $T_{\text{п}} = 0,01 \text{ с}$ , цепи якоря  $T_{\text{я}} = 0,13 \text{ с}$ ; момент инерции ЭП  $J = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; сопротивление цепи якоря  $R = 0,316 \text{ Ом}$ ; коэффициенты ОС по скорости  $k_c = 0,027 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ ; по току  $k_1 = 0,046 \text{ В/А}$ .

Переходные процессы описываются следующими алгебраическими и дифференциаль-

ными уравнениями:

$$u_{3, \text{и}} = U_{3, c} t / T_{3, \text{и}};$$

если  $u_{3, \text{и}} > U_{3, c}$ , то  $u_{3, \text{и}} = U_{3, c}$ ;

$$u_{y, c} = u_{3, \text{и}} - k_c \omega;$$

$$u_{\text{РС}} = u_{3, \text{т}} = k_{\text{РС}} u_{y, c};$$

если  $|u_{\text{РС}}| > U_{\text{РС max}}$ , то  $u_{\text{РС}} = U_{\text{РС max}}$ ;

$$u_{y, \tau} = u_{\text{РС}} - k_1 i;$$

$$u_{\text{РТ}} = u_{y, \text{п}} u_{\text{РТп}} + u_{\text{РТ, и}};$$

где  $u_{\text{РТп}} = k_{\text{РТ}} u_{y, \tau}$ ;  $k_{\text{РТ}} = T_{\text{я}} / T_{\text{РТ}}$ ;

$$du_{\text{РТ, и}} / dt = u_{y, \tau} / T_{\text{РТ}};$$

$$e_{\text{п}} = u_{y, \text{п}} k_{\text{п}} + T_{\text{п}} \frac{de_{\text{п}}}{dt};$$

$$e_{\text{п}} = c\omega + iR + T_{\text{я}} R \frac{di}{dt};$$

$$i - I_c = \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt}.$$

Решение проводится на ЭВМ типа СМ-4 по программе, записанной на языке FORTRAN. Для решения составлены вызывающая программа (головной модуль), подпрограмма вычисления производных S1 и программа вывода S2. Для решения дифференциальных уравнений используется стандартная подпрограмма NAMAD3. В программе приняты следующие обозначения переменных:

$U_{3, c}$ — UZS	$\omega - Y(1)$	$k_{\text{РС}}$ — KRS
$u_{3, \text{и}}$ — UZI	$i - Y(2)$	$k_{\text{п}}$ — KP
$u_{y, c}$ — UU	$e_{\text{п}} - Y(3)$	$k_c$ — KS
$u_{\text{РС}}$ — URS	$u_{\text{РТ}} - Y(4)$	$k_1$ — KT
$U_{\text{РС max}}$ — UMRS	$d\omega/dt$ — DERY(1)	$T_{3, \text{и}}$ — TP
$u_{\text{РТ}}$ — URT	$di/dt$ — DERY(2)	$T_{\text{РТ}}$ — TPT
$u_{\text{РТп}}$ — URTP		$T_{\text{п}}$ — TP
$I_c$ — IS	$de_{\text{п}}/dt$ — DERY(3)	$T_{\text{я}}$ — TA
$R$ — RA	$du_{\text{РТ}}/dt$ — DERY(4)	$J$ — JP
$c$ — C		$t$ — T

PRMT(1) — начальное значение независимой переменной;

PRMT(2) — конечное значение независимой переменной;

PRMT(3) — начальный шаг интегрирования (приращение независимой переменной в ходе решения);

PRMT(4) — максимальная погрешность, допустимая при решении. Если выбранный начальный шаг интегрирования не обеспечивает заданной точности и погрешность, оцениваемая в подпрограмме NAMAD3, превышает PRMT(4), то подпрограмма NAMAD3 уменьшает шаг в 2 раза;

PRMT(5) — входной и выходной параметры. Если подпрограмма NAMAD3 работает,

то PRMT(5) = 0. При окончании работы программы, например при достижении конечного значения переменной, PRMT(5) принимает значение, отличное от нуля;

L — условие вывода на печать (при необходимости вывода программы или результатов на печать принимается L = 1).

DTV — шаг вывода на терминал (или на АЦПУ);

IHLF — выходной параметр, обозначающий число делений начального шага в расчетной точке;

AUX — массив вспомогательных переменных, получаемых в ходе расчета каждой точки. В нем шесть строк, а количество столбцов определяется порядком системы.

Записывается программа вычислений на ЭВМ:

```

C  ВЫЗЫВАЮЩАЯ ПРОГРАММА
  DIMENSION PRMT(5), Y(4), DERY(4),
  $AUX(24)
  COMMON N, TV, DTV, L
  EXTERNAL S1, S2
103 TYPE *, 'ВВЕСТИ PRMT(2), PRMT(3),
  $ PRMT(4), DTV, L
  READ(5, 12) PRMT(2), PRMT(3),
  PRMT(4), $ DTV, L
  12 FORMAT (F10.5/F10.5/F10.5/F10.5/I1)
  IF (L.EQ.0) GO TO 11
  IF (L.NE.0) WRITE (6, 14) PRMT(2),
  $ PRMT(3), PRMT(4), DTV
  14 FORMAT (' PRMT(2) = ', F10.5, ' $
  PRMT(3)', F10.5,
  *' PRMT(4)', F10.5, ' DTV = ', F10.5)
  11 TV = 0.0
  PRMT(1) = 0
  Y(1) = 0
  Y(2) = 0
  Y(3) = 0
  Y(4) = 0
  CALL NAMAD3 (PRMT, Y, DERY, 4,
  IHLF, S1, S2, AUX, 6)
  STOP
  END
C  ПОДПРОГРАММА ДИФФЕРЕНЦИ-
C  АЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
  SUBROUTINE S1 (T, Y, DERY)
  DIMENSION Y(4), DERY(4)
  COMMON N, TV, DTV, L
  REAL KRS, KP, KT, KS, JP, IS, TOT
  IF (N.NE.0) GO TO 11
10 WRITE (5, 1)
  1 FORMAT ('ВВОД UZS, KRS, UMRS, KP, TP',
  $ TP)
  READ (5, 2) UZS, KRS, UMRS, KP, TP
  2 FORMAT (F30.10/F30.10/F30.10/F30.10/
  $F30.10)
  TYPE 200

```

```

200 FORMAT (' ПОВТОРИМ — 1, НЕТ — 0)
  READ(5, 201)J
  201 FORMAT(I2)
  IF (J.EQ.1) GO TO 10
  101 WRITE(5, 3)
  3 FORMAT (' ВВОД RA, TA, IS, C, JP')
  READ (5, 4) RA, TA, IS, C, JP
  4 FORMAT (F30.10/F30.10/F30.10 F30.10
  $/F30.10)
  TYPE 200
  READ (5, 201)J
  IF (J.EQ.1) GO TO 101
  102 WRITE (5, 5)
  5 FORMAT (' ВВОД KT, KS, TIT, TR')
  READ (5, 6) KT, KS, TIT, TR
  IF (TR.EQ.0) TR = .001
  6 FORMAT (F30.10/F30.10/F30.10/F30.10)
  $ TYPE 200
  READ (5, 200)J
  IF (J.EQ.1) GO TO 102
  N = 1
  IF (L.EQ.0) GO TO 11
  IF (L.NE.0) WRITE(6, 7) UZS, KRS,
  $ UMRS, KP, TP
  7 FORMAT (' UZS = ', F10.5, ' KRS = ', F
  10.5, ' UMRS = ', F10.5,
  *' KP = ', F10.5, ' TR = ', F10.5)
  WRITE (6, 8) RA, TA, IS, C, JP
  8 FORMAT (' RA = ', F10.5, ' TA = ', F10.5,
  ' IS = ', F10.5, *' C = ', F10.5, ' JR = ', F10.5)
  WRITE (6, 9) KT, KS, TIT, TR
  9 FORMAT (' KT = ', F10.5, ' KS = ', F10.5,
  ' TIT = ', F10.5, *' TR = ', F10.5)
  11 UZI = UZS * T/TR
  IF (UZI.GT.UZS) UZI = UZS
  DERY(1) = (Y(2) - IS) * C/JP
  DERY(2) = Y(3) - C * Y(1) - RA * Y(2)/
  /TA/RA
  UU = UZI - KS * Y(1)
  URS = KRS * UU
  IF (ABS(URS).GT.UMRS) URS = UMRS *
  $ URS/ABS(URS)
  URTP = (URC - KT * Y(2)) * TA/TIT
  DERY(4) = (URS - KT * Y(2))/TIT
  URT = Y(4) + URTP
  DERY(3) = (URT * KP - Y(3))/TP
  RETURN
  END
C  ПОДПРОГРАММА ВЫВОДА
  SUBROUTINE S2(X, Y, DERY, IHLF,
  NDIM, PRMT)
  COMMON N, TV, DTV, L
  DIMENSION Y(4), DERY(4), PRMT(5)
  IF (PRMT(5).NE.0) GO TO 2
  IF (X - TV) 4, 2, 2
  2 WRITE (5, 1) X, Y, IHLF
  IF (L.NE.0) WRITE(6, 1) $X, Y,
  IHLF

```

```

1 FORMAT (' ВРЕМЯ = ', F10.4, '$ СКО-
РОСТЬ = ', $F10.4, ' ТОК = ', F10.4,
2F10.4, 12)
TV = TV + DTV
4 RETURN
END
    
```

При расчете принято: начальные условия  $\omega = 0; i = 0; e_{11} = 0; I_c = 0$ . Интервал времени, на котором проводится расчет переходного процесса, равен 0–0,3 с, начальный шаг интегрирования 0,001 с; относительная максимальная погрешность расчетов 0,01 с; шаг вывода на терминал 0,01 с.

Для контроля правильности ввода данных на терминал выведено:  $PRMT(2) = 0.30000$   $PRMT(3) = 0.00100$   $PRMT(4) = 0.01000$   $DTV = 0.01000$   $UZS = 0.50000$   $KRS = 38.1000$   $UMRS = 10.00000$   $KP = 35.000$   $TP = 0.01000$   $RA = 0.31600$   $TA = 0.13000$   $IS = 0.00000$   $C = 0.88000$   $JP = 0.80000$   $KT = 0.04600$   $KS = 0.02700$   $TIT = 0.10000$   $TR = 0.00100$ . Результаты вычислений приведены в табл. 51.12, а зависимости  $\omega(t)$  и  $i(t)$  – на рис. 51.54.

**Пример 51.6.** Микропроцессорное управление системы ТП–Д с цифровым ПИ-регулятором скорости.

В системе ТП–Д (рис. 51.55) КТ выполнен аппаратным способом на аналоговой элементной базе. КС имеет ПИ-регулятор, реализуемый программным способом с помощью МП-системы. АЦП преобразует аналоговый сигнал с датчика скорости в цифровой параллельный код. ЦАП преобразует цифровой выходной сигнал ПИ-регулятора в аналоговый сигнал задания на ток двигателя. Сигналы  $u_3(t)$  и  $u_{0,c}(t)$  поступают в МП-систему через устройства ввода-вывода (УВВ2 и УВВ3), а сигнал  $y_n(t)$  поступают из МП-системы через устройство вывода (УВВ1).

В качестве МП-системы используется контроллер программируемый «Электроника МС-2702» (К1-20), выполненный на базе 8-разрядного однокристалльного МП КР580ИК80А. В качестве устройств ввода-вывода информации (УВВ1–УВВ3) используется программируемый параллельный интерфейс КР580ВВ55. 10-разрядные ЦАП и АЦП позволяют

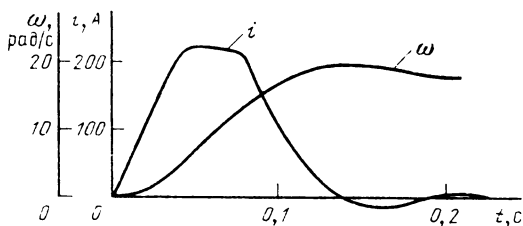


Рис. 51.54. Графики переходных процессов скорости и тока

Таблица 51.12

Время, с	Скорость, рад/с	Ток, А	ЭДС преобразователя, В
0.0000	0.0000	0 0000	0 0000
0.0100	0 1124	29.2998	253 3639
0 0200	0 8016	97 6118	317 8889

Таблица 51.13

№ № БИС	Наименование портов	Адрес	Назначение портов
1	Порт А	F0	8 младших разрядов задающего сигнала
	Порт В	F1	8 младших разрядов датчика скорости
	Порт С (0–3)	F2	2 старших разряда задающего сигнала
	Порт С (4–7)	F2	2 старших разряда датчика скорости
	Регистр управляющего слова (РУС)	F3	Управляющее слово
2	Порт А	F4	8 младших разрядов $y_n$
	Порт С	F6	2 старших разряда $y_n$
	РУС	F7	Управляющее слово

масштабировать входную и выходную информацию в диапазоне 0–1023 ( $2^{10}$ ), что соответствует точности измерения 0,1 % максимального сигнала. В случае реверсивного сигнала один разряд ЦАП должен выделяться под знак и точность снижается до 0,2 %.

Адреса и назначение портов устройств ввода-вывода приведены в табл. 51.13.

Аналоговая форма ПИ-регулятора описывается следующим уравнением:

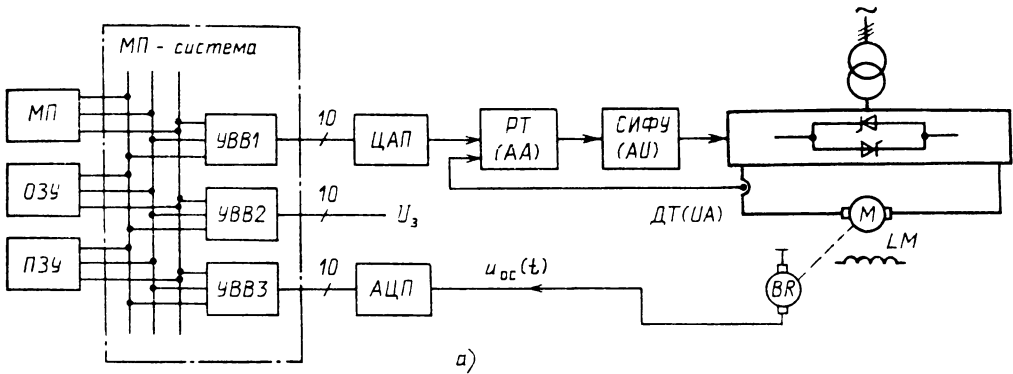
$$y(t) = kx(t) + \frac{k}{T_1} \int_0^t x(t) dt;$$

$$x(t) = u_3(t) - u_{0,c}(t),$$

где  $u_3(t)$  – требуемый выходной сигнал объекта;  $u_{0,c}(t)$  – действительный сигнал объекта регулирования;  $k$  – коэффициент усиления регулятора;  $T_1$  – постоянная времени интегратора. Используя упрощенные формулы

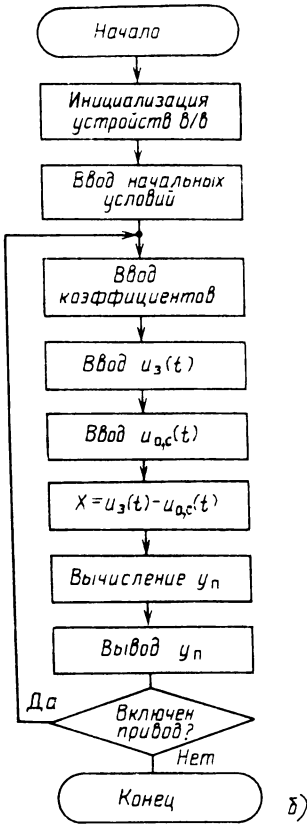
$$\int_0^t x(t) dt \approx \int_0^{t-\Delta t} x(t) dt + \frac{x_n + x_{n-1}}{2} \Delta t;$$

$$\int_0^{t-\Delta t} x(t) dt = \frac{T_1}{k} [y_{n-1} - kx_{n-1}].$$



а)

Рис. 51.55. Микропроцессорная система управления скоростного ЭП постоянного тока: а – функциональная схема, б – алгоритм работы цифрового регулятора скорости



б)

(порты А и В) и один полубайт (порт С). В программе вычисления  $u_n$  используются по два байта для хранения информации  $x_n$ ,  $x_{n-1}$  и  $y_{n-1}$ . Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  расположены в одном байте.

Для хранения исходных данных и конечных результатов расчета ПИ-регулятора используется область памяти ЗУ с адресами от  $2500_{16}$  – до  $2507_{16}$  (в шестнадцатеричном коде):

Адрес	ОЗУ	Содержимое
2500	Младшие разряды	$x_n$
2501	Старшие разряды	$x_n$
2502	$K_1$	
2503	Младшие разряды	$y_{n-1}$
2504	Старшие разряды	$y_{n-1}$
2505	Младшие разряды	$x_{n-1}$
2506	Старшие разряды	$x_{n-1}$
2507	$K_2$	

Ввод значений  $u_з(t)$ ,  $u_{ог}(t)$  и  $u_n(t)$  осуществляется побайтно. После ввода очередной информации вычисляется  $x_n(t) = u_з(t) - u_{ог}(t)$  и результат отправляется в ЗУ по адресу  $2500_{16} - 2501_{16}$ . С помощью подпрограммы REG вычисляется  $u_n$ , которая выводится в ЦАП для преобразования в аналоговую форму и заносится в ячейке ЗУ ( $2503 - 2504_{16}$ ) на место  $y_{n-1}$ . Значение  $x_n$  из ячеек памяти  $2500_{16} - 2501_{16}$  перемещается в ячейки памяти  $2505_{16} - 2506_{16}$  на место  $x_{n-1}$ . Далее МП-система готова принять новые значения  $u_з(t)$  и  $u_{ог}(t)$  и произвести расчеты для очередного временного интервала. Минимальный временной интервал, а следовательно, и точность обработки информации зависят от быстродействия МП и объема программы для обработки одного интервала.

получим закон ПИ-регулирования в разностной форме:

$$u_n = y_{n-1} + k_1 x_n - k_2 x_{n-1}, \quad (10.1)$$

где  $k_1 = k(1 + \Delta t/2T_1)$  и  $k_2 = k(1 - \Delta t/2T_1)$ .

Алгоритм работы цифрового ПИ-регулятора представлен на рис. 51.55, б. Так как ЦАП и АЦП 10-разрядные, для ввода и вывода информации используются один байт

Вычисление  $y_n$  осуществляется подпрограммой REG в соответствии с формулой (10.1).

#### Подпрограмма REG

REG: LXI H, 2500	Занесение в H, L адреса младшего байта $x_n$
MOV E, M	Занесение младшего байта $x_n$ в регистр E
INX H	В H, L адрес старшего байта $x_n$
MOV D, M	Старший байт $x_n$ в регистр D
INX H	В H, L адрес коэффициента $k_1$
MOV A, M	$k_1$ в аккумулятор
CALL DMULT	Вычисление $k_1 x_n$
INX H	В H, L адрес младшего байта $y_{n-1}$
CALL PLUS	Вычисление $y_{n-1} + k_1 x_n$
INX H	В H, L адрес младшего байта $x_{n-1}$
MOV E, M	Младший байт $x_{n-1}$ в регистр E
INX H	В H, L адрес старшего байта $x_{n-1}$
MOV D, M	Старший байт $x_{n-1}$ в регистр D
INX H	В H, L адрес коэффициента $k_2$
MOV A, M	$k_2$ в аккумулятор
CALL DMULT	Вычисление $k_2 x_{n-1}$
MOV A, C	Преобразование $k_2 x_{n-1}$ в дополнительный код
CMA	
MOV C, A	
MOV A, B	
CMA	
MOV B, A	
INX B	
LXI H, 2503	В H, L адрес младшего байта $y_{n-1}$
CALL PLUS	Вычисление $y_n = y_{n-1} + k_1 x_n + k_2 x_{n-1}$
LHLD 2500	Пересылка $x_n$ на место $x_{n-1}$
SHLD 2505	
RET	

#### Подпрограмма умножения двух чисел — двухбайтного и однобайтного

(множимое направляется в D, E и множитель в аккумулятор; результат пересылается в B, C)

DMULT: PUSH H	Запоминание в стеке содержимого регистров H, L
LXI H, 0000	Сброс регистра произведения
MVI C, 08	Инициализация счетчика бит
M1: DAD H	Сдвиг частичной суммы влево
RAL	Сдвиг множителя влево
JNC M2:	Анализ бита множителя
DAD D	Суммирование множимого
M2: ACI 00	Учет переноса
DCR C	Декремент счетчика бит
JNZ M1.	Умножение на следующий бит
MOV C, L	Перенос результата перемножения
MOV B, H	Из H, L в B, C
POP H	Восстановление из стека содержимого регистров H и L

RET Возврат из подпрограммы

#### Подпрограмма сложения содержимого регистров B, C с содержимым ЗУ по адресу, расположенному в H, L

```
PLUS: MOV A, C
      ADD M
      MOV M, A
      MOV A, B
      INX H
      ADC M
      MOV M, A
      RET
```

Для выполнения подпрограммы REG при тактовой частоте 2 МГц необходимо около 0,68 мс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 511 *Электротехнический справочник*. В 3-х т. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии — 6-е изд. М. Энергоиздат, 1982. С. 39—121.
- 512 См. [50.5].
- 513 См. [50.10].
- 514 Елисеев В. А. Релейное управление движением электроприводов. М. МЭИ, 1980. 104 с.
- 515 Блоки и панели управления двигателями переменного тока на платах. Каталог 08.11.08-85. ОБНИИЭМ Информэлектро.
- 516 Низковольтные комплектные устройства. Номенклатура Чебоксарского электроаппаратного завода. 1986.
- 517 Марголин Ш. М., Гуров А. С. Функциональные узлы схем автоматического управления. Справочное пособие. М. Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
- 518 Проектирование бесконтактных управляющих логических устройств промышленной автоматики / Г. Р. Грейнер, В. П. Ильясенко, В. П. Май и др. М. Энергия, 1977. 384 с.
- 519 Применение устройств УБСР-ДИ в системах управления электроприводами / В. В. Бирюков, В. М. Хуторецкий, В. И. Шухер. М. Информэлектро, 1982. 100 с.
- 5110 Горчаков В. В., Кириллов А. А., Купчан Я. М. Системы автоматизации и оптимизации режимов работы металлорежущих станков. Автоматизированный электропривод. М. Энергоатомиздат, 1986. С. 179—183.
- 5111 Управление автоматическими линиями с помощью ЭВМ / В. В. Крыленко, И. Н. Миков, Л. И. Фридман и др. М. Машиностроение, 1983. 152 с.
- 5112 Мишель Ж., Лоржо Е., Эспью Б. Программируемые контроллеры Пер с франц. А. П. Сизова. М. Машиностроение, 1986. 176 с.
- 5113 Контроллер программируемый типа МБ. Минприбор. Изготовитель — Киевский завод Точэлектробробор. Киев, 1985.
- 5114 Контроллер программируемый типа Ш9101—2644УХЛ4. Каталог 08.60.01—84. Информэлектро, 1985. 8 с.
- 5115 См. [50.3].
- 5116 Елисеев В. А. Непрерывное управление движением электроприводов. М. МЭИ, 1982. 100 с.
- 5117 Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами. Л. Энергоиздат, 1982. 392 с.
- 5118 Анализ и синтез систем управления элект-

- роприводов постоянного тока/В. В. Елисеев, Л. А. Ильяшенко, А. С. Лебедев и др., Под ред В. А. Елисеева М.: МЭИ, 1984 84 с
- 51.19. **Электроприводы** унифицированные трех- фазные серии ЭПУ1 Каталог 08.41.11—85 Информ- электро 1985 24 с
- 51.20. **Электроприводы** однофазные постоянно- го тока ЭПУ2. Каталог 08.41.10—85. Информэлектро. 1985. 8 с.
- 51.21. **Электроприводы** комплекты тиристор- ные постоянного тока Каталог 08.30.03-84. Ин- формэлектро. 1984 32 с
- 51.22 **Быстродействующие** электроприводы по- стоянного тока с широтно-импульсными преобразо- вателями/М. Е. Гольц, А. Б. Гудзенко, В. М. Остреров и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 184 с
- 51.23 См [50 8]
- 51.24 А. с. **1185531 СССР**. Устройство для управления возбуждением электрической машины/ Н. Ф. Ильинский, Б. М. Сарач, В. М. Пенкин и др.//Открытия. Изобретения. 1985 № 38
- 51.25 **Розман Я. Б., Брейер Б. З.** Устройство, наладка и эксплуатация электроприводов метал- лорежущих станков М.: Машиностроение, 1985 208 с
- 51.26. **Перельмутер В. М., Соловьев А. К.** Цифровые системы управления тиристорным электро- приводом. Киев: Техника, 1983. 104 с.
- 51.27 **Цифровые** электроприводы с транзистор- ными преобразователями/С. Г. Герман-Галкин, В. Д. Лебедев, Б. А. Марков, Н. И. Чичерин. Л.: Энергоатомиздат. 1986 248 с
- 51.28 **Тиристорные** преобразователи напряже- ния для асинхронного электропривода/Л. П. Пет- ров, О. А. Андрущенко, В. И. Капинос и др. М. Энергоатомиздат. 1986 200 с
- 51.29 **Герасимьяк Р. П.** Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов. М. Энер- гоатомиздат, 1983 168 с
- 51.30 **Елисеев В. А.** Системы управления электроприводов переменного тока М. МЭИ, 1985 98 с
- 51.31 **Тиристорные** преобразователи частоты в электроприводе/А. Я. Бернштейн, Ю. М. Гусья- нкий, А. В. Кудрявцев и др. М. Энергия. 1980 328 с
- 51.32 **Эпштейн И. И.** Автоматизированный электропривод переменного тока М.: Энергоиз- дат, 1982 192 с
- 51.33 **Системы** подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/О. В. Слежановский, Л. Х. Дац- ковский, И. С. Кузнецов и др. М. Энергоатомиздат, 1983 256 с
- 51.34 **Электропривод** асинхронный глубоко- регулируемый комплектный. Размер 2М-5-2. Ката- лог ЛК 08.18.06—82 М. Информэлектро. 1982 4 с
- 51.35 **Электроприводы** серии ЭПБ1 Каталог 08.41.12—85 Информэлектро. 1986 4 с.
- 51.36 **Вейнер А. М.** Регулируемый синхронный электропривод М. Энергоатомиздат, 1985 224 с
- 51.37 **Елисеев В. А.** Цифровые системы управ- ления электроприводами М. МЭИ, 1985 104 с
- 51.38 **Слепящие** электроприводы/Под ред Б. К. Чемоданова. Кн. 1, 2. М.: Энергия, 1976. 480 с., 384 с
- 51.39 **Программное** управление станками/В. Л. Сосонкин, О. П. Михайлов, Ю. А. Павлов и др. М. Машиностроение, 1981 398 с
- 51.40 **Станки** с числовым программным управ- лением (специализированные)/Под ред В. А. Ле- шенко М. Машиностроение, 1979 592 с
- 51.41 **Срибнер Л. А.** Цикловое программное управление оборудованием М. Машиностроение, 1980 152 с.
- 51.42 **Ивоботенко Б. А., Козаченко В. Ф.** Шаго- вый электропривод в робототехнике М. МЭИ, 1984 100 с
- 51.43 **Сосонкин В. Л.** Микропроцессорные систе- мы числового программного управления станками М. Машиностроение, 1985 288 с
- 51.44. **Кузовков Н. Г.** Модальное управление и наблюдающие устройства М. Машиностроение, 1976 184 с
- 51.45 **Электромеханические** системы с адаптив- ным и модальным управлением/Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. Л.: Энергоатомиздат, 1984 216 с
- 51.46 **Сарбатов Р. С., Безаев В. Г.** Опыт эксплуатации регулятора, минимизирующего по- тери в асинхронном двигателе//Электротехническая промышленность Электропривод 1981 Вып 4(93) С 23—24
- 51.47 **Балашов Е. П., Пузанков Д. В.** Микро- процессоры и микропроцессорные системы. М. Радио и связь, 1981, 326 с
- 51.48 **Александров А. Г., Галицын А. А., Иванни- ков А. Д.** Проектирование радиоэлектронной аппа- ратуры на микропроцессорах. М. Радио и связь, 1984 272 с
- 51.49 **Крылов Е. И.** Однокристалльные микро- ЭВМ серий К1814, К1820, К1816//Микропроцессорные средства и системы 1985 № 2. С 3—7
- 51.50 **Гальперин М. П.** Одноплатные микро-ЭВМ и микроконтроллеры/Микропроцессорные средства и системы 1984 № 2. С. 16—19
- 51.51. **Файнштейн В. Г., Файнштейн Э. Г.** Микро- процессорные системы управления тиристорными электроприводами. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 51.52 **Загальский Л. Н.** Электропривод с микро- процессорным регулятором частоты вращения. Электротехническая промышленность Электропривод 1981. Вып 2(81) С 16—20
- 51.53. **Микропроцессорные** средства диспетчериза- ции, автоматики, телемеханики — МикроДАТ Отрас- левой каталог. Серийно выпускаемое и перспектив- ное оборудование//ГСП. Средства централизован- ного контроля и регулирования М.: ЦНИИТЭИ приборостроения 1984. Вып 5. 80 с
- 51.54 **Программные** контроллеры зарубежных фирм/ЭИ//Автоматизированные системы управле- ния М. ЦНИИТЭИ приборостроения 1986 Вып 2. 6. 9 15 с, 9 с.
- 51.55 **Гибкие** производственные комплексы/ В. А. Лещенко, В. М. Киселев, Д. А. Куприянов и др. М.: Машиностроение, 1984 384 с.
- 51.56. **Теория** автоматического управления. По- ред А. В. Нетушила М. Высшая школа Ч 1, 1968 424 с Ч 2. 1972 432 с
- 51.57. **Электроприводы** постоянного тока для станков, роботов и других промышленных механиз- мов/Н. В. Донской, А. Г. Иванов, В. М. Никитин и др.//Электротехника. 1988. № 2. С. 5—10
- 51.58. **Транзисторный** электропривод на базе син- хронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов для станков и промышленных роботов/ А. Д. Поздеев, В. В. Горчаков, Н. В. Донской и др.//Там же. С. 10—14.
- 51.59 **Тиристорные** электроприводы серии ЭТС1 с синхронными двигателями/В. В. Горчаков, М. И. Альтшуллер, А. А. Сушенцов и др.//Там же С. 14—17.
- 51.60. **Перельмутер В. М., Сидоренко В. А.** Системы управления тиристорными электроприво- дами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат. 1988 304 с.
- 51.61 **Комплексные** тиристорные электроприво- ды: Справочник/И. Х. Евзеров, А. С. Горобец, Б. И. Мошквич и др. М.: Энергоатомиздат. 1988.

# Раздел 52

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

### СОДЕРЖАНИЕ

52.1 Состав общепромышленных механизмов . . . . .	118	52.5. Электропривод экскаваторов . . . . .	133
52.2. Механизмы циклического действия. Общие сведения (118). Определение статических нагрузок для подъемных устройств (119). Определение статических нагрузок для механизмов горизонтального передвижения груза (120). Влияние динамических нагрузок (121). Особенности механизмов, влияющих на выбор их электроприводов (125). Требования к механическим характеристикам электроприводов (126)		52.6. Электропривод конвейеров. Общие сведения (134). Определение статических нагрузок (135). Тяговый расчет конвейера (135). Многодвигательный электропривод конвейеров (137). Влияние динамических нагрузок (137). Требования к электроприводам (138). Системы электроприводов (139)	
52.3 Крановый электропривод. Общие особенности (127). Требования к электроприводу (127). Системы электроприводов (128)		52.7 Электропривод насосов, вентиляторов, компрессоров. Общие сведения (141). Характеристики машин для подачи жидкостей и газов (142). Механические характеристики (145). Особенности машин для подачи жидкостей и газов, определяющие требования к электроприводу (146). Системы электроприводов (147)	
52.4 Электропривод лифтов. Особенности схем управления (130). Требования к электроприводу (131). Системы электроприводов (131)		Список литературы . . . . .	150

### 52.1. СОСТАВ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

К общепромышленным механизмам относят большой класс рабочих машин, которые применяются в самых разнообразных отраслях народного хозяйства: в промышленности, сельскохозяйственном производстве, на транспорте, в строительстве. В большинстве случаев эти механизмы обслуживают основное производство различных отраслей.

Общепромышленные механизмы содержат следующие установки:

большую часть подъемно-транспортных машин (подъемно-транспортные машины — машины, предназначенные для перемещения грузов и людей на относительно небольшие расстояния): подъемные краны, различные подъемники (в том числе лифтовые) и конвейеры;

часть выемочно-погрузочных машин: одноковшовые и многоковшовые (роторные) экскаваторы;

машины для транспортировки жидкостей и газов и сжатия газов: насосы, вентиляторы, компрессоры.

По характеру работы общепромышленные механизмы подразделяются на две большие группы:

периодического (циклического) действия

(краны, подъемники периодического действия, экскаваторы);

непрерывного действия (конвейеры, насосы, вентиляторы, компрессоры).

Общепромышленные механизмы имеют массовое распространение. Для их электроприводов (ЭП) используется примерно 70—75 % выпускаемых АД и более 25 % вырабатываемой в народном хозяйстве электроэнергии.

Для механизмов рассматриваемого класса применяются практически все существующие виды ЭП переменного и постоянного тока. Однако в большинстве случаев для механизмов кранов, лифтов, насосов, вентиляторов, конвейеров используются такие асинхронные ЭП, которые вследствие их массовости должны иметь минимальные стоимость и массогабаритные показатели, возможно более простое схемное и конструктивное исполнение и высокую эксплуатационную надежность.

### 52.2. МЕХАНИЗМЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

#### Общие сведения

*Подъемный кран* представляет собой грузоподъемную машину, работающую с повторяющимися циклами и предназначенную для пере-

мещения грузов в пространстве. По конструктивным признакам различают мостовые краны, мостовые перегружатели, башенные, порталные, козловые, кабельные и другие типы кранов. Краны содержат механизмы подъема и механизмы горизонтального перемещения грузов (тележка, мост, механизмы поворота и т. д.).

Подъемник является грузоподъемной машиной, служащей для подъема и спуска людей или грузов в специальных подъемных сосудах, которые движутся по жестким вертикальным (или наклонным) направляющим. Преимущественное распространение получили канатные подъемники, в которых подъемные сосуды подвешиваются на стальных канатах, огибающих канатоведущие шкивы или навиваемых на барабаны. К подъемникам циклического действия относят лифты, шахтные подъемники (клетевые и скиповые) и др.

Экскаватор — основной тип выемочно-погрузочных машин, применяемых для производства земляных работ и для добычи полезных ископаемых при открытой разработке месторождений. С помощью рабочего органа экскаватора (ковша) осуществляется копанье грунтов или горных пород. К экскаваторам с циклическим характером работы относят одноковшовые экскаваторы с различным рабочим оборудованием: экскаватор-лопата, у которого ковш имеет жесткое сочленение со стрелой, и экскаватор-драглайн, у которого ковш подвешен на канатах.

**Определение статических нагрузок для подъемных устройств**

На рис. 52.1 приведены расчетные схемы подъемных устройств: механизма подъема крана, шахтного подъемника с двумя подъемными сосудами и лифтового подъемника.

Момент сопротивления для каждого из этих устройств при работе приводной электрической машины в двигательном или тормозном режиме определяется соответственно следующими формулами:

$$M_c = F_c D / 2i_m \eta$$

или

$$M_c = F_c D \eta / 2i_{\eta},$$

где  $F_c$  — статическое усилие на окружности диаметром  $D$  (барабана на рис. 52.1, а и б или канатоведущего шкива на рис. 52.1, в), равное натяжению каната на рис. 52.1, а или разности натяжений поднимающейся и опускающейся ветвей каната на рис. 52.1, б и в;  $i_m$  — передаточное отношение подъемного механизма, равное отношению угловых скоростей приводного двигателя и барабана (или канато-

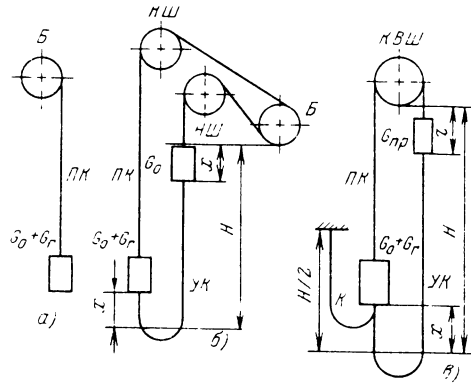


Рис. 52.1. Расчетные схемы подъемных устройств:

а — для механизма подъема крана; б — для подъемника с двумя подъемными сосудами; в — для лифта. Б — барабан; ПК и УК — подъемный и уравновешивающий канаты, К — гибкий кабель, НШ и КВШ — направляющий и канатоведущий шкивы

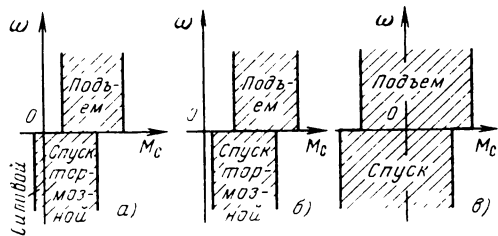


Рис. 52.2. Области изменения моментов сопротивления при транспортировке различных грузов:

а и б — для механизма подъема крана соответственно с легким и тяжелым грузозахватным органом; в — для лифтового подъемника

ведущего шкива);  $\eta$  — КПД подъемного механизма.

Момент сопротивления можно представить в виде

$$M_c = M_{тр} + M_T,$$

где  $M_{тр}$  — реактивный момент, создаваемый силами трения подъемного устройства;  $M_T$  — активный момент, создаваемый весом перемещаемого груза и не зависящий от трения.

На рис. 52.2 показаны области изменения  $M_c$  для механизма подъема крана (рис. 52.2, а и б) и лифтового подъемника (рис. 52.2, в) при изменении веса груза  $G_t$  от нуля до номинального  $G_{т,ном}$ .

Для механизмов подъема кранов в случае легкого грузозахватного органа (рис. 52.2, а)  $M_c$  при спуске грузов изменяется от отрицательных значений, когда вес груза небольшой



(«силовой спуск»), до положительных при спуске более тяжелых грузов, когда знак  $M_c$  при спуске такой же, как и при подъеме («тормозной спуск»). Когда грузозахватный орган сравнительно тяжелый (грейфер, ковш экскаватора), при изменении веса груза от нуля до номинального имеет место только тормозной спуск, как показано на рис. 52.2, б. При расчетах трение в механизме подъема учитывают с помощью КПД. В этом случае

$$F_c = G_0 + G_r,$$

где  $G_0$  — вес грузозахватного органа.

Значение КПД  $\eta_n$  при подъеме груза, отличного от номинального, может быть определено из графиков на рис. 52.3, а при спуске — по формуле [52.2]

$$\eta_c = 2 - 1/\eta_n.$$

Для шахтных подъемников в случае двух подъемных сосудов и цилиндрических барабанов (см. рис. 52.1, б)

$$F_c = k_{ш}G_r + (q_T - q_y)(H - 2x),$$

где  $q_T$  и  $q_y$  — вес 1 м подъемного (тягового) и уравновешивающего канатов;  $H$  и  $x$  — глубина шахты и текущее расстояние подъемного сосуда весом  $G_0$  с грузом  $G_r$  от начальной точки движения (рис. 52.1, б);  $k_{ш}$  — коэффициент, учитывающий вредные сопротивления в шахте подъемника. при расчетах принимается  $k_{ш} = 1,2$  для клетей,  $k_{ш} = 1,15$  для скипов и  $k_{ш} = 1,1$  для многоканатных установок [52.9].

В случае однососудных подъемных установок с противовесом

$$F_c = k_{ш}G_r + G_0 - G_{пр} + (q_T - q_y)(H - 2x),$$

где  $G_0$  и  $G_{пр}$  — вес подъемного сосуда (скипа или клетки) и противовеса.

Использование уравновешивающих канатов для подъемников позволяет уменьшить мощность их приводного электродвигателя. Исследования шахтных подъемников показывают, что если вес подъемных канатов больше половины веса полезного груза и уравновешивающий канат отсутствует, то мощность электродвигателя возрастает более чем на 15%, а КПД подъемника уменьшается более чем на 10%. Для двухсосудных шахтных подъемников уравновешивающие канаты не применяют при глубине подъема менее 450–500 м, а для подъемников с противовесом — при глубине шахты менее 250–300 м [52.9].

Для лифтовых подъемников при использовании распространенной расчетной схемы, показанной на рис. 52.1, в, КПД редуктора для

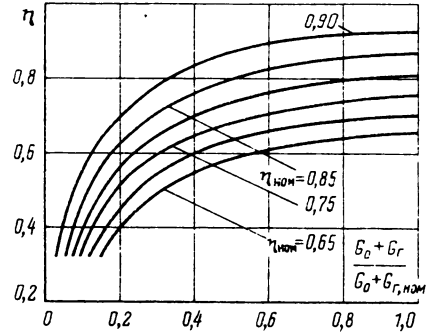


Рис. 52.3. КПД механизма при различных нагрузках:

$\eta_{ном}$  — номинальный КПД,  $G_{r, ном}$  — номинальный вес груза

расчетных нагрузок кабины определяется по кривым, аналогичным приведенным на рис. 52.3, а  $F_c$  находится с помощью выражения

$$F_c = G_r + G_0 - G_{пр} + (q_T - q_y)(H - 2x) + \frac{1}{2} q_{каб}x \pm F_{ш},$$

где  $G_r$ ,  $G_0$  и  $G_{пр}$  — вес полезного груза в кабине, кабины и противовеса;  $q_{каб}$  — вес 1 м гибкого кабеля;  $F_{ш}$  — сила сопротивления шахты.

Обычно

$$G_{пр} = G_0 + (0,4 \div 0,6) G_{r, ном},$$

где  $G_{r, ном}$  — номинальный вес груза для лифтовой установки.

Согласно [52.9] при работе лифтов с башмаками скольжения можно рассчитывать вредные силы сопротивления  $F_{ш}$  как 10% полезного груза, а при роликовых башмаках — 2%.

Для уменьшения мощности приводного электродвигателя используют уравновешивающие канаты или цепи. В лифтовых установках статическое уравновешивание применяют тогда, когда вес канатов превышает  $0,1G_{r, ном}$ , что обычно имеет место при высоте подъема более 45 м [52.9].

#### Определение статических нагрузок для механизмов горизонтального передвижения груза

Для механизмов передвижения с приводными колесами (тележки и мосты мостовых кранов и т. д.) сила статического сопротивления передвижению на рельсовом пути

$$F_c = F_{тр} \pm F_y \pm F_v,$$

где

$$F_{1p} = k_p \frac{(G_M + G_1)(f_k + \mu_c d_{ц}/2)}{D_k/2}$$

— сила сопротивления от трения качения колеса по рельсу и трения скольжения в опорах колеса;  $G_M$  — вес механизма;  $f_k = 0,0003 \div 0,0015$  м — коэффициент (плечо) трения качения;  $\mu_c = 0,06 \div 0,12$  — коэффициент трения скольжения;  $D_k$  и  $d_{ц}$  — диаметры колеса и его цапфы;  $k_p = 1,2 \div 2,5$  — коэффициент, учитывающий трение реборд ходовых колес о рельсы;  $F_y = (G_M + G_1) \sin \alpha$  — сила сопротивления передвижению от уклона пути на угол  $\alpha$ ;  $F_b = p_b s_b$  — сила ветровой нагрузки, определяемая удельной ветровой нагрузкой  $p_b$ , действующей на расчетную площадь  $s_b$ , на которую действует давление ветра под углом  $90^\circ$  [52.2].

Перед  $F_y$  знак «+» берется при движении на подъем, знак «-» — при спуске под уклон, а перед  $F_b$  знак «+» — при движении против ветра, знак «-» — при движении по ветру.

Момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя, определяется по формулам:

при двигательном режиме работы приводной электрической машины

$$M_c = F_c D_k / 2i_M \eta_M;$$

при генераторном режиме

$$M_c = F_c D_k \eta_M / 2i_M,$$

где  $i_M$  и  $\eta_M$  — передаточное отношение и КПД редуктора механизма.

На рис. 52.4, а и б для механизмов передвижения крана приведены области изменения моментов сопротивления при передвижении грузов и учете только сил трения. Эти области для различных направлений движения симметричны друг другу относительно начала координат. Если учитывать обусловленные уклоном и ветром активные составляющие  $M_c$ , то указанные области для различных направлений движения могут отличаться друг от друга.

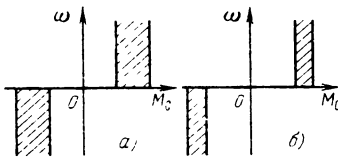


Рис 52.4. Области изменения моментов сопротивления (при учете только сил трения) при передвижении различных по массе грузов: а — для тележки, б — для моста мостового крана

Для механизмов передвижения с канатной или цепной тягой, а также для механизмов поворота моменты сопротивления можно рассчитать согласно [52.2].

Для механизмов поворота без учета уклона и ветра области изменения  $M_c$  при различных по массе грузах имеют вид, аналогичный областям на рис. 52.4, б.

При приближенных практических расчетах согласно [52.6] для механизмов передвижения моста или тележки крана без учета уклона и ветра можно исходить из того, что сила сопротивления движению в расчете на 1 т перемещаемой конструкции равна 80 Н (при качении колес по рельсам и подшипниках качения, а также нормальном состоянии подкранового пути), а для механизма поворота 65 Н.

### Влияние динамических нагрузок

Механизмы грузоподъемных машин содержат зазоры, упругие передачи (валы, канаты) и различные инерционные массы (муфты, зубчатые колеса и т. д.), которые взаимодействуют между собой в установившихся и переходных режимах. Принципиально такие механизмы представляют собой динамические системы высокого порядка. Однако исследования показывают, что реальные системы можно привести к упрощенным расчетным динамическим схемам. В большинстве случаев реальные многомассовые системы допустимо заменять расчетными системами с двумя-тремя массами.

Механизмы подъема часто представляются в виде двухмассовой системы (рис. 52.5, а и б), в которой масса  $m_1$  груза соединена упругой связью, характеризующейся коэффициентом жесткости  $c$ , с массой  $m_2$  механизма. Масса  $m_2$  пропорциональна моменту инерции вращающихся масс ЭП (ротор двигателя, редуктор, барабан). Показанный на рис. 52.5, б расчетный зазор  $\Delta_c$  отражает слабины каната подъемного механизма. Жесткость упругой связи опреде-

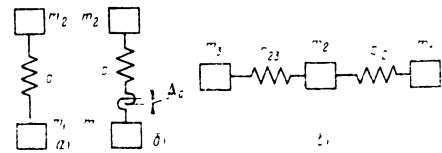


Рис 52.5. Расчетные динамические схемы подъемных устройств:

а — для механизма подъема при отсутствии слабых канатов; б — то же при наличии слабины; в — для подъемника

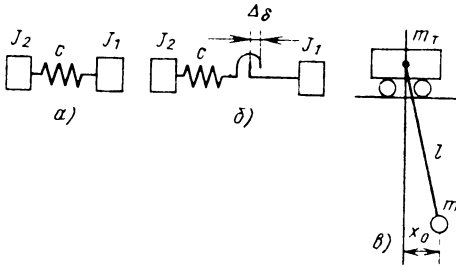


Рис. 52.6. Расчетные динамические схемы для механизмов горизонтального передвижения грузов:

*a* – с одной упругостью; *б* – с одной упругостью и зазором; *в* – с гибкой подвеской груза

ляется жесткостью конструкции моста и жесткостью подъемного каната [52.5].

Различные расчетные схемы подъемников приведены в [52.9]. Одна из этих схем показана на рис. 52.5, *в*. На этой схеме обозначено:  $m_1$  и  $m_3$  – массы, связанные с поднимающейся и опускающейся ветвями каната с коэффициентами жесткости  $c_{12}$  и  $c_{23}$ ;  $m_2$  – приведенная масса вращающихся частей механизма, включающих барабан или канатоведущий шкив, редуктор, ротор двигателя и т. д.

Для механизмов передвижения и поворота расчетные схемы чаще всего представляются в виде двух-трехмассовых систем [52.7]. На рис. 52.6, *а* и *б* представлены двухмассовые варианты расчетных схем, причем в схеме рис. 52.6, *б* показан угловой зазор  $\Delta\delta$ . Для механизма передвижения  $J_1$  и  $J_2$  – соответственно приведенные моменты инерции вращающихся и поступательно движущихся частей механизма, а  $c$  – общий коэффициент жесткости, учитывающий валы и упругие муфты [52.2]. Для механизма поворота  $J_1$  – приведенный момент инерции поворотной части механизма;  $J_2$  – приведенная масса груза и металлической конструкции, к которой подвешен груз;  $c$  – эквивалентный коэффициент жесткости металлической конструкции механизма.

Приведенные на рис. 52.6, *а* и *б* расчетные схемы не учитывают явление раскачивания подвешенного к механизму передвижения груза, что справедливо при жесткой подвеске груза или в случае, когда груз высоко поднят, так что жесткость канатной связи оказывается весьма высокой.

На рис. 52.6, *в* показана двухмассовая расчетная схема для тележки массой  $m_T$  (значение  $m_T$  учитывает и момент инерции двигателя) с подвешенным к ней с помощью каната длиной  $l$  грузом массой  $m_r$ . Эта схема

чаще всего используется для анализа колебаний подвешенного на канате груза.

Трехмассовая расчетная схема механизма передвижения имеет такой же вид, как на рис. 52.5, *в*. Ее используют для анализа механизмов тележки с канатной тягой, а также передвижения с учетом конечной жесткости металлоконструкции механизма и колебаний подвешенного на канате груза [52.7]. Для механизма передвижения в схеме рис. 52.5, *в*  $m_1$  – масса груза;  $m_2$  – масса тележки;  $m_3$  – приведенная масса вращающихся частей механизма (учитывающая момент инерции двигателя);  $c_{12}$  – приведенная жесткость каната, учитывающая колебания груза, Н/м:

$$c_{12} = gm_r/l = G_r/l,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $l$  – длина каната;  $c_{23}$  – жесткость тяговых канатов для тележки с канатной тягой или приведенную жесткость металлоконструкции механизма.

Важной количественной характеристикой ЭП является его момент инерции. Для рассматриваемых ЭП отношение  $J_{\Sigma}/J_{дв}$ , где  $J_{\Sigma}$  – полный момент инерции ЭП, приведенный к валу приводного двигателя;  $J_{дв}$  – момент инерции ротора двигателя, ориентировочно находится в следующих границах:

для механизмов подъема . . . . .	1.1–1.5
для подъемников . . . . .	2–10
для механизмов передвижения тележки . . . . .	5–20
для механизмов передвижения мостов, кранов, механизмов поворота . . . . .	20–100

Если принять, что конструкция механизма подъема абсолютно жесткая, и учесть только жесткость каната, то для расчетной схемы рис. 52.5, *а* частота собственных колебаний выражается в виде

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}.$$

Поскольку для механизмов подъема  $m_2 \gg m_1$ , то

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m_1}}.$$

Жесткость  $c$  каната определяется его длиной, сечением и пропорциональна массе номинального груза. При этом для массы грузов, близкой к номинальной, справедлива следующая приближенная формула:

$$f_0 \approx 10\sqrt{l},$$

где  $l$  – длина каната, м.

В соответствии с этой формулой для механизмов подъема кранов можно принять  $f_0 \approx 1 \div 5$  Гц; для механизмов подъема мощных экскаваторов  $f_0 \approx 0,3 \div 1$  Гц [52.11], а для их механизмов поворота  $f_0 \approx 2 \div 3$  Гц. Для порталных кранов частота собственных колебаний их стрел в горизонтальной плоскости лежит в пределах 0,5–5 Гц.

Наименьшая частота  $f_0$  собственных колебаний получается для процесса раскачивания груза с неподвижной точкой подвеса каната:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{0,5}{\sqrt{l}}.$$

При  $l = 100 \div 5$  м  $f_0 = 0,05 \div 0,22$  Гц.

При подъеме «с веса», т. е. когда в начале подъема натяжение каната равно весу груза  $G_r$ , а начальные скорости движения масс  $m_1$  и  $m_2$  (см. рис. 52.5, а) равны между собой, и в случае постоянства момента  $M_n$  приводного двигателя коэффициент динамичности, под которым понимают отношение максимальной нагрузки упругой связи к нагрузке в ней в стационарном напряженном состоянии,

$$k_d = \frac{S_{max}}{G_r} = 1 + 2 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \frac{M_n - M_c}{M_c},$$

где  $S_{max}$  – наибольшая сила натяжения каната;  $M_c$  – момент сопротивления механизма подъема, пропорциональный весу груза  $G_r$  и приведенный к валу двигателя.

При  $M_n \approx 2M_c$  и условии, что наибольшие отношения масс  $m_1$  и  $(m_1 + m_2)$  не превосходят 0,1–0,2,

$$k_d \approx 1,2 \div 1,4.$$

Следовательно, коэффициент динамичности для механизмов подъема небольшой, откуда следует важный для проектирования электропривода вывод: при переходных процессах подъема «с веса» вполне приемлемым для практики является формирование постоянного во времени момента приводного двигателя механизма.

При подъеме «с подхватом» (под которым понимается подъем при наличии слабины в канате – см. рис. 52.5, б) в случае постоянства момента двигателя и при учете справедливого для механизмов подъема неравенства  $m_1 \ll m_2$  коэффициент динамичности представляется в виде

$$k_d = \frac{S_{max}}{G_r} = 1 + \Delta v_0 \frac{\sqrt{cm_1}}{G_r},$$

где  $\Delta v_0 = v_2(0) - v_1(0)$  – разность скоростей по окончании выбора слабины каната (здесь  $v_2$  –

скорость верхней части каната, связанной с барабаном механизма подъема;  $v_1$  – скорость нижней части каната, связанной с поднимаемым грузом).

Таким образом, для уменьшения коэффициента динамичности необходимо обеспечить выбор слабины каната при небольшом значении  $\Delta t_0$ , что наиболее целесообразно осуществить средствами электропривода. Для обеспечения выбора слабины каната при малой скорости можно создать жесткую механическую характеристику приводного двигателя при его пониженных угловых скоростях или создать сравнительно мягкую (например, реостатную) характеристику, пусковой момент на которой равен примерно  $(0,7 \div 0,85) M_{c,ном}$ , где  $M_{c,ном}$  – момент сопротивления при подъеме номинального груза.

При пуске механизмов передвижения или поворота при наличии зазора (рис. 52.6, б) и в случае постоянства момента  $M_n$  приводного двигателя, а также с учетом того, что для этих механизмов момент инерции ротора двигателя обычно составляет небольшую долю общего момента инерции ЭП, коэффициент динамичности можно записать следующим образом:

$$k_d = \frac{M_{ynmax}}{M_n} = 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{c \Delta \omega_0}{\Omega_0 M_n} \right)^2},$$

где  $M_{ynmax}$  – наибольшее значение момента в упругом элементе;  $c$  – коэффициент жесткости упругого элемента;  $\Delta \omega_0$  – разность скоростей инерционных масс  $J_1$  и  $J_2$  в момент выбора зазоров;

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{c(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$$

– частота собственных колебаний механической системы.

Следовательно, для уменьшения коэффициента динамичности целесообразно уменьшать начальную разность скоростей инерционных масс. Для этого, так же как и для механизмов подъема, необходимо иметь жесткую механическую характеристику приводного двигателя при малых его скоростях или осуществить выбор зазоров при пониженных ускорениях двигателя, как это принято в ЭП экскаваторов. В случаях больших начальных зазоров и значительных  $\Delta \omega_0$  может иметь место многократное образование зазоров.

Коэффициент динамичности у инерционных механизмов (передвижения или поворота) больше, чем у малоинерционных механизмов (подъема), даже при отсутствии зазоров в механических передачах. Для уменьшения  $k_d$  целе-

сообразно момент приводного двигателя такого механизма при переходных процессах изменять плавно во времени.

Большие динамические нагрузки возникают при стопорении механизмов. Анализ этого процесса особенно важен в тех случаях, когда он происходит часто, например в копающих механизмах экскаваторов (механизмы подъема, напора, тяги), где при внезапной встрече ковша с валуном или участком невзорванной скалы ковш останавливается практически мгновенно (за время менее 0,1 с (см. [52.12])). Для расчета процесса стопорения используют приведенную на рис. 52.6, а расчетную схему, в которой левый конец упругого элемента зацементирован, т. е. принимают  $J_2 = \infty$ . При условии постоянства момента приводного двигателя в процессе стопорения коэффициент динамичности представляется в виде

$$k_d = \frac{M_{упmax}}{M_{стоп}} = 1 + \frac{\omega_{нач} \sqrt{J_1 c}}{M_{стоп}},$$

где  $M_{упmax}$  – максимальное значение момента в упругой связи (пропорциональное наибольшему натяжению подъемного каната механизма);  $M_{стоп}$  – стопорное значение момента двигателя;  $\omega_{нач}$  – начальная угловая скорость двигателя при стопорении.

При заданной рабочей скорости копания и заданном коэффициенте жесткости механизма коэффициент динамичности может быть уменьшен путем снижения приведенного суммарного момента инерции, основную долю в котором составляет момент инерции двигателя. Поэтому для копающих механизмов стремятся использовать безредукторные ЭП с тихоходными двигателями или редукторы с небольшим передаточным отношением. Практически для приводов подъема и напора экскаваторов-лопат  $k_d = 1,6 \div 2,8$ , а для привода тяги экскаваторов-драглайнов  $k_d = 2 \div 4$  [52.11, 52.12].

Для анализа колебаний груза относительно положения равновесия обычно используется расчетная схема рис. 52.6, в. уравнения которой при малых углах отклонения груза имеют вид

$$\frac{dv_T}{dt} + \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \omega_{0r}^2 x_0 = 0;$$

$$\frac{dv_T}{dt} - \frac{m_T}{m_r} \omega_{0r}^2 x_0 - \frac{1}{\rho m_T} (M - M_c) = 0,$$

где  $v_T$  – скорость тележки;  $M$  – момент приводного двигателя;  $\rho$  – радиус приведения скорости тележки к валу двигателя;  $\omega_{0r} = \sqrt{g/l}$  – угловая частота собственных колебаний груза.

При разгоне и торможении тележки (равно как и другого механизма горизонтального передвижения) принципиально всегда возникают колебания груза относительно своего положения равновесия. Для ограничения амплитуды и времени этих колебаний используют различные способы:

а) способы, основанные на ручном управлении и заключающиеся в том, что крановщик определенным образом маневрирует механизмами крана. Опытные крановщики гасят колебания груза, управляя двигателем в определенной последовательности следующим образом: при разгоне осуществляют операции пуск – торможение – пуск, а при торможении – операции торможение – пуск – торможение. При ручном управлении система ЭП может быть сравнительно простой, однако работа крановщика оказывается в этих случаях интенсивной и напряженной, а сам крановщик должен быть достаточно опытным;

б) механические, основанные на создании дополнительных устройств, усложняющих конструкцию кранов и не связанных с ЭП (дополнительные оттяжные канаты с подвижным противовесом внутри стрелы, широкий разнос блоков в узлах подвески груза и т. д. – см. [52.7]);

в) электрические, основанные на использовании автоматизированного ЭП со специальными свойствами, обеспечивающими автоматическое успокоение колебаний груза. При этом крановщик дает только начальный командный импульс, а дальнейшее движение тележки автоматически формируется системой управления ЭП. Электрические способы в свою очередь можно разделить на две группы: автоматическое управление колебаниями груза с ненулевыми, т. е. произвольными, отклонениями груза в начале переходного процесса и с нулевыми начальными отклонениями груза.

Один из способов обеспечения автоматического успокоения колебаний груза при нулевых начальных отклонениях заключается в следующем. При переходных процессах обеспечивают движение тележки с постоянным ускорением (рис. 52.7, а), причем время изменения скорости от начальной до конечной выбирают равным периоду собственных колебаний груза:

$$T_{0r} = 2\pi \sqrt{l/g}.$$

Другой способ состоит в том, что обеспечивают движение тележки при ее переходных процессах в три этапа (рис. 52.7, б): на первом этапе формируют движение с постоянным ускорением и изменяют скорость тележки от начальной до средней между начальной и

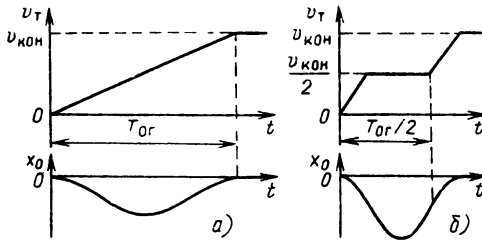


Рис. 52.7. Зависимости скорости  $v_1$  тележки и отклонения  $x_0$  груза от времени (для расчетной схемы рис. 52.6, в) для случаев пуска тележки при одноступенчатом (а) и двухступенчатом (б) законах изменения скорости

конечной скоростью, на втором обеспечивают равномерное движение тележки, причем общее время первого и второго этапов выбирают равным  $T_{0r}/2$ , как показано на рис. 52.7, б, а на третьем вновь формируют движение с постоянным ускорением и изменяют скорость тележки до заданного конечного значения.

Для осуществления таких способов необходимо иметь датчик длины  $l$  подвески каната и определять значение  $T_{0r}$ . На вход системы ЭП должен быть подан сигнал задания, изменение которого во времени пропорционально необходимой зависимости  $v_r(t)$  (рис. 52.7, а и б). При этом система ЭП должна обладать следующим свойством: скорость тележки должна с небольшой динамической погрешностью изменяться во времени, так же как и входной сигнал. Такими свойствами обладают системы с двигателями постоянного или переменного тока с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием параметров.

Практически для всех рассматриваемых механизмов требуется точная остановка рабочего органа (точная посадка груза, точная остановка подъемных сосудов у подъемников, точная установка грузов механизмами передвижения и т. д.). Для достижения требуемой точности остановки часто используется предварительное снижение скорости рабочих органов механизмов. В [52.3, 52.4] приведены формулы для расчета параметров механических характеристик, обеспечивающих пониженную скорость движения механизмов.

**Особенности механизмов, влияющие на выбор их электроприводов**

Особенности статических и динамических нагрузок рассматриваемого класса механизмов определяют выбор систем ЭП и требования

к ним. Основные из этих особенностей следующие:

1. Широкий диапазон изменения моментов сопротивления.
2. Необходимость реверсирования.
3. Ограничение момента в элементах механизмов.
4. Обеспечение работы на пониженной скорости (реализуется путем формирования механических характеристик для пониженной скорости).

5. Ограничение ускорений:

а) при выборе зазоров в передачах или при выборе слабых канатов для уменьшения скорости в момент замыкания всей механической системы;

б) для уменьшения амплитуды колебаний груза, перемещаемого краном на гибком подвесе;

в) для обеспечения требуемого характера работы механизмов (например, ускорение кабины лифтов должно быть ограничено значением  $2 \text{ м/с}^2$  по условиям «комфортности», обусловленным необходимостью обеспечения нормального самочувствия перевозимых в кабине пассажиров);

г) по условиям обеспечения надежного сцепления колес механизмов передвижения с рельсами [52.1];

д) по условиям обеспечения надежного сцепления канатов со шкивами трения в подъемниках [52.9];

е) для исключения затруднений при управлении механизмами, например экскаватором [52.12].

6. Формирование переходных процессов, исходя из допустимых ускорений и моментов и обеспечения максимальной производительности работы механизмов.

Средние значения ускорений,  $\text{м/с}^2$ , для механизмов кранов следующие:

Механизмы подъема, осуществляющие монтажные операции и работающие с жидким металлом . . . . .	0,1
Механизмы подъема кранов механосборочных цехов . . . . .	0,2
Механизмы подъема кранов металлургических цехов . . . . .	0,5
Механизмы подъема, перегружающие сыпучие грузы . . . . .	0,8
Механизмы передвижения мостовых перегружателей . . . . .	0,05
Механизмы передвижения кранов и тележек, транспортирующих жидкий металл, козловых кранов . . . . .	0,1
Механизмы передвижения монтажных кранов и их тележек при гибкой (жесткой) подвеске груза . . . . .	0,2(0,3)
Грейферные тележки мостовых перегружателей . . . . .	0,8
Механизмы вращения кранов . . . . .	0,6

Максимальные значения ускорений для подъемников:

лифты пассажирские (кроме больничных) . . . . .	2
лифты больничные . . . . .	1
шахтные подъемники клетевые . . . . .	0,6—0,75
шахтные подъемники скиповые . . . . .	0,8—1,2

Для лифтов, кроме того, ограничивается производная ускорения (рывок) в пределах 3—10 м/с<sup>3</sup>.

Среднее время переходных процессов для механизмов подъема составляет 1—2 с, а для механизмов передвижения и поворота 4—10 с.

**Требования к механическим характеристикам электроприводов**

*Желаемые механические характеристики для механизмов подъема* приведены на рис. 52.8. Характеристика 1n используется для подъема грузов с пониженной скоростью и предназначена для выбора слабины канатов и точной установки груза при некоторых монтажных операциях. Характеристики 2n и 3n служат для подъема грузов с промежуточной и номинальной скоростями. Характеристика 4n требуется для подъема малых грузов с повышенной скоростью с целью повышения производительности работы кранов, в частности путем подъема пустого грузозахватного органа (например, крюка) со скоростью, примерно в 2 раза превышающей номинальную.

Характеристика 1с служит для спуска грузов с малой скоростью, что требуется для точной установки груза при его спуске. Характеристики 2с и 3с используются для спуска грузов с промежуточной и номинальной скоростями, а характеристика 4с — для спуска легких грузов с повышенной скоростью, что, как и в случае подъема, целесооб-

разно по условиям повышения производительности работы кранов.

Показанные на рис. 52.8 вертикальные участки характеристик требуются для ограничения моментов и ускорений при пусках и торможениях механизма.

На рис. 52.8 показана характеристика 0, которая обычно не используется в крановых механизмах, но широко используется для механизмов экскаваторов. В экскаваторах торможение обычно осуществляется электродвигателем, а тормоза применяются для аварийного торможения. При этом используется механическая характеристика 0 (так называемая характеристика «удержания ковша»), обеспечивающая малую скорость движения ковша, которая требуется для маневровых и вспомогательных операций.

Следует отметить, что семейство характеристик, представленных на рис. 52.8, можно получить при использовании сравнительно сложных систем ЭП. Для подъемников обычно не требуются механические характеристики типа 4n, 2n, 0, 2с и 4с. В ЭП подъемников используются показанные на рис. 52.8 жирными линиями характеристики 3n и 3с (для подъема и спуска грузов с номинальной скоростью), а также 1n и 1с (для получения так называемой «ревизионной скорости» и обеспечения точной остановки подъемных сосудов около заданного уровня). Однако в отличие от характеристик, показанных на рис. 52.8, для подъема и спуска в подъемниках формируются одинаковые характеристики, что объясняется примерно одинаковыми значениями моментов сопротивления при подъеме и спуске грузов (см. рис. 52.2, в).

Для механизмов передвижения и поворота требуются изображенные на рис. 52.9 механические характеристики. Механические характеристики ЭП одинаковы для обоих направлений движения механизмов, что определяется одинаковыми моментами сопротивления при

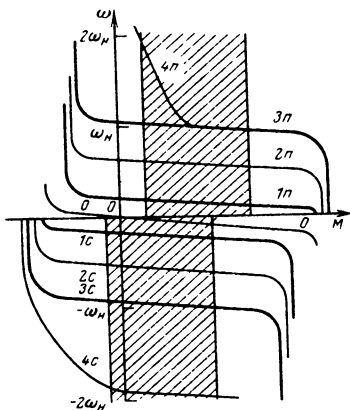


Рис. 52.8. Желаемые механические характеристики для механизмов подъема

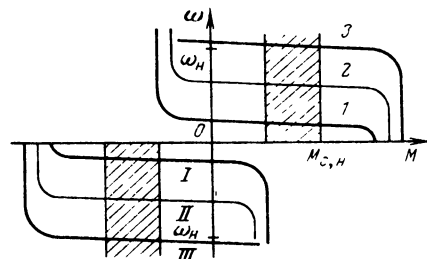


Рис. 52.9. Желаемые механические характеристики для механизмов передвижения и поворота

различных знаках скорости. Характеристики  $I$  и  $I'$  требуются для выбора зазоров в передачах механизмов и обеспечения точной их остановки, характеристики  $2$  и  $II$  являются промежуточными, а характеристики  $3$  и  $III$  служат для движения механизмов с номинальной скоростью.

В ЭП подъемников и экскаваторов понижение скорости обычно получают путем формирования специальных механических характеристик (см. рис. 52.8 и 52.9). Для крановых механизмов часто применяют асинхронные ЭП с реостатным регулированием, которые не обеспечивают характеристик вида  $I$  на рис. 52.8 и 52.9.

### 52.3. КРАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

#### Общие особенности

Для электропривода крановых механизмов выпускаются специальные двигатели постоянного тока (ДПТ) серии Д и АД (серии МТФ и МТН). Наиболее широко используются АД, которые составляют до 90% общего числа двигателей, а с учетом двигателей некранового назначения (на электротралях) число АД превышает 95% [52.8].

В крановом ЭП используют электродвигатели следующих типов:

1) АД с фазным ротором, с короткозамкнутым ротором, а также многоскоростные (с двумя или тремя обмотками статора с соотношением полюсов до 6:1);

2) ДПТ с последовательным или независимым возбуждением.

По способу управления крановые ЭП подразделяются на три группы:

1) с управлением от силовых кулачковых контроллеров (при мощности двигателей до 30 кВт), когда процесс управления, включая выбор ускорений, осуществляется самим оператором;

2) с управлением от кнопочных постов; при этом возможности управления ограничены схемными особенностями поста;

3) с управлением от сложных комплектных устройств – магнитных контроллеров (с использованием преобразователя электроэнергии или без него); в этом случае оператор с помощью командоконтроллера только выбирает необходимые скорости, а переходные процессы и промежуточные переключения осуществляются автоматически.

#### Требования к электроприводу

Основные требования к крановым ЭП обусловлены описанными в § 52.2 особенностями статических и динамических нагрузок и заключаются в следующем:

1) регулирование скорости и момента двигателей в соответствии с определенным набором механических характеристик (см. рис. 52.8 и 52.9);

2) ограничение динамических нагрузок в элементах механической части электропривода (ускорений и моментов);

3) повышенная надежность и безопасность работы крановых установок. Для защиты ЭП крановых механизмов используют специальные комплектные устройства – защитные панели [52.8], осуществляющие максимальную, нулевую и конечную защиты, а также нулевую блокировку;

4) использование по возможности максимально простых схем ЭП, что обусловлено массивностью крановых установок и стремлением поддерживать невысокую стоимость их эксплуатации. Вместе с тем характерными особенностями развития массовых крановых установок является повышение их производительности путем увеличения средних скоростей движения при одновременном снижении установочных скоростей для повышения точности остановки. Это обуславливает увеличение диапазона регулирования скорости. Согласно [52.8] в 1960 г. удовлетворительным считался диапазон регулирования 4:1, а в настоящее время ставится задача получения для большинства кранов диапазона  $(8 \div 10):1$ ;

5) упрощение управления краном с целью уменьшения утомляемости крановщиков. При использовании максимально простых систем ЭП с реостатным регулированием и релейно-контакторным управлением из-за неудовлетворительного вида механических характеристик крановщику приходится производить большое количество дополнительных переключений, что повышает число включений элементов электрооборудования, увеличивает износ аппаратуры и интенсифицирует труд крановщика. При использовании более сложных ЭП, обеспечивающих характеристики вида 52.8 и 52.9, число переключений при управлении краном резко уменьшается. При этом эффективность работы ЭП повышается в том случае, если обеспечивается высокая надежность его работы;

6) формирование специальных динамических режимов в некоторых кранах (автоматическое успокоение колебаний грузов на перегружателях и башенных кранах, синхронизация опор крупных козловых кранов и т. д.);

7) повышенная точность остановки для ряда крановых установок (краны-штабелеры, контейнерные краны), для обеспечения которой в ряде случаев необходимо применение позиционных ЭП.



### Системы электроприводов

Наиболее массовое распространение для крановых механизмов получил простейший асинхронный ЭП с силовыми кулачковыми контроллерами, где используется реостатное регулирование по несимметричной или симметричной схеме в цепи ротора двигателя. Типовые механические характеристики такого ЭП [52.8] значительно отличаются от требуемых (рис. 52.8 и 52.9). ЭП с кулачковыми контроллерами имеют следующие недостатки: невысокие регулировочные свойства из-за отсутствия посадочных скоростей, низкие энергетические показатели. Несколько более высокие показатели имеют асинхронные ЭП с кулачковым контроллером при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением. Такие ЭП (рис. 52.10) используются для механизмов подъема и обеспечивают при спуске диапазон регулирования до 8:1.

ЭП постоянного тока с кулачковыми контроллерами находят ограниченное применение (в тех случаях, когда электроснабжение крана осуществляется на постоянном токе).

ЭП с магнитными контроллерами применяют для систем как переменного, так и постоянного тока. На постоянном токе такие ЭП выполнены аналогично системам с кулачковыми контроллерами и базируются на использовании различных схем регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (реостатное регулирование, схема с шунтированием обмотки якоря, схема безопасного спуска — см. [52.3]). На переменном токе используются системы управления с одно- и двухскоростными короткозамкнутыми двигателями [52.8] и двигателями с фазным ротором. Короткозамкнутыми двигателями обычно управляют с помощью кнопок.

При использовании магнитных контроллеров для управления АД с фазным ротором применяются следующие системы ЭП:

1) система с реостатным регулированием в цепи ротора и использованием режима торможения противовключения. Система ЭП проста, но не обеспечивает устойчивых пониженных скоростей перемещения груза;

2) система с реостатным регулированием при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением. Механические характеристики этой системы аналогичны приведенным на рис. 52.10, б. Такой ЭП используется только для механизмов подъема, поскольку режим динамического торможения возможен при активном моменте сопротивления;

3) система с так называемым импульсно-ключевым способом регулирования скорости, предназначенная для механизмов передвижения. На рис. 52.11, а и б показаны соответственно схема импульсно-ключевого управления и механические характеристики ЭП. Принцип действия схемы заключается в сравнении выпрямленного напряжения ротора двигателя с напряжением порогового элемента ПЭ (например, стабилитрона) и автоматическом включении тиристорного полупроводящего моста в случае, если первое из этих напряжений больше, чем второе, либо при отключении его в противном случае. При таком управлении обеспечивается характеристика II, имеющая участок стабильной работы на пониженной скорости. Характеристика I получается в схеме динамического торможения и обеспечивает работу механизма передвижения в тормозном режиме, а естественная характеристика III определяет номинальную скорость механизма.

В крановых ЭП переменного тока все большее распространение находят полупроводниковые преобразователи. Для АД с фазным

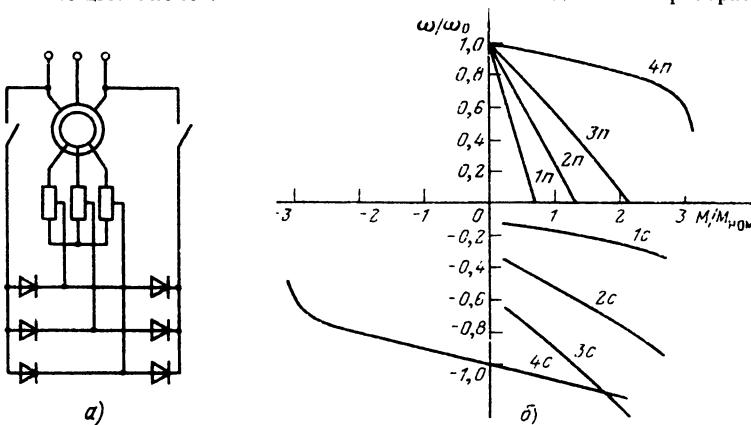


Рис. 52.10. Схема динамического торможения АД с самовозбуждением (а) и получаемые с ее помощью механические характеристики в ЭП с кулачковым контроллером (б)

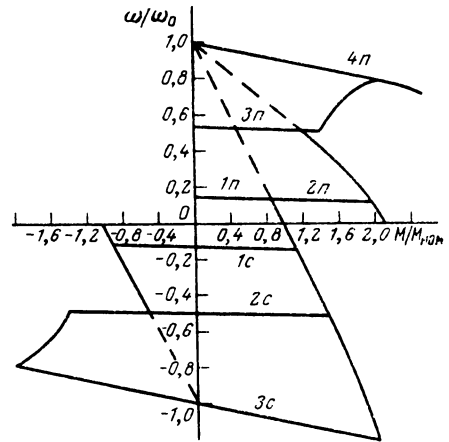
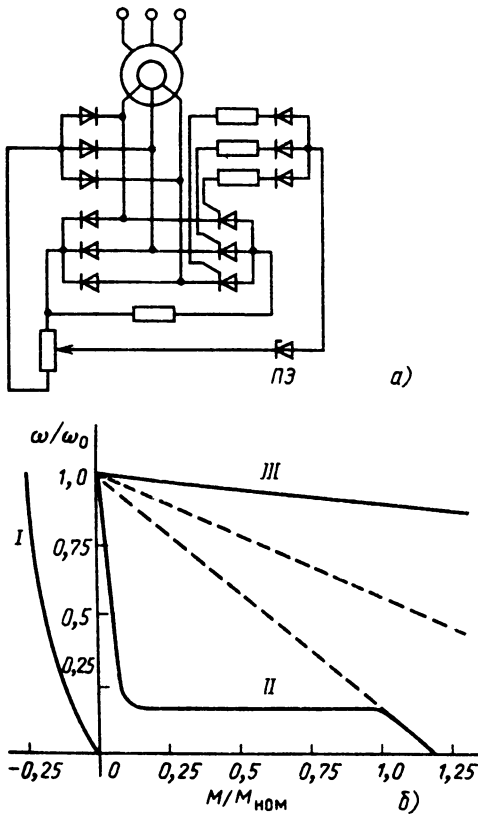


Рис. 52.12. Механические характеристики асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения для механизма подъема

Рис. 52.11. Схема импульсно-ключевого включения асинхронного двигателя (а) и получаемые с ее помощью механические характеристики (б)

Таблица 52.1. Системы крановых электроприводов

Электропривод	Диапазон		
	мощностей, кВт	регулирования скорости $D$	
		ниже номинальной	выше номинальной
Асинхронный с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное	2–30	3 : 1	—
То же при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	5–30	7 : 1	—
Асинхронный с магнитным контроллером, регулирование скорости реостатное	2–180	4 : 1	—
То же при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	20–180	8 : 1	—
Асинхронный с импульсно-ключевым управлением	2–30	10 : 1	—
Асинхронный с тиристорным преобразователем напряжения статора и резисторами в роторе	2–180	10 : 1	—
С многоскоростным АД и преобразователем частоты с непосредственной связью	2–60	40 : 1	—
Постоянного тока с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное и с использованием потенциометрических схем	3–15	4 : 1	2 : 1
Постоянного тока с магнитным контроллером, регулирование скорости реостатное и с использованием потенциометрических схем	3–180	6 : 1	2 : 1
Постоянного тока по системе Г – Д	20–180	10 : 1	2,5 ÷ 1
Постоянного тока по системе ТП – Д	50–300	10 : 1	2,5 ÷ 1

ротором используют включаемые в цепи статора тиристорные преобразователи (ТП) напряжения. С целью получения малых скоростей механизмов предусмотрена обратная связь по скорости с помощью тахогенератора (см. рис. 51.27). Такие ЭП используются как для механизмов подъема, так и для механизмов передвижения. На рис. 52.12 приведены механические характеристики для ЭП механизма подъема. Для крановых механизмов промышленностью освоен ЭП преобразователь частоты с непосредственной связью – АД. Такая система с двухскоростными АД обеспечивает большие возможности по регулированию скорости.

В крановых ЭП постоянного тока получила распространение система Г–Д, которая в настоящее время все более заменяется системой ТП–Д.

В настоящее время разрабатываются асинхронные крановые ЭП с квазичастотным управлением, с импульсным регулированием в цепи ротора двигателя при использовании тиристорных и транзисторных коммутаторов, с частотным управлением при использовании автономных инверторов.

В табл. 52.1 приведены основные технические показатели выпускаемых промышленностью крановых ЭП переменного и постоянного тока.

## 52.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИФТОВ

### Особенности схем управления

Схемы управления лифтовыми установками содержат определенный набор устройств или блоков, каждый из которых предназначен для выполнения определенных функций. В общем случае структурную схему лифтовой

установки можно представить в виде, показанном на рис. 52.13. В соответствии с этой схемой лифтовая установка работает следующим образом.

Команда на начало движения лифта подается с помощью кнопочного устройства приказов и вызовов в узел, который осуществляет запоминание и последующее снятие соответствующих команд после их выполнения. Одним из наиболее сложных и ответственных узлов схемы управления лифтовой установки является позиционно-согласующее устройство (ПСУ), которое служит для определения положения кабины в шахте и выдачи сигналов для движения кабины в нужном направлении и ее остановки. Конструктивно ПСУ выполняют в виде набора электро-механических переключателей, размещаемых в шахте или смонтированных в специальных приборах – копировальном аппарате или селекторе, которые находятся в машинном помещении и связаны с кабиной механической или электрической связью.

Сигналами с выхода ПСУ осуществляется управление электроприводом подъемной лебедки и механическим тормозом с электромагнитным приводом. Узел точной остановки осуществляет перевод кабины на пониженную скорость или введение в систему ЭП контура регулирования положения. После остановки кабины автоматически включается ЭП дверей кабины и шахты. В лифтах с ручным управлением дверей этот узел отсутствует.

Узел защиты и блокировки обеспечивает безопасность работы лифта. Этот узел исключает возможность движения кабины при открытых или незаблокированных замках дверей и открывания дверей шахты при отсутствии кабины на данном этаже, осуществляет остановку кабины при обрыве канатов, превышении

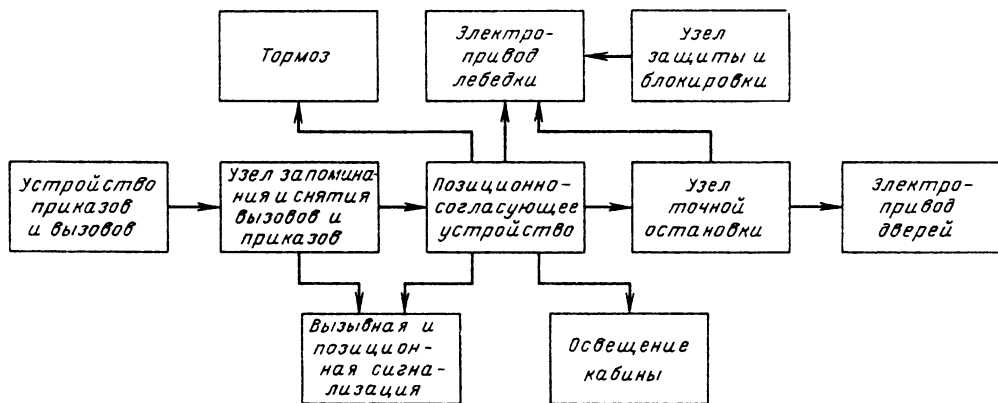


Рис. 52.13. Структурная схема лифтовой установки

допустимой скорости, нажатии аварийной кнопки «Стоп» и срабатывании защиты.

Схема управления лифта включает также устройства сигнализации и освещения кабины. Вызывная сигнализация предназначена для извещения пассажиров о занятости кабины, направлении ее движения, принятии вызова, а также для извещения обслуживающего персонала о состоянии схемы вызывных устройств.

Позиционная световая сигнализация предназначена для извещения пассажиров и обслуживающего персонала о местонахождении кабины в данный момент.

### Требования к электроприводу

Основные требования к ЭП лифтов следующие:

- надежность в работе, обеспечение безопасности при пользовании лифтовой установкой;
- малощумность (для лифтов используют специальные электродвигатели, обеспечивающие пониженный уровень шума);
- удобство и простота в эксплуатации и обслуживании;

- ограничение ускорений кабины (по условиям комфортности для пассажирских лифтов и отсутствия проскальзывания каната относительно канатоведущего шкива для грузовых лифтов);

- обеспечение плавных переходных процессов пуска и торможения при широких пределах изменения момента сопротивления (см. рис. 52.2, в). На рис. 52.14 приведены зависимости скорости, ускорения и рывка для кабины лифта. Эти зависимости построены, исходя из ограничения ускорений и рывков на допустимом уровне (см. § 52.2);

- наличие ревизионной пониженной скорости  $v_{рев} \leq 0,36$  м/с для лифтов с основной рейсовой скоростью более 0,71 м/с;

- обеспечение точности остановки кабины относительно уровня этажной площадки (10–20 мм для коротких и больничных лифтов, 35–50 мм для остальных лифтов [52.3]). Для лифтов с номинальной скоростью кабины не выше 1,4 м/с указанные ревизионная скорость и точность остановки реализуются путем создания механической характеристики ЭП лифта при пониженной скорости;

- лифтовая лебедка должна быть оборудована автоматически действующим тормозом нормально замкнутого типа.

### Системы электроприводов

Для лифтов используют ЭП переменного тока с односкоростными и двухскоростными короткозамкнутыми асинхронными двигателя-

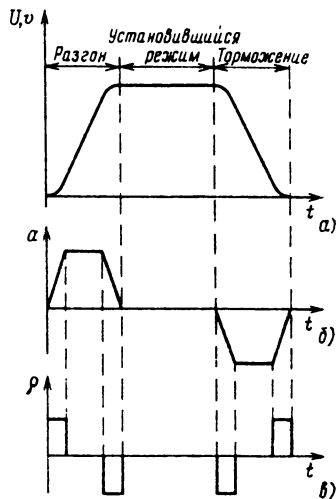


Рис. 52.14. Желаемые зависимости от времени скорости  $v$ , ускорения  $a$  и рывка  $p$  кабины лифта

ми и ЭП постоянного тока с управляемыми ТП.

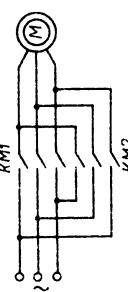
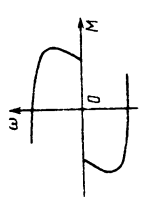
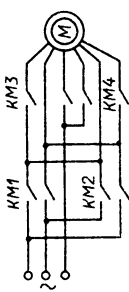
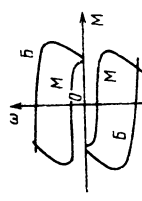
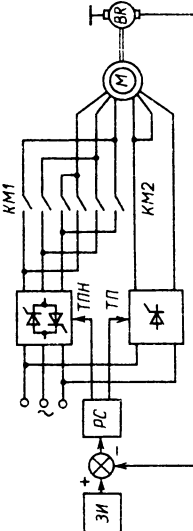
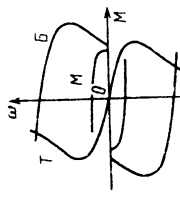
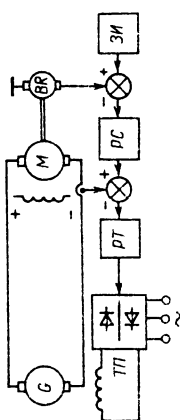
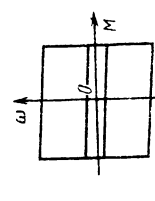
Наиболее распространенные схемы ЭП лифтовых лебедок для различных рабочих скоростей движения кабины приведены в табл. 52.2.

Для лифтов со скоростью движения до 0,5 м/с применяется простейшая схема ЭП с короткозамкнутым АД. Ограничение ускорений в этом случае производится путем преднамеренного увеличения момента инерции ЭП лифтовой лебедки за счет применения специальных лифтовых двигателей с повышенным моментом инерции и дополнительных маховиков, устанавливаемых на валу двигателя.

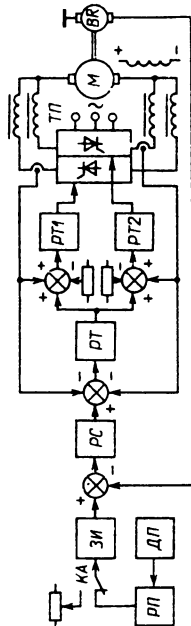
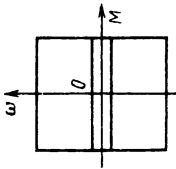
При скорости кабины выше 0,5 м/с необходимо иметь дополнительную механическую характеристику, обеспечивающую возможность работы двигателя на пониженной скорости. Эта характеристика нужна для движения кабины с ревизионной скоростью и обеспечения требуемой точности остановки. Для лифтов со скоростью движения кабины не выше 1,4 м/с наиболее распространенным является ЭП с двухскоростным асинхронным двигателем и контакторным управлением. Ограничение ускорений в переходных процессах в этом случае производится таким же образом, как и в предыдущем случае.

Использование двухскоростных АД с независимыми обмотками, управляемых от ТП, позволяет увеличить скорость движения кабины до 2 м/с. Ограничение ускорений и рывков в такой системе ЭП осуществляется в одно-

Таблица 52.2. Системы электроприводов пассажирских лифтов

Электропривод		Механические характеристики	Примечания
Скорость кабины, м/с	Принципиальная схема		
0,5			Скорость не регулируется. Ограничение ускорений параметрическое. Торможение при замедлении механическое. <i>КМ1, КМ2</i> — реверсивные контакторы
1,4			$D = (3 \div 4) \cdot 1$ . Ограничение ускорений параметрическое. Разгон при пуске и движение с номинальной скоростью — по характеристике <i>Б</i> . Дотягивание и реверзия — на характеристиках <i>М, КМ3, КМ4</i> — контакторы большой ( <i>Б</i> ) и малой ( <i>М</i> ) скорости
2,0			$D = 10 : 1$ Разгон при пуске и движение с номинальной скоростью — по характеристикам <i>Б, Т</i> . Торможение при замедлении — по характеристикам <i>Т</i> (питание обмотки малой скорости от <i>ТП</i> ). Реверзия — на характеристиках <i>М</i> (цепи питания обмотки малой скорости переменным током на схеме не показаны)
2,0			$D = 10 \cdot 1$ . Ограничение ускорений и рывков с помощью задатчика <i>ЗИ</i> . Регуляторы: скорости <i>РС</i> — пропорциональный с ограничением, тока <i>РТ</i> — пропорционально-интегральный

$D = 10 \cdot I$ . Ограничение ускорений и рывков с помощью задатчика  $ЗИ$ . Регуляторы скорости  $РС$  и тока  $РТ$  — пропорционально-интегральные ( $РС$  — с ограничением), уравнивающих токов  $РТ1$ ,  $РТ2$  и положения  $РП$  — пропорциональные



2-4

контурной замкнутой системе регулирования скорости путем формирования оптимальной тахограммы движения, показанной на рис. 52.14. Задатчик движения  $ЗИ$  формирует на входе системы автоматического управления ЭП напряжение  $U$ , определяющее вид желаемой тахограммы лифта.

В табл. 52.2 показана схема с двухскоростным АД, обмотка большой скорости которого питается от ТП переменного напряжения  $ТПН$ , а обмотка малой скорости используется для получения ревизионной скорости и формирования режима динамического торможения АД при питании от управляемого выпрямителя  $ТП$ .

При скорости движения кабины более 2 м/с используются ЭП постоянного тока по системе Г-Д и ТП-Д. Эти ЭП помимо контуров регулирования скорости имеют контуры регулирования тока. Точность остановки кабины осуществляется контуром положения, который включается при подходе кабины в зону точной остановки. Линейные механические характеристики в системе ТП-Д обеспечиваются путем исключения работы ЭП в зоне прерывистых токов за счет введения в систему регулирования дополнительных регуляторов тока  $РТ1$  и  $РТ2$ , предназначенных для поддержания на требуемом уровне уравнивающих токов.

### 52.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЭКСКАВАТОРОВ

В настоящее время для управления основными механизмами одноковшовых экскаваторов преимущественное распространение имеет система Г-Д с возбуждением генератора от магнитных усилителей или ТП [52.11, 52.12]. На рис. 52.15 приведена структурная схема такой системы, которая представляет собой двухконтурную систему подчиненного регулирования с внутренним контуром регулирования момента (тока) и внешним контуром регулирования напряжения двигателя. Особенностью внутреннего контура является наличие интегрального регулятора тока  $РТ$ , представляющего собой генератор постоянного тока (с критическим самовозбуждением при питании обмотки возбуждения от магнитных усилителей или критической обратной связью по ЭДС при возбуждении от ТП), и звена ограничения  $ЗО$ , подключенного на вход  $РТ$ . Регулятор напряжения  $РН$  с коэффициентом  $k_{р,н}$  выполнен в виде пропорционального звена с ограничением.

Основными положительными качествами структуры на рис. 52.15 являются ее сравнительная простота, а также то, что она обеспе-

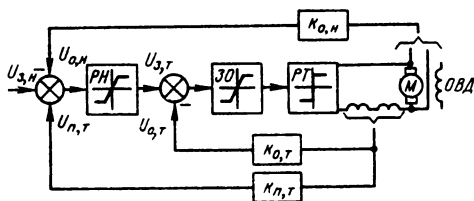


Рис. 52.15. Структурная схема экскаваторного электропривода постоянного тока:

$U_{3,н}$  – напряжение задания на входе регулятора напряжения;  $U_{0,н}$  – сигнал отрицательной обратной связи по напряжению;  $U_{п,т}$  и  $U_{0,т}$  – сигналы положительной и отрицательной обратных связей по току;  $U_{3,т}$  – напряжение задания на входе контура регулирования тока

чивает требуемые для экскаваторного ЭП статические и динамические характеристики. Основные особенности такой структуры следующие:

1) обеспечиваются требуемые «экскаваторные» механические характеристики ЭП. Действительно, наличие интегрального РТ и ограничение сигнала на входе контура тока, а также отрицательная связь по току якоря с коэффициентом  $k_{0,т}$  обеспечивают вертикальный участок механической характеристики при заданном моменте стопорения, а наличие отрицательной обратной связи по напряжению двигателя с коэффициентом  $k_{0,н}$  и положительной обратной связью по току якоря с коэффициентом  $k_{п,т} = k_{0,т}/k_{р,н}$  обеспечивает требуемую жесткость на рабочем участке механической характеристики;

2) требуемые для экскаваторных ЭП характеристики «удержания ковша» (см. характеристику 0 на рис. 52.8) в схеме рис. 52.15 формируются автоматически при  $U_{3,н} = 0$ ;

3) в схеме отсутствует тахогенератор, что улучшает эксплуатацию ЭП. Наличие контура регулирования напряжения (а не скорости) двигателя обеспечивает жесткость рабочих участков механических характеристик на уровне примерно естественной характеристики, что приемлемо для экскаваторов;

4) схема обеспечивает ограничение тока и момента двигателя в динамике на уровне, определяемом ограничением сигнала на выходе РН;

5) наличие звена ограничения ЭО обеспечивает ограничение темпа изменения ЭДС генератора, а вместе с тем ограничивает и ускорение двигателя;

6) при всех моментах сопротивления любой переходный процесс пуска или торможения имеет равномерный характер с ограниченными моментами и ускорениями, что требуется для экскаваторов.

В настоящее время для механизмов экскаваторов ведутся интенсивные работы по внедрению ЭП по системе ТП–Д и частотно-управляемых асинхронных ЭП.

Исследования показали, что перспективным вариантом системы ТП–Д является система источник тока – двигатель, в которой якорь двигателя питается от нереверсивного ТП, работающего в режиме регулируемого источника тока. В этой системе используется реверсивный полупроводниковый преобразователь для возбуждения двигателя. При воздействии на возбуждение двигателя обеспечивается управление знаком и значением момента и скорости ЭП.

В частотно-регулируемых экскаваторных ЭП наиболее перспективными являются два типа преобразователей частоты: с непосредственной связью и с промежуточным звеном постоянного тока при использовании инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией.

## 52.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД КОНВЕЙЕРОВ

### Общие сведения

Конвейер, транспортер – это машина непрерывного действия для перемещения сыпучих, кусковых или штучных грузов. По типу тягового органа различают конвейеры с ленточным, цепным, канатным и другими тяговыми органами и конвейеры без тягового органа (винтовые, инерционные, вибрационные, роликовые). По типу грузонесущего органа различают ленточные, пластинчатые, скребковые, подвесные грузонесущие, толкающие, тележечные, ковшовые и лопелечные, а также винтовые, инерционные, вибрационные, роликовые конвейеры.

Конвейеры находят применение во всех отраслях народного хозяйства для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, обеспечения непрерывности технологического процесса, выполнения ряда последовательных операций в поточном производстве. Наряду с обеспечением транспортно-технологических функций конвейеры являются основными средствами комплексной механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и складских операций. Современное производство невозможно без конвейеров, которые определяют темп производства, его ритмичность, способствуют повышению производительности труда и выпуска продукции.

Конвейеры с гибким тяговым элементом состоят из следующих частей: грузонесущего органа, который непосредственно несет на себе транспортируемый груз; тягового органа, пере-

дающего движение грузонесущему органу; ходовых опорных устройств (катков, роликов, кареток и т. п.), с помощью которых перемещаются грузонесущий и тяговый органы; натяжного устройства, обеспечивающего необходимое первоначальное натяжение тягового органа; приводного устройства, сообщающего движение тяговому органу; поддерживающей металлоконструкции конвейера, включающей и направляющие пути. У отдельных конвейеров тяговый и грузонесущий орган совмещены (например, лента в ленточных конвейерах).

Основными элементами приводных устройств являются приводной барабан, редуктор и электродвигатель. По числу барабанов различают одно-, двух- и трехбарабанные приводы. Электродвигатель с редуктором, муфтой, тормозом образует приводной блок, в состав которого могут входить также отклоняющие барабаны и приспособление для очистки барабанов и ленты.

Основным элементом натяжного устройства является натяжной барабан, перемещающийся на тележке или в направляющих неподвижной рамы. Натяжное устройство предпочтительно располагать в точке минимального натяжения тягового органа. Обычно его устанавливают на сбегающей с ЭП ветви тягового органа, а при ограниченной длине конвейера — в его хвостовой части.

Основным критерием выбора наиболее выгодного места для приводного устройства является достижение минимального значения наибольшего натяжения тягового органа из всех возможных вариантов установки ЭП. Уменьшение натяжения гибкого органа экономически выгодно, так как приводит к снижению капитальных затрат на конвейерную установку. Приводная станция конвейера может устанавливаться как в верхней, так и в нижней части конвейеров в зависимости от условий эксплуатации. Обычно установка ЭП предпочтительнее вверху. Для определения места установки приводного устройства в общем случае производят сравнение вариантов расчетов, однако в зависимости от конструкции конвейеров эти места в ряде случаев определены [52.13].

Конвейерная лента является основным элементом ленточного конвейера. Ее стоимость составляет 30–50% общей стоимости конвейера [52.13]. Поэтому правильный выбор ленты и типа привода существенно влияет на технико-экономические показатели конвейерного транспорта.

Технические характеристики конвейеров отличаются большим разнообразием по мощности приводных двигателей, скорости, массе перемещаемых грузов и т. п.

Основные параметры распространенных ленточных конвейеров общего применения следующие [52.13]:

Ширина ленты, мм . . . . .	400–3000
Скорость движения ленты, м/с . . . . .	0,4–6,3
Тип ленты . . . . .	Резино- тканевая, резино- тросовая
Диаметр барабана, мм . . . . .	160–2000
Диаметр опорных роликов, мм . . . . .	63–245
Мощность двигателей, кВт . . . . .	0,37–2100
<i>Характерные общие параметры подвесных конвейеров</i>	
[52.13]	
Скорость транспортирования, м/с . . . . .	0,01–0,70
Длина транспортирования, м . . . . .	5–500
Мощность двигателя, кВт . . . . .	1–18
Масса груза, кг . . . . .	1–8000
Длина груза наибольшая, м . . . . .	12

### Определение статических нагрузок

Статическая нагрузка конвейера определяется силами трения в элементах конвейера (подшипниках, опорных роликах, в тяговых элементах при его изгибах и т. д.), а также составляющими сил тяжести транспортируемого груза на наклонных участках трассы конвейера. Результирующая сила сопротивления (тяговая сила)  $F_c$  определяется путем последовательного обхода трассы конвейера при учете всех сил сопротивления на каждом его участке.

Мощность приводного двигателя конвейера

$$P = k_3 F_c v / \eta,$$

где  $F_c$  — тяговая сила конвейера;  $v$  — скорость тягового органа;  $\eta$  — КПД приводного механизма, учитывающий потери в барабане или звездочке и редукторе;  $k_3 = 1,1 \div 1,35$  — коэффициент запаса, определяемый типом конвейера [52.13].

Значение тяговой силы определяется с помощью тягового расчета конвейера.

### Тяговый расчет конвейера

Контур (трассу) конвейера разбивают на отдельные расчетные участки, в пределах каждого из которых сила сопротивления характеризуется какой-либо одной функцией. Все силы сопротивлений, имеющиеся в конвейере, разделяют на сопротивления, не зависящие от натяжения гибкого органа (сопротивление группы роликовых опор, сопротивление от веса ленты и груза), и на сопротивления, зависящие от натяжения тягового органа (в опорах барабанов и звездочек, на криволинейных участках).



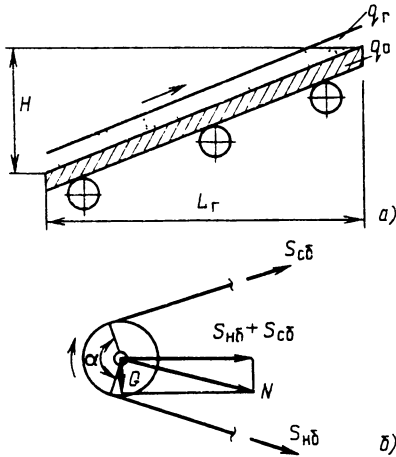


Рис. 52.16. К определению сил сопротивления конвейера:  
а – на прямолинейных участках; б – на участках изгиба тягового органа

Силы сопротивления на прямолинейном участке трассы конвейера (рис. 52.16)

$$\Delta F_{\text{п}} = \Delta F_{\text{р}} + \Delta F_{\text{Г}},$$

где  $\Delta F_{\text{р}} = (q_{\text{Г}} + q_{\text{о}}) w L_{\text{Г}}$  – сила сопротивления роликовых опор, определяемая расчетной линейной нагрузкой от транспортируемого груза  $q_{\text{Г}}$  и тягового органа  $q_{\text{о}}$ ;  $L_{\text{Г}}$  – горизонтальная проекция рассматриваемого прямолинейного участка;  $w$  – коэффициент сопротивления на данном участке конвейера.

Для катков с цилиндрическими или сферическими ободами

$$w = \frac{\mu \frac{d_{\text{н}}}{2} + f}{D_{\text{к}}/2} k_{\text{р}},$$

т. е. коэффициент сопротивления определяется так же, как и для механизма передвижения с приводными колесами (см. § 52.2);

$$\Delta F_{\text{Г}} = \pm (q_{\text{Г}} + q_{\text{о}}) H$$

– сопротивление силы тяжести груза и тягового органа для высоты  $H$  данного участка конвейера.

Знак «+» берется в случае, если на данном участке конвейер работает на подъем, и знак «-» – в противном случае.

На криволинейных участках сила сопротивления движению определяется двумя составляющими: сила от изгиба тягового органа и сила трения в подшипниках блоков или роликов, определяемая равнодействующей силой  $N$  (рис. 52.16, б). Сопротивления сбегающей ветви

$S_{\text{сб}}$  для таких участков зависят от натяжения тягового органа и определяются в виде произведения натяжения набегающей ветви  $S_{\text{нб}}$  на коэффициент изгиба тягового органа  $k_{\text{и}} > 1$ , т. е.

$$S_{\text{сб}} = S_{\text{нб}} k_{\text{и}}.$$

Согласно [52.15] при приближенных расчетах в зависимости от диаметра барабана и звездочки и условий работы при углах охвата тяговым органом 90 и 180° можно принять  $k_{\text{и}} = 1,02 \div 1,03$  и  $k_{\text{и}} = 1,03 \div 1,07$  соответственно.

Силы сопротивления для различных участков трассы конвейеров самых разнообразных видов можно определить по методикам, изложенным в специальной литературе по конвейерным установкам [52.13–52.16].

Для определения тяговой силы и натяжения тягового органа в различных точках конвейера используют метод последовательного обхода по контуру (т. е. обхода по точкам сопряжений прямолинейных и криволинейных участков конвейера). Пронумеровав точки сопряжений, начиная от точки сбегающей ветви тягового органа с приводного барабана или звездочки, находят последовательно натяжения во всех этих точках и по разности натяжений на набегающей и сбегающей ветвях определяют тяговую силу.

В случае ленточного конвейера при указанном тяговом расчете получается связь между  $S_{\text{нб}}$  и  $S_{\text{сб}}$  в виде двучлена [52.1]

$$S_{\text{нб}} = X S_{\text{сб}} + Y.$$

Кроме того,  $S_{\text{нб}}$  и  $S_{\text{сб}}$  связаны формулой Эйлера, выражающей условие отсутствия скольжения ленты по барабану:

$$S_{\text{нб}} = S_{\text{сб}} e^{\alpha \mu},$$

где  $\alpha$  – угол охвата приводного барабана лентой;  $\mu$  – коэффициент трения между тяговым органом и барабаном.

Решая совместно два последних уравнения, находим

$$S_{\text{нб}} = \frac{Y e^{\alpha \mu}}{e^{\alpha \mu} - X}; \quad S_{\text{сб}} = \frac{Y}{e^{\alpha \mu} - X},$$

после чего можно рассчитать натяжение тягового органа в любой точке конвейера, его тяговую силу  $F_{\text{с}} = S_{\text{нб}} - S_{\text{сб}}$  и мощность приводного электродвигателя.

В случае цепного конвейера задают минимальное натяжение цепи (300–500 Н и более в зависимости от типа конвейера) и далее, проводя тяговый расчет, находят  $S_{\text{нб}}$ ,  $S_{\text{сб}}$ , тяговую силу  $F_{\text{с}} = S_{\text{нб}} - S_{\text{сб}}$  и мощность приводного электродвигателя. На рис. 52.17 приведены пример схемы трассы конвейера и гра-

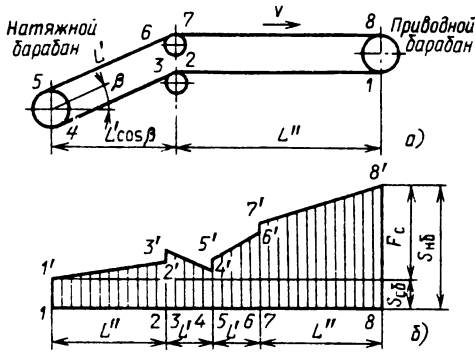


Рис. 52.17. Схема трассы (а) и график натяжения тягового органа (б) конвейера

фик натяжения его тягового органа. Конвейер предназначен для транспортировки груза от точки 5 к точке 8. Приводной барабан расположен в головной, а натяжной – в хвостовой части конвейера. Прямолинейные участки конвейеров соединены отклоняющими барабанами (или звездочками). Вся трасса конвейера отмечена точками 1, 2, ..., 8, которые отделяют прямолинейные участки трассы от криволинейных.

**Многодвигательный электропривод конвейеров**

Для привода конвейеров значительное распространение получили два типа многодвигательного ЭП.

Первый тип, применяемый как для ленточных, так и для цепных конвейеров, содержит две или более приводных станций, расположенных в промежуточных точках трассы. Применение нескольких ЭП позволяет снизить максимальное натяжение тягового органа. При определении рационального места установки приводов по трассе конвейера исходят из стремления в наибольшей степени снизить натяжение тягового органа и использовать одинаковые электродвигатели. Практически при установке *n* приводов снижается максимальное натяжение тягового органа несколько больше, чем в *n* раз [52.15]. Многодвигательные конвейеры рассматриваемого типа применяются в случае ленточных конвейеров при длине трассы 5–20 км по горизонтали и 1–2 км по наклону, а в случае цепных конвейеров – при длине трассы от 500 м до нескольких километров [52.13].

Второй тип многодвигательного ЭП характерен для ленточных конвейеров, где могут использоваться двухбарабанные и трехбарабанные ЭП. В тех случаях, когда нежелательно

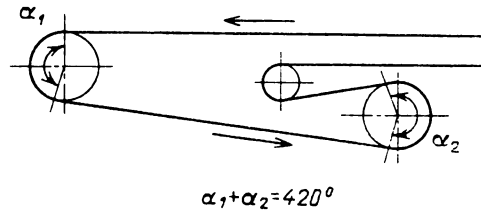


Рис. 52.18. Пример схемы двухбарабанного привода конвейера

увеличение натяжения ленты, но требуется повысить тяговое усилие конвейера, используют двухбарабанный ЭП, в котором обеспечивается повышенный угол  $\alpha$  охвата лентой барабана (рис. 52.18). Увеличение этого угла повышает тяговое усилие конвейера согласно выражению [52.13]

$$F_c = S_{сб} [e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2)} - 1].$$

**Влияние динамических нагрузок**

Электроприводы конвейеров имеют продолжительный режим работы, для которого характерны длительный период движения ходовой части с постоянной скоростью и кратковременные переходные режимы пуска и торможения. Несмотря на относительно малое время переходных процессов их анализ является важной задачей, так как конвейер представляет собой систему масс, соединенных упругими связями (цепью или лентой). При переходных процессах в ЭП эти упругие связи деформируются и в тяговых элементах конвейера появляются значительные динамические нагрузки, которые в ряде случаев имеют колебательный характер.

Основным средством ограничения динамических нагрузок является снижение пускового динамического усилия путем увеличения времени пуска. Для конвейеров рекомендуется ограничивать ускорение движения ходовой части на уровне  $a_{доп} = 0,1 \div 0,2 \text{ м/с}^2$  [52.13].

Следует отметить, что конвейеры принадлежат к инерционным механизмам, в которых момент инерции двигателя составляет лишь  $(0,03 \div 0,1) J_k$ , где  $J_k$  – суммарный момент инерции конвейера.

Для цепных конвейеров характерна неравномерность движения, вызываемая периодическими изменениями мгновенного радиуса навивки цепи на ведущую звездочку. Неравномерность движения тяговых цепей вызывает возникновение в них динамических усилий, которые снижаются с уменьшением шага цепей. Динамические усилия в существующих цепных

конвейерах редко превышают 20–25 % статического натяжения цепи. При числе зубьев приводной звездочки  $z = 13 \div 20$  и скорости движения  $v \leq 0,3$  м/с эти нагрузки сравнительно незначительны и учитываются соответствующим коэффициентом при выборе запаса прочности цепи [52.13].

Для ленточных конвейеров динамические нагрузки имеют характерные особенности и проявляются более значительно, чем в цепных конвейерах. При переходных процессах в ленточных конвейерах важно учитывать следующее:

возрастают наибольшие усилия в ленте. Однако [52.14] динамические нагрузки в ленте не настолько велики, чтобы их дополнительно учитывать при прочностном расчете ленты, тем более что они, как правило, учитываются в суммарном коэффициенте запаса прочности;

из-за действия динамических нагрузок происходит изменение натяжения ленты, что может привести к ее пробуксовке. Пробуксовка нежелательна, так как вызывает интенсивный износ нижней обкладки ленты [52.14], резкое уменьшение сцепления ленты с барабаном, что затрудняет дальнейший разгон и нормальную работу конвейера. Поэтому основной задачей динамических режимов является установление условий беспробуксовочного пуска и торможения.

Расчет динамики ленточного конвейера представляет значительные трудности, поскольку механическая часть конвейера является сложной системой с распределенными по его длине параметрами. При этом продольная жесткость ленты определяется не только ее упругими деформациями, но также формой и величиной провиса между роликоопорами и нелинейно зависит от натяжения ленты. Кроме того, лента обладает значительным внутренним трением [52.14].

Анализ вопросов динамики пуска приобретает особое значение при увеличении производительности (до 20 000 т/ч) и длины (до 11–13 км) конвейеров, и необходимости ограничения коэффициента динамичности ленты в процессе пуска до 1,4–1,6. Согласно [52.16] такой коэффициент динамичности может быть достигнут, если окружное усилие приводного барабана  $F_{пр}$  при пуске формировать из двух участков: на первом участке ( $0 \leq t \leq t_{тр}$ ) значение  $F_{пр}$  изменяется по линейному закону, а на втором участке ( $t_{тр} \leq t < t_n$ )  $F_{пр}$  поддерживается постоянным и равным максимальному значению  $F_{max} = F_c + m_{\Sigma k} a_{доп}$ , где  $m_{\Sigma k}$  – приведенная к окружности барабана суммарная масса механизма конвейера. Время трогания  $t_{тр}$  представляет собой время распро-

странения фронта волны упругих деформаций от левого сечения тягового органа до конечного правого и обратно.

Значительные динамические усилия возникают не только при пуске, но и при торможении конвейера. В тормозных режимах также необходимо ограничивать динамические усилия, чтобы исключить пробуксовку ленты относительно барабана. С этой целью применяют плавное нарастание тормозного момента путем включения нескольких тормозных устройств с некоторым интервалом и использования электрического торможения приводного двигателя.

### Требования к электроприводам

Требования к ЭП конвейеров обусловлены необходимостью получения его трех основных режимов (пуска, установившегося движения, торможения) и ряда вспомогательных и наладочных режимов, а также обеспечения надежной и бесперебойной работы конвейерных установок. Основные требования, предъявляемые к ЭП конвейеров, следующие:

1. Обеспечение плавного пуска двигателей с ограниченными значениями моментов и уско-

ренных безударного выбора зазоров в зубчатых передачах в начальный период трогания;

ограничения динамических усилий тягового органа;

получения надежного сцепления ленты с барабанами в ленточных конвейерах;

ограничения раскачивания грузонесущих органов (люлек, кабин) в подвесных конвейерах;

создания требуемых комфортных условий в конвейерах, предназначенных для перевозки людей (эскалаторы, канатные дороги).

2. Обеспечение больших моментов при трогании конвейера в начале его пуска, поскольку сопротивления трения в покое примерно в 1,5 раза превышают сопротивления трения при движении [52.13], а также из-за возможного наличия грязи в ходовых частях механизмов, застывания смазки при морозах и т. п.

3. Обеспечение установившегося режима с заданной скоростью движения рабочего органа. Период установившегося движения занимает основное время в конвейерных установках, поэтому их ЭП характеризуется продолжительным режимом работы. Чаще всего в установившихся режимах конвейеры работают с одной скоростью, однако в ряде случаев требуется регулирование скорости, в частности в приводах конвейеров с относительно высокой

скоростью движения ленты, которые должны обеспечивать дополнительную небольшую скорость для проведения осмотра ленты при ее ревизии, ремонтных работах (при этом конвейер переводится в режим местного управления) и т. д. Кроме того, в случаях изменения грузопотока конвейеров лента значительное время может работать с недогрузкой. При этом рационально уменьшить скорость конвейера, чтобы лента работала с полной нагрузкой. Тогда увеличивается срок службы ленты, которая соответственно меньшее число раз оборачивается. В этих случаях в зависимости от количества поступающего на конвейер груза целесообразно обеспечить автоматическое регулирование скорости ленты с плавным переходом от одного уровня скорости к другому.

4. Необходимость равномерного распределения нагрузки между двигателями в многодвигательных ЭП конвейеров из-за различия в жесткости характеристик отдельных двигателей. Эксперименты показали, что для асинхронных ЭП с номинальным скольжением двигателей 4–6% отклонение в нагрузках разных двигателей достигает 15–30%. Для выравнивания нагрузок используют следующие способы:

применяют АД с повышенным скольжением;

в случае применения короткозамкнутых АД нормального исполнения дополнительно используют гидромфты или электромагнитные муфты скольжения;

в случае применения АД с фазным ротором жесткости механических характеристик отдельных двигателей выравнивают путем включения резисторов в их роторные цепи.

5. Использование двух режимов: дистанционного и местного управления.

При дистанционном автоматизированном управлении пуск производится кратковременным нажатием пусковой кнопки и во избежание завалов ленты осуществляется в определенной последовательности, а именно: против направления потока груза. Плановая остановка конвейерной линии производится в обратном порядке, т. е. последовательно по направлению потока.

Для монтажа, наладки и текущего профилактического ремонта обеспечивают перевод всех механизмов конвейера на местное управление.

В режиме местного управления предусматривается управление с пульта, расположенного вблизи каждой приводной станции. В этом режиме привод должен обеспечивать реверсирование и пониженную скорость конвейера.

6. Согласование движения конвейеров для сборочных операций с целью выполнения строго согласованных технологических операций с грузами, перемещающимися по разным конвейерным линиям. Мощности двигателей таких конвейеров относительно небольшие, однако используются достаточно сложные позиционные ЭП (асинхронные ЭП по схеме электрического вала, следящие ЭП постоянного тока с тиристорными преобразователями).

### Системы электроприводов

Системы ЭП, применяемые для конвейеров, указаны в табл. 52.3. В ленточных конвейерах длиной до 300 м и мощностью до 100 кВт, как правило, используются ЭП с асинхронным короткозамкнутым двигателем. Достоинство таких ЭП – простота и относительно низкая стоимость, недостатки – повышенный пусковой момент и, следовательно, возможность появления больших натяжений и пробуксовки ленты.

В ЭП конвейеров значительное распространение получили асинхронные ЭП с муфтами скольжения (гидромфты, электромагнитные муфты). Такие ЭП обеспечивают равномерное распределение нагрузки между двигателями в многодвигательном ЭП и плавный пуск конвейера. В зарубежной практике находят применение двухдвигательный ЭП, в котором кроме главного двигателя устанавливается и вспомогательный меньшей мощности, который обеспечивает плавный разгон конвейерной ленты с уменьшенным ускорением. С помощью таких мероприятий область применения ЭП с короткозамкнутым АД расширяется до 200 кВт [52.14].

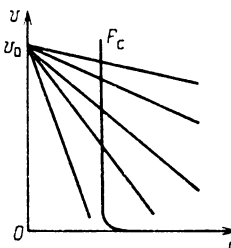
Для более мощных ЭП ленточных конвейеров наибольшее распространение получили АД с фазным ротором. При включении резисторов в роторные цепи АД обеспечивается плавный пуск конвейера, а в случае многодвигательного ЭП – равномерное распределение нагрузки между двигателями. В качестве роторных резисторов используют металлические реостаты с большим количеством пусковых ступеней (до 20–25), а также жидкостные реостаты с ручным или автоматическим управлением при помощи исполнительного ЭП. Такие ЭП широко используют при мощности 200–900 кВт в одном блоке. Суммарная мощность этих ЭП достигает несколько тысяч киловатт.

В приводе конвейеров получают распространение асинхронные ЭП с индукционными резисторами в цепи ротора АД [52.14]. Активное сопротивление таких резисторов определяется частотой протекающего через

Таблица 52.3. Системы ЭП конвейеров

Тип	Механические характеристики	Примечание
С короткозамкнутым АД		Нерегулируемый ЭП, $P_{ном} < 100$ кВт
С короткозамкнутым АД и муфтами скольжения (электромагнитными, гидравлическими)		Плавный пуск. $P_{ном} < 200$ кВт
С фазным АД и управлением с помощью металлических и жидкостных реостатов		Плавный пуск, $P_{ном} < 2000 \div 3000$ кВт Дополнительный микропривод для пониженной скорости ленты
Частотно-управляемый асинхронный, асинхронный вентильный каскад; ТП – Д постоянного тока		Перспективные ЭП. Плавный пуск, регулирование скорости

Продолжение табл. 52.3

Тип	Механические характеристики	Примечание
С линейным АД		Перспективные ЭП. Упрощенные механические передаточные устройства

них тока. Такие ЭП при простой схеме обеспечивают примерно постоянный момент АД при пуске и ограничивают ускорение конвейеров.

В последнее время установлено, что для конвейеров во многих случаях следует использовать регулируемые ЭП, в качестве которых перспективными являются системы асинхронного ЭП с частотным управлением, асинхронные вентильные каскады, ЭП постоянного тока с ТП. Для конвейерных установок также перспективным является применение линейных АД. Они позволяют ликвидировать сложные и металлоемкие редукторные механические передачи и создать бесконтактные и безредукторные ЭП [52.14].

## 52.7. ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСОВ, ВЕНТИЛЯТОРОВ, КОМПРЕССОРОВ

### Общие сведения

В современной технике используется большой класс машин для подачи жидкостей и газов, которые подразделяют на насосы (Н), вентиляторы (В), компрессоры (К) и нагнетатели. Насосы предназначены для перемещения жидкостей и сообщения им энергии; вентиляторы — это машины, перемещающие газовые среды при степени повышения давления до 1,15 (степенью повышения давления называется отношение давления газа на выходе из машины к давлению на ее входе). Нагнетатели (машины с естественным охлаждением) и компрессоры (машины с искусственным охлаждением) используются при степени повышения давления газовых сред более 1,15.

Наличие вращающегося рабочего колеса с лопастями является отличительным признаком лопастных машин (в технической литературе такие машины часто называют турбомеха-

низмами). Схемы лопастных машин приведены на рис. 52.19. Поток жидкости или газа, проходя через рабочее колесо 1 с лопастями 2 машин центробежного (ЦМ) типа, изменяет свое направление под углом  $90^\circ$ , в осевых машинах (ОМ) он перемещается вдоль оси рабочего колеса 3 с лопастями 4, а в вихревых (ВМ) — по периферии рабочего колеса 5 с лопастями 6.

Работа объемных машин (рис. 52.20) основана на всасывании и вытеснении жидкости или газа твердыми телами, движущимися в рабочих полостях. В машинах поршневого типа (ПМ) изменение объема рабочей полости (цилиндра 1) осуществляется за счет возвратно-поступательного движения поршня 2. В роторных машинах (РМ) внутри рабочей полости (корпуса 3) вращается эксцентрично расположенный ротор 4 с пластинами 5, которые под действием центробежных сил прижимаются к внутренней поверхности корпуса.

Наибольшее распространение в практике имеют ЦМ, ОМ и ПМ. При этом ОМ предпочтительны там, где требуется обеспечить высокую подачу при низком напоре. ВМ позволяют обеспечить наиболее высокий

Таблица 52.4. Ориентировочные значения основных параметров компрессоров и вентиляторов

Рабочая машина	Тип	Подача, м <sup>3</sup> /мин	Степень повышения давления
Компрессоры	Поршневые	≤ 500	2,5 — 1000
	Роторные	≤ 500	3 — 12
	Центробежные	100 — 4000	3 — 20
	Осевые	100 — 15 000	2 — 20
Вентиляторы	Центробежные	≤ 6000	1 — 1,15
	Осевые	50 — 10 000	1 — 1,04

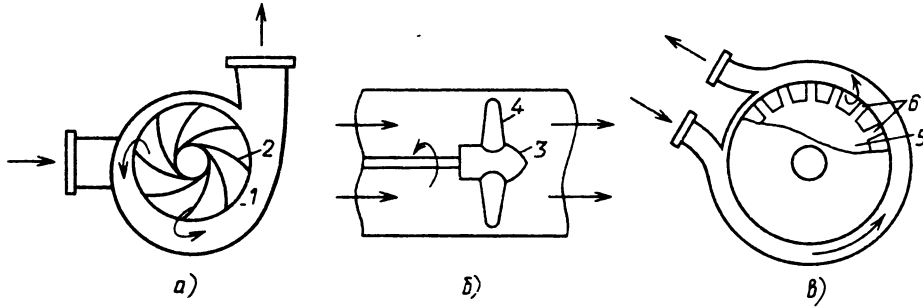


Рис. 52.19. Схемы лопастных машин:  
а – центробежного типа; б – осевого типа; в – вихревого типа

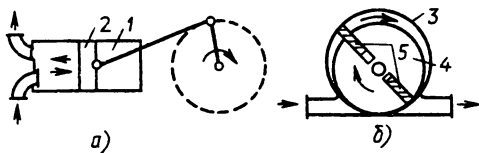


Рис. 52.20. Схемы объемных машин:  
а – поршневого типа (одностороннего действия);  
б – роторного типа (с двумя пластинами)

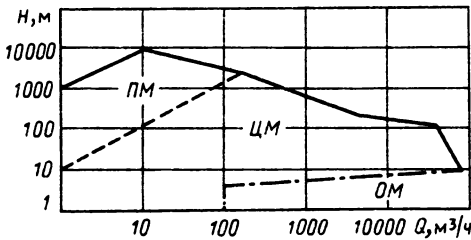


Рис. 52.21. График подачи и напоров водяных насосов различных типов

напор среди турбомеханизмов, однако они не нашли широкого распространения, так как характеризуются более низким КПД по сравнению с объемными машинами, обеспечивающими практически такие же значения напора и подачи, что и ВМ. Среди машин объемного типа наибольшее распространение имеют поршневые Н и К, которые используются в основном в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокий напор при небольших значениях подачи.

На рис. 52.21 показаны области применения водяных Н различных типов в зависимости от развиваемых ими значений напора  $H$  и подачи  $Q$  [52.19]. Ориентировочные значения основных параметров  $K$  и  $V$  приведены в табл. 52.4.

### Характеристики машин для подачи жидкостей и газов

Основными параметрами, характеризующими работу машин для подачи жидкостей и газов, являются создаваемые ими подача, давление и напор, а также энергия, сообщаемая потоку их рабочими органами.

Подача – это количество жидкости или газа, перемещаемых машиной в единицу времени. При измерении подачи в единицах объема ее называют объемной и обозначают обычно  $Q$ . Используется также понятие массовой подачи  $M_\gamma$  – количества массы жидкости или газа, подаваемых машиной в единицу времени:

$$M_\gamma = \gamma Q,$$

где  $\gamma$  – плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $Q$  – объемная подача,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Подачу можно определять на входе либо на выходе машины. Массовые подачи на входе и выходе машины любого типа одинаковы. Объемные же одинаковы только в Н – машинах, подающих практически несжимаемую среду, и приблизительно одинаковы в В. В К объемная подача на выходе меньше, чем на входе, вследствие существенного изменения удельного объема при повышении давления газа. В расчетах принято исчислять объемную подачу  $K$  на их входе.

Давление насоса определяется зависимо

$$p = p_k - p_n + \gamma \frac{c_k^2 - c_n^2}{2} + \gamma g(z_k - z_n),$$

где  $p_k$  и  $p_n$  – соответственно давление на выходе (конечное) и на входе (начальное), Па;  $c_k$  и  $c_n$  – скорости потока жидкости на выходе и входе, м/с;  $z_k$  и  $z_n$  – высоты расположения центров тяжести выходного и входного сечений, м;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Полный напор, развиваемый  $H$ , м,

$$H = p/(\gamma g).$$

Напор, создаваемый  $V$ , выражают иногда в миллиметрах водяного столба:  $h = p/g$ , мм вод. ст.

В  $K$  давление измеряют по степени его повышения  $\epsilon = p_k/p_n$ .

Важным параметром, характеризующим работу машин рассматриваемого типа с энергетической стороны, является удельная полезная работа. Для  $H$  и  $V$  она определяется зависимостью  $L_n = p/\gamma$ , Дж/кг. Удельная работа  $K$  вычисляется более сложно с учетом вида термодинамического процесса [52.19].

Полезную мощность  $P_n$ , Вт, передаваемую машиной потоку жидкости или газа, можно определить различным образом:

$$P_n = M_\gamma L_n = Qp = M_\gamma g H = \gamma g H Q.$$

Мощность  $P$ , кВт, на валу  $H$ ,  $V$ ,  $K$

$$P = \frac{P_n}{1000\eta},$$

где  $\eta$  – КПД машины.

Значения КПД  $H$ ,  $V$ ,  $K$ , приведенные в [52.19], указаны ниже. Часто для увеличения производительности эти машины изготавливают в виде блока, содержащего несколько последовательно соединенных ступеней. КПД таких многоступенчатых машин может быть определен по данным, приведенным ниже, как произведение КПД отдельных ступеней.

**Коэффициенты полезного действия насосов, вентиляторов, компрессоров**

Центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры большой мощности . . . . .	0,75–0,92
Центробежные насосы малой и средней мощности . . . . .	0,6–0,75
Осевые насосы и вентиляторы . . . . .	0,7–0,9
Осевые компрессоры . . . . .	0,8–0,9
Вихревые насосы . . . . .	0,3–0,5
Поршневые насосы . . . . .	0,65–0,85
Поршневые компрессоры . . . . .	0,5–0,8
Роторные насосы . . . . .	0,6–0,9
Роторные компрессоры . . . . .	0,5–0,7

Характеристиками машин для подачи жидкостей и газов называют графически изображенные зависимости, отражающие характер изменения напора  $H$  (давления  $p$ ), подачи  $Q$ , мощности  $P$  и КПД  $\eta$  машины при изменении ее режима работы.

Для лопастных  $H$  и  $V$  характеристики изображают в виде зависимостей напора, мощности и КПД от подачи (рис. 52.22). В объемных машинах подача почти не зависит от напора. Поэтому в качестве аргумента здесь иногда используют давление или напор (рис. 52.23). Для  $K$  характеристики имеют

Рис. 52.22. Характеристики центробежной машины

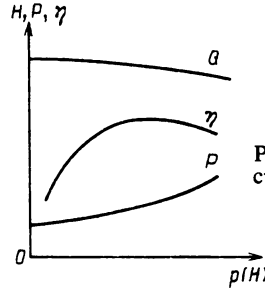
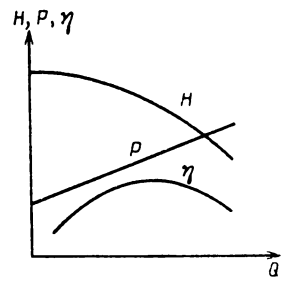


Рис. 52.23. Характеристики объемной машины

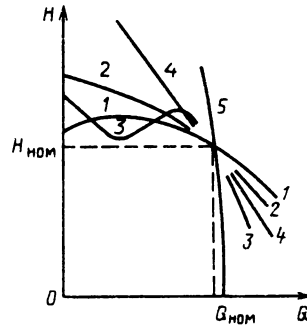


Рис. 52.24. Напорные характеристики машин для подачи жидкостей и газов: 1 – центробежной тихоходной; 2 – центробежной быстроходной; 3 – осевой; 4 – вихревой; 5 – объемной (поршневой и роторной)

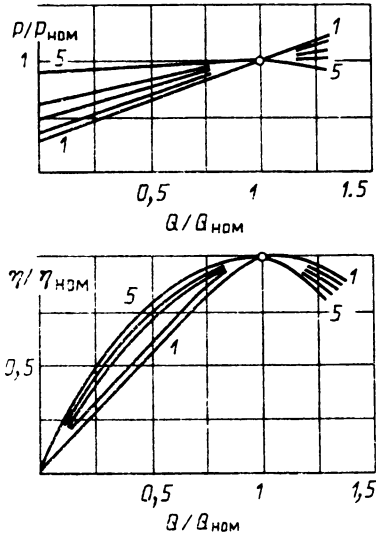
такой же вид, как на рис. 52.22 и 52.23, с тем отличием, что вместо напора указывается степень повышения давления  $\epsilon$ , а подача измеряется в единицах массы.

Основные типы напорных характеристик  $H = f(Q)$   $H$ ,  $V$ ,  $K$  показаны на рис. 52.24.

Вид характеристик ЦМ зависит от коэффициента быстроходности  $n_s$ , [52.18], который определяется по номинальным данным машины. Для центробежных  $H$  коэффициент быстроходности находится по выражению

$$n_s = \frac{3,65 n_{ном} \sqrt{Q_{ном}}}{H_{ном}^{3/4}}$$





Входящие в это выражение номинальные величины соответствуют режиму работы  $H$  с максимальным КПД. Для многоступенчатых машин  $n_s$  подсчитывают, исходя из напора на одну ступень. На рис. 52.25 показаны характеристики центробежных  $H$  с двусторонним входом при различных значениях  $n_s$  [52.18]. Для  $H$  с односторонним входом характеристики имеют такой же вид, как на рис. 52.25, при условии, что  $n_s$  рассчитывается при двойном значении подачи  $Q_{ном}$ .

Пользуясь законами подобия, можно по известным характеристикам для номинальной скорости построить характеристики для скоростей, отличных от номинальной.

Законы подобия лопастных машин при изменении их угловой скорости  $\omega$  выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} Q_1/Q_2 &= \omega_1/\omega_2; \\ H_1/H_2 &= (\omega_1/\omega_2)^2; \\ P_1/P_2 &= (\omega_1/\omega_2)^3. \end{aligned}$$

В объемных машинах напор не зависит от скорости. Поэтому для них законы подобия имеют вид

$$\begin{aligned} Q_1/Q_2 &= \omega_1/\omega_2; \\ P_1/P_2 &= \omega_1/\omega_2. \end{aligned}$$

Приведенные соотношения основаны на допущении, что при изменении скорости КПД для подобных точек характеристик остается постоянным. В действительности со снижением скорости КПД машин уменьшается, поэтому законы подобия для мощности справедливы в ограниченном диапазоне изменения подачи и напора.

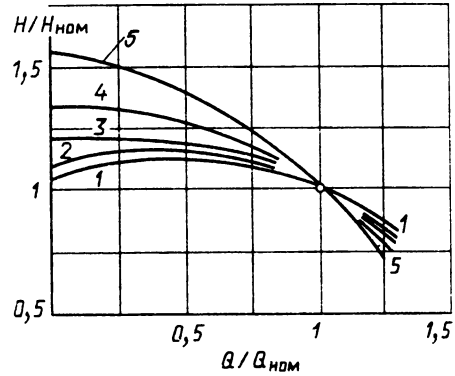


Рис. 52.25. Характеристики центробежных насосов при различных значениях коэффициента быстроходности  $n_s$ :

1 – 64; 2 – 106; 3 – 155; 4 – 212; 5 – 282

На рис. 52.26 показаны характеристики для ЦМ, построенные для скоростей, равных 0,8 и 0,6  $\omega_{ном}$ . Точки, получающиеся в результате пересчета по законам подобия, лежат на квадратичных параболах  $H = aQ^2$  для напорных характеристик и на кубических параболах  $P = bQ^3$  для характеристик мощности, где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты. Предполагается, что все точки характеристик, расположенные на одной параболе, имеют одинаковые значения КПД, соответствующие номинальной скорости машины.

В соответствии с законами подобия характеристики объемных машин получают путем пересчета значений подачи и мощности пропорционально первой степени скорости.

Совместная работа  $H$ ,  $B$ ,  $K$  и магистрали в установившемся режиме работы этих машин определяется точкой пересечения ее напорной характеристики и характеристики магистрали, подключенной к машине. Характеристика магистрали описывается выражением

$$H_{маг} = H_{ст} + k_{маг}Q^2,$$

где  $H_{маг}$  – полный напор в магистрали;  $H_{ст}$  – статическая составляющая напора;  $k_{маг}$  – коэффициент гидро- или аэродинамического сопротивления магистрали.

Напор  $H_{ст}$  имеет положительный знак, если направлен навстречу напору, создаваемому машиной, и отрицательный знак в противоположном случае. Значение  $H_{ст}$  определяется: для  $H$  – напором на его входе и геодезической разностью уровней потребителя и  $H$ ; для  $B$  – естественной тягой; для нагнетателей и  $K$  – давлением сжатого газа в магистрали (резервуаре).

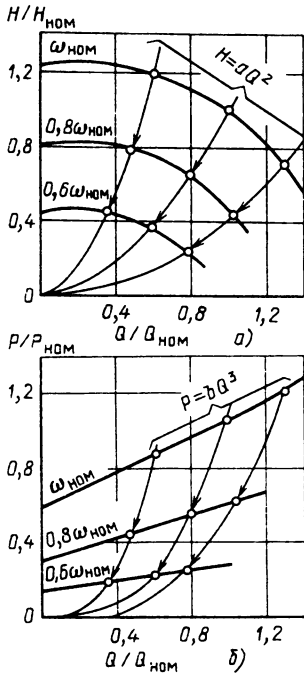


Рис. 52.26. Построение характеристик центробежных машин для различных значений скорости:  
 а – напорных; б – мощностей

Регулирование производительности  $H$ ,  $V$ ,  $K$  осуществляется двумя способами: воздействием на характеристику магистрали или характеристики машин. Наиболее распространенный первый способ – дросселирование с помощью заслонки на выходе машины – приводит к изменению коэффициента сопротивления магистрали.

Изменение характеристики машины производится плавным либо ступенчатым регулированием ее скорости. При совместной работе нескольких машин регулирование их режимов может осуществляться за счет изменения количества работающих машин, одновременного регулирования скорости всех машин, комбинации количества работающих машин и регулирования скорости одной (или нескольких) машин.

Требуемый диапазон регулирования скорости определяется минимальными значениями подачи или напора:

$$D = \omega_{max}/\omega_{min} = Q_{max}/Q_{min} = \sqrt{H_{max}/H_{min}}$$

Значения  $Q_{max}$  и  $H_{max}$  для лопастных машин, работающих на магистраль без статической

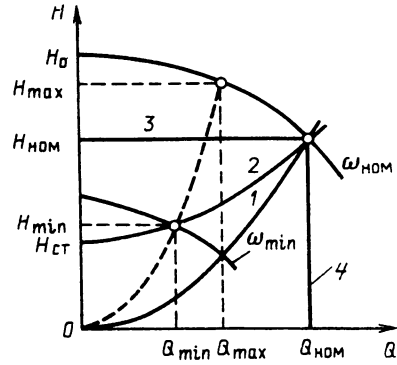


Рис. 52.27. Режимы работы лопастных машин на магистраль:  
 1 –  $H_{ст} = 0$ ; 2 –  $H_{ст} > 0$ ; 3 –  $H = H_{ном} = const$ ; 4 –  $Q = Q_{ном} = const$

составляющей напора, определяются пересечением характеристик магистрали и машины при максимальной скорости (если регулирование производится вниз от номинальной скорости, то  $\omega_{max} = \omega_{ном}$ ). При наличии  $H_{ст}$  значения  $Q_{max}$  и  $H_{max}$  определяются пересечением напорной характеристики машины при максимальной скорости и квадратичной параболы, проходящей через точку с координатами  $Q_{min}$  и  $H_{min}$  (рис. 52.27).

Для объемных машин напор (давление) не зависит от скорости, поэтому требуемый диапазон ее регулирования определяется по максимальному и минимальному значениям подачи.

### Механические характеристики

Особенностью механических характеристик лопастных машин является функциональная зависимость момента от скорости. Вид зависимости  $\omega(M)$  определяется режимом работы машины на магистраль и их характеристиками.

Машины для подачи жидкостей и газов могут работать на магистраль с постоянными или переменными параметрами. В практике очень часто  $V$  и особенно  $H$  работают на магистраль с переменными параметрами, например параметры магистрали  $H$ , работающих в системах водоснабжения, зависят от режимов водопотребления. В этих случаях однозначно определить механическую характеристику нельзя, а можно вести речь лишь о некотором поле режимов (в координатах  $Q$ ,  $H$  или  $M$ ,  $\omega$ ), в котором может работать машина.

Механическая характеристика определяется однозначно при работе машины на ма-

гистраль с постоянными параметрами и в системах автоматического регулирования выходных параметров машины, например стабилизации напора или подачи. Аналитическое выражение для расчета момента на валу лопастных машин любого типа имеет сравнительно простой вид лишь при  $H_{ст} = 0$  (характеристика 1 на рис. 52.27):

$$M = M_{тр} + (M_{ном} - M_{тр}) \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2,$$

где  $M_{тр}$  — момент трения, который обычно не превышает 5–10% номинального момента  $M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном}$ .

Для расчета момента ЦМ с монотонно падающими напорными характеристиками (типа кривой 2 на рис. 52.24) пригодно выражение, которое не учитывает момент трения

$$M = [M_0 + (M_{ном} - M_0)c] \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2,$$

где  $M_0 = P_0/\omega_{ном}$  — момент ЦМ при закрытой задвижке, который определяется по каталожной характеристике потребляемой мощности  $P = f(Q)$  при  $Q = 0$ . Значения  $c$  в зависимости от режима работы ЦМ приведены ниже

$$\text{при } H_{ст} = 0 \quad c = 1;$$

$$\text{при } H_{ст} > 0 \quad c = \sqrt{\frac{H_0 - H_{ст}(\omega_{ном}/\omega)^2}{H_0 - H_{ст}}};$$

$$\text{при } H = H_{ном} = \text{const} \quad c = \sqrt{\frac{H_0 - H_{ном}(\omega_{ном}/\omega)^2}{H_0 - H_{ном}}};$$

$$\text{при } Q = Q_{ном} = \text{const} \quad c = \omega_{ном}/\omega,$$

где  $H_0$  — напор, создаваемый машиной при  $\omega = \omega_{ном}$  и  $Q = 0$ .

В общем случае аналитический расчет момента лопастных машин представляет большие трудности, поэтому на практике находит применение графоаналитический метод с использованием законов подобия и характеристик машин  $H = f(Q)$  и  $\eta = f(Q)$ , которые приводятся в каталогах для номинальной скорости машины.

Механические характеристики ЦМ при различных условиях работы показаны на рис. 52.28. Характеристика 7 при работе машины с закрытой задвижкой имеет вид квадратичной параболы с моментом  $M_0$  при скорости  $\omega_{ном}$ . Вышеприведенные способы расчета механических характеристик не учитывают изменения КПД машины при изменении ее скорости, поэтому они применимы в небольшом диапазоне ее изменения, ограниченном снизу минимальными значениями подачи  $Q_{min} = (0,35 \div 0,4) Q_{ном}$  и напора  $H_{min} = (0,25 \div 0,3) H_{ном}$ .

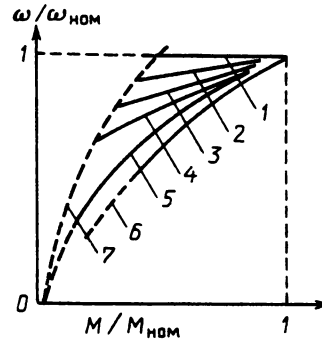


Рис. 52.28. Механические характеристики центробежных машин:

1 —  $\omega = \text{const}$ ; 2 —  $H = \text{const}$ ; 3 —  $H_{ст} \approx 0,8H_{ном}$ ; 4 —  $H_{ст} \approx 0,5H_{ном}$ ; 5 —  $H_{ст} = 0$ ; 6 —  $Q = \text{const}$ ; 7 — при закрытой задвижке

Момент на валу объемных машин имеет пульсирующий характер:

$$M \approx M_{ср} + M_{пер} \sin n\omega t,$$

где  $M_{ср}$  — среднее значение момента;  $M_{пер}$  — амплитуда переменной составляющей момента;  $\omega$  — угловая скорость вала машины;  $n$  — целое число, определяемое конструкцией машины (количеством поршней или пластин, ступеней и др.).

Среднее значение момента объемной машины  $M_{ср}$  не зависит от скорости, т. е. объемные машины являются механизмами с постоянным моментом сопротивления на валу. Частота пульсаций переменной составляющей пропорциональна скорости, а ее амплитуда тем меньше, чем больше  $n$ . Например, при  $n = 1$   $M_{пер} \approx 1,5M_{ср}$ , а при  $n = 3$   $M_{пер} \approx 0,25M_{ср}$ .

#### Особенности машин для подачи жидкостей и газов, определяющие требования к электроприводу

Основными свойствами машин для подачи жидкостей и газов, которые определяют требования к ЭП, являются:

- 1) продолжительный режим работы со спокойной нагрузкой;
- 2) широкий диапазон мощностей — от сотен ватт до нескольких десятков мегаватт;
- 3) целесообразность регулирования скорости по технологическим и энергетическим соображениям;
- 4) как правило, небольшой диапазон регулирования скорости,  $D \leq (2 \div 3): 1$ ;
- 5) отсутствие необходимости реверсирования в силу особенностей конструкции и

условий технологического процесса (исключение составляют ОМ, для которых реверсирование скорости позволяет изменять направление подачи);

б) отсутствие генераторного режима.

Для возникновения генераторных режимов Н, В, К необходимо создание условий, при которых направление подачи изменяется, т. е. жидкость или газ должны перетекать с выхода на вход машины. Такие режимы являются нежелательными, а иногда и аварийными, поэтому во избежание их появления на стороне выхода устанавливают обратный клапан, который автоматически закрывается, если указанные условия возникают.

Характерными особенностями лопастных машин являются существенное снижение момента при уменьшении скорости, возможность облегченного пуска при закрытой задвижке, большой момент инерции центробежных В. Спецификой объемных машин являются пульсации момента на валу с постоянным, не зависящим от скорости средним его значением и невозможность пуска при закрытой задвижке.

Указанные выше особенности, в первую очередь широкий диапазон мощностей Н, В, К и целесообразность регулирования скорости, определяют многообразие систем ЭП, применяемых для этих машин.

### Системы электроприводов

Типы применяемых в настоящее время и перспективных систем ЭП Н, В, К показаны в табл. 52.5. В подавляющем числе случаев для этих машин применяются ЭП переменного тока. ЭП с двигателями постоянного тока используются редко для единичных установок. Подробно свойства систем ЭП переменного тока рассмотрены в [52.17]. Укажем главные особенности.

Для нерегулируемых ЭП большой мощности целесообразно применять синхронные двигатели (СД), так как они могут работать в режиме компенсации реактивной мощности.

Регулируемые системы ЭП, как правило, применяются для ЦМ. Эти ЭП можно разделить на четыре группы со следующими признаками:

1) со ступенчатым регулированием скорости – АД с реостатным управлением, многоскоростные АД, синхронно-асинхронный ЭП (рис. 52.29);

2) с рекуперацией энергии скольжения – асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания при однозонном регулировании скорости вниз от скорости холостого хода;

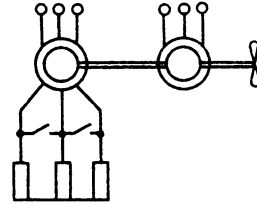


Рис. 52.29. Схема синхронно-асинхронного ЭП

3) с двухзонным регулированием скорости – двигатель двойного питания, АД и СД с частотным управлением;

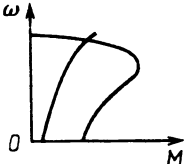
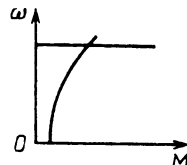
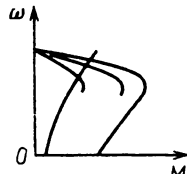
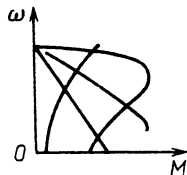
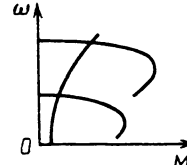
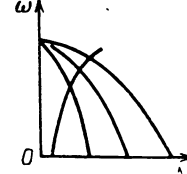
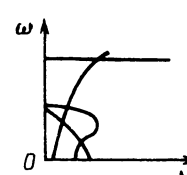
4) с потерями энергии скольжения – АД с реостатным управлением, с преобразователем переменного напряжения, индукционной муфтой скольжения.

Системы ЭП со ступенчатым регулированием скорости обычно применяют тогда, когда требуется облегчить условия пуска или обеспечить пониженную производительность Н и В в нерабочее время (ночные смены, праздничные дни и т. п.). Двухдвигательный синхронно-асинхронный ЭП целесообразен для крупных В с тяжелыми условиями пуска.

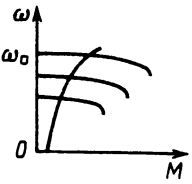

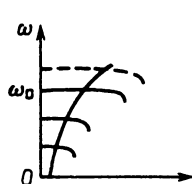
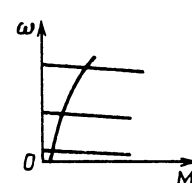
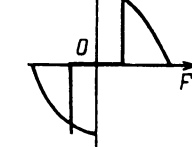
Достоинством ЭП с рекуперацией энергии скольжения является то, что мощность преобразователя, включенного в цепь ротора, пропорциональна номинальной мощности АД и диапазону регулирования его скорости. Это свойство ЭП с рекуперацией энергии скольжения определяет целесообразность их использования для Н, В, К большой мощности при неглубоком регулировании скорости. Характеристики и свойства ЭП с рекуперацией энергии скольжения описаны в [52.17]. К недостаткам этих систем ЭП следует отнести необходимость применения дополнительных пусковых устройств и низкий  $\cos \varphi$  (0,2–0,7) вентильных каскадов. Двигатели двойного питания позволяют поддерживать  $\cos \varphi = 1$ , а при некотором увеличении габаритных размеров преобразователя и двигателя – работать с опережающим коэффициентом мощности.

В двигателях двойного питания можно регулировать скорость вверх от скорости холостого хода  $\omega_0$ , при этом энергия скольжения не рекуперуется, а потребляется из сети, т. е. момент на валу АД создается за счет суммарной мощности, потребляемой из сети по цепям статора и ротора. Двухзонное регулирование скорости (вверх и вниз относительно  $\omega_{0ном}$ ) обеспечивается также при частотном управлении АД и СД. Максимальное значение скорости в этих случаях определяется предельной частотой преобразователя и допустимой скоростью дви-

Таблица 52.5. Системы ЭП насосов, вентиляторов, компрессоров

Тип	Механическая характеристика	Примечания
С короткозамкнутым АД		Скорость не регулируется $P_{\text{ном}} < 1000 \text{ кВт}$
С СД		Скорость не регулируется $P_{\text{ном}} < (20 \div 30) \text{ МВт}$
С короткозамкнутым АД и преобразователем переменного напряжения		Двигатель с повышенным скольжением $P_{\text{ном}} < 100 \text{ кВт}$ ; $D = (1,2 \div 1,5) : 1$
С АД с фазным ротором и реостатным управлением		Используется преимущественно при тяжелых пусковых режимах $P_{\text{ном}} < 5000 \text{ кВт}$ ; $D = (1,5 \div 2) : 1$
С двухскоростным (многоскоростным) АД		$P_{\text{ном}} < 1400 \text{ кВт}$ ; $D = (1,5 \div 3) : 1$
С короткозамкнутым АД (или СД) и муфтой скольжения (электромагнитной, гидравлической)		$P_{\text{ном}} < 200 \text{ кВт}$ ; $D = (1,5 \div 2) : 1$
Двухдвигательный ЭП (рис. 52.29) синхронно-асинхрон-		Используется при тяжелых пусковых режимах $P_{\text{ном}} < (20 \div 30) \text{ МВт}$ ; $D = 2 : 1$

Продолжение табл. 52.5

Тип	Механическая характеристика	Примечания
Асинхронный вентиляльный каскад		Необходимы дополнительные пусковые устройства. $P_{\text{ном}} < 5000 \text{ кВт}$ ; $D = (1,5 - 2) \cdot 1$
С АД двойного питания		Необходимы дополнительные пусковые устройства. $P_{\text{ном}} < 5000 \text{ кВт}$ ; $D = 2 \cdot 1$
С АД (СД) и преобразователем частоты		$P_{\text{ном}} < 5000 \text{ кВт}$ ; $D = 10 \cdot 1$
С двигателем постоянного тока и тиристорным преобразователем		$P_{\text{max}} \omega_{\text{max}} < 125 \cdot 10^3 \text{ кВт/с}$ , $D = 10 \cdot 1$
С бесконтактным двигателем постоянного тока (вентильный ЭП)		Перспективная система ЭП большой мощности $P_{\text{ном}} < 20 - 30 \text{ МВт}$ $D = 10 \cdot 1$
С линейным АД		Перспективная система ЭП для поршневых машин

гателей. Серийные тиристорные преобразователи частоты позволяют повышать частоту до 60 Гц и выше (см. табл. 50.8). Максимальная частота вращения короткозамкнутого АД общепромышленного исполнения ограничивается значением 3000 об/мин, а для СД должна согласовываться с заводом-изготовителем.

При регулировании скорости выше  $\omega_0$  необходимо учитывать, что момент на валу

двигателей возрастает, поэтому их мощность  $P_{\text{max}}$  необходимо рассчитывать при максимальной скорости  $\omega_{\text{max}}$ , а затем приводить к номинальной скорости  $P_{\text{ном}} = P_{\text{max}} \omega_{\text{ном}} / \omega_{\text{max}}$ . При соответствующих законах управления в системах ЭП с частотным управлением и с двигателями двойного питания можно минимизировать (уменьшить на 10–20%) потери в двигателях.

Значительное уменьшение момента при

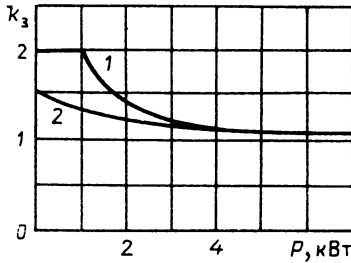


Рис. 52.30. Коэффициент запаса для центробежных машин:  
1 – для вентиляторов; 2 – для насосов

снижении скорости определяет целесообразность использования для лопастных машин малой и средней мощности асинхронных ЭП с потерями энергии скольжения. В ЭП с реостатным управлением и муфтой скольжения мощность приводного двигателя завышать не требуется, так как потери скольжения при регулировании скорости выделяются в резисторах и муфте.

При регулировании напряжения мощность короткозамкнутого АД необходимо выбирать таким образом, чтобы потери скольжения не вызывали его повышенный нагрев [52.3].

В последние годы во всех развитых странах мира интенсивно ведутся разработки по использованию для Н, В, К асинхронных и синхронных ЭП с тиристорными преобразователями частоты. Мощность единичных установок достигла 1–1,5 МВт. Ведутся также разработки вентиляльных ЭП на базе СД и машин специального исполнения, которые целесообразно использовать для Н, В, К большой мощности.

Для поршневых машин ведутся работы по созданию ЭП с линейным АД. Имеются

сведения о таком ЭП для плунжерных Н, предназначенных для откачки нефти из скважин глубиной до 2,5–4 км.

Мощность двигателей для Н, В, К рассчитывается по соотношению

$$P_d = k_3 k_p P / \eta_n,$$

где  $P$  – мощность на валу Н, В, К при максимальной скорости машины;  $\eta_n$  – КПД передаточного устройства;  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета  $P$  (при  $P > 5$  кВт  $k_3 \approx 1,1$  для  $P < 5$  кВт значения  $k_3$  приведены на рис. 52.30);  $k_p$  – коэффициент, уточняющий мощность двигателей в регулируемых системах ЭП (для нерегулируемых ЭП  $k_p = 1$ ).

Значения  $k_p$ , а также пределы регулирования скорости различных систем ЭП приведены в табл. 52.6.

Значения  $k_p$ , приведенные в табл. 52.6, не учитывают изменение теплоотдачи двигателей при регулировании их скорости. Однако вследствие снижения момента двигателя при уменьшении скорости ухудшение теплоотдачи не приводит к увеличению нагрева двигателей. Исключение составляют короткозамкнутый АД с регулированием напряжения, когда потери скольжения выделяются внутри двигателя. В этих случаях достаточно учесть ухудшение теплоотдачи на скорости, при которой потери скольжения максимальны.

Список литературы

52.1. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1979. 558 с.  
52.2. Вайнсон А. А. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1975. 431 с.  
52.3. См. [50.20].  
52.4. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М.: Энергия, 1976. 488 с.

Таблица 52.6. Пределы регулирования скорости и значения  $k_p$  регулируемых систем ЭП для Н, В, К

Система ЭП	Пределы регулирования скорости	$k_p$
АД с частотным управлением	$0,1 \omega_{ном} - 314$ 1/с	$1,1 \omega_{ном} / \omega_{max}$
СД с частотным управлением	$0,1 \omega_{ном} - \omega_{доп СД}$	$1,1 \omega_{ном} / \omega_{max}$
Вентильный каскад	$(0,5 \div 1) \omega_{ном}$	1,1
Двигатель двойного питания	$(0,65 \div 1,35) \omega_{ном}$	$\omega_{ном} / \omega_{max}$
АД с регулированием напряжения	$(0,5 \div 1) \omega_{ном}$	$\frac{\Delta P_{2max}}{P_{ном^2 \omega_{ном}}}$
АД с реостатным управлением, муфтой скольжения	$(0,5 \div 1) \omega_{ном}$	1
Двигатель постоянного тока	$(0,1 \div 1) \omega_{ном}$	1
Вентильный двигатель	$0,1 \omega_{ном} - \omega_{доп СД}$	$1,1 \omega_{ном} / \omega_{max}$

- 52.5. Казак С. А. Динамика мостовых кранов. М.: Машиностроение, 1968. 332 с.
- 52.6. Крановое электрооборудование: Справочник/Ю. В. Алексеев, А. П. Богословский, Е. М. Певзнер и др./Под ред. А. А. Рабиновича. М.: Энергия, 1979. 240 с.
- 52.7. Шеффлер М., Дресиг Х., Курт Ф. Грузоподъемные краны. Кн. 2. Пер. с нем./Под ред. М. П. Александрова. М.: Машиностроение, 1981. 287 с.
- 52.8. Электрооборудование кранов/А. П. Богословский, Е. М. Певзнер, Н. Ф. Семерня и др. М.: Машиностроение, 1983, 310 с.
- 52.9. Федорова З. М., Луккин И. Ф., Нестеров А. П. Подъемники. Киев: Вища школа, 1976. 296 с.
- 52.10. Чутчиков П. И., Алексеев Н. И., Прокофьев А. К. Электрооборудование лифтов массового применения. М.: Машиностроение, 1983. 168 с.
- 52.11. Вуль В. Я., Ключев В. И., Сedaков Л. В. Наладка электроприводов экскаваторов. М.: Недра, 1975. 312 с.
- 52.12. Одноковшовые экскаваторы НКМЗ/Ю. Я. Вуль, Ю. Т. Калашников, А. В. Сапилов, И. М. Харахаш. М.: Недра, 1978. 189 с.
- 52.13. Конвейеры: Справочник/Р. А. Волков, А. Н. Гнутов, В. К. Дьячков и др./Под ред. Ю. А. Пертена. Л.: Машиностроение, 1984. 367 с.
- 52.14. Ленточные конвейеры в горной промышленности/В. А. Дьяков, Л. Г. Шахмистер, В. Г. Дмитриев и др./Под ред. А. О. Спиваковского. М.: Недра, 1982, 349 с.
- 52.15. Спиваковский А. О., Дьячков В. К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.
- 52.16. Червоненко А. Г., Раздольский А. Г., Заболотный Ю. В. Динамика протяженных горных транспортных машин. Киев: Наукова думка, 1983. 192 с.
- 52.17. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
- 52.18. Степанов А. И. Центробежные и осевые насосы. М.: Машгиз, 1960. 462 с.
- 52.19. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984. 415 с.

## Раздел 53

# ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

## СОДЕРЖАНИЕ

- 53.1. Электрические печи сопротивления и установки прямого нагрева. Описание конструкций и характеристика основных типов электропечей сопротивления косвенного действия (151). Электрические нагревательные элементы (161). Электрические печи и устройства прямого нагрева (163). Электрическое оборудование и автоматическое регулирование температуры (164)
- 53.2. Дуговые печи и установки электрошлакового переплава. Дуговые трехфазные печи прямого действия для плавки стали (165). Рудовосстановительные печи (169). Дуговые однофазные печи косвенного действия (171). Вакуумные дуговые печи (ВДП) (173). Установки электрошлакового переплава (174)
- 53.3. Установки индукционного и диэлектрического нагрева. Индукционные канальные печи (176). Индукционные тигельные печи (177). Индукционные нагревательные установки (182). Высокочастотные установки для нагрева диэлектриков и полупроводников (185)
- 53.4. Характеристики специальных материалов для электрических печей . . . . . 185
- 53.5. Установки плазменного и электронного нагрева. Общие сведения (190). Управляемые системы электропитания (УСЭП) плазменных ЭТУ (193). Вакуумные плазменные печи (197). Электронные печи (199)
- Список литературы . . . . . 201

### 53.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И УСТАНОВКИ ПРЯМОГО НАГРЕВА

#### Описание конструкций и характеристика основных типов электропечей сопротивления косвенного действия

В электрических печах сопротивления косвенного действия электрическая энергия преобразуется в тепловую в нагревательных эле-

ментах и от них тепло путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу.

По способу загрузки и характеру работы во времени электрические печи сопротивления разделяются на садочные (печи периодического действия) и методические (печи непрерывного действия).

В садочной печи нагреваемая загрузка неподвижна в течение всего времени пребывания в печи. Садочные печи могут работать кругло-



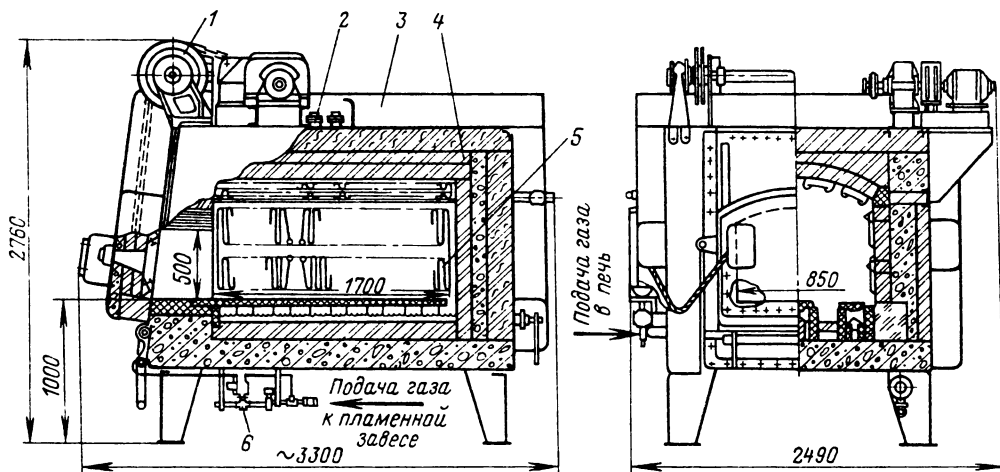


Рис. 53.1. Камерная электропечь:

1 — механизм подъема дверцы; 2 — выводы нагревателей; 3 — кожух; 4 — футеровка; 5 — нагреватели; 6 — газоподвод

суточно (при циклично чередующейся загрузке и выгрузке), посменно или эпизодически — по мере надобности. По конструктивному признаку эти печи разделяются на следующие основные типы: камерные, шахтные, колпаковые и ванны.

В буквенных обозначениях типовых печей сопротивления первая буква (С) обозначает метод нагрева — сопротивлением; вторая буква определяет конструкцию электропечи: Н — камерная, Ш — шахтная, К — конвейерная, Б — барабанная, Т — толкательная, Р — рольганговая, В — ванна, П — протяжная, Э — элеваторная и т. д.

Третья буква обозначает характер среды: О — окислительная (обычная атмосфера), З — защитная, Ц — цементационный газ, С — соль и щелочь, Р — агрессивная среда, К — компрессия (повышенное давление в печи).

В цифрах, следующих за буквенным обозначением, числитель дает размеры рабочего пространства в дециметрах, а знаменатель — максимальную температуру печи в сотнях градусов стоградусной шкалы.

Камерные печи являются универсальными по назначению. В них производится нагрев для различных видов термической и термохимической обработки изделий из черных и цветных металлов. Камерная печь (рис. 53.1, табл. 53.1) в основе представляет собой футерованную камеру. На внутренних поверхностях печной камеры монтируются нагревательные элементы из специальных жаростойких высокоомных сплавов (см. табл. 15.25) в виде проволочных зигзагов и спиралей или зигзагов

из ленты [53.1, 53.5], а для печей с рабочей температурой 1200–1350 °С применяются стержневые нагреватели из карборунда КЭН (см. табл. 53.14) [53.12].

Футеровка печи выполняется в кожухе из листовой и профилированной стали. Загрузка и выгрузка изделий производится через окно с дверцей, имеющей ручной или электромеханический привод.

Разновидностями камерных печей являются печи с выдвигным подом (табл. 53.1) и элеваторные. Под печи представляет собой футерованную тележку, которая имеет электромеханический привод. Элеваторная печь имеет также подвижный под — тележку (на одну печь их может быть 2–3), которая поднимается в печную камеру специальным подъемным столом. Элеваторные печи чаще всего применяются для специального отжига чугунных деталей (процесса получения ковкого чугуна).

Шахтные печи (рис. 53.2, табл. 53.1) в основном предназначаются для термообработки изделий при мелкосерийном производстве.

Колпаковые печи (рис. 53.3, табл. 53.1) применяются преимущественно для светлого отжига пакетов листовой стали, рулонов ленты и бунтов проволоки. Колпаковая печь состоит из неподвижного футерованного стенда, на который устанавливается загрузка, накрываемая жароупорным муфелем, и колпака. Колпак, несущий основную часть нагревательных элементов печи, может перемещаться с помощью мостового крана с одного стенда на другой. Так как при отжиге требуется длительное охлаждение изделий, на один

Таблица 53.1. Технические данные некоторых печей сопротивления пермодического действия

Наименование и основное назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Число фаз	Максимальная рабочая температура, °С	Мощность холостого хода, кВт	Число тепло-вых зон	Мощности тепловых зон, кВт	Габаритные размеры: длина × ширина × высота, мм	Масса, т	Примечание
Камерная с обычной атмосферой (воздух) различного назначения	СНО-3.6.2/10-И2	14,6	72	1	1000	4,4	1	14	1575 × 1040 × 1570	1,1	—
	СНО-6.12.4/10-И2	71	103	3	1000	9,5	1	70	2850 × 2050 × 2495	4,1	—
	СНО-3.2.6.2.5/15-М1	23,5	20—26	1	1500	7,0	1	—	1900 × 1380 × 1950	4,3	Нагреватели из дисилицида молибдена
Камерная с окислительной (СНО) и защитной (СНЗ) атмосферой различного назначения	СНЗ/СНО-3.6.2/10-М1	14	72	1	1000	6,0/4,5	1	—	1150 × 1040 × 1570	1,0/0,97	—
	СНЗ/СНО-6.12.4/10-М1	58	103	3	1000	13,5/9	1	—	2055 × 2490 × 1820	3,75/3,7	—
Шахтная для нагрева под закалку, отжиг и нормализацию в обычной атмосфере	СШО-6.20/10-М1	100	65—55	3	1000	17,0	3	I—40; II—30; III—30	2825 × 2310 × 4645	4,4	Габаритные размеры с открытой крышкой
	СШО-10.10/10-М1	111	56—47	3	1000	16,0	2	I—55; II—55	4070 × 3060 × 3700	4,67	
Шахтная того же назначения с защитной атмосферой	СШЗ-10.20/12, СШЗ-15.30/10	211	130	3	1200	24,0	3	3 × 70	4675 × 3625 × 5300	9,83	С циркуляцией печной атмосферы
	СШЗ-6.6/7-М1	37,2	220	3	700	8,0	1	35	2750 × 2320 × 3345	2,3	
Шахтная для нагрева под высокий отпуск в защитной атмосфере	СШЗ-6.30/7-М1	107,2	220	3	700	16,6	3	I—35; II—35; III—35	2600 × 2380 × 5950	5,7	С циркуляцией печной атмосферы
	СШЦМ-6.6/9-М1	73,2	65—55	3	900	9,0	2	I—40; II—30	2650 × 2600 × 3015	3,4	
Шахтная для цементации и других видов термобработки в защитной атмосфере	СШЦМ-6.20/9-И3	108,2	65—37	3	900	14,0	3	I—30; II—45; III—30	2750 × 2850 × 4380	5,8	С циркуляцией печной атмосферы
	СДО-10.20.80/8	300	380	3	800	—	3	I—105; II—105; III—90	9800 × 2900 × 1300	27	
Камерная с выдвигаемым подом для нагрева заготовок	СДО-28.56.20/12	1100	500	3	1200	—	3	—	2500 × 7050 × 9570	150	—
	СГО-40.50.25/7	570	380	3	750	—	—	—	7600 × 7000 × 6540	88,5	—
Колпаковая для отжига волокон	СТЗ-10.56.10/10	436	380	3	950	38	3	—	28125 × 3570 × 4470	87	—
	СТЗ-18.38.19/8,5	600	380	3	850	45	3	—	6360 × 4580 × 4850	94	—

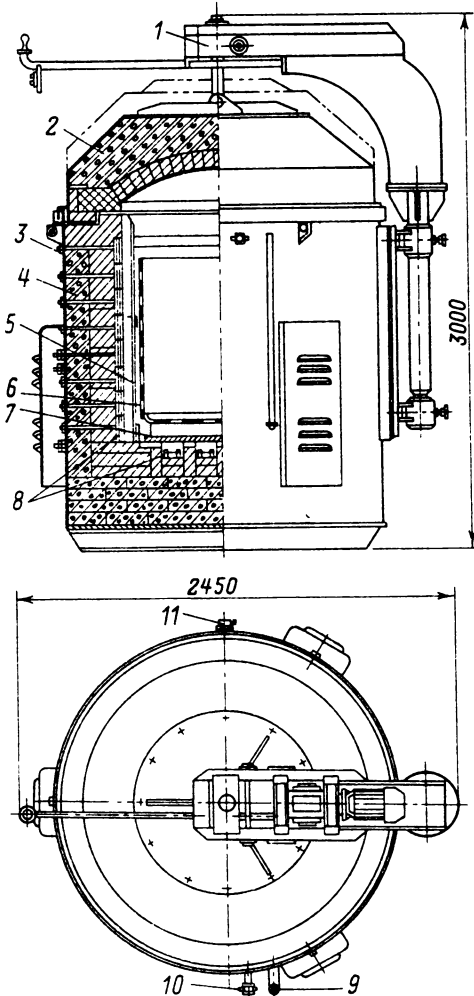


Рис. 53.2. Шахтная электрическая печь.

1 — механизм подъема и поворота крышки; 2 — крышка; 3 — кожух печи; 4 — футеровка; 5 — направляющие; 6 — корзина; 7 — подовая плита; 8 — нагреватели; 9 — контрольная газовая свеча; 10 — патрубок ввода газа; 11 — ввод термоэлектрического термометра

колпак предусматривается два — четыре стенда. Число стенов  $n = \tau_{\text{охл}}/\tau_{\text{н}} + 1$ , где  $\tau_{\text{охл}}$  и  $\tau_{\text{н}}$  — время охлаждения и нагрева загрузки. Нагрев и охлаждение изделий осуществляется под жароупорным муфелем в атмосфере защитного газа или в вакууме. Форма колпака, стенда и муфеля в зависимости от конфигурации загрузки может быть цилиндрической, эллиптической или прямоугольной.

Электрические ванны представляют собой широкую группу печей сопротивления, отли-

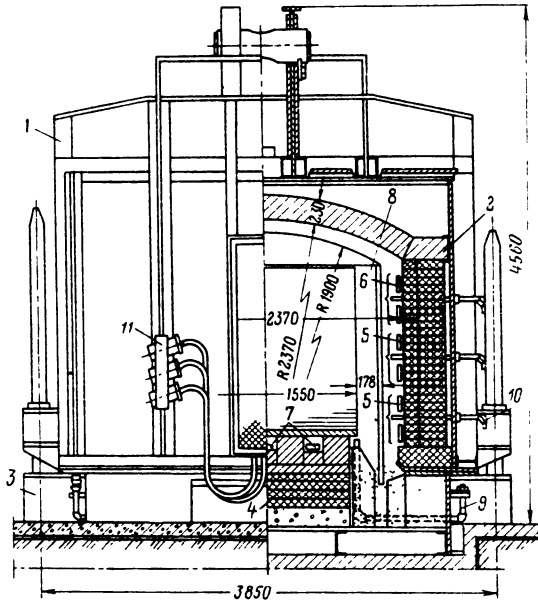


Рис. 53.3. Колпаковая электрическая печь:

1 — каркас колпака; 2 — футеровка колпака; 3 — каркас стенда; 4 — футеровка стенда; 5, 6 — нагреватели колпака; 7 — нагреватель стенда; 8 — муфель; 9 — подвод газа; 10 — термоэлектрический термометр

чающихся друг от друга как по назначению, так и по конструкции.

Наиболее распространенными видами электрических ванн являются:

- а) электродные соляные ванны;
- б) соляные и масляные ванны с внешним или внутренним обогревом нагревательными элементами.

В электродных соляных ваннах (рис. 53.4) тепловая энергия выделяется в расплавленной соли (как правило, смеси солей) за счет протекающих в ней токов, а нагреваемая загрузка получает тепло от жидкого теплоносителя — соли — посредством конвекции.

Основным назначением электродных соляных ванн является нагрев стальных деталей под термическую обработку при температурах до 1300 °С. Электродные соляные ванны питаются от сети через специальные понизительные трансформаторы, обеспечивающие возможность получения на электродах рабочего напряжения 6,5—20 В.

Примерами электродных соляных ванн отечественного производства являются ванны СВС-1.3/13 и СВС-2.3/13 на максимальную рабочую температуру 1300 °С с трансформаторами мощностью соответственно 63 и 160 кВт·А.

Для различных видов химико-термической обработки при температурах до 900 °С (цементация, цианирование и др.) применяются ванны с металлическими тиглями, обогреваемыми снаружи нагревательными элементами. Нагрев загрузки осуществляется в расплавленных солях или щелочах. Для нагрева деталей под закалку в таких ваннах в качестве жидкого теплоносителя иногда используется расплавленный свинец.

Для химико-термической обработки стальных изделий отечественной электропромышленностью выпускаются электрические ванны с наружным электрообогревом тигля типа СВГ-1,5,2/8,5, СВГ-2,5,3,5/8,5 и СВГ-3,5,4/8,5 на максимальную рабочую температуру 850 °С мощностью соответственно 10, 20 и 30 кВт с питанием от трехфазной сети переменного тока 220 или 380 В.

В методических печах нагреваемые изделия непрерывно или циклично перемещаются от загрузочного конца печи к разгрузочному. Методические печи применяются для серийного и поточного производства. Низкотемпературные печи методического действия имеют вентиляторы или калориферные устройства, которые создают принудительную циркуляцию атмосферы внутри рабочей камеры для интенсификации процесса нагрева и выравнивания температуры. Название печи, как правило, определяется типом транспортирующего механизма.

**Конвейерные печи** (рис. 53.5). Перемещение изделий внутри печной камеры осуществляется конвейерным механизмом. Лента или цепь конвейера в печах с рабочей температурой выше 500 °С выполняется из жароупорной стали, марка которой выбирается в зависимости от рабочей температуры печи и механической нагрузки конвейера (см. табл. 53.17). Электро-механический привод конвейера монтируется около загрузочного или разгрузочного конца печи. Загрузка изделий на конвейер производится различными способами: толкателем, из бункера или с пульсирующего лотка. Выгрузка изделий осуществляется через вертикальный (в закалочных печах) или наклонный (в печах отжига и отпуска) патрубок. В табл. 53.2 приведены данные некоторых конвейерных печей типов СКЗ и СКО. Конвейерные закалочнотпускные агрегаты (СКЗА) кроме электропечей включают вспомогательное технологическое оборудование: закалочный бак, моечную машину, промежуточные транспортирующие устройства.

**Толкательные печи** (табл. 53.2). Изделия проталкиваются по направляющим или роликам пода печи с помощью находящегося перед загрузочной дверцей печи механизма —

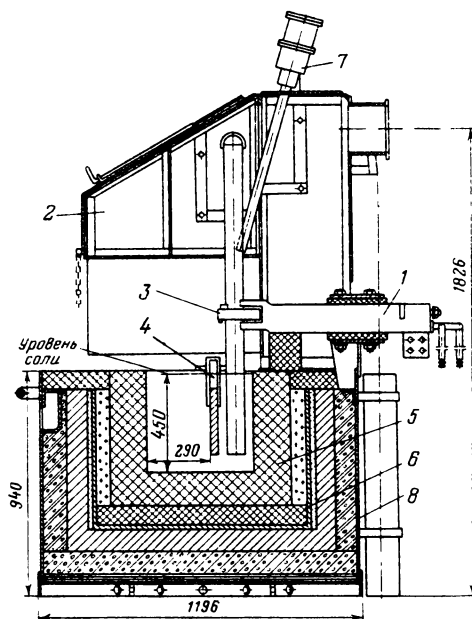


Рис. 53.4. Соляная электродная ванна: 1 — токоподвод; 2 — зонт; 3 — электродная группа; 4 — перегородка; 5 — футеровка; 6 — внутренний кожух; 7 — пирометр; 8 — наружный кожух

толкателя. Мелкие изделия или изделия сложной конфигурации проталкиваются на специальных поддонах, башмаках или тележках. Направляющие и транспортирующие детали для печей с температурой выше 500 °С выполняются из жароупорных сталей (см. табл. 53.18). Загрузка и выгрузка изделий производится механизмами с гидравлическим или электрическим приводом.

Разновидностью толкательных печей являются ручьевые печи. Направляющими в этих печах служат жароупорные лотки — «ручьи», по которым с помощью толкателей перемещаются вдоль печи (в несколько параллельных «ручьев») однотипные детали, имеющие правильную цилиндрическую (кольца, втулки) или иную удобную для проталкивания по узким лоткам форму.

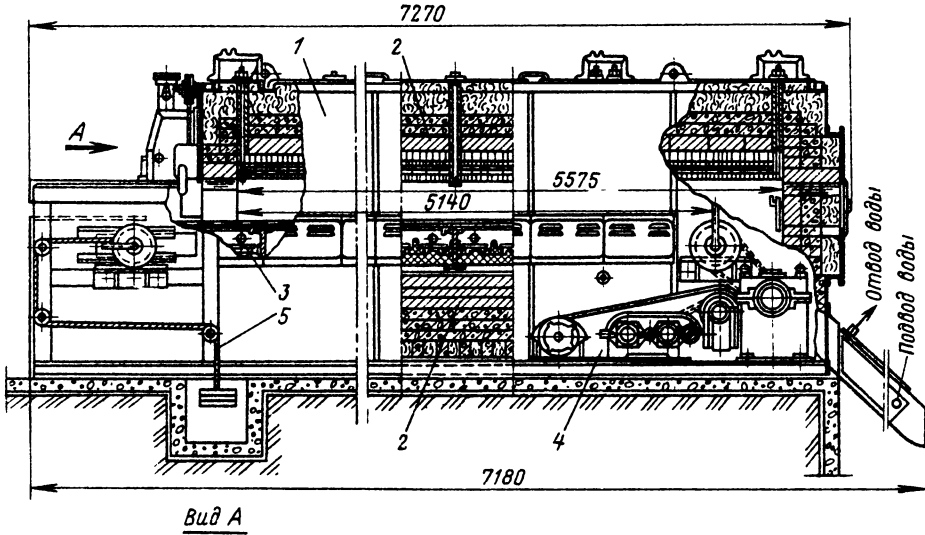
**Барабанные печи** (рис. 53.6) предназначены для нагрева мелких изделий сферической, цилиндрической (шарики, ролики, кольца) или другой округлой формы. Печь имеет загрузочный бункер, из которого изделия попадают в жароупорный барабан, имеющий внутри винтовую полость. При вращении барабана изделия перекатываются из одного витка барабана в другой и передвигаются вдоль печи к разгрузочному патрубку. Электро-механиче-

Таблица 53.2. Технические данные некоторых печей сопротивления непрерывного действия

Наименование и назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Максимальная рабочая температура, °С	Производительность, кг/ч	Мощность холостого хода, кВт	Число тепловых зон	Мощности тепловых зон, кВт	Габаритные размеры: длина × ширина × высота, мм	Масса, т	Примечание (тип загрузки)
Конвейерная: для закали стальных изделий в защитной атмосфере	СКЗ-4.30.1/9И4	102	25—130	900	160—260	35	3	I—60; II—20; III—20	6700 × 2470 × 2900	12,55	Пульсирующий под
	СКЗ-6.30.1/9И3	142	32—162	900	235—380	40	3	I—72; II—38; III—30	6460 × 3000 × 2900	12,76	Пульсирующий под
	СКЗ-8.40.1/9И4	224	43—166	900	410—670	58	3	I—122; II—63; III—36	9600 × 3300 × 2900	18,6	Толкатель
для отпуса стальных изделий в защитной атмосфере	СКЗ-10.40.1/9И1	258	52—195	900	520—840	68	3	I—140; II—77; III—40	9600 × 3300 × 2900	18,5	Бункер
	СКЗ-4.30.1/7И3	73	98—196	700	160—260	20	3	I—37; II—15; III—13	6460 × 2540 × 2900	11,8	Пульсирующий под
	СКЗ-8.40.1/7И2	157	130—220	700	410—670	32	3	I—78; II—49; III—23	6600 × 3190 × 2900	19,0	Бункер
	СКЗ-10.40.1/7И1	193	90—220	700	520—840	37,5	3	I—95; II—60; III—30	6600 × 3380 × 2900	18,7	Бункер

для низкотемпературного отпуски	СКО-6.40.3/3,5И1	46	—	350	160—260	14	2	1—30; II—10	9270 × 2750 × 2760	7,0	—
	СКО-12.60.3/3,5И1	105	—	350	410—670	30	3	1—55; II—15; III—20	11270 × 2865 × 2760	11,6	—
для рекристаллизационного отжига и отпуски деталей	СКЗ-4.20.1/1И1	75	55—90	1100	135	30	2	1—55; II—20	13000* × 1960 × 2250	8,6	—
С пульсирующим током для закалки стальных изделий в защитной атмосфере	СИЗ-4.20.1/9	80	90—120	900	180	34	2	1—50; II—30	7500 × 2000 × 2500	7,0	—
	СИЗ-6.40.1/9	150	105—120	900	400	38	3	1—80; II—40; III—30	12500 × 2500 × 2500	11,5	—
Рольганговая для различных термических процессов	СРЗ-8.160.10/10	1500	173—225	1000	3100	—	6	1—320; II и VI—260; III—240; IV и V—210	20460 × 4660 × 4500	93	—
	СРЗ-12.240.4/11X—150	1200	—	1100	2000	—	—		45500* × 3500 × 3000	135	—
Толкательная: для нормализации стальных изделий	СТО-10.60.5/10	360	33—50	950	1000	52	3	—	13800 × 4800 × 4000	38	—
для закалки стальных изделий	СТЗ-5.40.5/10	235	65—75	950	450	80	2	1—146; II—89	9800 × 4800 × 4000	40	—
Барбанная: для закалки стальных изделий	СБЗ-4.24/9	95	61—106	900	140	45	2	1—65; II—30	7000 × 3000 × 3000	13	—
для цементации и нитроцементации	СБЦ-6.25/10	120	33—80	950	150	50	3	—	7000 × 3500 × 3000	14	—
Карусельная для нагрева стальных изделий под за- калку	САЗ-53.21.7/10	550	196—380	1100	600	215	6	1 и IV—89; V—135, II, III VI—76	9500 × 7000 × 6500	80	—

\* С камерой охлаждения.



Вид А

Рис. 53.5. Конвейерная электропечь:  
1 – каркас; 2 – футеровка; 3 – нагреватели;  
4 – привод конвейера; 5 – натяжное устройство

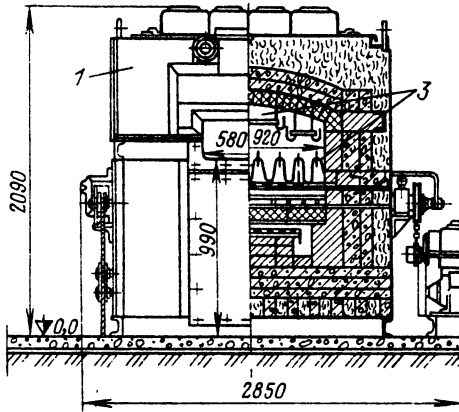
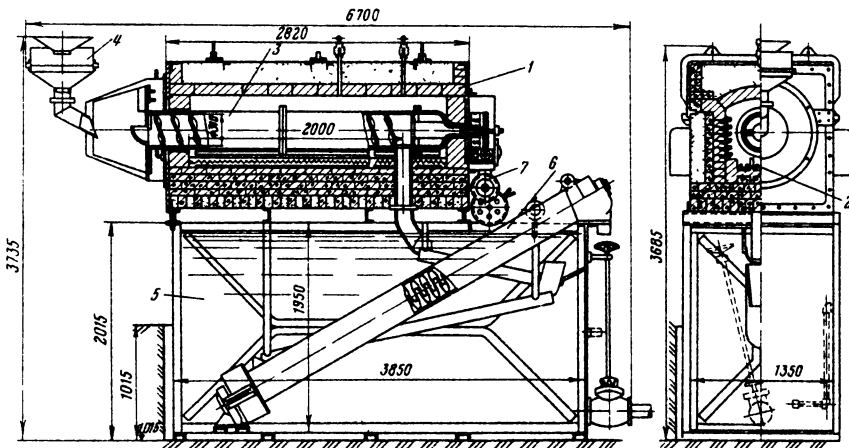


Рис. 53.6. Барабанная муфельная электропечь:

1 – футеровка; 2 – нагреватели; 3 – жароупорный муфель; 4 – загрузочный бункер;  
5 – закалочный бак; 6 – разгрузочный шнек; 7 – привод муфеля



ский привод барабана монтируется на торцевой стенке печи со стороны выгрузки.

*Карусельные печи* (табл. 53.2). Под печи, выполнимый обычно в виде футерованной кольцевой тележки, вращается от электромеханического привода. Загрузочное и разгрузочное отверстия либо совмещены, либо находятся в непосредственной близости друг от друга. Благодаря отсутствию жароупорных конструкций внутри печи рабочая температура печи лимитируется только допустимой температурой материалов нагревательных элементов и огнеупорной кладки печи (табл. 53.13, 53.18).

*Рольганговые печи* (табл. 53.2). Перемещение изделий в печи осуществляется рольгангом пода. Ролики выполняются из жароупорных материалов и приводятся во вращение цепной передачей. Рольганговые печи приме-

няются для термической обработки крупнобаритных изделий (труб, профильного и листового проката, стекла, подшипниковых колец и др.) или мелких изделий, размещаемых в поддонах.

*Протяжные печи* предназначены для термической обработки и процессов эмалирования проволоки и ленты. Лента или проволока перемещается вдоль печи специальными намоточно-размоточными механизмами, находящимися вне печи. Для термической обработки чаще применяются горизонтальные печи, а для эмалирования — вертикальные.

*Высокотемпературные вакуумные печи* (рис. 53.7). Для термообработки или плавки очень чистых по химическому составу и тугоплавких материалов применяются высокотемпературные вакуумные печи сопротивления.

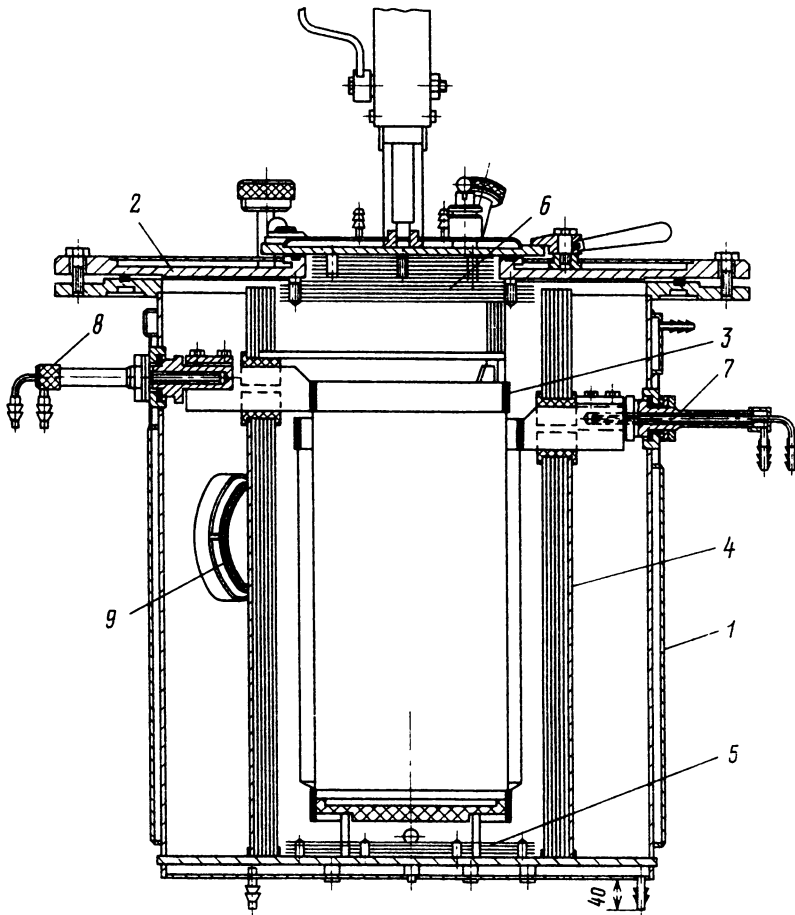


Рис. 53.7. Высокотемпературная вакуумная электропечь:

1 — водоохлаждаемый кожух печи; 2 — крышка; 3 — нагреватель; 4–6 — экраны; 7, 8 — выходы нагревателя; 9 — гляделка



Нагреватели в печах этого типа выполняются из молибдена, вольфрама, ниобия, тантала или графита.

Печь работает в комплексе с вакуумной установкой, откачивающей перед включением нагревателей воздух из рабочей камеры и под-

держивающей необходимую степень разрежения в течение всего цикла работы печи.

Особенностью высокотемпературных вакуумных печей является или полное отсутствие футеровки, или выполнение ее очень тонкой и легкой. Часто вместо футеровки используется

Таблица 533 Технические данные некоторых вакуумных печей сопротивления

Наименование	Тип	Мощность установленная, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Максимальная рабочая температура, °С	Число тепловых зон
Шахтная высокотемпературная безмуфельная	СШВ-1,5.3/25	192	20—43	2500	1
	СШВ-2.20/20ЭМ3	570	11—18	2000	4
	СШВ-8.12/13ЭМ1	303	10—26	1300	3
Камерная высокотемпературная безмуфельная	СНВ-1.10.3/25	400	11	2500	1
	СНВ-2.42/25	430	15	2500	1
Камерная с выдвижным подом	СНВ-5.15.5/11,5М2	170	77—87	1150	4
	СНВ-15.30.5/11,5	485	66—142	1150	4
Элеваторная высокотемпературная с загрузочным поддоном	СЭВ-2,5.5/20Э	200	19	2000	1
	СЭВ-5.5/20	340	19	2000	1
	СЭВ-8.8/16ЭМ1	510	28	1600	1
Толкательная высокотемпературная	СТВ-3,8.38/16—Х30	620	13,3	1600	4
Туннельная	СЛВ-16.128.16/14,5—Х64	2000	30—60	1450	3

Продолжение табл. 53.3

Наименование	Мощности тепловых зон, кВт	Габаритные размеры: длина × ширина × высота, мм	Масса, т	Остаточное давление, Па	Примечание
Шахтная высокотемпературная безмуфельная	190	3300 × 2545 × 1910	3,5	0,01	Нагреватели из карбида ниобия
	I—120, II—150, III—150; IV—120	4650 × 4170 × 11250	15,2	0,001	Нагреватели из вольфрамовой проволоки
	I—45, II—165; III—50	9100 × 5520 × 5610	18,3	0,001	Нагреватели из молибдена
	—	6350 × 4900 × 3500	16,3	0,001	Нагреватели из вольфрама
Камерная высокотемпературная безмуфельная	—	6000 × 4710 × 3085	15,8	0,001	Нагреватели из вольфрама
Камерная с выдвижным подом	4 × 35	5900 × 5220 × 2740	10,5	0,001	Нагреватели из молибдена
	I—50, II—130; III—50, IV—110	15200 × 4900 × 6000	45	0,1	Нагреватели из молибдена
Элеваторная высокотемпературная с загрузочным поддоном	180	4100 × 2730 × 4100	9	0,001	Нагреватели из вольфрамовых прутков
	300	6800 × 4900 × 5900	19,3	0,001	
	480	9150 × 4900 × 6300	39	0,001	
Толкательная высокотемпературная	—	11470 × 5200 × 7800	42	5	Нагреватели из графита
Туннельная	—	44000 × 11500 × 7200	195	0,1	Две камеры нагрева и одна камера охлаждения

система тепловых экранов из жаростойких материалов, обладающих малым коэффициентом излучения. При отсутствии футеровки печь очень быстро разогревается до рабочей температуры и значительно ускоряется процесс откачки воздуха из рабочего пространства печи.

Конструкция нагревателей в высокотемпературных вакуумных печах определяется в основном свойствами и сортаментом применяемых для нагревательных элементов материалов. Металлические нагревательные элементы выполняются из проволоки и прутков (зигзагообразные, стержневые, шпильчатые) или тонколистового материала (рис. 53.7).

Графитовые и угольные нагреватели применяются в виде стержней, трубок или колец. Характеристики высокотемпературных вакуумных печей приведены в табл. 53.3 [53.5, 53.7].

### Электрические нагревательные элементы

Электрические нагревательные элементы промышленных печей сопротивления выполняются для рабочих температур до 1200 °С из специальных жаростойких металлических сплавов высокого сопротивления, для печей с температурой до 1350 °С — из карборунда (карбида кремния). В печах с рабочей температурой выше 1350 °С применяются нагреватели из молибдена, вольфрама, угля, графита и дисилицида молибдена. Свойства материалов для нагревателей см. в разд. 15 (табл. 15.25) и в табл. 53.13. Характеристики выпускаемых отечественной промышленностью типовых нагревателей из карборунда и дисилицида молибдена даны в табл. 53.14 и 53.16.

Металлические нагревательные элементы выполняются из круглой проволоки и из ленты (в отдельных случаях могут применяться литые нагреватели). Неметаллические нагреватели чаще всего изготавливаются в виде стержней круглого или прямоугольного сечения.

**Расчет нагревательных элементов.** Исходные данные:  $P_\phi$  — мощность на фазу или одну фазовую ветвь при параллельном соединении нескольких ветвей в фазе, Вт;  $U_\phi$  — фазное напряжение, В;  $t_{изд}$  — конечная температура изделия, °С.

По максимальной температуре нагреваемого изделия выбирается материал нагревательных элементов.

Для выбранного материала с учетом его максимальной рабочей температуры и определенной конструкции нагревателя определяется значение допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя  $W_d$ , Вт/см<sup>2</sup>.

Расчетный диаметр, мм, нагревателя круг-

лого сечения (проволочный зигзаг, спиральный, стержневой) определяется по формуле

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 P_\phi^2 \rho_{гор}}{\pi^2 U_\phi^2 W_d}},$$

где  $\rho_{гор}$  — удельное электрическое сопротивление материала нагревателя в горячем состоянии, мкОм·м;  $W_d$  — допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/см<sup>2</sup>.

Расчетная длина проволоки или стержня на фазу, м,

$$L_\phi = \frac{R\pi d^2}{\rho_{гор} 4} = \frac{\pi U_\phi^2 d^2}{4 \cdot 10^3 P_\phi \rho_{гор}}.$$

Для ленточного нагревателя или стержня прямоугольного сечения размеры сечения, мм, определяются по формуле

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 P_\phi^2 \rho_{гор}}{2m(m+1) U_\phi^2 W_d}},$$

где  $m = b/a$  (рис. 53.8).

Обычно для ленточных нагревателей  $m = 5 \div 15$  в соответствии с сортаментом выпускаемой ленты. Длина ленты (или стержня) на фазоветвь, м,

$$L_\phi = \frac{Rab}{\rho_{гор}} = \frac{U_\phi^2 ma^2}{10^3 P_\phi \rho_{гор}}.$$

Для спирального проволочного нагревателя средний диаметр спирали выбирается из условий механической прочности нагревателя (рис. 53.8);  $D = (4 \div 6)d$  для хромоалюминиевых сплавов 0Х23Ю5, 0Х27Ю5А и фехрала;  $D = (7 \div 10)d$  для нихромов и сплавов ХН70Ю, Х15Н60Ю3А.

Шаг витков спирали  $S \geq 2d$ . Для ленточного зигзагообразного нагревателя высота петли принимается по условиям механической прочности нагревателя  $A \leq 100a$ . Рекомендуется шаг волны  $S \geq 2b$  (рис. 53.8). Для проволочного зигзагообразного нагревателя  $S \geq 5d$ .

**Выбор удельной поверхностной мощности нагревателя высокотемпературной печи** ( $t_{печи} \geq 700$  °С). В печах с рабочей температурой  $t_{печи} \geq 700$  °С теплообмен между нагревателем и изделием осуществляется преимущественно излучением.

Если представить себе электрическую печь, в которой отсутствуют потери через кладку печи ( $P_{пот} = 0$ ) и нагреватель выполнен в виде сплошного тонкого листа, охватывающего загрузку, то при допущении равенства поверхности нагревателя и изделия  $F_n = F_{изд}$  уравнение теплообмена излучением между таким идеальным нагревателем и поверхностью на-

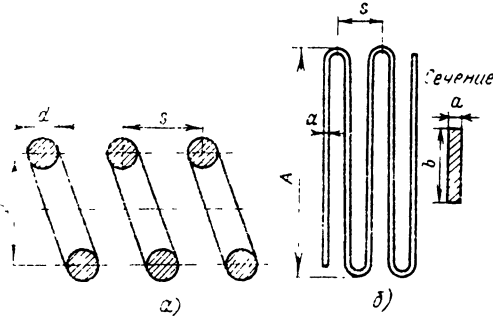


Рис. 53.8. Конструктивные размеры проволочного спирального (а) и ленточного зигзагообразного (б) нагревателя

греваемого изделия имеет вид

$$P_{\text{печи}} = C_s \epsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{н}},$$

откуда удельная поверхностная мощность идеального нагревателя

$$w_{\text{ид}} = \frac{P_{\text{печи}}}{F_{\text{н}}} = C_s \epsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right] = \epsilon_{\text{пр}} w_s.$$

В этих уравнениях:  $P_{\text{печи}}$  — мощность печи, Вт;  $F_{\text{н}}$  — поверхность нагревателя, м<sup>2</sup>;  $T_{\text{н}}$ ,  $T_{\text{изд}}$  — температуры нагревателя и изделия, К;  $C_s = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — излучательная способность абсолютно черного тела;  $\epsilon_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент теплового излучения:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\epsilon_{\text{н}} + 1/\epsilon_{\text{изд}} - 1},$$

где  $\epsilon_{\text{н}}$  и  $\epsilon_{\text{изд}}$  — коэффициенты теплового излучения материала нагревателя и материала изделия;  $w_s$  — удельная поверхностная мощность при теплообмене двух абсолютно черных тел.

Значения  $w_s$  в зависимости от температуры абсолютно черного нагревателя и абсолютно черного изделия даны семейством кривых на рис. 53.9.

В реальных условиях работы печи часть мощности нагревателя, равная тепловым потерям через стенку печи, поглощается футеровкой. Теплообмен излучением в камере печи с реальным нагревателем представляет собой сложную картину. Имеет место взаимное экранирование отдельных витков и секций (спирали, зигзаги) нагревателя. Если нагреватели укладываются в пазы на полочки, футеровка также частично экранирует нагреватели. Кроме того, внутренняя поверхность футеровки

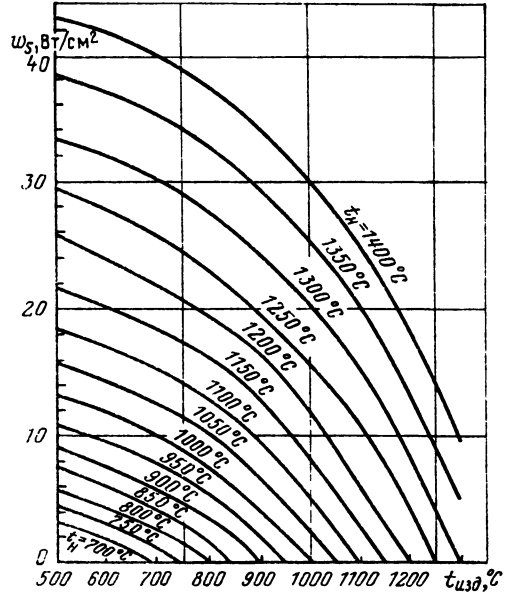


Рис. 53.9. Кривые удельной поверхностной мощности идеального абсолютно черного нагревателя

участвует в теплообмене с поверхностью нагреваемого изделия.

Эти факторы могут быть учтены коэффициентом эффективности излучения нагревателя  $\alpha_{\text{эф}}$ .

Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя

$$w_{\text{доп}} = \epsilon_{\text{пр}} w_s \alpha_{\text{эф}}.$$

Рекомендуемые значения  $\alpha_{\text{эф}}$  для различных конструкций нагревателей приведены ниже:

	$\alpha_{\text{эф}}$
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки . . . . .	0,16–0,24
Проволочные спирали на полочках и на трубках . . . . .	0,3–0,36
Проволочные зигзагообразные или стержневые . . . . .	0,6–0,72
Ленточные зигзагообразные . . . . .	0,38–0,44
Ленточные профилированные (ободовые) и литые . . . . .	0,56–0,7

Расчет нагревательных элементов можно вести, основываясь на имеющемся сортamente проволоки ленты или неметаллических стержней. Имея расчетное сопротивление фазовтви нагревателя  $R_{\phi} = U_{\phi}^2/P_{\text{н}}$  и выбирая из имеющегося в наличии материала размеры сечения проволоки, ленты или стержня, можно получить длину нагревателя на фазовтвь, м:

$$L_{\phi} = R_{\phi} f / \rho_{\text{гор}} = U_{\phi}^2 f / \rho_{\text{гор}} P_{\text{н}}.$$

Рассчитанный таким образом нагреватель проверяется на допустимую удельную поверхностную мощность

$$w_n = P_n/F_n.$$

Для проволоки и стержней круглого сечения

$$w_n = P_n/\pi d L_\phi,$$

а для ленты и стержней прямоугольного сечения

$$w_n = P_n/2(a + b) L_\phi.$$

Если полученное значение удельной поверхностной мощности меньше допустимого ( $w_n \leq w_{д}$ ), нагреватель выбран правильно. Если  $w_n > w_{д}$ , размер сечения нагревателя при данной схеме соединений нагревателя не подходит. В этом случае необходимо увеличить сечение и соответственно длину нагревателя, а при отсутствии возможности размещения такого нагревателя следует считать вынужденным уменьшение заданной мощности нагревателя.

При расчете нагревательных элементов следует иметь в виду, что для промышленных печей сопротивления с рабочей температурой выше  $700^\circ\text{C}$  проволоку диаметром меньше 3 мм и ленту тоньше 1,5 мм из-за малого срока их службы применять не рекомендуется.

Нагреватели из карборунда (КЭН) и дислицида молибдена (Дм) могут быть выбраны из имеющегося сортамента (табл. 53.15 и 53.16). Расчет сводится к определению количества нагревателей и их размещению в рабочем пространстве печи с последующей проверкой на допустимую удельную поверхностную мощность.

Расчет нагревателей низкотемпературных печей см. в [53.1].

#### Электрические печи и устройства прямого нагрева

При протекании тока через нагреваемый предмет в нем выделяется джоулево тепло, Дж,

$$Q = I^2 R \tau,$$

где  $I$  — ток, А;  $R$  — сопротивление предмета, Ом;  $\tau$  — время, с.

Печи прямого нагрева применяются для процесса графитизации угольных электродов, в стекловаренной промышленности, при производстве карборунда и др. Проектируются и изготавливаются печи прямого нагрева индивидуально для конкретных технологических процессов в соответствии с требуемым температурным режимом и заданной производитель-

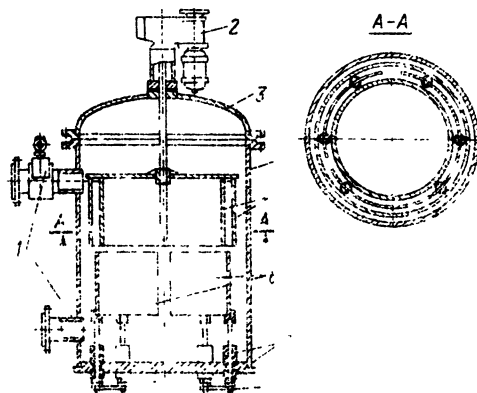


Рис. 53.10. Электродный водогрейный котел на напряжении 380 В:

1 — патрубки подвода и отвода воды; 2 — механизм перемещения антиэлектрода; 3 — крышка; 4 — корпус, 5 — антиэлектрод; 6 — электроды; 7 — изоляционные втулки; 8 — токоподвод

ностью. Устройства прямого нагрева применяются в штамповочном и кузнечном производствах для нагрева прутков, труб и деталей цилиндрической формы (табл. 53.4). Расчет установок прямого нагрева приведен в [53.5].

Разработан ряд конструкций установок для прямого нагрева под пластическую деформацию и термическую обработку стальных цилиндрических заготовок, прутков, труб, проволоки. Созданы также установки прямого нагрева для термической обработки изделий из тугоплавких и химически активных металлов в вакууме или защитной среде.

К установкам прямого нагрева относятся также электродные водогрейные типа КЭВЗ и паровые типа КЭП и котлы, нашедшие широкое применение для целей отопления и горячего водоснабжения.

Электродный водонагреватель (рис. 53.10) представляет собой теплоизолированный сосуд (котел) с патрубками для подвода и отвода воды.

Нагрев воды происходит за счет прохождения электрического тока на участке между фазовым электродом и антиэлектродом (нулевой точкой). Последний может перемещаться и тем самым обеспечивать регулирование мощности в широких пределах.

Отечественной электропромышленностью выпускаются трехфазные электродные водогрейные котлы типа КЭВЗ мощностью 25, 40, 60, 100, 250, 400 и 1000 кВт и паровые типа КЭП мощностью 25, 160, 250, 400 и 600 кВт. Питание этих котлов осуществляется от сети 380 В.

Таблица 53.4. Технические данные некоторых установок ВНИИЭТО прямого (электроконтактного) нагрева

Параметр	ОКБ-1383	ОКБ-1171	ОКБ-1355	ОКБ-1238	СКБ-5015	СКБ-5003	СКБ-7013
	Вакуумные установки						
	Нагрев стальных заготовок		Нагрев медной проволоки	Нагрев проволоки	Термообработка груб		
Размеры нагреваемых изделий, мм: сечение	60 × 120 2000—4000		Ø 1—4	Ø 3—8	Ø 19	Ø 70	30 × 30
длина	3000—4500		160	Нерывного действия	2500	1250	600
Мощность, кВт·А	500		600	180	132	132	270
Рабочая температура, °С	1150		1930	150—680	1200	1200	2900
Максимальная производительность, кг/ч	1300		35—50	1000	—	—	—
Напряжение на контактах, В	30—100		85	28—84	—	—	—
Средний коэффициент КПД, %	75		2150 × 1200	84	—	—	—
Габаритные размеры в плане	19440 × 4890		2500	2500 × 5000	2820 × 2780	2820 × 2780	4000 × 2800
высота	2300		—	1950	5240	3900	3700

Электрический расчет электродных водоподогревателей и паровых котлов приведен в [53.5].

### Электрическое оборудование и автоматическое регулирование температуры

Электрические печи сопротивления подключаются непосредственно к цеховой электросети 220, 380, 500 В или питаются от специальных понизительных трансформаторов — однофазных ТПО и ТПОУ и трехфазных ТПТ с первичным напряжением 380 и 220 В [53.6].

Для управления электрическими печами выпускается серия однозонных щитов управления (ИР, ИЗР, ИЗРП). Щит управления предназначен для дистанционного включения нагревателей, контроля и регулирования температуры одной тепловой зоны электрической печи [53.6].

Силовое оборудование щита состоит из трехполюсного автоматического выключателя для защиты от токов коротких замыканий, а также от возможных перегрузок, и трехполюсного силового контактора. В контрольно-регулирующую часть щита входят: прибор теплового контроля ПТК, промежуточный контактор РП, универсальный переключатель для включения нагревателей на ручной или автоматический режим работы, автоматический выключатель для отключения и защиты цепей управления и сигнальные лампы (рис. 53.11).

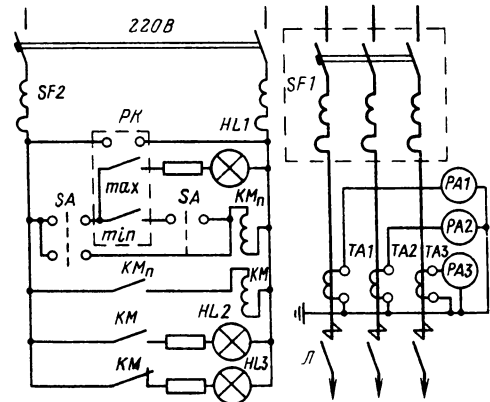


Рис. 53.11. Схема управления электрической зоной печи:

SF1 — выключатель автоматической силовой цепи, КМ — контактор; ТА1 — ТА3 — трансформаторы тока; ПА1 — ПА3 — амперметры; SF2 — автоматический выключатель цепей управления; PK — прибор теплового контроля; SA — универсальный переключатель; КМп — промежуточный контактор (реле); HL1 — HL3 — сигнальные лампы

Щиты различаются:

- 1) по току в главной цепи 90, 140, 200 и 350 А;
- 2) по типу прибора теплового контроля;
- 3) по наличию приборов контроля тока и напряжения;
- 4) по наличию дополнительной аппаратуры для включения электродвигателей вспомогательных механизмов печи и для работы печи с защитной атмосферой.

Щиты управления изготавливаются в виде шкафов закрытого типа с обслуживанием со стороны фасада. Габаритные размеры щита: в плане 700 × 574 мм, высота 1900 мм.

При большом количестве регулируемых тепловых зон вместо указанных типовых щитов управления могут применяться контрольно-распределительные пункты КРП, в которых сосредоточивается аппаратура управления и теплового контроля.

### 53.2. ДУГОВЫЕ ПЕЧИ И УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

#### Дуговые трехфазные печи прямого действия для плавки стали

В печах этого вида тепловая энергия выделяется в электрических дугах, горящих между графитированными или угольными электродами и поверхностью расплавляемого металла.

По характеру загрузки в печь твердой шихты (металлолома) дуговые сталеплавильные печи (ДСП) подразделяются на:

- а) *печи с боковой загрузкой* через рабочее окно (вручную или при помощи грузоподъемных средств с использованием завалочных машин или кранов с приспособлениями в виде лотков) (рис. 53.12);
- б) *печи с верхней загрузкой* краном при помощи специальных загрузочных корзин (бадей). Для обеспечения возможности загрузки сверху печь должна быть оборудована механизмами подъема свода и раскрытия ванны (рис. 53.13).

Основными элементами любой ДСП являются:

- 1) футерованный кожух печи (ванна) с рабочим окном и сливным носком;
- 2) свод печи с футеровкой;
- 3) комплект электрододержателей с электрическими или гидравлическими приводами механизмов перемещения электродов;
- 4) механизм наклона печи с электрическим или гидравлическим приводом;

5) вторичный токопровод от выводов печного трансформатора до электродов включительно (короткая сеть).

Печь с верхней загрузкой помимо перечисленных выше основных элементов имеет механизм подъема свода в сочетании с механизмом поворота свода или выката ванны, а также загрузочную корзину (бадью).

В ДСП при значительной глубине ванны жидкого металла, находящегося в спокойном состоянии, имеет место существенная разность температур по высоте (порядка 100 °С/м). В таких условиях для интенсификации протекания реакций металла со шлаком и для обеспечения возможности подогрева металла перед разливкой необходимо обеспечивать перемешивание жидкого металла. На печах малой емкости (до 6 т) это осуществляется ручным способом, но на печах средней (12–50 т) и особенно большой емкости (100 т и выше) ручное перемешивание ванны весьма затруднительно.

Для облегчения труда сталеваров и для повышения качества выплавляемого металла иногда применяется *устройство для электромагнитного перемешивания жидкого металла* (ЭМП) по принципу, аналогичному принципу работы короткозамкнутого асинхронного двигателя. Бегущее магнитное поле, создаваемое помещенным под немагнитным днищем печи статором переменного тока частотой порядка 0,5–1,0 Гц с двумя обмотками, токи в которых сдвинуты по фазе на 90°, вызывает в металле ванны механические усилия в направлении продольной оси печи. За счет переключения обмоток можно изменять направление движения металла на обратное.

Из современных ДСП с верхней загрузкой наиболее распространенными являются печи с поворотным сводом, однако в отечественной промышленности успешно эксплуатируется весьма значительное количество печей с выкатывающейся ванной емкостью от 3 до 50 т.

Важнейшими параметрами ДСП являются диаметр кожуха, определяемый исходя из номинальной емкости печи; мощность печного трансформатора.

Номинальной емкостью печи является расчетная емкость ее ванны, выраженная в тоннах выпускаемого из печи жидкого металла.

Мощность печного трансформатора оказывает решающее влияние на длительность расплавления загрузки, что в значительной мере определяет производительность печи.

Применительно к современной тенденции замены мартеновского способа плавки стали конвертерным и электропечным в мировой практике нашли широкое распространение ДСП емкостью 100–200 т, а в отдельных

случаях и выше, оснащенные трансформаторами высокой и сверхвысокой мощности.

По уровню максимальной активной мощности в период расплавления, отнесенной к 1 т жидкого металла, ДСП принято разделять на обычные, высокой и сверхвысокой мощности.

**Водоохлаждаемые элементы футеровки ДСП.** Возможность широкого распространения

ДСП высокой и сверхвысокой мощности в значительной мере зависит от обеспечения приемлемой стойкости футеровки стен и свода. Это особенно важно с учетом перспективы применения в электросталеплавильном производстве непрерывной загрузки в печь металлизированных окатышей (предварительно восстановленного и окомкованного агломерата железной руды).

*вид сверху*

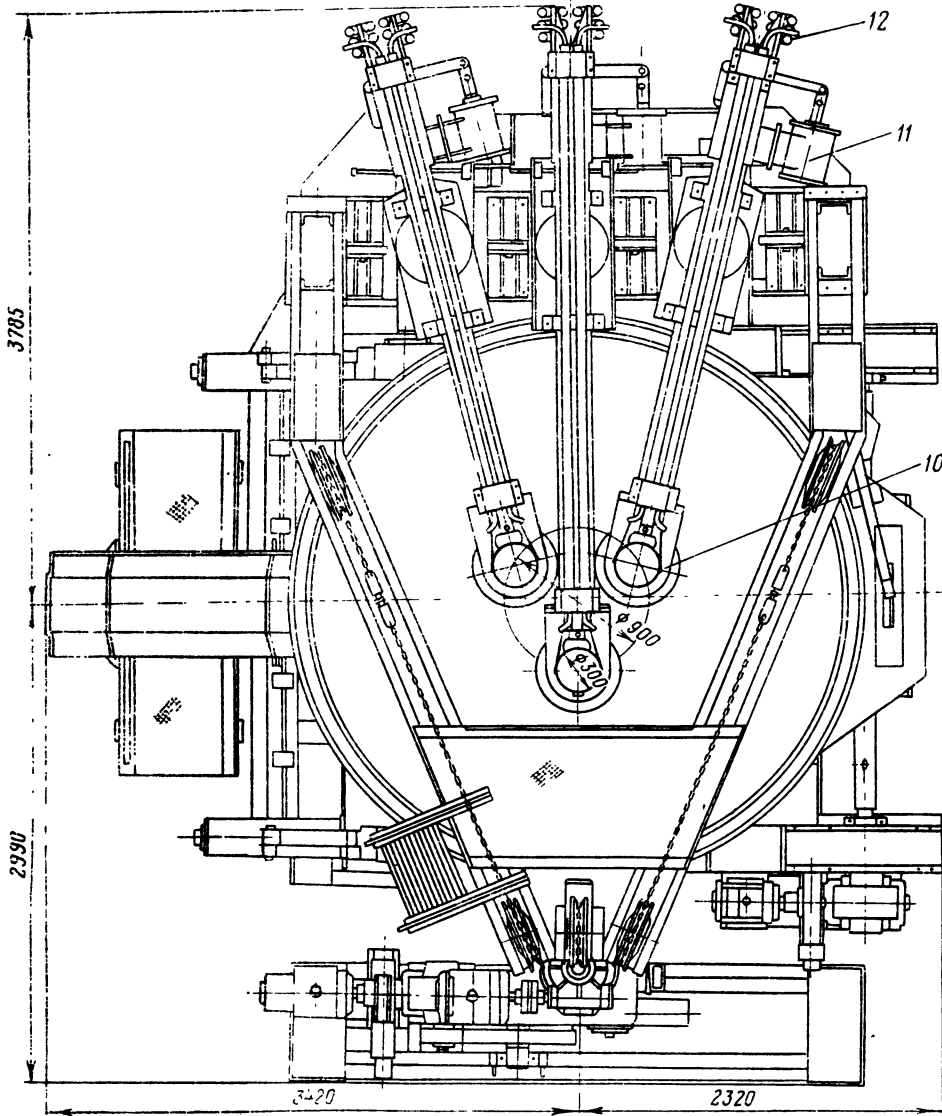
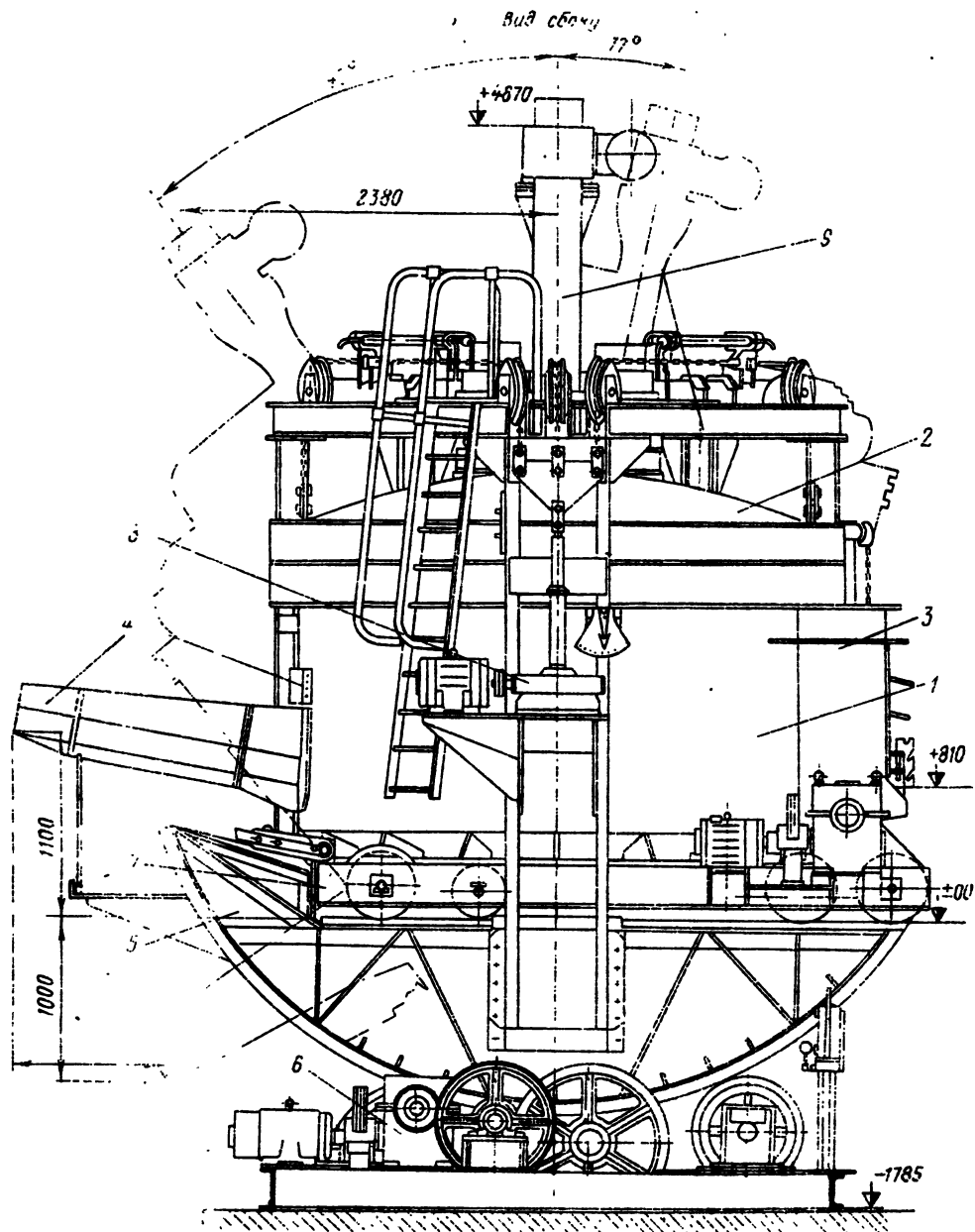


Рис. 53.12. Сталеплавильная электропечь типа ДС-5МП (ДС-6Н1):

1 — кожух, 2 — свод, 3 — рабочее окно, 4 — сливной носок, 5 — июлька, 6 — механизм наклона печи, 11 — механизм перемещения электрода, 12 — токоподвод

Разнообразные конструкции водоохлаждаемых элементов футеровки ДСП можно разделить на два типа: а) *коробчатые* («кессонные»), выполняемые из толстолистовой стали; б) *трубчатые*, выполняемые из толстостенных цельнотянутых стальных труб. Каждому из

этих двух типов свойственны определенные преимущества и недостатки. С целью снижения тепловых потерь к внутренней поверхности водоохлаждаемого элемента стен или свода приваривается различного рода арматура для удержания первичной огнеупорной обмазки и



7 — механизм отката ванны. 8 — механизм подъема свода. 9 — электрод. 10 — электрододержатель.



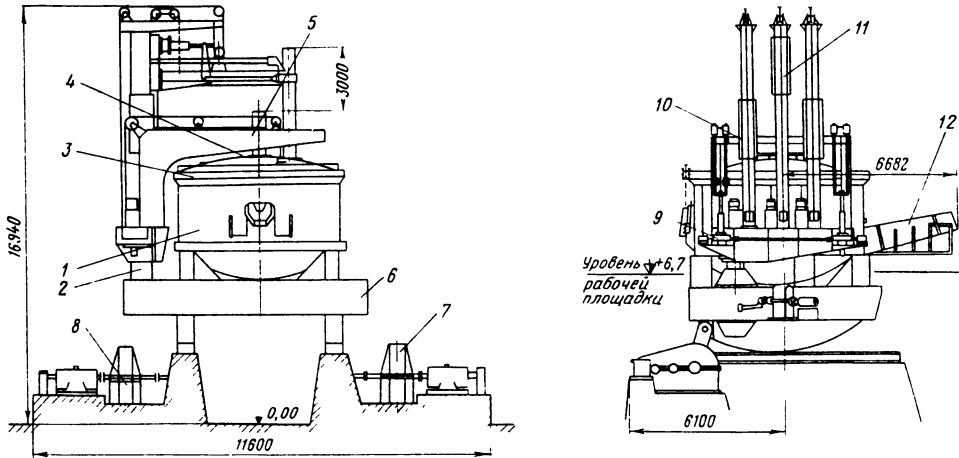


Рис. 53.13. Дуговая сталеплавильная электропечь емкостью 100 т:

1 – кожух; 2 – электродная стойка; 3 – сводовое кольцо; 4 – футеровка свода; 5 – портал; 6 – люлька с механизмами; 7, 8 – привод наклона; 9 – механизм подъема свода; 10, 11 – механизм перемещения электрода; 12 – сливной носок

последующего гарнисажа (застывшего расплава), самопроизвольно налипающего в процессе эксплуатации.

С 1982 г. на нескольких печах ДСП-100НЗА, а с 1984 г. и на печах ДСП-100И6 находятся в эксплуатации трубчатые водоохлаждаемые панели оригинальной конструкции, разработанной в СКБ производственного объединения «Сибэлектротерм». Особенностью этой конструкции является минимально возможное количество сварных швов, за счет чего обеспечивается высокая степень надежности работы панелей (взамен большого количества сварных стыков выполняется гибка труб на специальных приспособлениях).

ГОСТ 7206-80 устанавливает для отечественных ДСП следующий ряд номинальных емкостей, т: 0,5–1,5–3–6–12–25–50–100–150–200.

Для питания ДСП Московским электрозаводом им. В. В. Куйбышева разработаны и поставляются печные трансформаторы в широком диапазоне мощностей.

Основные технические данные ДСП отечественного производства приведены в табл. 53.5.

В конструктивном отношении эти печи характеризуются следующими основными чертами. Печи типов ДСП-6, ДСП-12, ДСП-25, ДСП-50 и ДСП-100И6 с гидравлическими приводами механизмов перемещения электродов имеют механизмы подъема и поворота свода на отдельных опорах с гидравлическими приводами. Печи типов ДСП-0,5, ДСП-1,5 и ДСП-3

с аналогичными по конструктивной схеме механизмами подъема и поворота свода выпускаются с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов.

Печи ДСП-100М1 и ДСП-200М1 с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов имеют механизмы подъема и поворота свода с электромеханическими приводами, смонтированные на люльке печи.

В отличие от печи ДСП-100М1 в печи ДСП-100НЗА все механизмы, включая механизмы перемещения электродов, выполнены с гидравлическим приводом.

Взамен печи ДСП-100НЗА с 1982 г. выпускается печь ДСП-100И6, отличающаяся следующими основными особенностями:

- 1) подъем и поворот свода осуществляется не на люльке печи, а на отдельно расположенной поворотной платформе с хвостовым шарниром и дугообразной рельсовой опорой;
- 2) печь оснащена водоохлаждаемыми элементами стен и свода;

- 3) в комплект поставки печи входят газокислородные горелки, основным назначением которых является ускорение расплавления металла за счет подвода тепловой энергии сжигания природного газа к участкам загрузки на периферии ванны, наиболее удаленным от электрических дуг.

Из печей с выкатывающейся ванной в настоящее время отечественной промышленностью выпускается только печь ДС-6Н1 (представляющая собой несколько измененную конструкцию широко распространенной печи

Таблица 53.5. Основные технические данные ДСП

Параметр	ДСП-0,5ИЗ	ДСП-1,5ИЗ	ДСП-3ИЗ	ДС-6Н1	ДСП-6Н2	ДСП-12Н2	ДСП-25Н2	ДСП-50Н2	ДСП-100М1	ДСП-100НЗА	ДСП-100И6	ДСП-200М1
Номинальная емкость, т	0,5	1,5	3	6	6	12	25	50	100	100	100	200
Диаметр кожуха на уровне откосов, мм	1720	2400	2950	3200	3300	4260	4700	5800	6750	6900	7200	8500
Мощность трансформатора, МВ·А	0,63	1,25	2,0	4,0*	4,0*	8,0*	12,5*	20*	32*	50*	80**	60
Пределы вторичного напряжения, В	216–106	225–110	243–124	281–130	281–130	380–120	390–130	420–155	478–161	574–287	761–259	695–193
Максимальный вторичный ток, кА	1,68	3,2	4,8	10	10	14,6	22,2	33	46,5	63,5	66	50
Диаметр графитированного электрода, мм	150	200	200	300	300	350	400	500	555	610	610	610
Диаметр ванны на уровне откосов, мм	1050	1500	1800	2280	2320	2740	3540	4560	5450	5600	5900	7100
Глубина ванны от уровня порога, мм	205	360	400	425	400	555	775	890	1150	1100	1100	1480
Высота плавильного пространства (от уровня порога до верха кожуха), мм	570	900	1050	1200	1100	1365	1500	1950	2070	2070	2070	3200
Расход электроэнергии на расплавление твердой завадки, кВт·ч/т	560	535	515	480	480	445	435	425	420	405	420	400
Расчетный расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	3	10	15	25	20	30	35	40	60	90	500	120
Масса металлоконструкций, т	5	21	23	50	50	90	168	276	450	460	520	1200

\* С возможностью перегрузки до 20% на период расплавления.

\*\* Этот же трансформатор предполагается в дальнейшем использовать для печей емкостью 150 т. Возможность перегрузки – 12,5%.

ДС-5МТ) с электромеханическими приводами всех основных механизмов.

Каждая ДСП имеет специальную подстанцию, размещаемую в непосредственной близости от печи. На подстанции устанавливается силовое оборудование (электропечной трансформатор, высоковольтный выключатель, разъединитель), а также аппаратура управления, защиты и контроля. Характеристика электрооборудования и его компоновка даны в [53.6].

Для поддержания мощности печи на требуемом уровне применяются автоматические электромашинные регуляторы типа РМД, регуляторы типа АРДМ с электромагнитными усилителями и тиристорные регуляторы типа АРДМ-Т. Регуляторы этих типов, воздействуя на электродвигатели механизмов перемещения

электродов, поддерживают заданное соотношение тока и напряжения дуги (т. е. в конечном счете длину дуги), чем определяется требуемая мощность печи. ДСП с гидравлическими приводами механизмов перемещения электродов комплектуются электрогидравлическими регуляторами типа АРДГ. Технические данные и характеристики автоматических регуляторов мощности ДСП см. в [53.6].

#### Рудовосстановительные печи

В рудовосстановительной печи (РВП) выделение тепла осуществляется двумя способами – за счет горения электрических дуг и за счет протекания тока через загрузку. В различных процессах соотношение мощности, выделяемой этими двумя способами нагрева, су-

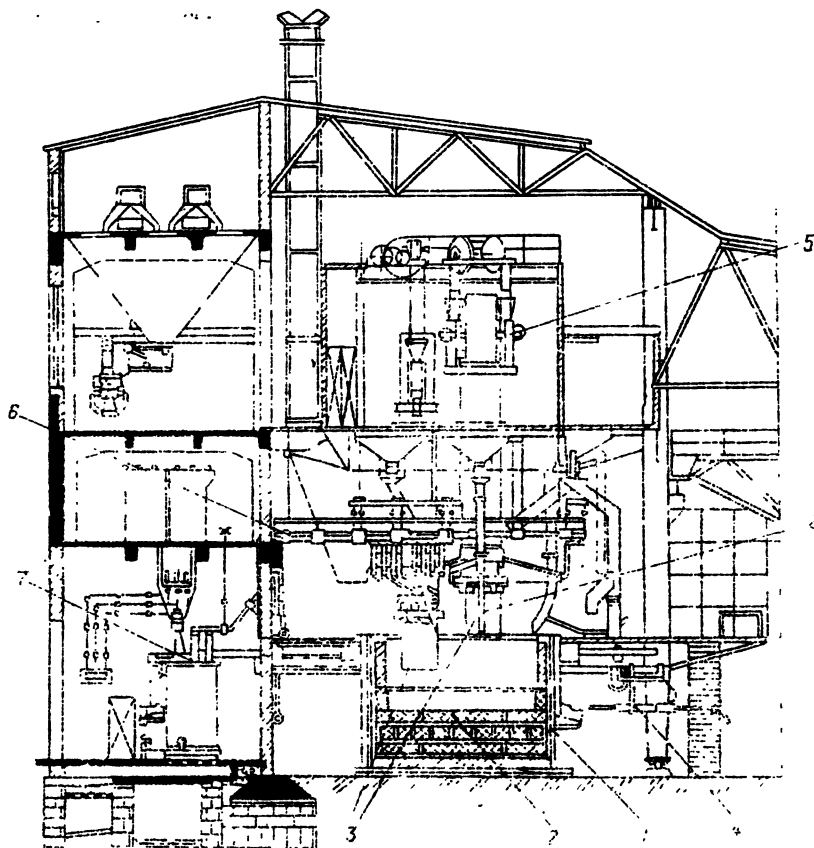


Рис. 53.14. Электродная печь для выплавки ферросплавов (компоновка оборудования):  
 1 — кожух печи; 2 — футеровка; 3 — электроды; 4 — аппарат для прожига летки; 5 — лебедка для подвески и перемещения электрода; 6 — токоподвод; 7 — печной трансформатор; 8 — трубы для загрузки шихты

шественно различно. РВП нашли широкое применение для восстановительных процессов выплавки ферросплавов и чугуна, получения никелевого штейна, карбида кальция, фосфора и электрокорунда. Для печей этого назначения характерны большие мощности (до 80 МВ·А в единице). Подавляющее большинство РВП работают с *набивными самообжигающимися* электродами, которые в обожженном состоянии по своим физическим свойствам близки к обычным угольным электродам. Самообжигающийся электрод представляет собой кожух из тонколистовой стали, заполняемый электродной массой. Самообжигающиеся электроды подвешиваются вместе с электрододержателями к лебедкам с электромеханическим приводом или гидравлическим подъемникам (рис. 53.14).

РВП, как правило, работают как печи непрерывного действия. Шихта подается сверху

на колошник печи, а продукты плавки (жидкий сплав и шлак) периодически сливаются через открывающиеся летки в нижней части печи без наклона ванны. В закрытых РВП ванна перекрыта сводом, через который проходят электроды и воронки или трубы для загрузки шихты. Для некоторых процессов, протекающих с полным проплавлением шихты, применяются печи, работающие в явно выраженном дуговом режиме, близком к режиму дуговой сталеплавильной печи. Печи этого назначения имеют мощность 2,5–5 МВ·А (например, печи типа РКО-3,5 для получения малоуглеродистого феррохрома) и обычно выполняются с механизмом наклона ванны [53.3; 53.6].

В табл. 53.6 приведены основные технические данные некоторых рудовосстановительных печей. Рудовосстановительные и рудоплавильные процессы характеризуются весьма высоким удельным расходом электроэнергии. При про-

Таблица 53.6. Основные технические данные некоторых рудовосстановительных печей

Тип	Основное назначение	Мощность, МВ·А	Пределы вторичного напряжения, В	Максимальный вторичный ток, кА	Размеры ванны, м		Примечание
					Диаметр	Глубина	
РКО-2,5	Выплавка малоуглеродистого ферромарганца	2,5	178–89	13	2,7	1,2	—
РКО-3,5	Выплавка рафинированного феррохрома	3,5	371–260	7	2,5	1,1	Плавка в дуговом режиме
РКО-4,5	Выплавка рудно-известкового расплава для получения рафинированного феррохрома	4,5	178–89	20	3,5	1,34	
РКО-16,5	Выплавка 75 %- и 90 %-ного ферросилиция, силикомарганца, а также углеродистого и перелдального феррохрома	16,5	204–131	59	6,1	2,3	—
РКЗ-16,5	Выплавка 45 %- и 65 %-ного ферросилиция, а также силикомарганца	16,5	204–131	59	6,63	2,8	—
РКО-25	Тоже, что и РКЗ-16,5	25	230–140	89	7,0	3,0	—
РКЗ-33	Выплавка 45 %-ного ферросилиция, силикохрома, силикомарганца, углеродистого и перелдального феррохрома	33	287–147	111	8,4	3,5	—
РКЗ-48	Возгонка желтого фосфора	48	500–100	65	8,5	4,35	—
РКЗ-80	Возгонка желтого фосфора	80	649–149	92	16,86	6,76	—
РПЗ-48	Выплавка марганцевых сплавов	48	238–137	112	20,4 × 7,1	4,5	Прямоугольная ванна с шестью электродами
РПЗ-63	Выплавка марганцевых сплавов	63	228–148	119	23 × 8,2	4,5	

изготовлении ферросплавов удельный расход электроэнергии обычно составляет 3000–9000 кВт·ч/т, а при получении некоторых материалов – значительно больше, например при производстве силикоалюминия 12 000–13 000, фосфора 13 000–15 000, карбида бора 20 000–22 000 кВт·ч/т.

Эксплуатационные значения КПД для РВП достигают 0,9–0,95. Коэффициент мощности печей обычно находится в пределах 0,75–0,95.

РВП с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов, предназначенные для технологических процессов с полным проплавлением шихты в дуговом режиме (например, РКО-3,5), комплектуются регуляторами мощности типа РМД.

РВП с электромеханическими приводами механизмов перемещения электродов, предназначенные для рудовосстановительных процессов со спокойным режимом, комплектуются релейно-контакторными регуляторами мощности типа ПДВ.

Печи с гидравлическими механизмами пе-

ремещения электродов работают с электрогидравлическими регуляторами мощности типа АРДГ-3 (трехэлектродные печи) или АРДГ-6 (шестизлектродные печи).

#### Дуговые однофазные печи косвенного действия

Дуговые печи косвенного действия применяются главным образом для плавки цветных металлов и изредка – чугуна. Конструктивно дуговая печь косвенного действия (рис. 53.15) в своей основе представляет собой цилиндрический или бочкообразный футерованный кожух, уложенный горизонтально на четыре роликовые опоры. Через отверстия в торцевых стенках по продольной оси в печь входят два графитированных электрода, между которыми горит электрическая дуга. Печь имеет одно окно, через которое производится загрузка шихты, а также слив расплавленного металла и шлака.

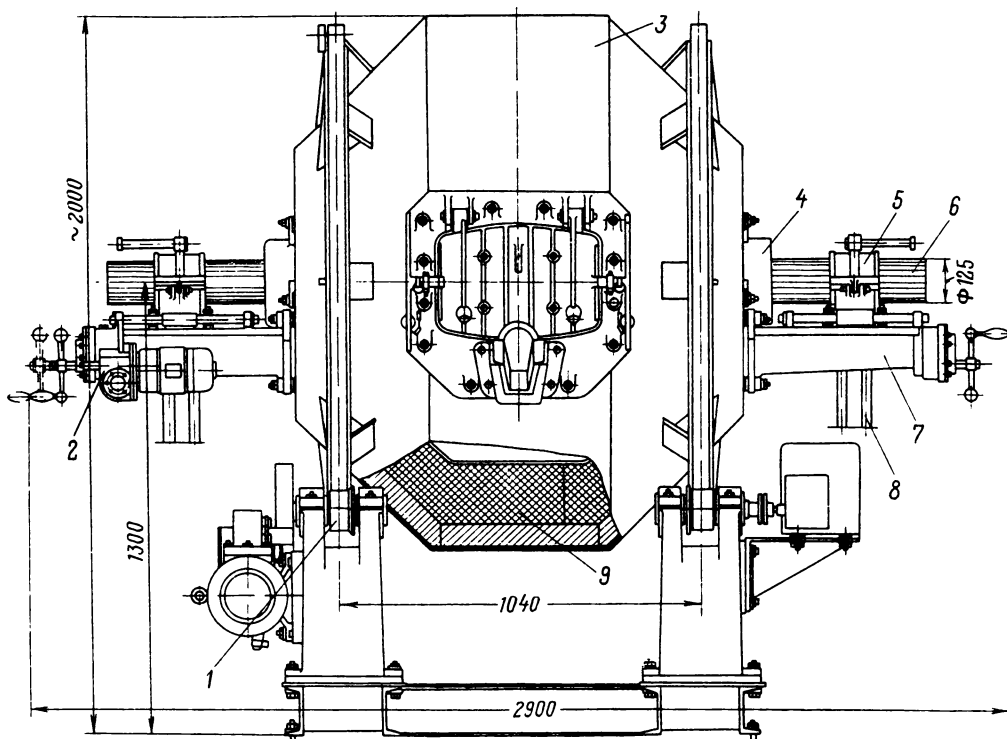


Рис. 53.15. Дуговая электропечь косвенного действия типа ДМБ-0,5:

1 — механизм качания; 2 — механизм перемещения электрода; 3 — кожух; 4 — уплотнение электрода; 5 — электрододержатель; 6 — электрод; 7 — механизм ручного передвижения электрода; 8 — гибкий токоподвод; 9 — футеровка

После расплавления некоторой части загрузки кожух печи приводится специальным механизмом в непрерывное качание на заданный максимальный угол ( $\pm 30$ ;  $\pm 45$ ;  $\pm 60^\circ$ ) с автоматическим реверсированием, причем угол качания может увеличиваться по заданной программе по мере расплавления металла. Помимо ускорения расплавления за счет омывания жидким металлом нерасплавленной части шихты качание ванны печи обеспечивает защиту огнеупорной кладки жидким металлом от чрезмерного перегрева излучением близко расположенной электрической дуги.

Для поддержания заданной мощности печи применяются механизм и аппаратура автоматического управления перемещением одного электрода. Другой электрод по мере необходимости перемещается вручную.

Отечественной электропромышленностью выпускаются дуговые однофазные печи косвенного действия двух типоразмеров — ДМБ-0,25 и ДМБ-0,5.

Основные технические данные этих печей приведены в табл. 53.7.

Таблица 53.7. Основные технические данные печей ДМБ

Показатель	ДМБ-0,25	ДМБ-0,5
Номинальная емкость, т	0,25	0,5
Мощность трансформатора, кВт·А	250	400
Вторичное напряжение трансформатора, В	115, 105, 95	130, 115; 100
Максимальный ток печи, А	2170	3080
Реактивность встроенного реактора, %	25; 20; 15	20; 15; 10
Диаметр графитированного электрода, мм	100	125
Скорость перемещения электрода, м/мин	0,12	0,12
Диаметр кожуха печи (внутренний), мм	1180	1530
Расчетный диаметр плавильного пространства, мм	800	1000
Расчетный удельный расход электроэнергии на расплавление, кВт·ч/т:		
при плавке бронзы	360	320
при плавке чугуна	510	450

**Вакуумные дуговые печи (ВДП)**

Вакуумные дуговые печи (ВДП) применяются:

- а) для получения слитков химически активных металлов и сплавов;
- б) для получения слитков тугоплавких и редких металлов;
- в) для выплавки стали повышенной прочности (дегазированной и практически свобод-

ной от неметаллических включений), применяемой главным образом для производства приборных и высокоскоростных подшипников.

Высокая концентрация энергии электрической дуги, отсутствие окисления и загрязнения расплава материалами футеровки и электродов – основные преимущества ВДП как плавильного агрегата. Плавка в ВДП обеспечивает получение высококачественных металлов и сплавов с заданными свойствами для

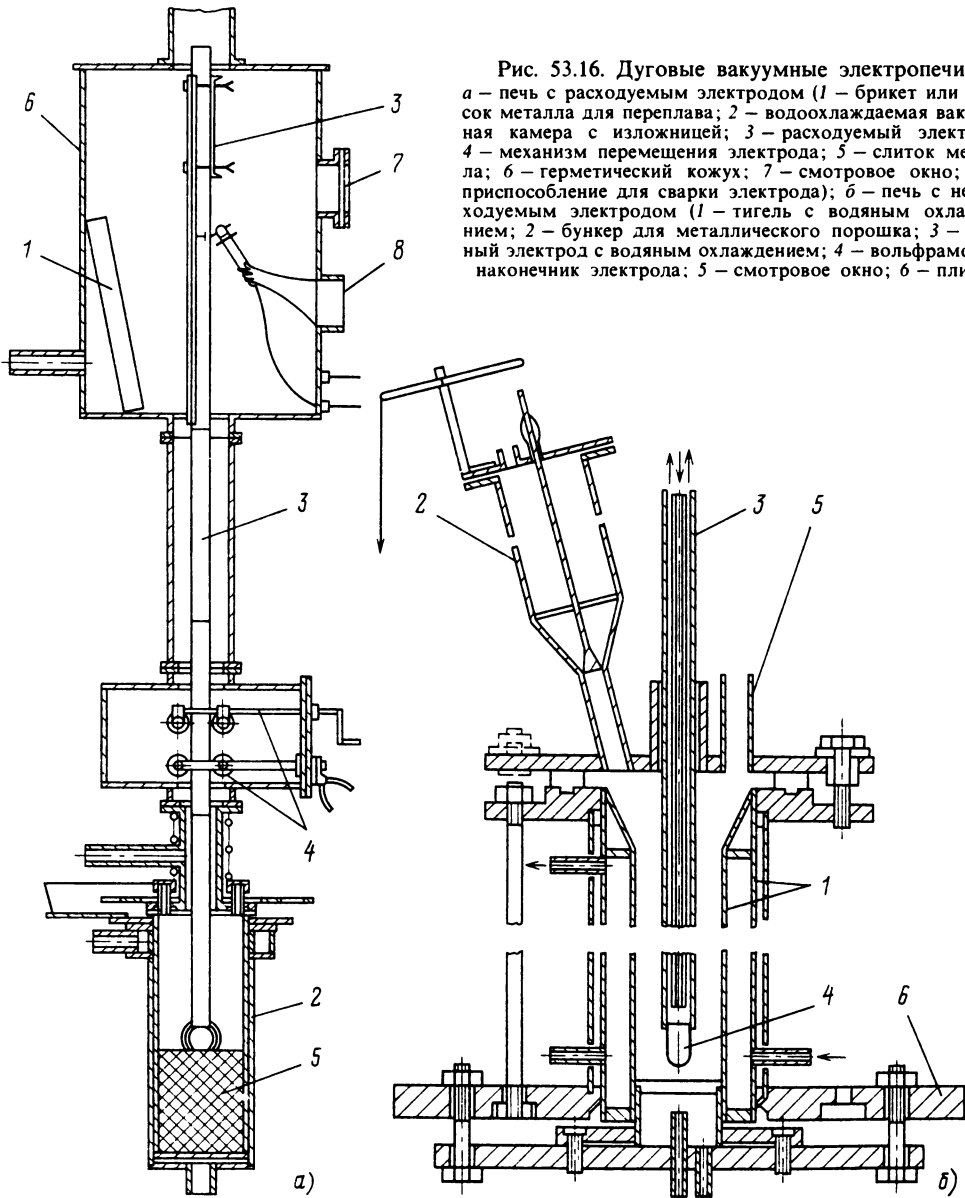


Рис. 53.16. Дуговые вакуумные электропечи:

а – печь с расходуемым электродом (1 – брикет или брусок металла для переплава; 2 – водоохлаждаемая вакуумная камера с изложницей; 3 – расходуемый электрод; 4 – механизм перемещения электрода; 5 – слиток металла; 6 – герметический кожух; 7 – смотровое окно; 8 – приспособление для сварки электрода); б – печь с нерасходуемым электродом (1 – тигель с водяным охлаждением; 2 – бункер для металлического порошка; 3 – медный электрод с водяным охлаждением; 4 – вольфрамовый наконечник электрода; 5 – смотровое окно; 6 – плита)

новых видов техники, в том числе космической и атомной.

Существуют две разновидности ВДП (рис. 53.16):

1) *печи с расходуемым электродом* — имеют электрод из переплавляемого материала (слиток или брусок);

2) *печи с нерасходуемым электродом* — переплавляют шихту, подаваемую из загрузочного бункера в зону дуги. Электрод выполняется графитовым или медным водоохлаждаемым с вольфрамовым наконечником. Печи с нерасходуемым электродом не могут обеспечить высокого качества переплавляемого металла, так как получаемый слиток загрязняется материалом электрода, поэтому основное промышленное применение получили печи с расходуемым электродом.

Печь с расходуемым электродом имеет следующие основные элементы конструкции:

1) изложницу-кристаллизатор, выполняемую в виде медной трубы (круглого, овального или прямоугольного сечения), окруженной водяной рубашкой. В некоторых конструкциях наружная стенка рубашки делается из немагнитного материала и на ней размещается соленоид. Назначение соленоида — концентрировать дугу по оси кристаллизатора и способствовать перемешиванию металла в жидкой ванне;

2) механизм подвески и перемещения электрода. Система подвески делается гибкой (тросами или цепями) или жесткой (винтовой или реечный механизм). Скорость перемещения электрода 20–300 мм/мин;

3) рабочую камеру, включающую шлюзовое устройство и бункер;

4) вакуумную систему, состоящую из вакуумных насосов, трубопроводов, измерительных приборов и другого вакуумного оборудования.

Печи могут также иметь различные механизмы для выгрузки слитка, загрузки электрода, вытягивания слитка.

Питание ВДП преимущественно осуществляется постоянным током. В качестве источников питания применяются вращающиеся преобразователи, полупроводниковые преобразовательные агрегаты типа ТВ-9 и параметрические источники тока (ПИТ) [53.6].

Автоматическое ведение процесса переплава в ВДП обеспечивается специальной системой регулирования или стабилизации тока и автоматическим регулятором дугового промежутка типа АРДВ-Р2 [53.6].

Для получения фасонного литья и полых заготовок в промышленности находят применение вакуумные дуговые *гарнисажные печи* ВДПГ. Печи этого типа имеют ванну жид-

кого металла, изолированную от водоохлаждаемого или графитового тигля слоем затвердевшего металла (гарнисажем). По окончании плавки металл выливается из ванны в изложницу или форму полностью (печь периодического действия) или за несколько приемов в несколько форм (печь полунепрерывного действия).

Возможен также и непрерывный процесс плавления и разливки.

Технические характеристики некоторых отечественных ВДП приведены в табл. 53.8.

Описания конструкций различных типов ВДП, методики расчета их основных параметров, разбор различных источников питания и схем автоматического регулирования приведены в [53.14].

### Установки электрошлакового переплава

Способ электрошлакового переплава (ЭШП) разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР на основе принципа электрошлаковой сварки [53.4].

Сущность этого способа заключается в следующем. Переплавляемый металл — электрод в виде слитка прямоугольного, квадратного или круглого сечения, полученного разливкой из обычного сталеплавильного агрегата (мартеновской печи, конвертера или ДСП), опускается в водоохлаждаемый кристаллизатор, в котором наведен жидкий шлак. Металл электрода плавится в рафинирующей среде — жидком шлаке, температура которого поддерживается на уровне около 1800–2000 °С за счет джоулева тепла, выделяемого при протекании через шлак тока. Шлак, таким образом, является жидким нагревателем. При этом происходит равномерная очистка металла от многих вредных примесей, а направленная кристаллизация улучшает его механические свойства. В результате переплава получается высококачественный металл с заданным химическим составом и улучшенной структурой.

В установках ЭШП получают слитки различных размеров и форм поперечного сечения — круглой, квадратной, прямоугольной и др. Наряду со слитками сплошного сечения имеется возможность получения пустотелых слитков, а также фасонных отливок.

Питание установок ЭШП осуществляется переменным током — однофазным и трехфазным. Исследования показали, что при постоянном токе возможны процессы электролиза отдельных составляющих шлака и не обеспечивается требуемое рафинирование металла.

По схемам включения установки ЭШП классифицируются следующим образом: а) од-

Таблица 53.8. Технические данные ВДП постоянного тока с расходуемым электродом

Наименование и назначение печи	Тип печи	Напряжение, В	Максимальный ток, А	Максимальные размеры, мм				Максимальная масса слитка, кг	Скорость расплавления, кг/мин	Остаточное давление, Па	Масса печи, т
				электрод		слитка					
				Диаметр	Длина	Диаметр	Длина				
Для плавки стали и жаропрочных сплавов	ДСВ-3,2-Г-1	75	12500	220	3550	320	1750	1000	2,5—5,4	0,13	23
	ДСВ-4,5-Г-2	75	12500	360	2750	450	1900	2000	3,1—3,8	0,13	50
	ДСВ-6,3-Г-6	75	25000	500	4550	630	2700	6300	3,3—11	0,13	35
	ДСВ-8-Г-10	75	25000	700	3550	800	2900	10000	4—12	0,13	80
	ДСВ-8-Г-16	75	25000	660	6400	820	4000	17000	6—14	0,13	90
Для плавки титана и его сплавов	ДТВ-11,2-Г-37	75	37500	900	7600	1120	5000	37000	6,3—19,2	0,13	135
	ДТВ-6,5-Г-6	75	25000	550	5400	650	4000	5500	9—22	2,6	118
	ДТВ-8,7-Г-10	75	37500	750	5100	870	4000	10300	11,5—31	2,6	120
Для плавки молибдена и его сплавов	ДТВ-14-Г-26	75	50000	1225	5100	1400	4000	26500	23—45	2,6	200
	ДДВ-1,4-В-0,1	75	12500	90	1000	140	420	110	2—6,5	0,0065	6,7
	ДДВ-2,5-В-0,6	75	12500	160	1715	250	835	570	2—6,5	0,0065	20
	ДНВ-2,5-В-0,6	75	12500	200	3000	250	1100	530	2—3,5	0,0065	60
	Гарнисажные для получения фасонных отливок из титана и его сплавов	ДТВГ-0,06ПФ	28—33	14000	200	500	600 × 600 × 400	1	6—8	1,3	36,6
ДТВГ-0,16ПФ		28—33	14000	300	500	800 × 600 × 400	5	6—3	1,3	36,6	
ДТВГ-0,25ПФ		38—40	25000	465	485	1000 × 800 × 1200	4	10—15	0,65	42	
ДТВГ-0,6ПЦ		75	37000	600	1000	∅ 1850 × 1600	2	10—20	0,65	61	
ДРВГ-0,025ПЦ		75	12500	50 × 50	1000	∅ 1500 × 1000	1	3—5	0,1	15	
Гарнисажная для плавки вольфрама	ДРВГ-0,06П	75	37500	100	1800	∅ 300 × 250	1	1—2	0,13	40	
Гарнисажная для плавки литого карбида вольфрама	ДХВГ-0,25ПЦ	75	75000	180	1500	∅ 1500 × 900	1	4	0,65	60	

Примечание. Расшифровка обозначений типов печей: первая буква Д — дуговая; вторая буква В — выплавляемый металл; С — сталь; Т — титан; Д — молибден; Н — ниобий; Р — вольфрам; Х — тантал; третья буква В — вакуумная; четвертая буква Г — гарнисажная; Буквы после цифр характеризуют особенности процесса плавки: Г — плавка в глухой кристаллизатор; В — плавка с вытягиванием слитка из кристаллизатора; ПФ — плавка в форму; П — непрерывный процесс плавки со сбрасыванием застывшей порции в накопитель; ПЦ — плавка с центральной отливкой. Цифры, следующие через дефис за третьей буквой обозначения В, означают максимальный диаметр слитка в дециметрах; цифры, следующие через дефис за буквой В или Г в конце обозначения, означают максимальную массу слитка в тоннах. Для гарнисажных печей цифры, следующие через тире за четвертой буквой Г, означают максимальную массу наплавляемого металла в тоннах.



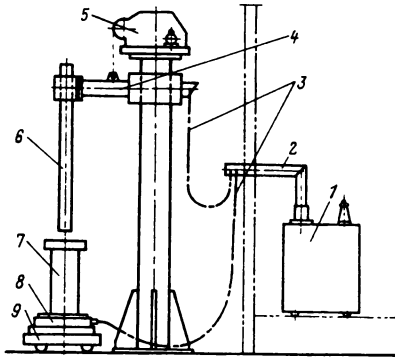


Рис. 53.17. Схема устройства установки электрошлакового переплава:

1 — печной трансформатор; 2 — ошиновка НН; 3 — гибкий токоподвод; 4 — электрододержатель; 5 — механизм перемещения электрода; 6 — расходный электрод; 7 — кристаллизатор; 8 — поддон; 9 — тележка с механизмом передвижения

нофазная с одним электродом с подводом тока к поддону (рис. 53.17); б) однофазная с двумя электродами в одном кристаллизаторе без подвода тока к поддону; в) трехфазная с тремя электродами в одном кристаллизаторе.

Примерами установок по схеме «а» являются: установка Р-951 с трансформатором мощностью 700 кВ·А для выплавки слитков массой до 1,5 т, установка ОКБ-1065 с трансформатором мощностью 1000 кВ·А для выплавки слитков массой до 4 т и установка ОКБ-1111 с трансформатором мощностью 8000 кВ·А для выплавки слитков массой до 60 т.

Установка по схеме «а» с длинным некомпенсированным вторичным токопроводом, обладающим высоким индуктивным сопротивлением, работает в ряде случаев с весьма невысоким коэффициентом мощности, что снижает ее технико-экономические показатели. Существенное повышение производительности и снижение удельного расхода электроэнергии достигается при последовательном соединении двух рядом расположенных одноэлектродных установок (опыт завода «Серп и молот» в Москве).

Однофазная установка ЭШП-10 ВГ (ОКБ-1429) с трансформатором мощностью 2500 кВ·А для выплавки слитков массой до 10 т различной формы поперечного сечения может работать как по схеме «а» с одним электродом, так и по схеме «в» с двумя электродами. Аналогичные установки ЭШП-16 ВГ-Н1 и ЭШП-20 ВГ предназначены для

получения слитков массой соответственно до 16 и до 20 т прямоугольного, квадратного и круглого сечений.

Для получения уникальных слитков массой порядка 150–200 т создаются специальные установки ЭШП, в которых осуществляется переплав шести и более электродов.

Специальные трансформаторы для установок ЭШП имеют большое число ступеней вторичного напряжения с переключением под нагрузкой. Трансформаторы включаются в сеть напряжением 6, 10 и 35 кВ. Значения вторичного напряжения — 30–250 В [53.6].

### 53.3. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Принцип работы индукционных плавильных печей и установок для нагрева металлов основан на поглощении электромагнитной энергии металла. При прохождении по металлу индуктируемого тока выделяется мощность, Вт,

$$P_M = I_M^2 R_M,$$

где  $I_M$  — ток, индуктируемый в металле, А;  $R_M$  — активное сопротивление контура тока, Ом.

В индукционных печах для плавки черных и цветных металлов магнитное поле создается *индуктором* — многovitковой цилиндрической или другой формы катушкой — при пропускании через него переменного электрического тока. Магнитное поле индуктирует в нагреваемом металле ток  $I_M = E_M / Z_M$ , где  $E_M$  — действующее значение ЭДС, возникающей в металле при изменении магнитного потока;  $Z_M$  — полное сопротивление контура, образуемого нагреваемым металлом.

В зависимости от формы плавильного пространства индукционные печи разделяются на каналные и тигельные.

#### Индукционные каналные печи

Индукционная каналная плавильная печь (рис. 53.18) представляет собой своеобразный трансформатор, первичная обмотка которого — индуктор, смонтированный на сердечнике магнитопровода, — питается током промышленной частоты, а вторичной обмоткой является футерованный кольцевой канал с жидким металлом, сообщающийся с ванной. Печь может иметь несколько каналов, образующих параллельно ветви при однофазном питании и фазоветви при трехфазном [53.2; 53.5].

Конструктивный узел, объединяющий индуктор, магнитопровод и футерованный канал

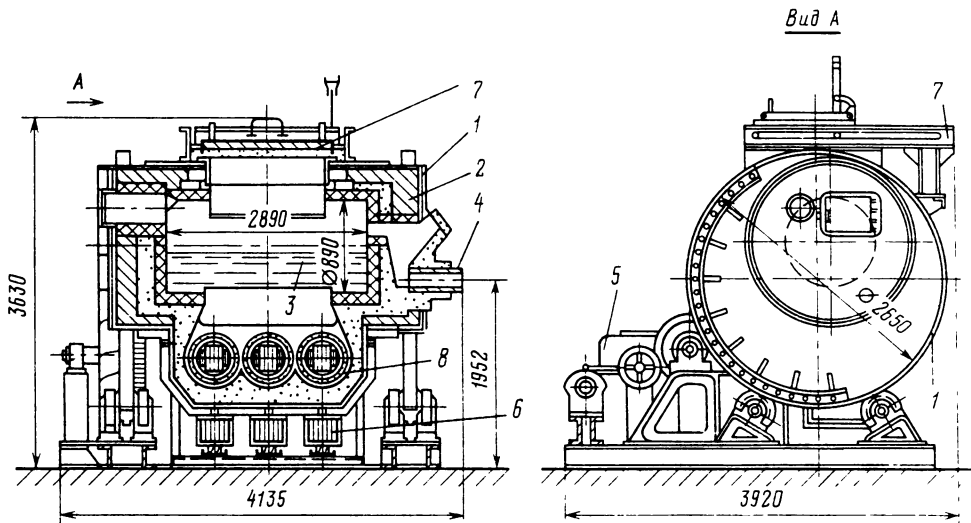


Рис. 53.18. Индукционная каналная электропечь емкостью 2,5 т для плавки медных сплавов (ИЛК-2,5):

1 — кожух печи; 2 — футеровка; 3 — ванна; 4 — сливной желоб; 5 — механизм наклона; 6 — магнитопровод; 7 — крышка; 8 — индуктор

(один или несколько), называется индукционной единицей (ИЕ). В большинстве печей ИЕ выполняются объемными и заключаются в составной кожух из немагнитного материала. ИЕ соединяются с кожухом ванны болтами или шпильками. Питание ИЕ мощностью до 300 кВ·А осуществляется непосредственно от сети 380 В или через однофазные автотрансформаторы.

Для больших мощностей применяются высоковольтные однофазные и трехфазные электропечные трансформаторы с регулированием вторичного напряжения под нагрузкой [53.6].

Для индуктора и магнитопровода ИЕ мощностью выше 300 кВ·А применяется водяное охлаждение витков индуктора. Воздушное охлаждение зазора между индуктором и наружной поверхностью футеровки канала с принудительным продуванием воздуха вентилятором применяется для ИЕ меньшей мощности.

Индукционные каналные печи выполняются наклоняющимися и стационарными. Механизм наклона, служащий для слива металла, выполняется с электромеханическим или с гидравлическим приводом. Стационарные печи оборудуются насосными устройствами для выкачивания металла или черпаковыми механизмами.

Основные достоинства индукционных каналных печей: 1) высокий КПД и меньший удельный расход электроэнергии по сравнению

с другими типами электроплавильных печей; 2) высокое качество металла за счет интенсивного перемешивания расплава, возникающего вследствие электродинамических сил, гидростатического давления и теплового движения в жидком металле; 3) малый угар металла — не более 1 %.

Недостатками каналных печей являются: 1) необходимость круглосуточного поддержания в каналах и частично в ванне металла в жидком состоянии, что обязывает иметь непрерывный режим работы и затрудняет переход процесса плавки от одной марки металла к другой; 2) низкая стойкость огнеупорной футеровки; 3) невысокий коэффициент мощности — 0,2–0,7 (табл. 53.9).

Отечественная промышленность выпускает: печи для плавки меди и ее сплавов серий ИЛК и ИЛКМ (миксер для выдержки и перегрева металла), печи для плавки алюминия и его сплавов серии ИАК, стационарные печи для плавки цинка серии ИЦК, а также печи для выдержки и перегрева чугуна серий ИЧКМ и ИЧКР.

В табл. 53.9 даны технические данные некоторых типов серийных индукционных каналных печей.

#### Индукционные тигельные печи

Индукционная плавильная тигельная печь состоит из следующих основных элементов: 1) тигля, помещенного внутри индуктора;

Таблица 53.9. Технические данные некоторых индукционных канальных плавильных печей промышленной частоты

Наименование и назначение печи	Тип печи	Емкость печи, т		Максимальная рабочая температура, °С	Число ИЕ и мощность, кВт	Удельный расход энергии на расплавление, кВт·ч/т	Напряжение на индукторе, В	Коэффициент мощности без компенсации
		полезная	полная					
Для плавки меди и сплавов на медной основе	ИЛК-1	1,0	1,3	1200	1 × 250	200	350	0,70
	ИЛК-1,6	1,6	2,5	1200	1 × 750	195	500	0,66
	ИЛК-2,5	2,5	5	1200	1 × 750	200	500	0,66
	ИЛК-6	6	9	1200	2 × 750	265	500	0,32
	ИЛК-16	16	25	1200	4 × 575	280	475	0,46
Для плавки алюминия и его сплавов	ИАК-0,4/0,2И1	0,4	0,65	750	1 × 215	475	345	0,25
	ИАК-1/0,4И1	1,0	1,7	750	1 × 400	450	320	0,21
	ИАК-2,5/0,8И1	2,5	4,5	750	2 × 400	450	440	0,21
	ИАК-25/3,3И1	25	40	750	6 × 385	400	525	0,16
	ИАК-40/3,5	40	60	750	9 × 385	350	525	0,17
Для переплава катодного цинка	ИЦК-25	25	25	500	2 × 300	100	500	0,65
	ИЦК-40	40	40	500	4 × 250	100	500	0,63
	ИЦК-100	100	100	500	6 × 500	100	500	0,63
Для плавки чугуна	ИЧК-6/1,5И1	6	10,5	1500	1 × 1500	480	500	0,49
	ИЧК-10/2,5И1	10	14,5	1500	1 × 2500	450	1000	0,52
	ИЧК-25/5,0И1	25	35	1500	1 × 5000	430	1000	0,37
	ИЧК-40/3,0И1	40	52	1500	2500 + 500	455	880	0,53
Для выдержки и перегрева чугуна (миксер)*	ИЧКМ-6С1	6	9	1500	1 × 500	33,4	500	0,7
	ИЧКМ-10С1	10	15	1500	1 × 500	33,7	500	0,7
	ИЧКМ-16С1	16	25	1500	1 × 500	34,4	500	0,7
	ИЧКМ-25М1	25	40	1500	4 × 500	33	500	0,7
	ИЧКМ-40/1И1	40	60	1500	2 × 500	35	500	0,7
	ИЧКМ-40/2И1	40	60	1500	2 × 1000	33,5	500	0,7

\* Удельный расход электроэнергии указан на перегрев 1 т чугуна на 100 °С

2) катушки, свитой из медной охлаждаемой водой трубки круглого, квадратного или прямоугольного сечения; 3) кожуха; 4) механизма наклона печи. Индуктор может питаться током промышленной или повышенной (500–10 000 Гц) частоты.

Выбор частоты определяется параметрами загрузки и прежде всего емкостью печи. Частота тока, Гц, при плавке черных металлов должна быть не ниже минимальной:

$$f_{min} = 25 \cdot 10^6 \rho_m / \mu_{гм} D_m^2,$$

где  $D_m$  – средний диаметр загрузки, м;  $\rho_m$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $\mu_{гм}$  – относительная магнитная проницаемость металла в горячем состоянии.

Принцип работы тигельной печи основан на поглощении помещенной в тигле металлической загрузкой – шихтой – энергии электромагнитного поля, создаваемого индуктором. Индуцируемый в шихте ток разогревает и

расплавляет металл. Наиболее интенсивно нагреваются наружные слои шихты в соответствии с экспоненциальным законом изменения плотности индуцируемого тока по сечению.

Эквивалентная глубина проникновения индуцируемого тока в металл, м,

$$\delta_{эвб} = 503 \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu_{гм} f}},$$

где  $\rho_m$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $f$  – частота, Гц;  $\mu_{гм}$  – относительная магнитная проницаемость металла.

Тигель выполняется керамическим – набивным или из электропроводящих материалов, например из графита (при плавке цветных металлов с низким удельным электрическим сопротивлением).

Отечественной электропромышленностью выпускаются тигельные печи серий ИСТ, ИАТ, ИЧТ, ИЛТ открытого исполнения (табл. 53.10)

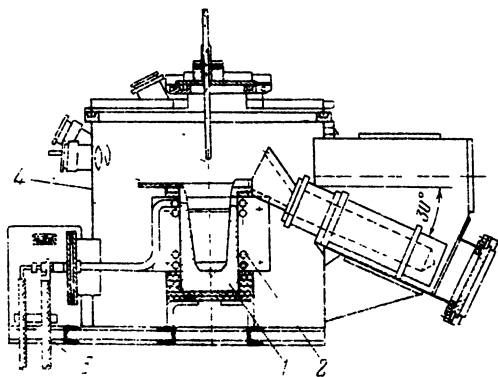


Рис. 53.19. Вакуумная индукционная тигельная электропечь:  
1 — тигель; 2 — индуктор; 3 — токоподвод; 4 — герметичный кожух

и серии ИСВ — вакуумные — для плавки особо чистых металлов (рис. 53.19, табл. 53.10). Вакуумные индукционные печи применяются главным образом для плавки высококачественных металлов, сталей, прецизионных и жаропрочных сплавов, а также для варки высокосортного специального стекла, получения монокристаллов.

Вакуумные печи имеют герметический кожух и поставляются с вакуумным оборудованием. Печи полунепрерывного действия позволяют осуществлять весь цикл плавки — от загрузки шихты до выгрузки изложниц со слитками без нарушения вакуума.

Вследствие большого магнитного рассеяния коэффициент мощности у тигельных пе-

чей очень низок (обычно 0,1—0,3), поэтому для компенсации реактивной мощности на всех тигельных печах устанавливаются конденсаторные батареи с регулируемой емкостью.

Источниками тока повышенной частоты для питания тигельных печей являются машинные генераторы и статические тиристорные преобразователи частоты [53.6].

Индукционные тигельные печи большой емкости (например, ИЧТ-25) питаются от высоковольтной сети промышленной частоты через понижающие трансформаторы с регулируемым вторичным напряжением.

Питание индукционных вакуумных и открытых печей малой емкости (до 10 кг) осуществляется от ламповых генераторов частотой 70—500 кГц. Чем меньше емкость печи, тем выше должна быть частота тока. Ламповые генераторы используются и для питания индукционных печей при производстве стекла, монокристаллов и другой продукции.

Вследствие изменения параметров загрузки в процессе работы индукционные тигельные печи снабжаются автоматическими регуляторами, поддерживающими на требуемом уровне основные параметры — напряжение на индукторе и емкость (коэффициент мощности).

Для печей, питающихся от машинных генераторов, выпускаются серийные станции управления типа ШДА [53.6], включающие автоматический регулятор возбуждения генератора, регулятор коэффициента мощности и регулятор нагрузки.

Для печей промышленной частоты производятся комплексные регуляторы типа АРИР [53.6], обеспечивающие регулирование напряжения на индукторе, поддержание оптималь-

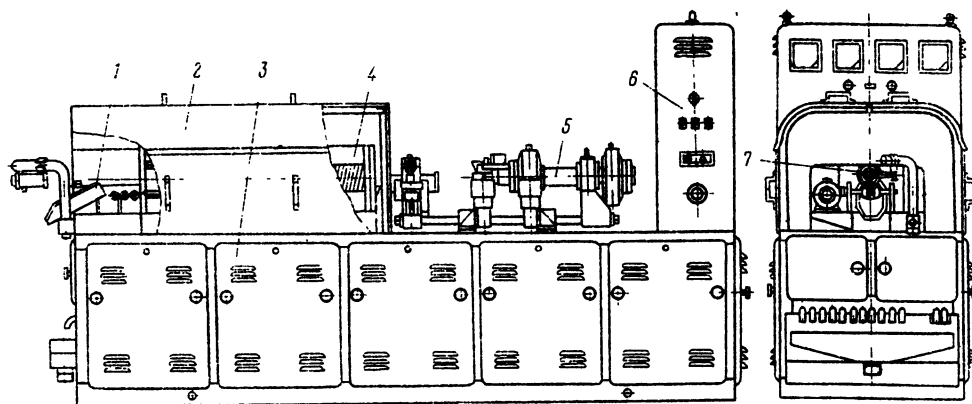


Рис. 53.20. Индукционная нагревательная установка непрерывного действия:  
1 — разгрузочный лоток; 2 — кожух индуктора; 3 — конденсаторная батарея; 4 — индуктор; 5 — механизм загрузки; 6 — шкаф управления; 7 — визирная головка пирометра

Таблица 53.10. Технические данные некоторых тигельных индукционных печей

Наименование и назначение печи	Тип печи	Емкость печи, т	Мощность печи, кВт	Частота, Гц	Напряжение на индукторе, В	Мощность конденсаторной батареи, кВ·Ар	Максимальная рабочая температура, °С	Максимальная производительность, кг/ч	Удельный расход электроэнергии на расплавление, кВт·ч/т	Габаритные размеры установок, мм		Масса установок, т
										в плане	высота	
Тигельные для плавки стали	ИСТ-0,06/0,1-ИЗ	0,06	100	2400	1000	600	1600	100	750	—	—	6,7
	ИСТ-0,16/0,25-ИЗ	0,16	250	2400	1000	2100	1600	150	730	—	—	7,3
	ИСТ-0,25/0,32-И1	0,25	290	2400	1000	4000	1600	220	708	—	—	9
	ИСТ-0,4/0,5-ИЗ	0,4	450	1090	1000	5000	1600	380	660	—	—	10,63
	ИСТ-1/0,8-М5	1,0	800	800—1000	1000	12000	1600	1000	625	—	—	12,6
Тигельные для плавки чугуна	ИСТ-2,5/2,4-М3	2,5	2400	400—500	1500—2000	33600	1600	2500	747	—	—	53
	ИСТ-6/2,4-М1	6	2400	500	1500—2000	38400	1400	800	630	—	—	55
	ИЧТ-1/0,4-С2	1,0	400	50	500	1620	1500	3400	560	—	—	18,3
	ИЧТ-2,5/1,0-С4	2,5	1000	50	1000	4950	1500	2700	560	—	—	26
	ИЧТ-6/2,5-И1	6	2000	50	1000	4950	1200	1000	400	—	—	70
Тигельные для плавки меди и ее сплавов	ИЧТ-6/1,6-И8	6	1560	50	1000	4950	1200	1000	340	—	—	35
	ИЛТ-1/0,4-М2	1,0	385	50	500	2000	1200	1000	320	—	—	—
	ИЛТ-2,5-1,0-С2	2,5	900	50	1000	5850	1200	2000	660	—	—	18,6
Тигельные для плавки алюминия и его сплавов	ИЛТ-10/2,5	10	2500	50	1050	5850	1200	4000	590	—	—	38,2
	ИАТ-0,4/0,8-М4	0,4	600	400—500	910	9600	750	900	—	—	—	—
ИАТ-2,5/1,6-М3	2,5	1500	400—500	1500—1700	—	38400	750	2000	—	—	—	—

## Вакуумные печи\*

Для получения отливок и высоколегированных сталей и сплавов методом точного литья по выплавляемым моделям	ИСВ-0,04ПФ	0,04	250	2400	500	1350	1650	120	1100	5600 × × 5200	4000	10
Для плавки стали и жаропрочных сплавов с разливкой в изложницы	ИСВ-0,06ПИ ИСВ-0,16ПИ	0,06 0,16	250 250	2400 2400	400 800	2300 4650	1800 1700	140 160	1960 1960	7100 × × 4900 8000 × × 5000	4100 4400	7,0 9,5
Для плавки стали и жаропрочных сплавов с разливкой в изложницы или в формы точного литья	ИСВ-0,16НФ	0,16	250	2400	800	4500	1700	210	2000	11445 × × 8500	6800	62,6
Для плавки жаропрочных и специальных сталей на слитки при полунепрерывном режиме работы плавильной камеры	ИСВ-0,6НИ ИСВ-0,6НИ	0,16 0,6	280 500	2400 1100	800 800	2860 6000	1700 1700	160 430	2000 1800	9800 × × 8000 11300 × × 10740	5800 7560	35,2 100
	ИСВ-1,0НИ	1,0	1000	1000	1000	15000	1800	600	1700	7500 × × 13800	12200	162
	ИСВ-2,5НИ	2,5	1600	1000	1000	30400	1750	1000	1600	18900 × × 17100	8835	252
Для плавки металлов высокой чистоты в графитовом тигле	ИТВ-3НИ	3,0	800	1000	800	7750	1500	1200	1400	18000 × × 17000	13000	243
Для металлургического восстановления с целью получения углоплавких химически активных металлов и сплавов	ИКВХ**-0,3-4/2000	0,3 × 4	2000	2400	800	20000	2000	—	—	10600 × × 8300	10000	135

\* Последние две буквы в обозначении вакуумных плавильных печей означают. ПФ — периодический процесс плавки в форму; ПИ — периодический процесс плавки в изложницу, НИ — полунепрерывный процесс плавки в изложницу.

\*\* В этом обозначении. К — означает тугоплавкий химически активный металл или сплав; В — среда в рабочем пространстве (вакуум). Х — водоохлаждаемый (холодный) тигель; 0,3 — емкость слитка в тоннах; 4 — количество плавильных камер, 2000 (за чертой) — мощность в киловаттах.

ного коэффициента мощности и симметричную нагрузку трехфазной питающей сети.

### Индукционные нагревательные установки

В зависимости от технологического назначения различают установки сквозного нагрева для горячей деформации металла, глубинной закалки, отпуска и отжига стальных деталей, для пайки деталей и установки поверхностной закалки для упрочнения поверхностного слоя стальных и чугунных деталей.

Установки сквозного нагрева имеют в основе конструкции индуктор-нагреватель, питающийся от источника промышленной, повышенной или высокой (50—500 кГц) частоты. Источниками тока высокой частоты являются ламповые генераторы.

Чем меньше размеры поперечного сечения деталей или заготовок, тем выше требуется частота. Для стальных цилиндрических заготовок частота, Гц, может быть определена по

формуле

$$f = 3 \cdot 10^4 / d_m,$$

где  $d_m$  — диаметр заготовки, см.

Индуктор-нагреватель может быть однофазным или трехфазным.

По характеру работы различают установки периодического и методического (непрерывного) действия. В первых нагрев от начальной до конечной температуры ведется без перемещения заготовок относительно индуктора. В установках методического действия заготовки нагреваются, перемещаясь по оси индуктора (рис. 53.20).

Отечественная электропромышленность выпускает индукционные установки сквозного нагрева непрерывного действия серии ИНМ промышленной частоты и серии КИН повышенной частоты (табл. 53.11). Большое число установок производится индивидуально для конкретных технологических операций при массовом поточном производстве. Естественный коэффициент мощности в установках

Таблица 53.11. Основные технические данные некоторых серийных индукционных нагревательных установок

Назначение и название установки	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на индукторе, В	Частота, Гц
Универсальная закалочная	ИЗ1-30/8	30	74	8000
	ИЗ1-100/2,4	100	74	2400
	ИЗ2-100/8	100	240	8000
	ИЗ1-200/2,4	200	240	2400
	ИЗ2-200/8	200	240	8000
Непрерывного действия для нагрева кузнечных заготовок из стали до 1250 °С	КИН-250/2,4К	250	800	2400
	КИН-500/1(ИК-500/1)	500	800	1000
	КИН-750/2,4К	750	800	2400
Непрерывного действия для нагрева заготовок из алюминия и его сплавов до 500 °С	ИНМ-50П-15/50НБ	500	600	50
	ИНМ-75П-19/60НБ	750	600	50
	ИНМ-75П-40/100НБ	750	600	50
	ИНМ-100П-35/85НБ	1000	600	50
Непрерывного действия для нагрева заготовок из меди и ее сплавов до 950 °С	ИНМ-50П-10/12НИ1	500	380	50
	ИНМ-500П-40/80НИ1	5000	490	50
Непрерывного действия для нагрева заготовок из стали до 1250 °С	ИНМ-100П-29/70НИ1	1000	600	50
	ИНМ-130П-36/42НИ1	1300	380	50
Для термической обработки сварных швов труб* при температуре до 1100 °С	ИНУ-10233*/20**	100	800 на генераторе	2400
	ИНУ-202*-63/20**	200	800	2400
	ИНУ-502*-200/20**	500	800	2400

Продолжение табл. 53.11

Назначение и название установки	Мощность конденсаторной батареи, квар	Размеры нагреваемых изделий		Производительность, т/ч
		Диаметр, мм	Длина, мм	
Универсальная закалочная	1000—1200	17 } 35 } мини- 19 } мальный 35 } 19 }	Поверхность, см <sup>2</sup> : до 25 до 200 до 200 до 400 до 400	—
	1000—1200			—
	1000—1200			—
	1400—1650			—
	1400—1650			—
Непрерывного действия для нагрева кузнечных заготовок из стали до 1250 °С	2640	40—80	100—500	0,85—0,6
	6000	70—150	100—600	1,7—1,3
	10800	30—80	100—600	2,4—1,8
Непрерывного действия для нагрева заготовок из алюминия и его сплавов до 500 °С	1800	112—145	150—600	1,8
	2700	145—190	150—600	2,5
	2700	275—410	565—1000	3,3
	4200	225—350	400—850	3,5
Непрерывного действия для нагрева заготовок из меди и ее сплавов до 950 °С	—	80—115	До 120	1,6
	—	165—400	До 800	До 18
Непрерывного действия для нагрева заготовок из стали до 1250 °С	—	130—290	До 700	3,2
	—	200—360	До 420	3,0
Для термической обработки сварных швов труб* при температуре до 1100 °С	1025	Толщина стенки, мм:	5—13	—
	1095		5—13	
	10560		10—44	

\* Диаметры труб: для ИНУ-10233/20 не более 330 мм; для ИНУ-202-63/20 не более 630 мм; для ИНУ-502-200/20 не более 2000 мм.

\*\* Ширина нагреваемого участка 200 мм.

сквозного нагрева очень низок (0,1—0,4), поэтому предусматривается компенсация реактивной мощности конденсаторными батареями. Для согласования напряжения источника питания и напряжения на индукторе применяются согласующие промежуточные трансформаторы [53.6].

Поддержание требуемого температурного режима нагреваемых заготовок достигается полной автоматизацией процесса загрузки, нагрева и выгрузки.

В последние годы получает все более широкое распространение низкотемпературный индукционный нагрев на промышленной частоте для различных технологических целей в машиностроении и в других отраслях промышленности — отпуск и отжиг деталей, нагрев под прессовую посадку, сушка электроизоляции и лакокрасочных покрытий и др. [53.9].

Установка для поверхностной закалки имеет индуктор, форма и размеры которого определяются размерами и конфигурацией закаливаемой детали.

Индуктор подключается к понизительному (закалочному) трансформатору. Назначение последнего — снизить напряжение питания, получаемого либо от машинного или лампового генератора, либо от тиристорного преобразователя, до величины, соответствующей требуемому напряжению на индукторе (10—160 В). Для стандартных частот 2400 и 8000 Гц выпускаются закалочные трансформаторы типа ТЗ со сталью [53.6]. Они имеют ступенчатое регулирование вторичного напряжения и изменяющийся в широких пределах коэффициент трансформации.

Для частот 60—450 кГц применяются воздушные трансформаторы, которые представ-



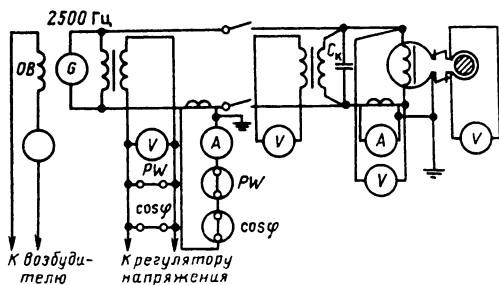


Рис. 53.21. Принципиальная схема установки для закалки деталей токами повышенной частоты

ляют собой первичную катушку (несколько витков из профилированной трубки) и вторичный виток, выполненный из листовой меди.

Частота тока закалочных установок выбирается в зависимости от требуемой глубины закаливаемого слоя детали. Для получения потребной глубины закаленного слоя  $x_3$ , мм, деталей из среднеуглеродистых сталей оптимальная частота  $f$ , Гц, может быть определена по эмпирическим формулам.

Для цилиндрических и плоских поверхностей

$$f = (3 \div 5) 10^4 / x_3^2.$$

Для деталей сложной формы

$$f = 5 \cdot 10^5 / x_3^2.$$

Закалочная индукционная установка включает: индуктор, закалочный трансформатор, устройство для охлаждения закаливаемой поверхности, конденсаторную батарею, преобразователь частоты и шкафы управления (рис. 53.21). В установках непрерывного действия добавляются механизмы транспортировки деталей через индуктор и через охлаждающее устройство.

Отечественная электропромышленность производит закалочные установки периодического и непрерывного действия индивидуального назначения и серийные.

Технические характеристики некоторых типов установок даны в табл. 53.11.

Таблица 53.12. Технические данные некоторых высокочастотных установок с ламповыми генераторами для нагрева диэлектриков

Назначение	Тип	Потребляемая мощность, кВт	Колебательная мощность, кВт	Частота, МГц	Анодное напряжение, кВ	Технологические показатели		Масса установки, кг
						Масса загрузки, т	Время нагрева, с	
Нагрев пресс-материалов перед прессованием	ВЧД-1,6/40	3,4	1,6	40,68	4,0	210—600	30—90	170
	ВЧД-4/40	8,2	4,0	40,68	5,0	100—500	30—60	685
	ВЧД-2,5/81	5,2	2,5	81,36	5,0	600—1500	30—60	330
	ВЧД-6/81	12,0	6,0	81,36	5,0	600—1500	30—60	880
Сушка литейных стержней	ВЧД-63/27-3	100	63	27,12	10,5	Скорость конвейера 0,05—1 м/мин		4250
Сварка термопластичных материалов (пленок)	ВЧД-0,63/40-СП	1,2	0,6	40,68	2,5	16 — площадь шва, см <sup>2</sup>	1—5 — время сварки, с	360
	ВЧД-1,6/40-СП	3,5	1,6	40,68	4	40	2—5	500
	ВЧД-2,5/40-СП	5,3	2,5	40,68	6	60	2—6	930
	ВЧД-4/40-СП	8,5	4,0	40,68	6	100	2—5	950
Склеивка древесины	ВЧД-2,5/13-СД	5,4	2,5	13,56	5	420 — площадь шва, см <sup>2</sup>	15 — время склеивания, с	400
	ВЧД-10/5-СД	18,5	10	5,28	8	3300	80	900
	ВЧД-25/27-СД	40	25	27,12	7,5	8000	80	1350

### Высокочастотные установки для нагрева диэлектриков и полупроводников

Высокочастотные установки для диэлектрического (конденсаторного) нагрева применяются для различных видов тепловой обработки неэлектропроводящих материалов (сварки термопластических материалов, сушки и склейки древесины, сушки литейных стержней, варки и консервирования пищевых продуктов и т. д.).

Диэлектрический нагрев основывается на возникновении токов смещения в электрическом поле конденсатора и поглощении энергии электрического поля.

Мощность, выделяемая в единице объема диэлектрика (конденсатора)  $p_0$ , Вт/м<sup>3</sup>, при подведении напряжения к контактным пластинам (расстояние между пластинами  $l$ , м) составляет

$$p_0 = 5,55\epsilon_r f E^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-11},$$

где  $E = U/l$  — напряженность электрического поля в конденсаторе, В/м;  $f$  — частота, Гц;  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая прони-

цаемость материала нагреваемого тела, Ф/м;  $\delta$  — угол диэлектрических потерь материала.

Для нагрева диэлектриков и полупроводников применяются высокочастотные лампы-генераторы с самовозбуждением, в колебательный контур которых входит рабочий конденсатор с нагреваемым материалом. Частота колебательного контура, а следовательно, и генератора, Гц,

$$f = 1/2\pi \sqrt{L_n C_n},$$

где  $C_n$  — емкость нагрузки, Ф;  $L_n$  — индуктивность контура, Гн.

В СССР выпускаются высокочастотные лампы-генераторы серии ВЧД на частоты 5,28; 13,56; 27,12; 40,68; 81,36 МГц и мощности от 0,6 до 63 кВт [53.5].

В табл. 53.12 даны технические данные некоторых установок диэлектрического нагрева.

### 53.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Таблица 53.13 Основные свойства материалов для нагревательных элементов высокотемпературных печей сопротивления

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, 10 <sup>-6</sup> Ом·м	Температурный коэффициент электрического сопротивления, 10 <sup>-3</sup> /°С	Температура плавления, °С	Максимальная рабочая температура, °С
<i>Чистые металлы</i>					
Молибден	10200	0,052	5,1	2625	2000*
Тантал	16600	0,15	4,0	3000	2500*
Вольфрам	19340	0,05	4,3	3400	2800*
Ниобий	8500	0,17	4,0	2000	1700*
<i>Неметаллические материалы</i>					
Карборунд	2300	800—1900	Переменный	—	1500
Графит	1600	8—13	»	—	2800*
Уголь	1600	40—60	»	—	2800*
Дисилицид молибдена	5600	0,2—0,4	Средний 4,8	—	1700

\* В вакууме или в защитной атмосфере.

Таблица 53.14. Технические данные карборундовых нагревателей КЭН

Условные обозначения*	Поверхность излучения активной части, см <sup>2</sup>	Сопротивление, Ом	
		Низкоомные КЭН	Высокоомные КЭН
КЭНА8/100/85, КЭНА8/100/130	25	1,20–1,80	1,85–2,25
КЭНА8/150/60 – КЭНА8/150/180	38	1,65–2,65	2,70–3,30
КЭНА8/180/160 – КЭНА8/180/150	40	2,10–3,30	3,55–4,05
КЭНА8/200/100, КЭНА8/200/150	50	2,25–3,65	3,70–4,5
КЭНА8/250/60 – КЭНА8/250/150	63	2,90–4,65	4,7–5,7
КЭНА8/300/150	75	3,60–5,80	5,85–7,15
КЭНА12/250/250	94	1,50–2,40	2,45–3,00
КЭНА14/200/250, КЭНА14/200/350	88	0,70–1,10	1,15–1,45
КЭНА14/250/250, КЭНА14/250/350	110	0,75–1,25	1,30–1,60
КЭНА14/300/250, КЭНА14/300/350	135	0,95–1,00	1,55–1,90
КЭНА14/400/250, КЭНА14/400/350	170	1,80–2,90	2,95–3,65
КЭНА18/250/250, КЭНА18/250/400	141	0,70–1,10	1,15–1,45
КЭНА18/300/250, КЭНА18/300/350	130	1,00–1,60	1,65–2,05
КЭНА18/350/400	198	1,10–1,80	1,85–2,25
КЭНА18/400/250, КЭНА18/400/350	226	1,25–2,05	2,10–2,60
КЭНА18/500/350	283	1,60–2,60	2,65–3,25
КЭНА18/600/150, КЭНА18/600/250	338	1,95–3,05	3,10–3,80
КЭНА25/400/300, КЭНА25/400/400	314	0,80–1,30	1,35–1,65
КЭНБ12/190/45	72	2,10–3,15	3,20–3,60
КЭНБ12/230/45	87	2,50–3,70	3,75–4,60
КЭНБ16/230/45	110	1,85–2,75	2,80–3,40
КЭНБ32/560/75	563	1,30–2,00	2,00–3,65
КЭНБС25/300/70 + 230	235	0,85–1,15	1,25–4,50
КЭНБС25/300/70 + 340	235	0,85–1,15	1,25–4,50
КЭНБС25/400/70 + 230	314	1,25–1,65	1,60–2,00
КЭНБС25/400/70 + 340	314	1,25–1,65	1,60–2,00
КЭНВП18/200/400 – КЭНВП18/800/500	113–452	От 0,70–0,90 до 2,70–3,20	От 0,95–1,15 до 3,3–4,05
КЭНВП25/250/400 – КЭНВП25/800/500	196–628	От 0,36–0,45 до 1,00–1,20	От 0,45–0,55 до 1,25–1,55
КЭНВП30/300/400 – КЭНВП30/1200/400	283–1130	От 0,35–0,43 до 1,1–1,3	От 0,44–0,55 до 1,35–1,65

\* Расшифровка обозначений: КЭН – карборундовый электронагреватель; А – трубчатый с утолщенными выводами; Б – сплошной с выводами, пропитанными сплавом металлов; БС – сплошной с приставными выводами, пропитанными сплавом металлов; ВП – трубчатый с выводами, пропитанными легированным кремнием.

Цифрами обозначены размеры, мм: диаметр, длина активной части, длина основного вывода, длина приставной части вывода для нагревателей типа КЭНБС.

Таблица 53.15. Зависимость удельного электрического сопротивления нагревателей из дисилицида молибдена от температуры

Температура нагревателя, °С	20	200	400	800	1000	1200	1400	1600
Удельное электрическое сопротивление, $10^{-6}$ Ом·м	0,3	0,5	0,85	1,8	2,2	2,7	3,2	3,7

Таблица 53.16. Технические данные электрических U-образных и прямых нагревателей из дисилицида молибдена – ДМ (диаметр рабочей части нагревателя 6 мм, выводов – 12 мм)

Тип	Развернутая длина рабочей части, м	Поверхность рабочей части, см <sup>2</sup>	Тип	Развернутая длина рабочей части, м	Поверхность рабочей части, см <sup>2</sup>
<i>U-образные нагреватели</i>			<i>Прямые нагреватели</i>		
ДМ150/150, ДМ150/230, ДМ150/300, ДМ150/400, ДМ150/500	0,32	60,3	ДМ100/150	0,1	18,84
ДМ180/150, ДМ180/185, ДМ180/250, ДМ180/300, ДМ180/350, ДМ180/400, ДМ180/500	0,39	72,4	ДМ150/150	0,15	28,26
ДМ200/200, ДМ200/350	0,42	79,1	ДМ180/150, ДМ180/185, ДМ180/250	0,18	33,91
ДМ225/560	0,47	88,5	ДМ200/200, ДМ200/250, ДМ200/350	0,2	37,68
ДМ250/185, ДМ250/250, ДМ250/300, ДМ250/350, ДМ250/400	0,53	99,4	ДМ250/185	0,25	47,1
ДМ315/185, ДМ315/250, ДМ315/300, ДМ315/350, ДМ315/400, ДМ315/500	0,66	124,2	ДМ400/250	0,4	75,36
ДМ400/250, ДМ400/400, ДМ400/500	0,83	156,0	В цифровом обозначении типа: числитель – длина рабочей части, знаменатель – длина вывода.		

Таблица 53.17. Технические данные некоторых жароупорных сталей и сплавов

Марка	Пределная температура, °С	Напряжение* $\sigma_s/\sigma_b$ , МПа, при температуре, °С							Примечание
		600	700	800	900	1000	1100	1200	
12Х13(ЭЖ1)	800	48/48	8,8/12	1,0/–	–	–	–	–	Фасонное литье и прокат
10Х14Г14Н4Т(ЭИ-711)	800	100/150	30/64	9,2/33	–	–	–	–	То же
12Х18Н10Т(ЭЯ-1Т)	900	100/130	16/55	5,5/15	–	–	–	–	Прокат
15Х25Т(ЭИ-439)	1100	–	8,0/16	3,6/5,0	1,8/2,7	0,08/1,7	–	–	»
20Х23Н13(ЭИ-319)	1100	–/18	–/6,0	13/1,7	6,8/–	1,8/–	–	–	Фасонное литье и прокат
20Х23Н18(ЭИ-417)	1100	–	47/58	18/20	6,0/12	1,7/4,5	–	–	Прокат
4Х25Н19С2Л	1200	–	–	30/40	10,2/17	6,6/10,5	0,46/2,4	–	Литье
ХН45Ю	1200	–	–	–/36	8,0/13	1,6/8,0	–/3,2	–/1,3	Прокат
Х28Н48В5Л	1200	–	–	–	–/32	5,7/13	0,37/4,0	0,12/1,8	Литье
ХН70Ю(ЭИ-652)	1200	–	–	–	4,8/20	2,1/11	0,35/4,5	0,17/–	Прокат

\*  $\sigma_s$  – предел ползучести – напряжение, вызывающее удлинение 1% за 10000 ч;  $\sigma_b$  – предел длительной прочности

Таблица 53.18 Технические данные огнеупорных материалов

Материал и марка	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вид изделия	Огнеупорность, °С	Максимальная рабочая температура, °С	Термическая устойчивость	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Примечание
Дипас	1900	Прямые и фасонные кирпичи	1700	1650	Недостаточная	830 + 0,25 / <sub>ср</sub>	0,93 + 0,7 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	Своды, арки, стены дуговых электропечей
	2000		1720	1700		830 + 0,25 / <sub>ср</sub>	0,93 + 0,7 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
Дипас легковес	1200		1670	1550	Удовлетворительная	830 + 0,25 / <sub>ср</sub>	0,547 + 0,3 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
Магнезит Хромомагнезит	2600 – 2800	Набивки, прямые и фасонные кирпичи	2000	1500 – 1550	Недостаточная	1000 + 0,29 / <sub>ср</sub>	6,15 – 2,67 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	Стены и подины дуговых электропечей
	2800 – 2900		2000	1500		447 + 0,61 / <sub>ср</sub>	2,64 – 0,75 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
Термостойкий хромомагнезит	2800 – 3000		2300	1650	Удовлетворительная	–	2,75 – 0,767 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	Своды дуговых электропечей
Шамот класса А	1800 – 1900		1730	1450		880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,7 + 0,64 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
	1800 – 1900		1670	1350		800 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,7 + 0,64 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
Шамот легковес. ШЛА-1,3 ШЛ-1,0 ШЛ-0,4	1300		1730	1400		880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,4 + 0,35 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	Футеровка электрических печей сопротивления
	1000		1670	1300		880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,5 + 0,163 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
	400		1650	1150		880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,06 + 0,18 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
Пеношамот Шамот ультралегковес	800	Прямые кирпичи.	1730	1300	Удовлетворительная	880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,29 + 0,23 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	
	350 – 400		1730	1100		880 + 0,41 / <sub>ср</sub>	0,093 + 0,162 · 10 <sup>-3</sup> / <sub>ср</sub>	

Высокоглиноземистый огнеупор ВГО-62	2300	Фасонные изделия	1830	1600		—	При $t = 600 \div 1000^\circ\text{C}$ 2,5—1,3	Высокая стойкость к углесодержащим атмосферам
	2500		1700	1700				
Высокоглиноземистый лег. класс ВГЛДС-0,8	800		1700	1300		—	$0,425 - 0,125 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	
	2200— 2400 3600		1800	1500				
Мушлит	4100		2700	2000	Удовлетворительная	—	При 1000°C около 2,0	
Корунд (алунд)	3000 1600— 1700		2600 3000	2000 2800				
Двуокись циркония	4100		3000	2800	Удовлетворительная	То же	При $t = 1000 \div 2000^\circ\text{C}$ 1—4	Тепловая изоляция
Оксид бериллия	3000		2600	2000				
Графит	1700		1900	1850	Хорошая	—	При $t = 1700 \div 2900^\circ\text{C}$ 55—25	
Графит (уголь)	—		2000	2800				
Карборунд. кл. I кл. II	2500	Фасонные изделия	2000	1500	Удовлетворительная	963 + 0,147 $t_{\text{ср}}$	≈ 20 ≈ 17	Тигли, муфели, детали кладки
	2300		1900	1400				

Таблица 53.19 Параметры теплоизоляционных материалов

Наименование материала	Вид изделия	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Максимальная температура применения, °С
Диатомит марки 700	Кирпич	700	$0,168 + 0,313 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	900
Диатомит марки 500	»	500	$0,105 + 0,232 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	900
Пенодиатомит ПД-350	»	350	$0,081 + 0,186 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	900
Диатомитовый порошок	Засыпка	500	$0,105 + 0,232 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	900
Вата минеральная (шлаковая) VM-150	»	150	$0,06 + 0,186 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	750
Стекланная вата	»	200	$0,033 + 0,26 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	600
Зонолит (вермикулит вспученный В-150)	»	150	$0,07 + 0,232 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	1100
Асбовермикулит АВ-300	Плиты	300	$0,088 + 0,232 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	700
Асбест распушенный третий сорт	Засыпка	350	$0,087 + 0,24 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	500
Асбест листовой (бумага асбестовая)	Листы	1200	$0,128 + 0,255 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	450
Перлигоцементные теплоизоляционные плиты ПЦ-350	Плиты	350	$0,081 + 0,232 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	500
Пеностекло	Кирпичи, блоки	240	$0,075 + 0,186 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	600
Вермикулитовые плиты	Плиты	250	$0,082 + 0,23 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	600
Перлит на фосфатной связке ПФ-350	Блоки	350	$0,045 + 0,163 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	1150
Керамоперлит КП-350	»	350	$0,087 + 0,186 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	900
Вата каолиновая ВК	Засыпка	100	$0,03 + 0,22 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	1100
Войлок углеграфитовый	»	180	0,2 в вакууме } 0,3 в аргоне } при 1000 °С	2000
Известково-кремнистые изделия ИКИ	Плиты, блоки	220	$0,0615 + 0,1 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$	600

### 53.5. УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО НАГРЕВА

#### Общие сведения

Плазменные электротермические установки (ПЭТУ) – это промышленные установки электрического нагрева, в которых основным активным компонентом преобразования и переноса энергии в технологическом объеме является низкотемпературная плазма. Наиболее надежным и простым стационарным генератором плазмы в промышленных ПЭТУ является сильноточный электрический разряд. В ПЭТУ атмосферного давления используется электрический самостоятельный разряд дуговой формы (электрическая дуга), в вакуумных ПЭТУ – сильноточный разряд с полым катодом.

К ПЭТУ атмосферного давления относятся:

плазменные дуговые печи (ПДП) для плавки металла в керамическом тигле;

ПДП для плавки металла в металлическом водоохлаждаемом кристаллизаторе;

плазменные рудовосстановительные печи (РВПП) обычно шахтного типа, предназначенные для прямого восстановления металлов из окислов;

промышленные дуговые струйные плазмотроны (ПДС), предназначенные для нагрева газа в потоке как теплоносителя в плазменных технологических установках.

Из вакуумных ПЭТУ промышленное применение нашли электронно-плазменные печи, источником нагрева в которых является самостоятельный сильноточный вакуумный разряд с горячим полым плазменным катодом.

ПЭТУ позволили реализовать ранее недостижимые малостадийные и высокоэнтальпийные технологические процессы с широкими пределами регулирования термодинамического режима в ведущих отраслях промышленности: металлургии, химии и машиностроении. Плазменное технологическое оборудование отличается высокой производительностью, малыми габаритными размерами и высоким качеством обработки материалов, что объясняется высокими концентрацией и направленностью переноса энергии при плазменном нагреве.

Зона электропроводности (столб)		Зона теплоносителя	Изделие
Электроды	Столбко-вещца	Атомы, ионы	
$J, E$ $\Sigma \frac{dW_e^k}{pe d\tau}$ $T_c$	$\rho$ $\frac{dP_m}{d\tau}$ $T_m$	$n_e$ $\frac{dP_m}{d\tau}$ $T_m$	
$W_e^k + W_e^n$ Бомбардировка электронами (плавильные ПЭТУ)			

Рис. 53.22. Электронно-молекулярная модель процессов переноса в плазменных ЭТУ:

$J, E$  — плотность тока и напряженность электрического поля в плазме столба электрического разряда;  $\rho, h_m$  — плотность и энтальпия плазмы;  $n_e, W_e^k$  — концентрация и кинетическая энергия электронов проводимости в плазме столба;  $W_e^n$  — потенциальная энергия электрона, определяемая работой выхода из катода;  $\tau$  — время;  $T_{изд}$  — характерная температура нагреваемого изделия

Активной зоной нагрева в ПЭТУ является плазменный столб электрического разряда. Принцип плазменного нагрева можно проиллюстрировать электронно-молекулярной моделью процессов переноса энергии в плазме столба сильноточного разряда (рис. 53.22).

В ПЭТУ в качестве генераторов плазмы используются плазмотроны двух типов: струйные и плавильные. Струйные плазмотроны —

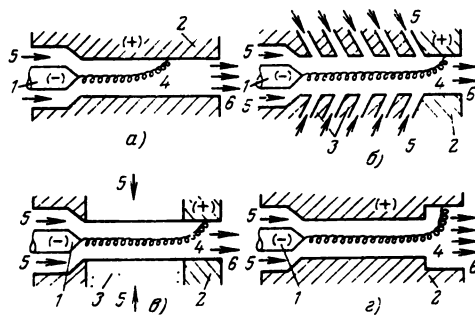


Рис. 53.23. Схемы промышленных струйных плазмотронов:

а — плазмотрон с самоустанавливающейся длиной дуги; б — с межэлектродной металлической водоохлаждаемой вставкой; в — с межэлектродной пористой вставкой; г — плазмотрон с уступом; 1 — катод; 2 — анод; 3 — межэлектродная изолированная вставка; 4 — столб дуги; 5 — ввод плазмообразующего газа; 6 — поток плазмы (нагретого теплоносителя)

это плазмотроны с внутренней дугой, предназначенные для нагрева газа в потоке, который затем поступает в технологический объем. В плавильных плазмотронах дуга вынесена в технологический объем и анод разряда является объектом нагрева.

Струйные промышленные плазмотроны

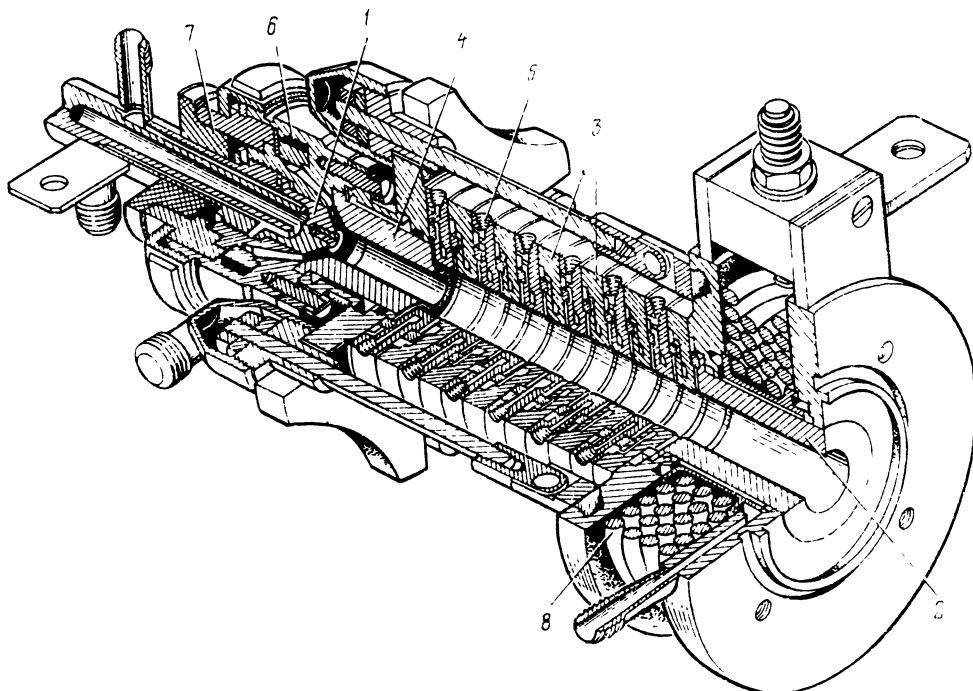


Рис. 53.24. Конструкция промышленного плазмотрона ЭДП-118:

1 — катод; 2 — анод; 3 — межэлектродные вставки; 4 — пусковая секция; 5 — узел ввода плазмообразующего газа; 6 — узел подачи защитного газа; 7 — изолятор; 8 — соленоид



Таблица 53.20. Параметры водородных плазмтронов

Тип	$l, \text{ м}$	$10^{-3} \dot{Q}, \text{ кг/с}$	$d_k, \text{ м}$	$d_1/d_2, \text{ м}$	$l_1/l_2, \text{ м}$	Схема рис. 53.23
ПР-03	0,234	3,42	0,02	—	—	<i>б</i>
ПР-03	0,15	4,50	0,02	—	—	<i>б</i>
ЭДП-118	0,155	3,78	—	0,02/0,04	0,135/0,04	<i>в</i>
ЭДП-118	0,155	9,40	—	0,02/0,04	0,135/0,04	<i>в</i>
ЭДП-118	0,19	9,40	—	0,03/0,06	0,160/0,06	<i>в</i>
ПДИ-4	0,24	2,40	0,008	—	—	<i>г</i>
ПП1	0,11	16,5	0,03	—	—	<i>а</i>
ПП2	0,12	15,4	0,03	—	—	—

Примечание.  $d_k$  — диаметр канала;  $d_1/d_2$  — отношение диаметра канала к диаметру уступа;  $l_1/l_2$  — отношение длины канала к длине уступа.

выполняются по следующим конструкционным схемам: а) с самоустанавливающейся длиной дуги (рис. 53.23, а), б) с межэлектродной вставкой (рис. 53.23, б, в), в) с уступом (рис. 52.23, г), г) с двусторонним истечением плазмы.

Наиболее эффективными струйными плазмтронами сегодня являются плазмтроны с фиксированной длиной дуги, к которым относятся плазмтроны с межэлектродной вставкой (МЭВ) и плазмтроны с уступом. На рис. 53.24

приведена схема конструкции промышленного струйного плазмтрона с МЭВ типа ЭДП-118 [53.18]. В табл. 53.20 приведены параметры промышленных струйных плазмтронов, работающих на водороде.

На рис. 53.25 приведены статические вольт-амперные характеристики промышленных струйных плазмтронов, работающих на водороде.

Плавильные плазмтроны нашли применение в ПДП для плавки металла в керамическом тигле (рис. 53.26). Конструкция плавильного плазмтрона приведена на рис. 53.27. Рабочие характеристики плавильного плазмтрона при работе на аргоне приведены ниже:

Ток, А	Рабочий режим			
	1	2	3	4
1000	3000	6000	10000	
Диаметр катода, мм	10	16	23	36
Расход аргона, $10^{-3}$ кг/с	1	2	4	6

Статическая вольт-амперная характеристика плавильного плазмтрона на постоянном токе для аргона может быть рассчитана по формуле [53.19]

$$U = \frac{a_3}{a_2} I^{a_2} \left[ \frac{l}{a_1 I^{a_1}} + 1,85 \right] + U_{эл}$$

где  $l$  — длина дуги, м;  $a_2 = 0,494 + 3,11 \cdot 10^{-5} T_{\infty}$ ;  $a_1 = 0,35 - 1,45 \cdot 10^{-5} T_{\infty} - 2,71 \cdot 10^{-9} T_{\infty}^2$ ;  $a_1 = 1,06 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-8} T_{\infty} + 2,49 \cdot 10^{-10} T_{\infty}^2$ ;  $a_2 = 2,24 + 1,12 \cdot 10^{-4} T_{\infty}$ ;  $a_3 = 0,37 - 7,5 \times 10^{-5} T_{\infty} + 3,02 \cdot 10^{-9} T_{\infty}^2$ ;  $U_{эл} = 10 \div 12 \text{ В}$  — приэлектродное падение напряжения;  $T_{\infty}$  — средняя расчетная температура газа в окружающем дугу пространстве.

В начальный период плавки температура составляет 1000 К, затем довольно быстро возрастает и повышается к концу расплавления шихты до 3500 К.

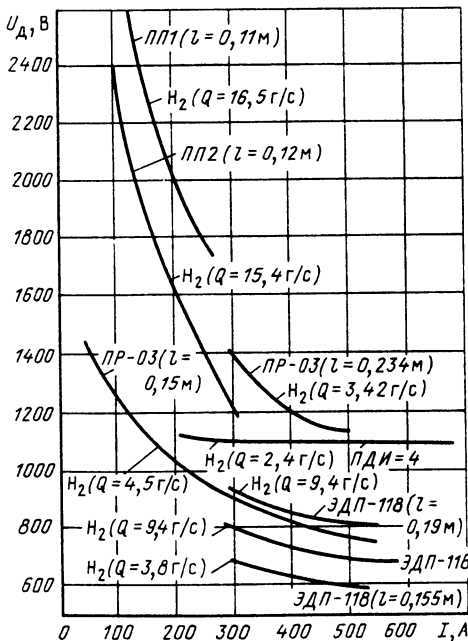


Рис. 53.25. ВАХ статической проводимости промышленных струйных плазмтронов для водорода ( $l$  — длина дуги;  $Q$  — расход газа)

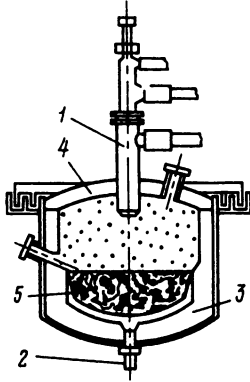


Рис. 53.26. Схема конструкции ПДП с керамическим тиглем:

1 — плавильный плазмотрон; 2 — анодный электрод; 3 — керамический тигель; 4 — свод печи; 5 — расплавляемый металл

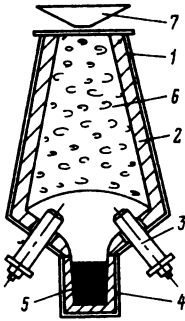


Рис. 53.28. Схема конструкции РВПП шахтного типа:

1 — кожух; 2 — футеровка; 3 — плазмотрон; 4 — тигель; 5 — слиток; 6 — шихта; 7 — устройство загрузки шихты

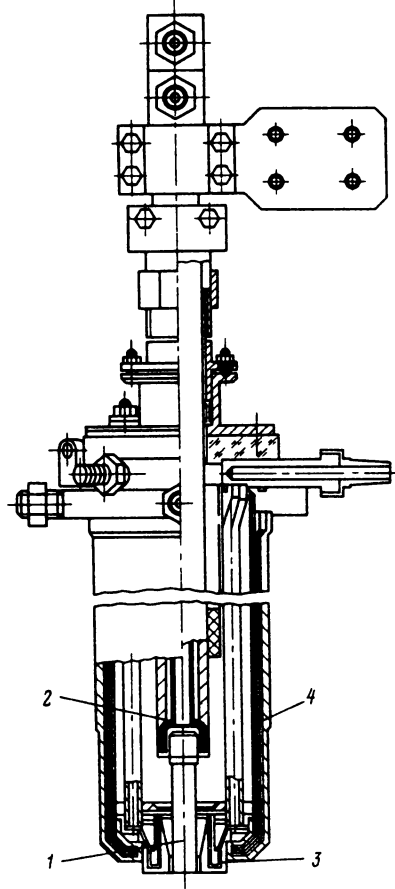


Рис. 53.27. Конструкция плавильного плазмотрона ВНИИЭТО:

1 — катод, 2 — катододержатель; 3 — сопло; 4 — корпус

На рис. 53.28 приведена схема РВПП шахтного типа. В РВПП используются как плавильные плазмотроны с вынесенной на шихту дугой, так и струйные плазмотроны.

реальных возмущениях ее электрических характеристик в плазмотроне. Для решения задачи абсолютной устойчивости дуги, т.е. асимптотической устойчивости УСЭП в целом при сколь угодно больших начальных отклонениях в режиме ее работы, необходима математическая модель нестационарной дуги, описывающая ее характеристики проводимости «в большом» в динамической системе при реальных конечных возмущениях.

#### Управляемые системы электропитания (УСЭП) плазменных ЭТУ

Для электропитания ПЭТУ непригодны источники питания и электрооборудование общепромышленного применения ввиду резко нелинейного характера дуговой нагрузки. Основным промышленным источником питания ПЭТУ является управляемый вентильный преобразователь с автоматической системой регулирования тока дуги, обеспечивающий крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 53.29).

Основным вопросом выбора параметров и режима работы УСЭП при проектировании промышленной ПЭТУ является обеспечение устойчивости горения дуги при интенсивных

Наиболее общим математическим описанием внешних электрических и теплофизических характеристик нестационарной дуги является уравнение первого закона термодинамики

$$\frac{dH(g)}{dt} + P_n(g) = i^2/g,$$

где  $H(g)$  — функция теплосодержания;  $P_n(g)$  —

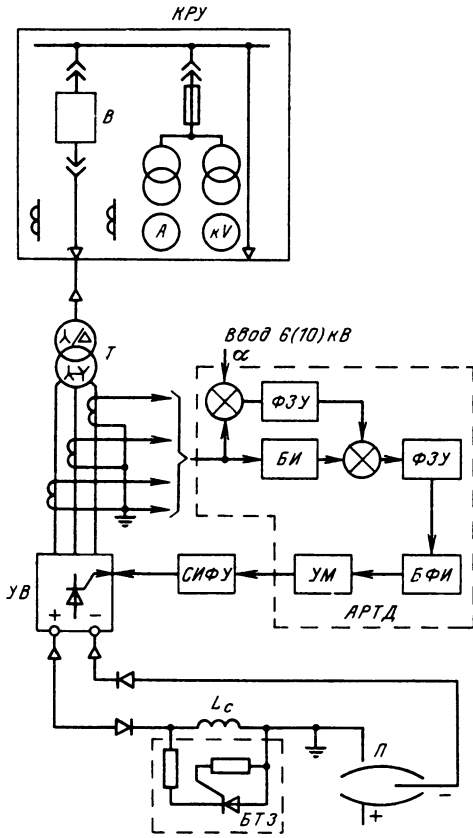


Рис. 53.29. Схема управляемой системы электропитания промышленного плазматрона: В – выключатель; Т – трансформатор тиристорного преобразователя; УВ – тиристорный выпрямитель;  $L_c$  – сглаживающий реактор; П – плазматрон; АРТД – автоматический регулятор тока дуги; БИ – измерительный блок; ФЗУ – формирователь закона управления; БФИ – блок формирования управляющих импульсов; УМ – усилитель мощности; СИФУ – система фазоимпульсного управления выпрямителем

функция потерь энергии нестационарной дуги;  $i, g$  – мгновенные значения тока и проводимости дуги.

Разработанная в МЭИ [53.23] двухслойная газодинамическая модель турбулентной дуги позволила создать теорию расчета нелинейных функций  $H(g)$  и  $P_n(g)$  нестационарной дуги плазменных и дуговых промышленных установок. В основе теории лежат найденные условия подобия внешних электрических и теплофизических характеристик реальных дуг и физической модели цилиндрической дуги для данного плазмообразующего газа.

На рис. 53.30 приведены рассчитанные теплофизические функции  $H(g)$  и  $P_n(g)$  для

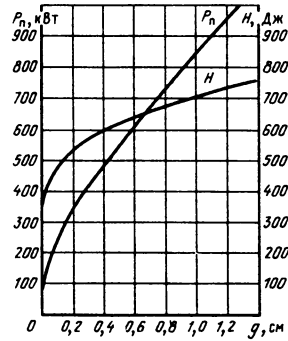


Рис. 53.30. Теплофизические характеристики эталонной цилиндрической водородной дуги

физической модели эталонной цилиндрической дуги в водороде (радиус дуги  $r_d = 10^{-2}$  м, длина дуги  $l_d = 1,0$  м). В соответствии с теорией функция потерь  $P_n(g)$  нестационарной реальной дуги определяется непосредственно по расчетной или экспериментальной статической ВАХ промышленного плазматрона:

$$P_n(g) = U_d I (I/U_d).$$

Из условий подобия теплофизических и электрических внешних характеристик нестационарных дуг функция теплоемкости нестационарной реальной дуги промышленного плазматрона

$$H = g l^2 H_n / g_n.$$

Если ограничиться точностью трехточечной степенной аппроксимации для теплофизических функций эталонной цилиндрической дуги вида

$$H(g) = a_1 g^n + a_0; P_n(g) = b_1 g^m + b_0,$$

то теплофизическая функция  $H(g)$  нестационарной дуги плазматрона принимает аналитический вид:

$$H(g) = g l^2 \frac{a_1 b_1^{(1-n)/m} [P_n(g)/l - b_0]^{n/m} + a_0 b_1^{1/m}}{[P_n(g)/l - b_0]^{1/m}},$$

где  $a_0, a_1, n, b_0, b_1, m$  – коэффициенты аппроксимации функций эталонной цилиндрической дуги;  $P_n(g), g, l$  – функция потерь энергии, проводимость и длина нестационарной дуги плазматрона.

В табл. 53.21 приведены значения коэффициентов аппроксимации теплофизических функций  $H(g)$  и  $P_n(g)$  нестационарной эталонной цилиндрической дуги в водороде и нестационарных водородных дуг промышленных плазматронов.

Таблица 53.21 Коэффициенты аппроксимации теплофизических функций нестационарной дуги плазматронов

Вид дуги в плазматроне	Диапазон $g$ , См	$a_1$	$a_0$	$n$	$b_1$	$b_0$	$m$
ПР-03	0,214 – 0,442	-0,451	5,41	-1,113	1128	385,2	2,256
ПР-03	0,080 – 0,733	3,125	0,598	0,561	484,4	0	0,542
ЭДП-118	0,438 – 0,879	-1,696	6,381	-0,550	233,9	104,6	1,044
ЭДП-118	0,386 – 0,847	-1,448	5,010	-0,486	321,9	117,8	1,009
ЭДП-118	0,326 – 0,745	-0,058	4,619	-2,449	454,3	186,5	1,449
ПДИ-4	0,273 – 0,682	8,00	1,33	0,424	12,06	-12,2	0,966
ПП1	0,058 – 0,200	1,037	0,006	0,916	-69,56	568,2	-0,330
ПП2	0,040 – 0,250	1,586	0,168	0,853	-1825	2262	-0,030
Расчетная цилиндрическая дуга	0,088 – 1,40	393,8	314,7	0,371	732,6	124,0	0,773

На основе полученного аналитического представления нелинейных теплофизических функций  $H(g)$  и  $P_n(g)$  интегральное уравнение энергии нестационарной дуги плазматрона принимает вид обыкновенного дифференциального уравнения:

$$a_1 n g^{n-1} \frac{dg}{dt} = \frac{i^2}{g} - b_1 g^m - b_0,$$

или в канонической форме

$$\frac{dg}{dt} = \frac{i^2}{a_1 n g^n} - \frac{b_1}{a_1 n} g^{m-n-1} - \frac{b_0}{a_1 n} g^{1-n}.$$

Численное решение этого уравнения совместно с уравнениями динамической системы (уравнениями САУ, уравнениями системы электроснабжения или уравнениями источника питания ПЭТУ) может быть выполнено на ЭВМ с помощью разработанных стандартных программ, что открывает возможность исследования динамики систем с дугой «в большом» с учетом нелинейных и динамических свойств нестационарной дуги при конечных изменениях ее проводимости в условиях динамической системы, в том числе УСЭП промышленных плазматронов.

Описанная математическая модель нестационарной дуги позволила разработать теорию расчета и оптимизации УСЭП плазматронов на основе условий абсолютной устойчивости дуги «в большом» при реальных возмущениях в системе. Данная модель и разработанные методы расчета динамических систем с дугой применимы и для расчета систем электропитания других дуговых установок постоянного и переменного тока, например ПДП, ДСП, если известны внешние статические характеристики проводимости дуги и законы изменения длины дуги.

При исследовании устойчивости дуги в УСЭП плазматрона необходимо учитывать дискретность, ограниченность управления и нелинейность управляемого вентильного пре-

образователя. Для этой цели в МЭИ разработаны две математические модели управляемого выпрямителя: простая – с выделением гладкой составляющей в кривой выпрямленного напряжения (рис. 53.31) и полная – с реальной кривой выпрямленного напряжения (рис. 53.32, 53.33).

Проведенные на основе разработанной теории динамических систем с дугой расчеты УСЭП промышленных плазматронов позволили определить оптимальную структуру УСЭП

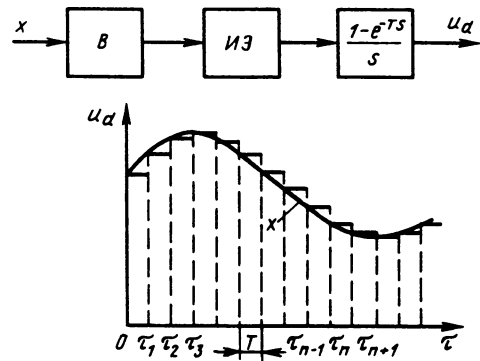


Рис. 53.31. Математическая модель УВ с гладкой составляющей кривой  $u_d$ :

$B$  – выпрямитель;  $ИЭ$  – импульсный элемент;  $x$  – сигнал управления;  $T$  – интервал дискретности

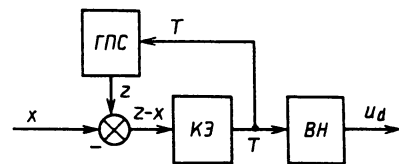


Рис. 53.32. Математическая модель УВ с реальной кривой  $u_d$ :

$ГПС$  – генератор пилообразного сигнала  $z$ ;  $КЭ$  – коммутирующий элемент;  $ВН$  – формирователь кривой выпрямленного напряжения

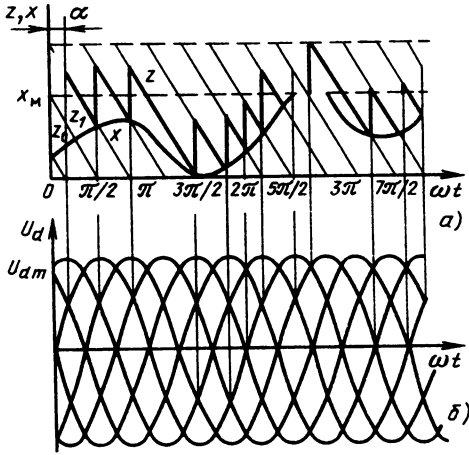


Рис. 53.33. Графики входного сигнала  $x$ , пилообразного сигнала  $z$  (а) и выходного сигнала  $u_d$  модели УВ с реальной кривой  $u_d$  (б)

с двухконтурным регулятором тока дуги плазмотрона (см. рис. 53.29). На рис. 53.34 приведена структурная схема регулятора тока дуги. Оптимизация параметров регулятора и источника питания плазмотрона проводится с учетом устойчивости дуги «в большом», минимального значения индуктивности сглаживающего реактора в цепи дуги  $L$ , минимального значения коэффициента запаса по напряжению управляемого выпрямителя  $k_3 = U_{d0}/U_{д, ном}$ .

Выполненные исследования [53.22] позволили установить следующие оптимальные значения параметров УСЭП плазмотронов: посто-

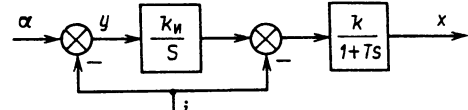


Рис. 53.34. Структурная схема двухконтурного регулятора тока плазмотрона

янная времени регулятора  $T_p \leq 0,003$  с, коэффициент усиления основного контура регулятора  $k = 5$ , коэффициент усиления интегрирующего контура  $k_n = 25 \text{ с}^{-1}$ , коэффициент запаса по напряжению управляемого выпрямителя в номинальном режиме плазмотрона  $k_3 = 1,15$ , индуктивность сглаживающего реактора  $L_{min} = 10^{-2} U_{д, ном} / I_{ном}$ . Минимальное значение индуктивности  $L_{min}$  выбрано с учетом условия абсолютной устойчивости дуги и сохранения необходимых фильтрующих свойств на уровне 1% по основной гармонике 300 Гц в кривой выпрямленного напряжения управляемого вентиляционного преобразователя.

Разработанный в МЭИ универсальный автоматический регулятор промышленных плазмотронов типа АСТ [55.23] может работать в двухконтурном режиме как регулятор тока, мощности или температуры плазмотрона (рис. 53.35).

В табл. 53.22 и 53.23 приведены рекомендуемые для УСЭП промышленных плазмотронов типы управляемых преобразователей и сглаживающих реакторов и их данные.

Наличие сглаживающего реактора в цепи дуги накладывает определенные требования к защите электрооборудования от перенапряжений при погасании и зажигании дуги в плазмотроне.

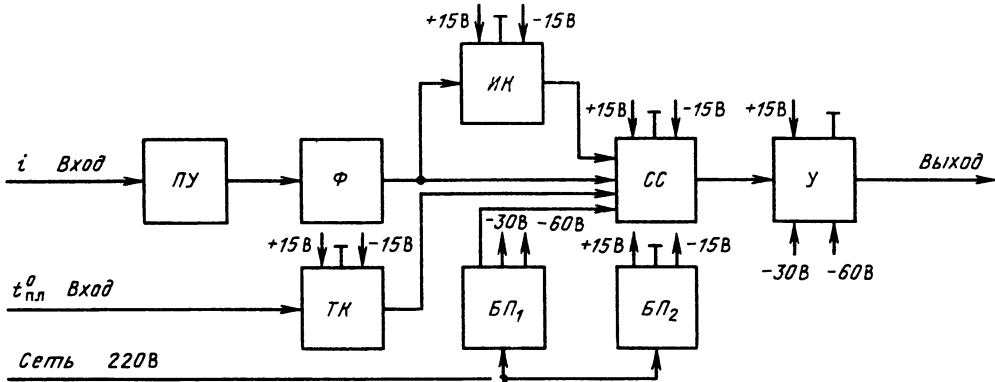


Рис. 53.35. Структурная схема автоматического регулятора АРТ:

ПУ – преобразовательное устройство; Ф – фильтр; ИК – блок интегральной коррекции; СС – схема сравнения; У – выходной усилитель; ТК – преобразователь контура температуры плазмы; БП<sub>1</sub> и БП<sub>2</sub> – блоки питания

Таблица 53.22. Тиристорные преобразователи УСЭП промышленных плазмотронов

Номер группы	Тип	$U_d$ , кВ	$I_d$ , А	$P_d$ , кВт
I	ВРВ-3500/8	8,5	400	3500
	ВРВ-7000/8	8,5	800	7000
	ВИПЭ-1	3,3	2000	7000
II	ВВТ-250/12	12,0	250	3000
	АТ-2-6300/460-II	0,46	6300	3000
	АТ-2-2500/460-II	0,46	2500	1100
	АТ-1600/825-1	0,825	1600	1500
	ТВ9-3200/230-4	0,23	3200	736
	ТВ9-6300/460Т-4	0,46	6300	3000
	ТВ9-10000/825Т-4	0,825	10000	8250
III	АТ-200/460-2	0,46	200	92
	АТ-200/230-1	0,23	200	46

Примечание. I – высоковольтные, II, III – низковольтные (II – большой мощности, III – малой).

На рис. 53.36 представлена типовая принципиальная схема управляемой системы электропитания промышленных струйных плазмотронов мощностью 5000 кВт на базе тиристорного преобразователя ВРВ-7000/8.

Расчет параметров электрооборудования

и характеристик источника питания для каждого конкретного плазмотрона может быть проведен на основе изложенного выше метода расчета динамических систем с дугой.

### Вакуумные плазменные печи

Вакуумные плазменные печи (ВПП) являются перспективным видом вакуумных плавильных печей для реализации в качественной металлургии процессов переплава и рафинирования в диапазоне давлений от  $10^{-1}$  до 10 Па. Источником нагрева с современных ВПП является самостоятельный сильноточный разряд с горячим полым плазменным катодом (РПК) и током 3000–10 000 А. В плазме столба РПК направленная составляющая кинетической энергии электронов превышает составляющую тепловую хаотического движения электронов:

$$\frac{mv_e^2}{2} > \frac{3}{2} kT_e.$$

Поэтому нагрев в ВПП представляет собой электронный нагрев с поверхности аналогично нагреву в электронных плавильных печах. Однако формирование направленного потока электронов в ВПП происходит в резко неравновесной разреженной плазме столба РПК. Именно поэтому ВПП такого типа получили название электронно-плазменных печей

Таблица 53.23 Сглаживающие реакторы УСЭП промышленных плазмотронов

Тип	$I$ , А	$L$ , Гн	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
СРОС-63/0,5У4	100	$16 \cdot 10^{-3}$	590 × 510 × 270	140
	200	$4 \cdot 10^{-3}$		
СРОС-100/0,5У4	160	$9 \cdot 10^{-3}$	670 × 510 × 270	160
	320	$2,25 \cdot 10^{-3}$		
СРОС-200/0,5У4	100	$6 \cdot 10^{-2}$	730 × 600 × 300	300
	200	$1,5 \cdot 10^{-2}$		
СРОС-400/0,5У4	200	$3 \cdot 10^{-2}$	860 × 710 × 400	580
	400	$7,5 \cdot 10^{-3}$		
СРОС-160/6У4	150	$2 \cdot 10^{-2}$	700 × 630 × 400	320
ФРОС-125/0,5У3	500	$7,5 \cdot 10^{-4}$		
ФРОС-250/0,5У3	250	$6,5 \cdot 10^{-3}$	–	210
	320	$4,2 \cdot 10^{-3}$	–	215
	800	$6 \cdot 10^{-4}$	–	215
	1000	$3,5 \cdot 10^{-4}$	–	220
ФРОС-500/0,5У3	500	$3,25 \cdot 10^{-3}$	–	340
ФРОС-1000/0,5У3	800	$5 \cdot 10^{-3}$	–	510
	800	$2,3 \cdot 10^{-3}$	–	460
	1000	$1,6 \cdot 10^{-3}$	–	470
РС-1500	400	$2 \cdot 10^{-2}$	1000 × 906 × 733	1061
СРОМ-1000/10У1	250	$5 \cdot 10^{-2}$	2800 × 2150 × 1500	3500
СРОМ-1500/10У1	150	0,2	–	–
СРОМ-5500/20У1	360	0,11	3900 × 3665 × 2200	10850

(ЭПП), а данный плазменный нагрев называется электронно-плазменным (ЭПН) [53.3].

Характерной особенностью РПК является значительная неоднородность плазмы по длине столба (рис. 53.37), который делится на две характерные области: а) область внутри полости катода – внутренний столб, б) область

в технологическом плазменном пространстве печи – внешний столб. Экспериментом установлено, что энергия электронов  $W_e$  резко возрастает в пределах внутреннего столба, достигает максимального значения 30–50 эВ на срезе полого катода, а затем в пределах внешнего столба на пути электронов к аноду-

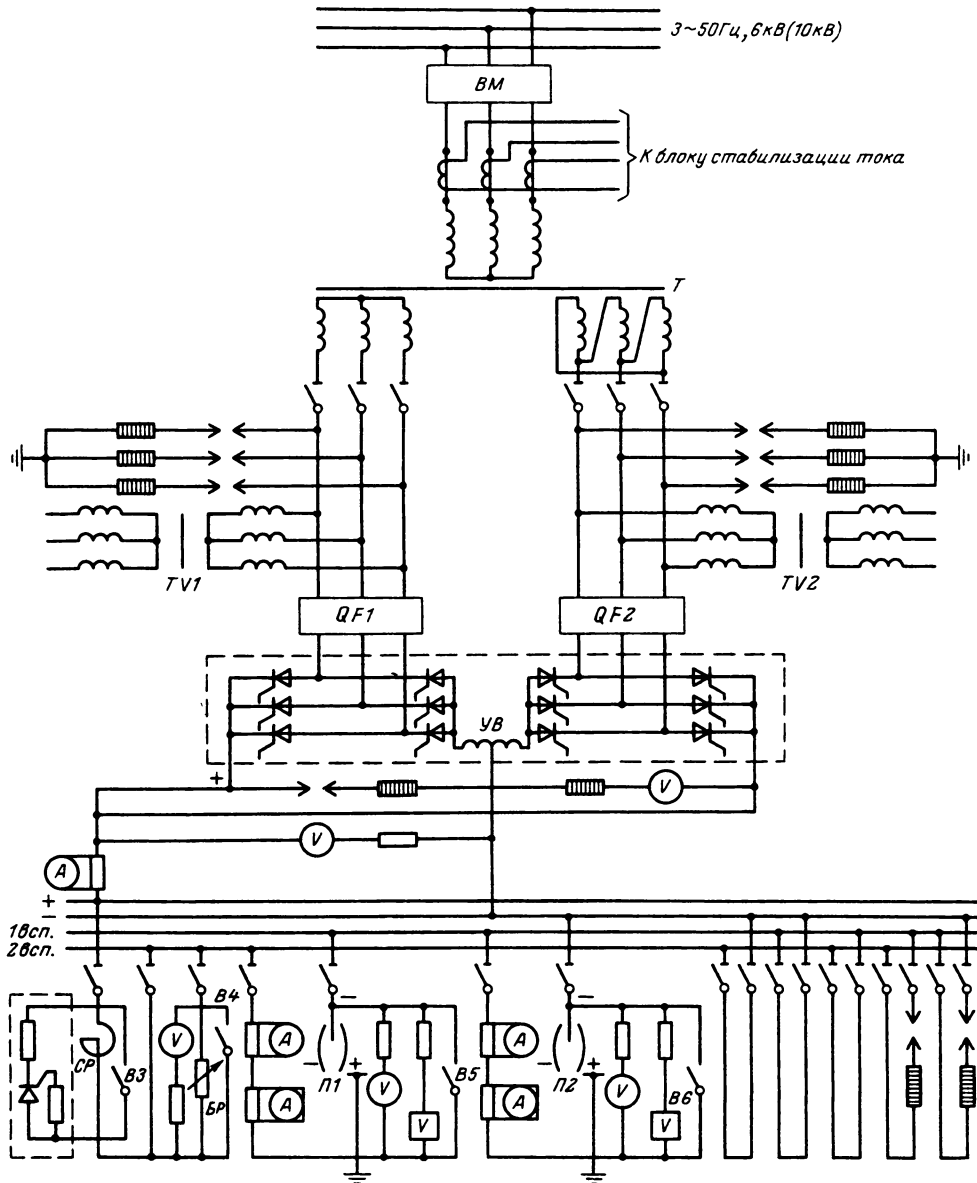


Рис. 53.36. Принципиальная схема управляемого источника питания струйного плазматрона: *BM* – высоковольтный выключатель; *TV1*, *TV2* – трансформатор напряжения; *T* – силовой трансформатор; *QF1*–*QF2* – автоматические быстродействующие выключатели; *UB* – управляемый выпрямитель; *CP* – сглаживающий реактор; *BP* – балластный реостат

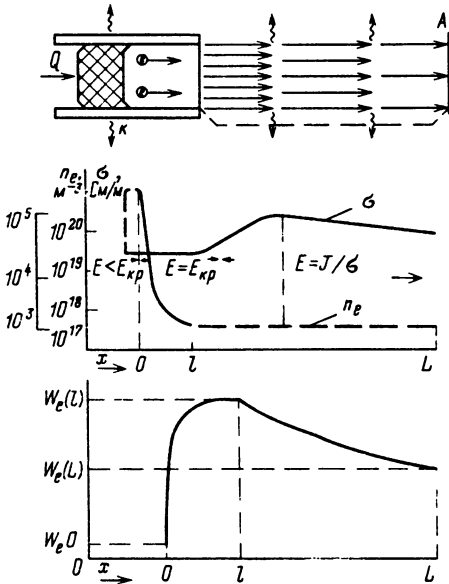


Рис. 53.37. Схема и характеристики разряда с полым катодом:

$\sigma$  — удельная электрическая проводимость плазмы;  $n_e$ ,  $W_e$  — концентрация и кинематическая энергия электронов плазмы столба; А — анод; К — катод.  $J$ ,  $E$  — плотность тока и напряженность электрического поля в плазме столба ( $E_{кр}$  — критическое значение);  $Q$  — расход плазмообразующего газа

кристаллизатору  $W_e$  только уменьшается. Подобное явление, ранее не наблюдавшееся в классических формах разряда, объясняется нелинейными явлениями в разреженной сильно ионизированной плазме РПК, обусловленными действием сильного электрического поля [53.24].

ЭПП отличаются устойчивым электрическим режимом работы и возрастающей внешней ВАХ. Поэтому для их питания в рабочем режиме используют источники общего про-

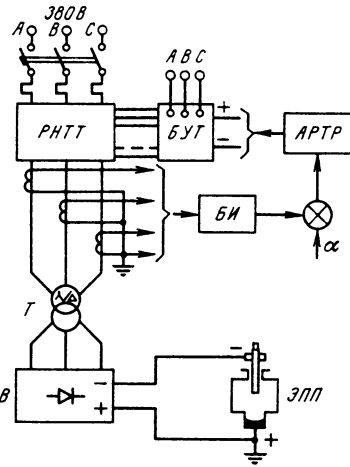


Рис. 53.38. Схема управляемого источника питания электронно-плазменной печи (рабочий режим):

PHTT — регулятор напряжения тиристорный трехфазный; БУТ — блок управления тиристорами РНТТ; АТР — автоматический регулятор тока разряда с полым катодом; БИ — блок измерения тока разряда; Т — трансформатор печной типа ТПТ; В — неуправляемый выпрямитель; ЭПП — электронно-плазменная печь

мышленного применения. Структурная схема управляемого источника питания ЭПП на базе тиристорного регулятора РНТТ приведена на рис. 53.38.

### Электронные печи

Электронные плавильные печи, так же как и электронно-плазменные печи, делятся на три группы (рис. 53.39): переплавные, рафинировочные и литейные установки. В переплавных печах плавка металла проводится в кристаллизаторе. В литейных плавка про-

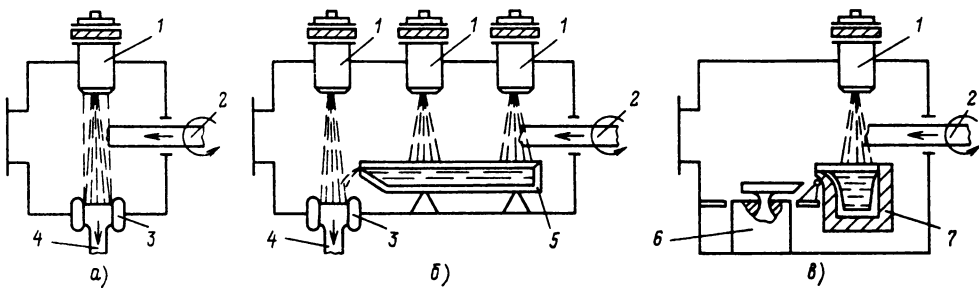


Рис. 53.39. Схемы плавильных электронно-плазменных и электронных печей:

а — переплавные печи; б — рафинировочные печи; в — литейные (гарнисажные) печи; 1 — источник нагрева; 2 — переплавляемая заготовка; 3 — кристаллизатор; 4 — слиток; 5 — холодный под (промежуточная емкость); 6 — литейная форма; 7 — тигель



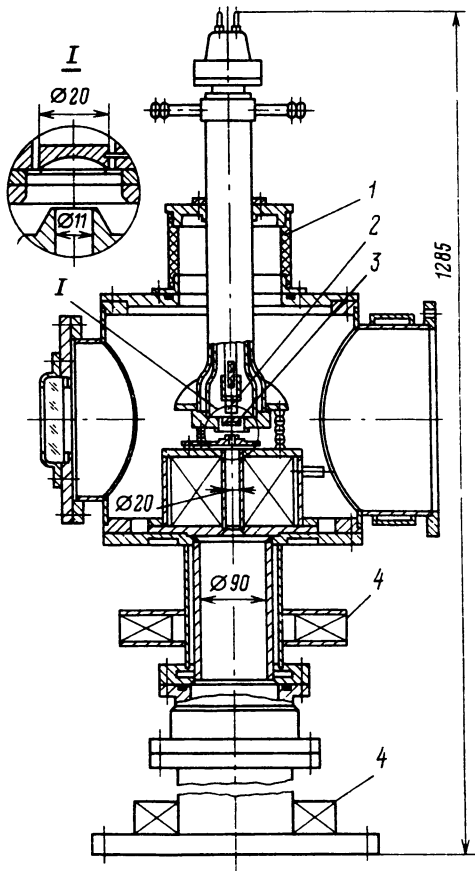


Рис. 53.40. Конструкция электронной пушки ВЭИ мощностью 250 кВт:

1 — изолятор; 2 — вспомогательный катод; 3 — основной катод; 4 — линзы магнитной фокусировки и развертки электронного пучка

дится в гарнисаже из этого же металла. В рафинировочных плавках проводится с промежуточной емкостью или на холодном поде.

В электронных печах нагрев осуществляется интенсивным потоком электронов с энергией 10–30 кэВ, создаваемым мощной электронной пушкой обычно аксиального типа. Нагрев проводится при давлении в печи не выше  $10^{-1}$  Па, что определяется электрической прочностью и характеристиками конструкции самой электронной пушки.

Электронная пушка аксиального типа (рис. 53.40) состоит из основного катода 3 с косвенным подогревом от вспомогательного катода 2, анода, системы магнитной фокусировки и развертки электронного пучка 4.

Вольт-амперная характеристика элект-

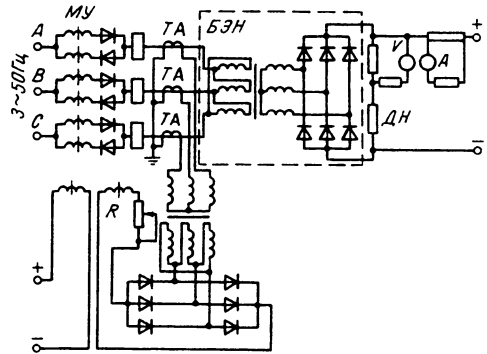


Рис. 53.41. Блок управляемого источника питания накала катода электронной печи: МУ — магнитный усилитель; ТА — трансформатор тока; БЭН — блок электронного накала; ДН — делитель напряжения

ронной пушки имеет вид

$$I = pU^{3/2},$$

где  $p$  — перванс данной промышленной электронной пушки, который лежит в пределах от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup>.

Для каждой конкретной промышленной пушки значение перванса определяется из эксперимента или находится методом моделирования [53.20].

Управление технологическим процессом в электронных печах осуществляется плавным изменением ускоряющего напряжения либо (при работе вблизи зоны насыщения) изменением температуры основного катода. Управляемая система электропитания электронных печей состоит из двух управляемых источников питания: а) источника анодного напряжения со ступенчатым изменением анодного напряжения электронной пушки, б) управляемого источника накала катода с регулятором тока в нагрузке.

Современные электронные плавильные печи мощностью 250, 500 кВт и выше [53.3] имеют автоматическое переключение ступеней напряжения силового трансформатора, автоматическую защиту от токов КЗ и управляемый источник накала катода с автоматическим регулятором тока. На рис. 53.41 приведена схема источника питания косвенного накала катода пушки мощностью 125 кВт. Блок накала БЭН основного катода пушки имеет мощность 4 кВт, напряжение до 4 кВ и подключается к сети через магнитный усилитель МУ. Сигнал обратной связи регулятора тока изменяется резистором R. Накал вспомогательного катода пушки обеспечивается с помощью трансформатора прямого накала, рассчитанно-

го на ток 50 А и напряжение до 15 В с изоляцией вторичной обмотки на рабочее напряжение пушки.

#### Список литературы

- 53.1. **Свенчанский А. Д.** Электрические промышленные печи. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975. 382 с.
- 53.2. **Вайнберг А. М.** Индукционные печи. М.: Энергия, 1967. 416 с.
- 53.3. **Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева/А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др.** М.: Энергоатомиздат, 1981. 296 с.
- 53.4. **Егоров А. В., Моржин А. Ф.** Электрические печи (для производства стали). М.: Металлургия, 1975. 320 с.
- 53.5. **Электротермическое оборудование: Справочник/Под общ. ред. А. П. Альтгаузена.** — 2-е изд. М.: Энергия, 1980. 416 с.
- 53.6. **Электрооборудование и автоматика электротермических установок (справочник).** М.: Энергия, 1978. 304 с.
- 53.7. **Лейкалд М. С.** Вакуумные электрические печи. М.: Энергия, 1968. 328 с.
- 53.8. **Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры/Под общ. ред. Л. Е. Никольского.** М.: Энергия, 1971. 272 с.
- 53.9. **Кувалдин А. Б.** Низкотемпературный индукционный нагрев стали. М.: Энергия, 1976. 112 с.
- 53.10. **Латаш Ю. В., Медовар Б. И.** Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1970. 240 с.
- 53.11. **Свенчанский А. Д., Трейзон З. П., Мнулин Л. А.** Электроснабжение и автоматизация электротермических установок. М.: Энергия, 1980. 320 с.
- 53.12. **Электрические печи сопротивления и дуговые печи: Учебник для техникумов/Под ред. М. Б. Гутмана.** М.: Энергоатомиздат, 1983. 160 с.
- 53.13. **Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С.** Источники питания электротермических установок. М.: Энергоатомиздат, 1985. 246 с.
- 53.14. **Волохонский Л. А.** Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
- 53.15. **Общепромышленные электропечи непрерывного действия/А. В. Арндарчук, Н. М. Катель, В. Я. Липов и др.** М.: Энергия, 1977. 247 с.
- 53.16. **Электротехнологические промышленные установки/Под ред. А. Д. Свенчанского.** М.: Энергоатомиздат, 1982. 400 с.
- 53.17. **Фомин Н. И., Затуловский Л. М.** Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Металлургия, 1979. 247 с.
- 53.18. **Электродуговые плазмотроны/Под ред. М. Ф. Жукова.** Новосибирск: СО АН СССР, 1977. 27 с.
- 53.19. **Бортничук Н. И., Крутянский М. М.** Плазменно-дуговые печи. М.: Энергоиздат, 1981. 120 с.
- 53.20. **Электронные плавильные печи/М. Я. Смелянский, А. В. Елютин, А. М. Кручинин и др.** М.: Энергия, 1971. 187 с.
- 53.21. **Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.** Электронно-лучевая технология: Пер. с нем. М.: Энергия, 1980. 528 с.
- 53.22. **Кручинин А. М.** Исследование и расчет динамических систем с дугой//Проблемы электронно-плазменного нагрева. Тр. МЭИ. 1981. Вып. 513. С. 5—10.
- 53.23. **Автоматический регулятор тока промышленных плазмотронов.** М.: МЭИ (Рекламный проспект ВДНХ), 1980. 4 с.
- 53.24. **Проблемы электронно-плазменного нагрева/Под ред. А. М. Кручинина, Ю. М. Смирнова//Тр. МЭИ. 1980. Вып. 462. 112 с.**

## Раздел 54

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

## СОДЕРЖАНИЕ

- 54.1. Электрофизикохимические методы размерной обработки. Принципы и схемы размерного формообразования (202). Область применения и перспективы развития электрофизикохимических методов размерной обработки (203)
- 54.2. Источники питания электрофизикохимических станков. Силовые импульсы, используемые в ЭФХ установках (204). Методы генерирования и формирования силовых импульсов (206). Статические источники питания ЭФХ станков с накопителями энергии (207). Статические источники питания ЭФХ станков без накопительной энергии (212). Источники питания электроэрозионных станков (213). Источники питания электрохимических копирувально-прошивочных станков (215). Источники питания светолучевых станков (225). Источники питания ультразвуковых станков (226). Источники питания комбинированных станков (227)
- 54.3. Электрогидравлические установки. Основные сведения (230). Расчет электрического пробоя (231). Расчет электрических характеристик канала разряда (233). Связь параметров канала разряда и волны сжатия с электрическими характеристиками установки (234). Схемы разрядных контуров установки (235)
- 54.4. Магнитно-импульсная обработка ма-

териалов. Импульсные электродинамические силы и их использование (238). Разрядные цепи установок (239). Расчет параметров магнитно-импульсных установок (241). Элементы установок для магнитно-импульсной обработки (242)

54.5. Электронно-ионная (аэрозольная) технология. Общие положения (243). Зарядка и движение частиц (244). Влияние концентрации частиц (246). Технические применения (247) Источники питания (262)

Список литературы . . . . . 264

Электротехнологическими называют процессы, основанные на использовании специфических свойств электроэнергии. К ним относятся процессы:

электротермические;  
электросварочные;

электрофизические, лежащие в основе соответствующих электрофизических методов обработки материалов – электроэрозионной, плазменной, магнитно-импульсной, электрогидравлической (электровзрывной), лазерной;

электрохимические, лежащие в основе электрохимических методов обработки материалов – электролиза, гальванотехники, анодной обработки;

связанные с аэрозольной (электронно-ионной) технологией.

Таким образом, понятие «электротехнология» (ЭТ) охватывает обширную группу разнообразных технологических процессов, основанных на использовании энергии электрического тока, электрического или электромагнитного поля, подводимой непосредственно к технологическому объекту и преобразуемой в его рабочей зоне в тепловую, химическую или (и) механическую энергию, которая (которые) собственно и обеспечивают (порознь или совместно) реализацию заданного процесса.

В настоящем разделе описывается оборудование для электрофизических, частично электрохимических и комбинированных методов размерной обработки, а также для аэрозольной (электронно-ионной) технологии.

#### **54.1. ЭЛЕКТРОФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

##### **Принципы и схемы размерного формообразования**

Электрофизическим, электрохимическим и комбинированным методам соответствуют два класса технологии получения деталей с заданными формой, размерами и физико-механическими свойствами:

снятием припусков («стружки») аналогично традиционным методам механической обработки резанием;

деформированием заготовки подобно известным процессам обработки давлением – штамповке, прессовке.

В § 54.1 и 54.2 рассматриваются первый класс технологии и оборудование, применяемое при использовании методов, соответствующих этому классу. Внутри этого класса преобладающее место занимают бесконтактные методы электротехнологии – электроэрозионные, лучевые (плазменные, лазерные и др.) и электрохимические методы размерной обработки. В § 54.3 и 54.4 рассматриваются методы обработки, связанные с деформированием заготовок.

В общем случае процесс бесконтактного формообразования заключается в изменении формы заготовки от исходной до заданной (детали) в результате воздействия через промежуток, ограниченный поверхностями инструмента и заготовки, на каждую точку поверхности некоторой обобщенной «силы», возникающей при создании между заготовкой и инструментом разности обобщенных потенциалов.

Возможно одновременное воздействие на объект нескольких видов энергии – такие процессы называются комбинированными или совмещенными. Принципиально возможно из пяти основных «сил» формообразования, обусловленных наличием электрических, тепловых, химических и механических (поверхностных или объемных) потенциалов, создать 26 основных комбинированных процессов, однако не все из них являются эффективными. В число основных комбинированных не входят процессы, при которых вводятся «силы», не приводящие к изменению формы, но снижающие «сопротивление» заготовки воздействию основных «сил» (например, сочетание резания с плазменным подогревом без изменения фазового состояния заготовки).

По временным характеристикам энергетические воздействия могут быть непрерывными, импульсными, пульсирующими.

В зависимости от степени концентрации используемой мощности процессы размерного формообразования могут быть разделены на две группы.

К первой группе относятся электрофизи-

ческие (ЭФ) методы, использующие высококонцентрированные источники мощности. При концентрации мощности, достигающей  $10^3$ – $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на локальном участке поверхности заготовки, энергия электрического тока или электромагнитного поля преобразуется в зоне обработки главным образом в тепловую, определяющую в конечном счете съем и удаление с участка заготовки «стружки» в жидком или парообразном состоянии. Высокая концентрация достигается благодаря локализации выделяющейся энергии в пространстве (например, на малой площадке при подводе энергии через канал разряда, луч лазера, поток плазмы или электронный луч) или (и) во времени (при импульсном воздействии). В эту группу по мере увеличения плотности мощности входят электроэрозионная, плазменная, электронно-лучевая, лазерная (светолучевая) и некоторые другие виды обработки.

Относящиеся ко второй группе электрохимические (ЭХ) методы основаны на преобразовании одновременно на всей обрабатываемой поверхности электрической энергии в химическую при меньшей (примерно  $10$ – $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) плотности мощности, подводимой непрерывно или импульсно.

Методы ЭФ и ЭХ часто объединяют под общим названием электрофизико-химических (ЭФХ) методов.

Дополнительную группу составляют комбинированные процессы, в которых сочетается одновременно или последовательно несколько видов дополняющих друг друга энергетических воздействий. Сюда относятся, в частности, эрозионно-электрохимическая, ультразвуковая электрохимическая, ряд сочетаний традиционных и ЭФХ-видов обработки (плазменно-механическая, алмазно-эрозионная и др.).

#### **Область применения и перспективы развития электрофизикохимических методов размерной обработки**

Область применения и перспективы развития ЭФХ технологии определяются тремя главными особенностями:

1) возможностью обработки материалов практически независимо от их прочностных характеристик, так как съем материала осуществляется не за счет создания концентрированных механических усилий, а вследствие ослабления связей в заготовке при нагреве (локальное плавление или испарение) либо перевода в результате электролиза металла в легко удаляемые химические соединения (например, гидроксиды металлов);

2) возможностью производительной обра-

ботки изделий со сложной формой (типа штампов, пресс-форм и т. п.). Это касается электроэрозионной (ЭЭ) и электрохимической (ЭХ) обработок, позволяющих отображать (копировать) форму фасонного электрода-инструмента в теле заготовки благодаря тому, что интенсивность съема материала в данной точке зависит от местного межэлектродного расстояния. Вследствие этого можно увеличивать вводимую энергию по мере роста размеров обрабатываемой поверхности. Отсюда вытекает принципиально важная зависимость – общая продолжительность обработки полости зависит не столько от объема, сколько от ее глубины  $h$ , поскольку имеется возможность в зависимости от площади обработки  $F$  соответственно изменять вводимую энергию. В традиционных же процессах обработки резанием допустимая энергия определяется не площадью  $F$ , а несоизмеримо меньшими и мало изменяющимися размерами инструмента и поэтому время обработки зависит от общего объема удаляемой «стружки». Таким образом, чем больше будет отношение  $F/h$ , тем выгодней в общем случае ЭФХ объемное формообразование;

3) возможностью обработки инструментами, не выдерживающими силового воздействия, тончайших отверстий и щелей, а также отверстий, щелей, полостей, расположенных в недоступных для вращающегося инструмента местах, имеющих, например, криволинейные оси, сложные формы, в частности при безотходном разделении твердых тел по любым траекториям.

Эти особенности проявляются в наибольшей мере при обработке деталей современных машин и аппаратов, работающих в особых условиях: в агрессивных средах, при воздействии интенсивных излучений, высоких температур, на больших скоростях и т. п., поскольку в этих случаях применяются, как правило, труднообрабатываемые традиционными методами материалы и сложные формы изделий. Таким образом, ЭФХ методы наиболее применимы и эффективны в области технологии передовых отраслей техники. В области технологии инструментального производства они существенно облегчают изготовление фасонной штамповой оснастки, пресс-форм для пластмасс, металла, стекла, резины и подобных им изделий, причем создаются условия для развития малоотходной технологии формообразования без снятия стружки.

В нашей стране разработаны наиболее универсальные методы обработки: электрохимический, электроэрозионный, лазерный и ряд комбинированных. Созданы новые подотрасли станкостроительной и электротехнической

промышленности, производящие станки и источники питания для ЭФХ методов (в том числе новый класс силовых генераторов импульсов) и системы управления, освоены новые электродные материалы, специальные диэлектрические жидкости и многое другое, необходимое для создания комплекса оборудования и технологии.

Особое значение ЭФХ методы обработки приобрели за последние годы в связи с тем, что они достаточно легко поддаются полной автоматизации. Это позволяет выпускать станки с числовым программным и адаптивным управлением, создавать участки из автоматизированных станков, работающие по малолюдной и безлюдной технологии, управляемые от центральной ЭВМ. Перспективным в этой области является создание автоматически управляемых источников питания, работающих в весьма широком диапазоне частот и режимов, практически сращенных с многокоординатными системами программного и адаптивного управления. На базе таких источников создаются гибкие производственные станочные модули, входящие в состав гибких автоматизированных производств.

## 54.2. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКИХ СТАНКОВ

### Силовые импульсы, используемые в ЭФХ установках

Терминология, способы описания, формы и параметры силовых импульсов, используемых при ЭФХ обработке (так же, как и вообще в импульсной электротехнике), принципиально не отличаются от принятых в импульсной электронике. Однако значение тех или иных факторов при анализе работы источника питания на конкретную нагрузку отличаются в связи с выделением на первый план энергетической стороны процесса.

Обычно в ЭФХ процессах приходится иметь дело с последовательностью периодически повторяющихся импульсов. Такая последовательность характеризуется периодом  $T$  или частотой повторения  $f = 1/T$ , скважностью  $q$  ( $q > 1$ ) или коэффициентом заполнения  $n$  ( $n < 1$ ), которые определяются соотношениями

$$q = T/t_n; \quad n = 1/q = t_n/T,$$

где  $t_n$  — продолжительность импульса.

Если  $T \gg t_n$ , то считается, что на объект действуют не периодические, а одиночные импульсы. Одиночные импульсы большой мощности и энергии, осуществляющие однократ-

ные энергетические воздействия, обычно используются при проведении испытаний и исследований. В случае использования периодических импульсов схема и конструкция генератора и линии передачи должны предусматривать возможность генерирования и передачи объекту достаточной энергии при высоком КПД для совершения заданной работы.

Импульсы униполярные и биполярные с постоянной составляющей используются в ЭЭ установках, симметричные знакопеременные и униполярные — соответственно в электродных и анодно-механических установках. Диапазон изменения длительности импульсов тока, используемых в импульсной электротехнологии, заключен примерно в пределах  $10^{-7} - 10^{-1}$  с. В этом диапазоне электроэрозивная обработка (ЭЭО) занимает область  $10^{-7} - 10^{-2}$  с, лазерная обработка  $10^{-6} - 10^{-4}$  с, импульсная электрохимическая обработка (ЭХО)  $10^{-3} - 10^{-1}$  с. Указанные границы диапазонов подвижны и расширяются по мере совершенствования процессов и оборудования.

Амплитуды импульсов тока изменяются в широких пределах: от долей ампера до десятков тысяч ампер (верхний диапазон относится к импульсной ЭХО). В широком диапазоне также изменяются амплитуды импульсов напряжения: от нескольких вольт до сотен вольт (верхний диапазон относится к ЭЭО). В технике периодических импульсных сильных токов, предназначенных для ЭФХ обработки, наиболее распространено применение импульсов относительно низкого напряжения (десятки и сотни вольт) и относительно большого тока (до нескольких тысяч ампер).

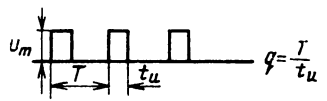
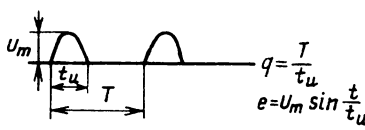
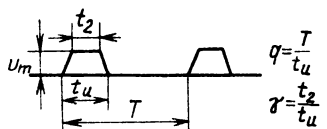
Диапазон изменения скважностей  $q$  лежит примерно от 1000 (практически одиночные импульсы) до значений, близких к единице. В ЭЭО  $1,05 \leq q \leq 10$ , причем нижний диапазон относится к объемному, а верхний — к плоскому формообразованию. В этих же границах заключены скважности, применяемые при импульсной ЭХО и лазерной обработке. Диапазон используемых при ЭФХ обработке частот изменяется от единиц импульсов в секунду (импульсная ЭХО) примерно до  $10^6$  имп/с (ЭЭО в области мягких режимов).

Параметры периодических импульсов — длительность, амплитуда и скважность — определяют средние и действующие значения токов и напряжений, максимальную мощность и энергию импульсов, мощность генератора, коэффициенты формы кривых токов и напряжений и другие параметры, характеризующие процессы, происходящие в генераторе импульсов, линии связи и нагрузке. Нагрузки источников периодических импульсов токов разделяются на два основных вида:

Таблица 54.1. Основные соотношения для периодических импульсов при работе на активную нагрузку

Параметры периодических импульсов	За период	За импульс	Соотношение значений за период за импульс
Среднее значение напряжения (тока)	$U_{срT} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$	$U_{ср,и} = \frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} u dt$	$\frac{U_{срT}}{U_{ср,и}} = 1/q$
Действующее значение напряжения (тока)	$U_{dT} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$	$U_{д,и} = \sqrt{\frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} u^2 dt}$	$\frac{U_{dT}}{U_{д,и}} = 1/\sqrt{q}$
Коэффициент формы	$K_{фT} = U_{dT}/U_{срT}$	$K_{ф,и} = U_{д,и}/U_{ср,и}$	$\frac{K_{фT}}{K_{ф,и}} = \sqrt{q}$
Коэффициент амплитуды	$K_{aT} = U_m/U_{dT}$	$K_{a,и} = U_m/U_{д,и}$	$\frac{K_{aT}}{K_{a,и}} = \sqrt{q}$
Отношение максимального значения к среднему	$U_m/U_{срT} = K_{мсрT}$	$U_m/U_{ср,и} = K_{мср,и}$	$\frac{K_{мсрT}}{K_{мср,и}} = q$
Средняя мощность на активной нагрузке	$P_{срT} = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = \frac{U_{dT}^2}{R}$	$P_{ср,и} = \frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} ui dt = \frac{U_{д,и}^2}{R}$	$\frac{P_{срT}}{P_{ср,и}} = \frac{1}{q}$

Таблица 54.2 Характеристики периодических импульсов и зависимости от скважности (для типичных форм импульсов)

Форма кривой	Коэффициент формы кривой $K_{фT}$	Коэффициент амплитуды $K_{aT}$	Отношение максимального значения к среднему $K_{мсрT}$	Для чисто активной нагрузки	
				$\frac{1}{K_{aT}}$ $\frac{P_{срT}}{P_m}$	$\frac{P_{ср,и}}{P_{срT}}$
	$\sqrt{q}$	$\sqrt{q}$	$q$	$\frac{1}{q}$	$q$
	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{q}$	$\sqrt{2} \sqrt{q}$	$\frac{\pi}{2} q$	$\frac{1}{2q}$	$\frac{\pi^2}{8} q$
	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{1+2\gamma}}{1+\gamma} \sqrt{q}$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+2\gamma}} \sqrt{q}$	$\frac{2}{1+\gamma} q$	$\frac{1+2\gamma}{3} \frac{1}{q}$	$\frac{4}{3} \frac{1+2\gamma}{(1+\gamma)} q$

1) линейная нагрузка, которую можно представить в виде комбинаций линейных элементов электрических цепей  $R$ ,  $L$  и  $C$ . Частным случаем является чисто активная нагрузка (наладочные режимы и режимы при замкнутых накоротко электродах) и электролиты;

2) нелинейная нагрузка, представляемая разрядным промежутком или переходным контактом, в которых происходит преобразование энергии импульса. К этой группе относятся все виды ЭЭО и импульсной ЭХО.

Для линейной нагрузки в установившемся режиме форма кривой импульсного тока или напряжения характеризуется коэффициентами (табл. 54.1) формы (отношение действующего значения к среднему), амплитуды (отношение максимального значения к действующему), искажения (отношение действующего значения основной гармоники к реальному действующему значению всей кривой тока). Указанные коэффициенты зависят не только от формы импульсов, но и от длительности паузы.

В табл. 54.2 приведены значения указанных коэффициентов для простейших форм кривых в зависимости от параметров и скажности импульса.

Расчет установившихся режимов в линейных цепях при питании их импульсным напряжением может быть произведен при помощи разложения кривой этого напряжения в ряд Фурье.

#### Методы генерирования и формирования силовых импульсов

Периодические силовые импульсы могут быть получены путем преобразования непрерывно подводимых незлектрических видов энергии (механической, химической, тепловой) в прерывистую электрическую, преобразования исходного переменного или постоянного тока в импульсный или путем комбинации этих способов.

Если принять, что в качестве исходных форм энергии у потребителя импульсного тока могут использоваться механическая  $M$  и электрическая энергия переменного тока промышленной частоты  $\mathcal{E}_{50}$ , то остальные виды энергии получают преобразованием из исходных. При сделанных оговорках отнесем к методам непосредственного генерирования те, которые основаны на одноступенчатом преобразовании исходных видов энергии в импульсную ( $M - \mathcal{E}_{им}$  и  $\mathcal{E}_{50} - \mathcal{E}_{им}$ ). Примером непосредственного генерирования является использование электромашинных генераторов

импульсов, дающих на выходе униполярные или знакопеременные импульсные напряжения ( $M - \mathcal{E}_{им}$ ), и статических электромагнитных генераторов симметричных знакопеременных импульсов на основе магнитонасыщенных элементов ( $\mathcal{E}_{50} - \mathcal{E}_{им}$ ).

При помощи управляемых клапанов можно преобразовать электрическую энергию постоянного или переменного тока в импульсную различными способами. В случае одноступенчатого преобразования переменного тока в импульсный ( $\mathcal{E}_{50} - \mathcal{E}_{им}$ ) без промежуточного выпрямления получим систему непосредственного генерирования. Формирование импульсов также может быть непосредственным (выпрямление с получением прерывистого тока в нагрузке) или с предварительным преобразованием в энергию высокой частоты  $\mathcal{E}_{вч}$  при двухступенчатом ( $M - \mathcal{E}_{вч} - \mathcal{E}_{им}$ ) или трехступенчатом (с выпрямлением  $\mathcal{E}_{50} - \mathcal{E}_{=}$ ) преобразовании ( $\mathcal{E}_{50} - \mathcal{E}_{=} - \mathcal{E}_{вч} - \mathcal{E}_{им}$ ).

Униполярные импульсы могут быть получены из энергии постоянного тока с помощью различных прерывателей на основе силовых транзисторов или тиристоров; в последнем случае для запирающих тиристоров необходимы специальные устройства принудительной коммутации (см. § 32.22). Весьма часто используют генераторы импульсов, основанные на комбинации колебательного  $LC$ -контура с каким-либо из названных выше приборов, а также на периодическом разряде емкостного или индуктивного накопителя энергии на нагрузку через ключ, в роли которого опять-таки используется управляемый полупроводниковый прибор.

По характеру влияния нагрузки на генератор и реакции генератора на нагрузку можно выделить электрические генераторы импульсов двух классов – независимые и зависимые. Независимыми генераторами называются те, у которых амплитуда, длительность, полярность, частота и форма импульсов практически не зависят во время работы от состояния нагрузки. У зависимых генераторов эти параметры определяются не только генератором, но и состоянием нагрузки. Группы генераторов, у которых часть параметров зависит, а часть не зависит от нагрузки, называются ограниченно зависимыми.

Следует отметить, что в настоящее время электромашинные генераторы практически повсеместно заменены статическими полупроводниковыми, выпускаемыми серийно. Поэтому ниже будут рассмотрены только статические полупроводниковые источники питания ЭФХ станков.

Статический импульсный источник питания ЭФХ станка, как и многие другие устрой-

ства преобразовательной техники, содержит источник питания, преобразовательные блоки, систему управления и линии связи с нагрузкой.

К основным электрическим характеристикам импульсной технологической нагрузки относятся: энергия, скважность, частота следования импульсов, напряжение, ток, средняя мощность и др. Исходя из используемых в промышленности диапазонов основных параметров, разделим условно значения энергии, скважности и частоты на большие и малые, что дает восемь вариантов сочетаний параметров (табл. 54.3).

Известно, что для получения импульсов с большой скважностью, когда мощность в импульсе по меньшей мере на порядок превышает среднюю за период, требуются накопители энергии и специальные источники для их заряда, обеспечивающие высокий КПД и требуемую скорость зарядки. Частота зарядных циклов определяет в большой мере структуру таких источников и обуславливает применение той или иной схемы заряда накопителя. Однако обязательными элементами всех генераторов этого типа являются: источник неизменных напряжения, тока, мощности либо источник с комбинированной характеристикой, прерыватель в зарядной цепи накопителя, сам накопитель и прерыватель в его разрядной цепи (иногда отсутствующий), определяющие параметры выходных импульсов генератора при его работе на нагрузку.

Для получения импульсов, следующих с малой скважностью, принципиальной нужды в накопителях энергии нет, здесь реактивные элементы используются в качестве *LC*-фильтров или ограничителей тока (индуктивности). Элементами силовой цепи, определяющими характеристики генератора, при этом становятся силовые полупроводниковые приборы, работающие в ключевом режиме, и выходная цепь к нагрузке.

#### Статические источники питания ЭФХ станков с накопителями энергии

Для запасания энергии, выделяющейся затем в нагрузку в виде импульсов, используют емкостные (как правило, линейные), индуктивные (линейные и нелинейные) и иногда механические накопители, попеременно работающие в режиме заряда и разряда.

С учетом того, что для ЭЭО и ЭХО требуемое напряжение не превышает 1,5 кВ, при малых накапливаемых энергиях по совокупности удельных показателей, таких как объем, масса и стоимость, отнесенных к запасаемой энергии, в настоящее время лучшими явля-

Таблица 54.3. Варианты сочетаний основных параметров импульсов

Энергия, Дж	Скважность	Частота, Гц
> 100	> 5	< 10 <sup>2</sup>
> 100	< 5	> 10 <sup>2</sup>
> 100	> 5	> 10 <sup>2</sup>
> 100	< 5	< 10 <sup>2</sup>
< 100	> 5	< 10 <sup>2</sup>
< 100	< 5	> 10 <sup>2</sup>
< 100	> 5	> 10 <sup>2</sup>
< 100	< 5	< 10 <sup>2</sup>

ются емкостные накопители, в том числе с конденсаторами с бумажно-масляной изоляцией. Электролитические конденсаторы имеют меньшие удельные объем и массу, но из-за высоких потерь могут быть применены только в генераторах одиночных импульсов (например, для питания ламп-вспышек для фотографии).

При больших накапливаемых энергиях (порядка 10<sup>6</sup> Дж и выше) весьма перспективно применение индуктивных накопителей, особенно сверхпроводящих, что резко уменьшает их массу, габаритные размеры и активные потери. Механические накопители — это ударные и униполярные генераторы, преобразующие механическую энергию вращения ротора в импульсную электромагнитную. Несмотря на широкие возможности таких генераторов для получения больших импульсных мощностей их применение в станках с ЭФХ обработкой ограничено из-за сложности реализации.

Заряд емкостных и индуктивных накопителей может быть выполнен от источников напряжения, от источников тока или от источников неизменной мощности.

**Заряд накопителей от источников напряжения.** На практике источники напряжения распространены наиболее широко; ими, в частности, являются сеть промышленной частоты, аккумуляторы и т. д. При этом для ограничения тока заряда используются активные или чаще реактивные токоограничивающие элементы. Например, для заряда емкостных накопителей с частотой следования импульсов порядка десятков килогерц и при скважности более 5 могут использоваться схемы типа последовательного инвертора (см. § 32.28). В таких схемах включенный последовательно с нагрузкой конденсатор обеспечивает периодическое запирающее действие инвертора, а последовательный реактор обеспечивает колоколообразную форму импульса тока, благодаря чему снижаются потери в полупроводниковых вентилях (транзисторах или тиристорах), работающих в ключевом режиме.



Если первичным источником напряжения является сеть переменного тока, возможны два варианта структуры генератора импульсов с последовательным инвертором:

1. Отдельные выпрямитель и инвертор. Для получения в такой системе неизменной амплитуды выходных импульсов требуется применить на выходе выпрямителя фильтр с высоким коэффициентом сглаживания, в результате чего габаритные размеры и масса источника повышаются.

2. Источник с непосредственным преобразованием переменного напряжения промышленной частоты в импульсное напряжение за счет поочередного включения коммутирующих приборов в разных фазах  $m$ -фазной системы, полученной с помощью соответствующего трансформатора. При этом коммутирующие приборы осуществляют с высокой частотой заряд и разряд емкостного накопителя энергии непосредственно от источника переменного напряжения. В этом варианте нет звена постоянного тока, а поочередное включение коммутирующих приборов в разных фазах облегчает их тепловой режим. Однако в этом случае также необходимы емкостные фильтры на входе преобразователя для снижения внутреннего сопротивления источника переменного напряжения.

В генераторах, нагрузкой которых является нелинейное сопротивление (разрядный промежутки или разрядная лампа), возможно использование полностью управляемых коммутаторов (транзисторов) в цепи заряда при отсутствии коммутирующих приборов в цепи разряда, что позволяет устранить ограничения, накладываемые характеристиками этих приборов на разрядные импульсы тока и их длительность. В этом случае логично применение датчика обратной связи по току (трансформатора тока, шунта и т. д.), отключающего приборы в зарядной цепи при появлении тока в цепи разряда. При этом коммутирующим прибором в разрядной цепи может быть сама нагрузка, пробой которой эквивалентен включению коммутирующего прибора.

При заряде емкостного накопителя в импульсных генераторах с низкой частотой повторения импульсов (единицы и доли герц) также возможно использование источника напряжения промышленной частоты с ограничением тока конденсаторами. Примером может служить схема выпрямителя с удвоением напряжения (см. § 32.7). Однако этот вариант неприменим при относительно большой мощности и при более высоких частотах, в связи с чем он не получил широкого распространения.

### Заряд накопителей от источников тока.

В этом случае отпадают многие из отмеченных выше трудностей, свойственных способам заряда от источников напряжения. Для преобразования неизменного напряжения в неизменный ток используются три типа устройств: индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), управляемые выпрямители (УВ) и импульсные модуляторы (ИМ), подразделяющиеся на широтно-импульсные (ШИМ), частотно-импульсные (ЧИМ), амплитудно-импульсные (АИМ) и комбинированные.

Принцип действия источников тока с использованием ИЕП основан на явлении резонанса в электрических цепях, содержащих катушки индуктивности и конденсаторы. Если в схеме рис. 54.1 реактор  $L$  и конденсатор  $C$  имеют собственную резонансную частоту, совпадающую с частотой питающего переменного напряжения, то напряжение на нагрузке  $Z_n$ , подключенной, например, параллельно конденсатору, растет по мере увеличения  $Z_n$ . При  $Z_n = 0$  ток в короткозамкнутой цепи определяется приложенным напряжением и индуктивным сопротивлением  $\omega L$ . Поскольку при увеличении  $Z_n$  нагрузка все в меньшей степени шунтирует конденсатор  $C$ , режим работы  $LC$ -контура приближается к резонансному. При большом сопротивлении  $Z_n$  в схеме имеет место резонанс напряжений и входной ток и напряжение на нагрузке определяются добротностью контура, определенной с учетом  $Z_n$ .

В последние годы ИЕП получили широкое распространение в качестве источников питания ламп накачки импульсных лазеров, лазеров непрерывного действия, в электрогидравлических установках и т. д. Их выгодно отличают высокие КПД и  $\cos \phi$ , синусоидальный ток, потребляемый от сети, простота и надежность. Основным недостатком промышленных ИЕП связан с питанием их от напряжения промышленной частоты, что обуславливает большие массы и габаритные размеры реакторов и конденсаторов. Для ослабления этого недостатка применяются оригинальные схемы трехфазных ИЕП с фазными связями типа «трехзвезда», а также с реакторами, совмещенными на одном общем трехстержневом магнитопроводе [54.18], что позволяет

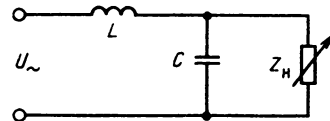


Рис. 54.1. Схема простейшего индуктивно-емкостного преобразователя

в ряде случаев снизить габаритные размеры и установленную мощность конденсаторов и реакторов. К числу недостатков ИЕП также относится трудность регулирования тока на выходе.

Важно отметить, что к ИЕП принципиально могут быть отнесены и резонансные последовательные или последовательно-параллельные инверторы, поскольку они содержат в силовой цепи колебательный  $LC$ -контур и обеспечивают при определенных условиях неизменный ток в цепи нагрузки (см., например, инвертор, описанный в § 32.29).

Источники тока с использованием УВ позволяют гибко управлять процессом заряда по заданному закону, когда время заряда больше периода питающего напряжения. При этом в начале процесса заряда емкостного накопителя угол управления тиристором (или других коммутирующих приборов) велик, а по мере зарядки он уменьшается. Броски тока в момент включения очередного тиристора ограничиваются с помощью последовательной индуктивности. Среднее значение зарядного тока в течение зарядного цикла поддерживается неизменным.

В случае заряда индуктивного накопителя, если нет жестких требований к пульсациям зарядного тока, схема остается практически такой же. Добавляется лишь диод для замыкания цепи индуктивного накопителя в паузах между импульсами тока, а закон управления тиристорами изменяется на противоположный: в начале заряда угол управления минимален и выпрямленное напряжение максимально, по мере заряда угол растет и напряжение уменьшается. При использовании УВ КПД заряда зависит от отношения волнового и активного сопротивлений цепи и может при длительном заряде достигать 90% и более.

К недостаткам способа заряда с применением УВ относятся низкая возможная частота зарядных циклов, низкие коэффициент использования напряжения питающей сети и средний за цикл коэффициент мощности, а также нагрузка сети несинусоидальными токами.

Для управления по заданному закону процессом заряда накопителей от источников постоянного напряжения используются, как указано выше, методы АИМ, ШИМ и ЧИМ, при которых среднее значение напряжения на выводах накопителя изменяется путем регулирования соответственно максимального значения, длительности и частоты следования зарядных импульсов.

При АИМ выходное напряжение цепи заряда имеет ступенчатую форму, причем зависимость напряжения ступеней от их числа

задается функционально на основе предварительного расчета. Длительность интервалов между моментами перехода с одной ступени на другую может быть неизменной или может регулироваться за счет обратной связи по току, чтобы минимизировать потери в цепи заряда либо время заряда. Недостатком АИМ является относительная сложность реализации источника со ступенчато изменяющимся напряжением.

Закон изменения среднего напряжения заряда при ШИМ и ЧИМ задают путем изменения соответственно скважности импульсов при постоянной частоте и частоты следования при постоянной длительности импульсов. В обоих случаях период следования импульсов должен быть на порядок меньше, чем постоянная времени зарядной цепи. При достаточно большом диапазоне регулирования напряжения методами ШИМ и ЧИМ неизбежны малое значение коэффициента использования источника питания, увеличение его установленной мощности и относительно низкий КПД (за счет потерь в коммутирующих приборах и других элементах). Для увеличения КПД при использовании ШИМ, как и во всех остальных схемах заряда емкостного накопителя непрерывным током, необходимо включение в зарядную цепь индуктивности.

**Заряд накопителей от источников неизменной мощности.** Во всех известных схемах заряда накопителей, представляющих собой источники напряжения или тока, в процессе заряда рабочая точка на внешней характеристике источника смещается. Например, начало заряда емкостного накопителя при нулевых начальных условиях эквивалентно короткому замыканию на выходе источника, а окончание заряда — холостому ходу. Заряд индуктивности дает обратную картину. Это неизбежно приводит к снижению коэффициента использования мощности источника, а при применении управляемых выпрямителей — и к снижению коэффициента мощности.

Наилучшее использование установленной мощности источника питания при высокой скважности импульсов может быть получено при заряде накопителей от источника мощности, т. е. источника, у которого произведение напряжения на средний ток на выходе постоянно и равно установленной мощности цепи питания (трансформатора, аккумулятора и т. д.). При этом осуществляется автоматическое согласование нагрузки с источником. Из литературы известны следующие способы создания источника неизменной мощности с высоким КПД, установленная мощность элементов которого близка к выходной:

1) дозированная передача энергии, для чего

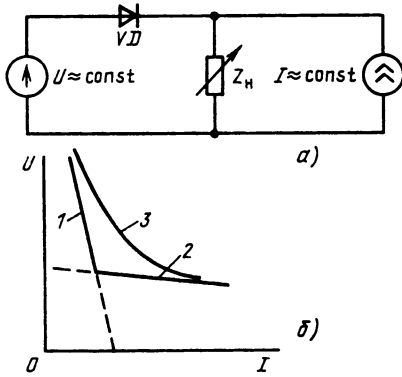


Рис 54.2. Схема источника примерно неизменной мощности на основе источников напряжения и тока (а) и результирующая характеристика (б)

между источником напряжения и изменяющейся нагрузкой включается блок, периодически запасаящий определенными дозами энергию, передаваемую затем нагрузке (см. § 32.23, а также [54.19]);

2) параллельное (либо последовательное) включение через диоды источника напряжения и источника тока (рис. 54.2, а). На рис. 54.2, б линиями 1 и 2 показаны нагрузочные характеристики реальных источников тока и напряжения соответственно. При высокоомной нагрузке рабочая точка находится на крутопадающем участке характеристики 1, а диод  $VD$  заперт, при увеличении тока нагрузки рабочая точка переходит на пологую часть характеристики (участок 2). Кривая 3 на рис. 54.2, б соответствует идеальному источнику неизменной мощности, у которого  $UI = \text{const}$ . Видно, что этот метод требует наличия двух источников (из которых один — источник тока со всеми особенностями, связанными с его реализацией) и позволяет получить характеристику источника неизменной мощности лишь в первом приближении;

3) применение плавно регулируемых источников тока. Способы реализации таких источников на основе управляемых выпрямителей и преобразователей с ШИМ или ЧИМ, а также недостатки таких устройств были кратко рассмотрены выше при описании способов построения источников тока.

При методе дозированной передачи энергии частота работы переключающих элементов, управляющих процессами запасания и отдачи энергии, или рабочая частота промежуточного источника переменного напряжения должна быть достаточно высокой, поскольку при низкой частоте (например, при частоте

сети 50 Гц) масса и габаритные размеры реактивных элементов, играющих роль промежуточных накопителей, резко возрастают.

Источники неизменной мощности могут быть, в частности, реализованы с помощью последовательных инверторов, для чего можно использовать одну из двух возможностей:

1) подключить нагрузку параллельно индуктивности последовательного  $LC$ -контура, имеющегося в составе инвертора, и так рассчитать параметры схемы, чтобы получить требуемую функциональную зависимость выходного напряжения от тока;

2) изменять рабочую частоту инвертора по определенному закону (метод ЧИМ); в этом случае последовательный инвертор будет обеспечивать характеристики источника неизменной мощности за счет принципа дозированной передачи энергии.

Таким образом, последовательные инверторы в зависимости от выбора параметров элементов, рабочей частоты и закона ее изменения могут обеспечить характеристики, свойственные источникам напряжения, тока и мощности. Следует также отметить, что схемы типа последовательного инвертора можно питать непосредственно от трехфазной цепи переменного тока с нулевой точкой. Пример подобного преобразователя показан на рис. 54.3. В течение одного полупериода высокой частоты ток  $LC$ -контур, образованного конденсатором  $C$  и нагрузкой  $Z_n$ , включенной через согласующий трансформатор  $T$ , протекает через один из тиристоров, например катодной группы, в течение другого полупериода — анодной группы. Для этого на тиристоры попеременно подаются управляющие высокочастотные импульсы (частота — единицы или даже десятки килогерц) в течение интервала времени, соответствующего трети периода промышленной частоты. Габаритные размеры согласующего трансформатора  $T$  мо-

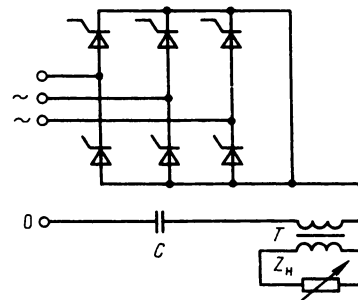


Рис 54.3. Схема непосредственного преобразователя трехфазного тока промышленной частоты в однофазный высокочастотный

гут быть на порядок меньше габаритных размеров согласующего низкочастотного трансформатора той же мощности. Для исключения влияния индуктивности сети на параметры инвертора и загрузки этой сети высокочастотными токами необходимо включение конденсаторов между фазами сети и нулевой точкой.

**Разрядные цепи генераторов с емкостными накопителями энергии.** Разрядная цепь емкостного накопителя образована самим накопительным конденсатором  $C$ , соединительными элементами, нагрузкой и коммутатором. Во многих случаях сама нагрузка является коммутатором (промежутком между инструментом и деталью в электроэрозионных станках). В качестве отдельных коммутаторов используются различные устройства: тиристоры, магнитные переключатели, транзисторы, лампы, тиратроны и разрядники. Участок разрядной цепи между накопителем и нагрузкой может быть выполнен просто в виде кабеля либо содержать дополнительные элементы ( $RC$ - и  $LC$ -контуры, токоограничивающие сопротивления, диоды), формирующие разрядный импульс.

Коммутирующие приборы применяются в таких генераторах для прерывания тока в цепи заряда, подключения накопителя в цепи разряда или для принудительного прерывания тока в цепи разряда.

Первый случай характерен для генератора с ИЕП, где для стабилизации заданного разрядного напряжения накопителя коммутирующие приборы, включенные до вентиля, шунтируют цепь заряда. Второй случай связан в большей мере с применением индуктивных накопителей, подключаемых к нагрузке после накопления в них заданной энергии. Третий случай может быть отнесен к схемам заряда емкостных накопителей при относительно небольших разрядных напряжениях, где требуется плавное регулирование длительности разрядного импульса.

Из многих коммутаторов наибольшее рабочее напряжение при ограниченном сроке службы имеют механические разрядники. Наилучшими суммарными показателями обладают импульсные тиристоры, допускающие скорости нарастания тока до 800–1000 А/мкс, максимальное значение тока до нескольких килоампер и при последовательном соединении большого числа тиристоров – напряжение до 50–100 кВ.

Для формирования импульсов разрядного тока, как уже сказано, применяют реакторы (линейные и нелинейные) и формирующие  $RC$ - и  $LC$ -цепочки и линии. Изменяя индуктивность реактора, регулируют длительность импульса и его фронта. Применение

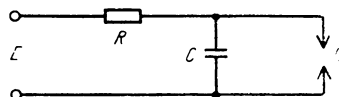


Рис. 54.4. Простейший релаксационный генератор импульсов типа  $RC$

формирующих линий переменной длины позволяет регулировать длительность импульса тока и придать ему заданную (обычно прямоугольную) форму.

**Релаксационные генераторы.** В таких генераторах используется способность самого эрозионного промежутка включать ток скачком при пробое и выключать ток при достаточно быстром уменьшении тока и при большом сопротивлении в цепи зарядки накопителя.

Первый генератор импульсов для ЭЗО, предложенный в 1943 г. Б. Р. и Н. И. Лазаренко, был именно релаксационным  $RC$ -типа. Генератор  $RC$ -типа исключительно прост, надежен и до сих пор с введением ряда усовершенствований широко применяется в промышленных электроэрозионных станках.

Принцип действия  $RC$ -генератора (рис. 54.4) состоит в следующем. До пробоя разрядного промежутка  $\Pi$  цепь нагрузки генератора разомкнута и конденсатор заряжается через токоограничивающий резистор  $R$ . Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения пробоя промежутка, конденсатор разряжается. Максимальное значение, длительность и форма импульса разрядного тока определяются параметрами разрядной цепи, а также наличием в ней формирующих элементов. Одновременно с током разряда конденсатора через нагрузку начинает проходить ток от цепи заряда. Если зарядная цепь имеет относительно небольшое сопротивление и ток заряда соизмерим с разрядным, то разряд в промежутке не прервется, т. е. возникнет дуга постоянного тока. Поэтому основным условием работы неуправляемых релаксационных генераторов является различие на 2–3 порядка эквивалентных сопротивлений зарядной и разрядной цепей. При этом частота следования импульсов определяется практически постоянной времени цепи зарядки.

Недостатками простого  $RC$ -генератора являются малая выходная мощность и вследствие этого относительно низкая производительность, разброс параметров импульсов разрядного тока и в результате при их применении в электроэрозионных станках переменный износ инструмента и шероховатость обрабатываемой поверхности, низкий КПД.

Для устранения этих недостатков был введен ряд усовершенствований схемы.

В зарядную и разрядную цепи для повышения мощности и частоты были введены реакторы, для снижения износа инструмента в разрядную цепь вводились резисторы, индуктивные элементы, формирующие линии и дополнительные нелинейные устройства. Однако лучшие результаты были получены путем введения в зарядную и разрядную цепи коммутирующих приборов, позволивших резко увеличить КПД и выходную мощность релаксационных генераторов, повысить стабильность их работы.

#### Статические источники питания ЭФХ станков без накопителей энергии

В качестве генераторов импульсов, используемых в источниках питания без накопителей энергии, применяются УВ (такие генераторы часто называются низкочастотными), генераторы с прерывателями тока и устройства с шунтированием цепи нагрузки. Генераторы двух последних типов позволяют изменять частоту повторения импульсов и их часто объединяют под названием «широкодиапазонные генераторы».

Генераторы на базе УВ являются наиболее простыми. В большинстве случаев они основаны на применении несимметричной (полууправляемой) либо симметричной (полностью управляемой) трехфазной мостовой схемы, работающей с большим углом управления (см. § 32.4 и 32.14). Для обеспечения высокого КПД токоограничивающие элементы выполняются реактивными (индуктивными либо емкостными) и устанавливаются на стороне переменного тока до выпрямителя. Частота повторения импульсов составляет 150 и 300 Гц.

Генераторы на УВ имеют высокую надежность, они обеспечивают управление амплитудой и скважностью импульсов тока. К недостаткам УВ относятся загрузка сети несинусоидальными токами, непостоянство максимального напряжения импульсов при изменении скважности, низкий коэффициент мощности.

Генераторы с относительно широким диапазоном изменения частоты различаются по методу формирования импульсов тока в нагрузке: за счет прерывания тока в силовой цепи и за счет шунтирования тока нагрузки при наличии в цепи активных и реактивных (индуктивных) токоограничивающих сопротивлений.

Рассмотрим кратко второй метод. При наличии токоограничивающих резисторов в широ-

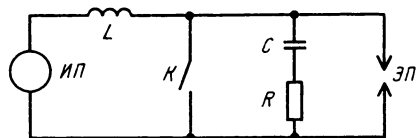


Рис. 54.5. Генератор импульсов с индуктивным токоограничивающим элементом и шунтирующей цепью нагрузки коммутатором

кодиапазонных генераторах используются выпрямители, являющиеся источниками напряжения (преимущественно с жесткой характеристикой). Для снижения потерь энергии чаще применяются индуктивные токоограничивающие (ТО) элементы, одновременно играющие роль накопителей энергии. Схема подобного типа представлена на рис. 54.5. При включенном состоянии коммутатора  $K$  ток в реакторе нарастает. При выключении  $K$  ток до пробоя эрозийного промежутка  $ЭП$  замыкается через дополнительный конденсатор  $C$  и резистор  $R$ , шунтирующие  $ЭП$ . После пробоя  $ЭП$  ток протекает через нагрузку. Повторное включение коммутатора прерывает разрядный ток в  $ЭП$ . Если после размыкания коммутатора пробоя нет, напряжение на конденсаторе  $C$  увеличивается до значения, определяемого накопленной в  $L$  энергией, после чего коммутатор опять включается. Изменение среднего значения тока в  $L$  осуществляется за счет регулирования напряжения источника питания.

Указанная схема принципиально может быть применена и для заряда накопителей энергии близким к постоянному током, если применить в качестве коммутатора полупроводниковые приборы с достаточно высоким предельным напряжением переключения. Достоинство схемы — трансформация энергии, запасенной в реакторе, в энергию электрического поля в конденсаторе при размыкании тока. Основной недостаток — резкое уменьшение КПД при увеличении скважности выходных импульсов, так как при этом силовая цепь большее время закорочена коммутатором — тиристором или транзистором, активные потери в которых в этом режиме возрастают. Кроме того, при замыкании  $ЭП$  последний не полностью обесточивается из-за неидеальности реального коммутатора, имеющего малое, но конечное сопротивление. Эти недостатки обусловили преимущественное применение метода формирования импульсного тока путем его прерывания. В этом случае использование ТО-резисторов позволяет легко изменить минимальное значение и форму

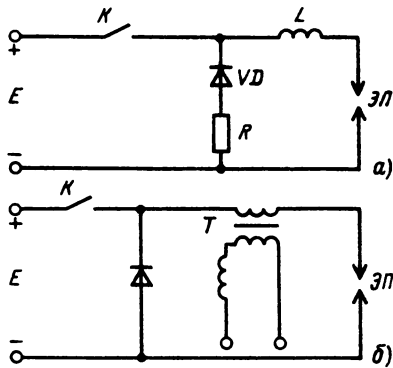


Рис. 54.6. Генераторы импульсов с индуктивным токоограничивающим элементом и последовательным коммутатором с линейным (а) и подмагничиваемым (б) реакторами

импульсов тока. Однако эти генераторы имеют низкий КПД, большие массы и габаритные размеры из-за значительных рассеиваемых внутри генератора энергий. С целью устранения этих недостатков разрабатываются генераторы с реактивными ТО-элементами. Кроме линейных и нелинейных реакторов для ограничения тока могут быть использованы и конденсаторы. Однако при этом необходима их установка на стороне переменного тока в схемах с промежуточными преобразователями, что резко ограничивает возможности и чрезмерно усложняет схемы.

Более перспективны силовые цепи с индуктивным ограничением тока. Два основных варианта таких генераторов изображены на рис. 54.6.

Схема рис. 54.6, а может содержать в цепи нагрузки линейный или нелинейный токоограничивающий дроссель  $L$  либо формирующую линию  $LC$ , разряжаемую после размыкания коммутатора  $K$  через демпфирующий диод  $VD$ , сопротивление  $R$  и нагрузку  $ЭП$ . Пробой  $ЭП$  происходит при замыкании  $K$ . В схеме рис. 54.6, б в силовую цепь включен подмагничиваемый трансформатор  $T$ .

Оба указанных варианта обладают сравнительно узкой полосой частот следования импульсов, что не позволяет использовать их для генерирования импульсов в широком диапазоне частот без применения дополнительных ограничителей тока. Следует отметить, что в промышленных разработках стремление устранить затягивание импульса после выключения коммутатора, приводящее к появлению на выходе генераторов пульсирующего тока, заставляет резко уменьшить индуктивность  $L$ .

### Источники питания электроэрозионных станков

**Характеристики эрозионного промежутка как элемента электрической цепи.** В соответствии с характером протекающих во время обработки физических процессов импульсов генератор может работать в режимах холостого хода, рабочем и короткого замыкания; в последнем случае источник питания генератора замкнут на линейные элементы  $R, L, C$ , основные соотношения для такой цепи представлены выше. В рабочем режиме нагрузкой является электроэрозионный промежуток ( $ЭП$ ), представляющий собой как элемент электрической цепи нелинейное сопротивление, вольт-секундная характеристика которого состоит из трех основных участков (рис. 54.7): 1 — с крутым падением, длительность которого, определяемая временем формирования канала разряда, равна  $10^{-3} - 10^{-1}$  с; 2 — с монотонным уменьшением напряжения, длительность этого участка на 4–7 порядков больше и равна 100–500 мкс; 3 — горизонтального участка, на котором (при данных среде, полярности и паре электродов) напряжение мало изменяется при дальнейшем увеличении длительности импульса. Закон изменения во времени напряжения на  $ЭП$  в послепробойной стадии мало зависит от формы подводимого импульсного напряжения, колебаний межэлектродного зазора и других факторов. Поэтому  $ЭП$  может быть в первом приближении представлен некоторой изменяющейся во времени фиктивной противо-ЭДС, включенной встречно разрядному току.

При длительных дуговых разрядах основное падение напряжения на  $ЭП$  сосредотачивается в прикатодной области. Оно зависит от материала катода и межэлектродной среды, мало зависит от тока через  $ЭП$  и составляет на практике 15–35 В. Падение напряжения в канале и в прианодной области относительно невелико: от 1–2 В до долей вольта. После начала разряда ток не может

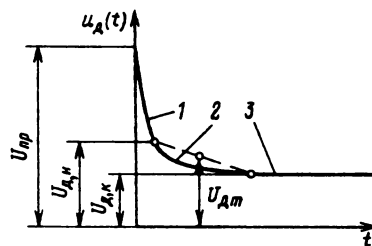


Рис. 54.7. Вольт-секундная характеристика эрозионного промежутка

Таблица 54.4. Формулы для определения взаимосвязи между параметрами электрических импульсов ( $U_{дл} \approx \text{const}$ )

Параметр	За импульс	За период	За период прямоугольного импульса
Ток: амплитуда	$I_{ми} = \frac{I_{ср,и} K_{\phi} K_a}{q}$	$I_{mT} = I_{ср} K_{\phi} K_a$	$I_{ср} q = I_{ср,и}$
среднее значение	$I_{ср,и} = \frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} i dt = I_{ср} q = \frac{I_{mq}}{K_{\phi} K_a}$	$I_{срT} = \frac{I_{ср,и}}{q} = \frac{I_m}{K_{\phi} K_a}$	$\frac{I_{ср,и}}{q} = \frac{I_m}{q}$
действующее значение	$I_{д,и} = I_{д,и} = \sqrt{\int_0^{t_{и}} i^2 dt}$	$I_{dT} = I_{ср} K_{\phi} = \frac{I_{ср,и} K_{\phi}}{q} = \frac{I_m}{K_a}$	—
Напряжение: на нагрузке в момент $i = Im$	$U_{ми} = U_{ср,и} \approx \frac{1}{t_{и}} \int_0^{t_{и}} u dt$	$U_{mT} = \frac{U_{ср}}{q} = U_{ср,и}$	$U_m = \frac{U_{ср}}{q} = U_{ср,и}$
среднее значение	$U_{ср,и} = U_m$	$U_{срT} = \frac{U_m}{q}$	$\frac{U_m}{q}$
Мощность: максимальная	$P_{ми} = U_m I_m$	$P_{mT} = U_m I_m$	$U_m I_m$
средняя	$P_{ср,и} = U_m I_{ср,и}$	$P_{срT} = \frac{P_{ср,и}}{q} = \frac{U_m I_m}{K_{\phi} K_a}$	$P_{ср} = \frac{U_m I_m}{q}$
Энергия	$W_s = \int_0^{t_{и}} ui dt = U_m I_{ср,и} t_{и} = \frac{U_m I_{ср,и}}{f q} = U_m I_{срT} = \frac{U_m I_{ср}}{f}$ $= U_m I_{ср} t_{и} q = \frac{U_m I_m T}{K_{\phi} K_a} = \frac{U_m I_m t_{и} q}{K_{\phi} K_a}$		$\frac{U_m I_{ср}}{f} = U_m I_{ср} t_{и}$
Коэффициенты формы	$K_{\phi,и} = I_{д,и} / I_{ср,и}$	$K_{\phi T} = I_{dT} / I_{срT} = K_{\phi,и} \sqrt{q}$	$\sqrt{q}$
амплитуды	$K_{a,и} = I_{ми} / I_{д,и}$	$K_{aT} = K_{a,и} \sqrt{q}$	$\sqrt{q}$

быть ограничен ЭП и определяется последовательно включенными сопротивлением и напряжением источника питания.

Приближенно изменение во времени напряжения дуги  $u_1(t)$ , действующего на ЭП, можно описать экспоненциальной функцией, определяемой рядом постоянных величин, зависящих от материала электродов, полярности, вида рабочей жидкости, и справедливой для используемого при ЭЭО диапазона электрических режимов:

$$u_{1,и}(t) = U_{д,и} \gamma \left( e^{-t/\tau} + \frac{1 + \gamma}{\gamma} \right),$$

где  $u_{д,и}$  — напряжение на промежутке в начале послепробойной стадии (рис. 54.7);

$\gamma = \frac{U_{д,и} - U_{д,к}}{U_{д,и}}$ ;  $U_{д,к}$  — напряжение на про-

межутке в конце участка 3 кривой;  $\tau$  — постоянная времени, характеризующая длительность участка 2 и зависящая от материалов электродов, полярности напряжения и среды [медь (+) — сталь (–)  $\tau = 30$  мкс; графит (+) — сталь (–)  $\tau = 50$  мкс; вольфрам-кобальтовый сплав (широко применяемый для изготовления резцов) ВК6 (+) — медь (–)  $\tau = 25$  мкс].

В условиях реального процесса отклонения значений  $U_{д,и}$ ,  $U_{д,к}$  и  $\tau$  связаны с изменением зазора. При зазоре, близком к короткому замыканию, они минимальны и снижаются примерно на 1/3 вышеуказанных.

Для практических расчетов иногда принимают, что напряжение на ЭП неизменно и равно среднему падению напряжения за импульс, в качестве которого может быть взято напряжение в середине второго участка

(рис. 54.7):

$$u_d(t) \approx U_{cp} = \text{const} = U_{dm}$$

Для этого случая простые формулы расчета импульсных характеристик при работе на ЭП даны в табл. 54.4.

Различные выражения для энергии в приведенных в табл. 54.4 формулах (через  $I_{cp}$ ,  $I_m$ ,  $f$ ,  $U_{dm}$ ) полезны при анализе влияния конкретных электрических параметров на технологические характеристики. Средний ток  $I_{cp}$  фиксируется на пульте генератора и является удобной для контроля и управления величиной.

Режимы ЭЗО можно разделить на две группы:

1) требующие широкого диапазона частот следования разрядов при относительно малой скважности импульсов (1,05–5,0). К этой группе относятся большинство операций объемной обработки, осуществляемых на копировально-прошивочных станках;

2) требующие повышенных и высоких частот при относительно большой скважности импульсов (более пяти). К этой группе относятся операции вырезки электродом-проволокой и обработки узких и глубоких пазов и отверстий, осуществляемые на вырезных станках.

**Источники питания копировально-прошивочных станков.** К этой группе относится 2/3 общего парка станков. В них наиболее широкое распространение в отечественной и зарубежной практике получили безнакопительные генераторы импульсов.

В большинстве схем безнакопительных импульсных генераторов основными элементами являются источник питания, силовые коммутирующие приборы и ТО-элементы. На рис. 54.8 представлена типовая структурная схема генератора, обязательными элементами которой являются источник питания ИП, последовательный коммутирующий прибор  $K_1$  и ТО-элемент. Как указано выше, генераторы различаются по типу ТО-элемента (активный или индуктивный), а также по способу включения коммутирующего прибора  $K$ : последовательно с ЭП или параллельно ему (пунктир на рисунке). Применение ТО-резистора позволяет легко варьировать ток заряда и постоянную времени зарядной цепи, увеличивает надежность ограничения тока. Поэтому несмотря на низкий КПД, большие размеры и массу ТО-резисторы широко используются в сочетании с транзисторными последовательными коммутаторами, прерывающими цепь нагрузки.

Схема силовой цепи одного из таких генераторов представлена на рис. 54.9. Генера-

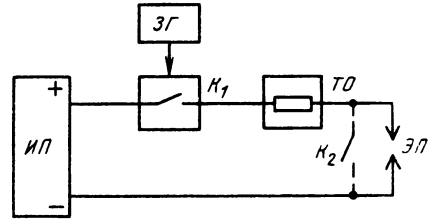


Рис. 54.8. Структурная схема безнакопительного генератора для питания эрозонных станков

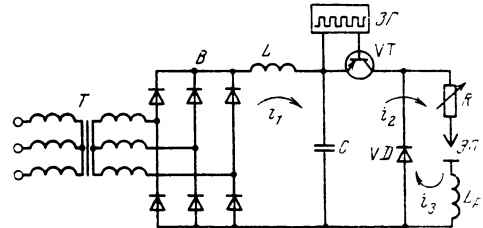


Рис. 54.9. Схема широкодиапазонного транзисторного безнакопительного генератора импульсов

тор содержит источник постоянного напряжения – трехфазный понижающий трансформатор  $T$ , выпрямитель  $B$  и фильтр  $LC$ , коммутатор  $VT$ , прерывающий цепь нагрузки, и регулируемое сопротивление  $R$  с малой собственной постоянной времени (отношением собственной распределенной индуктивности к сопротивлению).

При включении на холостом ходу происходит резонансный заряд конденсатора  $C$  фильтра через последовательно соединенные индуктивности рассеяния силового трансформатора  $T$ , реактор  $L$  и выпрямитель  $B$ . При разомкнутой цепи нагрузки конденсатор  $C$  может зарядиться до напряжения, составляющего 1,7–1,9 номинального напряжения на выходе выпрямителя. На это напряжение необходимо выбрать номинальное напряжение конденсатора  $C$  и транзисторного коммутатора  $VT$ . В некоторых случаях целесообразно конденсатор  $C$  шунтировать на короткое время (до 200–800 мкс) резистором, резко снижающим добротность резонансного контура. Транзисторный коммутатор  $VT$  включается и выключается с частотой и скважностью импульсов задающего генератора  $ЗГ$ . При включении  $VT$  напряжение подается к ЭП. При пробое ЭП фронт импульса тока  $i_2$  определяется постоянной времени разрядной цепи, включающей распределенную индуктивность



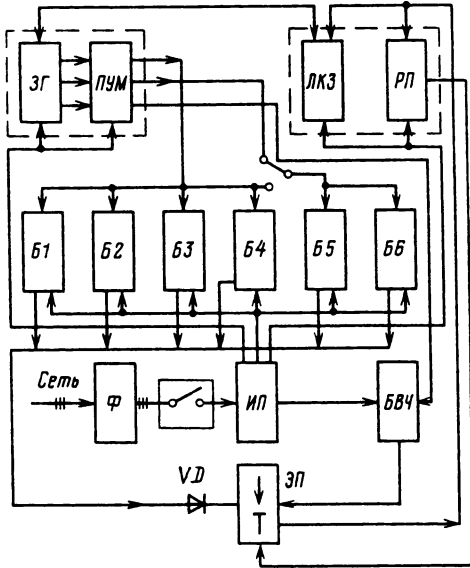


Рис. 54.10. Структурная схема широкодиапазонного генератора типа ШГИ-63-440:

*ЗГ* – задающий генератор; *ПУМ* – предварительный усилитель мощности; *Б1–Б6* – силовые блоки; *БВЧ* – блок высокой частоты; *ИП* – источник питания; *Ф* – помехоподавляющий фильтр; *ЛКЗ* – устройство для ликвидации коротких замыканий; *РП* – регулятор подачи

этой цепи  $L_p$ , и, кроме того, частотными характеристиками  $VT$ . После выключения  $VT$  энергия, запасенная в индуктивности  $L_p$ , обуславливает ток  $i_3$  по цепи ЭП –  $L_p$  –  $VD$  –  $R$ .

Описанная схема с небольшими отличиями реализована в отечественных генераторах типа ШГИ и в большинстве генераторов зарубежных фирм.

Широкодиапазонные генераторы импульсов типов ШГИ-125-100, ШГИ-40-440, ШГИ-20-440/3, ШГИ-63-440, ШГИ-62-44/2-3, ШГИ-16-880 имеют около 100 рекомендуемых режимов обработки с возможностью регулирования формы, максимального значения частоты и скважности импульсов тока и напряжения.

Генераторы серии ШГИ позволяют формировать силовые импульсы прямоугольной или близкой к ней формы. В отличие от других генераторов в них возможно получение импульсов тока гребенчатой формы для малозносной обработки.

В качестве типичной приведем структурную схему генератора ШГИ-63-440 (рис. 54.10). Задающий генератор *ЗГ* имеет три выходных канала: силовых импульсов (*СИ*), защитных (низкочастотных, кратных по длительности

периоду основной частоты) импульсов (*ЗИ*) и поджигающих импульсов (*ПИ*) длительностью от 0,9 до 2 мкс.

Импульсы к выходам силовых *Б1–Б6* и высокочастотного *БВЧ* блоков поступают через предварительные усилители мощности *ПУМ*, расположенные в блоке с *ЗГ* и имеющие на выходе схемы совпадения.

Напряжение питания силовых блоков составляет 80 В. Блоки *Б5, Б6* могут подключаться либо к первому, либо ко второму *ПУМ*. Высокочастотный блок *БВЧ* с импульсным напряжением 220 В является источником *СИ* с частотой 440 кГц, а при работе станка на более низких частотах – источником *ПИ*.

После пробоя *ЭП* импульсом *ПИ* напряжение на нем падает до 20–35 В, открывается разделительный диод *VD* и от источника питания с напряжением 80 В через силовые блоки и *ЭП* проходит *СИ* тока, максимальное значение, длительность и форма которого определяются параметрами токоограничивающих резисторов и длительностью импульсов *ЗГ*.

Работа идентичных силовых блоков с различными частотами позволяет получать гребенчатую форму импульсов тока в нагрузке, а при поочередном включении всех блоков от канала *СИ* – пакеты прямоугольных импульсов.

Устройство ликвидации коротких замыканий *ЛКЗ*, унифицированное для всей серии ШГИ, прерывает ток на выходе генератора при коротком замыкании электродов.

В генератор встроен регулятор рабочей подачи электродов *РП*, исполнительным элементом которого является двигатель постоянного тока.

Силовые блоки генераторов серии ШГИ собраны на транзисторах с импульсным током  $I_k = 5 \div 10$  А, допустимым напряжением  $U_{кз} = 100 \div 200$  В и граничной частотой в схеме с общим эмиттером 10–20 МГц. Кроме того, в состав каждого блока входят цепи предусиления, позволяющие переключать силовые транзисторы от относительно маломощного входного сигнала, и в ряде случаев *ТО*-резистор.

Компоновка блоков определяется выходными параметрами генератора, в частности мощностью и верхним диапазоном генерируемых частот.

В мощных генераторах (средний ток 50 А и более с диапазоном частот до десятков килогерц) целесообразно иметь силовые блоки со встроенными или расположенными рядом *ТО*-резисторами. Это упрощает монтаж и существенно уменьшает распределенную индук-

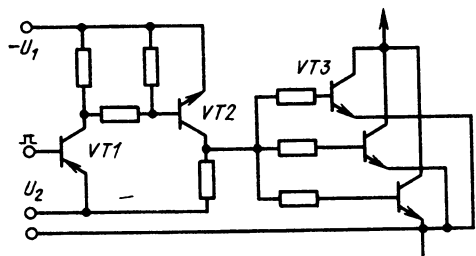


Рис. 54.11. Схема транзисторного силового блока

тивность разрядной цепи. ТО-резисторы могут быть выполнены из маломощных резисторов типа ПЭВ, постоянная времени которых при значениях сопротивления 100–200 Ом не превышает 0,2–0,4 мкс.

При проектировании силовых блоков большое значение имеет выбор схемы запуска выходных транзисторов. Для резкого сокращения времени рассасывания неосновных носителей из области базы мощных транзисторов при их работе в режиме коммутатора необходимо выбирать степень насыщения транзистора при его открывании не выше 1,2–1,4 или подавать на базу транзистора в момент его запирания запирающее напряжение от источника с малым внутренним сопротивлением.

В серийных генераторах используется только второй способ, поскольку автоматическое изменение базового тока транзистора в зависимости от коллекторного тока сопряжено при высоких частотах коммутации с усложнением схемы.

Однако схемы, сочетающие оба указанных способа, весьма перспективны, так как позволяют повысить частоту коммутаций и снизить рассеиваемую в мощных транзисторах и самих блоках энергию.

Силовой блок генератора ШГИ-125-100М состоит из предварительного усилителя, шести предоконечных усилителей и шести включенных параллельно силовых каскадов.

Силовые блоки генераторов ШГИ-40-440Б, ШГИ-63-440, ШГИ-20-440/3 отличаются тем, что вместо шести предоконечных усилителей на транзисторах типа П-605Б применен один мощный транзистор VT2 (рис. 54.11) типа КТ-805А. Транзисторы этого же типа используются в качестве выходных VT3 во всех этих генераторах. При открытом транзисторе VT1 (рис. 54.11), когда входной импульс на его базу отсутствует, открыт и транзистор VT2 и запирающее смещение через токоограничивающие резисторы поступает к базам

выходных транзисторов. Это уменьшает время рассасывания неосновных носителей из области баз выходных транзисторов и позволяет уменьшить размеры блока. При подаче входного импульса VT1 и VT2 запираются и выходные транзисторы открываются за счет положительного напряжения  $U_2$ .

Блоки ПИ формируют импульсы с повышенной амплитудой напряжения, обеспечивающие надежный пробой ЭП.

В генераторах ШГИ-125-200М и ШГИ-40-440Б в блоках ПИ применены последовательно соединенные транзисторы с шунтирующими RC-цепочками для устранения перенапряжений. В генераторах ШГИ-63-440 и ШГИ-20-440/3 использована схема с автоматическим управлением напряжений на двух последовательно соединенных транзисторах.

С целью получения ПИ с амплитудой до 350 В в генераторах ШГИ-63-44/2 и ШГИ-44/3 для обработки больших площадей вместо специальных блоков ПИ применены силовые блоки, нагрузкой которых служат повышающие импульсные трансформаторы. У этих трансформаторов, как и у входных маломощных трансформаторов, служащих для запуска последовательно соединенных коммутирующих каскадов, с целью уменьшения индуктивностей рассеивания первичные и вторичные обмотки выполняются перевитыми проводами.

Параметры и технологические характеристики транзисторных генераторов серии ШГИ представлены в табл. 54.5.

Для генераторов применены шкафы четырех типоразмеров. Четыре модели имеют многоконтурный выход. Электрооборудование станков малого типоразмера встроено в генераторы на рабочие токи 16 и 40 А, предназначенные для питания таких станков.

Разработанные в 1980–1982 гг. модернизированные генераторы серии ШГИМ снабжены блоками программного и адаптивного управления, позволяющими полностью автоматизировать копировально-прошивочные операции.

Все генераторы новой серии смонтированы на базе одного стандартного шкафа с габаритными размерами 600 × 600 × 1800 мм. Изменена конструкция силовых блоков, балластные резисторы вынесены в общий для всех блоков отсек, продуваемый воздухом. Цепи управления, включая задающий генератор, выполнены на микросэлектронной базе. Исключены реле в силовых цепях.

**Источники питания вырезных станков.** Вырезные работы осуществляются используемой в качестве электрода латунной, медной или

Таблица 54.5. Параметры и основные технологические характеристики транзисторных генераторов серии ШГИ для питания электрорезонансных копировально-прошивочных станков

Тип	Номинальный рабочий ток, А	Диапазон частот, кГц	Максимальная потребляемая мощность, кВт	Размеры, мм	Масса, кг	Примерная стоимость, тыс. руб.	Количество выходов
ШГИ-16-880Б	16	3–880	2,0	400 × 600 × 1600	150	4,5	1
ШГИ-40-440А, ШГИ-40-440Б	40	8–440	4,0	1000 × 600 × 1550	430	2,4	1
ШГИ-63-440	63	1–440	6,0	1100 × 600 × 1700	500	4,0	1
ШГИ-20-440/3	20 × 3	1–440	6,0	1100 × 600 × 1700	500	4,5	3
ШГИ-20-440/3П	20 × 3	1–440	6,0	1100 × 600 × 1700	500	5,0	3
ШГИ-125-100	125	0,4–100	7,5	800 × 1400 × 1800	700	6,0	1
ШГИ-63-44/2	63 × 2	1–44	12	(1100 × 1600 × 1700) × 2	1000	7,0	2
ШГИ-63-44/3	63 × 3	1–44	18	(1100 × 1600 × 1700) × 3	1500	6,0	3
ШГИ-40-440М*	40	1–440	4,0	600 × 600 × 1800	350	7,0	1
ШГИ-63-440М*	80	1–440	7,0	600 × 600 × 1800	350	7,0	1
ШГИ-80-88/4-2М*	80 × 4	1–88	28,0	(600 × 600 × 1800) × 4	1500	10,0	4
	80 × 2	1–88	14,0	(600 × 600 × 1800) × 2	1700	10,0	4

Продолжение табл. 54.5

Тип	Длина выходного кабеля, м	Начало серийного выпуска, год	Максимальная производительность, мм <sup>3</sup> /мин			Минимальная шероховатость обработанной стали, мкм	Минимальная шероховатость обработанной стали (при износе 1–2%), мкм
			Сталь 45 (+), ЭЭПГ (–) (объемный относительный износ 20%)	Сталь 45 (–), медь М1 (+) (объемный относительный износ 20–40%)	Сталь 45 (–), медь М1 (+) (объемный относительный износ 10%)		
ШГИ-16-880Б	1,2	1977	200	100	90	0,2	1,5–2,0
ШГИ-40-440А, ШГИ-40-440Б	1,2	1976	450	320	300	0,5	2,5
ШГИ-63-440	2,5	1973	–	550	500	0,5	2,5
ШГИ-20-440/3	2,5	1975	–	550	500	0,5	2,5
ШГИ-20-440/3П	2,5	1977	–	550	500	0,5	2,5
ШГИ-125-100	2,5	1969	–	1000	1100 (1500)	1,2	3,5
ШГИ-63-44/2	4,5	1974	–	1000	1200	3–4	5,0
ШГИ-63-44/3	4,5	1974	–	1400	1900	3–4	5,0
ШГИ-40-440М*	2,5	1983	–	320	–	0,5	2,5
ШГИ-63-440М*	2,5	1983	–	600	–	0,5	2,5
ШГИ-80-88/4-2М*	4,5	1983	–	3500	–	2	4

\* Генераторы серии ШГИМ выпускаются с блоками программного и адаптивного управления (система ПАК – ЭНИМС), позволяющими полностью автоматизировать процессы ЭЗО на копировально-прошивочных операциях

вольфрамовой проволокой диаметром 0,02–0,3 мм, натянутой между двумя роликами и движущейся относительно заготовки. Между проволокой, поливаемой рабочей жидкостью, и деталью возбуждаются кратковременные – от долей микросекунды до 5–8 мкс – разряды, каждый из которых «снимает» (в основном испаряет) частичку металла заготовки; частично при этом разрушается сама проволока. Диапазон амплитуды тока – от нескольких ампер до сотен ампер при ампли-

туде импульсов напряжения 300–500 В и частоте повторения импульсов 8–200 кГц. Благодаря кратковременности действия тока и большой паузе (скважность порядка 5–10) тонкая проволока выдерживает электрические перегрузки, в сотни раз превышающие номинальные.

Выбор типа и схемы генератора определяется не только указанными параметрами, но и характером нагрузки, зависящей также от вида рабочей жидкости. При диэлектрике

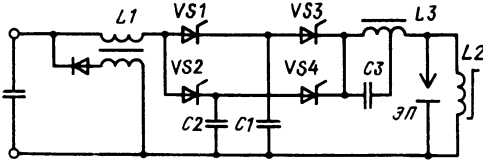


Рис. 54.12. Принципиальная схема тиристорного генератора импульсов типа ГКИ-300-200А

(керосин, деионизированная вода) приемлемы релаксационные генераторы с выходным емкостным накопителем, транзисторным ключом в цепи заряда (отключающим цепь разряда от цепи заряда в момент импульса) и токоограничивающим резистором. Если жидкость проводящая (промышленная вода с противокоррозионными добавками), необходимо во избежание электролиза и саморазряда накопителя вводить выходной трансформатор или включенный параллельно нагрузке реактор (среднее напряжение на выходе генератора при этом равно нулю или близко к нему).

Генераторы коротких импульсов для станков с проводящей средой являются более универсальными и пригодны также для непроводящих рабочих жидкостей. Имеется два типа универсальных генераторов, один из которых выполняется на высокочастотных тиратронах, другой — на тиристорах.

В генераторах первого типа имеется зарядная цепь, содержащая реактор, диод и накопительный конденсатор, который заряжается до напряжения, близкого к удвоенному выпрямленному. При включении импульсного водородного тиратрона (тип ТГИ-1-700/25) конденсатор разряжается и на вторичной стороне выходного импульсного трансформатора возникает импульс тока. Частота импульсов достигает нескольких десятков килогерц при длительности от долей до единиц микросекунд. Необходимость в высоком зарядном напряжении (10–15 кВ), ограниченный срок службы тиратрона, узкий диапазон частот и сложность изготовления импульсного трансформатора являются недостатками данной схемы. Подобные генераторы для специальных вырезных станков выпускает электронная промышленность.

Применение взамен тиратронов тиристоры серии ТБ, ТЧ и ТЧИ лежит в основе генераторов другого типа, например промышленного генератора типа ГКИ-300-200А. В генераторе используется схема, показанная на рис. 54.12. Для уменьшения частоты коммутации тиристоров применены две параллельные ячейки VS1 – C1 – VS3 и VS2 – C2 – VS4, работающие попеременно. Конденсатор C1

(или C2) заряжается при включении тиристора VS1 (или VS2) и разряжается через VS3 (VS4) и L3, C3 на нагрузку, параллельно которой включена индуктивность L2. Заряд формируется с помощью реактора L1, имеющего рекуперационную обмотку, а разрядный импульс — с помощью контура L3 – C3 и реактора L2, имеющего магнитопровод с прямоугольной петлей гистерезиса.

В генераторе имеется также блок с транзисторным генератором, позволяющий получать импульсы длительностью до 1 мкс на частоте до 200 кГц, что обеспечивает получение шероховатости менее 2 мкм.

**Технические данные тиристорного генератора коротких импульсов ГКИ-300-200А**

Напряжение сети, В . . . . .	380 <sup>+19</sup> <sub>-38</sub>
Частота сети, Гц . . . . .	50
Номинальная амплитуда выходного тока (при R = 0.06 Ом), А . . . . .	300
Частота, кГц . . . . .	8, 22, 44, 88, 200
Потребляемая мощность, кВт·А . . . . .	2,0
Габариты (ширина × глубина × высота), мм . . . . .	400 × 600 × 1800
Масса, кг . . . . .	250
Изготовитель . . . . .	ПО «Преобразователь» (г. Запорожье)
Примерная цена, тыс руб . . . . .	5,0

Эти генераторы используются для питания промышленных вырезных станков с программным управлением (моделей 4531Ф3, 474АФ3, 4532Ф3 и др.), выпускаемых заводом прецизионных станков (г. Кировск Арм. ССР).

**Системы управления.** Процесс формообразования не может существовать без целенаправленных управляющих воздействий. На рис. 54.13 показана структурная схема системы автоматического управления в ЭЭ станках.

Изменение координат управляемого объекта УО — заготовки, описываемых некоторым вектором  $\Phi(x, y, z, t)$ , происходит в результате управляющих УВ и возмущающих ВВ воздействий, под влиянием которых изменяется

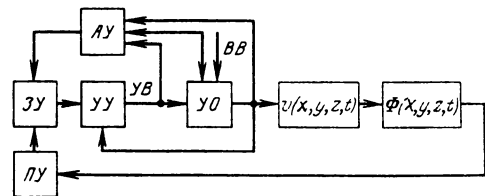


Рис. 54.13. Структурная схема системы автоматического управления процессом формообразования

скорость формообразования  $v$ , т. е. линейная скорость перемещения точек поверхности. В свою очередь изменение скорости  $v$  приводит к изменению вектора формообразования  $\Phi(x, y, z, t)$ . Воздействие на УО осуществляется через управляющее устройство УУ. При замкнутой системе управления должна быть обратная связь по отклонению регулируемой величины, при комбинированной — дополнительное управление по возмущениям. В системах программного регулирования в задающее устройство ЗУ подается сигнал от программного устройства ПУ, изменяющийся по известному закону и в общем случае корректируемый в функции вектора  $\Phi$ . В адаптивных системах управления происходит автоматическое приспособление к изменяющимся внешним условиям таким образом, что поставленная цель управления достигается путем изменения параметров (самоадаптивные системы) или структуры основного контура (самоорганизующиеся системы). Такая система содержит два или больше контуров: основной контур и второй, замыкающийся через блок адаптивного управления АУ, причем для второго контура первый контур является УО.

Процесс ЭЗО является бесконтактным: между инструментом и заготовкой всегда должен быть весьма малый (сотые или десятые доли миллиметра) зазор  $s$ , образующий совместно с ограничивающими его поверхностями электродов рабочую зону, в которой происходят основные физические процессы съема и удаления металла. Из этой рабочей зоны, поступательно перемещающейся в пространстве по мере съема металла, должна быть получена необходимая для управления информация в виде электрических, тепловых и других сигналов.

Как отмечалось выше, изменение формы и размеров заготовки (копировально-прошивочные работы) происходит в результате отображения в ней формы электрода-инструмента (ЭИ), обусловленного наличием зависимости скорости съема металла от зазора  $r = f(s)$ . Из этого следует, что при формообразовании положение точек поверхности заготовки в данный момент времени определяется только одной геометрической координатой, фиксирующей положение ЭИ и совпадающей с направлением подачи (при этом полагаем, что отсутствует износ ЭИ). При вырезе проволочным ЭИ положение точек заготовки определяется уже не одной, а двумя координатами.

В реальном процессе ЭЗО существует износ ЭИ, в общем случае зависящий не только от электрических и гидравлических параметров процесса, но и от формы и

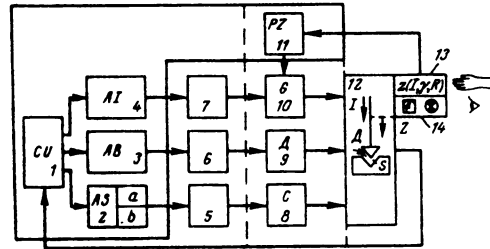


Рис. 54.14. Структурная схема комплексной системы адаптивно-программного управления ЭЭ копировально-прошивочным станком ПАК-ЭНИМС

материала ЭИ, вида рабочей жидкости, ее состояния и других факторов. Поскольку автоматическая задача измерения и управления износом пока не решена, при управлении устанавливаются определенные ограничения на параметры режима с целью сохранения износа в допустимых при заданной точности пределах.

Таким образом, для обеспечения нормального процесса ЭЗО необходимо регулировать электрические и гидравлические параметры режимов, взаимосвязанные через рабочую зону. Взаимодействие систем автоматического регулирования, адаптивного и программного управления видно на первом, полностью автоматизированном ЭЭ копировально-прошивочном станке особо высокой точности модели 4К722АФ3, оснащенный системой ПАК-ЭНИМС. Эта система с автоматически управляемым генератором импульсов, приводами подачи ЭИ и прокачки диэлектрической жидкости обеспечивает согласованную работу установки без участия оператора, за которым остаются функции установки заготовки и ЭИ, ввода программы, пуска, снятия готового изделия. Система обеспечивает получение выходных технологических характеристик, не уступающих таковым при работе квалифицированного оператора в тех же условиях. При этом исключаются повреждения ЭИ, связанные с нарушением стабильности рабочего процесса («шлакование», прижоги и т. п.).

В ПАК-ЭНИМС входят (рис. 54.14): блок контроля межэлектродного промежутка и преобразователя сигнала 1, три блока адаптивного управления 2–4, устройства промежуточной стыковки 5–7, блок программного управления 11 и устройство сигнализации о состоянии процесса 14.

Блок 2 адаптивного управления подачей ЭИ содержит адаптивные устройства непрерывного  $a$  и прерывистого (релаксация)  $b$  управления

рабочей подачей через регулятор 8. Блок 3 адаптивного управления прокачкой диэлектрической жидкости обеспечивает формирование сигнала для поддержания оптимального расхода диэлектрической жидкости через насос 9 при изменении условий обработки. Блок 4 адаптивного управления электрическим режимом генератора импульсов 10 формирует сигналы для изменения среднего рабочего тока  $I$ .

При подготовке станка 12 к работе оператор вводит с пульта 13 программу, определяющую исходя из заданных чертежом размеров материала заготовки и инструмента, электрические режимы генератора импульсов 10 и точки их переключения при перемещении ЭИ по координате  $z$ . Программа предусматривает разбивку вертикального размера детали (по координате  $z$ ) на три и более групп с выделением в каждой группе необходимого числа переключений.

Первая группа – начало работы (врезание). Режим по программе определяется исходя из условия сохранения ЭИ путем назначения соответствующего максимально допустимого режима. Адаптация осуществлена в сторону снижения допустимого режима.

Вторая группа – зона промежуточной обработки, где критериями могут явиться ограничения по минимальному износу  $\gamma$  и шероховатости  $R$ , а целью – достижение максимальной производительности. Адаптация осуществляется во всем заданном интервале координаты  $z$ .

Третья группа – зона получистовой и чистовой обработки, где критерием является достижение заданных по технологии шероховатости и точности за минимальное время. Адаптация осуществляется во всем заданном интервале координаты  $z$ . Система ПАК-ЭНИМС особенно эффективна при многостаночном обслуживании и комплектации автоматизированных участков.

Плоское формообразование осуществляется при помощи задания по программе движения по координатам  $x$  и  $y$ . Особенностью является введение в жесткую программу перемещений автоматического слежения за зазором между электродом-проволокой и заготовкой. Исполнительными органами являются высокочастотные шаговые двигатели или высокомоментные малоинерционные двигатели постоянного тока, питаемые от управляемого по программе силового полупроводникового блока. Промышленный комплект установки состоит из станка (например, модели 4732Ф3 или 4733Ф3), генератора импульсов технологического тока типа ГКИ-300-200А и системы программного управления с тремя или пятью

управляемыми координатами. Комплект предназначен для изготовления рабочих элементов вырубных гибочных штампов, матриц для пресования фасонных профилей и других сложно-контурных изделий из токопроводящих материалов (легированных и закаленных сталей, твердых сплавов и т. п.).

#### Технические данные ПАК-ЭНИМС

Диапазон частот генератора импульсов станка, при котором система обеспечивает адаптивное управление, кГц . . . . .	1–440
Число задаваемых электрических режимов генератора импульсов при перемещении электрода-инструмента по координате $z$ . . . . .	5(10)
Точность переключения электрического режима генератора по координате $z$ , мм . . . . .	0,01
Изготовители . . . . .	ПО «Преобразователь» (г. Запорожье) и Каунасский станкостроительный завод

Примечание Система обеспечивает обработку сталей, жаропрочных сплавов ЭИ из меди и графита без какой-либо перестройки системы ПАК-ЭНИМС. Пригодна для стыковки с универсальными ЭЭ копировально-прошивочными станками, имеющими соответствующие автоматически управляемые исполнительные органы.

#### Технические данные станка модели 4732Ф3

Наибольшие размеры обрабатываемого контура, мм . . . . .	200 × 125
Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг . . . . .	45
Наибольший угол наклона при конической резке . . . . .	3,5°
Диаметр электрода-проволоки, мм	0,5–0,3
Производительность по площади реза, мм <sup>2</sup> /мин:	
твердые сплавы . . . . .	18
сталь и медь . . . . .	42
Шероховатость обработанной поверхности, мкм . . . . .	0,8
Мощность, потребляемая станком, кВт . . . . .	2,4
Габаритные размеры станка, мм	1200 × 830 × 1570
Масса, кг . . . . .	1500
Примерная цена комплекта, тыс. руб. . . . .	37,0
Изготовители . . . . .	Опытный завод «Станкоконструкция» (г. Москва); Завод прецизионных станков (г. Кировскан Арм. ССР)

Механизм перемотки и натяжения проволоки располагается на скобе, перемещающейся на двух взаимно перпендикулярных направ-

ляющих качения (винтовых пар качения). Станок оснащен приспособлением для конической резки, блоком адаптивного управления режимами обработки. В качестве рабочей диэлектрической жидкости используется вода с антикоррозионными присадками или керосин. Применяемые при обработке прокатка и фильтрация рабочей жидкости позволяют резать детали большей высоты (до 75 мм). Станок комплектуется устройством ЧПУ. Ввод информации производится с перфоленты. Устройство ЧПУ обеспечивает коррекцию эквидистанты, масштабирование контура, редактирование программы, ввод программы с клавиатуры пульта. По заказам станок может поставляться с системой копировального управления (СКУ). В этом случае в качестве программно-носителя могут быть использованы шаблон или чертеж детали, выполненный на прозрачном материале.

#### Источники питания электрохимических копировально-прошивочных станков

**Особенности технологии.** Электрохимические (ЭХ) процессы обладают следующими характерными особенностями:

в их основе лежит превращение электрической энергии в химическую на поверхности раздела двух фаз — твердой и жидкой, причем в результате обмена между фазами заряженными частицами (ионами и электронами) образуется двойной электрический слой и возникает скачок потенциала;

изменение массы электродов, участвующих в ЭХ процессе, подчиняется законам Фарадея, устанавливающим связь между количеством выделившегося на электроде или отделившегося от него вещества и количеством прошедшего электричества;

процесс осуществляется по единой принципиальной схеме: электрический источник питания — электроды (твердая фаза) — электролит (жидкая фаза).

Изменяя материал электродов, состав электролита, размеры реакционного пространства, ограниченного электродами и заполненного электролитом и продуктами взаимодействия, а также условия протекания процесса (температуру, плотность, скорость удаления продуктов реакции, потока электролита и другие параметры процесса), получают все разнообразие ЭХ технологий.

Размерная ЭХ обработка заключается в копировании формы инструмента-катода в заготовке-аноде, которая растворяется избирательно в соответствии с местной плотностью тока. Этот эффект является результатом уменьшения на много порядков — в сотни и

тысячи раз — размеров реакционной зоны (точнее, расстояния между электродами, составляющего доли миллиметра) и большой скорости прокатки электролита (десятки метров в секунду), уносящего продукты реакции, возобновляющего исходные свойства и состав электролита и охлаждающего систему. В итоге благодаря резкому количественному изменению геометрического и гидромеханического факторов оказалось возможным на несколько порядков увеличить допустимую плотность тока (десятки и сотни ампер на квадратный сантиметр вместо сотых и десятых долей в традиционных ЭХ технологиях), соответственно увеличить скорость анодного растворения (до сотни и тысячи мм<sup>3</sup>/мин с 1 см<sup>2</sup> поверхности вместо долей или единиц, например, при электрополировании) и, главное, резко повысить точность копирования формы катода в теле анода.

Возможность получения заданной конфигурации в твердом, недоступном иногда механической обработке аноде основана на том, что атомы металла М, переходя в раствор положительных ионов М<sup>n+</sup> (где n — валентность) и взаимодействуя с имеющимися в электролите молекулами воды и анионами гидроокислов ОН<sup>-</sup>, образуют в итоге «мягкие» гидроокиси М(ОН), удаляемые затем потоком электролита. При отсутствии напряжения на электродах реакция  $M \rightleftharpoons M^{n+} + ne$  (где e — заряд электрона) обратима и потенциал φ<sub>p</sub> между электродами и раствором, соответствующий этому состоянию, называется равновесным. Он локализуется на границах М — М<sup>n+</sup> в узкой зоне (менее 10<sup>-3</sup> мкм) упомянутого выше двойного электрического слоя, представляющего собой электрический конденсатор с относительно большой емкостью. Равновесный потенциал зависит от природы материала электродов и электролита и концентрации последнего. При приложении некоторого потенциала φ<sub>3</sub> > φ<sub>p</sub> равновесие нарушается. Если φ<sub>3</sub> - φ<sub>p</sub> > 0, преобладает процесс окисления на аноде: ионы металла переходят в раствор, электроны из раствора — в металл анода; при этом происходит процесс образования нерастворимых гидроокисей. Этот процесс динамичный, он зависит от скорости подвода и отвода веществ и их концентрации.

Так как на электродах происходят дополнительные реакции, не связанные с анодным растворением, и на них также расходуется энергия, закон Фарадея принимает вид

$$m_a \approx K A_a J_a,$$

где  $m_a$  — скорость удельного съема в единицах массы с единицы поверхности в еди-

ницу времени;  $K_a$  – электрохимический эквивалент металла анода;  $J_a$  – плотность тока на аноде;  $A$  – коэффициент эффективности ( $0 < A < 1$ ); с ростом концентрации электролита (обычно 10–20 %-ный раствор NaCl или  $\text{NaNO}_3$ )  $A$  увеличивается.

Напряжение источника  $U$  должно быть достаточным для преодоления анодного  $\varphi_a$  и катодного  $\varphi_k$  потенциалов и падения напряжения на сопротивлении электролита:

$$U \approx \varphi_a - \varphi_k + J_a \frac{s}{\sigma_p} = \Delta\varphi + \frac{sI}{F\sigma_p} = \Delta\varphi + R_{жк}I,$$

где  $\sigma_p$  – удельная проводимость электролита;  $I$  – полный ток через электролит;  $R_{жк}$  – эквивалентное сопротивление;  $s$  – межэлектродный зазор;  $F$  – площадь электрода.

Потенциал  $\varphi_k$  изменяется в узких пределах (от  $-2,0$  до  $-1,5$  В) и определяется экспериментально по анодной поляризационной характеристике.

Удельная проводимость электролита растет с увеличением температуры (температурный коэффициент для солей  $0,02 - 0,025^\circ\text{C}^{-1}$ , для кислот  $0,01 - 0,015^\circ\text{C}^{-1}$ ) и концентрации; в последнем случае после достижения некоторого значения дальнейшее увеличение концентрации снижает диапазон изменения  $\sigma_p$  для применяемых электролитов от 5 до 20 См/м.

Установившаяся средняя скорость съема металла в объемных единицах равна

$$M = \frac{AK_a}{\rho} \frac{(U - \Delta\varphi)F\sigma_p}{s},$$

где  $\rho$  – плотность материала анода.

С уменьшением зазора  $s$  экономичность процесса растет, так как при этом падает расход энергии на нагрев электролита, одновременно при этом увеличивается точность отображения в детали формы анода. Однако уменьшение зазора возможно до тех пор, пока не будут существенно ухудшены условия удаления продуктов реакции. Очевидно, что для экономии энергии следует также снижать напряжение источника питания и увеличивать проводимость электролита. Верхний предел напряжения определяется вероятностью возникновения короткого замыкания. Обычно напряжение лежит в диапазоне от 4 до 24 В в зависимости от обрабатываемого материала (например, титан требует повышенного напряжения), рабочие токи – от сотен ампер до десятков килоампер, мощности – от десятков до сотен киловатт.

**Импульсная электрохимическая технология.** Применение импульсного тока в ЭХ технологии началось из-за следующих технических и экономических ограничений, свой-

ственных ЭХ механизму съема металла при непрерывном подводе энергии:

из-за высокой энергоемкости – почти на два порядка выше, чем при традиционных процессах, и на один-полтора порядка выше, чем при ЭЭ обработке. Этот недостаток принципиальный, так как в его основе лежат большие затраты энергии на нарушение связей в твердом теле на атомном уровне. Большая энергоемкость приводит к увеличению габаритных размеров установок (не только вследствие роста мощности источника питания, но и из-за необходимости введения устройств для отвода тепла, очистки и циркуляции электролита и т. п.) и их капиталоемкости;

из-за трудности получения малой шероховатости поверхности при низких плотностях тока: незначительные при высоких плотностях тока отличия в скорости растворения отдельных структурных и материальных компонентов сплавов проявляются при малых плотностях тока в виде зон растравливания, так называемой струйности и т. п. Если плотность тока менее 20 А/см<sup>2</sup>, поверхность становится некачественной. Таким образом, наименьшая допустимая мощность установки часто определяется не требуемой производительностью, а возможностью качественной обработки заданной поверхности при минимальной плотности тока. Так, обработка поверхности, имеющей площадь, занимаемую страницей этой книги, потребует мощности (вместе с вспомогательными устройствами) примерно не менее 150 кВт. По указанной причине промышленные ЭХ установки на непрерывном токе имеют мощность порядка сотен киловатт, занимают площади в десятки и сотни квадратных метров и используются преимущественно в специальном машиностроении, например при обработке турбинных лопаток из жаропрочных сплавов;

несмотря на съем металла на атомарном уровне точность копирования значительно ниже, чем у большинства способов размерной обработки, – погрешности достигают нескольких десятых долей или единиц миллиметров. Причиной является отклонение распределения местной плотности тока от идеальной. Из-за наличия межэлектродного зазора, сглаживающего благодаря своему сопротивлению различия в плотности тока на соседних участках, относительное изменение плотности тока на двух соседних участках, не равноотстоящих от катода, будет тем меньше, чем больше зазор. До определенных пределов, критических для каждой конфигурации и размера полости, снижение зазора возможно, однако в дальнейшем это приводит к росту сопротивления движению электролита, умень-



шению его скорости и возникновению в загрязненной отходами среде опасных замыканий.

Указанные ограничения в значительной степени устраняются при переходе от непрерывного подвода энергии к комбинированному, состоящему из двух фаз: а) непрерывной (на стадии предварительного съема металла, когда точность может быть небольшой, а качество поверхности еще несущественно); б) прерывистой, состоящей в свою очередь из двух последовательных этапов – собственно импульсного подвода, обусловливаемого импульсным источником питания, и так называемого циклического, получаемого в результате механического разведения и сведения электродов периодически по определенному циклу, когда зазор может доводиться до самых минимальных значений. При относительно больших площадях обработки процесс может начинаться прямо с импульсного, минуя непрерывный, и завершается циклическим. Импульсно-циклический подвод энергии позволяет использовать эффекты адаптации, стабилизации и «затухания» и частично снимает этим отмеченные выше ограничения. Поскольку при прерывистой фазе минимально допустимая плотность тока должна обеспечиваться только в течение импульса, потребляемая же из сети энергия будет определяться средним, а не импульсным значением тока и потому будет значительно ниже. Минимально допустимое значение межэлектродного зазора уменьшается благодаря снятию или ослаблению гидродинамического ограничения, поскольку рабочая фаза съема металла и пауза, во время которой осуществляется удаление отходов (гидроокисей и газов), разделены. Соответственно растет точность обработки. Увеличиваются и предельно допустимые размеры обрабатываемой поверхности соответственно снижению средней минимально допустимой плотности тока; этот эффект достигает двух-четырёхкратных значений по сравнению с режимом непрерывного тока.

Повышенная работоспособность, стабильность, надежность и уровень автоматизации процесса и установки обуславливаются использованием эффектов стабилизации и адаптации: во время паузы на основании анализа состояния рабочей зоны специальным датчиком определяется момент включения очередного импульса или цикла, когда исключается опасность короткого замыкания. Таким образом, длительность или количество импульсов в серии определяются автоматически и поддерживаются такими, чтобы обеспечить заданные технологические параметры, из которых главные – точность и качество поверх-

ности. Часть параметров (температура, степень очистки электролита и др.) автоматически стабилизируются.

В целом режим работы ЭХ установки задается специальным программным устройством, регламентирующим последовательность перехода от непрерывных к импульсным и циклическим режимам, т. е. от предварительной к лучистой и чистовой обработке; адаптация осуществляется автоматически на каждом переходе. Система генерирования импульсов органически связана с системой адаптивного и программного управления.

Применение импульсного тока при относительно небольших номинальных мощностях не исключает использования непрерывного подвода и больших мощностей там, где это связано с уникальными технологическими задачами обработки сложных по форме изделий больших размеров из спецсплавов, когда требования точности менее значимы, чем требования по производительности.

**Источники питания непрерывных и импульсных электрохимических установок.** Диапазон используемых для объемной ЭХ обработки напряжений (12–24 В), токов (от сотен до десятков тысяч ампер) совпадает с параметрами источников питания гальванических ванн. Совпадают также общие требования обеспечения длительного режима работы при колебаниях напряжений сети, точности стабилизации тока или напряжения, равной 5% при изменении в диапазоне  $(0,1 \div 1)I_{\text{ном}}$ . К специальным требованиям также относится необходимость обеспечения высокого быстродействия защиты при металлическом коротком замыкании.

Базовой моделью источников питания для ЭХ обработки являются преобразователи серии ВАК.

Унифицированный источник питания ЭХ станков представляет собой преобразователь с тиристорным регулированием выходного напряжения. Трехфазное напряжение сети выпрямляется после понижающего трансформатора тиристорами, включенными по схеме с уравнительным реактором. Импульсные режимы обеспечиваются блоком импульсного регулирования, содержащим задающий генератор, определяющий заданную длительность (4–6 мс и выше) импульсов и пауз, и синхронизатор, обеспечивающий равномерную загрузку фаз трансформатора. Специальными для ЭХ станка являются также блоки автоматического регулирования подачи электродов и блока защиты от коротких замыканий.

Для сокращения продолжительности опасного тока в случае короткого замыкания, разрушающего электроды, устанавливается тиристорный короткозамыкатель. Блок защиты

Таблица 54.6. Технические данные выпрямительных агрегатов серии ВАК, работающих с электрохимическими станками

Параметр	ВАК-1600-24	ВАК-3200-24	ВАК-6300-24	ВАК-12500-12
Выпрямленное напряжение, В	3–24	3–24	3–24	3–12
Номинальный ток, А	1600	3200	6300	1250
Номинальная выходная мощность, кВт	38,4	76,8	151,2	250
Минимальная длительность импульса, мс	—	4–6 мс	—	—
Габаритные размеры агрегата (длина × ширина × высота), мм	1700 × 1765 × 800	1900 × 2315 × 900	2945 × 3038 × 1800	2375 × 2995 × 2400
Модели ЭХ копирувально-прошивочных станков (индекс ФЦ обозначает наличие адаптивно-программного управления)	4421 4421ФЦ	4422(4423) 4А423ФЦ	4423 4А23ФЦ	4424 —

Примечание. Изготовитель — Быстровский электротехнический завод (Киргизская ССР). Напряжение сети 380 В.

получает сигнал от специального датчика коротких замыканий, который реагирует на провалы напряжения длительностью в десятки микросекунд, отсеивает ложные сигналы и выдает команды на открытие тиристора короткозамыкателя, отвод электрода и выключение источника питания.

Основные данные источников питания, используемых в ЭХ станках, приведены в табл. 54.6.

#### Источники питания светолучевых станков

Для размерной обработки применяются преимущественно твердотельные оптические квантовые генераторы-лазеры. Электрическая энергия от источника питания подводится в виде импульсов напряжения к лампе накачки, которая является промежуточным преобразователем электрической энергии в световое излучение с широким спектром частот. Это излучение преобразуется лазером в монохроматичный узкий пучок, который и осуществляет рабочий процесс, в данном случае размерную обработку — изготовление отверстий, щелей, сечок в проводниках и диэлектриках любой твердости и вязкости, сварку, термоупрочнение и многое другое. Основной вид взаимодействия — тепловое, результатом которого является испарение и удаление вещества из облученного участка.

Поскольку нагрузкой генератора импульсов является импульсная лампа накачки, его электрические характеристики мало зависят от технологического объекта. Электрический разряд, возбужденный в газовой среде лампы накачки при прохождении через нее импульса тока, образует в малом объеме разрядной камеры практически мгновенно высокотемпературную плазму, допускает частое повторение и легко управляется.

Источник питания лампы накачки представляет собой типичный генератор с емкостным накопителем и с регулируемой энергией, частотой и скважностью импульсов. Блок питания БП (рис. 54.15) заряжает конденсатор С, при разряде которого через импульсную лампу накачки ИЛ протекают импульсы тока с длительностью от долей до десятков миллисекунд и амплитудой до  $10^5$  А. Устройство управления УУ синхронизирует работу зарядной цепи и блока возбуждения ВВ разряда в лампе.

Для лазерных установок размерной обработки наиболее применимы трубчатые импульсные лампы, представляющие собой заполненный газом баллон из специального кварцевого стекла с необходимой спектральной полосой пропускания, в который вводятся электроды. Трубка — прямая или изогнутая (в соответствии с назначением) — заполняется обычно ксеноном под давлением в несколько килопаскалей. Разряд возбуждается управляющим электродом — изолированной металлической пластинкой или навитой в несколько рядов на внешней поверхности разрядной трубки проволокой.

#### Технические данные импульсных ламп накачки

ИФП-1200 ИФП-5000

Диаметр лампы и расстояние между электродами, мм	7 × 120	11 × 250
Тип лазерной установки . . .	«Квант-9»	
Емкость батареи конденсаторов, мкФ . . . . .	800	2000
Начальное рабочее напряжение, кВ . . . . .	1,3	1,7
Предельное напряжение, кВ	1,7	2,2
Длительность разрядки, мс	0,7	6,0
Частота импульсов, Гц . . . .	1	1
Срок службы, тыс. вспышек	100	200
Энергия излучения лазера, Дж	8,0	15,0

В технологических установках предъявляются высокие требования к стабильности

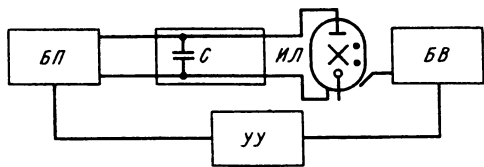


Рис. 54.15. Структурная схема твердотельного технологического лазера

энергетических характеристик лазерного излучения, которую, очевидно, необходимо обеспечить за счет стабильности параметров излучения лампы накачки и питающих ее электрических импульсов. Источник питания лампы накачки должен генерировать импульсы тока в диапазоне от долей до единиц, иногда до сотни герц при средней потребляемой мощности (учитывая низкий КПД лазера) до нескольких киловатт. Общий КПД системы преобразования электрической энергии в лазерное излучение составляет несколько процентов.

Унификация элементов питания лазерных установок привела к разделению их на типовые блоки, каждый из которых может самостоятельно использоваться и совершенствоваться. Такими типовыми блоками являются зарядные устройства накопительных конденсаторов, разрядные контуры, содержащие лампы накачки, устройства управления и защиты. Основными энергетическими блоками являются зарядное устройство, состоящее обычно из источника тока (в частности, на базе индуктивно-емкостного преобразователя — ИЕП), и тиристорный зарядный коммутатор. Заряд неизменным током обеспечивает по сравнению с другими схемами в 1,5–2 раза более высокий КПД заряда, достигающий до 80–85%,  $\cos \varphi \approx 1$ . При разряде накопителя, когда сопротивление лампы накачки резко падает и создается режим, близкий к короткому замыканию, сеть не испытывает толчков. В схеме зарядного устройства при заданной энергии имеется возможность простого регулирования продолжительности заряда, т. е. конечного напряжения на конденсаторе, либо при постоянном времени зарядки — тока, т. е. изменения энергии.

Промышленностью выпускаются импульсные источники питания типа БП (табл. 54.7), которые входят в комплект питания ламп накачки (модуляторов). Промышленные лазерные установки для размерной обработки имеют общую механическую базу — станок 4222.

Лазерный станок предназначен для обработки отверстий, резания труднообрабатываемых

материалов, в том числе для обработки отверстий в электродных системах газоразрядных индикаторных панелей, сетках, керамических деталях электронной техники, для профилирования многогранных резцов из зльбора и т. п. Станок оснащен специальной системой ЧПУ (исполнение 422Ф2), управляющей перемещением стола по двум координатам и работой квантового генератора.

Оптический квантовый генератор с активным элементом, например, на стекле, активированном неодимом, может работать в режимах свободной генерации, модулированной ультразвуковыми колебаниями. Наличие ультразвуковой модуляции излучения способствует повышению точности обработки.

В станке использована проекционная схема локализации излучения, позволяющая регулировать световое пятно в зоне обработки в широком диапазоне без фокусирующего объектива. Обработку можно также производить при установке детали в фокальной плоскости объектива.

#### Источники питания ультразвуковых станков

Ультразвуковые генераторы предназначены для преобразования тока промышленной частоты в ток высокой частоты и применяются для питания электроакустических преобразователей. По типу преобразовательного устройства они делятся на ламповые, полупроводниковые (транзисторные и тиристорные) и машинные.

В настоящее время новые ультразвуковые генераторы выполняются в основном на полупроводниковых приборах — транзисторах и тиристорах.

Применение тиристорных инверторов в качестве источников питания электроакустических преобразователей пока ограничено из-за низких частотных свойств тиристоров и сложности схемы управления, вследствие чего их преимущества перед транзисторными генераторами проявляются только при большой выходной мощности (выше 4 кВт). Наиболее широко в настоящее время применяются ультразвуковые генераторы на транзисторах. Так как параметры транзисторов непрерывно улучшаются, они являются наиболее перспективными приборами и для новых разработок ультразвуковых генераторов.

Генераторы предназначены для работы с пьезокерамическими преобразователями.

Ультразвуковой генератор УЗГ-4-0,1 с независимым возбуждением состоит из трех каскадов: задающего генератора, предварительного усилителя и усилителя мощности. Задаю-

Таблица 54.7. Технические данные импульсных источников питания для ламп накачки

Тип	Средняя мощность, кВт	Максимальный потребляемый из сети ток при закороченном выходе, А	Напряжение питания, В	Размеры, мм
БП-2000-3,0	3,0	2,2	220	1005 × 595 × 595
БП-2000-9,0	9,0	1,5	3 × 380	1275 × 595 × 595
БП-5000-0,6	1,5	1,6	220	815 × 595 × 595
ВП-5000-1,8	4,5	1,0	3 × 380	1125 × 595 × 595
БП-5000-3,6	9,0	1,5	3 × 380	1275 × 595 × 595

Примечание. Выходное напряжение, В, и ток зарядки, А, содержатся в обозначении типа.

Таблица 54.8. Технические данные ультразвуковых генераторов

Параметр	УЗГ4-0,1	УЗГ8-0,1/22	УЗГ1-0,25	УЗГ3-0,4/33	УЗГ5-0,63	УЗГ10-1,6
Мощность, потребляемая от сети, В·А	150	180	400	800	1200	2000
Напряжение питающей сети, В	220	220	220	220	380	380
Рабочая частота, кГц	18 ± 1,35	22 ± 1,65	18 ± 1,35	22 ± 1,65	22 ± 1,65	18 ± 1,35
Выходная мощность, Вт	100	100	250	400	630	1600
Габаритные размеры, мм	320 × 170 × 170	380 × 370 × 230	400 × 310 × 190	234 × 525 × 565	462 × 610 × 423	520 × 680 × 427

ший генератор выполнен по схеме с индуктивной обратной связью. Предварительный усилитель, так же как и выходной каскад, работает в режиме переключения и собран по полумостовой двухтактной схеме. В цепи вторичной обмотки выходного трансформатора стоит катушка корректирующего фильтра и нагрузка — пьезокерамический преобразователь.

#### Технические данные станка марки 4222

Энергия излучения, Дж, не более	2
Длительность импульса, мкс . . . . .	100—400
Диаметр обрабатываемых отверстий, мкм . . . . .	20—200
Глубина обрабатываемых отверстий при многоимпульсном воздействии, мм, не более . . . . .	4
Скорость обработки отверстий диаметром 100 мкм в заготовках толщиной до 0,1 мм, отверстий/ч	9000
Мощность станка, кВт . . . . .	3
Габаритные размеры, мм:	
станка . . . . .	650 × 1100 × 1245
блока питания . . . . .	100 × 570 × 1030
блока охлаждения . . . . .	430 × 390 × 600
системы ЧПУ . . . . .	300 × 400 × 1000
Масса станка (включая систему ЧПУ), кг . . . . .	900
Примерная цена (без системы ЧПУ), тыс. руб. . . . .	15,0

Ультразвуковой генератор с автоматической подстройкой частоты типа УЗГ8-0,1/22

(рис. 54.16) предназначен для питания ультразвуковых станков. Нагрузкой генератора служит магнитострикционный преобразователь *M*. Генератор состоит из двух каскадов, первый — возбудитель в виде блокинг-генератора на транзисторах *VT1*, *VT2*, питаемый от выпрямителя с выходным напряжением  $E_1$ . Выходной каскад собран по полумостовой схеме на транзисторах *VT3*, *VT4*. Нагрузка *M* подключена к выходу генератора через согласующие трансформатор *T2* и контур  $C1 - L1 - C2 - L2$  и дифференциальный трансформатор обратной связи *T3*. Напряжение обратной связи с трансформатора *T3* подается на базовые цепи транзисторов *VT1* и *VT2* и осуществляет синхронизацию работы возбудителя. В генераторе предусмотрена ступенчатая регулировка мощности в диапазоне от 10 до 100% номинальной.

Параметры УЗ генераторов представлены в табл. 54.8.

#### Источники питания комбинированных станков

Ниже кратко рассматриваются некоторые виды комбинированной ЭФХ обработки, уже получившие промышленное применение: плазменно-механическая (ПМО), алмазно-электрохимическая (АЭХО), алмазно-электроэрозий-

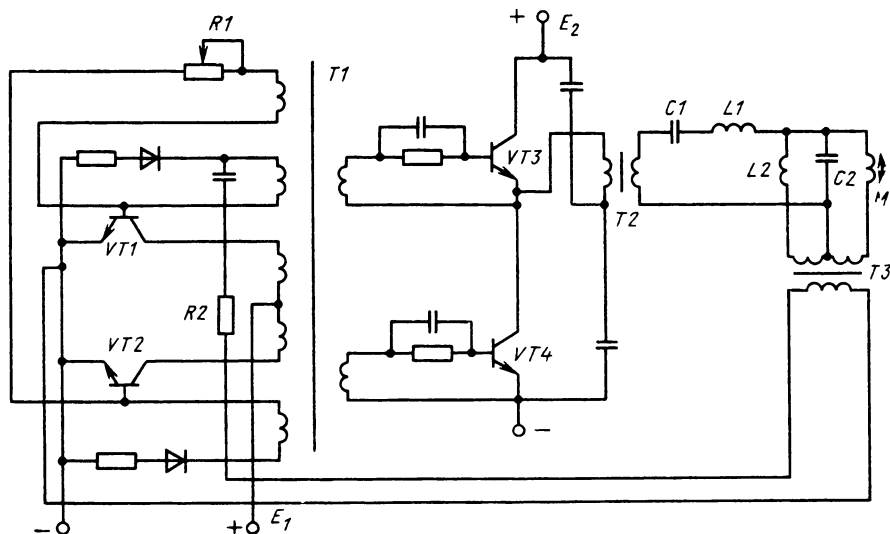


Рис. 54.16. Схема генератора ультразвуковых колебаний типа УЗГ8-0,1/22

ная (АЭЭО), ультразвуковая электрохимическая (УЗЭХО), анодно-механическая (АМО).

**Плазменно-механическая обработка.** При ПМО традиционный процесс резания дополняется подогревом при помощи плазмотрона, при этом температура в струе плазмы достигает 5000–10000 °С. Интенсивный нагрев приводит к снижению усилия резания и повышению стойкости реза. Тепло вводится либо через оплавленную канавку (способ ВНИИЭСО), либо прогревом, исключаям плавление (способ Грузинского политехнического института). ПМО применяется для обработки крупных цилиндрических или слабо конических заготовок из жаростойких, нержавеющей и подобных им труднообрабатываемых сплавов, встречающихся, в частности, в энергомашиностроении.

Дополнительное плазменное электрооборудование включает источник питания типа АПР-403 и плазмотрон ПВР-402, используемые также и для плазменной резки.

#### Технические данные установки АПР-403 и плазмотрона ПВР-402

Напряжение питающей трехфазной сети 50 Гц, В . . . . .	380
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	120
Номинальный ток, А . . . . .	400
Пределы регулирования тока, А . . . . .	150–400
Номинальный режим ПВ, % . . . . .	100
Напряжение холостого хода, В, не более . . . . .	300 ± 10%
Пределы регулирования напряжения на дуге, В . . . . .	100–200
Плазмообразующий газ . . . . .	Воздух
Габаритные размеры, мм . . . . .	1710 × 874 × 910

Масса, кг . . . . .	1500
Примерная цена комплекта, тыс. руб. . . . .	4,9
Изготовитель . . . . .	Степановский завод высоко-частотного электрооборудования

**Алмазно-электрохимическое и алмазно-эрозионное шлифование.** В обоих способах применяется одинаковый инструмент – вращающийся круг, на периферии или торце которого нанесен алмазный слой токопроводящей основы.

В процессе алмазно-электрохимического шлифования (АЭХШ) круг подключен к катоду источника постоянного напряжения (2–12 В), а шлифуемая заготовка – к аноду. Выступающие алмазные зерна ограничивают межэлектродный зазор, в котором находится рабочая жидкость – электролит, обладающий незначительным коррозионным воздействием. Растворение анода-заготовки и перевод припуска в легко удаляемый алмазными зернами слой снижают усилие резания, повышают производительность и стойкость круга. Процесс особенно эффективен при обработке твердых и магнитных сплавов, заточке инструмента.

Алмазно-электроэрозионное шлифование (АЭЭШ) основано на эрозионном разрушении токопроводящей связи, результатом чего является регулируемое электрическое вскрытие новых алмазных зерен и поддержание круга в «заостренном» состоянии. Рабочая среда – обычно шлифовальная жидкость. Источник питания – генератор импульсов типа ШГИ,

## Технические данные плоскошлифовальных алмазно-электрохимических станков

	ЗЭ731	ЗЭ754ЛФ1
Обрабатываемые поверхности . . . . .	Плоскости на изделиях из твердых сплавов, жаропрочных и нержавеющей сталей	
Диаметр круга, мм . . . . .	250	До 300
Частота вращения круга, об/мин . . . . .	2300	1460
Мощность привода шпинделя, кВт . . . . .	5,5	13
Источник питания:		
тип . . . . .	—	ВАКГ-12/6-3200 — 4
напряжение, В . . . . .	—	8 — 12
наибольший ток, А . . . . .	—	3200
Габаритные размеры станка (длина × ширина × высота), мм . . . . .	2540 × 1380 × 2330	3960 × 3530 × 2280
Масса, кг . . . . .	5500	6900
Изготовитель . . . . .	Оршанский станкозавод «Красный борец»	Воронежский станкозавод им 50-летия Ленинского комсомола

## Технические данные заточных алмазно-электрохимических станков

	3672	3622Э
Обрабатываемые поверхности . . . . .	Плоские задняя и передняя поверхности фрез, зенковок, разверток	
Частота вращения круга, об/мин . . . . .	3000	2540
Мощность привода шпинделя, кВт . . . . .	2,2	1,5
Источник питания:		
тип . . . . .	—	ВАКР-630-12У4
напряжение, В . . . . .	2; 4; 6; 13	8
максимальный ток, А . . . . .	400	300
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм . . . . .	2440 × 2400 × 1800	1490 × 1280 × 1500
Масса, кг . . . . .	4055	950
Изготовитель . . . . .	Витебский станкозавод им С. М. Кирова	

применяемый при ЭЭО, или специальные упрощенные преобразователи типа ИТТ-35 и ИТТ-9.

## Технические данные источников питания (трехфазная сеть 380 В)

	ИТТ-35	ИТТ-9
Наибольшая потребляемая мощность, кВт . . . . .	1	1
Частота выходных импульсов, Гц . . . . .	50	50
Диапазон регулирования выходного напряжения на холостом ходу, В:		
амплитуда импульсов . . . . .	27—75	27—75
среднее значение . . . . .	0,5—0,9	0,2—4
Диапазон регулирования длительности импульсов выходного напряжения . . . . .	85—160	120—180
Примерная цена, тыс. руб . . . . .	1,0	0,8
Изготовитель . . . . .	Бакинский станкостроительный завод (БСЗ)	

## Технические данные станка модели 4Д772Э и источника питания

Наибольшая площадь обработки, мм <sup>2</sup> . . . . .	1250
Производительность по твердому сплаву, мм <sup>3</sup> /мин . . . . .	350
Мощность на выходе УЗ генератора (типа УЗГ5-1,6) . . . . .	1,6
Частота, Гц . . . . .	22
Мощность на выходе источника для ЭХО, кВт . . . . .	2,9
Тип источника питания . . . . .	ВАК-320-9
Напряжение, В . . . . .	9
Ток, А . . . . .	320

Изготовители . . . . . Троицкий станкозавод (станок), Быстровский электротехнический завод (источник)

Способ АЭЭШ эффективен на тех же материалах, что и АЭХШ, но более технологичен и прост в эксплуатации. В промышленности используются АЭЭШ станки, сделанные на базе традиционных заточных (модели ЗЕ667Ф1, ЗЕ624ЭР — полуавтоматы Мукачевского станкозавода, источник питания ИТТ-35) и круглошлифовальных (модель ЗК12Р, источник питания ШГИ-40-440; модель ЗК227КР — источник питания ИТТ-9) станков.

Ультразвуковая электрохимическая обработка. При совмещении ультразвукового (УЗ) и ЭХ воздействий достигается многократное увеличение производительности объемного формообразования в твердосплавных изделиях. При воздействии УЗ-колебаний на поверхность заготовки, находящейся в среде проводящей абразивной суспензии, зерна абразива разрушают пассивирующую пленку, которая возникает при ЭХ процессе, открывая возможность продолжения анодного растворения. В свою очередь при ЭХ процессе, раство-

ряется преимущественно связка (кобальт в сплавах типа ВК), что облегчает последующее удаление УЗ воздействием твердых карбидов вольфрама.

### 54.3. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

#### Основные сведения

При импульсном электрическом разряде в жидкости происходит быстрое выделение энергии в канале разряда. В результате давление в канале разряда значительно превышает внешнее, канал быстро расширяется, что приводит к возникновению ударной волны и потоков жидкости.

Механические проявления импульсного разряда в жидкости принято называть электрогидравлическим эффектом, а установки с использованием этого эффекта — электрогидравлическими. В качестве рабочей среды в таких установках используется, как правило, техническая вода.

Обычно электрогидравлическая установка состоит из накопителя энергии НЭ (рис. 54.17), зарядного устройства ЗУ и технологического блока ТБ, содержащего некоторый объем жидкости, систему электродов, между которыми создается импульсный разряд, и обрабатываемый объект, располагаемый вблизи канала разряда К.

Накопитель энергии, как правило, представляет собой батарею импульсных конденсаторов высокого напряжения емкостью С. Конденсаторная батарея соединяется с электродной системой в технологическом блоке через разрядник Р, наличие которого позволяет зарядить емкость С до требуемого напряжения от зарядного устройства ЗУ со сравнительно небольшим током. Соединение накопителя энергии с технологическим блоком выполняется малоиндуктивным, для чего используются специальные коаксиальные кабели высокого напряжения. Применение коаксиальных кабелей помимо уменьшения индуктивности разрядной цепи ослабляет электромагнитные поля вблизи работающей установки.

Разрядник Р может быть управляемым или неуправляемым. Он представляет собой, как правило, двухэлектродный или трехэлектродный (тригатрон) воздушный искровой промежуток, в некоторых случаях помещаемый в звукоизолирующем корпусе. В установках с большой частотой следования разрядов промежуток разрядника продувается сжатым воздухом, а электроды охлаждаются водой.

Наличие технологического блока характерно для установок, предназначенных для обработки транспортабельных деталей или ма-

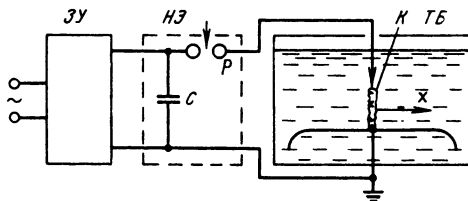


Рис. 54.17. Принципиальная схема электрогидравлической установки

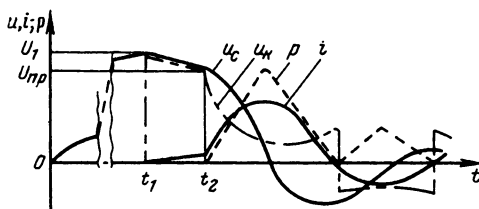


Рис. 54.18. Изменение напряжения на конденсаторе  $u_c$ , на канале разряда  $u_k$ , разрядного тока  $i$  и мощности  $p$  во времени  $t$

териалов (например, деталей в машиностроении и металлообработке, сырья в горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов и т. д.). В таких электрогидравлических установках, как установки для бурения, разрушения негабаритных кусков горных пород, для эхолокации водоемов, технологический блок отсутствует и вместо него используется перемещаемая электродная система, погружаемая в шпур, заполненный жидкостью, или в водоем.

Принцип работы типичной электрогидравлической установки поясняют графики изменения во времени основных электрических параметров, приведенные на рис. 54.18. До момента  $t_1$  происходит заряд накопителя; напряжение на конденсаторе С растет до  $U_1 = 10^3 \div 10^5$  В. В момент  $t_1$  накопитель подключается к искровому промежутку в жидкости и начинается процесс электрического пробоя промежутка. По завершении пробоя в момент  $t_2$  наступает канальная стадия разряда. Напряжение  $u_c$  за время  $t_2 - t_1$  несколько падает (до  $U_{np}$ ) из-за стекания заряда с конденсатора С вследствие электропроводности среды в промежутке. Если при пробое ток  $i$ , протекающий через промежуток, растет незначительно, то по завершении пробоя он резко возрастает. Обычно ток в течение канальной стадии имеет форму, близкую к синусоидальной с большим затуханием. Форма напряжения на промежутке  $u_k$  отражает нелинейность его сопротивления. Импульс мощности  $p$ , развиваемой в канале, имеет форму, близкую к треугольной.

В тех случаях, когда потери энергии за время пробоя  $t_2 - t_1$  недопустимо велики или при рабочем напряжении не обеспечивается стабильный пробой промежутка при требуемом расстоянии между электродами, перед каждым разрядом электроды закорачиваются тонкой провололочкой, которая взрывается под действием тока разряда.

При разряде или электрическом взрыве проволоочки в жидкости возникают ударная волна давления и пульсирующая по размерам газовая полость, изменение положения которых относительно оси канала во времени показано на рис. 54.19, а соответственно кривыми 1 и 2. Ударная волна распространяется от канала разряда, давление на ее фронте падает, и на некотором расстоянии  $x$  от оси канала разряда ударная волна переходит в звуковую.

Канал разряда в начале процесса расширяется с максимальной скоростью. После прекращения протекания тока полость канала разряда вследствие инерционности окружающей среды продолжает расширяться, достигает предельных размеров и затем начинает сжиматься. При расширении полости температура и давление газа в ней падают, а при сжатии повышаются, что приводит к затухающим пульсациям полости. Обычно период колебаний полости на несколько порядков превышает длительность разряда. Максимальные размеры полости в зависимости от выделившейся энергии при разряде и от условий протекания гидродинамических процессов в технологическом блоке составляют от нескольких до десятков сантиметров.

В случае применения взрывающейся проволоочки картина механических проявлений несколько изменяется (рис. 54.19, б). С момента

подключения накопителя  $t_1$  начинается разогрев проволоочки и происходит сравнительно медленное увеличение ее диаметра. К моменту начала электрического взрыва  $t_3$  от отдельных участков проволоочки отделяются слабые ударные волны, распространяющиеся со скоростью, близкой к скорости звука. В момент завершения взрыва  $t_4$  возникает мощная ударная волна, обгоняющая ранее возникшие, и далее процесс протекает так же, как и при разряде вследствие пробоя промежутка.

Из-за потерь энергии в соединительных проводах и элементах накопителя, в канале разряда и в газовой полости только незначительная часть накопленной энергии подводится при пробое промежутка или взрыве проволоочки к объекту обработки. Однако при разряде в жидкости достигаются высокие концентрации энергии и скорости обработки, что и определяет области применения электрогидравлических установок. Это прежде всего высокоскоростное деформирование металлов, разрушение и дробление хрупких материалов, очистка металлических деталей от формовочных смесей, окалины, эколокация водоемов и т. п.

#### Расчет электрического пробоя

В момент подключения накопителя энергии к промежутку в воде ( $t_1$  на рис. 54.18) начинается процесс пробоя. В зависимости от максимального значения напряженности электрического поля в промежутке между электродами, электрической проводимости воды, расстояния между электродами процессы пробоя могут качественно изменяться, и поэтому не существует единого подхода при расчете времени пробоя и степени снижения напряжения (потерь энергии) накопителя за время пробоя  $t_2 - t_1$ .

Если напряженность электрического поля в промежутке не превышает критического значения  $E_{кр}$  (для воды с электрической проводимостью  $\sigma = 10^{-2}$  См/м  $E_{кр} = 3,6$  МВ/м), то разряд наступает в момент закипания жидкости. Пробой этого вида принято называть тепловым.

При тепловом пробое промежутка с однородным полем и постоянным во времени приложенным напряжением время пробоя

$$t_{пр} = \frac{c\beta l^2}{\sigma_0 \alpha U^2} \ln \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1},$$

где  $l$  — расстояние между электродами;  $c$ ,  $\beta$  — удельные теплоемкость и плотность воды;  $\sigma_0$  — удельная проводимость воды при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент проводимо-

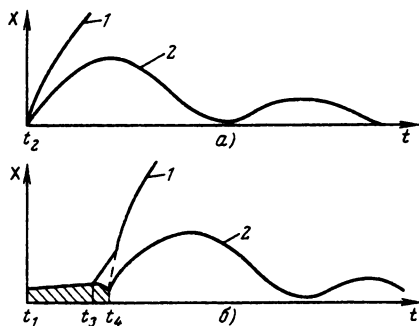


Рис. 54.19. Изменение положения ударной волны (кривые 1) и границы газовой полости (2) при разряде в жидкости, вызванном пробоем (а) и взрывом проводника (б)



сти;  $T_1$  — начальная температура;  $T_2$  — температура начала парообразования.

Если  $t_{пр} > 10^{-4}$  с, то  $T_2 = 100^\circ\text{C}$ . При меньших  $t_{пр}$  возможен перегрев воды выше  $100^\circ\text{C}$ .

Вольт-секундная характеристика промежутков с однородным полем с учетом перегрева воды имеет вид

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{l^2}{\sigma_0 t_{пр}} (200 + 345e^{-(t_{пр}/\tau)^{2,3}})},$$

где  $\tau = 3 \cdot 10^{-5}$  с.

Наибольшее расстояние между электродами, при котором возможен тепловой пробой, в случае использования емкостного накопителя энергии с емкостью  $C$

$$l_{max} = \frac{2c\beta S (T_2 - T_1)}{CE_{кр}^2},$$

где  $S$  — площадь оголенной поверхности электрода, контактирующая с водой.

Расчет теплового пробоя в промежутках с неоднородным полем затруднен, так как распределение электрического поля в промежутке зависит не только от приложенного напряжения и размеров электродной системы, но и от изменяющейся во времени электрической проводимости воды, зависящей от температуры. Поэтому расчет пробоя может быть выполнен численными методами. Однако для оценок времени пробоя промежутков с неоднородным полем можно воспользоваться формулами для однородного поля, подставив в них среднюю напряженность электрического поля. Такой подход оказывается возможным вследствие выравнивания электрического поля при локальном нагреве воды в местах с наибольшей напряженностью поля.

При напряженности электрического поля выше  $E_{кр}$  имеет место лидерный пробой; в этом случае процесс пробоя рассчитывается

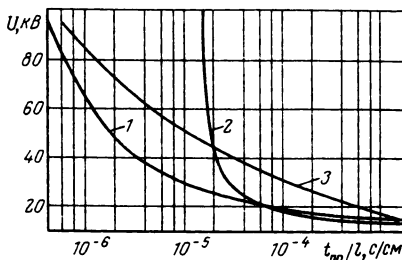


Рис. 54.20. Вольт-секундные характеристики промежутков в воде:

1 — стержень — плоскость, положительная полярность; 2 — стержень — плоскость, отрицательная полярность; 3 — стержень — стержень

с помощью вольт-секундных характеристик промежутков.

На рис. 54.20 приведены вольт-секундные характеристики промежутков. По оси абсцисс отложено время воздействия напряжения на стержне, необходимое для пробоя единицы длины промежутка. Приведенные вольт-секундные характеристики получены при прямоугольной форме приложенного напряжения и при удельной проводимости  $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-2}$  См/м.

Как следует из данных рис. 54.20, в электрогидравлических установках целесообразно использовать промежутки типа стержень — плоскость с резко неоднородным полем, время пробоя которых наименьшее (при положительной полярности напряжения на стержне при  $U > 25$  кВ или при любой полярности напряжения при более низких напряжениях). Симметричные промежутки типа стержень — стержень используются лишь в редких случаях, когда с потерями энергии за время пробоя можно не считаться.

Вольт-секундные характеристики промежутков стержень — плоскость при положительной полярности напряжения описываются формулой

$$t_{пр} = \frac{al}{(U - U_0)^2},$$

где  $a$  — постоянная ( $a = 3,6 \cdot 10^5$  В<sup>2</sup> · с/м);  $U_0$  — напряжение, соответствующее напряженности  $E_{кр}$ . При форме электрода-стержня, близкой к гиперболической,

$$U_0 = \frac{E_{кр}}{2} r \ln \frac{4l}{r},$$

где  $r$  — радиус закругления конца электрода.

Вольт-секундные характеристики промежутков в воде при форме напряжения, имеющей место в электрогидравлических установках, описываются следующим уравнением:

$$la = \frac{U_1^2 CR_{эж}}{2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t_{пр}}{CR_{эж}}\right) \right] - 2U_1 U_0 CR_{эж} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_{пр}}{CR_{эж}}\right) \right] + U_0^2 t_{пр},$$

где  $U_1$  — напряжение, до которого был заряжен конденсатор  $C$ ;  $R_{эж}$  — эквивалентное сопротивление промежутка при пробое.

Сопротивление  $R_{эж}$  определяется из параллельного соединения сопротивлений растеканию токов с оголенной поверхности электрода и с поверхностями лидеров, проросших до противоположного электрода — плоскости.

Считая оголенную поверхность электрода сферой с площадью, равной площади оголен-

ного участка электрода  $S$ , сопротивление  $R_{\text{эк}}$  можно найти из уравнения

$$R_{\text{эк}} = 1/\sigma (2\sqrt{\pi S} + bl/2),$$

где  $b$  — коэффициент, учитывающий количество параллельно развивающихся лидеров и зависящий от напряжения:

$$b = 2 \cdot 10^{-4} U_1.$$

Максимальное расстояние между электродами, при котором возможен пробой,

$$l_{\text{max}} = \left\{ \frac{U_0^2 C}{ab\sigma} \left[ \frac{U_1^2}{U_0^2} - 4 \frac{U_1}{U_0} + 3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \ln \frac{U_1^2}{U_0^2} \right] + \frac{4\pi S}{b^2} \right\}^{1/2} - \frac{2\sqrt{\pi S}}{b}.$$

Поскольку в выражение для  $U_0$  входит  $l = l_{\text{max}}$ , расчет максимального расстояния по приведенному выражению производится методом последовательных приближений. При этом необходимо задаться некоторым значением  $U_0$ , подставить его в выражение для  $l_{\text{max}}$  и рассчитать значение  $U_0$  для полученного  $l_{\text{max}}$ . При расхождении  $U_0$  с принятым в начале расчета необходимо расчет повторить.

Расстояние между электродами, при котором будут иметь место заданные потери энергии при пробое (заданное напряжение на емкости  $C$  в момент завершения пробоя  $U_{\text{пр}}$ ), рассчитывается по формуле

$$l_{\eta} = \left\{ \frac{C}{ab\sigma} [U_1^2 (1 - \eta) - 4U_1 U_0 (1 - \sqrt{\eta}) - U_0^2 \ln \eta] + 4\pi S/b^2 \right\}^{1/2} - 2\sqrt{\pi S}/b,$$

где  $\eta = U_{\text{пр}}^2/U_1^2$ .

Приведенная формула справедлива при  $U_{\text{пр}} > U_0$ .

Если  $U_1 \gg U_0$ , то

$$l_{\eta} = [CU_1^2 (1 - \eta)/ab\sigma + 4\pi S/b^2]^{1/2} - 2\sqrt{\pi S}/b.$$

### Расчет электрических характеристик канала разряда

Сопротивление канала разряда нелинейно. В момент  $t_{\text{max}}$  максимума тока  $I_{\text{max}}$  сопротивление

$$R = 4,4 \cdot 10^7 I_{\text{max}}^{-1,5}.$$

При колебательном разряде

$$R \exp \left( \frac{-3\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2} \right) = \\ = 4,4 \cdot 10^7 I U_{\text{пр}}^{-3/2} (L/C)^{3/4};$$



Рис. 54.21. Зависимость сопротивления канала разряда  $R$  от  $A$  при различных значениях  $\sqrt{L/C}$

при аperiodическом

$$R (\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1})^{\frac{-3\gamma}{2\sqrt{\gamma^2 - 1}}} = 4,4 \cdot 10^7 I U_{\text{пр}}^{-3/2} (L/C)^{3/4},$$

где  $\gamma = R/2\sqrt{L/C}$ ;  $L$  — индуктивность цепи разряда.

Значение  $R$  может быть определено из графиков рис. 54.21, где по оси абсцисс отложена величина

$$A = 4,4 \cdot 10^7 I U_{\text{пр}}^{-3/2} (L/C)^{3/4}$$

в пределах  $A = 1 \div 10$  Ом. Графиками рис. 54.21 можно пользоваться и при других порядках величины  $A$ , при этом соответственно меняются и порядки величин  $R$  и  $\sqrt{L/C}$ . Штриховой линией на рис. 54.21 показана граница между колебательными и аperiodическими разрядами.

Импульс мощности, развиваемой в канале, имеет форму, близкую к треугольной, с максимальным значением

$$P_{\text{max}} = 4,4 \cdot 10^7 I U_{\text{пр}}^{1/2} (C/L)^{1/4} \times \\ \times \exp \left( \frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2} \right)$$

и временем нарастания

$$t_{\text{max}} \approx \frac{0,8\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2},$$

составляющим примерно 0,8 времени достижения максимума тока.

Крутизна импульса мощности, отнесенная к единице длины промежутка между электродами, Вт/(с·м), используемая для расчетов

гидродинамических характеристик канала,

$$dp/dt = 5,5 \cdot 10^7 U_{\text{пр}}^{1/2} C^{-1/4} L^{-3/4} \times \\ \sqrt{1-\gamma^2} \exp\left(\frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2}\right) \\ \times \frac{\arcsin \sqrt{1-\gamma^2}}{\arcsin \sqrt{1-\gamma^2}}$$

При  $\gamma = 0,55$  на активном сопротивлении канала разряда развивается предельно возможная мощность. Удельная крутизна этой мощности

$$dp_{\text{max}}/dt = 3,4 \cdot 10^7 U_{\text{пр}}^{1/2} C^{-1/4} L^{-3/4}.$$

Длина промежутка, соответствующая предельно возможной мощности, называется оптимальной и равна

$$l_{\text{опт}} = 8 \cdot 10^{-9} U_{\text{пр}}^{3/2} (C/L)^{1/4}.$$

При этой длине время нарастания импульса мощности  $t_{\text{max}} \approx \sqrt{LC}$ , а длительность спада приблизительно в 2,5 раза больше.

#### Связь параметров канала разряда и волны сжатия с электрическими характеристиками установки

Физические характеристики канала разряда и параметры волны сжатия до момента максимума мощности слабо изменяются во времени и рассчитываются по следующим формулам:

давление в канале разряда, Па,

$$p_a = \frac{4,5 \cdot 10^{-20} (dp/dt)^{2/3}}{4,3 \cdot 10^{-19} + 3,9 \cdot 10^{-21} (dp/dt)^{1/6}};$$

скорость расширения канала, м/с,

$$da/dt = 7,9 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4};$$

температура плазмы, К,

$$T = 56 (dp/dt)^{1/6};$$

плотность частиц в канале,  $\text{м}^{-3}$ ,

$$n \approx \frac{57 (dp/dt)^{1/2}}{4,3 \cdot 10^{-19} + 3,9 \cdot 10^{-21} (dp/dt)^{1/6}};$$

радиус канала к моменту  $t_{\text{max}}$ , м,

$$a_{t_{\text{max}}} = 6,3 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4} (LC)^{1/2} \frac{\arcsin \sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{1-\gamma^2}}.$$

При расстоянии между электродами, равном  $l_{\text{опт}}$ ,

$$a_{t_{\text{max}}} = 7,5 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4} (LC)^{1/2};$$

скорость ударной волны, м/с,

$$D = 7,5 \cdot 10^2 \{1 + [1 + 4,4 \cdot 10^{-8} (dp/dt)^{1/2}]^{1/2}\};$$

давление на фронте ударной волны, Па,

вблизи канала (на расстоянии от оси канала  $x \leq Dt_{\text{max}}$ )

$$p_{\Phi} = 6,4 (dp/dt)^{1/2}.$$

Скорость выделения энергии при  $t > t_{\text{max}}$  начинает уменьшаться, и параметры всех физических характеристик канала разряда падают. Это в первую очередь относится к давлению в канале разряда, которое к концу первого полупериода колебаний тока уменьшается почти на порядок.

При  $x \leq 2,5l$  ударная волна является цилиндрической. В этой области давление на фронте волны, Па, рассчитывается по формуле

$$p_{\Phi} = 6,1 x^{-1/2} W_1^{5/8} T_1^{-3/4},$$

где  $W_1$  — энергия, выделившаяся в течение первого полупериода  $T_1$  колебаний разрядного тока и отнесенная к единице длины межэлектродного промежутка, Дж/м; эти величины рассчитываются по формулам

$$W_1 = 6,9 \cdot 10^7 U_{\text{пр}}^{1/2} C^{3/4} L^{1/4} \times \\ \exp\left(\frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin \sqrt{1-\gamma^2}\right) \\ \times \frac{\arcsin \sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{1-\gamma^2}};$$

$$T_1 = \frac{\pi \sqrt{LC}}{\sqrt{1-\gamma^2}}.$$

При расстоянии между электродами  $l_{\text{опт}}$

$$W_1 \approx CU_{\text{пр}}^2/2l_{\text{опт}};$$

$$T_1 \approx 3,8 \sqrt{LC}$$

и давление, Па,

$$p_{\Phi} \approx 1,6 \cdot 10^6 U_{\text{пр}}^{5/8} C^{1/4} L^{-7/32} x^{-1/2}.$$

С увеличением расстояния от оси канала разряда волна сжатия перерождается из цилиндрической в сферическую.

В области  $2,5l < x < 5l$  происходит уменьшение максимального давления примерно на 30% по сравнению со значением, соответствующим  $x = 2,5l$ .

Расчет давления при  $x > 5l$  производится по формуле

$$p_{\Phi} = 0,7 p_{\Phi}(x=2,5l) (5l/x)^{-1,1}.$$

Приведенные выше выражения относятся к разрядам, возникающим при пробое промежутка. Если в установке между электродами используется взрывающаяся проволока, энергетические характеристики канала становятся другими, даже если диаметр проволоки предельно мал. Это связано, вероятно, с тем, что образующийся после взрыва канал менее искривлен и его сопротивление оказывается

при тех же параметрах установки в несколько раз меньше, чем сопротивление канала, образованного в результате пробоя промежутка.

Давление на фронте волны сжатия зависит от материала и диаметра взрывающейся проволоочки. Вблизи канала разряда, где волна близка к цилиндрической, давление практически не зависит от длины проволоочки. Давление максимально при электрическом взрыве, происходящем в момент, близкий к моменту достижения максимума разрядного тока.

Поскольку электрический взрыв проволоочки, осуществляемый в электрогидравлических установках, относится к категории сравнительно медленных взрывов, для его завершения достаточно достижения проводником жидкого состояния. Затем быстро развиваются неустойчивости, возникают частичные дуги в разрывах проводника, переходящие в сквозной канал разряда. Момент плавления материала проводника определяется так называемым удельным действием  $A_I$  (интегралом квадрата плотности тока по времени). Для алюминия  $A_I = 4 \cdot 10^{16} \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$ , для меди  $A_I = 1,05 \times 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$ .

Диаметр проволоочки, м, при котором имеет место максимальное давление,

$$d = 0,85 \sqrt[4]{\frac{CU^2}{2A_I} \sqrt{C/L}}.$$

Вдали от канала разряда давление волны сжатия зависит не только от диаметра проволоочки, но и от ее длины. Давление максимально при наибольшей скорости выделения энергии в канале разряда, т. е. при колебательных затухающих разрядах.

Помимо давления важным параметром для многих технологических процессов является деформация обрабатываемой детали в зависимости от диаметра проволоочки. При этом оптимальный диаметр проволоочки по условию максимальной деформации или наибольшего перемещения обрабатываемого объекта может не совпадать со значением по условию максимального давления.

Для достижения наибольшей деформации диаметр проволоочки при сохранении той же длины должен быть на 20–30% больше, чем диаметр, при котором наблюдается наибольшее давление.

#### Схемы разрядных контуров установок

Кроме простейшей показанной на рис. 54.17 схемы разрядной цепи в электрогидравлических установках используются более сложные,

а также схемы с вспомогательными устройствами, обеспечивающими электрический пробой одного или нескольких промежутков в технологическом блоке.

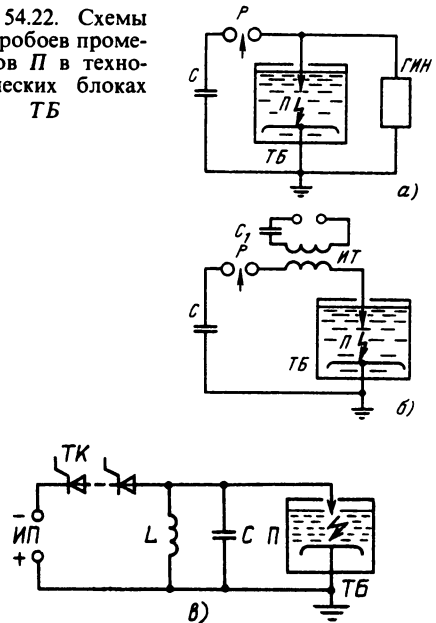
В тех случаях, когда рабочее напряжение накопителя энергии недостаточно для пробоя промежутка и нецелесообразно использовать взрывающиеся проволоочки (например, в установках с большой частотой следования разрядов), применяются для пробоя вспомогательные источники высокого напряжения.

Одним из них является генератор импульсных напряжений ГИН, подключенный к промежутку в жидкости (рис. 54.22, а). Рабочее напряжение ГИН и его емкость выбираются из условия обеспечения электрического пробоя промежутка  $\Pi$  в воде с заданной удельной проводимостью и при известных размерах электродной системы. Схема рис. 54.22, а используется при сравнительно больших индуктивностях разрядных цепей, а также в случае использования управляемого (чаще всего многоазорного) разрядника  $P$ , выдерживающего номинальное напряжение ГИН и срабатывающего от пускового импульса, поступающего с некоторым запаздыванием после срабатывания ГИН.

В некоторых случаях может оказаться достаточным для срабатывания установки обеспечение незавершенного (частичного) пробоя промежутка в воде под действием ГИН.

Особенностью электрогидравлической ус-

Рис. 54.22. Схемы для пробоев промежутков  $\Pi$  в технологических блоках ТБ



тановки с описанным способом пробоя промежутка в технологическом блоке является выполнение изоляции электрода и соединительных проводов, идущих от накопителя энергии, на напряжение, превышающее номинальное напряжение ГИН. В некоторых случаях в таких схемах в разрядную цепь накопителя включают дополнительную развязывающую индуктивность.

На рис. 54.22, б приведена схема с включением последовательно в разрядную цепь накопителя импульсного трансформатора ИТ, создающего необходимое для пробоя промежутка П напряжение и затем пропускающего по вторичной обмотке ток разряда накопителя энергии. Такой трансформатор обычно питается от малоиндуктивного конденсатора С<sub>1</sub>, заряжаемого от вспомогательного выпрямителя.

Недостатком такого способа пробоя является внесение в разрядную цепь дополнительной индуктивности. В целях снижения этой индуктивности применяют кабельные ИТ с малыми индуктивностями рассеяния, а также трансформаторы с магнитопроводами, насыщающимися при протекании по вторичной обмотке тока разряда накопителя.

В некоторых установках проблема инициирования разряда решается по-иному, например введением в промежуток струи электролита, в которой легче происходит пробой, или созданием продольного магнитного поля, оказывающего влияние на процесс пробоя при сравнительно небольших рабочих напряжениях установки.

В схемах рис. 54.22, а, б в разрядный контур входит управляемый или неуправляемый разрядник Р. Наличие разрядника необходимо для обеспечения заряда емкостного накопителя С от выпрямителя высокого напряжения со сравнительно небольшим зарядным током. Наличие разрядника приводит к дополнительным потерям энергии в нем, повышенному шуму при работе установки и к ограничению частоты повторения разрядов. Введение в установку мощного зарядного устройства в виде индуктивного накопителя энергии (рис. 54.22, в) позволяет устранить эти недостатки.

Индуктивность L заряжается через управляемый тиристорный коммутатор ТК от источника постоянного напряжения ИП, например от сети 220–380 В с выпрямителем. После накопления в магнитном поле катушки L требуемой энергии тиристорный коммутатор ТК выключается и переключает ток индуктивности I<sub>L</sub> в параллельно соединенные промежуток П и конденсатор С. До возникновения разрядных процессов промежуток обладает активным сопротивлением, приблизительно

но равным

$$R \approx 1/2 \sigma \sqrt{\pi S},$$

а напряжение на промежутке можно записать в виде

$$U = U_{max} \sin \omega t.$$

Выбор индуктивности L и зарядного тока I<sub>L</sub> должен производиться так, чтобы пробой промежутка П завершился в момент, близкий к моменту максимума напряжения U<sub>max</sub>. При этом U<sub>max</sub> ≈ U<sub>np</sub> и

$$\frac{\pi}{2\omega} \approx t_{np} = \frac{3c\beta r^2}{2\alpha\sigma U_{np}^2} \left( \frac{U_{np}^2}{U_0^2} - 1 \right).$$

Соответствующее значение индуктивности определяется из выражения

$$L = \frac{4t_{np}^2}{\pi^2 C} \left( 1 + \frac{L}{2R^2 C \left( 1 + \frac{L}{4R^2 C} \right)^2} \right).$$

При  $\gamma' = 2R\sqrt{C/L} > 1$

$$I_L = \frac{U_{np} \sqrt{\gamma'^2 - 1}}{2R \operatorname{sinarctg} \sqrt{\gamma'^2 - 1}} \exp \left( \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\gamma'^2 - 1}}{\sqrt{\gamma'^2 - 1}} \right),$$

а при  $\gamma' < 1$

$$I_L = \frac{U_{np} \gamma'}{2R} \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \gamma'^2}}{1 + \sqrt{1 - \gamma'^2}} \right).$$

При использовании электрического разряда для обработки деталей с большой поверхностью целесообразно использовать не один, а несколько искровых промежутков в жидкости. В этом случае применяются многоконтурные установки, в которых на каждый промежуток разряжается отдельный накопитель энергии.

На рис. 54.23, а приведена схема генератора, в котором накопители С<sub>1</sub>–С<sub>3</sub> заряжаются от общего источника через развязывающие резисторы R<sub>1</sub>–R<sub>3</sub>, а разряжаются на промежутки П<sub>1</sub>–П<sub>3</sub> через индивидуальные управляемые разрядники P<sub>1</sub>–P<sub>3</sub>. В общем случае каждый накопитель может содержать собствен-

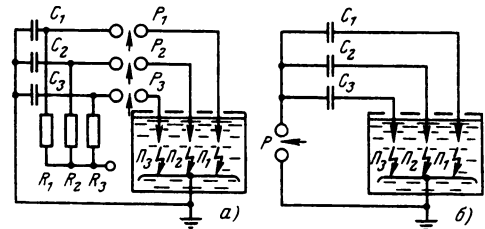


Рис. 54.23. Многоконтурные схемы с индивидуальными разрядниками (а) и с общим разрядником Р (б)

ный выпрямитель с регулируемым зарядным напряжением. Устанавливая требуемые моменты подачи пусковых импульсов разрядников, можно обеспечить необходимые последовательность возникновения разрядов в технологических блоках и временные интервалы между ними.

Поскольку электроды промежутков  $\Pi_1 - \Pi_3$  могут располагаться недалеко друг от друга, возможно их взаимное влияние в стадии пробоя и вынос потенциала на электроды разрядников при срабатывании одного или нескольких из них. Это приводит к необходимости использования в установке разрядни-

Таблица 54.9. Основные данные электрогидравлических установок для очистки литья

Показатель	Модель 67511	Модель 36313	«Искра-15»	«Искра-30»
Размеры обрабатываемой детали, мм	250 × 250 × 500	1000 × 800 × 400	3150 × 2500 × 1250	3200 × 2000 × 1250
Масса, кг, не более	25	315	2500	10 000
Установленная мощность, кВ · А	50	60	120	150
Накапливаемая энергия, кДж	5	15	5	10
Емкость, мкФ	4	12	4	8
Количество разрядных контуров	2	6	6–8	2
Габаритные размеры, м	8,03 × 3,96 × 1,7	14 × 10 × 7,5	12,2 × 8,5 × 7,95	18 × 6 × 4
Масса, кг	9700	35 000	65 000	52 500

Продолжение табл. 54.9

Показатель	Модель 36215	«Искра-18»	Модель 36121А	Модель 36131А	Модель 36141А
Размеры обрабатываемой детали, мм	5000 × 3200 × 2000	7500 × 3400 × 2500	1800 × 1000 × 700	3500 × 2000 × 1000	5600 × 3000 × 2000
Масса, кг, не более	25 000	30 000	2500	8000	25 000
Установленная мощность, кВ · А	280	262	75	210	212
Накапливаемая энергия, кДж	20	10	5	10	10
Емкость, мкФ	16	8	4	8	8
Количество разрядных контуров	2	2	1	1	1
Габаритные размеры, м	26 × 10 × 5	39 × 10 × 5	6,6 × 4,35 × 2,4	16 × 8,8 × 4,5	19 × 9,6 × 5
Масса, кг	65 000	77 000	11 000	30 000	46 000

Примечания: 1. Рабочее напряжение всех установок 50 кВ.

2. Разряд инициируется пробоем промежутков.

3. Модели 36313 и «Искра-15» — конвейерные, модели 36121А, 36131А, 36141А — тупиковые.

Таблица 54.10. Основные данные электрогидравлических прессов

Показатель	«Удар-1»	«Удар-12М»	«Удар-20С»	«Удар-11»	«Удар-17»	«Удар-16К»	ПЭГ-100М
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	12,5	10	20	150	80	80	100
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	10	50	50	50	50
Наибольшие размеры заготовки, мм:							
при вытяжке:							
длина	2500	400	500	2000	2400	—	1550
ширина	1200	400	500	2000	1400	—	1150
при формовке:							
диаметр	—	300	500	—	—	600	—
высота	—	275	700	—	—	1000	—
Масса установки, кг	50 000	3350	6600	94 000	60 000	46 300	32 000

Таблица 54.11. Основные данные серийно выпускаемых электрогидравлических установок для закрепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов

Показатель	ТО223	ТО226
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	20	40
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	50	50
Размеры трубы, мм:		
диаметр	8—35	8—40
толщина стенки	До 2,5	До 3,5
Толщина трубной решетки, мм	20—120	20—220
Масса установки, кг	7000	8000

Таблица 54.12. Основные данные серийно выпускаемых электрогидравлических прессов

Показатель	«Удар-21»				
	T1220	T1223		T1229	T1232
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	10	20	40	80	160
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	10	50	50
Наибольшие размеры заготовок, мм:					
плоских:					
длина	400	650	—	1400	2000
ширина	400	650	—	1400	2000
пространственных:					
диаметр	250	450	250	—	1500
высота	275	450	300	—	1200
Масса установки, кг	3355	8000	10000	50000	80000

ков, надежно управляемых при изменении приложенного к ним напряжения в широком диапазоне.

Несколько меньшими технологическими возможностями обладает многоконтурная схема, приведенная на рис. 54.23, б. В ней используется один разрядник  $P$ , включенный в общий для всех контуров провод. При такой схеме исключается возможность регулирования интервала времени между разрядами в промежутках  $P_1 - P_3$ , поскольку напряжение на них подается одновременно. Заряд конденсаторов  $C_1 - C_3$  производится до одного и того же напряжения от выпрямителя через рабочие промежутки в технологическом блоке. Оба вывода конденсаторов должны быть изолированы на рабочее напряжение.

Несмотря на отмеченные недостатки схема рис. 54.23, б чаще всего используется в многоконтурных установках вследствие про-

сты выполнения коммутирующего разрядника  $P$ .

В табл. 54.9—54.12 приводятся основные параметры некоторых электрогидравлических установок, серийно выпускаемых отечественной промышленностью.

#### 54.4. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

##### Импульсные электродинамические силы и их использование

Если в проводнике протекает ток с объемной плотностью  $I$ , то при наличии собственного или внешнего магнитного поля с индукцией  $B$  на единицу объема материала проводника действует сила

$$F = IB.$$

Эта сила перпендикулярна направлениям  $I$  и  $B$ , и ее направление может быть определено по правилу «левой руки».

Для участков замкнутого контура, находящихся в собственном магнитном поле, направление электродинамических сил совпадает с направлением деформации контура, при которой максимально увеличивается его индуктивность.

Электродинамическую силу, действующую на проводник в направлении  $x$ , можно выразить через ток  $i$  и индуктивность  $L$  цепи:

$$F = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial x}.$$

На уединенный проводник с током действуют электродинамические силы, стремящиеся сжать проводник.

В импульсных режимах кратковременно удается достигать высокой плотности тока в металлах без их термического разрушения.

При отсутствии теплообмена с окружающей средой из баланса энергии можно записать

$$A_I = \int_0^t J^2 dt = \frac{c\beta}{\alpha\rho_0} \ln \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1},$$

где  $t$  — время протекания тока;  $c$  и  $\beta$  — удельные теплоемкость и плотность материала;  $\rho_0$  — удельное сопротивление материала при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $T_1$  и  $T_2$  — начальная и конечная температуры проводника,  $^\circ\text{C}$ .

Связь между температурой  $T_2$ , теплофизическими константами материала и интегралом плотности тока  $A_I$  устанавливается следующим

уравнением:

$$T_2 - T_1 \approx \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left( \frac{\alpha \rho_0 A_I}{c\beta} \right) - 1 \right].$$

При малых перегревах

$$T_2 - T_1 \approx \frac{\rho_0 A_I}{c\beta}.$$

Из приведенных выражений при известном законе изменения плотности тока во времени устанавливается связь между временем протекания тока и нагревом с учетом теплофизических констант материала. При использовании в качестве источника тока конденсатора  $C$ , заряженного до напряжения  $U$ ,

$$A_I = CU^2/2RQ^2,$$

где  $R$  — активное сопротивление цепи разряда;  $Q$  — сечение проводника.

При временах порядка  $10^{-6}$  с через металлы можно пропускать токи с плотностью порядка  $10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, причем температура проводника может не превышать температуры плавления или температуры, при которой теряются прочностные свойства материала.

Индукции магнитного поля, реализуемые в импульсных режимах без разрушения катушки (индуктора), обтекаемой током, достигают приблизительно 80 Тл, а при использовании разрушающихся индукторов разового применения — до 200 Тл. Эти значения намного превышают индукции насыщения ферромагнитных материалов, поэтому последние не используются в технике сильных магнитных полей.

Высокие плотности тока и индукции магнитного поля, реализуемые сравнительно просто путем разряда конденсаторов, позволяют получать большие электродинамические силы, превышающие предел прочности большинства конструкционных материалов.

Импульсные электродинамические силы используются для ускорения проводников в импульсном электроприводе и для деформации различных заготовок. Последнее направление, бурно развивающееся в настоящее время, обычно называют магнитной штамповкой или магнитно-импульсной обработкой материалов.

Деформация или ускорение проводников осуществляется в импульсном магнитном поле либо при пропускании через проводник тока от генератора, либо при протекании по проводнику тока, индуцированного рядом расположенным индуктором. В последнем случае суммарные электродинамические силы, действующие на проводник, выражаются через

давление магнитного поля

$$P = \frac{B_1^2 - B_2^2}{2\mu_0},$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — индукции магнитного поля у поверхности обрабатываемой заготовки со стороны индуктора и за заготовкой;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Если поле не проникает за заготовку, то  $B_2 = 0$  и давление максимально.

Важную роль при магнитно-импульсной обработке играют поверхностный эффект и эффект близости. От проявления поверхностного эффекта зависят глубина проникновения электромагнитного поля в заготовку, распределение электродинамических сил по толщине заготовки, проникновение поля за заготовку. Этот эффект используется, например, в некоторых установках для создания притягивающих усилий. Подбирая параметры установки так, чтобы поле проникало за заготовку, и осуществляя быструю компенсацию магнитного поля в пространстве между индуктором и заготовкой, получают усилия, действующие на заготовку в направлении к индуктору.

Эффект близости влияет на распределение тока по сечению заготовки и виткам индуктора, вытесняя ток в направлении, противоположном направлению электродинамических сил.

При магнитно-импульсной обработке достигаются скорости перемещения заготовки до нескольких сотен метров в секунду, что открывает широкие технологические возможности этого способа при штамповке труднообрабатываемых обычными способами материалов, импульсной сварке и т. д.

Отсутствие инерционной среды, через которую обычно передается давление на обрабатываемую деталь, а также распределение электродинамических сил по объему заготовки, возможность осуществления технологических операций в контролируемой газовой среде или в вакууме через изоляционные стенки — уникальные особенности магнитно-импульсной обработки.

К преимуществам магнитной штамповки относятся также возможность точного регулирования электродинамических сил путем изменения электрических параметров установки, простота технологической оснастки, возможность полной автоматизации изготовления деталей и т. д.

#### Разрядные цепи установок

На рис. 54.24 приведены наиболее типичные схемы разрядных контуров установок для магнитно-импульсной обработки материалов.



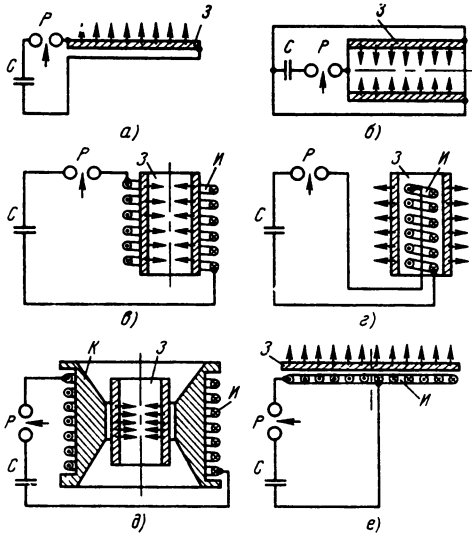


Рис. 54.24. Разновидности магнитно-импульсной обработки

Наиболее простые из них — первые две, в которых обрабатываемая заготовка  $Z$  включается последовательно в цепь разряда, состоящую из заряженного конденсатора  $C$  и разрядника  $P$ . В установке, схема которой показана на рис. 54.24,  $a$ , электродинамические силы создаются за счет взаимодействия тока в  $Z$  с магнитным полем, созданным током в обратном проводе, проложенном в непосредственной близости от  $Z$ . Заготовка или отдельные ее участки движутся в направлении действия электродинамических сил, показанных стрелками. В зависимости от задачи обработки за  $Z$  размещается матрица той или иной формы. Аналогично осуществляются и другие операции магнитно-импульсной обработки. В этом случае вместо  $Z$  включается подвижная мембрана, передающая импульсное давление на предмет обработки или в упругую среду.

Операции обжима заготовок из проводящего материала (формообразование, сборка, прессование материалов внутри заготовки и т. д.) наиболее просто осуществляются на установках, схема которых соответствует показанной на рис. 54.24,  $b$ . Обратный токопровод выполняется обычно в виде трубки и вместе с  $Z$  образует коаксиальную малоиндуктивную систему. Основным недостатком этого способа обработки являются трудности получения требуемых больших разрядов тока, что связано со сложностями конструктивного выполнения источника тока, и обеспечения контакта токопроводящих проводников с заготовкой.

В установках с индукторами  $I$  (рис. 54.24,  $e$ ) в значительной степени облегчается решение этих проблем. Так, многovitковый  $I$  вместе с  $Z$  образует понижающий трансформатор, и суммарный ток, протекающий по  $Z$ , может во много раз превышать ток первичной цепи.

С помощью  $I$  осуществляются операции обжима и раздачи (формообразование, сборка, вырубка отверстий, сварка и т. д.) в соответствии со схемами рис. 54.24,  $e-e$  (последняя служит для обработки плоских заготовок). При обработке заготовок с малыми размерами используют концентраторы  $K$  магнитного потока (рис. 54.24,  $d$ ), представляющие собой массивные детали сложной формы из хорошо проводящего и механически прочного материала. Концентратор имеет не показанную на рис. 54.24,  $d$  узкую аксиальную щель и представляет собой незамкнутый виток. Вместе с многovitковым намотанным на него индуктором концентратор образует понижающий трансформатор, а вместе с заготовкой — трансформатор с коэффициентом трансформации, близким к единице. Металл стенок щели концентратора выполняет функции проводов, соединяющих оба трансформатора.

Электрические схемы замещения разрядных контуров различных установок, используемые для расчетов переходных процессов, приведены на рис. 54.25. В них входят внутренняя индуктивность и активное сопротивление установок  $L_y$  и  $R_y$ , индуктивности и активные сопротивления заготовок  $L_z$  и  $R_z$ . При использовании индукторов необходимо учитывать их индуктивности  $L_n$  и активные сопротивления  $R_n$ , а также взаимную индуктивность  $M_{n,z}$  (рис. 54.24,  $b$ ). Наиболее сложной является схема замещения разрядной цепи с концентратором (рис. 54.24,  $e$ ). В нее кроме упомянутых элементов входят взаимные индуктивности индуктор — концентратор  $M_{n,k}$  и кон-

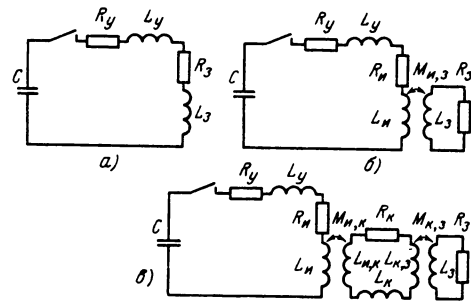


Рис. 54.25. Схемы замещения разрядных цепей установок с пропусканием тока через заготовку (а) с индуктором (б) и концентратором (e)

центратор – заготовка  $M_{к,з}$ , а также активное сопротивление концентратора  $R_k$ , индуктивности участков концентратора, граничащих с обмоткой  $L_{и,к}$  с заготовкой  $L_{к,з}$  и в щели  $L_k$ .

Все эти схемы приводятся к одной, состоящей из последовательно соединенных конденсатора  $C$ , заряженного до напряжения  $U$ , суммарных индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ .

Для установок с пропусканием тока по заготовке

$$R = R_y + R_3, \quad L = L_y + L_3;$$

с использованием индуктора

$$R = R_y + R_{и} + R_3 L' / L_3,$$

$$L = L_y + L_{и} - L'$$

и с применением концентратора

$$R = R_y + R_{и} + \frac{\omega^2 M_{и,к}^2 (R_k + R_3 L' / L_3)}{(R_k + R_3 L' / L_3)^2 + \omega^2 (L_{и,к} + L_k + L_{к,з} - L')^2},$$

$$L = L_y + L_{и} - \frac{\omega^2 M_{и,к}^2 (L_{и,к} + L_k + L_{к,з} - L')}{(R_k + R_3 L' / L_3)^2 + \omega^2 (L_{и,к} + L_k + L_{к,з} - L')^2},$$

где  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  – угловая частота разрядного тока;  $L' = \frac{M_{и,з}^2}{L_3 (1 + R_3^2 / \omega^2 L_3^2)}$ ;  $L'' = \frac{M_{к,з}^2}{L_3 (1 + R_3^2 / \omega^2 L_3^2)}$ .

#### Расчет параметров магнитно-импульсных установок

Разрядный ток в магнитно-импульсных установках имеет колебательный характер. Нелинейности элементов  $R$  и  $L$  обычно слабо сказываются на форме тока, поэтому он может быть найден из решения переходного процесса для линейной цепи:

$$i = \frac{U}{\omega L \sqrt{1 - R^2 C / 4L}} e^{-Rt/2L} \sin(\omega \sqrt{1 - R^2 C / 4L} t).$$

Электродинамические силы в простейших случаях (например, для установок, показанных на рис. 54.24, а, б и имеющих схему замещения, приведенную на рис. 54.25, а) находятся по уравнению

$$F = \frac{U^2 C}{2L(1 - R^2 C / 4L)} e^{-Rt/L} \sin^2(\omega \sqrt{1 - R^2 C / 4L} t) \frac{\partial L}{\partial x}.$$

Аналогично можно рассчитать электродинамические силы, действующие на заготовку, при использовании индукторов или концентраторов. Для этого необходимо определить ток в заготовке, что нетрудно сделать при задан-

ном токе разряда  $i$  и известных параметрах схем рис. 54.25, б, в.

Другой подход к определению электродинамических сил заключается в расчете энергии магнитного поля, сосредоточенного в пространстве между индуктором (или концентратором) и заготовкой. Для этого рассчитывается величина

$$W = (L_{и} - L') i^2 / 2,$$

а в случае применения концентратора

$$W = (L_{к,з} - L') i_k^2 / 2,$$

где  $i_k$  – ток в концентраторе.

Давление магнитного поля на заготовку

$$p = W / S \Delta_{эжв},$$

где  $S$  – обрабатываемая площадь заготовки;  $\Delta_{эжв}$  – эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой, равный сумме геометрического зазора  $\Delta_r$ , половины глубины проникновения поля в заготовку и половины глубины проникновения в материал индуктора:

$$\Delta_{эжв} = \Delta_r + \sqrt{(\rho_3 + \rho_{и}) / 2\omega\mu_0}.$$

Здесь  $\rho_3$  и  $\rho_{и}$  – удельные сопротивления материалов заготовки и индуктора.

При заданном материале заготовки, ее толщине  $\delta$  и обрабатываемой поверхности  $S$  расчет процесса обработки начинается с выбора собственной частоты процесса разряда.

Частота не должна быть очень высокой, так как при этом будет нагружаться только поверхностный слой заготовки и трудно обеспечить эффективное использование накопленной в конденсаторе  $C$  энергии из-за конечного значения  $L_y$ . Эффективность обработки падает и при чрезмерно низкой частоте вследствие просачивания поля за заготовку. Чтобы удовлетворить эти противоречивые требования, частота должна лежать в пределах

$$1/\sqrt{10L_y C} \geq \omega \geq 2\rho_3 / \mu_0 \delta^2.$$

Затем определяются требуемый максимальный ток разряда

$$I_m = U \sqrt{C/L} \exp\left(\frac{-R/2\sqrt{L/C}}{\sqrt{1 - R^2 C / 4L}}\right) \times$$

$$\times \arcsin \sqrt{1 - R^2 C / 4L} = \omega \sqrt{2C \Delta_{эжв} P S}$$

и индуктивность системы индуктор – заготовка

$$L_{и} - L' = 1/\omega^2 C,$$

которую необходимо обеспечить выбором конструктивных размеров и числа витков индуктора.

Значения  $R_3$  рассчитываются с использованием глубины проникновения электромагнитного поля:

$$\Delta = \sqrt{2\rho_3/\mu_0\omega},$$

а при расчетах  $L_3$  и  $M_{и,3}$  индуктор и заготовка замещаются тонкими плоскими катушками с расстоянием между ними  $\Delta_{эжв}$ .

Аналогично рассчитываются параметры и в случае применения концентратора магнитного потока.

#### Элементы установок для магнитно-импульсной обработки

Генераторами импульсных токов в магнитно-импульсных установках являются малоиндуктивные емкостные накопители энергии. Зарядное напряжение накопителей обычно составляет 5–20 кВ.

Накопители комплектуются из импульсных конденсаторов. В установках с большой накапливаемой энергией конденсаторы объединяются в блоки, имеющие собственные коммутаторы разрядного тока. Блочный принцип построения накопителя позволяет достичь малых значений индуктивностей и активных сопротивлений разрядной цепи  $L_y$  и  $R_y$ , избе-

жать опасности взрыва конденсаторов в случае их повреждения в процессе зарядки. Внутренняя индуктивность разрядной цепи установки может быть сведена до  $10^{-8}$  Гн.

В установках используют импульсные конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией с пропиткой конденсаторным либо касторовым маслом или соволом (см. § 21.2). При небольшом числе параллельно соединенных конденсаторов для достижения высокой частоты разрядного тока выбирают конденсаторы с малой внутренней индуктивностью.

Конденсаторы в установках или в пределах блока объединяются параллельно малоиндуктивной ошиновкой. Применяют два типа ошиновки: кабельную и плоскую, выполняемую широкими шинами, накладываемыми непосредственно на выводы конденсаторов.

В качестве коммутаторов разрядного тока используют воздушные или вакуумные разрядники и игнитроны. В простейших установках применяют механические коммутаторы — двухэлектродные разрядники, срабатывающие при сближении электродов. Если требуется точно синхронизировать разряд с работой остального, например измерительного, оборудования или обеспечить одновременную работу отдельных разрядников, используют

Таблица 54.13. Основные данные установок для магнитно-импульсной обработки металлов

Тип установки	Запасаемая энергия, кДж	Номинальное напряжение, кВ	Собственная частота разрядного контура, кГц	Производительность, операций в час	Тип конденсатора	Тип коммутатора	Количество коммутаторов	Масса, кг	Размеры в плане с учетом обслуживания, м <sup>2</sup>
МИУ-3,5	3,5	5	—	250	ИМУ-5-140	Тригatron	1	320	2,0 × 1,5
МИУ-0506/1	5	6	30	600	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-1	2	300	1,2 × 1,0
МИУ-6	6	6	20	360	МИОМ-4	Механический	1	800	1,2 × 1,0
ИУ-20/ПН	10	10	20	80	КИМ-17	Тригatron	1	1600	3,0 × 3,0
МИУА-10/5	10	5,2	24	600	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-2	1	1600	3,5 × 3,5
МИУ-20/1	20	20	50	360	КИМ-6м	Тригatron	1	2400	3,0 × 3,0
МИУ-20/5	20	20	50	360	КИМ-17	»	1	1500	2,0 × 3,0
ИУ-20/4ПР	20	20	60	360	КИМ-17	»	1	1550	2,0 × 3,0
МИУА-20/5	20	5,2	—	420	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-2	1	2310	3,5 × 3,5
МИУ-30	30	20	50	200	КИМ-17	Тригatron	1	2000	4,0 × 3,0
МИУА-40/10	40	9,5	—	360	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-2	2	4200	5,0 × 5,0
МИУА-80/10	80	9,5	—	240	ИК-6-150	То же	4	6215	7,3 × 5,0
МИУ-100	100	20	30	60	КИМ-17	Тригatron	10	5500	10 × 2,3

Примечание. Установка типа ИУ-20/4ПР предназначена для сварки труб, а ИУ-20/ПН — для обработки металлов с предварительным нагревом.

управляемые разрядники — тригатроны или игнитроны.

Накопитель заряжается от источника высокого постоянного напряжения, включающего в себя повышающий трансформатор, выпрямитель, защитные резисторы и устройства для регулирования зарядного напряжения и его измерения. Необходимым элементом установки является заземляющее устройство, разряжающее конденсаторы через резистор с малым сопротивлением и закорачивающее выводы конденсаторов после окончания работы. Зарядное устройство и накопитель энергии размещаются, как правило, в металлическом заземленном корпусе, дверцы которого снабжаются блокировкой.

Разрядный контур соединяется с заземленным корпусом установки в одной точке — обычно в месте присоединения индуктора.

Ответственным элементом установки является индуктор или концентратор. Он рассчитывается и изготавливается для каждого типа заготовки или технологической операции и заменяется при переходе на обработку другой детали. Индуктор при разрядах подвергается воздействию таких же электродинамических сил, что заготовка. Кроме того, его изоляция испытывает электрические нагрузки. Поэтому обеспечение термической, механической и электрической стойкости индуктора является сложной технической задачей. Накопленный опыт разработки индукторов и конденсаторов отражен в [54.27].

В табл. 54.13 приводятся основные параметры некоторых установок для магнитно-импульсной обработки, выпускаемых в СССР.

## 54.5. ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ (АЭРОЗОЛЬНАЯ) ТЕХНОЛОГИЯ

### Общие положения

Под электронно-ионной (аэрозольной) технологией понимается воздействие электрических полей на заряженные частицы материалов, взвешенные в газообразной или жидкой среде, в целях придания им упорядоченного движения, необходимого для осуществления определенных технологических процессов. Такими процессами являются электрогазоочистка, нанесение порошковых покрытий в электрическом поле, электросепарация, электропечать и т. д.

Во всех случаях частицам жидкости или твердого вещества сообщается некоторый заряд. Электрическое поле, действуя на заряженные частицы материалов, организует их

движение в определенном направлении. Так, в газоочистке частицы осаждаются на электродах и таким образом удаляются из газа; при электроокраске или нанесении порошковых покрытий частицы равномерно покрывают изделие; при электросепарации частицы, различающиеся физическими свойствами, собираются в различных приемных устройствах.

Характерными особенностями данного вида технологии являются: 1) универсальность метода: частицы любых материалов, как проводящих, так и изоляционных, могут быть заряжены и в заряженном состоянии могут быть подвергнуты воздействию электрического поля; 2) использование материалов в диспергированном, т. е. мелко раздробленном состоянии, в связи с чем имеется возможность прецизионного управления и организации непрерывного процесса; 3) разнообразие использования форм силового воздействия электрического поля на материалы.

В процессах электронно-ионной (аэрозольной) технологии основную роль играют три стадии: 1) зарядка частиц материала; 2) организация необходимых форм движения материалов в электрическом поле; 3) формирование готового продукта, которое часто происходит на электродах или в приэлектродной области.

Особую роль в электронно-ионной технологии играет коронный разряд, позволяющий объединить стадии зарядки и управления движением частиц. Обычно используется коронный разряд при отрицательной полярности напряжения, поскольку в этом случае обеспечиваются наибольшие значения пробивного напряжения. Чаще всего применяются системы электродов, показанные на рис. 54.26.

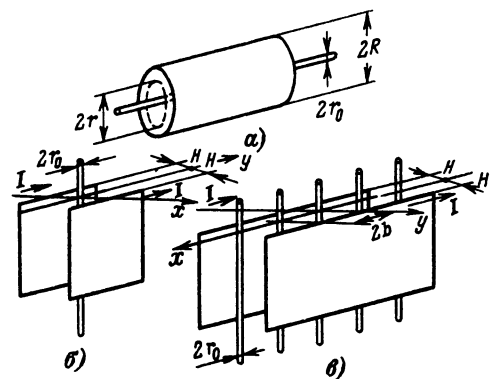


Рис. 54.26. Системы электродов: а — коаксиальные цилиндры; б — провод между плоскостями; в — ряд проводов между плоскостями

Распределение напряженности поля в промежутке между коаксиальными цилиндрами

$$E_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right] + \left( E_0 \frac{r_0}{r} \right)^2},$$

где  $k$  – подвижность ионов [для отрицательных ионов воздуха в среднем можно принять  $k = 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ];  $I$  – ток коронного разряда на единицу длины провода;  $E_0$  – начальная напряженность.

В условиях развитой короны при  $r \gg r_0$  формула для напряженности упрощается:

$$E_r = \sqrt{I/2\pi\epsilon_0 k}.$$

Распределение напряженности поля коронного разряда для систем с цилиндрическими проводами рассчитывается по методу Дейча – Попкова [54.29, 54.30].

Для системы «провод между плоскостями» (сечение  $I-I$  на рис. 54.26)

$$E_y = \frac{D}{\sin \frac{\pi y}{2H}} \sqrt{2 \sin^2 \frac{\pi y}{4H} + \frac{B}{H^2}};$$

для системы «ряд проводов между плоскостями» (сечение  $I-I$ )

$$E_y = D \operatorname{ctg} \frac{\pi y}{2b} \sqrt{\ln \operatorname{ch} \frac{\pi y}{2b} + \frac{B}{b^2}},$$

где  $J_r = I/2\pi r_0$  – средняя плотность тока на поверхности коронирующего провода;  $B = \pi^2 \epsilon_0 k E_0^2 r_0 / (8J_r)$ ;  $D = \sqrt{2J_r r_0 / (k\epsilon_0)}$ . Ток коронного разряда определяется из уравнения вольт-амперной характеристики для соответствующей системы электродов [54.30].

### Зарядка и движение частиц

Зарядка частиц осуществляется: 1) путем осаждения на поверхность частицы ионов из объема газа, окружающего частицу; 2) путем электростатической индукции, которая происходит в результате разделения зарядов при контакте частицы с электродом, находящимся под потенциалом; 3) путем механической, химической и тепловой электризации.

Зарядка частиц путем осаждения ионов на их поверхность наиболее часто используется в аппаратах электронно-ионной технологии. Это объясняется относительной простотой осуществления этого метода и большим зарядом, приобретаемым частицами. Частицу достаточно поместить во внешнюю область коронного разряда, т. е. в ту область разрядного промежутка, где имеется объемный униполярный заряд. Осаждение ионов на поверх-

ность частицы происходит под действием внешнего электрического поля, поля поляризации частицы и сил зеркального отображения, а для частиц менее 1,0 мкм – в результате диффузии ионов к поверхности частицы. Препятствует движению к поверхности частицы сила отталкивания между ионами, находящимися на частице, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Очевидно, зарядка частицы прекращается в тот момент, когда отталкивающая сила становится равной сумме всех притягивающих. При этом достигается максимальный или, как его называют, предельный заряд.

Для частиц размером более 2 мкм влиянием процессов диффузии можно пренебречь и предельный заряд определяется по формуле Потенье:

$$q_m = 4\pi\epsilon_0 k_t a^2 E,$$

где  $a$  – радиус частицы;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $k_t = 1 + 2(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2)$  ( $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость).

Для проводящей частицы  $\epsilon_r \rightarrow \infty$  и

$$q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E.$$

Динамика процесса зарядки описывается соотношением

$$q_t = q_m t / [t + 4\epsilon_0 (en_0 k)],$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_0$  – концентрация ионов во внешней области коронного разряда.

При характерной концентрации ионов  $10^8 \text{ см}^{-3}$  за 0,01 с частица приобретает 45% предельного заряда, за 0,1 с – 90%. Для частиц размерами менее 0,2–0,5 мкм зарядка определяется процессом диффузии и описывается уравнением

$$en_0 k t = \epsilon_0 \left[ \operatorname{Ei} \left( \frac{k}{D} \frac{q_t}{4\pi\epsilon_0 a} \right) - 0,5772 - \ln \left( \frac{k}{D} \frac{q_t}{4\pi\epsilon_0 a} \right) \right],$$

где  $\operatorname{Ei}(x)$  – интегральная показательная функция;  $D$  – коэффициент диффузии.

В промежуточной области (0,2–2 мкм) с достаточной для практики точностью заряд частиц можно вычислить как сумму зарядов, рассчитанных по формуле Потенье и по диффузионному заряду.

Заряды сферических частиц, находящихся на электроде в электрическом поле, рассчитываются по формуле

$$q = \frac{2\pi^3}{3} E a^2.$$

К этому предельному значению стремятся заряды частиц, оторвавшихся под действием электрических сил от поверхности электрода. Реальные значения заряда обычно существенно ниже предельного из-за влияния контактного сопротивления и стекания заряда при отрыве частицы.

Варианты конструкции устройств для зарядки частиц путем их контакта с электродом представлены на рис. 54.27. Частицы могут заряжаться, скатываясь из бункера по наклонной плоскости (рис. 54.27, а) или соприкасаясь с металлической сеткой (рис. 54.27, б). Особое значение данный способ зарядки имеет для жидких материалов, например при электрокраске. Это обусловлено тем, что жидкость нужно не только зарядить, но и распылить. В отношении порошковых материалов следует отметить, что для проводящих частиц метод электростатической индукции позволяет получить большие значения заряда на единицу массы порошка, чем в поле коронного разряда, а для диэлектрических — наоборот.

Механическая, химическая или тепловая электризация происходит при взаимном трении или разрыве контакта разнородных материалов, в результате некоторых химических реакций, при нагревании и охлаждении. В электронно-ионной технологии эти виды зарядки играют в основном роль сопутствующих явлений, с которыми, однако, нельзя не считаться. В электросепарации различия в электризации при трении и нагревании используются для разделения материалов по физическим свойствам.

Движение частиц, находящихся в воздушной среде и в электрическом поле, происходит под действием следующих сил:

1) тяжести

$$F_g = mg;$$

2) силы, обусловленной действием электри-

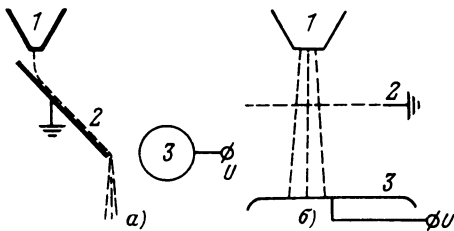


Рис. 54.27. Устройства для контактной зарядки:

а 1 — бункер; 2 — наклонная плоскость; 3 — цилиндрический электрод; б: 1 — бункер; 2 — металлическая сетка; 3 — плоский электрод

ческого поля,

$$F_q = Eq;$$

3) силы, обусловленной неравномерным распределением напряженности электрического поля. Для сферической частицы

$$F_E = 2\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \text{grad } E^2;$$

4) силы сопротивления среды движению частицы. При обычных атмосферных условиях она оказывает существенное влияние на движение частиц и определяет установившуюся скорость.

Расчет силы сопротивления среды составляет одну из основных задач при анализе поведения частиц в аппаратах электронно-ионной технологии. В общем случае она может быть рассчитана по формуле

$$F_c = c_x \frac{\gamma_{cp} |v_q - v_{cp}|^2}{2} S,$$

где  $S$  — площадь миделева сечения, для сферической частицы  $S = \pi a^2$ ;  $\gamma_{cp}$  — плотность среды;  $c_x$  — коэффициент сопротивления;  $v_q$  — скорость движения частицы;  $v_{cp}$  — скорость движения среды.

Коэффициент сопротивления  $c_x$  является функцией числа Рейнольдса  $Re = |v_q - v_{cp}| a \gamma_{cp} / \mu$  ( $\mu$  — коэффициент вязкости среды) и определяется зависимостью, представленной на рис. 54.28. Можно пользоваться аппроксимацией в виде

$$c_x = \frac{24}{Re} (1 + 0,167 Re^{2/3}).$$

В инженерных расчетах целесообразно использовать линейную аппроксимацию силы сопротивления

$$F_c = 6\pi\mu a k_c (v_q - v_{cp}^*),$$

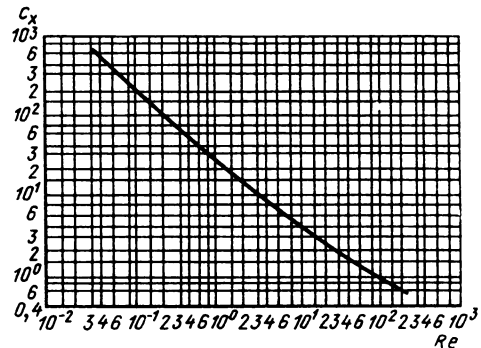


Рис. 54.28. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для сферических частиц

где  $k_c$  и  $v_4^*$  — параметры линейной аппроксимации в соответствующем диапазоне значений  $Re$ .

Частица, находящаяся в электрическом поле, под влиянием момента, обусловленного взаимодействием поля с поляризационными зарядами, стремится развернуться длинной осью вдоль направления действия поля. Электрические силы не являются единственным фактором, способствующим приобретению частицей определенной ориентации. Движущиеся частицы под действием гидродинамического момента стремятся повернуться таким образом, чтобы испытываемое ими сопротивление движению было наибольшим. Такое положение соответствует ориентации удлиненных частиц длинной осью перпендикулярно направлению движения. В зависимости от соотношения моментов частица может располагаться различным образом относительно направления действующих сил и направления движения. В частности, возможны случаи, когда частица в электрическом поле располагается длинной осью перпендикулярно направлению вектора напряженности электрического поля.

### Влияние концентрации частиц

Наличие большого числа частиц, принимающих участие в технологическом процессе, может изменить закономерности поведения одиночных частиц. При этом играют роль следующие факторы:

1) изменение закона движения частиц вследствие того, что возмущение среды, вносимое частицей, передается соседней при уменьшении расстояния между ними. Имея в виду, что эти возмущения распространяются на расстояние, примерно равное  $(20 \div 50) a$ , и то, что в технологических установках относительная объемная концентрация частиц не превосходит  $(0,1 \div 0,01) \%$ , можно сделать вывод, что указанным влиянием можно пренебречь;

2) изменение закона зарядки частиц. При движении в поле коронного разряда аэрозоля с достаточно высокой концентрацией частиц электрическое поле в промежутке перераспределяется и снижается плотность объемного заряда ионов. Первое влияет на предельный заряд частиц, размер которых превышает  $1 \text{ мкм}$ , а второе — на скорость зарядки и при ограниченном времени пребывания частиц в зарядном устройстве — на приобретенный ими заряд.

Влияние концентрации частиц проявляется различным образом в зависимости от направления движения аэрозоля по отношению к

направлению электрического поля. При движении частиц в основном вдоль силовых линий поля распределение напряженности и суммарной плотности объемного заряда (частиц и ионов) не меняется. Ток коронного разряда изменяется в соответствии с соотношением

$$I_k = I'_k - \left( \frac{k}{B} \right) N_i,$$

где  $I'_k$  — ток коронного разряда при отсутствии частиц;  $N_i$  — число частиц, поступающих в разрядный промежуток в единицу времени;  $B$  и  $k$  — соответственно подвижности частиц и ионов.

В случае движения аэрозоля перпендикулярно направлению электрического поля влияние концентраций определяется безразмерным параметром

$$D_k = k_e \xi S H,$$

где  $\xi = q/q_m$  — степень недозарядки частиц по отношению к предельному заряду;  $S$  — суммарная площадь поверхности частиц в единице объема газа;  $H$  — межэлектродное расстояние.

С увеличением параметра  $D_k$  концентрация ионов и ток коронного разряда уменьшаются. Условия, при которых ток коронного разряда спадает до нуля, соответствуют «запиранию» коронного разряда ( $D_k = D_{k,3}$ ). Влияние концентрации частиц на характеристики коронного разряда в системе электродов «ряд проводов между плоскостями» иллюстрируют рис. 54.29, 54.30.

Из анализа влияния заряженной дисперсной фазы на поле и ток коронного разряда следует, что если принять снижение тока на 30% и изменение напряженности поля на 10% допустимыми, то влиянием концентрации

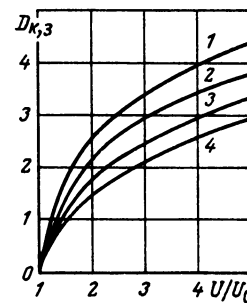
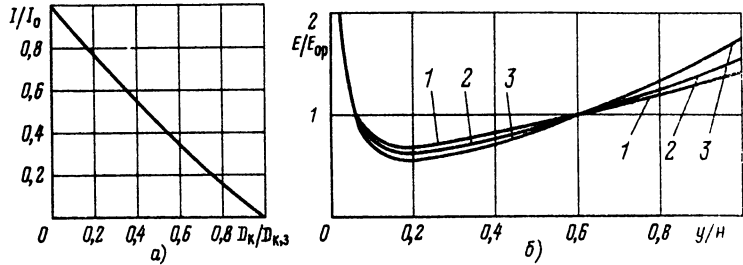


Рис. 54.29. Зависимость параметра  $D_{k,3}$  от приложенного напряжения  $U$  ( $U_0$  — начальное напряжение):

$$1 - \pi H/2b = 1,5, \pi r_0/2b = 10^{-3}; 2 - \pi H/2b = 4, \pi r_0/2b = 10^{-3}; 3 - \pi H/2b = 10, \pi r_0/2b = 10^{-3}; 4 - \pi H/2b = 10, \pi r_0/2b = 10^{-1}$$

Рис. 54.30. Влияние концентрации частиц на характеристики коронного разряда:

$a$  – степень уменьшения тока  $I$  ( $I_0$  – ток при отсутствии частиц);  $b$  – распределение напряженности при  $\pi H/2b = 4$ ,  $\pi r_0/2b = 0,02$ ,  $U/U_0 = 3$  ( $1 - D_k = 0$ ;  $2 - D_k = 0,4$ ;  $3 - D_k = 1,2$ )



в условиях развитой короны можно пренебречь при  $D_k < 0,5 \div 0,8$ ;

3) влияние процесса электростатического рассеяния, обусловленного кулоновскими силами отталкивания и играющего существенную роль даже при отсутствии внешнего поля при высокой концентрации униполярно заряженных частиц.

### Технические применения

**Электрофильтры.** Одним из наиболее совершенных способов очистки промышленных газов от пыли и жидких частиц является очистка в электрофильтрах. Электрофильтры оказывают малое гидравлическое сопротивление потоку газа, обеспечивают высокую степень очистки, пригодны для использования в самых различных условиях, в том числе при высокой температуре и для химически активных газов. Они применяются в цементной, химической, металлургической промышленности и на тепловых электростанциях. Электрофильтры бывают трубчатые и пластинчатые.

Трубчатые электрофильтры (рис. 54.31, *a*) – аппараты с вертикальным потоком газа. Подлежащие очистке газы проходят внутри трубчатых осадительных электродов, по оси которых располагаются коронирующие провода. В поле коронного разряда частицы заряжаются, под действием электрического поля движутся к осадительным электродам и осаждаются на них. Слой пыли удаляется периодическим встряхиванием электродов.

Пластинчатые электрофильтры (рис. 54.31, *б*) – аппараты, имеющие осадительные электроды в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Между пластинами размещены коронирующие электроды, укрепленные на рамах. В одном корпусе электрофильтра может быть расположено несколько независимых последовательно расположенных систем электродов или, как говорят в практике газоочистки, электрических полей. Разделение полей с независимым электрическим питанием и встряхиванием позволя-

ет обеспечить максимальное напряжение на каждой системе электродов в зависимости от местных условий.

Электрическое поле в пластинчатых электрофильтрах несколько слабее, чем в трубчатых, но их проще изготовлять и в них легче обеспечить встряхивание электродов.

Основной характеристикой работы электрофильтров является степень очистки газов. Она определяется содержанием пыли в газе до поступления в электрофильтр  $z_1$  и после выхода из него  $z_2$ :

$$\eta = (z_1 - z_2)/z_1 = 1 - z_2/z_1.$$

Связь степени очистки газов в электрофильтре с конструктивными параметрами электрофильтра выражается формулой

$$\eta = 1 - \exp(-\chi v_{oc} S/w),$$

где  $v_{oc}$  – скорость движения частиц к осадительному электроду;  $S$  – площадь осадительных электродов;  $w$  – объемный расход газа;  $\chi$  – поправочный коэффициент.

Из формулы следует, что степень очистки газов растет с увеличением скорости дрейфа частиц по направлению к осадительному электроду и с увеличением длины электродов, но уменьшается с ростом межэлектродного расстояния и скорости газа. Современные

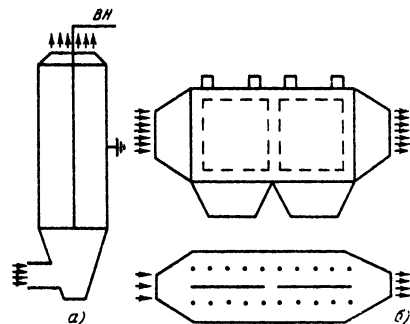


Рис. 54.31. Виды электрофильтров:  $a$  – трубчатый;  $b$  – пластинчатый



электрофильтры обеспечивают степень очистки газов, равную 97–99%.

Скорость движения частиц к осадительному электроду пропорциональна размеру частиц и квадрату напряженности поля. Следовательно, в первую очередь в электрофильтре осаждаются крупные частицы. Квадратичный характер зависимости скорости дрейфа от напряженности свидетельствует о целесообразности работать при максимально возможном напряжении.

Скорость осаждения частиц в пластинчатых электрофильтрах рассчитывается по формуле

$$v_{oc} = B_k q_{cp} E_{oc},$$

где  $B_k$  – подвижность частиц с учетом поправки Кеннингема;  $q_{cp}$  – заряд частиц, рассчитанный по средней напряженности поля  $E_{cp} = U/H$ ;  $E_{oc}$  – напряженность поля у осадительного электрода.

Поправочный коэффициент  $\chi = 1,1 \div 1,3$  учитывает неравномерный характер распределения концентрации частиц в промежутке электрофильтра и дополнительную зарядку частиц в области сильного поля вблизи коронирующих электродов.

Осаждение частиц на электроды из области газа, непосредственно примыкающей к электродам, происходит под действием электрического поля. Убыль частиц в этой области восполняется в результате перемещения частиц из остального межэлектродного пространства под действием поля и за счет увлечения частиц турбулентными пульсациями газа. Благодаря сравнительно большой скорости газа в электрофильтре (1,2–1,5 м/с) и значительным размерам межэлектродного промежутка течение газа в электрофильтрах всегда турбулентное ( $Re > 2 \cdot 10^3$ ). Увлечение частиц турбулентными пульсациями газа действует аналогично молекулярной диффузии и способствует выравниванию распределения концентрации частиц по сечению (турбулентная диффузия).

Окончательное распределение концентрации зависит от относительного влияния этих факторов, определяемого параметром

$$\mu_0 = BqE_{cp}H/D_0,$$

где  $D_0$  – коэффициент турбулентной диффузии в средней части промежутка.

Параметр  $\mu_0$  представляет собой отношение скорости направленного движения частиц под действием поля к средней скорости переноса частиц под действием турбулентной диффузии.

При  $\mu_0 > 100$  влиянием турбулентной диффузии можно пренебречь, при  $\mu_0 < 1$  устанавливается практически равномерное распределе-

ние концентрации. В электрофильтрах значение параметра  $\mu_0$  таково, что коэффициент  $\chi$  составляет 1,1–1,3.

На основании численных расчетов процесса осаждения частиц в пластинчатых электрофильтрах с учетом перечисленных выше факторов для коэффициента  $\chi$  получена следующая аппроксимационная формула:

$$\chi = \alpha + \beta v_{oc} L / (UH),$$

где

$$\alpha = \frac{E_{oc} H}{U} (0,745 - 0,121 \cdot 10^{-3} k U_0 / D_0);$$

$$\beta = 0,14 + 0,86 \cdot 10^{-3} k U_0 / (D_0 \mu_0^{0,86}),$$

здесь  $U$  – приложенное напряжение;  $U_0$  – начальное напряжение коронного разряда.

На степень очистки газов в электрофильтрах может существенное влияние оказать пропуск частиц через неактивные зоны. Неактивные зоны представляют собой части объема электрофильтра между коронирующей системой и верхней стенкой, а также между коронирующей системой и бункерами для уловленной пыли, в которых влияние электрического поля ослаблено. Для получения высокой очистки газов размеры неактивных зон при проектировании электрофильтров должны быть сведены до минимума.

Существенное влияние на работу электрофильтров оказывает унос осажденной пыли с электродов. Возвращение в поток даже малой доли осажденной пыли может привести к заметному ухудшению очистки газов и несоответствию расчетам по теоретической формуле.

Повторный унос частиц с электродов определяется следующими процессами: 1) процессом перезарядки и отталкивания от электрода частиц с малым удельным сопротивлением; 2) выбиванием частиц из слоя при осаждении новых частиц; 3) непосредственным отрывом частиц от слоя под действием потока воздуха. Если распределение потока воздуха в электрофильтре неблагоприятное, т. е. у осадительных электродов не созданы зоны с пониженной скоростью потока, то эта составляющая вторичного уноса может быть большой; 4) уносом пыли при встряхивании электродов.

Для обеспечения минимального повторного уноса необходимы: 1) оптимальная скорость газа с небольшой турбулентностью и равномерным распределением потока; 2) рациональная частота встряхивания и величина ускорения при встряхивании, обеспечивающие сбрасывание пыли крупными агрегатами; 3) специальная конструкция электродов.

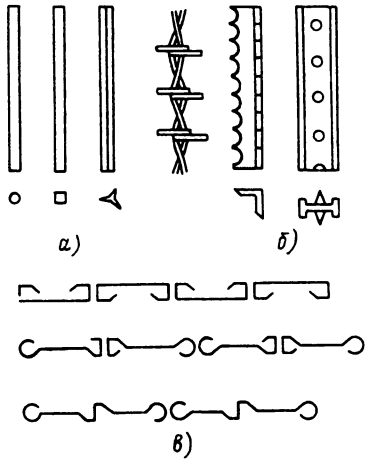


Рис. 54.32. Электроды электрофильтров:  
 а — гладкие коронирующие электроды; б — коронирующие электроды с фиксированными точками разряда; в — осадительные электроды

Коронирующие электроды можно разделить на две группы. К первой группе относятся электроды, которые не имеют фиксированных коронирующих точек. При отрицательной короне коронирующие точки располагаются вдоль электрода на разных расстояниях друг от друга в зависимости от состояния поверхности электрода. Типичные представители электродов этой группы: круглый — диаметром 2–4 мм, квадратный — со стороной 3–4 мм и штыкового сечения, вписывающийся в квадрат со стороной 4–5 мм (рис. 54.32, а). Ко второй группе относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. Типичными представителями этих электродов являются колючая проволока, пилообразные и игольчатые электроды (рис. 54.32, б). Электроды второй группы при равных напряжениях и межэлектродных расстояниях обеспечивают значительно больший ток короны, чем электроды первой группы. Легче обеспечивается необходимая механическая прочность.

Исследования показали, что обобщенной характеристикой качества коронирующего электрода является максимальная мощность, потребляемая коронным разрядом. Игольчатые электроды при соответствующем выборе шага между иглами ( $l = 40 \div 80$  мм) обеспечивают наибольшую мощность, потребляемую коронным разрядом.

Осадительные электроды электрофильтров также имеют разнообразную форму; они должны иметь гладкую поверхность без острых углов, необходимую для обеспечения вы-

сокой напряженности поля, и полости, позволяющие стряхивать пыль с минимальным вторичным уносом.

В последние годы стремятся использовать так называемые электроды желобчатой формы. Они изготавливаются прокаткой из рулонной стали, поэтому значительно проще в производстве и дешевле. Имеется ряд вариантов таких электродов (рис. 54.32, в). Все они имеют желоба для отвода стряхиваемой пыли в бункер. При работе с такими электродами удается снизить до минимума вторичный унос пыли и обеспечить работу электрофильтра с оптимальными электрическими показателями.

Для успешной работы электрофильтра имеет важное значение установка коронирующих проводов точно по оси между осадительными пластинами. Оптимальное расстояние между пластинами 250–300 мм. Шаг между коронирующими проводами 100–200 мм. Такие параметры имеют большинство электрофильтров.

Существенное влияние на эффективность работы электрофильтра оказывает удельное электрическое сопротивление пыли. Пыль с удельным сопротивлением до  $10^2$  Ом·м улавливается плохо, так как при осаждении частицы быстро перезаряжаются и отталкиваются от электрода. Пыль с удельным сопротивлением  $10^2$ – $10^8$  Ом·м, которой большинство, хорошо улавливается в электрофильтрах. Заряды частиц пыли равномерно стекают на осадительный электрод по мере подхода новых частиц из газового промежутка.

Частицы с удельным сопротивлением выше  $10^8$  Ом·м наиболее трудно улавливаются в электрофильтрах. На слое пыли накапливается заряд как за счет осаждения заряженных частиц, так и за счет потока ионов основного коронного разряда. Стеkanie происходит очень медленно из-за большого удельного электрического сопротивления пыли. В результате нарастания напряжения на слое его электрическая прочность нарушается, в слое формируются каналы разряда, в которых непрерывно происходит ионизация. В промежутках электрофильтра внедряются положительные ионы, которые противоположны по знаку ионам основного коронного разряда.

Разрядные процессы в высокоомном слое, которые носят название обратной короны, приводят к существенному снижению степени очистки газов в электрофильтрах за счет: 1) уменьшения заряда частиц из-за осаждения ионов противоположного знака; 2) уменьшения напряженности поля у осадительного электрода при наличии обратной короны, когда подъем напряженности к осадительному электроду, характерный для обычных электрофильтров

без обратной короны, будет отсутствовать; 3) снижения пробивного напряжения вследствие изменения характера распределения поля.

Меры борьбы с обратной короной:

1. Кондиционирование газов. В очищаемый газ вводятся мелкокораздробленная вода, аммиак или другие реагенты, которые, осаждаваясь на поверхности частиц, уменьшают поверхностное сопротивление и как следствие удельное электрическое сопротивление.

2. Снижение плотности тока основного коронного разряда. Уменьшение плотности тока приводит к замедлению нарастания напряжения на слое и, следовательно, уменьшению вероятности возникновения обратной короны. Снижение плотности тока возможно за счет выбора рациональных параметров коронирующих электродов.

3. Применение системы питания электрофильтров напряжением переменной полярности. Этот способ питания сводится к изменению полярности постоянного напряжения на электрофильтре на противоположную в момент, когда напряжение на слое приблизится к напряжению возникновения обратной короны. Изменение полярности приводит к разрядке слоя и накоплению заряда противоположного знака. Затем напряжение снова переключается, и так далее.

Для питания электрофильтров применяются автоматизированные источники, которые поддерживают напряжение на максимально возможном уровне. Применяются следующие системы регулирования.

1. Система поддержания напряжения вблизи уровня пробивного. Напряжение периодически плавно повышается до пробоя и потом резко снижается до значения, обеспечивающего гашение дуги. Спустя некоторое время (0,5–3 с) операция повторяется.

2. Система автоматического регулирования напряжения по частоте искровых разрядов. Установлено, что наилучшая очистка газов имеет место, когда в электрофильтре происходит оптимальное число разрядов в единицу времени (около 10–50 в 1 мин). Система регулирования, использующая этот принцип, обеспечивает большее напряжение на электрофильтре, чем предыдущая.

3. Система регулирования, обеспечивающая максимальное среднее напряжение. В этом случае не требуется знать заранее оптимальное число пробоев. Напряжение на электрофильтре автоматически поднимается до тех пор, пока не станет уменьшаться за счет резкого увеличения числа разрядов в единицу времени.

Методика расчета пластинчатых электро-

фильтров с учетом исходного распределения частиц по размерам на входе в электрофильтр сводится к следующему.

Рассчитывается фракционная степень очистки газов, т. е. степень очистки для частиц определенного размера:

$$\eta_{\phi} = 1 - k_a \exp(-\chi t_{от}) - (1 - k_a) \exp(-k_n t_{от}),$$

где  $k_a$  – относительная активная площадь поперечного сечения (для электрофильтров типов ПГДС и УГ может быть принята равной 0,9);  $k_n$  – коэффициент ухудшения очистки в неактивных зонах ( $k_n \approx 0,25$ );  $t_{от} = v_{ос} L / (U H k_u)$ ;  $L$  – длина электрофильтра;  $k_u$  – коэффициент неравномерности распределения скорости газа по сечению электрофильтра (зависит от числа распределительных решеток на входе в электрофильтр  $n$ :  $k_u = 1,4$  при  $n = 1$ ;  $k_u = 1,15$  при  $n = 2$ ;  $k_u = 1,1$  при  $n = 3$ ); параметры  $v_{ос}$  и  $\chi$  определяются по приведенным выше формулам.

Общая степень очистки

$$\eta = 1 - \int_0^{\infty} (1 - \eta_{\phi}) f(a) da,$$

где  $f(a)$  – функция, описывающая дифференциальное распределение частиц по размеру.

С учетом вторичного уноса частиц

$$\eta_{ун} = 1 - \exp[k_{ун} \ln(1 - \eta)],$$

где  $k_{ун}$  – коэффициент уноса ( $k_{ун} = 0,8$  при оптимальных интервалах встряхивания электродов).

Рабочее напряжение электрофильтра, соответствующее уровню пробивного напряжения, определяется по формуле

$$U = 18,8 (B_B / B_{B0})^{0,25} (H / H_0) \exp[-0,093 (S / S_0) - 2,21 (\lg^2 \rho / \lg^2 \rho_0 - 1,38 \lg \rho / \lg \rho_0)],$$

где  $B_B$  – фактическая относительная влажность ( $B_{B0} = 6\%$ );  $H$  – межэлектродное расстояние, м ( $H_0 = 0,1375$  м);  $S$  – площадь осадительных электродов, м<sup>2</sup> ( $S_0 = 10^4$  м<sup>2</sup>);  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление пыли, Ом·м ( $\rho_0 = 5 \cdot 10^9$  Ом·м).

Начальное напряжение коронного разряда

$$U_0 = 2,38 (B_B / B_{B0})^{0,276} (\delta / \delta_0)^{0,27} (\lg \rho / \lg \rho_0)^{0,41} \times \exp(0,85S / S_0),$$

где  $\delta$  – относительная плотность воздуха ( $\delta_0 = 0,724$ ).

При расчете по формулам напряжение получается в киловольтах.

Технические данные основных видов электрофильтров приведены в табл. 54.14. Для

Таблица 54.14. Технические данные электрофильтров

Показатель	УГ1	УГ2	УГ3	УГТ1	УГТ2	УВ	Мокрые
Площадь активного сечения, м <sup>2</sup>	10–15	26–74	88–265	30–80	50–80	22–72	8–20
Длина поля, м	2,5	2,5	4,0	2,5	2,5	4–5,8	
Высота поля, м	4,2	7,5	12,2	7,5	10	7,5	3,4–4,6
Площадь осаждения, м <sup>2</sup>	420–633	950–6291	9,9·10 <sup>3</sup> – 36,9× ×10 <sup>3</sup>	–	–	1,17× ×10 <sup>3</sup> –3,9× ×10 <sup>3</sup>	22,5– 1,03× ×10 <sup>3</sup>
Общая длина коронирующих электродов, 10 <sup>3</sup> м	1,12–1,68	4,53–16,9	25,4–101	–	–	1,58–3,46	0,29–14,2
Предельная температура, °С	250	250	250	425	425	250	35

получения высокой степени очистки скорость газа должна находиться в пределах 1–1,5 м/с. Преимущественно используются коронирующие ленточно-игольчатые и ленточно-зубчатые и С-образные профилированные осадительные электроды. Расстояние между осадительными электродами составляет 0,275 м. Число полей меняется от двух до четырех.

Электрофильтры унифицированной серии УГ применяются для очистки дымовых газов после котлов тепловых электростанций, вращающихся печей и мельниц цементных заводов, мартеновских печей и т. д. Унифицированные электрофильтры типа УГТ предназначены для очистки газов от пыли при температуре газов до 425 °С на предприятиях химической промышленности, цветной металлургии, нефтехимии и т. д. Электрофильтры УВ – однополюсные аппараты с вертикальным ходом газа, применяются после котлоагрегатов с производительностью до 220 т/ч, на цементных заводах с печами небольшой производительности, на алюминиевых заводах, на агломерационных фабриках. Мокрые электрофильтры применяются для тонкой очистки газов от пыли, туманов, смолистых и других веществ и снабжаются системой удаления пыли с электродов водой. Имеются ряд аппаратов различной конструкции в зависимости от конкретного назначения.

**Электроокраска.** Окраска изделий является одним из технологических процессов, в которых применение электрического поля оказалось эффективным. В отличие от пневматического распыления, при котором потери краски составляют около 50%, при электроокраске они не превышают 5–10%. Благодаря взаимодействию заряженных частиц краски покрытие получается плотным и ровным.

Процесс распыления в электрическом поле происходит следующим образом. Образующаяся на выходе из распылителя капля краски растет до тех пор, пока действующие на нее электрические силы не превысят силы поверхностного натяжения. Происходит нарушение

устойчивости поверхности на кончике капли и как следствие – выброс тонкой струйки. Далее эта тонкая струйка дробится на мелкие капли. Выброс тонкой струйки является условием мелкодисперсного распыления жидкости в электрическом поле.

На процессе распыления жидкости оказывают наибольшее влияние напряженность поля в непосредственной близости от распылителя, поверхностное натяжение, проводимость, вязкость жидкости, а также расход жидкости, т. е. скорость ее поступления в зону распыления.

При малой напряженности поля распыления не происходит, так как электрическая сила недостаточна, чтобы преодолеть силу поверхностного натяжения. От распылителя отрываются крупные капли под действием своего веса. Радиус кривизны кромки распылителя стремится уменьшиться, чтобы получить необходимую напряженность поля при возможно низком напряжении. В реальных установках рабочие напряжения достигают 80–100 кВ при межэлектродном расстоянии 200–300 мм, а напряженность поля на кромке распылителя составляет около 10 МВ/м и выше.

Если поверхностное натяжение велико, то возможно, что раньше, чем произойдет нарушение устойчивости поверхности капли, начнется коронный разряд, препятствующий дальнейшему увеличению напряженности поля у поверхности капли. Исследования показывают, что в электрическом поле плохо распыляются жидкости с коэффициентом поверхностного натяжения, превышающим  $(4 \div 5) \cdot 10^5$  Н/см.

Проводимость краски оказывает решающее влияние на процесс накопления заряда на капле жидкости. Жидкости с очень большим удельным сопротивлением (более  $10^8$  Ом·м) не распыляются в электрическом поле. Чем ниже сопротивление, тем быстрее подтекает заряд и больше сила, действующая на каплю. Однако при уменьшении сопротивления ниже  $10^2$  Ом·м распыление краски опять прекращается. Это связано с увеличением объ-

емного заряда частиц краски, внедряемого в промежутки. Этот объемный заряд уменьшает напряженность поля на кромке распылителя. Оптимальное удельное сопротивление жидкостей, хорошо распыляющихся в электрическом поле, лежит в пределах  $10^5 - 10^6$  Ом·м.

Очень вязкие жидкости также плохо распыляются в электрическом поле, поскольку вязкость жидкости ограничивает возможность выброса тонкой нити. С увеличением вязкости растет диаметр нити и соответственно размер капель, на которые она дробится. Вязкость краски должна быть не более 0,07 Па·с.

Для каждого типа распылителя имеется оптимальный расход краски, когда устанавливается баланс между количеством подтекающей жидкости и количеством жидкости, которая может распылиться при данной напряженности поля.

В промышленности применяются две различные системы электроокраски: электростатическая и окраска с механическим распылением.

Электростатическая окраска заключается в зарядке и распылении жидкости за счет электростатических сил, действующих на каплю, находящуюся на кромке распылителя. Заряженные частицы распыленной жидкости движутся в электрическом поле по направлению к изделию.

К электростатическим относятся лотковые, щелевые распылители (рис. 54.33, а). Распыление происходит на кромке наклонного лотка или на краю пластины, помещаемой на выходе из щели. Эти распылители применяются

для нанесения покрытий на изделия плоской формы с большой площадью поверхности. Подача краски на единицу длины кромки невелика — около 1 г/(см·мин).

Вращающиеся электростатические распылители имеют в 1,5–2 раза больший расход краски благодаря тому, что равномерное распределение краски по длине кромки обеспечивается центробежными силами. Наиболее употребительным является чашечный распылитель (рис. 54.34, б). Подача краски осуществляется на внутреннюю поверхность чаши, которая вращается с частотой 1,5–3 тыс. об/мин. Применяются чаши, изготавливаемые из полимерного материала с добавкой графита, диаметром от 40 до 150 мм. Перемещая распылитель в любом направлении, можно получать равномерные покрытия изделий, имеющих достаточно сложную форму.

Механическое распыление в сочетании с последующей зарядкой и движением частиц в электрическом поле составляет второе направление в электроокраске. В данном случае электрические силы не участвуют в распылении жидкости.

Применяются следующие системы неэлектрического распыления краски: центробежная, пневматическая, безвоздушная.

Центробежное распыление происходит на кромке диска или чаши, вращающихся с очень большой частотой (20–40 тыс. об/мин). В результате действия центробежных сил на пленку краски она отрывается с большой скоростью от распылителя и при взаимодействии с окружающим воздухом разбивается на капли (рис. 54.34).

При безвоздушном распылении капли краски ускоряются относительно неподвижного воздуха за счет того, что она подается к распылителю под большим давлением (до 12 МПа).

Наибольшее распространение получили электропневматические распылители, в которых дробление краски производится сжатым воздухом. В качестве примера на рис. 54.33, в приведен распылитель с концентрично расположенными кольцевыми соплами для краски и воздуха. Эквивалентный диаметр сопла для краски составляет 1–2 мм. Давление воздуха в электропневмораспылителе составляет 0,3–0,5 МПа при расходе до 15 м<sup>3</sup>/ч. Объемный расход краски достигает 500 см<sup>3</sup>/мин.

Зарядка частиц осуществляется в поле коронного разряда с иглы. Частицы краски переносятся к изделию электрическим полем и потоком воздуха.

Расход воздуха через распылитель определяется противоречивыми требованиями. Он должен быть достаточным, чтобы получить

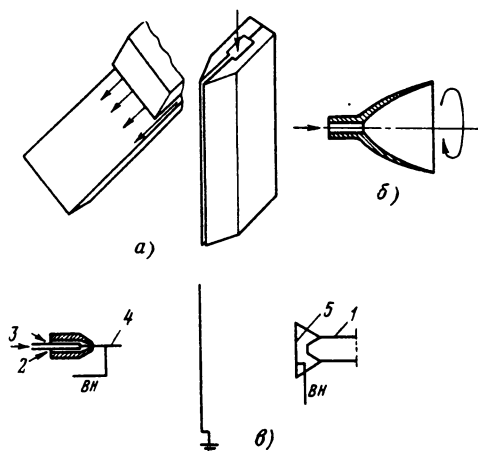


Рис. 54.33. Электрические распылители:

а — электростатические распылители; б — вращающийся электростатический распылитель; в — электропневматические распылители: 1 — пневматические распылители; 2 — подача краски; 3 — подача воздуха; 4 — игольчатый электрод; 5 — кольцевой электрод (ВН — высокое напряжение)

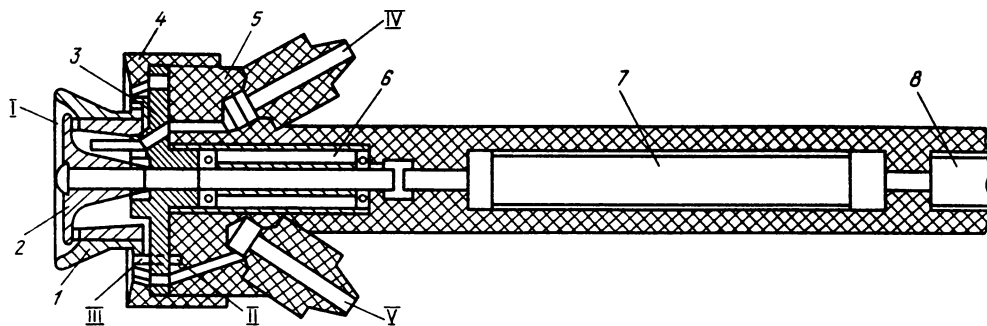


Рис. 54.34. Центробежно-вихревой электrorаспылитель:

1 — чаша с турбиной; 2 — расщепитель; 3 — сопловой аппарат; 4 — накидная гайка; 5 — корпус; 6 — вал с подшипниками; 7 — ограничительное сопротивление; 8 — кабель; 1 — отверстия для выхода краски на кромку чаши; II — каналы для подачи воздуха на вращение чаши; III — лопатки турбины; IV — подача лакокрасочного материала; V — подача воздуха на формирование факела

мелкодисперсное распыление, и не слишком большим, чтобы перенос капель к изделию в основном определялся электрическим полем.

Сравнивая методы электромеханического и электростатического распыления, необходимо отметить, что электростатические распылители обеспечивают более ровное и гладкое покрытие на деталях и обладают наименьшими потерями краски. Электромеханические распылители обеспечивают большую производительность, лучше окрашивают полости и углубления в деталях, налагают значительно меньше ограничений на краски. Недостатками этих распылителей являются относительно небольшая степень зарядки частиц и как следствие — потери краски, составляющие 20–30%.

**Нанесение порошковых покрытий.** Проблема разработки технологии получения порошковых слоев возникла в связи с широким внедрением полимерных материалов для получения технологических, защитных и декоративных покрытий. Полимерный порошок либо образует сплошное покрытие при соприкосновении с предельно нагретой поверхностью изделия, либо наносится на холодное изделие и образует порошковое покрытие, которое превращается в сплошное при последующей термообработке.

В первом случае используется вибровихревое напыление, во втором случае напыление производится в электрическом поле и порошковый слой удерживается на поверхности изделия за счет электрических сил. Напыление в электрическом поле позволяет получить полимерные покрытия более высокого качества и в настоящее время является основным способом.

Применяются два варианта организации напыления порошковых покрытий в электри-

ческом поле: а) в камерах с электрическим псевдокипящим слоем; б) с помощью распылителей.

Камеры с электрическим псевдокипящим слоем (рис. 54.35) широко применяются для нанесения покрытий на изделия различной конфигурации малого размера. Слой порошка переводится во взвешенное состояние потоком воздуха, поступающим через пористую перегородку. Электрическое поле создается между высоковольтным электродом, помещаемым в слой порошка, и заземленным изделием. Частицы порошка, приобретая заряд, движутся в электрическом поле по направлению к изделию, образуя покрытие. Кроме того, электрическое поле способствует увеличению высоты кипящего слоя, повышает его однородность. Существенное влияние на зарядку оказывают процессы трибоэлектризации при контактировании частиц друг с другом, со стенками камеры и высоковольтным электродом.

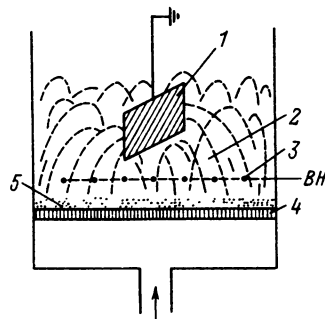


Рис. 54.35. Установка для напыления в электрическом кипящем слое:

1 — деталь; 2 — кипящий слой; 3 — коронирующий провoда; 4 — пористая перегородка; 5 — слой порошка

Получению равномерных по толщине покрытий способствует вращение изделий. Производительность процесса может быть повышена за счет выбора расположения высоковольтных электродов относительно изделия.

Качество получаемых покрытий зависит от дисперсного состава и физико-химических свойств полимерных порошков. Желательно применять порошки с размером частиц 30–70 мкм. При таких размерах частиц образуется плотное сплошное и ровное покрытие толщиной 50–150 мкм. Полимерам придается свойства, благоприятствующие образованию качественных покрытий. Это достигается введением специальных наполнителей и пластификаторов. Наибольшее распространение получили полимерные композиционные наполнители на основе эпоксидных смол.

Распылители применяются при нанесении полимерных покрытий на изделия размером более 150–200 мм. В основном используются пневмоэлектрические распылители. Установка для напыления включает: пистолет-распылитель; 2) дозирующее устройство; 3) источник высокого напряжения; 4) систему рекуперации. Дозирующее устройство предназначено для подачи в распылитель в необходимом количестве аэрозоля полимерного порошка. Забор порошка обычно производится из кипящего слоя воздушным эжектором. Высоковольтный источник служит для питания зарядного устройства и электродной системы, создающей электрическое поле между распылителем и изделием. Система рекуперации обеспечивает сбор и возврат порошка, не попавшего на изделие, препятствует загрязнению окружающего пространства.

В зависимости от способа зарядки частиц распылители разделяются на распылители с внешней зарядкой; 2) распылители с внутренней зарядкой; 3) распылители с трибоэлектрической зарядкой.

Распылители с внешней зарядкой представляют собой обычное пневматическое распыляющее устройство с коронирующими электродами на выходе. Покидая распылитель, частицы приобретают заряд в поле коронного разряда. В качестве коронирующего электрода чаще всего используется игла.

В устройствах с внутренней зарядкой частицам сообщается заряд внутри пистолета. Размеры факела регулируют с помощью расщепителя, устанавливаемого на выходе из пистолета. Распылители с внешней и внутренней зарядкой обеспечивают примерно одинаковые удельные заряды частиц на уровне  $10^{-3}$  К/кг.

На качество получаемых покрытий оказывает влияние обратная корона, возникающая

с уже нанесенного полимерного порошкового слоя. При интенсивной обратной короне возникают многочисленные кратеры, ухудшающие внешний вид покрытия. Вместе с тем начальная стадия обратной короны способствует получению более однородных по толщине покрытий за счет уменьшения скорости осаждения частиц на участках с обратной короной. Условия возникновения обратной короны облегчены для распылителей с внешней зарядкой за счет подзарядки слоя потоком ионов. Поэтому предпочтительным является использование распылителей с внутренней зарядкой.

В трибоэлектрических распылителях частицы получают заряд при движении пылегазовой смеси по штангам, соединяющим распылитель с дозирующим устройством. Распылители могут работать без источника высокого напряжения, и в этом их преимущество. Наиболее просто решаются вопросы электро- и пожаробезопасности. Недостатком этих распылителей является сильная зависимость качества напыления от влажности порошка и воздуха и от химического состава полимера.

Вопросы обеспечения электро- и пожаробезопасности играют важную роль при организации процесса напыления. Задача сводится к снижению вероятности возникновения пробоя и уменьшению энергии, выделяющейся в канале разряда, до значений ниже минимальной энергии вспышки пылегазовой смеси. Первое направление реализуется за счет применения источников с крутопадающей характеристикой, а второе — за счет снижения выходной емкости распылителя, например при уменьшении длины кабеля между источником питания и распылителем, за счет установки ограничительного сопротивления непосредственно перед распылителем.

Важным преимуществом с этой точки зрения обладают распылители со встроенным источником питания, у которых высоковольтный источник совмещен с распыляющим устройством. На рис. 54.36 представлен распылитель с внутренней зарядкой и встроенным источником питания.

Внутри корпуса 2 распылителя расположены трансформатор высокого напряжения 12 и блок выпрямления и умножения напряжения 11. К трансформатору через разъем 13 подводится напряжение 36 В, 10–15 кГц. Высокое напряжение 30 кВ с выхода блока умножения поступает через ограничительный резистор 10 на зарядное устройство. Зарядка частиц происходит в коронном разряде между иглой 9 и перфорированным электродом 6. Пылегазовая смесь поступает через штуцер 7 и трубку 5 непосредственно в область силь-

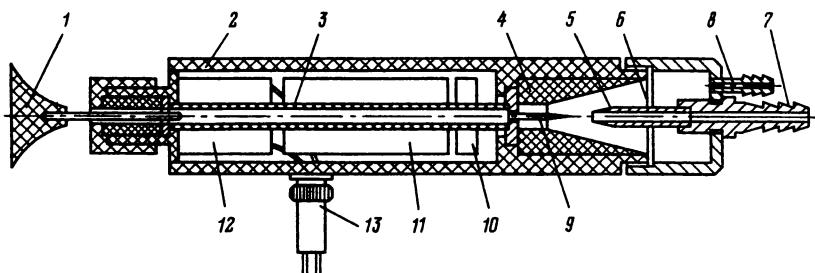


Рис. 54.36. Распылитель РПУ-1В

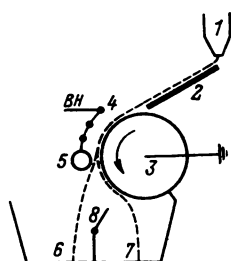


Рис. 54.37. Схема коронного барабанного сепаратора:  
 1 — питатель; 2 — наклонная плоскость; 3 — барабан; 4 — коронирующие электроды; 5 — диэлектрический цилиндр; 6, 7 — приемники; 8 — разделительная перегородка

ного поля вблизи иглы. Для того чтобы исключить осаждение порошка на диэлектрический конус 4 и электрод 6 внутри зарядного устройства, производится подача чистого воздуха через штуцер 8. Далее заряженная пылегазовая смесь через канал 3 поступает на выход распылителя. Необходимые размеры факела распылителя сменными раскателями 1.

Производительность распылителя составляет до 20 кг/ч порошка, расход воздуха на транспорт порошка — до 140 л/мин, чистого воздуха — 70 л/мин при давлении около 0,2 МПа.

Напыление полимерных покрытий в электрическом поле является перспективным и бурно развивающимся направлением. Во многих случаях эта технология вытесняет лакокрасочные покрытия, так как не требует дорогих растворителей, меньше загрязняет окружающую среду, обеспечивает более высокое качество покрытий.

**Сепарация материалов.** Сепарация материалов основана на том, что различие в физических свойствах приводит к различию в поведении отдельных компонентов смеси в электрическом поле. Известны следующие виды разделения материалов.

1. Разделение, основанное на различии в электрической проводимости. Работа сепараторов данного типа основана на различии в поведении проводящих и диэлектрических частиц на электроде, находящемся под высоким потенциалом. Проводящие частицы быстро при-

обретают заряд, аналогичный по знаку заряду электрода, отталкиваются от него и улетают. Частицы с высоким удельным сопротивлением приобретают заряд медленнее и соответственно удерживаются на электроде большее время. На рис. 54.37 представлена схема коронного барабанного сепаратора. В последнее время активно используется второй вид аппарата для разделения по проводимости — пластинчатый электрический сепаратор (рис. 54.38).

2. Разделение, основанное на различии в электризации трением. В результате трения двух различных материалов о третий заряды, получаемые этими материалами, различаются по величине, а часто и по знаку. Указанное свойство используется в конструкции трибоэлектрического сепаратора, представленного на рис. 54.39. Частицы электризуются при движении по наклонной плоскости и разделяются в электростатическом поле.

3. Разделение, основанное на использова-

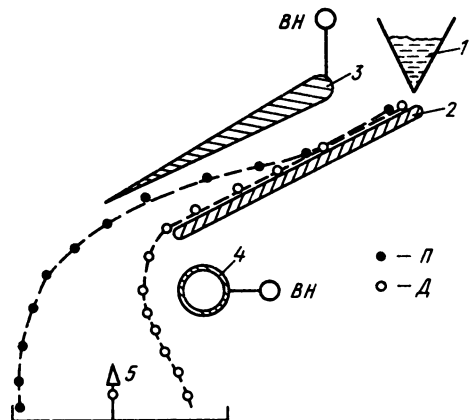


Рис. 54.38. Схема пластинчатого электростатического сепаратора (ПЭСС):

1 — пылепитатель; 2 — зарядный электрод; 3 — верхний электрод — крыло; 4 — нижний отклоняющий электрод — цилиндр; 5 — отсекающий электрод; П — частицы-проводники; Д — диэлектрические частицы



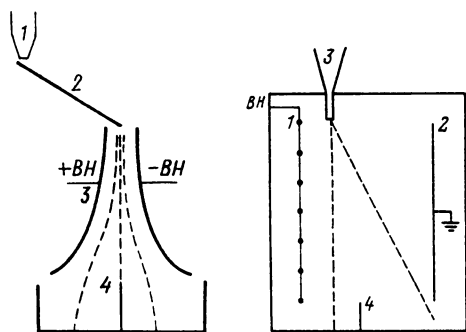


Рис. 54.39. Трибозлектрический сепаратор:  
1 – бункер; 2 – наклонная плоскость; 3 – электроды;  
4 – перегородка

Рис. 54.40. Схема коронного камерного сепаратора:

1 – коронирующие электроды; 2 – осадительная плоскость; 3 – питатель; 4 – приемник

нии пирозлектрического эффекта. При нагревании смеси разнородных минералов некоторые из них заряжаются положительно, другие – отрицательно. Пропуская термически обработанный порошок через электрическое поле, разделяют порошок по компонентам.

4. Разделение, основанное на различии в диэлектрической проницаемости. В этом случае используется сила, действующая на незаряженную диэлектрическую частицу в неоднородном электрическом поле. Если диэлектрическая проницаемость частицы больше, чем среды, то частица втягивается в область с наибольшей напряженностью, если наоборот – выталкивается. Подбирая соответствующим образом диэлектрическую жидкость, в которой происходит сепарация, можно добиться того, что компоненты смеси минералов будут двигаться в противоположных направлениях и выделяться в различных приемниках.

5. Разделение, основанное на различии массы частиц. На этом принципе работает коронный камерный сепаратор (рис. 54.40). Частицы разного размера падают в промежуток между коронирующим 1 и осадительным 2 электродами. На начальном участке движения они заряжаются и приобретают горизонтальную составляющую скорости. В результате движения в горизонтальном направлении под действием электрического поля и в вертикальном под действием силы тяжести частицы достигают осадительного электрода, причем место осаждения частиц зависит от их массы, а при однородных частицах – от их размера. В верхней части осадительного электрода со-

бираются самые мелкие частицы, а в нижней – самые крупные. Камерные электросепараторы используются для разделения порошков по размеру частиц.

Широкое промышленное применение получили в основном два метода: сепарация по проводимости и трибозлектрическая сепарация.

Характеристики барабанных электросепараторов, применяемых в промышленности, представлены в табл. 54.15. Барабанные электросепараторы используются при обогащении железных руд, в цветной металлургии, для доводки редкоземельных и алмазных концентратов. Трибозлектрическая сепарация применяется при обогащении калийных солей, фосфатных руд, полевых шпатов. Пластинчатые электростатические сепараторы нашли применение при обогащении титановых руд.

Сравнительные технико-экономические данные для барабанных и пластинчатых сепараторов приведены в табл. 54.16.

До последнего времени коронные барабанные электросепараторы считались лучшим видом аппарата, поскольку они обеспечивали высокую степень извлечения полезного продукта из руды (свыше 90 %) при достаточно большой производительности (до 2 т/ч на 1 м длины барабана). Недостатком коронного барабанного сепаратора является наличие вращающихся частей и привода, работающего в сильно запыленной среде. Стирание барабана и износ щеток, с помощью которых снимаются частицы, прилипшие к барабану, вызывают необходимость в частом ремонте оборудования. Это усложняет эксплуатацию электросепараторов. Поэтому проявляется тенденция к преимущественному использованию конструкций сепараторов свободного падения и пластинчатых сепараторов.

**Электрография** – процесс отображения текстовой или графической информации с использованием электрических полей. Электрографические печатающие устройства используются, во-первых, в качестве устройств копировально-множительной техники, во-вторых, в качестве печатающих устройств в ЭВМ, системах автоматизированного проектирования (АРМ конструктора) и автоматизации научных исследований (АСНИ), в информационно-измерительных системах и, в-третьих, в качестве маркирующих устройств и при нанесении структурных покрытий. В электропечати выделяются два направления: электрофотография и электрокапельная технология.

**Электрофотографические устройства** обеспечивают более высокую скорость и разрешающую способность печати, электрокапле-

Таблица 54.15 Технические данные барабанных электросепараторов

Показатель	СЭП-2	СЭС-1000М	СЭС-2000	ЭКС-1250	ЭКС-3000	СЭП-1
Производительность на один питатель, т/ч	2	2	4	2	5	2
Число каскадов	3	Любое	Любое	2	1	3
Число барабанов	8	»	»	2	1	6
Диаметр барабана, мм	300	125, 150	150	130	160	150
Ширина питателя, мм	1000	1000	2000	1250	3000	1000
Частота вращения барабана, об/мин	40–420	110–800	430, 460, 490	300, 400, 450	350, 465, 656	40–240
Рабочее напряжение, кВ	До 40	До 20	До 20	До 20	До 20	До 20
Максимальная крупность материала, мм	1,5	3	1,5	3	3	1,5
Мощность кВт (без нагревательных элементов)	1,47	2,25	2,25	3,43	2,55	1,57
Масса, т	8,9	3,9–16,4	6,3–22	2,2	2,2	4,83

струйные более просты по устройству и дешевы.

В основе электрофотографического способа лежит свойство высокоомного фотополупроводника, нанесенного тонким слоем на подложку, изменять свою электрическую проводимость под действием света.

На первой стадии процесса производится электризация полупроводника, т. е. на поверхность полупроводникового слоя наносятся электрические заряды того или иного знака. Постоянная времени разрядки слоя в темноте, определяемая диэлектрической проницаемостью и удельным электрическим сопротивлением слоя, может быть достаточно большой, так что заряды на поверхности сохраняются в течение времени, существенно превышающего время, необходимое для выполнения последующих операций.

После электризации производится экспонирование слоя, которое принципиально не отличается от экспонирования обычных фотографических материалов. Оно может производиться как в фотографических камерах, так и контактным методом. В процессе экспонирования благодаря фотопроводимости полупроводника уменьшается сопротивление слоя, что приводит к стеканию зарядов с тех участков поверхности, которые подверглись воздействию света. Оставшийся после экспонирования поверхностный заряд образует скрытое электростатическое изображение.

Проявление скрытого электростатического изображения производится с помощью заряженного порошка. Если заряд частиц проявляющего порошка противоположен по знаку остаточному поверхностному заряду, то частицы преимущественно будут оседать в местах с наибольшей плотностью поверхностного заряда. В результате на поверхности полупроводникового слоя образуется порошковое изображение. Электростатическое изображение

Таблица 54.16. Техничко-экономические данные сепараторов

Параметр	СЭС-2000	ПЭСС
Производительность, т/ч	4–20	20
Масса на 1 т сепарируемого продукта	1,5–1,0	0,38
Удельная производительность на единицу площади, т/(ч·м <sup>2</sup> )	0,8–1,6	2,2
Удельный расход электроэнергии на 1 т продукта, $\frac{\text{кВт ч}}{\text{т/ч}}$	1,2	0,04
Стоимость оборудования на 1 т продукта, $\frac{\text{руб}}{\text{т/ч}}$	6630	1100

можно проявить не только заряженными порошками, но непосредственным сканированием потенциального рельефа и превращением его в оптическое изображение на экране электронно-лучевой трубки.

Следующим этапом процесса является перенос слоя на нечувствительную подложку, например бумагу. Далее производится фиксация порошкового изображения на бумаге. Обычно на бумагу переносится незначительная часть порошка, что позволяет получить несколько копий с одного изображения на полупроводниковом слое. Наиболее простой и распространенный способ фиксации изображения – термический при соответствующем подборе порошка.

Использовать явление фотопроводимости для фотографирования впервые предложил русский изобретатель Е. Е. Горин в 1916 г. В 1928 г. голландская фирма «Филипс» применила проявление скрытого электростатического изображения с помощью измельченных частиц красителя, нанесенного на поверхность фотопроводника. И, наконец, американский физик У. Ф. Карлсон в 1938 г. объединил

Таблица 54.17

Фотопроводник	Относительная чувствительность	Светочувствительность в системе ASA
Сера	1	0,002
Антрацен	4	0,008
Поливинилкарбазол	7	0,014
Слой цинка в связующем	100	0,2
Сенсибилизированный красителями слой окиси цинка в связующем	500	1,0—2,0
Аморфный селен	500	1,0
Сплав селена и теллура	1000	2,0
Сульфид кадмия, легированный марганцем и кислородом, со связующим	5000—15 000	10—30

принцип формирования электростатического изображения на поверхности фотопроводника с принципом его проявления порошком красителя, положив начало современной электрографии.

Кроме описанного известны еще два метода электрографии: устойчивая поляризация и устойчивая электропроводность. В основе первого способа лежит обнаруженная в 1937 г. способность некоторых диэлектриков при одновременном действии электрического поля и света переходить в электретное состояние, которое сохраняется длительное время. В электрофотографии на фотоэлектретах диэлектрик поляризуется избирательно в соответствии со световым изображением на слое. Второй метод — устойчивая электропроводность — известен с 1952 г., и в его основу положена способность некоторых фотополупроводников приобретать электропроводность при освещении и сохранять ее длительное время после выключения света. Время, в течение которого сохраняется электропроводность, зависит от материала фотопроводника.

Рассмотрим материалы, обладающие свойством фотопроводимости. На практике пользуются материалами с удельным темновым сопротивлением  $10^{13}$  Ом·м и более. При освещении слоя удельное сопротивление должно уменьшаться в  $10^3$ — $10^5$  раз.

Электрофотографические слои должны иметь высокую фотозлектрическую чувствительность, которая характеризует способность слоя уменьшать сопротивление при освещении его светом определенной длины волны и интенсивности.

Светочувствительность исследованных электрофотографических слоев указана в табл. 54.17.

Широкое применение нашли материалы

на основе окиси цинка и селена. Они в наибольшей мере удовлетворяют предъявляемым требованиям: имеют высокое удельное электрическое сопротивление, обладают необходимой спектральной чувствительностью, позволяют получать тонкие слои, обладающие достаточной механической прочностью.

Для создания репродукций с помощью электрофотографического материала толщина светочувствительного слоя должна быть 8—12 мкм. Такой слой обладает оптимальными фотографическими характеристиками.

Применяются различные методы получения электрофотографических слоев. Например, слои из окиси цинка получают путем нанесения тонкого слоя суспензии порошка на бумагу и последующего высушивания. Такие слои предназначены для однократного использования, обладают наибольшей разрешающей способностью (до 100 линий/мм), обеспечивают качественное изображение с передачей полутонов, но чувствительность их мала (0,1—1 ед. ГОСТ).

Слои из селена наносят на металлические пластины напылением в вакууме и предназначены для получения многократных копий. Разрешающая способность при этом получается в 2—3 раза меньше, но чувствительность слоев на основе селена можно получить до 20 ед. ГОСТ.

В последние годы значительное внимание уделяется использованию в электрофотографии органических фотопроводников (например, поливинилкарбазола).

Рассмотрим основные стадии электрофотографического процесса. Из различных способов зарядки полупроводниковых слоев преимущественно применяется зарядка в поле коронного разряда. Коронирующие электроды представляют собой или тонкие вольфрамовые провода диаметром 0,02—0,1 мм, или иглы. Важное значение имеет равномерность распределения заряда по слою. Это достигается применением ряда проводов или игл вместо одного провода, перемещением слоя относительно коронирующих проводов, использованием дополнительных экранов. При зарядке слоев на основе окиси цинка используется коронный разряд отрицательной полярности, так как в этом случае происходит более быстрое восстановление сопротивления слоя после пребывания на свету.

В электрофотографии используются несколько способов проявления скрытого электростатического изображения. По характеру взаимодействия частиц проявляющего вещества с заряженными участками слоя различают проявление двух основных типов: сухое и жидкостное. Имеется много разновидностей

сухого метода проявления: каскадный, «магнитной кистью», меховыми валиками, аэрозольный. Метод сухого каскадного проявления наиболее распространен для селеновых фотослоев многократного использования. Каскадный проявитель обычно состоит из двух компонентов: крупнозернистого носителя и мелкодисперсного (проявляющего порошка). Вещства-носители для данного проявляющего порошка должны выбираться таким образом, чтобы при трении частиц носителя о частицы тонера последние приобретали заряды, противоположные по знаку зарядам электростатического изображения. Размеры частиц тонера обычно составляют 5–20 мкм, частицы носителя достигают 300–700 мкм. От размера частиц тонера зависит качество получаемого изображения: чем меньше частицы, тем выше разрешающая способность отпечатка. При слишком малом размере резко повышается оптическая плотность фона (вуаль) изображения. При проявлении изображения носитель обеспечивает равномерное перемещение проявляющего состава по поверхности слоя. Благодаря контактно-электрическому взаимодействию на каждой частице носителя удерживается значительное количество частиц тонера. Проявление состоит в том, что частицы тонера отрываются от носителя и осаждаются на заряженных участках слоя. В качестве носителей применяют кварцевый песок, стеклянные шарики, полистирол. Самое широкое распространение получили стеклянные шарики, покрытые пленкой смолы. Стеклянные или полистирольные шарики легко перекатываются по пластине и меньше царапают слой, чем кварцевый песок.

Каскадный способ проявления используется в большинстве отечественных и зарубежных моделей копировально-множительных аппаратов. В основном каскадный способ проявления применяют при копировании штриховых изображений. Несмотря на ряд таких достоинств, как малый расход проявляющего порошка, приемлемый уровень вуали, отсутствие пыли, каскадный метод проявления имеет серьезные недостатки, заключающиеся в том, что он не обеспечивает высокую скорость проявления, плохо проявляет полутонные изображения, а также однотонные сплошные участки изображения, т. е. дает так называемый «краевой эффект».

В методе проявления «магнитной кистью» также применяются носитель и проявляющий порошок, но частицы носителя обладают магнитными свойствами. Притягиваясь к магниту, они располагаются нитями вдоль силовых линий поля. При перемещении электрофотографического слоя относительно «магнитной

кисти» происходит проявление электростатического изображения, которое по механизму не отличается от каскадного проявления.

В методе аэрозольного проявления доставка частиц к поверхности электрофотослоя осуществляется потоком воздуха. Используются высокодисперсные порошки с размером частиц 0,1–1,0 мкм, что дает возможность получать изображения с очень высоким разрешением. Аэрозольный метод позволяет получать не только штриховые, но и полутонные отпечатки. Конструктивное оформление установки для аэрозольного проявления во многом подобно установкам для напыления порошковых покрытий в электрическом поле.

Существенным недостатком проявления заряженными порошками является «краевой эффект», который заключается в том, что при проявлении больших равномерно заряженных площадей получается контурное изображение. Причиной является то, что электрическое поле, создаваемое зарядами электростатического изображения и связанными с ним зарядами на подложке, выходит за пределы слоя только на краях изображения, где и происходит преимущественное осаждение частиц порошка. В наименьшей мере «краевой эффект» выражен при аэрозольном методе проявления. Для ослабления краевого эффекта применяют дополнительные электроды, расположенные в непосредственной близости над электрофотографическим слоем, и слои с регулярными неоднородностями.

При работе со слоями многократного использования после операции проявления следует перенос порошкового изображения на бумагу и закрепление изображения.

Сущность переноса порошкового изображения заключается в том, что частички тонера, из которых состоит видимое изображение, могут быть после проявления перенесены электростатическими полями на бумагу. Для этого на бумагу, наложенную на фотослой, наносят заряды, совпадающие по знаку с первоначальным зарядом слоя.

Для закрепления порошкового изображения на копиях в современных электрофотографических аппаратах применяются следующие способы: а) термическое с использованием трубчатых излучателей; б) термоконтактное; в) термосиловое; г) термическое с использованием трубчатого излучателя в фокусирующем отражателе; д) импульсное. По энергетическим затратам все указанные способы близки друг к другу, за исключением термического с трубчатыми отражателями, КПД которого существенно ниже остальных.

Для проявления и закрепления изображения применяют и жидкие проявители. В этом

случае используют трибоэлектрический эффект, наблюдаемый между порошком тонера и жидкостью с низкой электропроводностью, например бензином, керосином, бензолом и т. д. Чтобы частицы тонера все время находились во взвешенном состоянии в жидкости, ее постоянно перемешивают. Экспонирование электрофотографического слоя производится через слой жидкого проявителя. При этом тонер откладывается в тех местах, где имеются заряды, и сразу же закрепляется с помощью того же растворителя. Этот метод позволяет получать отпечатки с максимальной возможной для электрофотографии разрешающей способностью (200–250 линий/мм).

Качество изображения при использовании жидких проявителей значительно выше, чем при сухом проявлении. Причина этого в том, что в жидком проявителе все частицы тонера обладают одинаковым зарядом в противоположность сухому проявлению. В результате при сухом проявлении частицы осаждаются и на освещенных участках слоя, образуя фон изображения.

В настоящее время промышленностью серийно выпускаются и эксплуатируются ряд электрофотографических аппаратов различного назначения. В качестве примера на рис. 54.41 представлена структурная схема копировального аппарата ЭР-12Р1, предназначенного для оперативного копирования административной, информационной и технической документации без изменения масштаба и с уменьшением. Аппарат позволяет копировать листовые и сброшюрованные оригиналы форматов А4 и А3 с приближенным воспроизведением тонов на копиях. Впервые в нашей

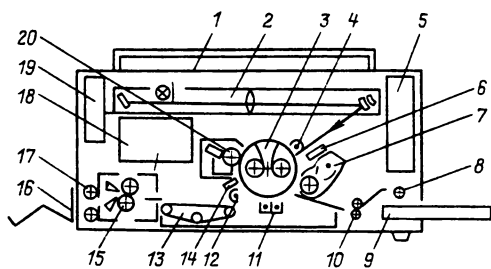


Рис. 54.41. Структурная схема аппарата ЭР-12Р1:

1 – столик оригинала, 2 – блок экспонирования; 3 – цилиндр с гибким промежуточным носителем; 4 – устройство зарядки; 5 – блок управления; 6, 12, 14 – устройство нейтрализации; 7 – устройство проявления; 8, 10 – ролики подачи бумаги; 9 – кассета с бумагой; 11 – устройство переноса; 13 – транспортер; 15 – устройство закрепления; 16 – приемный лоток; 17 – выводные ролики; 18 – высоковольтные блоки питания; 19 – вентиляторы; 20 – устройство очистки

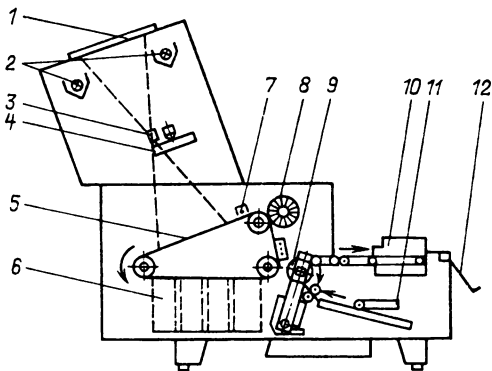


Рис. 54.42. Принципиальная схема аппарата многокрасочного электрофотографического копирования:

1 – цветной оригинал; 2 – импульсные лампы, 3 – объектив, 4 – блок светофильтров; 5 – панхроматический фотопроводящий транспортер, 6 – блок проявления с четырьмя проявляющими камерами; 7 – зарядное устройство; 8 – узел очистки; 9 – цилиндр переноса; 10 – закрепляющее устройство, 11 – самонаклад, 12 – приемный лоток

стране для экспонирования изображения применена конструкция с подвижным столиком оригинала при неподвижных элементах оптической системы. Производительность ЭР-12Р1 составляет 20 копий в минуту формата А4 и 10 копий формата А3.

В электрофотографическом аппарате ЭР-12Р1 для управления технологическим процессом изготовления копий и контроля использован микропроцессор на базе БИС серии КР580.

Активно ведутся во всем мире работы по созданию аппаратов для получения многокрасочных копий с цветных оригиналов. Зарубежные фирмы особое внимание уделили разработке способов многокрасочного копирования с помощью формирования изображения непосредственно на конечном носителе информации за счет многократного переноса порошкового изображения с промежуточного фотослоя на материал копии.

Один из вариантов принципиальной схемы электрофотографического аппарата с использованием промежуточного носителя записи ленточного типа и классического электрофотографического процесса, аналогичного рассмотренному выше, представлен на рис. 54.42. Копируемый цветной оригинал 1 укладывают на предметное стекло, где он периодически освещается импульсными лампами 2. Световое изображение оригинала через объектив 3 и соответствующий светофильтр из блока светофильтров проецируется на движущуюся по-

верхность панхроматического фотопроводящего транспортера 5, на который предварительно наносятся заряды с помощью зарядного устройства 7. Блок светофильтров 4 содержит светофильтры синего, зеленого, красного и нейтрального серого цветов, а блок проявления 6 — четыре устройства проявления способом «магнитной кисти» с тонерами соответственно желтого, пурпурного, голубого и черного цветов. Проявляющие устройства работают последовательно. При проецировании изображения оригинала через синий светофильтр скрытое изображение на фотопроводящей поверхности ленточного типа визуализируется тонером желтого цвета. Последующее экспонирование через зеленый, а затем красный светофильтры визуализируется соответственно тонерами пурпурного и голубого цветов. Для получения черно-белой копии с многоцветного оригинала имеются нейтрально-серый светофильтр и проявляющее устройство с тонером черного цвета. Поверхность фотопроводящего слоя очищается от избытка тонера в узле очистки 8. Листы бумаги с само-наклада 11 подаются в захваты цилиндра переноса 9. Изображения, образованные на поверхности фотопроводящего слоя и проявленные тонером соответствующего цвета, переносятся последовательно на лист бумаги, находящийся на цилиндре переноса, под действием электрического поля. Синхронная работа всех элементов аппарата обеспечивает точность совмещения перенесенных изображений разных цветов на листе бумаги и высокое качество копирования. После переноса многокрасочное изображение фиксируется в закрепляющем устройстве 10 и готовая копия поступает в приемный лоток 12.

**В электрокапельструйных устройствах** используется принцип электростатического управления струей монодисперсных заряженных капель по аналогии с электронно-лучевыми осциллографом или дисплеем. Обобщенная

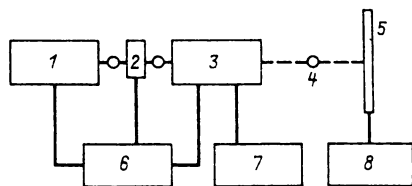


Рис. 54.43. Обобщенная функциональная схема электрокапельструйного устройства: 1 — эмиттер капель, 2 — зарядное устройство, 3 — блок управления струей, 4 — капля, 5 — подложка (бумага); 6 — синхронизирующее устройство, 7 — задающий генератор, 8 — механизм привода

функциональная схема электрокапельструйного устройства приведена на рис. 54.43.

Эмиттер капель генерирует однородную прямолинейную капельную струю, которая получает индукционную или ионную зарядку капель в зарядном устройстве. Блок управления отклоняет струю по одной или двум координатам, прерывает и очищает ее от сателлитов (капель меньшего размера). Для обеспечения качественного процесса печати эмиссия капель, их зарядка и управление должны быть синхронными. Эту функцию выполняет синхронизирующее устройство. Механизм привода осуществляет взаимное перемещение печатающей головки и подложки.

Электрокапельструйные устройства обладают рядом достоинств: простотой конструкции за счет одностадийности печати, высокой надежностью благодаря отсутствию в печатающей головке механических подвижных элементов, большой скоростью печати. Скорость печати при последовательном формировании знаков в виде матрицы точек  $5 \times 7$  превышает 1000 знаков в секунду.

Электрокапельструйные устройства используются для вывода информации, печати, маркировки и выполнения ряда других высокоточных технологических операций. Ассортимент возможных знаков охватывает русский и латинский алфавиты, служебные и условные обозначения, метки, графические элементы. В качестве поверхностей, на которые производится печать, можно использовать материалы с самыми различными свойствами и с различной формой поверхности. Достигнутая разрешающая способность и гибкость алгоритмов управления позволяют получить большое число градаций оптической плотности как черно-белых, так и цветных изображений. Гибкость управления позволяет обеспечить нужное цветовоспроизведение за счет варьирования цветами красок, качеством материала подложек, знакообразующими растрами и разрешающей способностью.

Основные параметры электрокапельструйных устройств: скорость печати, связанная с частотой каплеобразования; качество печати, определяемое стабильностью процесса каплеобразования; толщина и плотность обводки знаков, зависящие от диаметра капель; надежность, достигаемая за счет простоты конструкции печатающей головки и устройства управления; универсальность, связанная с возможностью регулирования частоты каплеобразования и диаметра капель, — определяются способом эмиссии капель. При струйной печати эмиссия капель в основном осуществляется импульсным давлением, высоким давлением и электростатическим полем.

Способ эмиссии капель импульсным давлением заключается в выбросе из сопла одной капли чернил на каждое импульсное изменение давления внутри камеры с чернилами. Каплеобразование происходит в том случае, если давление в импульсе достаточно для преодоления сил поверхностного натяжения в капиллярном сопле и приобретения капель кинетической энергии для отрыва ее от сопла. Для получения импульсного давления используются пьезоэлектрические, магнитоstrictionные, электрогидродинамические и другие преобразователи. В печатающей головке используется принцип импульсного бесклапанного насоса. Давление в импульсе достигает 350–500 кПа, скорость капель на вылете – 2–3 м/с, максимальная частота каплеобразования – 8–10 кГц, что позволяет получить скорость печати до 300 знаков/с. Диаметр капилляров, через которые выбрасывается капля, составляет 25–40 мкм.

К недостаткам этой системы относят высокие требования к точности изготовления относительно сложной механической системы печатающей головки и к свойствам используемых чернил.

Использование эмиссии капель высоким давлением позволило существенно повысить скорость печати.

Печатающая головка в этом случае (рис. 54.44) состоит из форсунки 1 и часового камня 6 с капилляром диаметром 20–100 мкм. Продольные колебания струи обеспечиваются системой пьезокристаллов 3, управляемых от генератора синусоидального напряжения 5 (20–100 кГц). Насос высокого давления 14

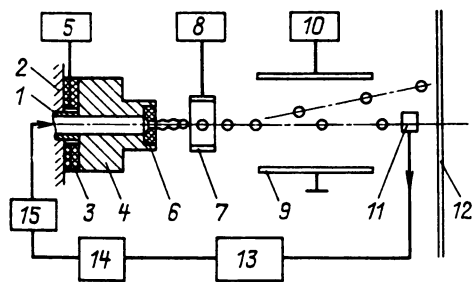


Рис. 54.44. Схема электрокаплеустройного устройства с эмиссией капель высоким давлением: 1 – форсунка; 2 – крепление головки к корпусу устройства; 3 – пьезокерамические элементы; 4 – конденсатор вибрации; 5 – генератор синусоидального напряжения; 6 – часовой камень с соплом; 7 – заряжающий электрод; 8 – блок питания зарядного устройства; 9 – пластины плоского конденсатора; 10 – высоковольтный блок питания; 11 – ловушка капель; 12 – подложка (бумага); 13 – камера с чернилами; 14 – насос; 15 – фильтр

(300–500 кПа) подает чернила через фильтр 15 в форсунку из чернильницы 13 и отсасывает неиспользованные чернила из ловушки 11.

Под действием высокого давления из сопла с большой скоростью (20 м/с) выбрасывается струя проводящих чернил, которая на некотором расстоянии от сопла дробится на капли. Пьезоэлектрический преобразователь модулирует скорость истечения струи и тем самым синхронизирует дробление струи на капли. При отрыве капли приобретают индукционный заряд под действием напряжения на электроде 7 и далее при полете отклоняются в поле плоского конденсатора 9. Незаряженные капли попадают в ловушку 11. Развертка знака при знакоформировании обеспечивается по одной координате за счет отклонения полем, а по другой – относительным перемещением печатающей головки и бумаги.

Способ эмиссии капель высоким давлением также предъявляет высокие требования к герметичности, прочности крепления и качеству изготовления элементов печатающей головки. Жесткие требования предъявляются и к чернилам по проводимости, вязкости, поверхностному натяжению, частоте. Устройство усложняется тем, что необходима система точной синхронизации каплеобразования, зарядки и перемещения бумаги. Однако возможность получить частоту каплеобразования до 100 кГц позволяет увеличить скорость печати до 1500 знаков при матрице  $5 \times 7$ .

Наконец, еще один способ – эмиссия капель электрическим полем – реализуется по аналогии с электростатическим распылением жидкости при электроокраске с тем отличием, что в качестве электрода используется капилляр. Привлекательным в этом способе является простота конструкции печатающей головки, так как в ней отсутствует сочетание высокого давления с высокочастотной вибрацией. Основной проблемой является обеспечение стабильного размера и заряда капель при распылении. Трудно исключить сопутствующие мелкие капли, которые существенно ухудшают качество печати. Требование по использованию жидкостей с малой удельной электрической проводимостью в узком диапазоне  $[(0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-7} \text{ см/м}]$  существенно уменьшает заряд частиц и ограничивает возможность их управления электрическим полем. Наибольшая скорость печати определяется предельной частотой каплеобразования, которая составляет 10 кГц.

#### Источники питания

Источники питания для установок электронно-ионной технологии должны обеспечи-

вать высокое напряжение (несколько десятков киловольт и выше) при относительно небольших потребляемых токах (от  $10^{-5}$  до 10 А).

В настоящее время применяются источники питания трех видов: 1) высоковольтные выпрямители; 2) выпрямители с умножением напряжения; 3) электростатические генераторы.

Высоковольтный выпрямитель состоит из регулятора напряжения, повышающего трансформатора и собственно выпрямителя.

Регулятор напряжения поддерживает напряжение на установке в заданных пределах. Выполнение регуляторов зависит от потребляемой мощности и требований к управлению. Регулирование может быть ручным и автоматическим. Наибольшее распространение автоматическое регулирование напряжения получило в системах питания электрофильтров, где необходимо поддерживать напряжение на максимально возможном уровне. Для регулирования напряжения применяются автотрансформаторы, потенциал-регуляторы, магнитные усилители (см. § 29.2), тиристорные регуляторы (см. § 32.19) и т. д.

Трансформаторы по конструкции не отличаются от обычных силовых трансформаторов. Однако они предназначены для внутренней установки и поэтому имеют значительно меньший запас электрической прочности.

Выпрямление переменного тока производится полупроводниковыми диодами.

Выпрямители с умножением напряжения (см. § 32.7) применяются в тех случаях, когда требуется высокое напряжение при очень малом потребляемом токе (около  $10^{-4}$  А). Они оказываются более компактными и имеют меньшую массу по сравнению с трансформаторно-выпрямительными установками.

Электростатические генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую благодаря механическому перемещению зарядов против сил электрического поля. Транспортёром зарядов служат твердые тела — проводники и диэлектрики. В соответствии с этим и делятся электростатические генераторы. Транспортёры выполняются в виде ленты, дисков, цилиндров, стержней.

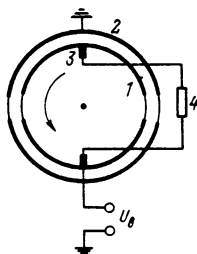


Рис. 54.45. Принципиальная схема цилиндрического генератора с транспортером-проводником

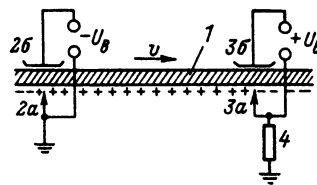


Рис. 54.46. Принципиальная схема генератора с транспортером-диэлектриком

На рис. 54.45 представлена схема генератора с проводящим цилиндрическим транспортером. неподвижная часть генератора — статор — состоит из изолированных друг от друга полуцилиндров 2, к которым подводится напряжение возбуждения. Вращающаяся часть — ротор также состоит из двух изолированных половин 1, с которыми соприкасаются щетки 3, соединенные с нагрузкой 4. В пространстве между статором и ротором при включенном напряжении возбуждения возникает электрическое поле, а на полуцилиндрах ротора индуцируются заряды разных знаков. Эти заряды максимальны при совпадении положения полуцилиндров статора и ротора, при повороте на  $180^\circ$  заряд каждого полуцилиндра ротора опять достигает максимума, но с переменной знака. Поскольку щетки попеременно касаются каждой из половин ротора, в нагрузке будет протекать ток неизменного направления.

Мощность генератора определяется площадью активной поверхности ротора и статора, частотой вращения и плотностью энергии в рабочем зазоре машины. Последняя связана с напряжением возбуждения и соответствующим ему значением напряженности в пространстве между ротором и статором. Предельная напряженность определяется электрической прочностью среды. Электростатические генераторы заполняются газом под давлением, однако это приводит к увеличению потерь на трение при вращении ротора.

Более широкое распространение в качестве источников питания устройств электроокраски, при напылении порошковых покрытий получили электростатические генераторы с транспортером из диэлектрика (рис. 54.46). Здесь 1 — изоляционный транспортер зарядов, движущийся с некоторой скоростью (ротор). Элементы статора осуществляют зарядку (2а, 2б) и разрядку (3а, 3б) поверхности транспортера. Зарядное и разрядное устройство состоит из ионизаторов 2а и 3а и индукторов 2б и 3б. В зарядном устройстве индуктор заземлен, а в разрядном соединен с нагрузкой 4.

При приложении между индуктором и ионизатором зарядного устройства напряжения



возбуждения  $U_B$ , превышающего критическое, на ионизаторе, представляющем собой тонкую проволоку, тонкую пластинку или ряд игл, возникает электрический разряд. Образующиеся ионы осаждаются на поверхности транспортера и уносятся им.

На высоковольтном полюсе между индуктором и ионизатором прикладывается напряжение  $U_B$  противоположного знака. На ионизаторе возникает разряд также обратного знака, благодаря чему с транспортера снимается заряд, который и создает ток через нагрузку. Подключение между электродами полюса высокого напряжения  $U_B$  связано с трудностями. Вместе с тем можно обеспечить разряд с ионизатора в поле заряда, доставленного с транспортером, поэтому в большинстве конструкций генераторов ионизатор  $3a$  и индуктор  $3б$  объединяют накоротко.

Среди различных видов генераторов с транспортером из диэлектрика нашли распространение генераторы с цилиндрическим ротором. Обычно они заполняются водородом при давлении 1–2 МПа. Разработаны генераторы мощностью от десятков ватт до нескольких киловатт.

Достоинствами электростатических генераторов являются надежность работы, стабильность напряжения на выходе, отсутствие пульсации, малые размеры и масса. При массовом производстве может быть обеспечена их сравнительно небольшая стоимость.

### Список литературы

- 54.1 Лившиц А. Л., Отто М. Ш. Импульсная электротехника М Энергоатомиздат, 1983 352 с
- 54.2 Донский А. В., Келлер О. К., Кратый Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки Л Энергоиздат, 1982 208 с
- 54.3 Волков Ю. С., Лившиц А. Л. Введение в теорию формообразования электрофизикохимическими методами Киев Вища школа, 1978 118 с
- 54.4. Электронимпульсная обработка металлов А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сосенко М. Машиностроение, 1967 295 с
- 54.5. Попилов Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов Л Машиностроение, 1971 544 с.
- 54.6. Лившиц А. Л., Рогачев И. С., Отто М. Ш. Генераторы импульсов М Энергия, 1970 224 с
- 54.7 Фрунгель Ф. Импульсная техника Генерирование и применение разрядов конденсаторов Пер с нем М Энергия, 1965 488 с
- 54.8 Размерная электрическая обработка материалов/Б. А. Артамонов, А. Л. Винницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков. М.: Высшая школа, 1978 336 с
- 54.9 Отто М. Ш., Коренблюм М. В. Схемы и конструкции генераторов для питания электроэрозионных станков М Информэлектр, 1977 51 с
- 54.10 Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов М Машиностроение, 1975 29 с
- 54.11. Волков И. В., Вакуленко В. И. Источники электропигания лазеров Киев, Техника, 1976. 176 с
- 54.12 Импульсные источники света/Под ред И. С. Маршака. М. Энергия, 1978. 447 с
- 54.13 Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки М Машиностроение, 1978 239 с
- 54.14 Селькин Ф. В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин М. Машиностроение, 1976 302 с.
- 54.15 Сафронов А. И., Болларенко Н. Н., Розман Я. Б. Источники технологического тока для электрохимических станков и гальванических ванн М. НИИмаш, 1975. 70 с.
- 54.16. Коренблюм М. В., Левит М. Л., Лившиц А. Л. Адаптивное управление электроэрозионными станками. М НИИмаш, 1978 80 с
- 54.17. Электрохимические и электрофизические станки/Под ред А. Л. Лившица Каталог М НИИмаш, 1978. 228 с.
- 54.18. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей/И. В. Волков, В. И. Губаревич, В. Н. Исаков и др. Киев: Наукова думка, 1981. 174 с.
- 54.19 Булатов О. Г., Царенко А. И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи М. Энергоиздат, 1982 216 с.
- 54.20. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. М Наука, 1971. 155 с
- 54.21. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта, Г. А. Гудый, П. П. Малюшевский, С. А. Пегуренко и др. М Машиностроение 1977 320 с
- 54.22 Малюшевский П. П. Основы разрядно-импульсной технологии. Киев Наукова думка, 1983 270 с
- 54.23. Мазуровский Б. Я., Силёв А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке Киев Наукова думка, 1983. 192 с
- 54.24 Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред/Г. Н. Гаврилов, Г. Г. Горюченко, П. П. Малюшевский, А. Г. Рябинин. Киев Наукова думка, 1979. 164 с
- 54.25 Кривичкий Е. В., Шамко В. В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде Киев Наукова думка, 1979 208 с
- 54.26. Импульсные методы обработки материалов. Минск Наука и техника, 1977. 216 с.
- 54.27 Белый И. В., Фертг С. М., Хименко Л. Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов Харьков Вища школа, 1977 168 с
- 54.28 Фукс Н. А. Механика аэрозолей М Изд-во АН СССР, 1955 352 с
- 54.29 Основы электрогазодинамики дисперсных систем/И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабеян, М. М. Пашин. М Энергия, 1974. 480 с
- 54.30. Верещагин И. П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии М. Энергоатомиздат, 1985 160 с
- 54.31 Физические основы электросепарации/Под ред. В. И. Ревинцева М Недра, 1983 271 с
- 54.32 Дымовые электрофильтры Под ред В. И. Левитова М Энергия, 1980 448 с
- 54.33 Попков В. И., Глазов М. И. Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле М Наука, 1976. 128 с.
- 54.34. Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология)/Под ред В. И. Попкова М Энергия Вып. 1, 1969 Вып. 2, 1972 Вып. 3, 1979
- 54.35 Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения М Недра, 1977 519 с
- 54.36 Аэрозоли: К. Спурный, Ч. Йех, Б. Седлачек, О. Шторх Пер с чеш. Под ред К. П. Маркова

и М Н Пчельникова М. Атомиздат, 1964 360 с  
 54 37 Яковлев А. Д., Здор В. Ф., Каплан В. И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе Л Химия, 1979 250 с  
 54 38 Окраска изделий в электрическом поле

Под ред. Е Н Владычиной. М М Гольдберга М Химия, 1966 224 с  
 54 39 Воробьев А. А. Сверхвысокие электрические напряжения М Госэнергоиздат, 1955 424 с  
 54 40 Страттон Д. А. Теория электромагнетизма М — Л ОГИЗ, 1948 530 с

## Раздел 55

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ, ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ И КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

## СОДЕРЖАНИЕ

55.1 Оборудование для дуговой и электрошлаковой сварки Источники питания сварочной дуги (265) Требования, предъявляемые к сварочным машинам и аппаратам (266) Сварочные однопостовые трансформаторы (267) Источники питания постоянного тока (269) Сварочные выпрямители (272). Специализированные источники питания (273) Автоматы для дуговой сварки (274). Аппараты для электрошлаковой сварки (275)

55.2 Оборудование для контактной сварки. Основные требования к оборудованию (278) Машины для точечной сварки (278) Машины для рельефной сварки (282) Машины для шовной сварки (283) Машины для стыковой сварки (283) Системы управления машинами контактной сварки (284)

Список литературы . . . . . 286

### 55.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

#### Источники питания сварочной дуги

В сварочной технике различают три случая использования электрической дуги: 1) открытая дуга, горящая в воздухе, парах металла и компонентах электродных покрытий (используется в основном при ручной сварке); 2) закрытая дуга, горящая под флюсом в парах металла и флюса (используется при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом); 3) защищенная дуга, горящая в защитных газах: аргоне, гелии, двуокиси углерода и др. (находит применение при автоматической и ручной сварке как плавящимся, так и неплавящимся электродом).

Зависимость напряжения от тока  $[U_d = f(I)]$  при постоянной длине дуги  $l_d$  (вольт-амперная характеристика дугового разряда — ВАХ) в общем случае имеет три участка:

падающий (рис. 55.1) при малых значениях, жесткий (рис. 55.1, б) при средних и возрастающий (рис. 55.1, в) при больших значениях тока. Форма и рабочий участок ВАХ дугового разряда при данном способе сварки кроме тока определяется составом газовой атмосферы, материалом электродов, их размерами и др. Так, например, при ручной дуговой сварке чаще всего используется падающий или жесткий участок, при автоматической под флюсом — жесткий или возрастающий, при автоматической и полуавтоматической сварке в защитных или инертных газах — возрастающий.

В зависимости от используемого (рабочего) участка сварочной дуги для обеспечения устойчивой работы системы источник питания — сварочная дуга необходимо выбирать тот или иной вид внешней характеристики источника  $[U_{\text{н}} = f(I)]$ . Система источник питания — сварочная дуга работает устойчиво, без корректирующих обратных связей (например, при постоянной скорости подачи электрода),

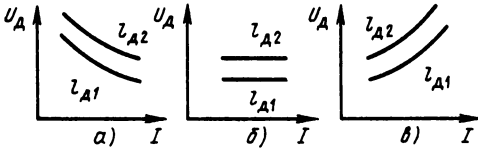


Рис. 55.1. Вольт-амперные характеристики дуги:

а – падающий участок; б – жесткий участок; в – возрастающий участок,  $l_d$  – длина дуги ( $l_{d2} > l_{d1}$ )

если коэффициент устойчивости

$$K_y = (\partial U_d / \partial I - \partial U_n / \partial I) > 0.$$

Поэтому при падающей ВАХ дуги система работает устойчиво при крутопадающей внешней характеристике источника, причем в рабочей точке должно выдерживаться соотношение  $|\partial U_n / \partial I|_p > |\partial U_d / \partial I|_p$ . При жесткой ВАХ дуги  $|\partial U_d / \partial I|_p = 0$  источник должен иметь падающую внешнюю характеристику  $\partial U_n / \partial I < 0$ , а при возрастающей ВАХ дуги можно использовать источник с падающей, жесткой или возрастающей характеристикой. Однако при использовании источника с возрастающей внешней характеристикой необходимо, чтобы  $|\partial U_n / \partial I|_p < |\partial U_d / \partial I|_p$ .

При дуговой сварке плавящимся электродом регулярно происходит короткое замыкание (КЗ) дугового промежутка, например при возбуждении дуги и при переходе капли расплавленного металла с электрода в сварочную ванну. Моменты КЗ и горения дуги чередуются, причем длительность каждого процесса измеряется долями секунды. Напряжение и ток переходного процесса отличаются от их значений в режиме устойчивого горения, поэтому при использовании источников, которые имеют большие времена переходных процессов, это может привести к обрыву дуги или затруднить ее возбуждение. Сварочные трансформаторы обладают малой электромагнитной инерцией, а у сварочных генераторов она больше. Проверку показателей сварочных свойств источников питания для дуговой сварки осуществляют по ГОСТ 25616-83 (СТ СЭВ 3235-81).

Источники питания для сварки различают: по роду тока – переменного (трансформаторы и генераторы повышенной частоты) и постоянного (генераторы, преобразователи и выпрямители); по виду внешних характеристик – с падающей, жесткой или полого-возрастающей; по способу установки – стационарные и передвижные; по назначению – одно- и многопостовые, универсальные и специализированные, для ручной, автоматической и полуавтоматической дуговой сварки плавящимся и не-

плавящимся электродом в защитных, инертных газах и под флюсом, плазменно-дуговой сварки и резки и электрошлаковой сварки; по схеме подключения – одно- и трехфазные.

### Требования, предъявляемые к сварочным машинам и аппаратам

Источники питания сварочной дуги должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Напряжение холостого хода источника должно быть достаточным для возбуждения дуги и безопасным для человека.
2. После возбуждения дуги напряжение источника должно уменьшаться до значений, соответствующих напряжению горения дуги.
3. При изменении длины дуги не должно происходить значительного изменения сварочного тока.
4. При КЗ ток в цепи не должен превышать рабочий ток при сварке более чем на 20–40 %.
5. Источник тока должен обеспечивать возможность легкого и плавного регулирования сварочного тока.
6. Источник должен обладать хорошими динамическими свойствами.
7. КПД источника тока должен быть достаточно высоким.

Сварочное оборудование, выпускаемое промышленностью СССР, имеет единую систему обозначений, которая состоит из буквенной и цифровой части (рис. 55.2).

А – наименование изделия (А – агрегат, В – выпрямитель, И – источник питания, П – преобразователь, Т – трансформатор);

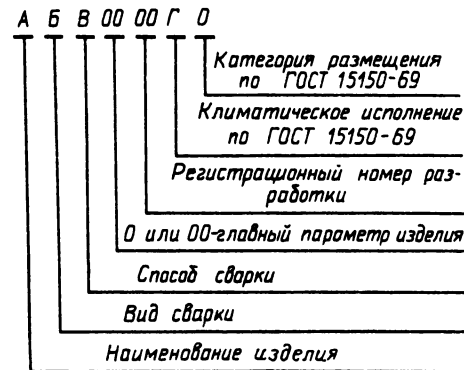


Рис. 55.2. Структура обозначения оборудования для сварки

Б – вид сварки (Д – дуговая, П – плазменная);

В – способ сварки (О – открытой дугой, Ф – под флюсом, Г – в защитном газе). Отсутствие буквы означает ручную сварку штучным электродом. Дополнительно могут использоваться буквы М – для многопостовой сварки, И – импульсной, Б – с бензиновым двигателем, Д – с дизельным двигателем. Первые две или одна цифры – номинальный сварочный ток в сотнях ампер, последующие две цифры – регистрационный номер;

Г – климатическое исполнение (У – умеренного, Т – тропического или ХЛ – холодного климата); последующая цифра обозначает категорию помещения, для которого оно предназначено (1 – открытый воздух, 2 – палатки-прицепы и кузова автомобилей, 3 – помещения с естественной вентиляцией, 4 – помещения с принудительной вентиляцией и отоплением, 5 – помещения с повышенной влажностью).

### Сварочные однопостовые трансформаторы

Сварочные однопостовые трансформаторы изготавливаются для сварки и наплавки – ручной дуговой (ГОСТ 95-77Е) и автоматической под флюсом (ГОСТ 7012-77Е) на первичное напряжение 220 и 380 В. Сварочный трансформатор должен обеспечивать горение дуги при всех токах в пределах регулировочного диапазона при номинальном первичном напряжении, а также при понижении его на 10 % и при па-

дении напряжения в соединительных проводах сварочной цепи, не превышающем 2 В.

Технические данные некоторых сварочных трансформаторов приведены в табл. 55.1.

Сварочные трансформаторы (рис. 55.3, а–г) можно разделить по способу получения падающей характеристики на три группы:

1. Трансформаторы с нормальным рассеянием и отдельным дросселем 1 (рис. 55.3, а), включенным последовательно в сварочную цепь. Сварочный ток плавно регулируется изменением зазора  $a$  между подвижной и неподвижной частями. При  $a = 0$  сварочный ток минимальный, при максимальном зазоре – максимальный. По этой схеме выпускаются передвижные трансформаторы СТЭ-24У, СТЭ-34У.

2. Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием. Увеличенные потоки рассеяния создаются:

размещением первичной обмотки 2 и вторичной обмотки 3 на разных стержнях магнитопровода 4 (рис. 55.3, в);

удалением первичных обмоток 2 от вторичных 3 (рис. 55.3, г);

размещением в окне магнитопровода 4 магнитного шунта 5 – подвижного или неподвижного (рис. 55.3, в и д). Иногда эти способы комбинируются.

Выпускаются следующие трансформаторы такого типа: с подвижным магнитным шунтом СТАН-0, ОСТА-350, СТШ-250, СТШ-500, СТШ-500-80; с неподвижным магнитным шун-

Таблица 55.1. Технические данные сварочных трансформаторов

Показатель	СТЭ-24У	СТЭ-34У	СТН-500-1	СТН-700	ТСД-500-1	ТСД-1000-4	ТСД-2000-2
Пределы регулирования сварочного тока, А	100–500	150–700	150–700	200–900	200–600	400–1200	800–2200
Вторичное напряжение холостого хода, В	60	60	60	60	80	69–70	72–84
Номинальная мощность, кВт А	23	–	32	43,5	42	78	162
КПД при номинальном режиме, %	83	86	85	85	87	90	90
Масса трансформатора и дросселя (реактора), кг	130/90	160/100	275	380	450	510	675

Продолжение табл. 55.1

Показатель	ТД-102	ТД-306	ТД-300	ТД-500	ТД-502	ТДФ-1001	ТДФ-1601
Пределы регулирования сварочного тока, А	55–175	90–300	60–385	90–650	100–560	400–1200	600–1800
Вторичное напряжение холостого хода, В	80	80	61–79	60–76	60–76	68–71	74–79
Номинальная мощность, кВт А	11,4	19,4	20	32	26,5	82	170
КПД при номинальном режиме, %	72	72	88	85	85	87	88
Масса трансформатора и дросселя (реактора), кг	38	71	137	210	240	720	1000

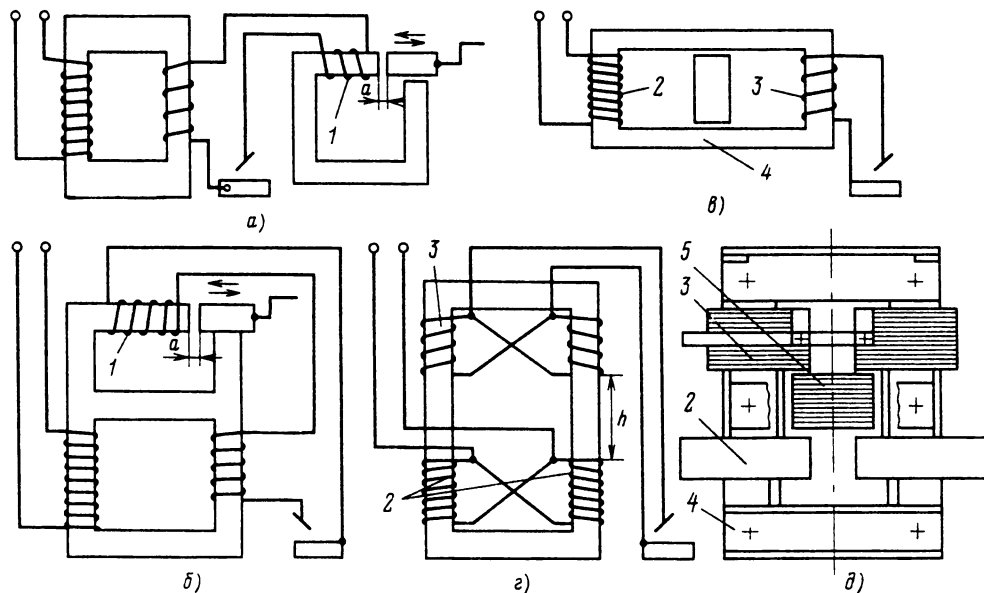


Рис. 55.3. Принципиальные схемы трансформаторов:

*a* — с нормальным магнитным рассеянием и отдельным дросселем; *б* — с реактивной обмоткой на общем магнитопроводе; *в* — с размещением обмоток на разных стержнях магнитопровода; *г* — с удалением первичных обмоток от вторичных, *д* — с магнитным шунтом в магнитопроводе

том и помещенной на нем обмоткой управления ТДФ-1001 и ТДФ-2001; с подвижными вторичными обмотками ТС-300, ТС-500, ТСК-300, ТСК-500, ТД-102, ТД-300, ТД-500.

Кроме того, для сварки используются трансформаторы (рис. 55.3 б) типа ТСД-500-1, ТСД-1000-4, ТСД-2000-2 и СТН-350, СТН-500, СТН-500-1, СТН-700, которые являются по свойствам смешанными, так как сочетают свойства как трансформаторов типа СТЭ, так и трансформаторов типа ТДФ.

3. Трансформаторы с жесткой характеристикой (для электрошлаковой сварки) ТШС-1001-1, ТШС-3000-1 (однофазные) и ТШС-600-3, ТШС-1000-3, ТШС-3000-3 (трехфазные) имеют секционные первичные и вторичные обмотки для регулирования вторичного напряжения.

В трансформаторах типа СТШ, принципиальная схема которых приведена на рис. 55.3, д, первичная обмотка 2 закреплена в нижней части магнитопровода 4, а вторичная 3 — в верхней. Магнитный шунт 5, расположенный между обмотками, состоит из двух частей, которые могут раздвигаться или сдвигаться. Когда части шунта раздвинуты, магнитный поток рассеяния уменьшен — сварочный ток максимален. а когда сдвинуты — минимален.

Трансформаторы для ручной дуговой сварки типа ТД обладают увеличенным индуктивным рассеянием обмоток и имеют внешние характеристики падающей формы. Магнитопровод трансформаторов — стержневого типа. Конструкция трансформатора позволяет перемещать катушки вторичной обмотки. Катушки первичной обмотки неподвижны и закреплены у нижнего ярма. Вторичные катушки перемещаются с помощью ходового винта, пропущенного через верхнее ярмо. Трансформатор снабжен переключателем диапазонов сварочного тока. Пределы регулирования сварочного тока  $I_2$  обеспечиваются для всех трансформаторов при рабочем напряжении на выводах трансформатора  $U_2 = 20 + 0,04I_2$ .

Принципиальная схема трансформатора типа ТД приведена на рис. 55.3, в. На рис. 55.4 приведены внешние характеристики трансформатора ТД-500.

Трансформаторы ТДФ-1001 и ТДФ-1601 — стационарные, в этих трансформаторах первичные и вторичные обмотки разнесены на значительное расстояние.

Сварочные трансформаторы типа ТДФ (рис. 55.5) имеют магнитопровод стержневого типа, в котором размещен магнитный шунт МШ с обмотками управления  $w_y$ . На каждом стержне магнитопровода размещены первичная

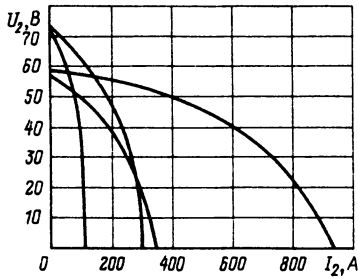


Рис. 55.4. Внешние характеристики трансформатора ТД-500

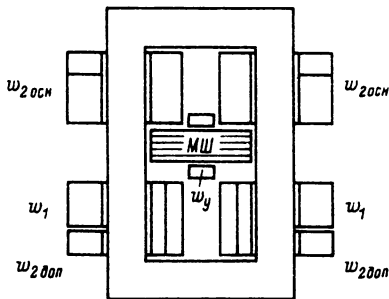


Рис. 55.5. Конструкция магнитопровода и размещение обмоток у трансформатора ТДФ-1001

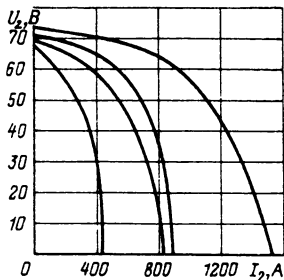


Рис. 55.6. Внешние характеристики трансформаторов типа ТДФ

$w_1$  и вторичная  $w_2$  обмотки трансформатора. Вторичная обмотка состоит из двух частей: основной части  $w_{2осн}$ , расположенной у верхнего яра магнитопровода, и дополнительной части, витки  $w_{2доп}$  которой размещены у нижнего яра. Трансформаторы типа ТДФ имеют ступенчато-плавное регулирование сварочного тока. Ступенчатое регулирование осуществляется переключением катушек вторичной обмотки, плавное, в пределах ступени, — изменением

тока подмагничивания в обмотке шунта  $w_y$ . Большему току подмагничивания соответствует больший сварочный ток и наоборот.

Внешние характеристики трансформаторов типа ТДФ приведены на рис. 55.6.

#### Источники питания постоянного тока

Источники питания постоянного (ГОСТ 304-82) тока для автоматической, полуавтоматической и ручной дуговой сварки и наплавки можно разделить на вращающиеся электромашинные преобразователи и сварочные выпрямители.

В зависимости от схемы получения падающей характеристики различают сварочные генераторы:

- 1) с намагничивающей обмоткой независимого возбуждения и размагничивающей последовательной обмоткой;
- 2) с параллельным самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой.

Технические данные некоторых сварочных преобразователей приведены в табл. 55.2.

Преобразователь ПС-300-1 состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и сварочного генератора типа ГСО-300, смонтированных в одном корпусе. Генератор ГСО-300 с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой имеет падающие внешние характеристики. Принципиальная электрическая схема генератора ГСО-300 приведена на рис. 55.7, а. Намагничивающая обмотка возбуждения  $w_b$  генератора получает питание от основной и дополнительной шеток, при этом напряжение на щетках практически не зависит от сварочного тока. Падающая внешняя характеристика (рис. 55.7, б) создается за счет размагничивающего действия последовательной обмотки  $w_p$  с использованием взаимодействия магнитных потоков обмоток возбуждения  $\Phi_b$  и размагничивающей последовательной  $\Phi_p$  и поперечной реакции якоря. Регулирование сварочного тока у генератора ГСО-300 ступенчато-плавное. Ступенчатое регулирование (положение 2 или 3 переключателя) осуществляется изменением числа витков обмотки  $w_p$ , плавное — регулированием в пределах каждой ступени тока  $I_b$  в цепи намагничивающей обмотки.

Преобразователь ПС-500 (рис. 55.8, 55.9) состоит из генератора постоянного тока ГС-500 и асинхронного двигателя. Исполнение генератора — однокорпусное, защищенное. Генератор ГС-500 относится к генераторам с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками возбуждения. Ге-

Таблица 55.2. Основные технические данные преобразователей постоянного тока

Показатель	С независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой				
	ГСО-120	ГСО-300А	ПД-303	ГСО-500	СГ-1000III
Тип генератора	ГСО-120	ГСО-300А	—	ГСО-500	СГ-1000III
Напряжение холостого хода, В	48—65	55—80	65	58—86	90
Пределы регулирования сварочного тока, А	30—120	75—300	80—300	125—500	300—1200
Мощность преобразователя, кВ·А	4,0	12,5	10	28	45
Размеры, мм:					
длина	1055	1015	1052	1275	1465
ширина	550	590	508	770	770
высота	730	980	996	1080	910
Масса, кг	155	400	331	540	1600

Продолжение табл. 55.2

Показатель	С самовозбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой				С самовозбуждением и жесткой характеристикой
	ПД-101	ПС-300-1	ГСО-300М	ГСО-500	ГСГ-500-1
Тип генератора	ГД-101	ГСО-300	ГСО-300М	ГСО-500	ГСГ-500-1
Напряжение холостого хода, В	80	75	50—76	62—80	40
Пределы регулирования сварочного тока, А	15—135	75—320	80—380	120—600	60—500
Мощность преобразователя, кВ·А	7,5	14	14	28	28
Размеры, мм:					
длина	—	1026	1200	1400	1052
ширина	—	590	755	770	590
высота	—	838	1180	1100	1013
Масса, кг	222	430	600	940	500

генератор имеет четыре основных и четыре дополнительных полюса. Намагничивающая обмотка размещена на всех четырех основных полюсах, а размагничивающая, последовательная — только на двух основных полюсах.

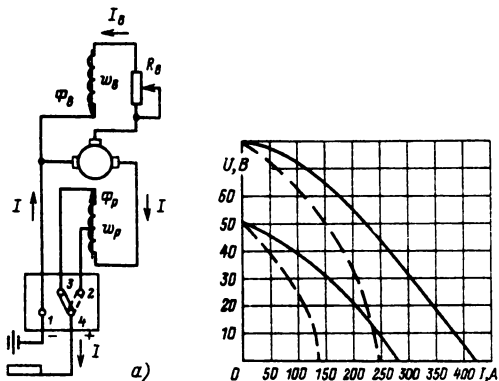


Рис. 55.7. Принципиальная электрическая схема (а) и внешние характеристики (б) генератора ГСО-300 с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой

Преобразователь ПД-501 имеет однокорпусное исполнение, приводом является трехфазный асинхронный двигатель, а генератором — генератор типа ГСО-500. Генератор ГСО-500 имеет независимое возбуждение и последовательную размагничивающую обмотку. Принципиальная электрическая схема генератора ГСО-500 отличается от схемы рис. 55.7, а тем, что обмотка независимого возбуждения  $w_b$  получает питание от выпрямительного блока через феррорезонансный стабилизатор напряжения.

На рис. 55.10 приведены внешние характеристики генератора ГСО-500. Сплошными линиями показаны внешние характеристики при установке генератора на ступень больших токов, штриховыми — на ступень малых токов.

Преобразователь ПСГ-500-1 имеет встроенный трехфазный асинхронный двигатель и генератор ГСГ-500-1 с самовозбуждением (рис. 55.11, а), который имеет жесткие внешние характеристики (рис. 55.11, б), что достигается применением специальной схемы самовозбуждения. Магнитная система генератора имеет

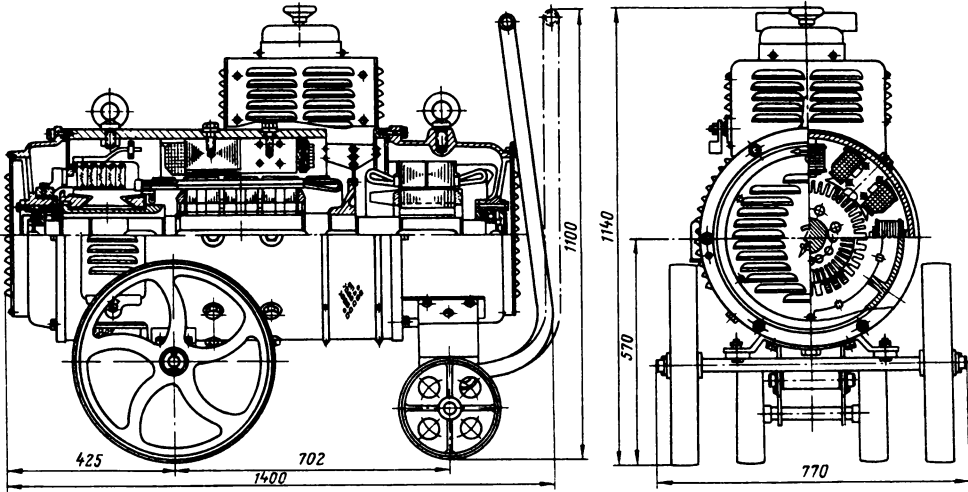


Рис. 55.8. Сварочный преобразователь ПС-500

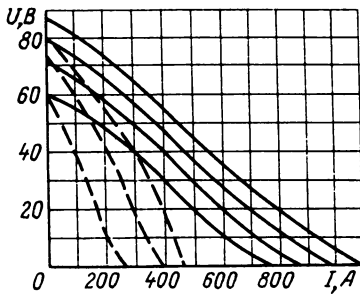


Рис. 55.9. Внешние характеристики генератора ГС-500

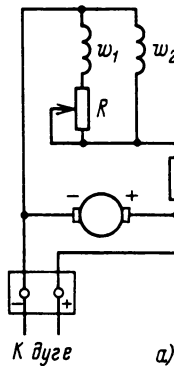


Рис. 55.11. Принципиальная электрическая схема (а) и внешние характеристики (б) генератора ГСГ-500-1:

1 – малое сопротивление  $R$ ; 2 – большое сопротивление  $R$

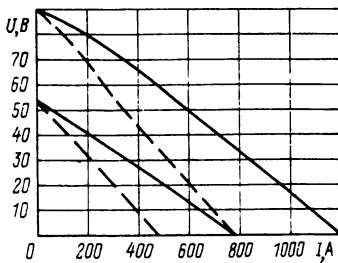
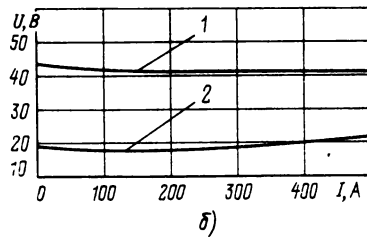


Рис. 55.10. Внешние характеристики генератора ГСО-500





четыре основных полюса и четыре добавочных, обеспечивающих безыскровую работу щеток. Катушки обмотки возбуждения, расположенные на ненасыщенных полюсах,  $w_1$  и катушки обмотки возбуждения насыщенных полюсов  $w_2$  включены параллельно. Регулирование выходного напряжения генератора осуществляется резистором  $R$ , включенным в цепь обмотки возбуждения, расположенной на ненасыщенных полюсах. Сварочный генератор ГСГ-500-1 имеет пределы изменения выходного напряжения от 16 до 40 В.

### Сварочные выпрямители

В последние годы в связи с развитием силовой полупроводниковой техники выпрямители (табл. 55.3) получают все большее применение в установках для питания сварочной дуги. Сварочный выпрямитель состоит из трансформатора с устройством для регулирования тока и выпрямительного блока, собранного по трехфазной мостовой схеме.

Динамические свойства выпрямителей из-за меньшей электромагнитной инерции лучше, чем генераторов постоянного тока. Отсутствие вращающихся частей и коллектора делает выпрямители более надежными и простыми, чем генераторы постоянного тока; КПД выпрямителей также несколько выше, чем сварочных преобразователей с генераторами постоянного тока.

Однополюстные сварочные выпрямители с падающими внешними характеристиками ВД-306 и ВД-502 выполнены передвижными, рассчитаны на перемежающийся режим рабо-

ты при принудительном воздушном охлаждении. Для формирования падающей внешней характеристики и плавного регулирования сварочного тока использован управляемый реактор, включенный во вторичную цепь трансформатора. Выпрямитель ВД-502 стабилизирован. Установленный выпрямленный ток в диапазоне 100–500 А поддерживается с точностью 2,5% при понижении напряжения сети на 10%.

Однополюстные сварочные выпрямители с жесткими внешними характеристиками выпускаются отечественной промышленностью типов ВДГ и ВСЖ. Выпрямители ВДГ – передвижные, рассчитаны на повторно-кратковременный режим работы ПВ = 60% при принудительном воздушном охлаждении.

Выпрямители ВДГ-302 и ВДГ-601 предназначены для комплектации сварочных полуавтоматов унифицированной серии. Упрощенная схема стабилизированного выпрямителя ВДГ-302 приведена на рис. 55.12. Регулирование напряжения – плавно-ступенчатое. Ступенчатое регулирование производят путем изменения коэффициента трансформации трансформатора  $T$ , плавное регулирование в пределах каждой ступени – управляемым трехфазным дросселем насыщения  $A$ . Соединению первичной обмотки треугольником с использованием отводов соответствует первая ступень регулирования рабочего напряжения; соединению полных обмоток треугольником – вторая ступень регулирования; соединению обмоток с использованием отводов звездой – третья ступень регулирования. Обмотки переключаются пакетно-кулачковым переключателем на три положения (1–3).

Таблица 55.3. Основные технические данные сварочных выпрямителей

Показатель	Тип выпрямителя							
	С падающей внешней характеристикой		С жесткой внешней характеристикой		Универсальные			
	ВД-306	ВД-502	ВДГ-302	ВДГ-601	ВДУ-305	ВДУ-504	ВДУ-1201	ВДУ-1601
Продолжительность цикла сварки, мин	5	10	—	—	10	10	Продолжительный	
Пределы регулирования тока, А	45–315	50–500	50–315	100–700	50–315	100–500	300–1250	500–1600
Номинальное рабочее напряжение, В	32,6	40	38	66	38	50	66	66
Напряжение холостого хода, В	70	80	55	90	70	80	100	100
Первичная мощность, кВ·А, не более	24	42	19	69	23	40	120	155
Габаритные размеры, мм:								
длина	780	550	748	900	634	1100	1400	1150
ширина	772	805	1045	1250	975	800	850	900
высота	850	1062	953	1125	760	940	1250	1850
Масса, кг	200	370	275	570	240	380	850	950

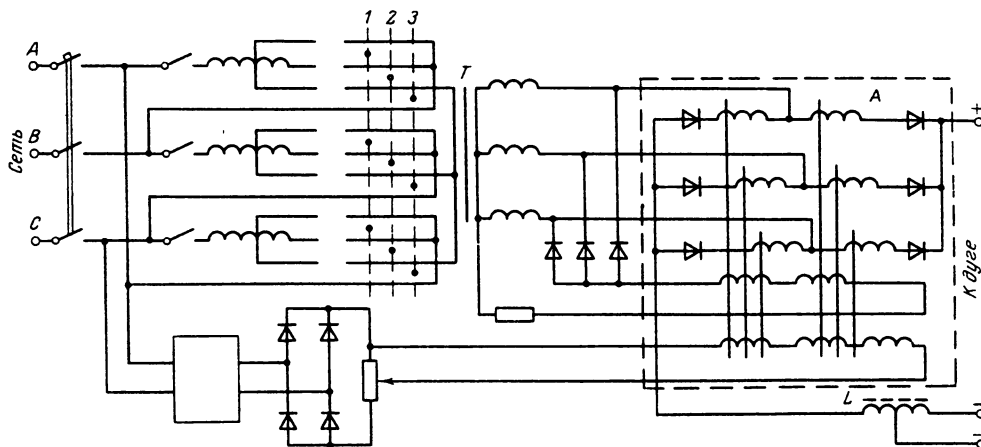


Рис. 55.12. Упрощенная электрическая схема выпрямителя ВДГ-302

Источники питания серии ВДУ называют универсальными сварочными выпрямителями, так как их электрические схемы предусматривают переключение для работы как с жесткими, так и с падающими внешними характеристиками. Универсальные сварочные выпрямители серии ВДУ обеспечивают плавное дистанционное регулирование выходных тока и напряжения, стабилизацию режима при изменении напряжения сети.

Выпрямители типов ВДУ-306, ВДУ-604 предназначены для однопостовой сварки в углекислом газе и ручной сварки штучными электродами, выпрямители ВДУ-1201 и ВДУ-1601 — для автоматической сварки под флюсом и в защитных газах.

#### Специализированные источники питания

Большинство специализированных источников питания серии ВСВУ, ВСВ, ВСП, ВПР, ТИР (табл. 55.4) выпускаются на номинальное напряжение питающей сети 380 В, с номиналь-

ной относительной продолжительностью нагрузки 60%, продолжительность цикла сварки 60 мин; предназначены для работы в умеренных климатических условиях в помещениях с естественной вентиляцией (У3) при температуре окружающей среды не ниже +5 °С; выполнены с применением обратной связи по току и напряжению; у них предусмотрено управление формой, величиной и продолжительностью импульса тока; обеспечена стабилизация сварочного тока в пределах  $\pm 2,5\%$  при изменении напряжения питающей сети  $\pm 10\%$  и температуры окружающей среды от +5 до +35 °С.

Источники питания серии ВСВУ (рис. 55.13) выпускаются на токи 40, 80, 160, 315, 630 А и предназначены для автоматической сварки сжатой дугой неплавящимся электродом Э изделий И из сталей и титановых сплавов в непрерывном и импульсном режимах с автоматическим плавным регулированием нарастания тока в начале и снижением в конце сварки, изменением формы импульса сварочного тока от прямоугольного до треуголь-

Таблица 55.4. Основные технические данные специализированных источников питания

Показатель	ВСВУ-80	ВСВУ-630	ВСВ-1000	ВСВ-2000	ВСП-160	ВСП-1000	ТИР-300Д
Номинальный сварочный ток, А	80	630	1000	2000	160	1000	300
Пределы регулирования тока, А	3–90	10–700	25–1000	25–2000	40–180	150–1100	10–300
Номинальное рабочее напряжение, В	30	30	30	30	—	—	30
Напряжение холостого хода, В	180	480	1150	2150	240	1150	480
Масса, кг, не более	—	—	45	45	16–34	16–60	65

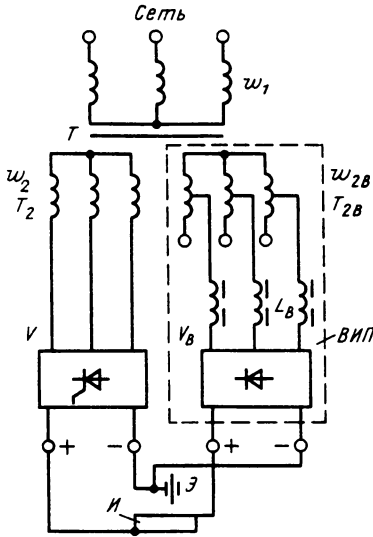


Рис. 55.13. Принципиальная электрическая схема силовой цепи источников питания серии ВСВУ

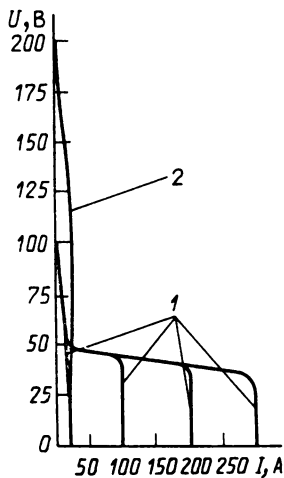


Рис. 55.14. Внешние характеристики источника питания ВСВУ-315:

1 — силового блока; 2 — блока ВИП

ного и плавным регулированием тока дежурной дуги от 2 до 30% номинального. Основными элементами источника являются силовой трехфазный трансформатор  $T$ , имеющий одну первичную обмотку  $w_1$  и две вторичные  $w_2$  — основную и  $w_{2B}$  — вспомогательную. Напряжение от вторичной обмотки подается на основной силовой выпрямитель  $V$ . Основной источник ( $w_2 - V$ ) имеет пологопадающую

характеристику (рис. 55.14). Вспомогательный источник питания ВИП содержит дополнительно к  $w_{2B}$  и  $V_B$  три линейных дросселя  $L_B$  с разъемными ферромагнитными магнитопроводами, имеет крутопадающую характеристику. Изменением зазора в разъемном магнитопроводе дросселя устанавливают требуемый ток возбуждения дуги. ВИП обеспечивает необходимое напряжение холостого хода, а для возбуждения дуги неконтактным способом в источнике установлен осциллятор типа ОСПЗ-300-М1.

Источники питания серии ВСВ предназначены для автоматической сварки сталей и титановых сплавов погруженной дугой неплавящимся электродом, обеспечивают возбуждение дуги на минимальном токе касанием электродом изделия и плавное нарастание тока в начале сварки и его снижение при заварке кратера (конец сварки).

Источники питания серии ВСП выпускаются на номинальный ток сварки 160, 215, 1000 А и предназначены для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов сталей, титановых и алюминиевых сплавов, имеют плавно регулируемую внешнюю падающую характеристику со значительным превышением тока короткого замыкания над рабочим (рис. 55.15).

Источники питания серии ВПР выпускаются на номинальный ток сварки 80, 315, 630 А и предназначены для плазменной резки сталей, титановых и алюминиевых сплавов, имеют повышенное напряжение холостого хода — 180 и 250 В.

Универсальный источник питания типа ТИР-300Д предназначен для дуговой сварки сталей, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов неплавящимся электродом, а также для ручной сварки покрытым электродом. В источнике использованы силовой трансформатор с малым магнитным рассеянием и дроссель насыщения, имеющий отдельные рабочие обмотки, коммутируемые тиристорами, что обеспечивает получение крутопадающей характеристики (рис. 55.16). Источник обеспечивает стабильное горение дуги, поддержание заданного значения тока и плавное увеличение тока с 5 А при возбуждении дуги до заданной величины за время около 0,4 с и его уменьшение при гашении дуги.

#### Автоматы для дуговой сварки

Автоматы для дуговой сварки могут быть: с плавящимся или неплавящимся электродом; одно- или многоэлектродные; для сварки в защитных газах или под флюсом; сварочные тракторы, самоходные сварочные головки или установки для автоматической сварки.

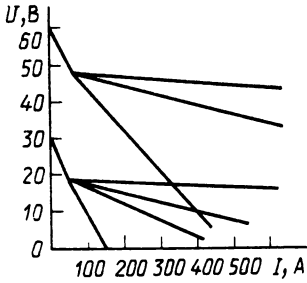


Рис. 55.15. Внешние характеристики источника питания ВСП-1000

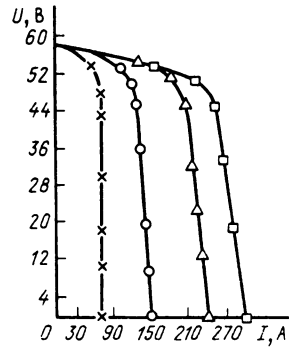


Рис. 55.16. Внешние характеристики источника питания ТИР-300Д

При работе автоматы для дуговой сварки обеспечивают: зажигание дуги, поддержание требуемого режима сварки, подачу электродной и присадочной проволок, перемещение автомата, сварочной головки или изделия, подачу флюса или защитного газа в зону дуги и окончание процесса сварки.

Основные технические данные, конструктивные особенности и назначение некоторых автоматов (тракторов) для дуговой сварки приведены в табл. 55.5 и 55.6, а на рис. 55.17 дан внешний вид трактора АДС-1000-4.

**Аппараты для электрошлаковой сварки**

Электрошлаковая сварка основана на использовании тепла, выделяющегося в жидком шлаке при прохождении через него сварочного тока.

При электрошлаковой сварке изделие устанавливается так, чтобы шов занимал вертикальное положение. Сварочное пространство для предупреждения вытекания металла из места сварки с двух сторон ограничивается

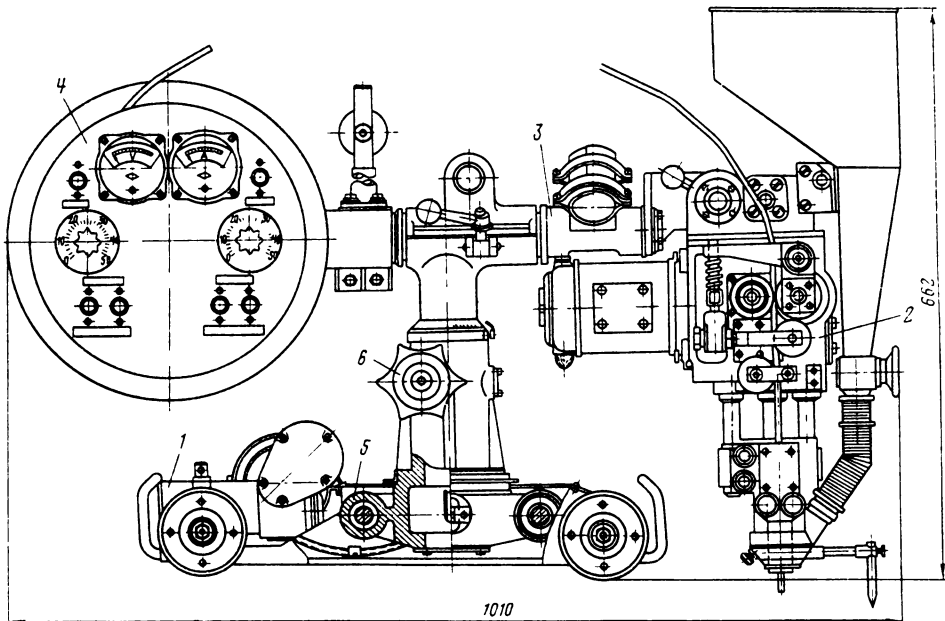


Рис. 55.17. Универсальный сварочный трактор АДС-1000-4:

1 — самодвижущаяся тележка; 2 — автоматическая головка; 3 — коромысло; 4 — пульт управления; 5 — поперечный суппорт; 6 — поворотный механизм

Таблица 55.5. Технические данные сварочных тракторов

Тип	Напряже- ние пи- тающей сети, В	Номина- льный сва- рочный ток, А	Электродная проволока		Скорость сварки, м/ч	Емкость бункера, дм <sup>3</sup>	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			Диаметр, мм	Скорость подачи, м/ч				
<i>Для сварки под флюсом</i>								
АДФ-500	380, 220	500	1,6–2,5	150–720	15–70	4	590 × 265 × 425	28
ТС-33	380	800	1,0–4,0	85–670	8–35	1,6	800 × 400 × 465	45
ТС-17М1У3	380, 220	1000	1,6–5,0	52–400	16–126	6,5	715 × 345 × 540	45
АДС-1000-5У3	380, 220	1000	2,0–5,0	60–360	12–120	6	1010 × 350 × 670	55
АДФ-1001У3	380	1000	2,0–5,0	18–360	12–120	6	1050 × 365 × 655	60
АДФ-1201	380	1250	2,0–6,0	60–360	12–120	—	1050 × 365 × 655	70
АДФ-1602У3	380	1600	3,0–6,0	18–360	12–120	6	1050 × 365 × 655	60
<i>Для сварки в защитных газах</i>								
ТС-49	380	250	0,8–1,2	210–320	50–75	—	500 × 230 × 440	21
АДСП-2	380	400	1,0–2,5	100–800	10–80	—	730 × 600 × 1050	63
АДГ-502У4	380	500	1,2–2,0	30–720	18–180	—	845 × 365 × 670	55
АДПГ-500-1	380	500	0,2–2,0	150–720	15–70	—	425 × 265 × 570	22
АСУ-6У	220	750	1,6–2,0	66–660	13–51	—	—	36
«Горизонт»	220	1000	3,0–4,0	150–600	10–60	—	950 × 470 × 450	55

Таблица 55.6. Назначение и конструктивные особенности сварочных тракторов

Тип	Конструктивные особенности	Назначение
<i>Для сварки под флюсом</i>		
АДФ-500	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно; скорость подачи не зависит от напряжения на дуге	Сварка углеродистой стали
ТС-33	Скорость подачи регулируется ступенчато независимо от напряжения на дуге; трактор снабжается специальным экраном с водяным охлаждением и колпаком для отсасывания газа, сварка может производиться внутри и вне колесной базы	Сварка полуоткрытой дугой листовых конструкций из алюминиевых сплавов
ТС-17М1	Скорость подачи электродной проволоки регулируется ступенчато	Сварка стыковых соединений с разделкой и без разделки кромок, нахлесточных и угловых соединений
АДС-1000-5	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно, скорость подачи зависит от напряжения на дуге	То же
<i>Для сварки в защитных газах</i>		
ТС-49	Скорость подачи и сварки регулируется ступенчато	Сварка нахлесточных швов
АДСП-2	В комплект входит сварочная головка АГП-2	Сварка углеродистой и легированной стали, а также легких сплавов
АДГ-502	Скорость подачи и сварки регулируется плавно;	Сварка на постоянном токе углеродистой стали
АДПГ-500-1	Скорость подачи не зависит от напряжения на дуге	Сварка кольцевых швов
«Горизонт»	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно	

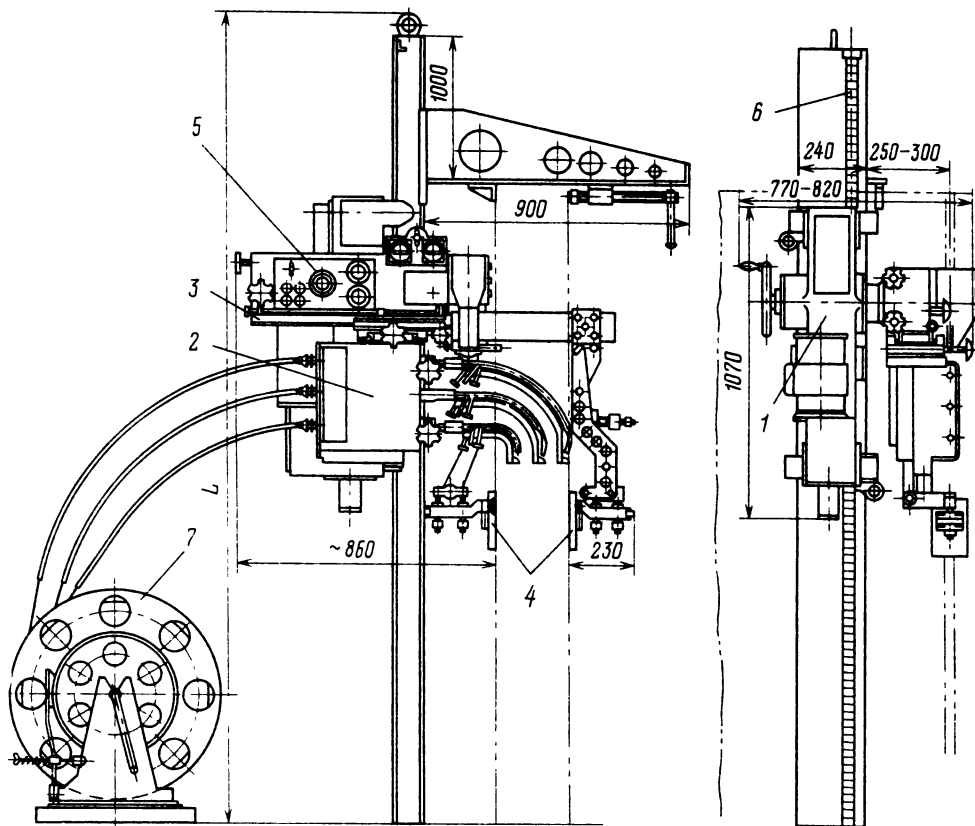


Рис. 55.18. Автомат А-535 для электрошлаковой сварки:

1 — ходовая тележка; 2 — трехэлектродная головка; 3 — механизм перемещения; 4 — формирующее устройство (накладки); 5 — пульт управления; 6 — рельс; 7 — катушка с проволокой

Таблица 55.7. Технические характеристики аппаратов для электрошлаковой сварки

Тип	Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток на электрод, А	Число электродов, шт.	Размер электродов, мм	Скорость, м/ч		Габаритные размеры аппарата, мм	Масса, кг
					сварки	подачи электрода		
<i>Рельсового типа</i>								
А-820МУ4	18—50	700	1	Ø2,5—3,0	4—15	58—580	350 × 250 × 650	16
А-433Р	150	750	1	Ø3,0	2,6—21	60—400	392 × 440 × 800	75
А-736	500	750	1	Ø3,0	1—5	160—320	340 × 240 × 490	—
А-372Р	20—250	1000	3	Ø3,0	1—10	150—480	1200 × 730 × 1560	320
А-535У4	450	1000	3	Ø3,0	0,4—9	60—480	1600 × 820 × 1070	380
А-550	200	3000	1	200 × 20	0,3—8	6,8—10	1200 × 575 × 2580	3780
<i>Безрельсового типа</i>								
А-612У4	20—100	1000	1	Ø3,0	0,4—4	130—444	750 × 370 × 870	70
А-645	800	2000	6	Ø3,0	0,5—10	60—150	380 × 440 × 550	35
<i>Подвешного типа</i>								
А-532	16—400	1000	3	Ø3,0	0,5—10	150—500	—	340
А-535К	16—300	1000	3	Ø3,0	0,4—9	65—480	1600 × 820 × 1070	380

Примечание Напряжение питающей сети 380 В, частота 50 Гц.

медными накладками – ползунами, охлаждаемыми водой. Сварочный аппарат перемещается вдоль кромок снизу вверх и постепенно заполняет весь зазор между ними расплавленным присадочным металлом.

Аппараты для электрошлаковой сварки классифицируются по способу перемещения вдоль свариваемого шва: 1) рельсовые автоматы, перемещающиеся по вертикальным рельсам, устанавливаемым параллельно шву; 2) безрельсовые автоматы, перемещающиеся непосредственно по свариваемому изделию.

Основные технические данные, конструктивные особенности и назначение некоторых аппаратов для электрошлаковой сварки приведены в табл. 55.7, а на рис. 55.18 дан внешний вид аппарата А-535.

### 55.2. Оборудование для контактной сварки

Машины общего назначения для точечной, рельефной, шовной и стыковой электрической контактной сварки изготавливаются по техническим требованиям, изложенным в ГОСТ 10594-80 (СТ СЭВ 3234-81) и ГОСТ 297-80, в которых предусмотрены параметрические ряды машин по продолжительным сварочным токам, номинальным усилиям сжатия и осадки, а также установлены номинальные вылеты электродов.

Для машин контактной сварки принята система обозначения, позволяющая определить тип оборудования, значение главного параметра и некоторые другие данные.

Оборудование любого типа обозначено буквами и цифрами (см. рис. 55.2). Первая буква характеризует изделие: установка – У, автомат – А, полуавтомат – П, машина – М и т. д. Вторая буква указывает вид контактной сварки: точечная – Т, рельефная – Р, шовная – Ш, стыковая – С. Если в буквенное обозначение входит третья буква, то она указывает либо конструктивное исполнение (многоэлектродная М), либо тип источника питания (постоянного тока В, конденсаторная К и т. д.).

Первые две цифры числовой части обозначения указывают сварочный ток в килоамперах для точечных, рельефных, шовных и стыковых машин для сварки методом сопротивления или усилие осадки в 10 кН для машин стыковой сварки методом оплавления. Вторые две цифры указывают номер конструктивного исполнения данного типа машины. Машина для точечной сварки с номинальным сварочным током 12,5 кА обозначается МТ-1217, машина для шовной сварки с номинальным током 32 кА – МШ-3204 и т. д.

Отечественная промышленность выпускает широкую номенклатуру машин для контактной сварки, которые могут быть классифицированы следующим образом:

по виду получаемых при сварке соединений – точечные, шовные, рельефные, стыковые;

по конструктивному исполнению – стационарные, подвижные, радиального типа, прессового типа, с встроенным трансформатором, с отдельным трансформатором и др.;

по типу источника сварочного тока – переменного или постоянного тока, низкочастотные, конденсаторные;

по типу усилия сжатия – с постоянным или переменным усилием;

по нормируемым техническим требованиям – группы А (с повышенной стабильностью параметров), группы Б (с нормальной стабильностью параметров).

#### Основные требования к оборудованию

Оборудование для контактной сварки рассчитано на питание от сети переменного тока частотой 50 Гц с напряжением 380 В.

Максимальное вторичное напряжение холостого хода не должно превышать 36 В; отношение вторичного максимального тока к минимальному должно быть не менее 1,8. Вторичный ток можно регулировать: ступенчато – изменением вторичного напряжения сварочного трансформатора и плавно – фазовым регулированием выпрямителя.

Машина должна быть снабжена отключающими устройствами, рассчитанными на максимальную мощность.

Машины рассчитываются на номинальную работу при колебаниях напряжения питающей сети от –10% до +5% номинального.

В машинах для контактной сварки предусматривается водяное охлаждение электродов, токоподводов, электрододержателей, вторичного витка сварочного трансформатора и других частей вторичного контура.

#### Машины для точечной сварки

Серийные машины для точечной сварки изготавливают на номинальные токи: до 40 кА при питании от однофазной сети переменного тока; до 160 кА при питании от трехфазной сети переменного тока; конденсаторные.

Наибольшее распространение в современных машинах для точечной сварки получил пневматический привод сжатия электродов.

Для сварки низколегированной стали вы-

Таблица 55.8. Технические данные однофазных машин для точечной сварки с радиальным ходом верхнего электрода

Показатель	MT-604	MT-810	MT-1214	MT-1614
Напряжение сети, В	220/380	380	380	380
Мощность, кВт	14,8	20	50	85
Первичный ток, А	67/38,6	52,5	132	224
Сварочный ток, кА	6,3	8,0	12,5	16,0
Число ступеней регулирования	4	8	8	8
Вылет электродов, мм	250	300	400	500
Усилие сжатия электродов, кН	2	3	5	6,3
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистой стали, мм	0,2–2	0,25–3	0,5–4	0,5–5
Число сварок в минуту	180	200	200	200
Расход охлаждающей воды, л/ч	140	180	210	230
Габаритные размеры, мм:				
высота	1237	1410	1574	1574
ширина	452	410	430	430
длина	833	1083	1230	1340
Масса, кг	200	325	440	540
Тип регулятора цикла сварки	РЦС-301	РЦС-403	РЦС-403	РЦС-403

Таблица 55.9. Технические данные однофазных машин переменного тока для точечной сварки

Показатель	MT-1217	MT-1222	MT-1223	MT-1617	MT-1618	MT-2002	MT-2517	MT-4017
Мощность, кВт	65	60	85	110	100	221	170	495
Сварочный ток, кА	12,5	12,5	12,5	16,0	16,0	20,0	25,0	40,0
Число ступеней регулирования	6	8	8	6	6	8	—	8
Вылет электродов, мм	500	500	500	500	500	1250	500	500
Усилие сжатия электродов, кН	3	6	15	6	6	20	12	25
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистой стали, мм	0,7–1,5	0,5–5	—	0,8–2,3	0,8–2,3	1–4	1–4	2,5–8
Быстродействие, ход/мин	250	375	150	300	300	150	150	70
Расход воды, л/ч	700	600	700	700	700	1000	1000	1100
Габаритные размеры, мм:								
высота	1810	1900	2250	1820	1695	2320	2200	2370
ширина	490	386	550	490	450	590	550	590
длина	1425	1340	1700	1425	1420	2450	1685	1600
Масса, кг	750	440	1110	800	800	1680	1200	1430

пускаются стационарные машины с радиальным ходом верхнего электрода (табл. 55.8). Машину типа MT-604 выпускают в двух вариантах: с пневматическим и с механическим приводом сжатия электродов. В машинах с радиальным ходом установлены бесконтактные регуляторы цикла сварки, синхронные тиристорные контакторы и воздушные распределители с электропневматическим управлением. Машин типа MT-810 показана на рис. 55.19. Отличительной особенностью машин этого типа является горизонтальное размещение пневматического привода сжатия электродов на силовой стойке корпуса 1 машины.

Машины MT-1214 и MT-1614 имеют идентичное с машиной MT-810 исполнение и отличаются друг от друга только размерами и

техническими данными. Кроме того, машина MT-1614 имеет двухпоршневой пневмопривод, обеспечивающий дополнительный ход верхнего электрода.

Для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей и сплавов выпускаются однофазные машины переменного тока с прямолинейным ходом верхнего электрода (табл. 55.9). Машины этой группы имеют пневматические приводы сжатия электродов, снабжены бесконтактными регуляторами цикла сварки, синхронными тиристорными прерывателями и сварочными трансформаторами с обмотками, залитыми эпоксидным компаундом.

Для точечной сварки крупногабаритных изделий из легированных сталей, легких сплавов, титановых сплавов и низкоуглеродистой



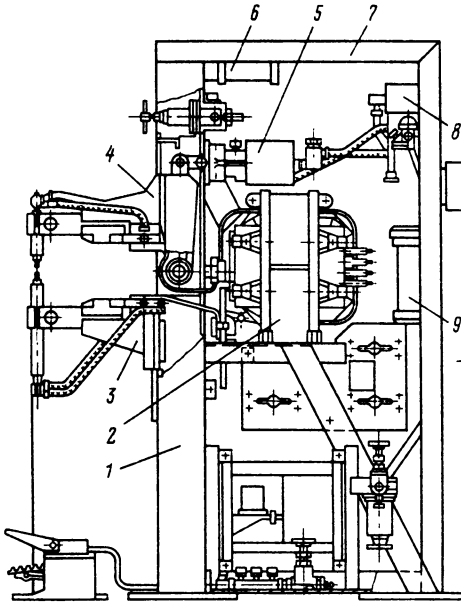


Рис. 55.19. Машина для точечной сварки типа МТ-810:

1 — корпус; 2 — сварочный трансформатор; 3 — нижний кронштейн; 4 — угловой рычаг; 5 — пневмопривод; 6 — регулятор цикла сварки; 7 — Г-образный кожух; 8 — электропневматический клапан; 9 — автоматический выключатель

стали выпускают стационарные машины для точечной сварки с выпрямлением тока (табл. 55.10). Машины предназначены для питания от сети трехфазного переменного тока. Машину со сварочным током на 40 кА выпускают с радиальным ходом верхнего электрода, остальные машины — прессового типа.

Для сварки изделий из легких сплавов, легированных и жаропрочных сталей, а также из сплавов других цветных металлов серийно выпускаются конденсаторные машины (табл. 55.11). В этих машинах сварку производят за счет энергии, запасенной в батарее электролитических низковольтных конденсаторов, которые заряжаются от сети переменного тока до определенного напряжения через управляемый выпрямитель. Переключающим устройством батарею разряжают через первичную обмотку сварочного трансформатора, а на сварочном токе во вторичной обмотке этого трансформатора осуществляют сварку. К преимуществам машин для конденсаторной сварки следует отнести стабильность сварочного импульса, к недостаткам — сложность и более высокую стоимость. Выпускаются также конденсатор-

Таблица 55.10. Технические данные машин для точечной сварки

Показатель	Модели			
	МРВР-4001	МТВ-6304	МТВ-8002	МТВ-16002
Мощность, кВ·А	350	600	600	1200
Сварочный ток, кА	40	63	80	160
Число ступеней регулирования	6	8	8	8
Вылет электродов, мм	800—1200	1500	1500	1700
Усилие сжатия электродов, кН	1—12	2—50	4—70	13—200
Диапазон толщин свариваемых деталей из легированной стали и титановых сплавов, мм	0,3—2,5	0,5—5	0,8—5	3—10
Номинальный темп работы, циклов/мин	60	60	20	10
Расход охлаждающей воды, л/ч	3000	3200	4800	7200
Габаритные размеры, мм				
высота	1637	2550	3750	4000
ширина	900	950	1160	1160
длина	3020	3660	3455	3635
Масса, кг	2640	4200	6600	14000

Таблица 55.11 Технические данные конденсаторных машин для точечной сварки

Показатель	Модели		
	МТК-5001	МТК-6301	МТК-8004
Мощность, кВ·А	20	40	70
Номинальный сварочный ток, кА	50	63	80
Максимальная емкость батареи конденсаторов, мФ	105	167	315
Усилие сжатия электродов, кН			
сварочное	1,5—5	1,5—10	1,8—25
ковочное	5—17	3—22	7—50
Номинальный вылет электродов, мм	600	1200	1500
Рекомендуемые толщины свариваемых деталей из сплавов алюминия и титана, мм	0,3—1,5	0,5—2	0,3—2,5
Расход охлаждающей воды, л/ч	800	900	3000
Габаритные размеры, мм			
высота	2400	2550	3190
ширина	2460	2730	3820
длина	1000	910	1260
Масса, кг	2700	4500	6000

Примечание. Напряжение сети 380 В  
Рабочий ход верхнего электрода 20 мм

Таблица 55.12. Технические данные конденсаторных машин малой мощности

Показатель	ТКМ-14	ТКМ-15	МТК-1601
Мощность, кВ·А	0,3	0,6	2,0
Номинальный сварочный ток, кА	—	—	16,0
Максимальная емкость батареи конденсаторов, мФ	0,75	0,6	3,2
Усилие сжатия электродов, Н	0,5–70	10–500	90–630
Вылет электродов, мм	150	150	150
Рекомендуемая толщина свариваемых деталей, мм	0,1–0,2	0,5–0,7	0,05–0,8
Габаритные размеры, мм			
высота	1000	685	1365
ширина	780	800	940
длина	1285	1285	980
Масса, кг	200	200	400

ные машины малой мощности, применяемые в приборостроении, радиоэлектронике, электротехнике и в других отраслях промышленности (табл. 55.12).

Машина МТК-1601 (рис. 55.20) может работать с одним или двумя импульсами свароч-

Таблица 55.13. Технические данные машин для сварки плоских арматурных каркасов

Показатель	МТМ-09	МТМС-10 × 35	АТМС-14 × 75-7-1	МТМ-35	МТМ-32
Число сварочных трансформаторов	2	10	18	4	5
Сварочный ток одного трансформатора, кА	12,5	8	12,5	25,0	20
Усилие одного пересечения, кН	5	2	5	10	10
Ширина свариваемого каркаса, мм	600	2000	3800	1200	3000
Диаметр продольных стержней, мм	3–10	3–8	3–12	12–40	12–32
Габаритные размеры, мм					
высота	1700	1685	1776	1500	1960
ширина	3200	2950	5000	3250	3580
длина	2810	2480	3442	2300	2740
Масса, кг	3085	3500	8000	4600	5500

ного тока. В этой машине регулируются: емкость батареи конденсаторов, коэффициент трансформации сварочного трансформатора, напряжение заряда батареи конденсаторов, усилие сжатия электродов, скорость опускания верхнего электрода, время паузы между

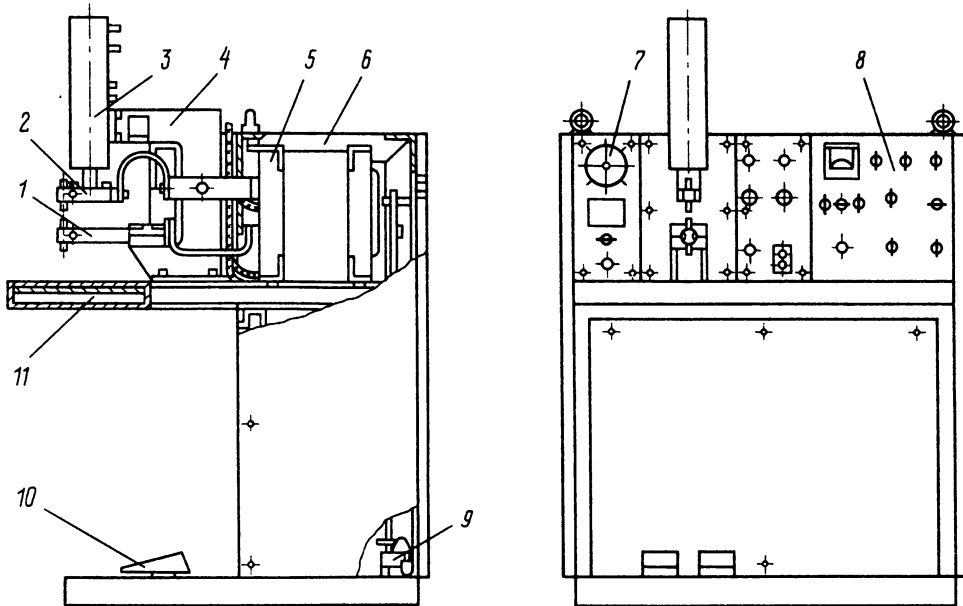


Рис. 55.20. Конденсаторная машина для точечной сварки типа МТК-1601:

1 – нижний электрододержатель; 2 – верхний электрододержатель; 3 – пневматический привод сжатия, 4 – кронштейн крепления пневмопривода, 5 – сварочный трансформатор; 6 – корпус машины; 7 – пневматическое устройство; 8 – пульт управления, 9 – система охлаждения; 10 – педальная кнопка; 11 – горизонтальный столик

импульсами сварочного тока, полярность импульса; при автоматической работе — число сварок в единицу времени.

Крупногабаритные громоздкие изделия, точечная сварка которых затруднена или невозможна на стационарных сварочных машинах, сваривают с помощью подвесных машин или клещей со встроенными трансформаторами. Особенно широко применяются такие машины в автомобилестроении, для сварки арматурных каркасов железобетонных изделий и т. д.

Подвесные машины состоят из сварочного трансформатора, закрепленного на специальном подвесном устройстве, и сварочных клещей, которые являются рабочим инструментом. Клещи соединяются со сварочным трансформатором одним или двумя токоведущими гибкими кабелями. Для облегчения пользования клещи подвешивают на стальном тросе с пружинами или грузовым противовесом. Машины комплектуются тиристорными контакторами и регуляторами цикла сварки. Сварочные трансформаторы подвесных машин имеют повышенные вторичные напряжения, так как соединительные токоведущие кабели имеют высокое сопротивление, а в случае применения двух кабелей — и индуктивное сопротивление.

Для сварки плоских каркасов из горячекатаной и холоднотянутой проволоки, используемых в производстве железобетонных изделий, серийно выпускаются специализированные многоэлектродные машины (табл. 55.13). Рабочий цикл машины задается программным устройством.

### Машины для рельефной сварки

Эти машины по конструкции мало отличаются от аналогичных машин для точечной сварки. Однофазные машины переменного тока с одним сварочным трансформатором выпускают на токи 25 и 40 кА; это машины с пневматическим приводом сжатия и прямолинейным ходом верхнего электрода. От точечных машин они отличаются конструкцией электродов, выполненных в виде двух плит с Т-образными пазами для установки приспособлений и закрепления свариваемых деталей, меньшими вылетами и повышенной жесткостью корпуса. Кроме того, выпускаются рельефные машины на сварочные токи 63, 80 и 100 кА с двумя однофазными трансформаторами. Технические данные машин серии МР приведены в табл. 55.14.

Таблица 55.14. Технические данные машин для рельефной сварки

Показатель	МР-2517	МР-4017	МР-6303	МР-8001	МР-10002
Мощность, кВ·А	160 25,0	368 40,0	600 63,0	850 80,0	1300 100,0
Номинальный сварочный ток, кА					
Число ступеней регулирования	6	8	16	16	16
Расстояние между электродными плитами, мм	330	330	450	450	450
Максимальное усилие сжатия плит, кН	16	24	30	30	80
Быстродействие, ход/мин	150	70	60	60	60
Габаритные размеры, мм:					
высота	2200	2370	3330	3300	3650
ширина	531	590	1030	1030	1030
длина	1470	1250	1550	1550	1550
Масса, кг	615	1430	3000	3000	3650

Примечание. Вылет (до центра плиты) 300 мм.

Таблица 55.15. Технические данные однофазных машин для шовной сварки

Показатель	МШ-1001	МШ-1601	МШ-2001	МШ-3201
Мощность, кВ А	31	75	127	323
Сварочный ток, кА	10	16	20	32
Число ступеней регулирования	8	8	6	6
Вылет электродов, мм	400	400	800	800
Усилие сжатия электродов, кН	25	50	80	120
Скорость сварки, м/мин	1—5	0,8—4,5	0,4—4,5	0,4—4,5
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистых сталей, мм	0,5—1,2	0,5—1,5	0,5—1,8	0,8—3,0
Расход охлаждающей воды, л/ч	350	450	1100	2500
Габаритные размеры, мм:				
высота	1405	1770	2295	2360
ширина	520	510	720	720
длина	1270	1455	2395	2395
Масса, кг	526	620	1350	1700

### Машины для шовной сварки

Машины для шовной сварки во многом подобны машинам для точечной сварки и отличаются в основном конструкцией электродных частей и наличием привода вращения электродов. У машин для шовной сварки электроды выполнены в виде роликов, между которыми зажимают свариваемые детали. Один или оба ролика соединяют с приводом вращения. Серийно выпускаются стационарные машины для шовной сварки с питанием силовой части от однофазной сети переменного тока на сварочные токи 10–32 кА (табл. 55.15), что позволяет сваривать изделия из

низкоуглеродистой стали толщиной от 0,5+0,5 до 3+3 мм (рис. 55.21).

Для шовной сварки изделий из легированной стали и легких сплавов используются машины с выпрямлением тока на сварочные токи 16, 63 и 120 кА (табл. 55.16).

### Машины для стыковой сварки

Машины для стыковой сварки находят применение для соединения стержней, труб, арматуры железобетона, рельсов и т. п. Для стыковой сварки сопротивлением серийно выпускают стационарные машины с ручными

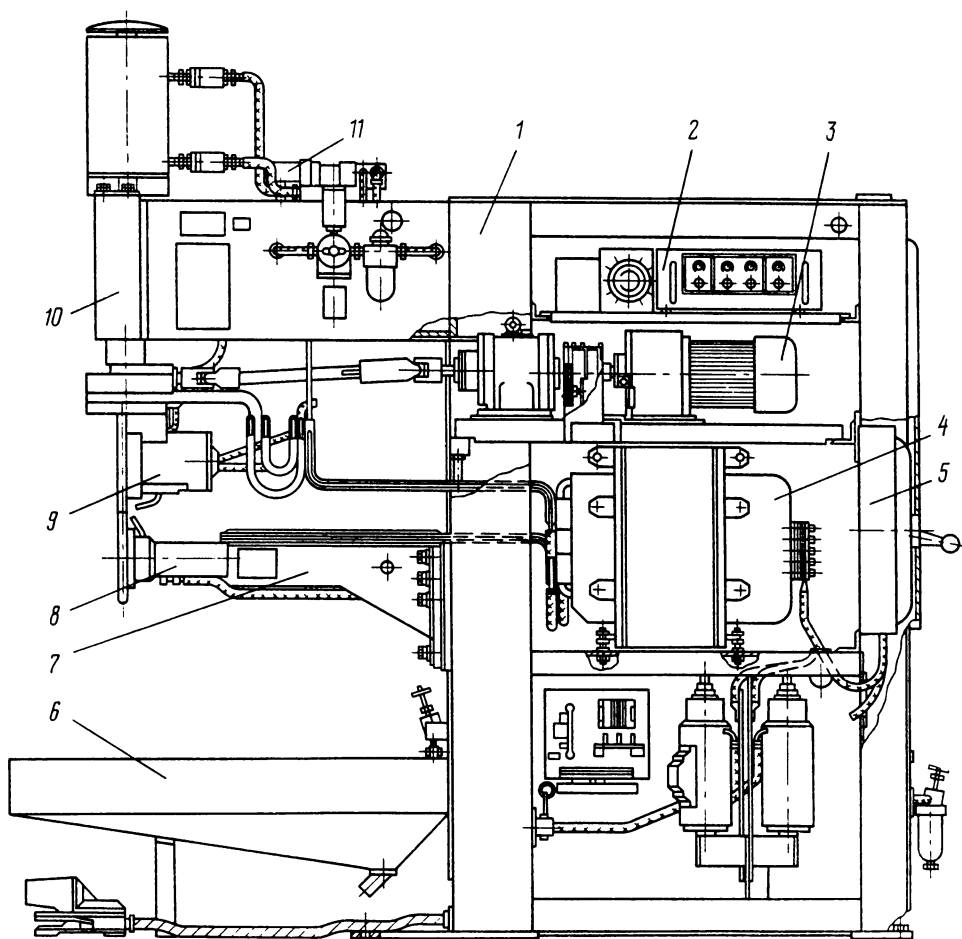


Рис. 55.21. Машина для шовной сварки типа МШ-3201:

1 — корпус машины; 2 — регулятор цикла сварки; 3 — электромеханический привод; 4 — сварочный трансформатор; 5 — автоматический выключатель; 6 — корыто для слива воды; 7 — кронштейн нижнего электрода; 8 — нижний электрод; 9 — верхний электрод; 10 — пневматический привод сжатия электродов; 11 — элементы управления приводом сжатия электродов

Таблица 55.16. Технические данные машин для шовной сварки постоянным током

Показатель	МШВ-1601	МШВ-6301	МШ-12001
Мощность, кВ·А	133	533	1100
Номинальный сварочный ток, кА	16	63	120
Номинальный длительный вторичный ток, кА	11,2	36	56
Число ступеней регулирования	8	24	8
Вылет электродов, мм	1500	1200	1300
Усилие сжатия электродов, кН	2–20	2–20	6–50
Скорость перемещения детали при непрерывном вращении роликов, м/мин	0,2–8,0	0,2–8,0	—
Рекомендуемые толщины свариваемых деталей из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и легких сплавов, мм	0,3–3,0	0,3–3,0	1,5–5
Габаритные размеры, мм:			
высота	2680	2770	3725
ширина	960	1000	1300
длина	3320	3525	3735
Масса, кг	3700	6300	8500

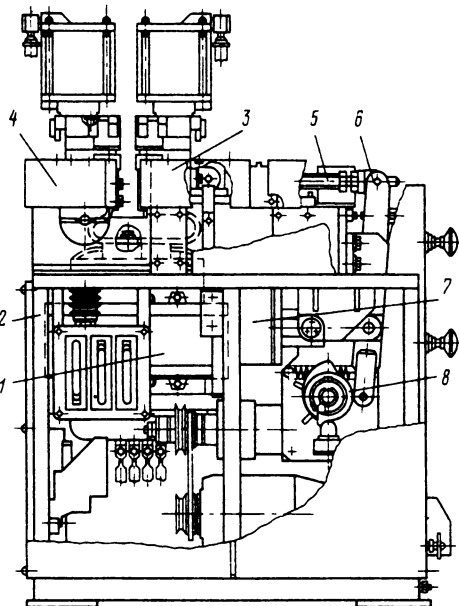


Рис. 55.22. Машина для стыковой сварки оплавлением типа МСО-0801:

1 — сварочный трансформатор; 2 — корпус машины; 3 — каретка с подвижным зажимом; 4 — неподвижный зажим; 5 — тяга; 6 — рычаг пневмопривода осадки; 7 — пневмопривод осадки; 8 — моторно-кулачковый привод оплавления

Таблица 55.17. Технические данные машин для стыковой сварки оплавлением

Показатель	МСО-0801	МСО-0802	МСО-2301	МСО-602
Номинальная мощность, кВ·А	24		100	190
Номинальный длительный вторичный ток, кА	5,0		12,5	12,5
Номинальный сварочный ток, кА	6,3		18,0	25,0
Номинальное усилие, кН:				
зажатия	16		50	125
осадки	8		25	63
Диапазон свариваемых сечений, мм <sup>2</sup> , из сталей:				
низкоуглеродистых	50–160		100–800	200–2000
легированных	50–100		100–300	200–800
Максимальная производительность при сварке низкоуглеродистой стали, сварок в час	600	150	350	250
Габаритные размеры, мм:				
высота	1450	1440	1240	1367
длина	860	1000	2000	2265
ширина	1085	1080	900	1110
Масса, кг	1000	1000	1700	2500

Примечание. Напряжение сети 380 В.

эксцентриковыми механизмами зажатия и пружинными механизмами подачи на номинальные сварочные токи 4, 5 и 8 кА.

Для стыковой сварки оплавлением низкоуглеродистых и легированных сталей, а также цветных металлов выпускают серию унифицированных машин типа МСО (табл. 55.17, рис. 55.22). Промышленностью выпускаются специальные рельсосварочные машины для контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением непосредственно на железнодорожных путях. Такие машины можно использовать и в стационарных условиях. Привод всех механизмов машины — гидравлический (табл. 55.18).

#### Системы управления машинами контактной сварки

Особенностью цикла сварки является кратковременность составляющих его элементов. Надежность сварных соединений зависит от правильности выбранного режима сварки и его стабильности повторяемости, что определяет особые требования к аппаратуре управле-

Таблица 55.18. Технические данные универсальных машин для стыковой сварки

Показатель	К-190П	К-355	К-617	АСГЦ-150-3
Мощность, кВт А	150	150	150	100
Номинальный длительный вторичный ток, кА	16,0	14,0	9,0	11,2
Номинальное усилие, МН:				
зжатия	1,0	1,25	0,32	0,03
осадки	0,5	0,45	0,16	0,12
Площадь свариваемых сечений, мм <sup>2</sup>	< 10 000	3000 – 10 000	1000 – 4000	380
Габаритные размеры, мм:				
высота	2500	1140	1450	2550
ширина	1080	1050	1850	2150
длина	3200	1810	1600	3130
Масса, кг	7800	2375	3660	4850

Примечание. Напряжение сети 380 В.

Таблица 55.19. Технические данные тиристорных контакторов

Показатель	КТ-01У4	КТ-02У4	КТ-03У4	КО-04У4
Напряжение сети, В	380	220	380	380
Номинальный ток, А, при:				
ПВ-50%	200	800/700*	800/700*	1300/1200*
ПВ-20%	250	850/750	850/750	1400/1300
ПВ-5%	—	1000/850	1000/850	1600/1500
Максимальный ток при ПВ-20%, А	280	1100/900	1100/900	1800/1600
Номинальный ток тиристора, А	200	500	500	800
Номинальный расход охлаждающей воды, л/мин	2	2	2	6
Габаритные размеры, мм:				
ширина	320	325/420**	375/420**	375/420**
высота	300	430/650	470/650	470/650
длина	260	260/340	260/340	260/340
Масса, кг	6,9	17/30**	17/30**	17/30**

\* В числителе указан номинальный ток при длительности включения не более 0,5 с, в знаменателе — при длительности включения до 20 с.

\*\* В знаменателе указаны размеры и масса контакторов закрытого исполнения

Примечание. Температура охлаждающей воды — не более 40 °С; длительность импульса управления — не менее 100 мкс; максимальное импульсное напряжение 900 В.

ния, которая должна быть максимально автоматизирована, малоинерционна, должна обладать высокой чувствительностью, точностью работы и эксплуатационной надежностью. При помощи аппаратуры управления осуществляется: включение, регулирование и выключение сварочного тока; регулирование последовательности и продолжительности отдельных операций цикла сварки, в том числе и времени протекания тока, изменение скорости вращения роликов шовной машины или перемещения подвижной плиты (стыковые машины); включение и регулирование усилия сжатия электродов и т. п. В контактных машинах преобладает аппаратура управления однофазными машинами — это регуляторы времени, прерыватели, вентильные контакторы. Регуляторы

цикла сварки регулируют ток и стабилизируют его при колебаниях напряжения сети. Большинство однофазных машин переменного тока оснащено тиристорными контакторами, при этом достигается значительный технико-экономический эффект вследствие упрощения схем включения тиристорov, уменьшения рассеиваемых энергетических потерь, повышения стабильности работы и уменьшения габаритных размеров. Контактторы на тиристорах различных типоразмеров различаются коммутируемым током (табл. 55.19). На рис. 55.23 представлена схема тиристорного контактора КТ-1У4. Импульсы управления с частотой 100 Гц поступают на тиристоры  $V1M$  и  $V2M$ , но включается только тот, анод которого находится под положительным потенциалом.

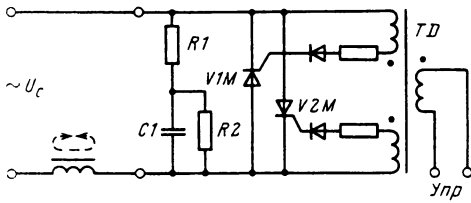


Рис. 55.23. Принципиальная электрическая схема тиристорного контактора КТ-1У4

Цепочка  $R1, R2, C1$  ограничивает скорость восстановления напряжения на тиристорах во время коммутации тока с целью предотвращения возможности самопроизвольного включения, а также снижает импульсы перенапряжений. Все применяемые контакторы имеют импульсное управление и могут работать только с регуляторами, оснащенными фазоимпульсными выходными устройствами. В контактных машинах принято обязательное водяное охлаждение тиристоров.

Последовательность действия механизмов машины для точечной сварки определяется регулятором времени или регулятором цикла сварки, которые либо являются самостоятельными устройствами, либо входят в виде отдельного функционального блока в состав шкафов управления сварочными машинами и работают по определенной, заранее установленной программе.

**Список литературы**

55.1. **Сварка в машиностроении**. Справочник Под ред Ю Н Зорина Т 4 М. Машиностроение, 1979 512 с

55.2. **Патон Б. Е.** Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М.: Машиностроение, 1974 768 с

55.3. **Технология и оборудование контактной сварки.** Под ред Б. Д Орлова. М Машиностроение, 1975 536 с

55.4. **Сергеев Н. П.** Справочник сварщика. М. Высшая школа, 1975. 192 с

55.5. **Браткова О. Н.** Источники питания сварочной дуги. Учебник М Высшая школа, 1982 182 с

55.6. **Прох Л. Ц., Шпаков Б. М., Яворская Н. М.** Справочник по сварочному оборудованию. — Изд. 2-е Киев Техника, 1982 207 с.

55.7. **ГОСТ 10594-80.** Оборудование для дуговой, контактной, ультразвуковой сварки и для плазменной обработки Ряды параметров.

55.8. **ГОСТ 7012-77.** Трансформаторы однофазные однополюсные для автоматической дуговой сварки под флюсом Общие технические условия.

55.9. **ГОСТ 7237-82.** Преобразователи сварочные Общие технические условия.

55.10. **ГОСТ 304-82.** Генераторы сварочные Общие технические условия

55.11. **ГОСТ 297-80.** Машины контактные Общие технические условия

55.12. **ГОСТ 25616-83.** Источники питания для дуговой сварки Методы испытания сварочных свойств

**Раздел 56**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ**

**СОДЕРЖАНИЕ**

56.1	Световые величины и соотношения между ними . . . . .	287	Выбор нормируемых параметров (312). Выбор системы освещения, типов источников света и светильников и их размещения (313). Расчет мощности осветительной установки методом коэффициента использования (320). Расчет осветительной установки методом удельной мощности (324). Точечный метод расчета осветительной установки (325). Аварийное, эвакуационное и охранное освещение (329)
56.2.	Оптические свойства материалов . . .	288	
56.3.	Электрические источники света . . .	289	
	Лампы накаливания (290). Люминесцентные трубчатые лампы низкого давления (293). Лампы ДРЛ, ДРИ и ДНаТ (294). Пускорегулирующие аппараты (296)		
56.4.	Электрические осветительные приборы. Основные характеристики осветительных приборов (299). Светильники (299). Проекторы (311)		
56.5.	Проектирование и расчет искусственного освещения производственных помещений . . . . .	311	56.6. Проектирование и расчет наружного освещения . . . . . 331
			Выбор нормируемых параметров (332). Проектирование установок, выполненных светильниками (335). Проектирование установок, выполненных проекторами заливающего света (335)
			Список литературы . . . . . 339

### 56.1. СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ

Обозначения основных световых величин и единиц измерения\*

$I$ , кд — сила света, излучаемого в перпендикулярном направлении с поверхности черного тела площадью  $1/6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  при температуре затвердевания платины ( $T = 2045 \text{ К}$ ) и давлении  $101\,325 \text{ Па}$  [56.1]

$\Phi$ , лм (кд·ср) — световой поток — эффективный поток излучения, определяемый спектральной чувствительностью глаза

$M$ , лм/м<sup>2</sup> (кд·ср/м<sup>2</sup>) — светимость — плотность излучаемого (отражаемого) светового потока по площади поверхности излучающего (отражающего) тела

$E$ , лк (кд·ср/м<sup>2</sup>) — освещенность — плотность светового потока по освещаемой поверхности.

$Q$ , лм·с (кд·ср·с) — световая энергия, определяемая произведением светового потока на время его действия. Для импульсных источников с переменным во времени световым потоком — светосумма  $Q = \int_0^t \Phi(t) dt$ ,

где  $\Phi(t)$  — мгновенное значение светового потока

$H$ , лк·с (кд·ср·с/м<sup>2</sup>) — световая экспозиция (количества освещения) — определяется световой энергией, упавшей на единицу площади

$L_\alpha$ , кд/м<sup>2</sup> — яркость — плотность силы света по площади проекции излучающего (отражающего) тела в заданном направлении  $\alpha$ . Выражение яркости в интегральном виде записывается так:  $L_\alpha = I_\alpha/A_\alpha$ , где  $A_\alpha$  — площадь проекции светящегося тела на плоскость, перпендикулярную направлению  $\alpha$ , отсчитываемому от нормали к поверхности излучающего тела (рис. 56.1);  $I_\alpha$  — сила света в направлении  $\alpha$ .

Устаревшие единицы: сила света 1 свеча (св) = 1 кд; освещенности: 1 лм/1 фут<sup>2</sup> = 10,76 лк (английская единица освещенности); 1 фот = 10<sup>4</sup> лк (1 лм/1 см<sup>2</sup>); яркости: 1 нит (НТ) = 1 кд/м<sup>2</sup>; 1 стильб = 10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>.

#### Соотношения между световыми величинами

Световой поток излучающего тела (лампы, светильника) может быть рассчитан [56.2] по кривой силы света (КСС) на рис. 56.2 и таблице зональных телесных углов (табл. 56.1),

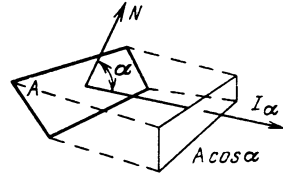


Рис. 56.1. К расчету яркости излучающей поверхности

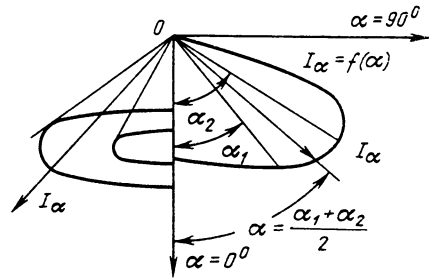


Рис. 56.2. К расчету зонального светового потока

Таблица 56.1. Зональные телесные углы

$\alpha_1 - \alpha_2$	$\alpha_{ср}$	$\omega$	$\alpha_{ср}$	$\alpha_1 - \alpha_2$
$\Delta\alpha = 5^\circ$				
0 — 5°	2,5	0,0239	177,5	175 — 180
5 — 10	7,5	0,0715	172,5	170 — 175
10 — 15	12,5	0,1186	167,5	165 — 170
15 — 20	17,5	0,1648	162,5	160 — 165
20 — 25	22,5	0,2098	157,5	155 — 160
25 — 30	27,5	0,2531	152,5	150 — 155
30 — 35	32,5	0,2945	147,5	145 — 150
35 — 40	37,5	0,3337	142,5	140 — 145
40 — 45	42,5	0,3703	137,5	135 — 140
45 — 50	47,5	0,4041	132,5	130 — 135
50 — 55	52,5	0,4349	127,5	125 — 130
55 — 60	57,5	0,4623	122,5	120 — 125
60 — 65	62,5	0,4862	117,5	115 — 120
65 — 70	67,5	0,5064	112,5	110 — 115
70 — 75	72,5	0,5228	107,5	105 — 110
75 — 80	77,5	0,5352	102,5	100 — 105
80 — 85	82,5	0,5435	97,5	95 — 100
85 — 90	87,5	0,5476	92,5	90 — 95
$\Delta\alpha = 10^\circ$				
0 — 10°	5	0,095	175	170 — 180
10 — 20	15	0,283	165	160 — 170
20 — 30	25	0,463	155	150 — 160
30 — 40	35	0,628	145	140 — 150
40 — 50	45	0,774	135	130 — 140
50 — 60	55	0,879	125	120 — 130
60 — 70	65	0,993	115	110 — 120
70 — 80	75	1,058	105	100 — 110
80 — 90	85	1,091	95	90 — 100

\* См. т. 1, § 2.3.



$\Delta\Phi = 2\pi (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) I_x$ , где  $2\pi (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$  — зональный телесный угол, ср, образованный двумя коническими поверхностями с углами раствора  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 56.2);  $I_x$  — сила света источника по направлению, ориентируемому углом  $\alpha_{ср} = 0,5(\alpha_1 + \alpha_2)$ , кд;  $\Delta\Phi$  — зональный световой поток, лм.

Полный световой поток источника  $\Phi = \sum \Delta\Phi$ .

В случае КСС, описываемых простыми аналитическими зависимостями, существует простая связь между световым потоком источника и его максимальной силой света. Например:  $\Phi = 4\pi I$  для равномерного источника ( $I_x = \text{const}$ ) шаровой формы;  $\Phi = \pi I_{max}$  для косинусного источника (дисковой формы)  $I_x = I_{max} \cos \alpha$ ;  $\Phi = \pi^2 I_{max}$  для синусного источника  $I_x = I_{max} \sin \alpha$  (цилиндрической формы).

Освещенность  $E$  элемента  $\Delta A$  некоторой поверхности (рис. 56.3) определяется по закону обратных квадратов значением силы света  $I_x$ , излучаемого источником  $S$  в направлении этого элемента:

$$E = I_x \cos \alpha / R^2.$$

Это выражение справедливо для расстояний  $R$ , начиная с которых сила света  $I_x$  остается постоянной. Если известен световой поток  $\Delta\Phi$ , падающий на элемент поверхности площадью  $\Delta A$ , то освещенность, лм/м<sup>2</sup>,  $E = \Delta\Phi/\Delta A$ .

Яркость  $L$  равномерная по поверхности светящего тела и одинаковая по всем направлениям, связана со световым потоком  $\Phi$ , им излучаемым, выражением  $L = \Phi/\pi A$ , где  $A$  — площадь поверхности светящего тела, м<sup>2</sup>. Так как отношение  $\Phi/A$  (лм/м<sup>2</sup>) есть светимость  $M$ , то выражение яркости для диффузных тел приобретает вид  $L = M/\pi$  [лм/(м<sup>2</sup>·ср)]. Следовательно, яркость таких тел и их светимость отличаются друг от друга на постоянный коэффициент  $\pi$ .

Яркость поверхности тел, рассеивающих падающий на них световой поток равномерно по всем направлениям пространства (диффузных тел), зависит от освещенности  $E$ . Яркость

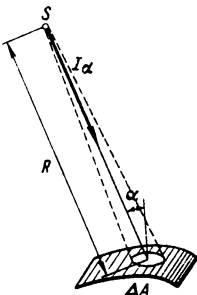


Рис. 56.3. Схема расчета освещенности

для отражающих свет поверхностей

$$L = \rho E/\pi,$$

для пропускающих свет поверхностей

$$L = \tau E/\pi,$$

где  $\rho$ ,  $\tau$  — коэффициенты отражения и пропускания материалов (см. § 56.2).

Светимость  $M$  диффузно отражающих или пропускающих свет поверхностей связана с их освещенностью через коэффициенты  $\rho$  или  $\tau$  (см. § 56.2):  $M = \rho E$ ,  $M = \tau E$ .

В том случае, если поверхности имеют направленно-рассеивающее и смешанное отражение или пропускание света, их яркость в данном направлении  $\alpha$  рассчитывается по формуле

$$L_x = r_x E/\pi,$$

где  $r_x$  — коэффициент яркости поверхности (см. § 56.2).

## 56.2. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

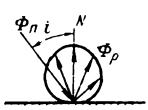
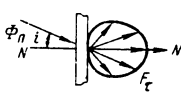
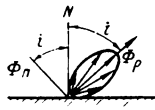
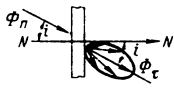
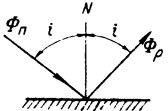
Световой поток  $\Phi_n$ , падающий на некоторое тело, частично отражается ( $\Phi_p$ ), поглощается ( $\Phi_a$ ) и, наконец, пропускается ( $\Phi_t$ ) этим телом. Потоки  $\Phi_p$ ,  $\Phi_a$ ,  $\Phi_t$  определяют оптические коэффициенты:

$$\begin{aligned} \text{отражения } \rho &= \Phi_p/\Phi_n; \\ \text{пропускания } \tau &= \Phi_t/\Phi_n; \\ \text{поглощения } \alpha &= \Phi_a/\Phi_n. \end{aligned}$$

Для любого материала  $\tau + \rho + \alpha = 1$ . Кроме этих коэффициентов материалы характеризуются еще кривыми рассеяния (табл. 56.2), дающими возможность судить о степени рассеяния отраженного или пропущенного ими светового потока. По характеру рассеяния светового потока материалы делятся на диффузно, т. е. равномерно рассеивающие, направленно-рассеивающие (с преимущественным отражением или пропусканием по направлениям угла отражения или пропускания) и смешанно пропускающие (направленное + диффузное пропускание или отражение света).

Кривыми рассеяния (табл. 56.2) могут являться как распределения относительных значений силы света  $I_x(\alpha)$  в плоскости, проходящей через нормаль к образцу, так и распределения значений коэффициента яркости  $r_x$ , в той же плоскости. Значение  $r_x$  равно отношению яркости рассматриваемой поверхности  $L_x$  к яркости  $L_d$  идеально диффузной ( $\rho = 1$ ,  $L_d = \text{const}$ ) пластины при одинаковых условиях освещения. Для разных направлений пространства значения  $r_x$  могут быть меньше ( $L_x < L_d$ ) и больше ( $L_x > L_d$ ) единицы.

Таблица 56.2 Значения коэффициентов  $\rho$  и  $\tau$  для некоторых материалов

Кривые рассеяния светового потока	Материал	$\rho$	$\tau$
<i>С диффузным отражением света</i>			
	Углекислый магний	0,92	—
	Окись магния	0,91	—
	Мел, гипс	0,85	—
	Фарфоровая эмаль (белая)	0,80	—
	Белая бумага (вагман)	0,76	—
	Белая клеевая краска (побелка)	0,65	—
	Необработанная поверхность черных металлов	0,15	—
	Уголь	0,08	—
Нитроэмаль белая	0,70	—	
<i>С диффузным пропусканием света</i>			
	Стекло глушное (массивное, толщина 2,3 мм)	0,5	0,35
	Стекло глушное накладное (толщина 2,3 мм)	0,30	0,55
	Органическое стекло белое (толщина 2—3 мм)	0,35	0,50
	Стекло опаловое (толщина 2,3 мм)	0,20	0,70
	Светотехническая бумага желтоватого цвета с рисунком	0,35	0,40
<i>С направленно рассеивающим отражением света</i>			
	Алюминий травленый	0,62	—
	Полуматовый алъзакированный алюминий	0,72	—
	Алюминиевая краска на нитролаке	0,55	—
	Неполированный никель	0,50	—
Неполированная латунь	0,45	—	
<i>С направленно рассеивающим пропусканием света</i>			
	Стекло с химической матировкой (толщина 2,3 мм)	0,08	0,80
	Стекло с механической матировкой (толщина 2 мм)	0,14	0,70
	Пергамент тонкий (белый)	0,40	0,40
	Шелк белый	0,30	0,45
<i>С направленным отражением (зеркальное)</i>			
	Серебро свежеполитрованное	0,92	—
	Стекло посеребренное (зеркало)	0,85	—
	Алъзакированный алюминий (политрованный)	0,80	—
	Хром политрованный	0,62	—
	Сталь политрованная	0,50	—
	Латунь политрованная	0,60	—
Белая жемчужная	0,55	—	
<i>С направленным пропусканием света</i>			
	Стекло прозрачное (толщина 2 мм)	0,08	0,89
	Органическое стекло (толщина 2 мм)	0,10	0,85

Коэффициенты  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$  необходимо знать для правильного определения нормируемой освещенности (см. ниже, табл. 56.20), расчета осветительных установок, а также для расчета яркости и свечистости различных поверхностей. Характер рассеяния света материалами (табл. 56.2) необходимо знать для правильного выбора осветительных средств при проектировании искусственного освещения. Например, блестящие поверхности (направленное отражение) при «гочечных» светильниках (СВ) дают их изображение (блики), мешающее видимости объектов, расположенных на них. Блики могут

быть устранены применением крупногабаритных СВ из рассеивающих материалов, светящихся панелей и потолков.

### 56.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Электрические источники света (ИС) [56.3] по способу генерирования ими оптического излучения делятся на температурные и люминесцентные. Первую группу составляют лампы накаливания (тепловое излучение), вторую — газоразрядные лампы (ГРЛ) (излучение в ре-

Таблица 56.3 Основные характеристики ЛН общего назначения (по ГОСТ 2239-79)

Мощность, Вт	Тип наполнения и тела накала	Номинальный световой поток, лм, при расчетном напряжении, В					Полная длина лампы, мм	Диаметр колбы лампы, мм
		130	220	225	235	240		
15	В	135	105	105	100	—	105	61
25	В	260	220	230	225	—	105	61
40	В	485	415	415	410	—	110	61
—	БК	520	460	460	450	—	98	51
60	Б	810	715	715	705	700	110	61
	БК	875	790	790	775	—	98	51
75	Б	—	950	950	935	—	110	61
	БК	—	1020	—	—	—	105	56
100	Б	1540	1350	1350	1335	1330	110	61
	БК	1630	1450	1450	1430	—	105	56
150	Г	2280	2090	2090	2065	2060	137	71
	Б	2100	—	—	—	—	137	71
200	Г	3200	2920	2920	2890	—	166	81
300	Г	4900	4610	4610	4560	—	184	91
500	Г	8700	8300	8300	8225	—	240	111
750	Г	—	13 100	13 100	—	—	309	151
1000	Г	19 100	18 600	18 600	18 450	—	309	151

Примечания: 1. Тип цоколя: E27/27 — для ЛН мощностью от 15 до 200 Вт, E27/30, 32 — для ЛН мощностью до 300 Вт с колбой длиной 184 мм, E40/45 — для ЛН мощностью от 300 до 1000 Вт (по СТ СЭВ 783-77)

2. Световой поток указан для ЛН в прозрачных колбах. Лампы мощностью до 300 Вт включительно могут изготавливаться: в матированных (МТ) колбах — со световым потоком не менее 97% указанных в таблице, в опаловых (О) колбах — не менее 80%, молочных (МЛ) — не менее 80%.

зультате электрического разряда в газах, парах или их смесях), в том числе и различные люминесцентные лампы (электрофотолюминесценция).

Основными параметрами электрических ИС являются: номинальная мощность, световая отдача, измеряемая числом люменов на 1 Вт (лм/Вт), напряжения питающей сети и на лампе, пусковые и рабочие токи, номинальный световой поток и спад светового потока через определенное время эксплуатации, средний или номинальный срок службы. Почти все эти параметры регламентируются соответствующими ГОСТ или ТУ (см. ниже, табл. 56.3, а также [56.10]).

#### Лампы накаливания

Для целей освещения находят широкое распространение электрические [56.3] лампы накаливания (ЛН) общего назначения (табл. 56.3), что объясняется простотой их эксплуатации и отсутствием специальных устройств для включения их в электрическую сеть. Они могут быть вакуумными (тип В, от 15 до 25 Вт) и газополными (типы Г, Б, БК, от 40 до 1500 Вт). Лампы типов Г (моноспиральная) и Б (биспиральная) наполняются аргоном с добавлением 12–16% азота. Лампы с криптоновым наполнением (тип БК) имеют световую отдачу на 10–20% выше ламп с аргоновым наполнением. Ввиду высокой стоимости криптона им наполняются пока маломощные ЛН

(от 40 до 100 Вт) в специальных грибовидных баллонах.

Вольфрамовая нить накала при большой ее длине может сворачиваться в спираль, биспираль (лампы типа Б), триспираль и образовывать различные конструктивные формы (цилиндрическую, кольцевую, прямоугольную и т. д.).

Вследствие нестабильности напряжения питающей сети в настоящее время выпускаются ЛН, допускающие колебание напряжения в диапазоне  $\pm 5$  В от расчетного (табл. 56.3). Диапазон напряжений указывается на лампе, например 125–135, 215–225 и т. д.

Для повышенного напряжения электрической сети выпускаются специальные ЛН с расчетным напряжением 235 и 240 В с тем же диапазоном его изменения. Расчетное напряжение 240 В применяется только для ЛН мощностью 60, 100, 150 Вт. Лампы на напряжение 235 и 240 В нецелесообразно применять при стабильном напряжении сети 230 В из-за резкого уменьшения их светового потока в такой сети. Условные обозначения ЛН общего назначения имеют такую структуру: тип наполнения и тела накала, вид колбы ЛН (если она не прозрачная), диапазон напряжения, номинальная мощность, наименование доработки. Например, ЛН вакуумная, прозрачная колба, на напряжение 125–135 В, мощность 25 Вт, вторая доработка — В 125–135–25–2; ЛН газополная моноспиральная аргоновая в матированной (МТ) колбе — ГМТ 220-230-150.

Средняя продолжительность горения ЛН общего назначения при расчетном напряжении (табл. 56.3) должна быть не менее 1000 ч. Продолжительность горения каждой лампы должна быть не менее 700 ч. Средняя продолжительность горения ЛН на напряжение 215–225 В со Знаком качества (ЗК) при расчетном напряжении должна быть не менее 1100 ч.

Снижение светового потока каждой ЛН, измеренного после 750 ч горения при расчетном напряжении, должно быть не менее (в процентах начального): 72 % для ЛН мощностью 15 и 25 Вт при напряжениях 125–135 В, 74 % для прочих напряжений; 85 % при мощности 40–200 Вт для всех напряжений (80 % для криптоновых ламп); 80 % при мощности 300, 500 Вт при напряжениях 125–135 В, 85 % для прочих напряжений; 70 % при мощности 750, 1000 Вт при напряжениях 125–135 В, 80 % для прочих. Для ЛН с ЗК мощностью 40–100 Вт снижение светового потока каждой ЛН после 750 ч горения должно быть не менее 85 %. Если ЛН не соответствует этому требованию, то следует считать, что продолжительность ее горения равна 690 ч.

Для местного освещения применяются специальные ЛН на пониженное напряжение сети (табл. 56.4).

В последнее время широкое распространение получили ЛН, колбы которых покрыты отражающим слоем (зеркальным или белым диффузным) (табл. 56.5). Придавая ту или иную форму зеркальной части колбы, получают ЛН с определенной КСС (см. табл. 56.5). Так как ЛН с отражающими покрытиями имеют требуемую КСС, то для их применения используются световые приборы без оптических устройств, что значительно удешевляет СВ с ними. Кроме того, ЛН с отражающими

Таблица 56.4. Номинальные параметры ЛН местного освещения (МО) на напряжение 12, 24, 36 В

Тип лампы	Мощность, Вт	Ф, лм	Диаметр колбы, мм	Полная длина, мм
МО12-15	15	200	61	108
МО12-25	25	380	61	108
МО12-40	40	620	61	108
МО12-60	60	1000	61	108
МО24-25	25	350	61	108
МО24-40	40	580	61	108
МО24-60	60	950	61	108
МО24-100	100	1740	66	129
МО36-25	25	345	61	108
МО36-40	40	580	61	108
МО36-60	60	950	61	108
МО36-100	100	1590	66	129

Таблица 56.5 Лампы накаливания с отражающими слоями (лампы-светильники)

Напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Размеры, мм	
			Диаметр	Полная длина
<i>Общего освещения с диффузным слоем типа НГД</i>				
127	40	390	71	101
127	60	640	71	101
127	100	1260	81	125
127	150	2040	93	157
127	200	2860	93	157
220	40	340	71	101
220	60	580	71	101
220	100	1110	81	125
220	150	1740	93	157
220	200	2500	93	157
220	300	3700	105	190
<i>Местного освещения с диффузным слоем типа МОД</i>				
12	25	270	71	104
12	40	480	71	104
12	60	810	71	104
36	25	240	71	104
36	40	400	71	104
36	60	720	71	104
36	100	1380	81	133
<i>Зеркальные с широким (Ш) светораспределением типов ЗН27-ЗН30</i>				
220	300	4100	134	250
220	500	7560	162	300
220	750	12230	162	300
220	1000	17200	162	300
<i>Зеркальные со средним (Г) светораспределением типа НЗС (в графе «Световой поток» указана осевая сила света, кд)</i>				
127	40	210	73	122
127	60	350	73	122
127	75	470	87	128
127	100	670	87	128
220	40	180	73	122
220	60	300	73	122
220	75	400	87	128
220	100	590	87	128
<i>Зеркальные с концентрированным светораспределением типа НЗК (в графе «Световой поток» указана осевая сила света, кд)</i>				
127	40	630	91	131
127	60	1060	91	131
127	75	1400	97	144
127	100	2000	97	144
127	150	1700	128	175
127	200	2300	128	175
127	300	4250	127	185
127	500	9000	180	267
127	750	16 800	201	267
127	1000	21 300	201	267
220	40	530	91	131
220	60	890	91	131
220	75	1200	97	144
220	100	1780	97	144
220	150	1400	128	175
220	200	1900	128	175

Продолжение табл. 56.5

Напря- жение, В	Мош- ность, Вт	Свето- вой поток, лм	Размеры, мм	
			Диа- метр	Полная длина
220	300	3350	127	185
220	500	5050	180	267
220	750	15 000	201	267
220	1000	20 600	201	267

Зеркальные для местного освещения типа МОЗ  
(в графе «Световой поток» указана максимальная  
сила света)

12	40	150	71	109
12	60	245	71	109
24	40	160	71	109
24	60	250	71	109
24	100	450	81	128
36	40	135	71	109
36	60	240	71	109
36	100	450	81	135

Примечания. 1. Все ЛН имеют срок службы 1000 ч, за исключением типов НЗК от 150 до 1000 Вт для напряжения 127 В и от 40 до 1000 Вт для напряжения 220 В (1500 ч).

2. КСС ЛН светильников даны в табл. 56.15 Лампы типов НЗС и НЗК имеют КСС, по форме близкие к типовым кривым Г-2 и К-1 соответственно.

3. Цоколь для ЛН светильников применяется такой же, как и для простых ЛН соответствующей мощности.

покрытиями не нуждаются в чистке и при этом их световой поток и КСС более стабильны в процессе эксплуатации. Все это может обеспечить высокую экономичность осветительной установки с такими лампами.

Лампы накаливания очень чувствительны к изменению напряжения питающей сети.

Изменение основных параметров ЛН в процентах номинального значения при изменении напряжения сети на  $\pm 1\%$  примерно следующее: ток  $\pm 0,5$ , мощность  $\pm 1,5$ , световой поток  $\pm 3,5$ , срок службы  $\pm 13,0$ , световая отдача  $\pm 1,8\%$ .

Начиная с 60-х годов широкое распространение получили галогенные ЛН – ГЛН (табл. 56.6), на стенках которых при определенных условиях образуются галогениды вольфрама. Последние, испаряясь со стенок колбы ЛН, разлагаются на теле накала и возвращают ему, таким образом, атомы вольфрама. Это позволяет повысить вдвое срок службы при несколько повышенной световой отдаче. ГЛН имеют линейные или компактные тела накала. Первые выполнены в форме длинной спирали (с отношением длины к диаметру более 10), помещенной в кварцевую колбу трубчатой формы с торцевыми выводами. Вторые имеют спирали и колбы значительно меньшей длины. Обозначение ГЛН такое: К – колба из кварцевого стекла, И – иодная или Г – галогенная (бромистый метил или метилен), М – малогабаритная, далее обозначается номинальное напряжение (В), мощность (Вт), номер разрядки.

Цоколи трубчатых ГЛН бывают цилиндрическими с торцевым вводом (радиуса 7 мм для ЛН мощностью до 2 кВт и радиуса 27 мм ЛН мощностью от 5 до 20 кВт) и плоскими металлическими (первая группа трубчатых ЛН и лампы КГМ).

ЛН всех групп и типов должны удовлетворять ГОСТ 19190-84. При эксплуатации ЛН необходимо: использовать ЛН только при соответствии напряжения, указанного на лампе, напряжению сети; не превышать мощность ЛН по сравнению с максимально допустимой

Таблица 56.6 Характеристики трубчатых ГЛН

Тип лампы	Световой поток, кЛм	Размеры, мм			Срок службы, ч
		Диаметр	Длина	Длина спирали $\times$ $\times$ диаметр	
<i>Общего освещения</i>					
КГ220-1000-5	22	10,7	189	116 $\times$ 1,3	2000
КГ220-1500	33	10,7	254	186 $\times$ 1,3	2000
КГ220-2000-4	44	10,7	335	260 $\times$ 1,3	2000
КГ220-5000	110	10,7	520	275 $\times$ 3	3000
КГ220-10000	220	26,0	675	375 $\times$ 4,3	3000
КГ380-20000	440	36,0	890	570 $\times$ 6,6	2000
<i>ГЛН малогабаритные на низкое напряжение</i>					
КГМ30-300	8,9	14	65	$\delta_{\text{сп}} 9 \times 5$	20
КГМ27-400	10,8	25	85	$\delta_{\text{сп}} 9,5 \times 5,7$	250
КГМ6-25-25	0,35	10,7	36	$2_{\text{сп}} 2,7 \times 1$	200

мощностью, указанной в паспорте светильника; соблюдать рекомендованное рабочее положение ЛН в пространстве; обращаться с ЛН как с хрупкими электро- и пожароопасными изделиями.

ЛН в дальнейшем будут совершенствоваться [56.3], так как существует значительный разрыв между теоретически возможной световой отдачей вольфрама (50 лм/Вт) и фактической (25 лм/Вт).

### Люминесцентные трубчатые лампы низкого давления (ЛЛ)

В ЛЛ низкого давления плазма (ионизированные пары металла и газа) излучают как в видимых, так и в ультрафиолетовых частях спектра. С помощью люминофоров ультрафиолетовое резонансное излучение преобразуется в излучение, ощущаемое глазом.

По характеру разряда можно выделить ЛЛ дугового разряда с горячими катодами (специального назначения и общего) и тлеющего разряда с холодными катодами (для сигнализации и световой рекламы). Дуговые ЛЛ общего назначения — это трубчатые лампы прямой или изогнутой формы в основном стартерного зажигания для сетей напряжением 127 и 220 В. ЛЛ специального назначения имеют особенности в конструкции: малогабаритные, с фигурной колбой, амальгамные, быстрогорящие, высокоинтенсивные, рефлекторные, панельные и со специальным спектром излучения (цветовые, эритемные, для фотосинтеза и т. д.).

Трубчатые ЛЛ низкого давления (табл. 56.7) с дуговым разрядом в парах ртути по цветности излучения делятся на ЛЛ белого света (ЛБ, цветовая температура 3500 К), ЛЛ теплого белого света (ЛТБ, 2700 К), ЛЛ холодно-белого света (ЛХБ, 4850 К), лампы дневного света (ЛД, 6500 К) и ЛЛ дневного света с исправленной цветностью (ЛДЦ) для правильной цветопередачи, обеспечивающие со-

хранение цвета объекта таким же, каким он был при стандартном источнике.

Наиболее широко применяются ЛЛ типа ЛБ. При повышенных требованиях к передаче цветов освещением применяются ЛЛ типов ЛХБ, ЛД, ЛДЦ. Лампа типа ЛТБ применяется для правильной цветопередачи человеческого лица.

Средняя продолжительность горения всех типов ЛЛ должна быть не менее 12000 ч, а ЛЛ со Знаком качества (ЗК) мощностью 15 и 30 Вт — 15000 ч; 20–65 Вт — 13000 ч. Продолжительность горения каждой лампы должна быть не менее 4800 ч, а ЛЛ с ЗК 15 и 30 Вт — 6000 ч, 20–65 Вт — 5200 ч.

Световой поток каждой ЛЛ после 70% средней продолжительности горения должен быть не менее 70% среднего номинального потока (см. табл. 56.7).

Средняя яркость поверхности ЛЛ колеблется от 6 до 11 ккд/м<sup>2</sup>. Вследствие значительной яркости ЛЛ открытая их установка (без светильников), как правило, не допускается.

Люминесцентные лампы, как и прочие ГЛ, при включении их в сеть переменного тока излучают переменный во времени световой поток. Глубина пульсаций светового потока оценивается коэффициентом пульсации в процентах:  $K_p = (\Phi_{max} - \Phi_{min}) / 100 / 2\Phi_{ср}$ . Коэффициент пульсации всех типов равен 23% (кроме ламп типа ЛДЦ, для которых  $K_p = 43\%$ ). Изменения параметров ЛЛ в зависимости от напряжения питающей сети даны на рис. 56.4.

ЛЛ применяются для освещения общественных, жилых зданий и промышленных предприятий. Их применение по сравнению с ЛН оказывается значительно экономичнее из-за высокой световой отдачи и большего срока службы. Перспективы развития ЛЛ заключаются в улучшении их светотехнических параметров (повышении светового потока и его стабильности, увеличении срока службы и световой отдачи — предельное ее значение 120 лм/Вт), их можно достигнуть усовершенство-

Таблица 56.7. Характеристики ЛЛ по ГОСТ 6825-74 (с изменениями с 01.01.79 г.)

Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Ток лампы, А	Длина ЛЛ между штырьками, мм	Диаметр ЛЛ, мм	Световой поток, мм									
					ЛДЦ		ЛД		ЛХБ		ЛТБ		ЛБ	
					1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
15	54	0,33	437,4	27	600	530	700	590	800	680	820	700	820	760
20	57	0,37	589,8	40	850	820	1000	920	1000	920	1100	975	1200	1180
30	104	0,36	894,6	27	1500	1450	1800	1640	1940	1800	2020	1880	2180	2100
40	103	0,43	1199,4	40	2200	2100	2500	2340	3000	2780	3100	2780	3200	3000
65	110	0,67	1500,0	40	3160	3050	4000	3570	4400	4100	4650	4200	4800	4550
80	102	0,865	1500,0	40	3800	3610	4300	4070	5040	4600	5200	4720	5400	5220

Примечание. В колонках: 1 — номинальный средний световой поток ЛЛ со Знаком качества; 2 — то же ЛЛ первой категории

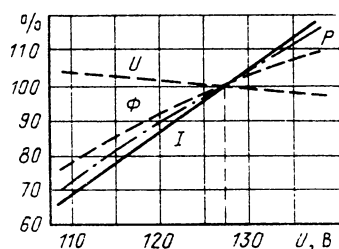


Рис. 56.4. Зависимость напряжения, светового потока, мощности и тока лампы ЛБ-15 от напряжения сети

ванием галофосфатного люминофора и применением более эффективных конструкций электродов и лампы в целом. В настоящее время производство переходит к выпуску энергоэкономичных ЛЛ с пониженной мощностью: 18 вместо 20 Вт, 36 вместо 40 Вт и 58 вместо 65 Вт, уменьшенным диаметром колбы лампы (25 вместо 40 мм) и повышенной световой отдачей.

Особенностями ЛЛ являются: включение в сеть только с пускорегулирующим аппаратом (ПРА), так как напряжение на ЛЛ при горении должно быть примерно вдвое ниже напряжения сети; работа в ограниченном диапазоне температур (от 5 до 40 °С); большая чувствительность к отклонениям напряжения (рис. 56.4) сети (например, его снижение на 20% приводит к отказу в зажигании); повышение напряжения зажигания при повышенной влажности.

ЛЛ маркируются так: первая буква – Л – люминесцентная, следующие буквы обозначают цветность, далее идут буквы, обозначающие особенности конструкции, например Р – рефлекторная, У – U-образная, К – кольцевая, Б – быстрого пуска, А – амальгамная. Цифры, стоящие после букв, обозначают мощность лампы, Вт.

### Лампы ДРЛ, ДРИ и ДНаТ

Наряду с трубчатыми ЛЛ низкого давления широкое применение нашли *ртутно-кварцевые лампы высокого давления* типа ДРЛ (дуговая ртутная люминесцентная). В обозначении ламп цифры после букв соответствуют мощности ламп, Вт, далее в скобках – процент красного излучения и последняя позиция – номер разработки. Лампа ДРЛ (табл. 56.8) состоит из кварцевой разрядной трубки, помещенной в стеклянный баллон эллипсоидной формы. На внутренней поверхности баллона нанесен слой люминофора –

фосфат-ванадат иттрия, активированный европием. Видимое излучение ртутного разряда проходит через слой люминофора. Ультрафиолетовое излучение кварцевой горелки, составляющее около 40% всего потока ее излучения, люминофор преобразует в видимое (красная область спектра от 600 до 780 нм). Процент содержания красного излучения в общем световом потоке лампы указывается в скобках (6 или 10) в обозначении ламп. Так как люминофор дает наибольшую яркость при температурах от 220 до 280 °С, то это позволяет увеличить удельную нагрузку и повысить яркость ламп примерно в 10 раз по сравнению с ЛЛ. Добавление красного излучения улучшает цветопередачу ДРЛ по сравнению с ртутными.

Световой поток и средняя продолжительность горения ламп ДРЛ регламентируются ГОСТ 16354-77. ГОСТ подразделяет эти параметры для ламп первой категории (1к) и со Знаком качества (ЗК). Средняя продолжительность горения для ламп 1 к: 6 тыс. ч для 80 и 125 Вт, 8 тыс. ч для 250 Вт, 10 тыс. ч для 400, 700 и 1000 Вт; для ЗК: 8 тыс. ч для 80 и 125 Вт, 12 тыс. ч для 400–1000 Вт. При этом 70% ламп ДРЛ должны обязательно догорать до 70% средней продолжительности, указанной выше. Для ламп ДРЛ регламентируется также процентное содержание красного излучения. Номинальное напряжение сети для всех ДРЛ 220 В, напряжение на лампах разной мощности – от 115 до 145 В.

Коэффициент пульсации светового потока ДРЛ  $K_p = 63 \div 74\%$ . При изменении напряжения сети в пределах  $\pm(10 \div 15)\%$  изменения светового потока  $\Phi_l$  и мощности  $P_l$  рассчитываются по соотношениям  $\Delta\Phi_l/\Phi_l \approx 2,5\Delta U_c/U_c$  и  $\Delta P_l/P_l \approx 2\Delta U_c/U_c$ .

Основные области применения: наружное освещение, освещение промышленных предприятий с высотой потолков более 4 м; рабочее положение ДРЛ любое, однако горизонтальное не рекомендуется. Для облегчения зажигания большинство ДРЛ имеют кроме двух основных электродов еще два вспомогательных.

Наиболее современными источниками света являются *металлогалогенные лампы (МГЛ)*, в колбу которых вводятся добавки в виде галогенидов разных металлов. Галогениды металлов испаряются легче, чем сами металлы, поэтому внутри разрядных колб МГЛ кроме ртути и аргона имеются различные соединения этих элементов. Это позволяет широко варьировать спектральное распределение излучения МГЛ и вследствие этого увеличивать их световую отдачу по сравнению с ДРЛ.

Таблица 56.8. Характеристики ламп ДРЛ по ГОСТ 16354-77

Тип	Напряжение на лампе, В	Ток, А	Начальный световой поток, клм				Световой поток каждой лампы после 30% средней продолжительности горения, клм, не менее		Диаметр внешней колбы, мм	Полная длина лампы, мм
			номинальный		каждой лампы, не менее		1К	3К		
			1-я категория	3К	1-я категория	3К				
ДРЛ80(6)-2	115	0,8	3,2	3,4	2,9	3,0	2,3	2,5	81	165
ДРЛ125(6)-2	125	1,2	5,2	6,0	4,6	5,4	3,7	4,3	91	184
ДРЛ250(6)	130	2,1	12,5	13,0	10,3	11,7	8,2	9,3	91	227
ДРЛ400(6)-2	135	3,3	20,0	23,0	18,0	20,7	14,4	16,5	122	292
ДРЛ700(6)-2	140	5,4	36,0	40,0	32,0	36,0	25,9	28,8	152	368
ДРЛ1000(6)-2	145	7,5	52,0	57,0	46,0	51,3	37,4	41,0	181	410
ДРЛ2000	270	8,0	120,0	—	—	—	—	—	187	445

Примечания: 1. Средний начальный световой поток ламп должен быть не менее 0,95 номинального  
2. Тип цоколя по ГОСТ 170011-71 для ДРЛ 80 и 125 Вт Е27/30-32, для остальных ламп Е40/45.

Таблица 56.9. Основные параметры МГЛ типа ДРИ

Тип	Напряжение на лампе, В	Ток, А	Световой поток, клм	Средняя продолжительность горения, тыс. ч	Диаметр, мм	Полная длина, мм	Тип цоколя
-----	------------------------	--------	---------------------	---	-------------	------------------	------------

С добавками иодидов натрия и скандия,  $T_{цв} = 4200 \text{ К}$

ДРИ250-5	130	2,15	19	10	91	227	Е40/45
ДРИ250-6	130	2,15	19	3	60	227	Е40/45
ДРИ400-5	130	3,3	35	10	122	290	Е40/45
ДРИ400-6	130	3,3	32	3	62	290	Е40/45
ДРИ700-5	130	6,0	60	9	152	370	Е40/45
ДРИ700-6	130	6,0	56	3	80	350	Е40/45
ДРИ1000-5	230	4,7	90	9	176	390	Е40/45
ДРИ1000-6	230	4,7	90	3	80	350	Е40/65
ДРИ2000-6	230	9,2	200	2	100	430	Е40/65
ДРИ3500-6	230	16,0	350	1,5	100	430	Е40/65
ДМ4-3000	105	15/21	240	1,5	190	470	Специальный

С добавками иодидов натрия, галлия, индия,  $T_{цв} = 5500 \pm 500 \text{ К}$

ДРИ-250	125	2,15	18,7	3	91	227	Е40/45
ДРИ-400	130	3,4	34,0	6	91	227	Е40/45
ДРИ-700	120	6,5	59,5	5	122	300	Е40/55 × 47

Для общего освещения применяются МГЛ типа ДРИ (дуговая, ртутная с иодидными добавками). Они имеют следующий состав металлогалогенных добавок: первая группа — иодиды натрия, галлия и индия; вторая группа — иодиды натрия, скандия (иногда тория). Часть ламп ДРИ выполняются с иодидами диспрозия, имеющими сплошной спектр в видимой области.

Лампы типа ДРИ (табл. 56.9) по конструкции подобны лампам ДРЛ с двухэлектродными горелками. Они имеют прозрачные или рассеивающие свет внешние колбы эллипсоидной и цилиндрической форм. Внутри этих колб размещается кварцевая цилиндрическая горелка, где и происходит разряд в парах металлов и их иодидов. В маркировке МГЛ в первой позиции указывают тип, во



второй – мощность, третья обозначает номер разработки или модификации. Световая отдача ламп ДРИ колеблется от 70 до 95 лм/Вт. Коэффициент пульсации  $K_{п} = 20 \div 30 \%$ .

Параметры ламп ДРИ очень чувствительны к их положению во время горения. Обычно световой поток при горизонтальном положении на 15–18% ниже, чем при вертикальном. Изменение светового потока и мощности при изменении  $U_c$  в пределах  $\pm(10 \div 15)\%$  может быть рассчитано так же, как и для ламп ДРЛ.

Перспективы развития МГЛ заключаются в повышении световой отдачи до 120–130 лм/Вт, улучшении их цветопередачи и стабильности горения, а также увеличении срока службы.

Самыми экономичными современными источниками света являются *натриевые лампы* [56.10]. В них используется резонансное излучение Д-линий (589 и 589,6 нм). Это обеспечивает их высокую световую отдачу. В натриевых лампах низкого (0,2 Па) давления (НЛНД) световая отдача может достигать сотен люмен на ватт. Однако эти лампы неудовлетворительны по цветопередаче, так как их желтое излучение почти монохроматично. Они могут применяться в тех случаях, когда не требуется различать цветность объектов освещения (автостреды, туннели, товарные станции и т. д.).

В натриевых лампах высокого давления (НЛВД) используется разряд в парах натрия, ртути и зажигающем газе ксеноне. Рабочее давление паров натрия 4–14 кПа. При таком давлении резонансные линии натрия расширяются, занимая некоторую спектральную полосу. Это сказывается в том, что цветность излучения разряда белеет. При этом световая

отдача ламп достигает 100–130 лм/Вт (табл. 56.10). Коэффициент пульсации этих ламп  $K_{п} = 82\%$ . Устройство ламп НЛВД типа ДНАТ (дуговые натриевые трубчатые) аналогично устройству ламп ДРИ. Внутри стеклянной цилиндрической колбы помещается разрядная трубка из поликристаллической окиси алюминия, инертной к парам натрия и хорошо пропускающей его излучение. Лампы ДНАТ широко применяются для освещения улиц, площадей и больших открытых пространств. Перспективы их развития заключаются в увеличении световой отдачи и повышении надежности, расширении номенклатуры ламп, улучшении цветности ламп и снижении их цены. В маркировке ламп типа ДНАТ цифры обозначают их мощность в ваттах.

Для освещения больших по площади территорий находят применение *мощные ксеноновые трубчатые безбалластные лампы* типа ДКСТ (табл. 56.10). Они зажигаются с помощью пускового устройства, вырабатывающего высоковольтный (до 30 кВ) высокочастотный импульс напряжения, под воздействием которого в лампе возникает разряд в ксеноне. Применение ламп ДКСТ для освещения карьеров, сортировочных станций и других объектов объясняется их большой мощностью (5, 10, 20 кВт; мощность содержится в обозначении типа), что резко сокращает число световых приборов и уменьшает эксплуатационные расходы. Кроме того, лампы ДКСТ выгодно применять при необходимости правильно передавать цвета освещаемых объектов.

#### Пускорегулирующие аппараты

Для ограничения тока дугового разряда в цепь газоразрядных ламп последовательно

Таблица 56.10. Характеристики ламп типа ДНАТ и ДКСТ

Тип	Напряжение, В	Ток, А	Световой поток, клм	Средняя продолжительность горения, тыс. ч	Диаметр, мм	Полная длина, мм	Тип цоколя
ДНАТ-250	100	3,0	25	10	58	240	E40/45
ДНАТ-400	100	4,7	47	15	58	240	E40/45
ДКСТ-2000	40	49	35,7	0,3	26	366	Специальный
ДКСТ-5000	110	44	97,6	0,3	25	646	»
ДКСТ-10000	220	46	250	0,8	35	1260	»
ДКСТ-20000	380	56	694	0,8	35	1990	»
ДКСТ-50000	380	132	2230	0,5	42	2160	»

Примечания: 1. Положение горения ламп ДНАТ-250 – цоколем вверх, ДНАТ-400 – цоколем вверх и горизонтальное, ламп ДКСТ – горизонтальное.

2. Лампы типа ДКСТ-2000 и ДКСТ-5000 применяются с балластом.

Таблица 56.11. Характеристика основных видов ПРА для ЛЛ

Тип	Ток, А		Потери мощности, %	Масса, кг	Размеры (длина × ширина × высота), мм
	рабочий	пусковой			
1УБИ-40/220-ВП-600У4	0,43	0,86	22–24	1,1	170 × 47 × 45
1УБИ-65-220-ВП-600У4	0,67	1,34	20–22	1,65	205 × 56 × 48
1УБИ-80/220-ВП-600У4	0,865	1,65	19–21	1,75–2,3	205 × 56 × 48
2УБИ-20/220-ВПП-100ХЛ4	–	0,74	20	0,85	145 × 42 × 42
2УБИ-20/220-ВПП-110ХЛ4	–	0,74	20	0,85	145 × 42 × 42
1УБИ-40/220-ВПП-100ХЛ4	–	0,86	22	0,85	145 × 42 × 42
1УБИ-80/220-ВПП-900ХЛ4	0,86	1,72	22	1,70	230 × 39,5 × 36,5

Таблица 56.12. Характеристики основных видов ПРА для ламп типов ДРЛ, ДРИ, ДНаТ

Тип ПРА	Ток, А		Потери мощности, % (Вт)	Масса, кг	Размеры (длина × ширина × высота), мм
	рабочий	пусковой			
1ДБИ-80ДРЛ/220–В–432	0,8	1,68	20 (16)	2,5	111 × 90 × 88
1ДБИ-125ДРЛ/220–В–432	1,15	2,01	16,0	2,8	121 × 90 × 88
1ДБИ-250ДРЛ/220–В–432	2,15	4,5	10,4 (26)	3,6	145 × 90 × 88
1ДБИ-250ДРЛ/220–Н–641	2,15	4,5	10,4 (26)	5,0	210 × 110 × 180
1ДБИ-400ДРЛ/220–В–432	3,25	7,15	8 (32)	5,8	131 × 90 × 88
1ДБИ-400ДРЛ/220–Н–641	3,25	7,2	8 (32)	6,7	220 × 100 × 200
1ДБИ-700ДРЛ/220–В–432	5,45	12,0	5,6 (40)	8,3	171 × 132 × 125
1ДБИ-700ДРЛ/220–Н–026	5,45	12,0	5,7 (40)	9,5	172 × 120 × 190
1ДБИ-1000ДРЛ/220–Н–026	7,5	16,5	5 (50)	12	172 × 120 × 214
1ДБИ-2000ДРЛ/380–Н–041	7,5	16,5	3,5 (70)	23	255 × 162 × 275
<i>Для ламп ДРИ</i>					
1ДБИ-700ДРИ/220–Н–012	5,45	12	5,7 (40)	9,9	185 × 120 × 234
1ДБИ-2000ДРИ/380–Н–032	9,5	18,5	4,5 (90)	25	255 × 162 × 327
<i>Для ламп ДНаТ</i>					
1ДБИ-250ДНаТ/220–В	3,1	6	11 (28)	5,6	175 × 89 × 86
1ДБИ-400ДНаТ/220–В–009	4,6	8,6	8,0 (32)	5,6	152 × 130 × 136
1ДБИ-400ДНаТ/220–Н–009	4,6	8,6	8,0 (32)	8,2	186 × 120 × 212

включаются балластные сопротивления (чаще всего индуктивные). Кроме того, имеется еще ряд элементов схемы включения газоразрядных ламп. Дроссель, компенсирующий конденсатор для повышения коэффициента мощности, и конденсаторы, блокирующие радиопомехи, объединяются в пускорегулирующие аппараты (ПРА). Они делятся на три группы по способу зажигания: стартерного (условное обозначение УБ), быстрого и мгновенного зажигания (условное обозначение бесстартерных схем АБ). Основные типы ПРА для ЛЛ, ламп ДРЛ, ДРИ, ДНаТ приведены в табл. 56.11.

Схемы зажигания ЛЛ импульсом напряжения с помощью стартеров показаны на рис. 56.5, а–в.

Бесстартерные ПРА быстрого зажигания тех же ламп (рис. 56.6) работают с помощью накальных трансформаторов *НТ*, которые предварительно нагревают катоды лампы. В момент возникновения разряда в лампе ток накала ПРА автоматически снижается. Для снижения напряжения зажигания вдоль лампы накладывается металлическая полоска (рис. 56.6). Иногда применяются бесстартерные ПРА мгновенного зажигания, осуществляемого с

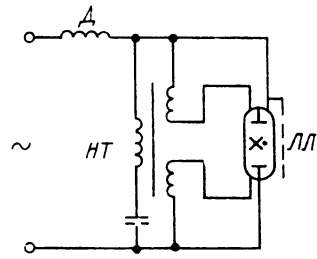
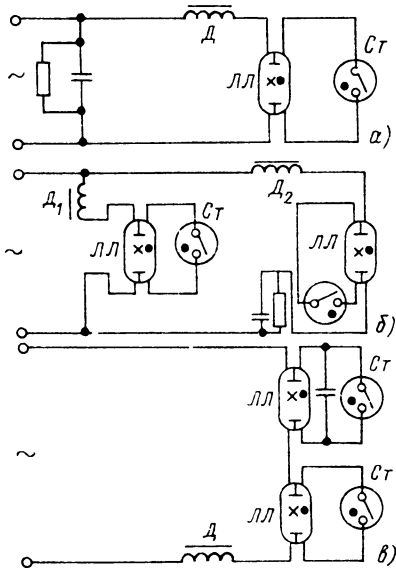


Рис. 56.6. Резонансная бесстартерная схема включения ЛЛ (НТ – накальный трансформатор)

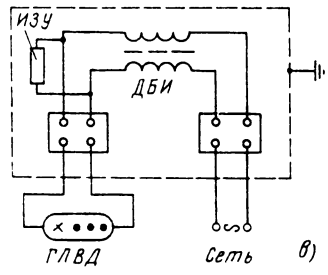
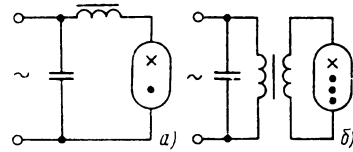


Рис. 56.7. Схемы включения газоразрядных ламп высокого давления

а – ДРЛ с дросселем; б – с трансформатором, имеющим большое магнитное рассеяние; в – ДРИ и ДНаТ; ДБИ – балластный дроссель; ИЗУ – импульсное зажигающее устройство; ГЛВД – газоразрядная лампа высокого давления

Рис. 56.5. Электрические схемы стартерных ПРА для люминесцентных ламп: а – одноламповый, дроссели балластного типа, б – двухламповый антистробоскопический типа 2УБК, в – двухламповый типа 2УБИ, Ст – стартер; ЛЛ – люминесцентная лампа

помощью импульса напряжения (до 500 – 600 В) при холодных катодах (автоэлектронная эмиссия). ПРА для ламп ДРЛ могут быть либо с дросселем (рис. 56.7, а), либо с трансформатором, имеющим большое рассеяние (рис. 56.7, б). Для включения ламп ДРИ и ДНаТ применяются ПРА (рис. 56.7, в) с унифицированными устройствами импульсного зажигания (ИЗУ), основными элементами которых являются динисторы (диодные тиристоры). При работе ламп с ИЗУ повторное включение погасшей лампы возможно только после ее остывания – через 10 – 15 мин. Для мгновенного повторного зажигания ламп существуют специальные блоки мгновенного перезажигания (БМП), посылающие высоковольтный импульс напряжения (40 – 60 кВ).

Все ПРА имеют обозначения, состоящие из ряда цифр и букв. Порядок их следования такой: на первом месте – цифра, указывающая, какое количество ламп включается с аппаратом, на втором – буквенное обозначение УБ, АБ, ДБ – дроссель балластный (для ДРЛ, ДРИ, ДНаТ), на третьем – буква, характеризующая сдвиг фаз потребляемого аппаратом тока: И – индуктивный; Е – емкостной; К – компенсированный; на четвертом – дробь,

числитель которой – мощность и тип лампы (для ДРЛ, ДРИ, ДНаТ), знаменатель – напряжение питающей сети. Буквенный индекс в конце маркировки дает дополнительную характеристику аппарата: Н – независимый, В – встроенный, П – с пониженным уровнем шума; ПП – с особо низким уровнем шума. Три цифры после буквенного индекса указывают номера серии и модификацию ПРА. В конце обозначения ПРА указываются климатическое исполнение, предназначенное для эксплуатации в районах с климатом: У – умеренным; ХЛ – холодным; ТВ – тропическим влажным; ТС – тропическим сухим; Т – как с сухим, так и с влажным тропическим; 0 – любым на суше, и категория размещения:

1 – на открытом воздухе; 2 – в помещениях, плохо изолированных от окружающего воздуха, и под навесами; 3 – в обычных естественных вентилируемых помещениях; 4 – в помещениях с искусственно регулируемым климатом (4,1 – с кондиционированным воздухом, 4,2 – лабораторные помещения); 5 – в помещениях с повышенной влажностью, в том числе невентилируемых подземных помещениях. Например ПРА для включения двух ЛЛ, стартерного зажигания, индуктивный, мощностью ламп 20 Вт, для напряжения сети 220 В, встроенный в СВ, с особо низким уровнем шума серии 110, для холодного климата в помещениях с искусственным климатом имеет шифр 2УБИ-20/220-ВП-110ХЛ4 (см. табл. 56.11). ПРА для одной лампы ДРЛ с балластным дросселем, мощностью 250 Вт, встроенный в СВ имеет шифр 1ДБИ-250ДРЛ/220 В (табл. 56.12).

Перспективными являются полупроводниковые (тиристорные или транзисторные) ПРА. Они имеют малую массу, небольшие габаритные размеры и могут одновременно со стабилизацией питающего тока преобразовывать его частоту (до 2000 Гц). Они существенно сокращают расход остродефицитного проводникового материала. Широкому их распространению пока мешает большая стоимость полупроводниковых приборов. Задачей дальнейшего развития ПРА является разработка полупроводниковых ПРА и схем с хорошей устойчивостью работы, расширение их номенклатуры и снижение стоимости.

## 56.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### Основные характеристики осветительных приборов

Осветительный прибор (ОП) состоит из двух главных частей – источника света (ИС) и оптического устройства (ОПУ), перераспределяющего световой поток источника в пространстве (отражающего, преломляющего, рассеивающего). Кроме ИС и ОПУ прибор имеет устройства, коммутирующие и стабилизирующие электрический ток, устройства крепления ИС и ОПУ и другие конструктивные узлы.

ОП можно делить на два класса: приборы ближнего действия – светильники (СВ) и приборы дальнего действия – прожекторы (ПР). СВ применяются для освещения объектов, удаленных на расстояния, лишь в десятки раз большие, чем их размеры. ПР применяются на расстояниях, в сотни и тысячи раз больших их диаметров.

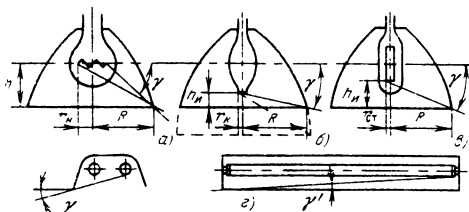


Рис. 56.8. Защитные углы светильников: а – с лампой накаливания; б – с лампой ДРЛ; в – с лампой ДРИ;  $r$  – с люминесцентной лампой ( $\gamma$  – в поперечной плоскости,  $\gamma'$  – в продольной плоскости)

СВ характеризуются: мощностью источника, напряжением питающей сети, габаритными размерами (диаметр  $D$ , высота  $H$ ), КСС, дающей зависимость значений силы света  $I(\alpha)$  (см. рис. 56.9, табл. 56.15), ориентирующих направление в некоторой плоскости; КПД  $\eta = \Phi_{п,св}/\Phi_{л}$  (где  $\Phi_{п,св}$  – полезный световой поток прибора;  $\Phi_{л}$  – световой поток источника); коэффициентом усиления  $K_y = I_{maxсв}/I_{ср}$  (где  $I_{maxсв}$  – максимальная сила света прибора;  $I_{ср}$  – среднесферическая сила света ИС, для цилиндрических ИС иногда вместо  $I_{ср}$  берут максимальную силу света лампы  $I_{maxл}$ ); защитным углом  $\gamma = \arctg(h/(R+r))$ , где  $h$  – расстояние от края светящего тела лампы до плоскости светового отверстия (рис. 56.8);  $R$  – радиус светового отверстия;  $r$  – радиус или тела накала ( $r_n$ ), или точки касания в колбе лампы ДРЛ ( $r_k$ ), или горелок ламп ДРИ, ДНаТ ( $r_{ст}$ ).

ПР кроме мощности характеризуются: диаметром  $D$ , углом охвата  $\varphi_{max}$  или фокусным расстоянием  $f$ ; осевой  $I_0$  или максимальной  $I_{max}$  силой света и 10%-ным углом рассеяния  $\alpha_{10}$ , в пределах которого сила света снижается в 10 раз по сравнению с ее осевым значением.

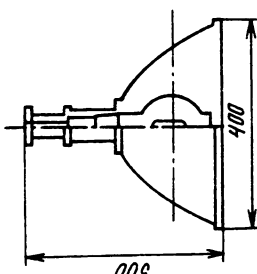
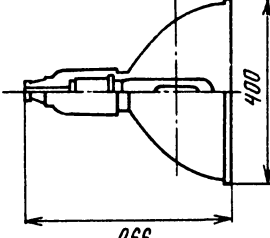
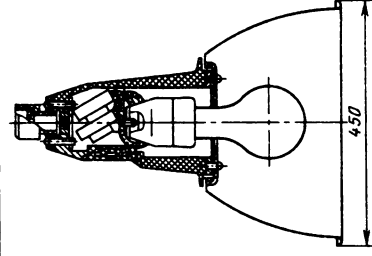
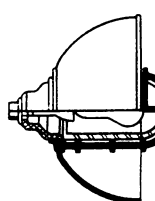
### Светильники

Защитный угол  $\gamma$  СВ (табл. 56.13) имеет важное значение для ограничения их слепящего действия. Круглосимметричные СВ характеризуются одним значением угла  $\gamma$ . Люминесцентные СВ характеризуются двумя значениями угла: в поперечной  $\gamma$  (перпендикулярной лампам) и в продольной  $\gamma'$  плоскостях (см. рис. 56.8). Для обеспечения равенства указанных углов в люминесцентных СВ устраиваются затеняющие решетки с продольными и поперечными планками.

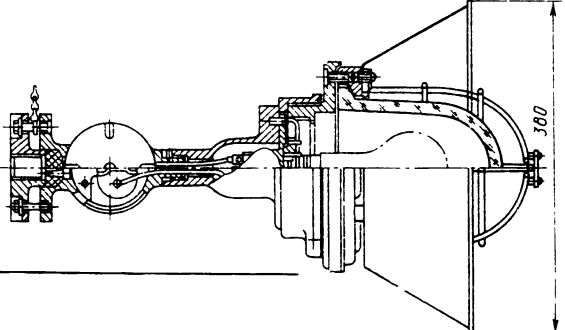
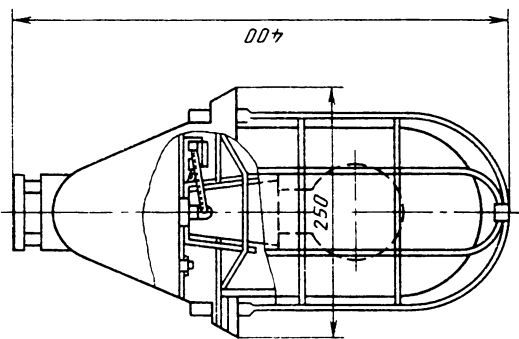
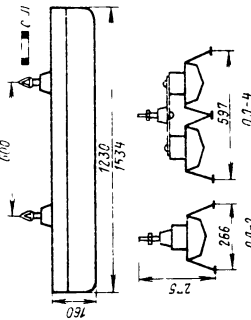
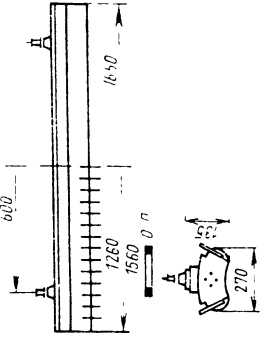
Ограничение ослепленности, создаваемой СВ, достигается соответствующей высотой их

Таблица 56.13. Основные типы СВ внутреннего освещения

Наименование, условное обозначение	СВ с диффузными отражателями		СВ с зеркальными отражателями
	НСП-22 УПМ 15 открытый	УП-24 со стеклом	
Эскизный чертёж			
Тип лампы	ЛН	ЛН	ДРЛ
Мощность лампы, Вт	500	500	250, 400
Класс	Прямого света	Прямого света несимметричнос	Прямого света
Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 56.15)	Д-2	Г-1	Г-3
КПД η, %	0,75	0,67	0,75
Защитный угол γ	15°	—	15°
Наименьшая высота подвеса, м	4	3	4
Степень защиты	5'0	IP63	IP20

Наименование, условное обозначение	СВ с зеркальными отражателями			Для химических сред		
	ГС	НСП17	ГК			
Эскизный чертёж	<p>ГСП-18</p> 	<p>ЖСП-20</p> 			ПСХ	
	ДРИ	ДНаТ	ЛН	ЛН		
	250, 400   700, 1000	250, 400	500-1000   1000	60		
	Прямого света	Прямого света	Прямого света	Преимущественно прямого света М		
	Г-2   Г-4	К-2	Г-4   К-1	Д-1/Д***		
0,70   0,75	0,70	0,80	0,60, 0,50			
15°   20°	20°	30°	—			
4   5	4	5   6	3			
Наименьшая высота подвеса, м						
Степень защиты	IP20	IP20	IP20	IP54		

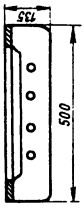
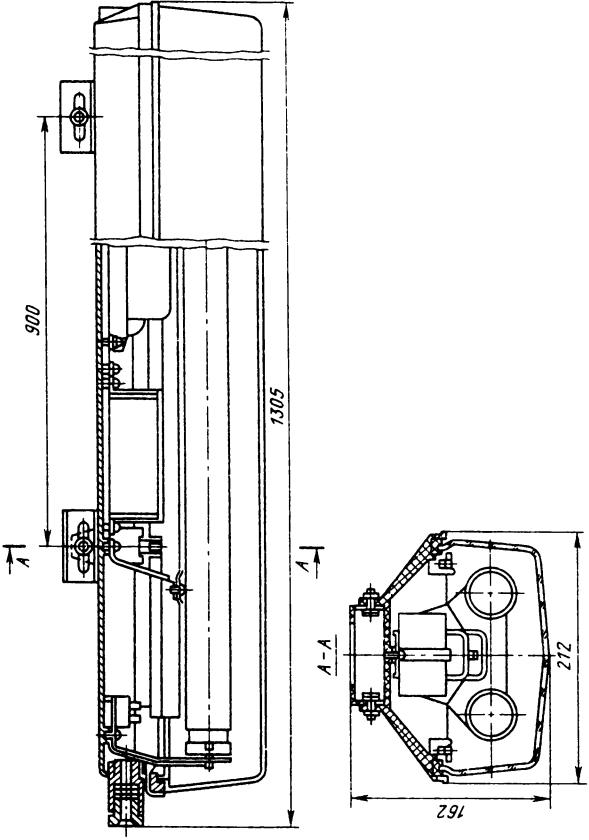
Продолжение табл. 56.13

Наименование, условное обозначение	Взрывозащищенный		Повышенной надежности с отражателем		Люминесцентный с диффузным отражателем и решеткой		Люминесцентный с диффузным отражателем и планками	
	ВЗГ-200АМ без отражателя	ВЗГ-200АМ с диффузным отражателем	Н4БН-150	Н4БН-300М	ОДР-2	ОДР-4	ЛСПО6	
Эскизный чертеж								
	Тип лампы	ЛН	ЛН	ЛН	ЛЛ	ЛЛ	ЛЛ	
Мощность лампы, Вт	200	300	2 × 40 или 2 × 80	4 × 40 или 4 × 80	2 × 40, 2 × 65, 2 × 80			
Класс	Прямому-щественно-прямого света	Прямого света	Прямого света	Прямого света	Прямого света		Прямого света	

Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответ- ствии с табл. 56.15)	М, Д-1/Д	Д-1	Г-1	Г-2	Г-1	Г-2	Д-2	Д-2, Д-1
КПД $\eta$ , %**	0,75, 0,55	0,60	0,55	0,60	0,70	0,65	0,70	0,70
Защитный угол $\gamma$	—	16°	15°	15°	15°	15°	15°	15°
Наименьшая высота подвеса, м	4	3	3	4	3	3	3	3
Степень защиты	2Е × dПТ3*	2Е × dПТ3*	2Е × ПП2*	2Е × ПП2*	IP20	IP20	IP20	IP20
					в двух главных плоскостях		в двух главных плоскостях	



Продолжение табл. 56 А3

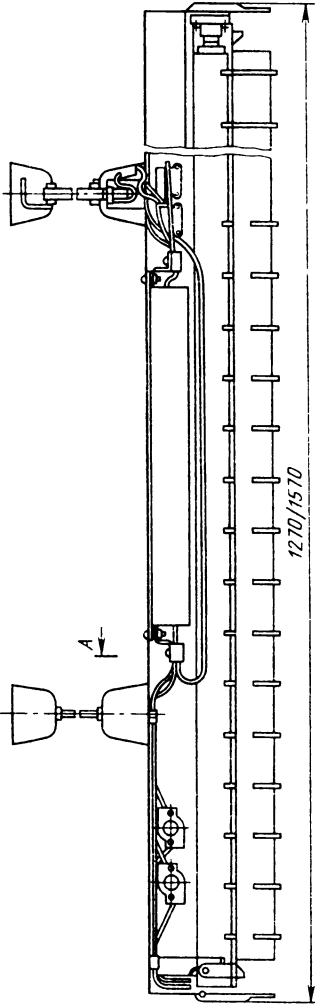
Наименование, условное обозначение	Люминесцентный потолочный с рассеивателем	Люминесцентный с рассеивателем уплотненный
Эскизный чертёж		<p>ЛПО25</p>
<p>Тип лампы                      Мощность лампы, Вт                      Класс                      Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 56.15)                      КПД, η, %                      Защитный угол γ                      Наименьшая высота подвеса, м                      Степень защиты</p>	<p>ЛСП13</p>  <p>ЛЛ                      2 × 40, 2 × 65                      Прямое свечение                      Д-2, Л1                      0,75                      15°                      3                      IP20</p> <p>в двух главных плоскостях</p>	<p>ЛПО25</p> <p>ЛЛ                      2 × 40, 4 × 40                      Прямое свечение                      Д-1                      0,50, 0,45                      —                      2,7, 3                      IP54</p>

Продолжение табл. 56.13

Люминесцентный подвесной с рассеивателем и решеткой  
ЛС004

Наименование, условное обозначение

Эскизный чертёж



ЛЛЛ  
2 × 40, 2 × 65  
Рассеянного света  
М, Г-2  
0,70, 0,50  
30°  
3  
IP20  
в двух главных плоскостях

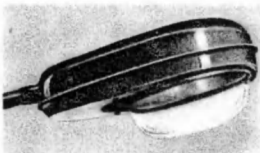
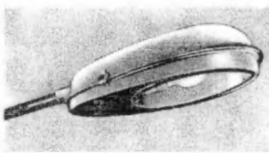
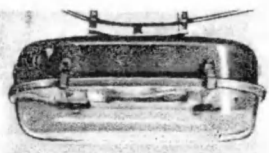
Тип лампы  
Мощность лампы, Вт  
Класс  
Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 56.15)  
КПД П, П\*\*\*  
Защитный угол γ  
Наименьшая высота подвеса, м  
Степень защиты

\* СВ — экспортного исполнения повышенной надежности против взрыва с видом защиты «взрывонепроницаемая оболочка» под группы II, температурного класса 3 (от 200 до 300 °С).

\*\* П<sub>в</sub> — поток в нижнюю полусферу, отнесенный к потоку лампы

\*\*\* КСС — верхняя полусфера/нижняя полусфера

Таблица 56.14. Основные виды СВ наружного освещения


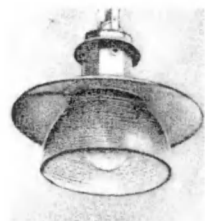


Наименование	Зеркальный консольный перекрытый	Зеркальный консольный открытый		Зеркальный подвесной перекрытый		
		РКУ01-250	РКУ01-400	РСУ05-250	ГСУ05-250	ЖСУ05-250
Условное обозначение	ЖКУ01-400	РКУ01-250	РКУ01-400	РСУ05-250	ГСУ05-250	ЖСУ05-250
Эскизный чертеж						
Тип лампы Мощность лампы, Вт Класс СВ, тип КСС (табл. 56.15)	ДНаТ 400  Прямого света, Ш/Д*	250   ДРЛ   400 Прямого света, Л – Ш/Д*	ДРЛ   ДРИ   ДНаТ 250   250   250 Прямого света, Л – Ш/Д*			
КПД	0,58	0,7	0,55			
Коэффициент использования по освещенности при В/Н = 3	0,34	0,3	0,28			
Степень защиты	IP53	IP23	IP53 (23)			
Категория улиц	А, Б	В   А, Б	В   Б, В   Б			
Высота установки, м (не менее)	11,5	9,0   10,5	8,0   9,5   10,5			

\* КСС в поперечной плоскости, в продольной плоскости

подвеса, наименьшее значение которой, регламентируемое «Строительными нормами и правилами» (СНиП) [56.4], зависит от защитного угла, типа СВ и мощности применяемой лампы. Если в СВ применяется лампа накаливания с колбой из матированного стекла, то высота подвеса может быть снижена на 0,5 м по сравнению с нормируемой (табл. 56.13, 56.14). Если СВ с лампой накаливания имеет защитный угол  $\gamma \leq 10^\circ$  СВ, то они без рассеивателей не применяются. СВ с матированными лампами накаливания мощностью до 60 Вт либо с матированными рассеивателями

и обычными лампами мощностью до 60 Вт не имеют ограничений по высоте подвеса. Высота подвеса СВ с лампами ДРЛ должна быть не менее 6 м при мощности лампы 400 Вт и более и не менее 4 м при лампах мощностью 400 Вт.

По соотношению потоков, направляемых СВ в верхнюю ( $\Phi_{\uparrow}$ ) и нижнюю ( $\Phi_{\downarrow}$ ) полусферы, они делятся на СВ прямого ( $\Pi$ ) света ( $\Phi_{\downarrow} \geq 0,8\Phi_{\text{св}}$ ), СВ преимущественно прямого ( $\Pi$ ) света ( $0,6\Phi_{\text{св}} < \Phi_{\downarrow} < 0,8\Phi_{\text{св}}$ ), СВ рассеянного ( $P$ ) света ( $\Phi_{\downarrow} - \Phi_{\uparrow} \leq \pm 0,2\Phi_{\text{св}}$ ), СВ преимущественно отраженного ( $B$ ) света ( $0,6\Phi_{\text{св}} < \Phi_{\uparrow} <$

Подвесной с рассеивателем		Подвесной призматический	Венчающий, шаровой, стеклянный, с кольцевой решеткой	Парковый с рассеивателем
СПОР-250	СПОГ-250	СПО-200	РТУ04-125	РТУ02-125
				
ДРЛ	ДРИ	ЛН	ДРЛ	ДРЛ
250	250	200	125	125
Преимущественно прямого света, Д		Прямого света Ш	Преимущественно отраженного света, С	Рассеянного света, С
0,65	0,24	0,7 0,32	0,65 0,15	0,6 0,14
IP23		IP23	IP53	IP53
В	Б	В	Декоративное освещение скверов и парков	Освещение парков
8,0	9,0	7,5		3,0—4,0

$< 0,8\Phi_{св}$ ) и СВ отраженного (0) света ( $\Phi_{\Omega} \geq 0,8\Phi_{св}$ ). По КСС СВ прямого света делятся на глубоководные (кривые *К, Г, Д* на рис. 56.9, *а* и *б*) и широкоизлучающие (кривые *Л, Ш* на рис. 56.9, *б*). СВ рассеянного света могут иметь равномерную и синусную КСС (кривые *М, С* на рис. 56.9, *б*). СВ для внутреннего освещения помещений могут иметь все вышеперечисленные КСС, рациональные СВ наружного освещения должны быть СВ прямого света, широкоизлучающими.

Основные типы СВ внутреннего общего и местного освещения даны в табл. 56.13, а наружного освещения — в табл. 56.14. КСС для этих СВ приведены в табл. 56.15 и 56.16, причем они даны в этих таблицах более детально, чем в классификации (рис. 56.9, *а, б*).

«Правила устройства электроустановок» (ПУЭ) различают [56.5] СВ по степени защиты от попадания внутрь твердых посторонних тел, в частности пыли; по степени защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением частями, расположенными внутри оболочки изделия, а также по степени защиты от воды. Степень защиты характеризуется двумя цифрами. Первая — класс или подкласс СВ по степени его защиты от пыли и соприкосновения с частями, находящимися под напряжением, а вторая — степень защиты СВ от проникновения воды. По защите от пыли конструкции СВ делятся на три класса: пыленезащищенные — 2, пылезащищенные — 5, пыленепроницаемые — 6. Первый класс (2) имеет защиту от возможности прикосновения паль



Таблица 56.16 КСС СВ наружного освещения (для  $\Phi_{л} = 1000$  лм) в продольной (Пр) и поперечной (Пп) плоскостях

Углы	ЖКУ01-400		РКУ01-400		PCУ06-250		СПОГ-250	СПО-200	РТУ04-250	РТУ02-125
	Пр	Пп	Пр	Пп	Пр	Пп				
0°	180	180	200	200	220	220	210	180	0	15
10	180	180	180	200	210	220	210	180	0	23
20	175	200	170	205	170	220	205	180	5	30
30	125	215	150	215	150	220	200	180	10	37
40	100	220	135	225	130	220	190	180	20	42
50	75	250	125	240	100	240	160	180	35	45
60	50	275	80	300	60	440	110	200	45	48
70	25	315	50	260	10	360	75	260	52	54
80	0	100	50	50	0	100	45	100	60	58
90	0	0	0	0	0	0	30	0	62	56
100	—	—	—	—	—	—	35	—	65	53
110	—	—	—	—	—	—	45	—	70	45
120	—	—	—	—	—	—	50	—	70	38
130	—	—	—	—	—	—	40	—	70	30
140	—	—	—	—	—	—	30	—	70	20
150	—	—	—	—	—	—	25	—	70	15
160	—	—	—	—	—	—	15	—	70	10
170	—	—	—	—	—	—	10	—	70	5
180°	—	—	—	—	—	—	0	—	70	0

Таблица 56.17. Номенклатура выпускаемых КОУ и их основные параметры

Тип	Размеры КОУ				Тип лампы	Параметры лампы					Масса, кг		
	Каналы		Камеры			Мощность, Вт	Световой поток, кЛм	Срок службы, ч	Количество в КОУ	Общая потребляемая мощность, кВт	КПД, %	с ПРА	
	$L_k$ , м	$d$ , мм	$L_k$ , м	$H_k$ , мм								без ПРА	с ПРА
КОУ1-М600-4Х700-У3	18	650	1.5	700	ДРИ3700-1	700	38	3000	4	2.95	40	80	160
КОУ1-М275-1Х250-У3	6	275	1	380	ЛФМГ-250	250	14	2000	1	0.26	40	12.5	16
КОУ1-М275-1Х400-У3	6	275	1	380	ЛФМГ-400	400	25	2500	1	0.42	40	12.5	18
КОУ1-М275-1Х700-У3	6	275	1	380	ДРИ3700-1	700	38	3000	1	0.74	40	12.5	22
КОУ1-Т140-1Х300-У3	3	140	0.3	210	ЗК220-300	300	3	1500	1	0.30	30	15	—

рической формы. Оболочка световода может быть жесткой (полый металлический цилиндр с зеркальным покрытием) и мягкой — из металлизированной полиэтилентерефталатной (ПТЭФ) пленки. И в том и в другом случае световод имеет выходную светорассеивающую щель, через которую выходит световой поток, испытавший многократные отражения от зеркальных стенок световода. Световой поток от источника вводится в световод через его торец. Световод и ИС входят в комплектное осветительное устройство (КОУ), предназначенное для освещения производственных помещений с большим содержанием пыли и влаги, а также пожароопасными и взрывоопасными зонами (см. § 57.7). Применение КОУ в указанных помещениях возможно при обязательной установке ИС вне этих помеще-

ний либо в строительных галереях и коммуникационных помещениях.

КОУ состоит из следующих основных частей (рис. 56.10): камеры 1, ИС 2, входного торцевого элемента 3, канала шелевого световода 4, выходной продольной щели 5 и оконечного торцевого элемента 6.

КОУ рассчитаны на работу в сети переменного тока с номинальным напряжением 380/220 В. Степень защиты оболочек устрой-

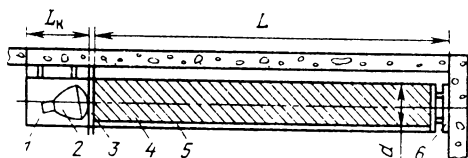


Рис. 56.10. Устройство КОУ с цилиндрическим световодом

Таблица 56.18. Характеристики основных типов прожекторов ПЗ с ЛН, ДРЛ и ДКСТ

Тип прожектора или светильника	Тип лампы	Максимальная сила света, ккд	Угол рассеяния в плоскости		Габаритные размеры, мм			Масса, кг
			горизонтальной	вертикальной	Высота	Ширина	Длина	
ПСМ-50-1	Г220-1000	120	21°	21°	650	545	640	10
ПСМ-50-1	ДРЛ700	52	74	90				
ПСМ-50-1	ДРЛ400	20	74	90				
ПСМ-50-2	ПЖ220-1000	640	9	9	560	435	530	8
ПСМ-40-1	Г220-500	70	19	19				
ПСМ-40-2	ПЖ-220-250	280	9	9				
ПСМ-30-1	Г220-200	33	16	16	440	340	430	6
ПЗР-250	ДРЛ250	11	60	60	560	430	475	16
ПЗР-400	ДРЛ400	19	60	60	570	535	575	18
ПЗС-45	Г220-1000	130	26	24	730	600	380	21
ПЗС-45	ДРЛ700	30	100	100				
ПЗС-45	ДРЛ400	14	84	90				
ПЗС-35	Г220-500	50	21	19	580	460	290	10
ПЗС-25	Г220-200	16	16	12	480	360	250	8
ПЗС-35	Г220-500	40	30	20	580	469	290	10
ПЗМ-25	Г220-200	10	8	8	480	360	250	8
ПКН-1000-1	КГ220-1000-5	52	92	18	410	345	225	9
ПКН-1000-2	КГ220-1000-5	30,5	90	40				
ПКН-1500-1	КГ220-1500	90	92	20				
ПКН-1500-2	КГ220-1500	45,5	106	54	410	400	225	10
ИСУ01Х2000/К-63-01	КГ220-2000-4	71	100	35				
ИСУ02Х5000/К-03-02	КГ220-5000-1	200	100	65				
СКсН-10000	ДКсТ10000	165	135	24	1040	675	1925	180(40)
ОУКсН-20000	ДКсТ20000	650	95	10	1616	840	2500	330(40)
ОУКсН-50000	ДКсТ50000	1300	140	40	2700	1650	3700	420(100)
ККУ01Х20000/Н00-01	ДКсТ20000	120	—	—	900	540	2370	—

Примечания. 1 В скобках указана масса отдельно устанавливаемого ПРА.

2. Подвижность прожекторов в горизонтальной плоскости 360°.

3. Размеры светового отверстия ПКН-1000 250×290 мм

4. Размеры светового отверстия ПКН-1500 250×350 мм

Таблица 56.19 Характеристики прожекторов типов ПГЦ и ПГП с лампами ДРИ

Тип	Характеристика отражателя	Мощность лампы, кВт	Осевая сила света, ккд	Угол рассеяния		КПД, %	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
				по горизонтали	по вертикали		Ширина	Глубина	Высота	
ПГП-400	Зеркальный	0,4	540	10°	10°	30	—	—	—	—
ПГП-1000	»	1	1000	17	17	30	720	850	975	50
ПГП-2000	»	2	1800	18	18	30	—	—	—	—
ПГП-3500	»	3,5	3000	18	18	30	960	910	1150	68
ПГЦ-400-1	»	0,4	50	75	20	45	—	—	—	—
ПГЦ-400-2	Рифленный	0,4	18	100	80	60	—	—	—	—
ПГЦ-1000-1	Зеркальный	1,0	150	73	20	45	700	400	730	40
ПГЦ-1000-2	Рифленный	1,0	50	100	80	60	—	—	—	—
ПГЦ-2000-1*	Зеркальный	2,0	500	80	20	45	—	—	—	—
ПГЦ-2000-2*	Рифленный	2,0	120	100	80	60	—	—	—	—
ПГЦ-3500-1*	Зеркальный	3,5	800	80	20	45	825	435	795	50
ПГЦ-3500-2*	Рифленный	3,5	200	100	80	60	—	—	—	—

\* Напряжение сети 380 В для прожекторов 2,0 и 3,5 кВт, 220 В для остальных

ства соответствует IP54. В качестве ИС в них применяются зеркальные металлогалогенные лампы-светильники типа ДРИЗ и ЛФМГ, а также ЗЛН типа ЗК. Характеристики некоторых КОУ приведены в табл. 56.17.

Дальнейшее совершенствование СВ всех типов заключается в повышении их КПД и увеличении стабильности светотехнических параметров. Особенно большое развитие должны получить зеркальные и призматические СВ с высокоинтенсивными лампами типа ГЛН, ДРИ и ДНаТ малой или большой мощности. Целью разработки таких СВ должно быть улучшение их показателей, хорошее воспроизведение образцовых КСС и уменьшение допусков на разброс значений силы света и КПД.

### Пржекторы

Осветительные приборы дальнего действия, отличающиеся большой концентрацией светового потока, называются прожекторами (ПР). Наиболее широко распространены ПР заливающего света (ПЗ). Они могут концентрировать световой поток в конусе (с параболическими отражателями, рис. 56.11) и в веере (с параболоцилиндрическими отражателями, рис. 56.12). Основными светотехническими параметрами ПР являются осевая сила света  $I_0$ , полезный угол рассеяния (в пределах которого световой поток  $\Phi_n$  ПР еще полезен, т. е. создает необходимую освещенность), КПД  $\eta = \Phi_n / \Phi_1$ .

Сила света  $I_0$  ПР первого типа на несколько порядков больше, чем сила света ПР второго типа, в то время как углы рассеяния в продольной плоскости у второго типа ПР много больше, чем у первого.

ПР делятся (табл. 56.18, 56.19) на ПР заливающего света со стеклянными отражателями (ПЗС), заливающего света с металлически-

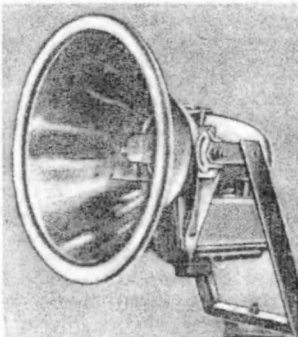


Рис. 56.11. ПР типа ППП с лампой ДРИ-3500 и параболическим зеркальным отражателем

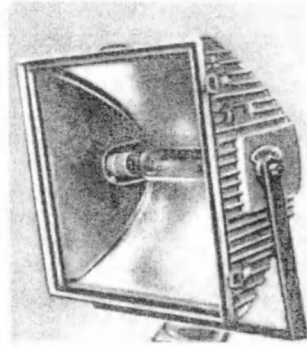


Рис. 56.12. ПР типа ПГЦ с лампой ДРИ-2000 и параболоцилиндрическим отражателем

ми отражателями (ПСМ, ПГП, ПГЦ). ПР, разработанные для освещения фасадов зданий, называются ПФС. Они имеют стеклянный отражатель и съемный рассеиватель из цилиндрических линз. Диаметр (в сантиметрах) отражателя ПР указывается при маркировке прибора, например ПЗС-35. Угол излучения этих прожекторов характеризуется 10 %-ными полезными углами рассеяния  $2\alpha_{10}$  (в пределах которых сила света снижается до  $0,1I_0$ ) в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Дальнейшее развитие прожекторных приборов предполагает увеличение их осевых сил света при сокращении диаметров отражателей и габаритных размеров. Должна быть увеличена номенклатура ПР с ГРЛ высокой интенсивности и разнообразными формами световых пучков.

## 56.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Задачей осветительной установки (ОУ) производственного помещения является обеспечение достаточной освещенности рабочей поверхности и создание благоприятного распределения яркости стен и потолка в поле зрения. Эти требования положены в основу действующих норм и правил.

Электрическое освещение подразделяется на рабочее, охранное, аварийное, эвакуационное (аварийное освещение для эвакуации). При необходимости часть СВ того или иного вида освещения может использоваться для дежурного освещения (освещения в нерабочее время). Искусственное освещение проектируется двух систем: общее и комбинированное, когда к общему освещению добавляется местное, рабочих мест.



Рабочее освещение следует устраивать во всех помещениях зданий, а также на участках территорий, где производятся работы, движется транспорт.

Проектирование ОУ производится в следующей последовательности: установление нормируемой освещенности, качественных показателей освещения (показателя ослепленности или дискомфорта), коэффициента запаса; выбор системы освещения, выбор типов источников света и СВ (с учетом технико-экономических показателей и необходимого спектрального состава), а также их размещения; расчет мощности ОУ и мощности применяемых ламп и СВ; поверочный расчет установки на минимальную освещенность.

#### Выбор нормируемых параметров

Выбор освещенности производится на основе норм, предусмотренных СНиП II-4-79 (табл. 56.20) [56.4]. Нормируемое значение освещенности в люксах иногда следует повышать или понижать по сравнению со значениями, указанными в табл. 56.20. Это следует делать с помощью ступеней изменения освещенности, регламентированных следующей шкалой: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500; 5000 лк.

Нормы освещенности, приведенные в табл. 56.20, следует повышать на одну ступень шкалы освещенности в следующих случаях:

а) при работах I—IV разрядов, если напряженная зрительная работа выполняется в течение всего рабочего дня (например, визуальный контроль изделий, контроль нитей в текстильном производстве и т. п.);

б) при повышенной опасности травматизма, если освещенность от системы общего освещения составляет 150 лк и менее (например, работа на дисковых пилах, гильотинных ножницах и т. п.);

в) при специальных повышенных санитарных требованиях (например, на предприятиях пищевой и химико-фармацевтической промышленности), если освещенность от системы общего освещения составляет 500 лк и менее;

г) при работе или производственном обучении подростков, если освещенность от системы общего освещения составляет 300 лк и менее;

д) при отсутствии в помещении естественного света при постоянном пребывании работающих, если освещенность от системы общего освещения составляет 1000 лк и менее.

Таблица 56.20 Нормы освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях по СНиП II-4-79

Разряд, характеристика зрительной работы, наименьший размер объекта различения, мм	Подразряд зрительной работы	Освещенность, лк	
		при комбинированном освещении	при общем освещении
I, наивысшей точности, не менее 0,1	а	5000	1500
	б	4000	1250
	в	2500	750
II, очень высокой точности, свыше 0,15 до 0,3	а	1500	400
	б	4000	1250
	в	3000	750
III, высокой точности, свыше 0,3 до 0,5	а	2000	500
	б	1000	300
	в	750	300
IV, средней точности свыше 0,5 до 1	а	400	200
	б	750	300
	в	500	200
V, малой точности свыше 1 до 5	а	300	150
	б	300	200
	в	200	150
VI, грубая (очень малой точности), более 5	а	—	100
	б	—	150
VII, со светящимися материалами и изделиями в горячих цехах, более 0,5	—	—	200
VIII, общее наблюдение за ходом производственного процесса: постоянное периодическое при постоянном пребывании людей в помещении то же при периодическом пребывании людей в помещении	а	—	75
	б	—	50
	в	—	30

Примечания 1. Наименьшие размеры объекта различения и соответствующие разряды зрительной работы установлены при расположении объектов различения на расстоянии не более 0,5 м от глаз работающего. При увеличении этого расстояния разряд зрительной работы следует устанавливать с учетом углового размера объекта различения (отношения минимального размера  $d$  объекта к расстоянию  $l$  от объекта до глаз работающего) I — менее  $0,3 \cdot 10^{-3}$ ; II — от  $0,3 \cdot 10^{-3}$  до  $0,6 \cdot 10^{-3}$ ; III — свыше  $0,6 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-3}$ ; IV — свыше  $10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$ ; V — свыше  $2,0 \cdot 10^{-3}$  до  $10 \cdot 10^{-3}$ ; VI — свыше  $10 \times 10^{-3}$  рад.

2. Освещенность при использовании ЛН следует снижать по шкале освещенности а) на одну ступень при системе комбинированного освещения, если нормируемая освещенность составляет 750 лк и более, б) на одну ступень при системе общего освещения для разрядов I—V, VII, при этом освещенность от ЛН не должна превышать 300 лк, в) на две ступени при системе общего освещения для разрядов VI и VIII.

## Продолжение табл. 56.20

3. Освещенность для системы комбинированного освещения является суммой освещенности от общего и местного освещения.

4. Освещенность при работах со светящимися объектами размером 0,5 м и менее следует выбирать в соответствии с размером объекта различения и относить их к подразряду «в».

При наличии одновременно нескольких признаков нормы освещенности следует повышать не более чем на одну ступень.

В помещениях, где выполняются работы V и VI разрядов, нормы освещенности следует снижать на одну ступень при кратковременном пребывании людей или при наличии оборудования, не требующего постоянного обслуживания.

Подразряды зрительной работы определяются по значениям яркостного контраста, определяемым яркостями объекта ( $L_o$ ) и фона ( $L_f$ ),  $K = (L_o - L_f)/L_f$ : а) малый  $K$  на темном фоне; б) малый  $K$  на среднем фоне или средний  $K$  на темном фоне; в) малый  $K$  на светлом фоне, средний  $K$  на среднем фоне или большой  $K$  на темном фоне; г) средний  $K$  на светлом фоне, большой  $K$  на светлом фоне или большой  $K$  на среднем фоне.

Значения контраста  $K$  делятся на большое ( $K \geq 0,5$ ), среднее ( $0,2 \leq K < 0,5$ ), малое ( $K \leq 0,2$ ). Фон в зависимости от коэффициента отражения материала считается светлым ( $\rho \geq 0,4$ ), средним ( $0,2 \leq \rho < 0,4$ ) и темным ( $\rho < 0,2$ ).

Кроме общих норм освещенности СНиП II-4-79 предусматривает нормы для ряда зданий различного назначения.

К показателям качества освещения относятся показатели, ограничивающие блеское действие световых приборов, — показатель дискомфорта для общественно-административных зданий и показатель ослепленности для производственных помещений и открытых пространств. Показатель ослепленности не должен превышать значений: 20 единиц для I и II разрядов работ при постоянном пребывании людей в помещении, 40 для III, IV, V и VII разрядов работ при постоянном пребывании, 60 при периодическом, 60 для VI и VII разрядов при постоянном пребывании и 80 при периодическом.

Показатель ослепленности не ограничивается для помещений, длина которых меньше двойной высоты установки светильников и высота не более 2,5 м, при выполнении работ VI и VIII разрядов, а также при временном пребывании людей независимо от разрядов работ.

При отражении светового потока от рабочей поверхности в направлении глаз работающего эта поверхность начинает слепить,

что проявляется в снижении видимости. Чрезмерная яркость рабочей поверхности в отраженном свете вызывает отраженную блескость. В помещениях I–IV разрядов работ следует предусматривать ограничение отраженной блескости (СНиП II-4-79, приложение 7).

Так как пульсации светового пучка во времени утомляют глаза, то качество освещения оценивается и по ограничению этого фактора. Таким показателем является коэффициент пульсации освещенности  $K_{п} = (E_{max} - E_{min})/2E_{ср}$ , где  $E_{max}$  и  $E_{min}$  — максимальное и минимальное значения освещенности за период ее колебания, лк,  $E_{ср}$  — среднее значение освещенности за тот же период, лк.

Коэффициент пульсации при освещении помещений газоразрядными лампами, питаемыми переменным током частотой 50 Гц, не должен превышать 10% для I и II разрядов, 15% для III разряда и 20% для IV–VIII разрядов. Допускается повышение  $K_{п}$  до 30% в помещениях, где выполняются работы VI и VIIа разрядов при отсутствии в них условий для возникновения стробоскопического эффекта. В случае, если такие условия могут возникать, должно быть  $K_{п} \leq 20\%$ . При питании газоразрядных ламп переменным током с частотой 400 Гц и более выполнение вышеперечисленных требований не обязательно.

Примеры норм освещенности и качественных показателей для электротехнического производства и общественных зданий даны в табл. 56.21 и 56.22.

В процессе эксплуатации осветительной установки освещенность рабочих мест снижается вследствие запыления и загрязнения светильников, а также из-за снижения светового потока ламп. Для учета снижения освещенности в процессе эксплуатации вводится коэффициент запаса, повышающий расчетную освещенность по сравнению с нормируемой (табл. 56.23).

#### Выбор системы освещения, типов источников света и светильников и их размещения

Осветительные установки выполняются по системе либо общего, либо комбинированного освещения, когда к общему еще добавляется местное освещение. Система общего освещения применяется в производственных помещениях с невысоким уровнем освещенности (до 150 лк). В помещениях с I–IV разрядами работ следует применять, как правило, систему комбинированного освещения. Предусматривать для них систему общего освещения допускается при технической невозможности или нецелесообразности устройства

Таблица 56.21 Освещенность и качественные показатели освещения ряда электротехнических производств (при освещении ГЛ)

Цех, участок	Плоскость, в которой нормируется освещенность (Г — горизонтальная, В — вертикальная) — высота от пола, м	Разряд зрительной работы	Минимальная освещенность, лк, при			Показатель ослепленности, не более	Коэффициент пульсации, % не более**
			комбинированном освещении		общем освещении		
			общем и местном	общем			
<i>Электромашиностроительное производство</i>							
Изготовление сердечников	Г — 0,8	—	—	—	200	40	20
Участок штамповки	Г, В	IVб	500	150	200	40	20
Изготовление изоляционного материала и деталей	Г — 0,8	—	—	—	200	40	20
Изготовление обмоток:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	20	20
участок намотки катушечных групп	Г, В	IIв	2000	200	—	20	20/10
участок изоляции секций	Г, В	IIIб	1000	200	—	40	20/15
Изготовление коллекторов	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
Сборка контактных колец	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
Укладка обмотки:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
участок укладки	Г, В	IIIб	1000	150	—	40	20/15
участок пропитки и компаундирования	Г	Vб	—	—	150	40	20
участок заливки алюминием	Г	VII	—	—	200	40	20
Сборочный:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
участки узловой сборки	Г	IIIб	1000	150	300	40	20/15
участки генеральной сборки	Г, В	IIIб	—	—	300	40	15
испытательная станция	Г	IIIб	—	—	200	40	20
Малярно-отделочный	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
<i>Производство высоковольтной аппаратуры</i>							
Штамповочно-сварочный	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
Механообработочный	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
То же механические и слесарные участки	Г	IIв, IIIа	2000	300	—	20	20/15
Механосборочный:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
участки конвейерной сборки	Г	IIIб + 1	1250	150	400	40	20/15
участки напольной сборки	В	IIIб	1000	150	300	40	20/15
участки намотки	В	IIIб + 1	1250	150	400	40	20/15
участки пропитки, заливки	Г	VI	—	—	150	60	20
<i>Производство силовых трансформаторов</i>							
Механические:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
общее освещение на рабочих местах	Г, В	IIв	2000	300	—	20	20/10
Сварочный	В	IIб	—	—	300	40	20
Штамповочный	Г	IVб	—	—	200	40	20
Магнитопроводов:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	200	40	20
участок раскройки	Г	Vб + 1	—	—	200	40	20
участок сборки пакетов магнитопроводов	Г, В	IIIб	1000	150	300	20	20/15
контроль магнитопровода	Г, В	IIIб + 1	1250	150	400	20	20/15
Изготовление изоляции:							
общие требования	Г — 0,8	—	—	—	300	40	20
участок механической обработки	Г	IVб	500	150	—	40	20
участок изготовления обмоток	Г	IIIб	1000	150	300	40	20
намотка катушек	В	—	1250	150	400	20	20/15
участок пропитки, сушки	Г	IIIб + 1 VI	—	—	150	60	20

Продолжение табл. 56.21

Цех, участок	Плоскость, в которой нормируется освещенность (Г – горизонтальная, В – вертикальная) – высота от пола, м	Разряд зрительной работы	Минимальная освещенность, лк, при			Показатель ослепленности, не более	Коэффициент пульсации, % не более**
			комбинированном освещении		общем освещении		
			общем и местном	общем			
<i>Производство низковольтной аппаратуры</i>							
Заготовительный	Г – 0,8	–	–	–	200	40	20
Штамповочный	Г – 0,8	–	–	–	200	40	20
Механический	Г – 0,8	–	–	–	300	20	20
Сварочный	Г – 0,8	–	–	–	300	40	20
Гальванический	Г – 0,8	–	–	–	300	40	20
Намоточно-пропиточный:	Г – 0,8	–	–	–	300	40	20
участок заготовки изоляции	Г	Vб + 1	–	–	200	40	20
участок намотки	Г, В	IIIб + 1	1250	150	300	20	20/10
участок пропитки и сушки	Г	VI	–	–	150	60	20
Переработка пластмасс:	Г – 0,8	–	–	–	200	40	20
участок таблетирования	Г	Va	–	–	200	40	20
прессовый	Г	IVa	750	150	300	40	20/15
литьевое отделение	Г	IVa	–	–	300	40	20
Слесарно-сборочный:	Г – 0,8	–	–	–	400	40	20
участок узловой сборки	В	IIIб + 1	1250	150	400	20	20/15
участок окончательной сборки и регулировки	В	IIIб + 1	1250	150	400	20	20/15

Примечание. В числителе – максимально допустимое значение для общего освещения в системе комбинированного освещения, в знаменателе – для местного освещения и для системы общего освещения; +1 – освещенность повышена на одну ступень.

Таблица 56.22. Освещенность некоторых помещений общественных зданий

Помещения	Плоскость (Г – горизонтальная, В – вертикальная) нормирования освещенности – высота плоскости над полом, м	Освещенность рабочих поверхностей, лк	Цилиндрическая освещенность, лк	Показатель дискомфорта, не более	Коэффициент пульсации освещенности, % не более
Рабочие комнаты, проектные кабинеты	Г – 0,8	300*	–	40	15
Проектные залы и комнаты, конструкторские, чертежные бюро	Г – 0,8	500*	–	40	10
Машинописные и машиносчетные бюро	Г – 0,8	400*	–	40	10
Читальные залы	Г – 0,8	300*	100	40	15
Книгохранилища и архивы, помещения фонда открытого доступа	В – 1,0 (на стеллажах)	75	–	60	–
Переплетно-брошюровочные	Г – 0,8	200*	–	60	20
Помещения для электрофотографирования и микрофотографирования	Г – 0,8	200	–	60	20
Макетные, столярные и ремонтные мастерские	Г – 0,8	300*	–	40	15
Конференц-зал, залы заседаний	Г – 0,8	200	75	60	15
Кулуары (фойе)	Пол	150	75	90	–
Лаборатории	»	300*	–	40	10
Фотокомнаты, дистилляторные, стеклодувные	Г – 0,8	200*	–	60	20
Вестибюли и гардеробные.	Пол	150	–	–	–
в вузах, школах, театрах, клубах, общежитиях, гостиницах и главных входах в крупные промышленные предприятия и общественные здания	»	75	–	–	–
в прочих промышленных, вспомогательных и общественных зданиях	»	75	–	–	–

Продолжение табл. 56.22

Помещения	Плоскость (Г — горизонтальная, В — вертикальная) нормирования освещенности — высота плоскости над полом, м	Освещенность рабочих поверхностей, лк	Циркулярная освещенность, лк	Показатель дискомфорта, не более	Коэффициент пульсации освещенности, % не более
Лестницы: главные лестничные клетки остальные лестничные клетки	Пол (площадки, ступени)	100 50	— —	— —	— —
Лифтовые холлы	Пол	75	—	—	—
Коридоры, проходы и переходы: главные коридоры и проходы	»	75	—	—	—
остальные коридоры и проходы	»	50	—	—	—
Чердаки	Г — 0,8	5**	—	—	—

\* Для местного освещения следует предусматривать розетки.

\*\* Норма дана для ламп накаливания. Для ламп накаливания норму освещенности следует понижать на две ступени шкалы освещенности, кроме нормы, отмеченной в таблице двумя звездочками

Таблица 56.23 Значения коэффициента запаса  $K_z$ 

№ п/п	Помещения и территории	Примеры помещений	Газоразрядные лампы	Лампы накаливания
1	Производственные помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне: а) пыль, дым, копоть свыше $5 \text{ мг/м}^3$  от 1 до $5 \text{ мг/м}^3$  менее $1 \text{ мг/м}^3$  б) значительные концентрации паров, кислот, щелочей газов, способные при соприкосновении с влагой образовывать слабые растворы кислот, щелочей, обладающих большой коррозийной способностью	Агломерационные фабрики, цементные заводы и обрубные отделения литейных цехов  Цехи кузнечные, маргеновские, литейные, сварочные, сборного железобетона  Цехи инструментальные, сборочные, механосборочные, пошивочные, ткацкие, прядильные, деревообрабатывающие  Цехи химических заводов по выработке кислот, щелочей, едких химических реактивов, ядохимикатов, удобрений  Цехи гальванических покрытий и гальванопластики различных отраслей промышленности с применением электролиза	2  1,8  1,5  1,8	1,7  1,5  1,3  1,5
2	Производственные помещения с особым режимом по чистоте воздуха при обслуживании СВ: а) с технического этажа б) снизу из помещения	— —	1,3 1,4 1,5	1,15 1,2 1,3
3	Помещения общественных и жилых зданий	Кабинеты и рабочие помещения общественных зданий, жилые комнаты, учебные помещения, лаборатории, читальные залы, залы совещаний, торговые залы и т.д.	—	—
4	Территории а) металлургических, химических, горнообрабатывающих предприятий, шахт, рудников, железнодорожных станций и прилегающих к ним улиц и дорог б) промышленных предприятий (кроме указанных в п. «а») и общественных зданий	— —	1,5 1,5	1,4 1,3
5	Улицы, площади, дороги, территории жилых районов и выставок, парки, бульвары	—	1,5	1,3

Примечания: 1 Значения коэффициентов запаса, указанные в п. 1, а, б, могут быть снижены на 0,2, если предусматриваются СВ 5—7-й эксплуатационных групп (см. табл. 56.27)

2 Коэффициенты запаса установлены с учетом числа чисток светильников в год: 1,8 для п. 1, а, б для п. 1, б, 2 и 4 для п. 1, в и 2, а; 2 для пп. 2, б и 3, 4 для п. 4, а, 2 для пп. 4, б и 5

Таблица 56.24. Освещенность от светильников общего освещения, лк, в системе комбинированного освещения

Разряд зрительной работы	При газоразрядных лампах	При лампах накаливания
Ia	750	300
Iб, IIa	600	300
Iв, IIб	500	300
Iг	300	200
IIв, IIIa	400	300
IIг, IIб, IIIв	200	150

местного освещения. Освещенность рабочей поверхности, создаваемая СВ общего освещения в системе комбинированного, должна составить 10 % нормируемой. При этом для СВ общего освещения с газоразрядными лампами наибольшая освещенность, ими создаваемая, должна ограничиваться 500 лк, а наименьшая – 150 лк, при ЛН наибольшая 100 лк, наименьшая 50 лк. В помещениях без естественного света освещенность рабочей поверхности, создаваемая СВ общего освещения, должна приниматься согласно табл. 56.24.

Неравномерность освещенности  $E_{max}/E_{min}$  в зоне размещения рабочих мест должна быть 1,5 для работ I–III разрядов при люминесцентных лампах, 2 – при других источниках и 1,8 и 3 для работ IV–VII и VIII разрядов соответственно. В помещениях работ I–V разрядов освещенность проходов должна составлять не менее 25 % освещенности, создаваемой СВ общего освещения, но не менее 75 лк при газоразрядных лампах и не менее 30 лк при лампах накаливания.

Выбор типа источника делается исходя из их экономичности (большая световая отдача при большем или том же сроке службы), правильной передачи цветов освещаемых объектов (там, где это важно) и удобства эксплуатации (табл. 56.25).

Для освещения помещений, как правило, предусматриваются газоразрядные лампы (люминесцентные, ДРЛ, ДРИ, ДНаТ). В случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности применения газоразрядных ламп допускается использование ламп накаливания. Применение ксеноновых ламп типа ДКсТ внутри помещения допускается в виде исключения, только по согласованию с органами здравоохранения.

Выбор типа СВ делается с учетом: требований к его светораспределению (табл. 56.26); условий среды по степени защиты от поражения током, от пыли и воды (табл. 56.27); требований к ограничению ослепленности; экономичности установки в целом.

В зависимости от конструктивной схемы

СВ, степени защиты и твердости светотехнических материалов [твердые (Т) – силикатная эмаль, стекло; средней твердости (СТ) – полированный алюминий; мягкие (М) – органические эмали; вакуумное алюминирование] СВ разделены на семь эксплуатационных групп, причем чем выше номер группы, тем светильники менее подвержены воздействию среды и тем более в тяжелых условиях целесообразно их использование (табл. 56.27).

При системе общего освещения применяется равномерное и локализованное размещение СВ. При равномерном размещении обеспечивается достаточная равномерность освещенности по всей площади помещения в целом. В этом случае расстояние между СВ в каждом ряду неизменно, расстояние между рядами берется также постоянным.

При локализованном размещении положение каждого СВ зависит от расположения оборудования. Оно применяется при локализованном размещении станков; в специальных случаях, обусловленных требованием технологии, и, наконец, в том случае, если по условиям работы невозможно устройство местного освещения.

Наилучшими вариантами равномерного размещения являются шахматное размещение СВ и по сторонам квадрата (расстояния между светильниками в ряду и между рядами СВ равны). Размещение СВ по сторонам квадрата следует производить по оптимальным значениям относительного расстояния  $l/H_p$ , где  $l$  – расстояние между СВ;  $H_p$  – высота подвеса СВ над рабочей поверхностью (удаленной от пола на высоту  $l$  м) для различных типовых КСС СВ (табл. 56.28).

Оптимальное расстояние  $l_k$  от крайнего ряда СВ до стен при условии размещения возле нее рабочих поверхностей определяется величиной  $l_k = (0,24 \div 0,3) l$ . При отсутствии рабочих поверхностей у стен это расстояние может быть увеличено до  $l_k = (0,4 \div 0,5) l$ .

При равномерном размещении люминесцентных СВ последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования. Учитывая, что распределение силы света люминесцентных СВ типа ОДР близко к косинусному, относительное расстояние между СВ в ряду и между СВ соседних рядов рекомендуется принимать не более 1,4. Для светильников с решетчатым затемнителем (типа ОДР), имеющих более концентрированное светораспределение, относительное расстояние не должно превышать 1,2. При высоких уровнях нормированной освещенности люминесцентные СВ обычно располагаются непрерывными рядами, для чего светильники сочленяются друг с другом торцами.

Таблица 56.25. Рекомендуемые цветовые параметры и примерные типы источников света для различных зрительных работ

Характеристика зрительной работы	Освещенность при общем освещении, лк	Индекс цветопередачи, не менее, для зданий		Цветовая температура $T_{цв}$ , К, для зданий		Тип источника света для зданий	
		производственных	общественных	производственных	общественных	производственных	общественных
Контроль цвета с очень высокими требованиями к цветоразличению (контроль готовой продукции на швейных фабриках, тканей на текстильных фабриках, сортировка кож, изготовление красок, подбор красок для цветной печати и др.)	≥ 300	90	90	5000—6500	5000—6500	ЛДЦ, ЛДЦ УФ (ЛХЕ)	ЛХЕ, ЛДЦ, ЛДЦ УФ
Сопоставление цветов с высокими требованиями к цветоразличию (раскрой верха обуви, контроль сырья на консервных заводах и ткацких фабриках, раскрой и пошив на швейных фабриках, окраска машин, работы в выставочных залах и специализированных магазинах и др.)	≥ 300	85	85	4000—6500	4000—6500	ЛДЦ, ЛДЦ УФ (ЛХЕ, ЛЕ)	ЛЕ, ЛДЦ, ЛДЦ УФ (ЛХЕ)
Различение цветных объектов для контроля и сопоставления (при сборке радиоаппаратуры, прядении, намотке проводов, переплетных работах и др.)	300 и более	50	55	3500—6500	3500—6000	ЛБ, ДРИ (ЛХБ)	ЛБ (ЛХБ, ЛЕ)
	150—300	50	55	3000—4500	3000—4500	ЛБ (ЛХБ)	ЛБ (ЛХБ, ЛЕ)
	< 150	45	55	2700—3500	2700—3500	ЛБ (ЛН, КГ)	ЛБ (ЛН)
Общее восприятие интерьера (фойе, вестибюли, залы театров и кинотеатров)	≥ 150	—	85	—	2700—4000	—	ЛБ (ЛЕ, ЛТБЦ, ЛН)

Примечания: 1. При расположении зданий в I или II поясе светового климата СССР из диапазона цветовых температур выбираются преимущественно значения, приближенные к нижней границе диапазона, в V поясе — к верхней.

2. В скобках приведены типы менее эффективных источников света.

Таблица 56.26. Выбор типа светильников по его светораспределению

Класс светильника	Область применения
Прямого света (П): глубокоизлучатели концентрированного светораспределения (К) и среднего светораспределения (Г) косинусного светораспределения (Д)  широкого светораспределения и косинусного светораспределения (Л, Ш)	Высокие производственные помещения с темными стенами и потолком, локализованное освещение рабочих поверхностей, требующих большой горизонтальной освещенности Производственные помещения с высотой не более 8—10 м с темным потолком и наличием пылевыведения Открытые пространства, цехи с небольшой высотой и неформальным оборудованием, локализованное освещение при требовании двусторонней вертикальной освещенности
Преимущественно прямого света (Н)	Производственные и подсобные помещения со свежей окраской потолка и стен, школьные, конторские и прочие помещения
Преимущественно отраженного света (В)	Помещения с гладкими белыми потолками и стенами, где основным требованием является отсутствие резких теней (клубы, фойе, чертежные)
Отраженного света (О)	Помещения общественного и коммунального назначения (театры, кино, клубы)

Таблица 56.27. Эксплуатационные группы светильников

Конструктивно-светотехнические схемы светильников		I			II			III			
С лампами накаливания и газоразрядными лампами высокого давления	A										
	С люминесцентными лампами	B									
		B									
		Г									
Конструктивное исполнение по степени защиты		2', 5', 6'			2', 5', 6'			2'			
Вид материала (или покрытия) отражателей и рассеивателей светильников		Т	СТ	М	Т	СТ	М	Т	СТ	М	
Эксплуатационная группа светильников		4	3	2	5	4	3	2	2	1	
Примеры светильников, соответствующих ГОСТ 17677-82, ГОСТ 22758-77 и общесоюзным ТУ 16		УПМ, УПС, НСП01	Гс, сУ, ГсР, Сз, РСП05, ЖСП01, РСП14, ОВЛ, ЛВП02 (04)	СД, РСП05 (Д), ОД, ОДР, ЛД, ЛДР, ПВЛМ - Д, ЛСП02, (04, 10)	УПД	СО, НСП07, РСП08, РСП10, РСП13, ЛС002, Л2010, УСП	ЛДОР, ЛСП02 (01, 07), ПВЛМ - ДО, ПВДЛ - Р, АВЛМ - ДОР, ШОД	Уз, У15, НСП01 (32)	ЛП001, ЛП002, ЛП003, ЛП021, ЛС003	МЛ, ЛНП01	



Продолжение табл. 56.27

Конструктивно-светотехнические схемы светильников		IV		V		VI		VII							
С лампами накаливания и газоразрядными лампами высокого давления	A														
	B														
	B														
	Г														
Конструктивное исполнение по степени защиты		5', 6'		5, 6		5, 6		2', 5', 6'							
Вид материала (или покрытия) отражателей и рассеивателей светильников		Т      СТ		Т      М		Т      СТ		Т							
Эксплуатационная группа светильников		7		5		6		6							
Примеры светильников, соответствующих ГОСТ 17677-82, ГОСТ 22758-77 и общесоюзным ТУ 16		УП24, ППД2, РСП10, ГСП10, РСП12, ЖСП01, НПП01, НПП02, ЛСП04, ЛСП09		ПВЛ, ПВЛП, ВЛВ, ВЛН, УВЛ, ЛВП02 (01, 03), ЛВП31, ЛВП33		ППД, Н4БН, (Д), Н4Т2Н (Д), В4А (Д), В3Г (Д), В3Т3 (Д), РСП11 (Д), НСП02 (Д)		НОГЛ (Д), НОДИ (Д)		ППР, ППД500, Н4БН, Н4Т2Н, В4А, В3Г, В3Т3, РСП11, НСП02		НОГЛ, НОДЛ, РВЛМ		ССП02, ДРИЗ, ПВЛМ	

Примечания: 1. Данные о материалах и покрытиях отражателей и рассеивателей содержатся в ТУ на светильники, а также в каталогах и других информационных материалах.

2. При использовании ламп-светильников эксплуатационная группа (кроме 7) повышается на одну ступень (за исключением приборов с конструктивно-светотехническими схемами VII).

Таблица 56.28 Рекомендуемые и допустимые значения  $l/H_p$  для светильников в различных КСС

Тип КСС светильника по ГОСТ 13828-74 (рис. 56.9)	$l/H_p$	
	Рекомендуемые значения	Наибольшие допустимые значения
К	0,4–0,7	0,9
Г	0,8–1,2	1,4
Д	1,2–1,6	2,1
М	1,8–2,6	3,4
Л	1,4–2,0	2,3

Для электротехнических производств в зависимости от строительных параметров, характера технологических процессов и условий среды в табл. 56.29 даны рекомендации по выбору значений  $K$ , типов ИС и СВ общего освещения.

#### Расчет мощности осветительной установки методом коэффициента использования

Коэффициент использования  $U$  осветительной установки (ОУ) показывает, какая

Таблица 56.29 Строительные параметры, условия среды, рекомендуемые значения  $K_3$ , типы ИС и СВ общего освещения

Цех, участок	Строительные параметры, м		Среда	$K_3$ (по табл. 56.23)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Свето-рас-пре-деле-ние (по табл. 56.15)	Конст-руктив-но-све-тотехни-ческая схема	Экс-плуа-таци-онная группа	Степень защиты	
Изготовление сердечников	6 × 6 – 6 × 18	3,6 – 6,0	Пыль-ная	1,8, 1,6	ЛЛ	Д-2	ИБ	6	5'0	ПВЛМ (с лам-пами типа ЛБР) ПВЛМ. ЛД РСП11, РСП12 УПДДРЛ РСП14, ГСП14  РСП16 РСП05  РСП15, РСП18 РСП05, РСП18 ГСП10, ГСП14, ГСП18
	6 × 6 – 6 × 18	3,6 – 6,0		1,6, 1,8	ЛЛ	Д-1, Д-2	ИБ, ИВ	6, 2; 3	5'0, IP20	
	6 × 6 – 6 × 24	6,0 – 9,0		1,6	ДРЛ	Д-1, Г-1	ИА, IVA	5; 7	IP60	
				1,6, 1,8, 1,6	МГЛ, ДРЛ, ДРИ	Г-1, Г-1	ИА	5, 4, 7	5'0, 5'0	
	6 × 6 – 6 × 24	6,0 – 9,0		1,6, 1,8	ДРЛ	Г-1, Г-3, Г-4	IVA, IA	7, 3	IP54, IP23	
	6 × 6 – 6 × 24	9,0 – 14,4		1,6, 1,8	ДРЛ	Г-2, Г-3	ИА	5, 3	5'4, IP20	
	6 × 6 – 6 × 24	9,0 – 14,4		1,8	ДРЛ	Г-1	ИА	3	IP23, IP20	
6 × 6 – 6 × 24	9,0 – 14,4	1,6	ДРИ	НТ, Г-2	ИА, IA, IA	3, 4	5'3, 5'0, IP20			
Изготовление изоляцион-ного мате-риала и де-талей	6 × 6 – 6 × 24	4,2 – 12,6	См. рекомендации для участков изготовления сердечников							
Изготовление обмоток  Участок укладки	6 × 6 – 6 × 18	4,2 – 6,0	Нор-маль-ная	1,5	ЛЛ	Д-2	ИВ, ИБ	3; 2	IP20	ЛД, ЛСП02 ОДР, ЛСП13 ЛСП13 ЛСП13 ПВЛМ (с лам-пами типа ЛБР)  РСП05, РСП18 РСП18
		1,5		ЛЛ	Г-1, Л	ИВ				
	6 × 12 – 6 × 24	6,0 – 12,6		1,5	ЛЛ	Г-2	ИВ	2	IP20	
	6 × 6 – 6 × 18	4,2 – 6,0		1,5	ЛЛ	Д-2	ИВ	6	5'0	
		6,0 – 10,8		1,5	ДРЛ	Г-1	3; 2	IP23, IP20		
			1,5	ДРЛ	Г-3	ИА			3	IP20
<i>Производство силовых трансформаторов</i>										
Изготовление магнито-проводов	6 × 12 – 6 × 36	6,0 – 9,0	Нор-маль-ная	1,5	ДРЛ	Г-1	ИА	3	IP23	РСП05, ГСП18, ГСП14 РСП18, РСП13  РСП05, С35ДРЛ, РСП18 ГСП18, ЖСП01 ГСП10, ГСП18 ЖСП01
		6,0 – 9,0		1,5	ДРИ	Г-2, НТ				
		9,0 – 15,0		1,5	ДРЛ	Г-3	ИА	3, 5	IP20, 5'4	
		15,0 – 20,0		1,5	ДНАТ	К-1	ИА	3	IP23, IP20	
		15,0 – 20,0		1,5	ДРЛ	К-2	ИА	3	IP20, IP23	
		Свыше 20,0		1,5	ДРИ	К-1, К-2	ИА	3	5'3, IP20	
Свыше 20,0	1,5	ДНАТ	К-2	ИА	3	IP23, IP20				
Изготовление обмоток, изо-ляционных деталей (все участки).	6 × 6 – 6 × 18	4,2 – 6,0	Нор-маль-ная	1,5	ЛЛ	Л	ИВ	2	IP20	ЛСП13 ЛД, ЛСП02 РСП08, РСП05 РСП18, ГСП18
	6 × 6 – 6 × 24	4,2 – 6,0		1,5	ЛЛ	Д-2				
		6,0 – 9,0		1,5	ДРЛ	Л, Г-1	ИА	3	IP20, IP23, IP20	
		6,0 – 9,0		1,5	ДРИ	Г-1	ИА	3, 2	IP20	

Продолжение табл. 56.29

Цех, участок	Строительные параметры, м		Среда	K <sub>3</sub> (по табл. 56.23)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Свето-распределение (по табл. 56.15)	Конструктивно-светотехническая схема	Эксплуатационная группа	Степень защиты	
кроме пропитки и сушки)		9,0–14,4		1,5	ДРЛ	Г-2 Г-3	IA	3	IP23, IP20, 5'0	РСП05, РСП18
		9,0–14,4		1,5	ДРИ	Г-2, НТ	IA	3, 4		ГСП18, ГСП14
Участок пропитки и компаундирования	6×6–6×18	3,4–6,0	Класс В-1а, В-1б и химически агрессивная	1,6	ЛЛ	М, Г-1	VIБ, VB	6; 4	Повышенной надежности против взрыва	НОГЛ, НОДЛ
		6,0–10,0		1,6	ДРЛ	Д-1	IA	6		Н4Т4Л, Н4Т5Л, Н4АДРЛ–250
Участок заливки алюминием	6×6–6×18	4,2–6,0	Пыльная	1,6	ЛЛ	Д-2	IB	6	5'0	ПВЛМ (с лампами типа ЛБР) УПДДРЛ, РСП11 РСП12
		6,0–10,0		1,6	ДРЛ	Г-1, Д-1	IA, IIA	5		
				1,6	ДРЛ	Г-1	IVA	7		
<i>Производство высоковольтной аппаратуры</i>										
Штамповочно-сварочные участки	6×6–6×30	4,8–15,0	Пыльная	См. рекомендации для участков изготовления сердечников						
Штамповочно-сварочные участки	6×6–6×30	15,0–18,0	Пыльная	1,6	ДРЛ	К-1	IA	5, 3	5'4, IP20, IP23, 5'3, 5'0, IP20, IP23	РСП13, РСП18 РСП18, РСП05 ГСП17, ГСП14, ГСП18 ЖСП01
		15,0–18,0		1,8	ДРЛ	К-1	IA	3		
		15,0–18,0		1,8	ДРИ	К-1	IA	3; 4		
		15,0–18,0		1,8	ДНАТ	К-2	IA	3		
Участки намотки	6×6×24	4,0–6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0–10,0		1,5	ЛЛ					
Участки пропитки, заливки и сушки	6×6	3,0–4,0	Класс В-1а, В-1б	1,6	ЛЛ	См. рекомендации для участков пропитки и компаундирования				
<i>Производство низковольтной аппаратуры</i>										
заготовки, намотки	6×6–6×18	3,6–7,2	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
пропитки и сушки	6×6–6×18	3,6–7,2	Класс В-1а, В-1б и химически агрессивная	1,6	ЛЛ	См. рекомендации для участков пропитки и компаундирования				

Продолжение табл. 56.29

Цех, участок	Строительные параметры, мм		Среда	K <sub>3</sub> (по табл. 56.23)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Свето-распределение (по табл. 56.15)	Конструктивно-светотехническая схема	Эксплуатационная группа	Степень защиты	
Слесарно-сборочный	6 × 6 – 6 × 24	4,2 – 6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0 – 9,0		1,5	ДРЛ	Г-1	IA	3, 2	IP23, IP20	РСП05, РСП18
		6,0 – 9,0		1,5	ДРИ	Г-2, Л	IA	3; 4	IP20, 5'0	
		9,0 – 12,5		1,5	ДРЛ	Г-3	IA	3	IP23, IP20	РСП05, РСП18
		9,0 – 12,5		1,5	ДРИ	Г-3, Г-2 Л	IA	3	IP20	
Сборочный	6 × 6 – 6 × 24	4,8 – 6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0 – 9,6		1,5	ДРЛ ДРИ	См. рекомендации для слесарно-сборочного цеха				

Таблица 56.30. Значения коэффициента Z для различных типов светильников

Тип	Z при отношении l/H <sub>p</sub>			
	0,8	1,2	1,6	2
НСП22	1,2	1,15	1,25	1,5
УПМ 15	1,15	1,1	1,2	1,4
ПСХ	1,0	1,0	1,2	1,2

часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность:

$$U = \Phi_p / n\Phi_n,$$

где  $\Phi_p$  – световой поток, падающий на рабочую поверхность.

На основании этого определения световой поток лампы, необходимый для обеспечения заданной минимальной освещенности,

$$\Phi_n = EAK_3Z/nU,$$

где  $E$  – нормированное значение освещенности, лк;  $n$  – количество установленных СВ;  $K_3$  – коэффициент запаса (см. табл. 56.24);  $A$  – площадь рабочей поверхности помещения, м<sup>2</sup>;  $Z$  – коэффициент минимальной освещенности, равный отношению освещенности  $E_{cp}$  к нормированной минимальной  $E$ .

Значение  $Z$  для ОУ, в которых можно не учитывать затемнения оборудованием рабочих мест, зависит от отношения  $l/H_p$ . Для ЛН и ДРЛ рекомендуется  $Z = 1,15$ , для ЛЛ

при равномерном расположении СВ  $Z = 1,1$ . Более детализированные значения коэффициента  $Z$  даны в табл. 56.30.

Коэффициент использования  $U$  (табл. 56.31) зависит от типа СВ (его КПД и КСС), коэффициентов отражения стен  $\rho_c$ , потолка  $\rho_n$ , рабочей поверхности  $\rho_p$  помещения (табл. 56.32) и, наконец, от показателя помещения  $\varphi$ , учитывающего соотношение размеров помещения:

$$\varphi = ab/H_p(a + b),$$

где  $a$  и  $b$  – ширина и длина освещаемого помещения.

В табл. 56.31 даны значения  $U$  для типовых КСС СВ (табл. 56.15), световой поток которых равен 1000 лм (считается  $\eta_{св} = 1$ ). Ввиду того что число типов СВ очень большое и нужно иметь огромное количество таблиц  $U$ , в настоящее время используются таблицы  $U$  лишь для типовых КСС. Зная КПД конкретного СВ и определив его типовую КСС, можно по табл. 56.32 найти для соответствующих КСС,  $\rho_n$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_p$  и индекса помещения  $\varphi$  значение  $U$ . Коэффициент использования для конкретного СВ находится как произведение  $U\eta_{\cup}$ , где  $\eta_{\cup}$  – КПД СВ в нижнюю полусферу,  $\eta_{\cup} = \Phi_{\cup}/\Phi_n$ . Для большинства промышленных СВ  $\eta_{\cup} = \eta_{св}$ , так как небольшим потоком в верхнюю полусферу  $\Phi_{\cap}$  можно пренебречь. Этого нельзя делать для СВ с КСС типа  $M$ , если учитывать поток в обеих полусферах.

Таблица 56.31. Значения коэффициентов использования, %

КСС	$\rho_n = 0,7; \rho_c = 0,5; \rho_p = 0,3$						$\rho_n = 0,7; \rho_c = 0,5; \rho_p = 0,1$					
	Индекс помещения $\phi$											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3	5
М	35	50	61	73	83	95	34	47	56	66	75	86
Д-1	36	50	58	72	81	90	36	47	56	63	73	79
Д-2	44	52	68	84	93	100	42	51	64	76	84	92
Г-1	49	60	75	90	100	100	48	57	71	82	89	94
Г-2	58	68	82	96	100	100	55	64	78	86	92	96
Г-3	64	74	85	95	100	100	62	70	79	86	90	93
Г-4	70	77	84	90	100	100	65	71	78	83	86	87
К-1	74	83	90	96	100	100	69	76	83	88	91	92
К-2	75	84	95	100	100	100	71	78	87	95	97	100
К-3	76	85	96	100	100	100	73	80	90	94	99	100
Л	32	49	59	71	83	91	31	46	55	65	74	83

КСС	$\rho_n = 0,5; \rho_c = 0,5; \rho_p = 0,1$						$\rho_n = 0,5; \rho_c = 0,3; \rho_p = 0,1$					
	Индекс помещения $\phi$											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	31	43	53	63	72	80	23	36	45	56	65	75
Д-1	34	47	54	63	70	77	27	40	48	55	65	73
Д-2	40	48	61	74	82	84	33	42	52	69	75	86
Г-1	44	53	69	77	83	80	41	48	64	76	70	88
Г-2	53	63	76	85	90	94	48	58	72	83	86	93
Г-3	61	68	78	84	88	91	57	65	75	83	86	90
Г-4	65	71	78	88	81	85	62	62	74	81	83	85
К-1	68	77	83	86	89	90	64	73	80	86	88	90
К-2	71	78	87	93	98	99	68	74	84	92	93	99
К-3	72	79	88	94	97	99	68	76	85	93	95	99
Л	30	45	55	65	70	78	24	40	49	60	70	76

Таблица 56.32. Приблизительные значения коэффициента отражения стен и потолка

Характер отражающей поверхности	$\rho$
Побеленный потолок, побеленные стены с окнами, закрытыми белыми шторами	0,70
Чистый бетонный и светлый деревянный потолки, побеленный потолок в серых помещениях, побеленные стены при незавешенных окнах	0,50
Бетонный потолок в грязных помещениях, деревянный потолок	0,30
Сплошное остекление без штор, красный кирпич, бетонные и деревянные потолки и стены в пыльных помещениях	0,10

В табл. 56.31 для СВ с КСС типа М дан поток только в нижнюю полусферу  $\Phi_{\text{с}} = 1000$  лм.

Коэффициент отражения рабочей поверхности  $\rho_p$  обычно принимается равным 0,1 либо 0,3.

Расчитав световой поток лампы, зная ее тип, по табл. 56.3 – 56.10 выбираем мощность

лампы так, чтобы световой поток выбранной лампы был равен расчетному или незначительно отличался ( $\pm 10\%$ ) от него. Это дает возможность определить общую установленную мощность ОУ. При заданном потоке лампы  $\Phi$  и известном  $U$  можно найти количество необходимых СВ.

#### Расчет осветительной установки методом удельной мощности

Приближенный метод определения мощности ламп в СВ общего освещения, расположенных равномерно, по удельной мощности  $W$  более прост, чем метод расчета по коэффициентам использования. Значения удельной мощности  $W$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) приведены в табл. 56.33, 56.34 в зависимости от типа СВ, коэффициентов отражения потолка и стен, площади освещаемого помещения и, наконец, высоты подвеса СВ.

Порядок расчета:

1. Намечается число СВ  $n$  в помещении исходя из оптимального их расположения.

Продолжение табл. 56.31

КСС	$\rho_n = 0,7; \rho_c = 0,3; \rho_p = 0,1$						$\rho_n = 0,5; \rho_c = 0,5; \rho_p = 0,3$					
	Индекс помещения $\phi$											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3	5	0,6	0,8	1,25	2,0	3	5
М	26	36	46	56	67	80	32	45	55	67	74	84
Д-1	28	40	49	59	68	74	36	48	57	66	76	85
Д-2	33	43	56	74	80	76	42	51	65	71	80	85
Д-2	42	52	69	78	73	76	45	56	65	78	76	84
Г-1	48	60	73	84	90	94	55	66	80	92	98	100
Г-2	57	66	76	84	83	91	63	72	83	91	96	100
Г-3	62	69	76	81	84	85	68	73	81	87	91	94
Г-4	65	73	81	86	89	90	70	78	86	92	86	100
К-1	67	75	84	93	97	100	72	80	91	99	100	100
К-2	68	77	86	95	98	100	74	83	93	100	100	100
К-3	24	40	50	62	71	77	32	47	57	69	79	90

КСС	$\rho_n = 0,3; \rho_c = 0,1; \rho_p = 0,1$						$\rho_n = 0; \rho_c = 0; \rho_p = 0$					
	Индекс помещения $\phi$											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	17	29	38	46	58	67	16	28	38	45	55	65
Д-1	27	35	42	52	61	68	21	33	40	49	58	66
Д-2	28	36	48	63	75	81	25	33	47	61	70	78
Д-2	35	45	60	73	68	77	34	44	56	61	68	74
Г-1	43	54	68	79	85	90	43	53	66	77	82	86
Г-2	53	62	73	80	84	86	53	61	71	78	82	85
Г-3	61	66	72	78	81	83	59	65	71	78	80	81
Г-4	62	71	77	83	86	88	60	69	77	84	85	86
К-1	68	72	80	89	93	97	65	71	79	88	92	95
К-2	64	73	83	90	94	97	64	72	81	88	91	94
К-3	20	35	44	48	65	69	17	33	42	53	63	70

2. По табл. 56.33, 56.34 находят значения  $W$ .

3. Определяется расчетная мощность одной лампы:

$$P_1 = AW/n,$$

где  $A$  — площадь помещения.

4. Выбирается ближайшая по мощности лампа. Если ее мощность оказывается больше расчетной, то снова по установленной мощности  $AW$  пересчитывается  $n$ .

### Точечный метод расчета осветительной установки

При расчете осветительной установки методами коэффициента использования и удельной мощности получают среднюю горизонтальную освещенность. Расчет освещенности, создаваемой на рабочей поверхности непосредственно СВ, без учета светового потока, отраженного от стен и потолка, производится точечным методом. Суть последнего заключается в том, что освещенность в данной точке рабочей поверхности рассчитывается по силе

света СВ. Вследствие этого точечный метод может быть применен при расстояниях от СВ до рабочей поверхности, в 5 раз и более больших размеров СВ.

Для расчета освещенности в точечном методе используются следующие зависимости:

$$E_{V1} = I_x \cos^3 \alpha / H_p^2 K_s; E_{V1} = E_{V1p} / H_p,$$

где  $E_{V1}$  — освещенность в точке  $M$  горизонтальной плоскости, лк (рис. 56.13, а);  $E_{V1}$  — освещенность в той же точке для вертикаль-

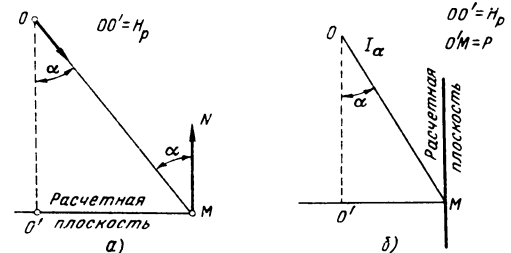


Рис 56.13. Схема расчета освещенности: а — горизонтальной плоскости; б — вертикальной плоскости

Таблица 56.33. Значения удельной мощности, Вт/м<sup>2</sup>,

H <sub>р</sub> , м	А, м <sup>2</sup>	УПМ-15 при ρ <sub>п</sub> = 0,5, ρ <sub>с</sub> = 0,3, ρ <sub>р</sub> = 0,1							H <sub>р</sub> , м	А, м <sup>2</sup>	Н4БН-150 ρ <sub>с</sub> = 0,3.		
		Е. лк									5	10	
		20	30	50	75	100	150	200					
2-3	10-15	10.5	15.2	24.0	39.0	43.0	57.0	73	1.5-2	10-15	4.3	7.1	
	15-25	8.8	12.8	20.0	28.0	36.0	49.0	62		15-25	3.6	6.3	
	25-50	7.8	11.2	17.3	24.0	31.0	43.0	53		25-50	3.0	5.3	
	50-150	6.7	9.6	14.8	20.5	26.5	37.0	45		50-150	2.6	4.4	
	150-300	6.2	8.4	13.2	18.5	23.5	33.0	40		150-300	2.2	4.0	
	> 300	5.7	7.8	12.0	17.3	22.0	30.0	37		> 300	2.0	3.7	
3-4	10-15	13	18.3	29.5	48.0	48.0	72.0	94	2-3	10-15	4.7	7.7	
	15-20	11	15.8	23.5	34.0	41.0	63.0	82		15-25	3.8	6.5	
	20-30	9.6	13.8	20.5	29.0	36.0	54.0	72		25-50	3.2	5.4	
	30-50	8.4	11.7	17.7	25.0	31.0	45.0	61		50-150	2.6	4.3	
	50-120	7.1	9.8	15.3	21.0	25.5	38.0	51		150-300	2.1	3.7	
	120-300	6.0	8.3	12.8	17.4	22.0	33.0	44		> 300	1.9	3.4	
	> 300	5.3	7.4	11.3	15.5	19.5	29.0	39					
4-6	10-17	15.0	20.5	31.0	46.0	62.0	92.0	124	3-4	10-15	6.5	11.7	
	17-25	12.5	17.3	25.5	39.0	51.0	79.0	104		15-20	5.0	9.3	
	25-35	10.7	15.2	22.0	34.0	44.0	69.0	93		20-30	4.0	7.5	
	35-50	9.5	13.2	19.3	29.0	39.0	60.0	82		30-50	3.3	6.1	
	50-80	8.2	11.3	16.3	25.0	33.0	50.0	69		50-120	2.6	4.8	
	80-150	6.8	9.6	14.0	21.0	28.0	43.0	58		120-300	2.1	3.8	
	150-400	5.7	9.1	12.0	17.5	24.0	36.0	50		> 300	1.8	3.3	
	> 400	5.0	6.8	10.5	15.5	21.0	31.0	43					

Примечания 1 Таблица рассчитана для K<sub>1</sub> = 1,3, при K<sub>2</sub> = 1,5 коэффициент пересчета 1,15, при 2 Для ρ<sub>р</sub> = 0,3 коэффициент пересчета 0,93.  
3. Данные таблицы приведены для ламп при напряжении сети 220 В, при напряжении 127 В коэффициент

Таблица 56.34 Значения удельной мощности общего равномерного освещения, Вт/м<sup>2</sup>,

H <sub>р</sub> , м	А, м <sup>2</sup>	ОДР-2, ОДР-4						
		75	100	150	200	300	400	500
		2-3	10-15	7.0	9.3	14.0	18.6	28.0
15-25	5.9		7.9	11.8	15.8	23.5	32.0	39
25-50	5.0		6.6	10.0	12.2	20.0	24.5	33
50-150	4.1		5.4	8.2	10.8	16.4	21.5	27
150-300	3.6		4.8	7.8	9.6	14.4	19.2	24
> 300	3.4		4.6	6.8	9.2	13.6	18.4	23
3-4	10-15	9.3	12.4	18.6	25.0	37.0	50.0	62
	15-20	8.1	10.8	16.2	21.5	32.0	43.0	54
	20-30	7.1	9.4	14.2	18.8	28.0	37.0	47
	30-50	6.0	8.0	12.0	16.0	24.0	32.0	40
	50-120	4.8	6.4	9.6	12.8	19.2	25.5	32
	120-300	4	5.3	8	10.6	16.0	21.0	27
	> 300	3.6	4.8	7.2	9.6	14.4	19.2	24
4-6	10-17	12.0	16.0	24.0	32.0	48.0	64.0	80
	17-25	10.3	13.7	20.5	27.5	41.0	55.0	68
	25-35	8.8	11.7	17.6	23.5	35.0	47.0	58
	35-50	7.7	10.2	15.2	20.5	30.0	41.0	51
	50-80	6.5	8.6	13.0	16.2	26.0	34.0	43
	80-150	5.5	7.3	11.0	14.6	22.0	29.0	38
4-6	150-400	4.3	5.8	8.6	11.6	17.2	23.0	28
	> 400	3.7	5.0	7.4	10.0	14.8	20.0	25

Примечания 1 При расчете удельной мощности для СВ с люминесцентными лампами другого ЛТБ-40, ЛБ-80; 1,29 для ЛД-30, ЛД-40, ЛД-80, ЛД-В-80; 1,68 для ЛДЦ-30, ЛДЦ-40, ЛДЦ-80.

2 При расчете установок, имеющих другие значения коэффициентов отражения, следует пользоваться и ρ<sub>р</sub> = 0,1; 0,84 для ρ<sub>п</sub> = 0,7, ρ<sub>с</sub> = 0,5 и ρ<sub>р</sub> = 0,3.

3 Значения удельной мощности даны для коэффициента запаса K<sub>3</sub> = 1,5 При K<sub>3</sub> = 1,8 коэффициент

общего равномерного освещения для СВ с ЛН

без отражателя при $\rho_n = 0,5$ , $\rho_p = 0,1$			$H_p$ , м	$A$ , м <sup>2</sup>	НСПО1 «Астра» при $\rho_n = 0,5$ , $\rho_c = 0,3$ , $\rho_p = 0,1$						
$E$ , лк					$E$ , лк						
20	30	50			20	30	50	75	100	150	200
12,0	16,2	27,0	4-6	17-25	9,4	13,3	20,5	30,0	37	52	71
10,4	14,3	22,5		25-35	8,1	11,4	17,5	24,5	32	45	61
8,8	12,2	19,5		35-50	7,2	9,9	15,3	22,0	28	39	52
7,5	10,2	16,0		50-80	6,2	8,6	12,0	19,0	24	33	43
6,6	8,8	14,5		80-150	5,3	7,3	11,0	15,7	20	28	37
6,2	8,1	13,2		150-400	4,6	6,4	9,6	13,7	17	24	32
				> 400	4,2	5,7	8,5	12,0	15	24	28
14,6	20,5	31	6-8	35-50	8,7	12,0	18,0	27,0	36	53	72
11,3	16,7	25		50-65	7,6	10,5	16,3	23,0	31	46	62
9,5	13,2	20,5		65-90	6,6	9,2	14,5	20,5	27	41	53
7,7	10,9	16,5		90-135	5,7	7,8	12,5	17,5	22	35	45
6,5	9	13,7		135-250	4,7	6,7	10,4	14,5	19	29	39
5,9	8	13,2		250-500	4,2	6,0	9,2	12,7	17	25	34
				> 500	3,8	5,0	8,0	11,3	15	22	30
21,0	28,0	46,0	8-12	70-100	7,5	10,3	17,3	27,5	35	56	73
16,5	22,0	37,0		100-130	6,7	9,2	15,0	23,0	31	48	64
13,0	18,0	29,5		130-200	5,9	8,0	12,8	19,3	27	40	56
10,8	15,0	23,5		200-300	5,0	6,8	10,8	16,5	22	33	46
8,5	11,8	18,7		300-600	4,2	5,8	9,2	14,0	18	29	40
6,8	9,3	15,0		600-1500	3,6	5,0	8,2	12,0	16	24	35
5,7	8,1	13,0		> 1500	3,4	4,8	7,5	11,0	15	22	33

$K_2 = 1,7$  коэффициент пересчета 1,3

пересчета 0,85

при люминесцентных светильниках с лампами ЛБ-30, ЛБ-40 при  $\rho_n = 0,5$ ;  $\rho_c = 0,3$ ;  $\rho_p = 0,1$

ЛСО04							ШОД						
$E$ , лк													
75	100	150	200	300	400	500	75	100	150	200	300	400	500
7,6	10,2	15,2	20,5	30,0	41	51	7,5	10,0	15,0	20,0	30,0	40	50
6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	43	6,4	8,6	12,9	17,2	26	34	43
5,4	7,2	10,8	14,4	21,5	29	36	5,6	7,5	11,2	15,0	22,5	30	37
4,4	5,9	8,8	11,8	17,6	23,5	30	4,8	6,6	9,6	12,6	19,2	25	31
3,9	5,2	7,6	10,4	15,2	21	26	4,1	5,6	8,2	11,0	16,4	22	27
3,7	4,9	7,4	9,8	14,8	19,6	25	3,9	5,2	7,8	10,4	15,6	21	26
10,4	13,8	21,0	27,5	42,0	55	96	10,5	14,0	21,0	28,0	42,0	56	70
8,8	11,8	17,6	23,5	35,0	47	59	8,8	11,8	17,7	23,5	35,0	47	59
7,5	10,0	15,0	20,0	30,0	40	50	7,3	9,8	14,6	19,6	29,0	39	49
6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	43	6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	42
5,3	7,0	10,6	14,0	21,0	28	35	5,5	7,4	11,0	14,8	22,0	29	37
4,8	5,8	8,7	11,6	17,4	23	28	4,6	6,1	9,2	12,2	18,4	24	30
3,9	5,2	7,8	10,4	15,6	21	26	4,1	5,8	8,2	11	16,4	22	27
13,9	18,5	28,0	37,0	55,0	74	92	14,6	19,5	29,0	39,0	58,0	78	107
11,3	15,0	22,5	30,0	45,0	60	75	11,6	15,5	23,0	31,0	46,0	62	77
9,7	13,0	19,4	26,0	39,0	52	65	9,6	12,8	19,2	22,5	38,0	51	64
8,2	11,0	16,5	22,0	33,0	44	55	8,0	10,6	16,0	21,0	32,0	42	53
7,0	9,3	14,0	18,6	28,0	37	47	6,7	9,0	13,5	18,0	27,0	36	45
5,8	7,8	11,6	15,6	23,0	31	39	5,8	7,8	11,7	15,9	23,5	33	39
4,7	6,3	9,4	12,6	18,8	25	32	5,0	6,7	10,0	13,4	20,0	27	33
4,1	5,5	8,3	11,0	16,6	22	27	4,3	5,8	8,7	11,6	17,4	23	29

типа следует пользоваться следующими значениями коэффициента пересчета 1,13 для ЛХБ, ЛТБ-30, следующими коэффициентами пересчета 1,08 для  $\rho_n = 0,3$ ,  $\rho_c = 0,3$ ,  $\rho_p = 0,1$ , 0,92 для  $\rho_n = 0,7$ ,  $\rho_c = 0,5$  пересчета 1,15, при  $K_2 = 2,0$  коэффициент пересчета 1,35



Таблица 56.35 Углы  $\alpha$ , значения горизонтальной освещенности

$H_p$ , м										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0°0'	27°	45°	56°	63°	68°	71°	74°	76°	78
3	25,00	17,850	8,850	4,275	2,245	1,275	0,802	0,528	0,365	0,255
	0°0'	18°	34°	45°	53°	59°	63°	67°	69°	72
4	11,110	9,500	6,400	3,933	2,400	1,522	1,000	0,680	0,477	0,356
	0°0'	14°	27	37	45	51	56	60	63	66
5	6,250	5,707	4,472	3,200	2,210	1,524	1,066	0,764	0,559	0,419
	0°0'	11°	22	31	39	45	50	54	58	61
6	4,00	3,771	3,202	2,522	1,904	1,414	1,050	0,785	0,595	0,458
	0°0'	9°	18	27	34	40	45	49	53	56
7	2,778	2,673	2,372	1,987	1,600	1,260	0,982	0,766	0,600	0,474
	0°0'	8°	16	23	30	36	41	45	49	52
8	2,041	1,980	1,814	1,585	1,336	1,100	0,893	0,722	0,583	0,473
	0°0'	7°	14°	21	27	32	37	41	45	48
9	1,563	1,527	1,427	1,283	1,118	0,958	0,800	0,672	0,552	0,453
	0°0'	6°	13	18	24	29	34	38	42	45
10	1,235	1,212	1,148	1,054	0,943	0,825	0,711	0,697	0,515	0,437
	0°0'	5°43'	11°	17	22	27	31	35	39	42
11	1,000	0,985	0,943	0,879	0,801	0,716	0,631	0,550	0,476	0,411
	0°0'	5°12'	10°	15	20	24	29	32	36	39
12	0,826	0,816	0,787	0,742	0,686	0,623	0,559	0,496	0,437	0,383
	0°0'	4°46'	9°	14	18	23	27	30	34	37
13	0,694	0,687	0,668	0,634	0,593	0,546	0,497	0,448	0,400	0,356
	0°0'	4°24'	9°	13	17	21	25	28	32	35
14	0,592	0,587	0,571	0,547	0,517	0,481	0,447	0,404	0,366	0,329
	0°0'	4°5'	8°	12	16	20	23	27	30	33
15	0,510	0,506	0,495	0,477	0,454	0,426	0,396	0,365	0,334	0,304
	0°0'	3°49'	8	11	15	18	22	25	28	31
16	0,444	0,442	0,433	0,419	0,401	0,380	0,356	0,331	0,305	0,280
	0°0'	3°35'	7	11	14	17	21	24	27	29
17	0,391	0,388	0,382	0,371	0,357	0,339	0,321	0,300	0,280	0,259
	0°0'	3°22'	7	10	13	16	19	22	25	28
18	0,346	0,344	0,339	0,331	0,319	0,306	0,290	0,274	0,256	0,239
	0°0'	3°11'	6	9	13	16	18	21	24	27
19	0,309	0,307	0,303	0,297	0,287	0,276	0,264	0,250	0,236	0,221
	0°0'	3°1'	6	9	12	15	18	20	23	25
20	0,277	0,276	0,273	0,267	0,260	0,251	0,240	0,229	0,217	0,205
	0°0'	2°51'	5°43'	9	11	14	17	18	22	24
21	0,250	0,249	0,246	0,242	0,236	0,228	0,219	0,210	0,200	0,190
	0°0'	2°44'	5°26'	8	11	13	16	18	21	23
22	0,227	0,226	0,224	0,220	0,215	0,210	0,201	0,194	0,185	0,176
	0°0'	2°36	5°10'	8	10	13	15	18	20	22
23	0,207	0,206	0,205	0,201	0,196	0,192	0,185	0,179	0,171	0,164
	0°0'	2°29'	4°58'	7	10	12	15	17	19	21
	0,189	0,189	0,187	0,184	0,181	0,176	0,171	0,165	0,159	0,153

ной плоскости, лк (рис. 56.13, б);  $\alpha$  — угол между осью СВ (вертикалью) и направлением силы света в расчетную точку;  $H_p$  и  $r$  показаны на рис. 56.13;  $K_z$  — коэффициент запаса.

Расчет значений горизонтальной освещенности может производиться инженерным методом с помощью вспомогательных таблиц. Например, расчет суммарной освещенности от СВ, действующих в контрольной точке  $M$  (рис. 56.13, а), делают так: 1) определяют расстояния  $H_p$  и  $r$  от  $i$ -го СВ до контрольной точки; 2) по табл. 56.35 для определенных значений  $H_p$  и  $r$  находят угол  $\alpha$  и  $e_{\alpha 100}$  — освещенность, создаваемую силой света  $I_{\alpha} = 100$  кд, действующей по направлению  $\alpha$ ; 3) для угла  $\alpha$  находят значение силы света  $I_{\alpha}$

СВ с потоком  $\Phi = 1000$  лм по его типовой кривой (см. табл. 56.15), определяемой из каталогов (табл. 56.13, [56.8]); 4) по силе света  $I_{\alpha}$  и световому потоку СВ  $\Phi_{св}$  рассчитывают его фактическую силу света  $I_{св\alpha} = I_{\alpha}\Phi_{св}/1000$ ; 5) определяют освещенность от СВ в контрольной точке  $M$ :

$$E_i = e_{\alpha 100} I_{\alpha} \Phi_{св} / 10^5 K_z.$$

Пункты 1–5 повторяются для  $n$  однотипных СВ, дающих еще заметные значения освещенности (определяемые точностью расчета). Значение освещенности в точке  $M$

$$E_M = \sum_1^n E_i = \Phi_{св} \sum_1^n (e_{\alpha(i)\alpha} I_{\alpha}^2) / 10^5 K_z.$$

$e_{100}$ , лк, для равномерного источника с силой света 100 кд

P, м										
10	11	12	13	14	15	16	18	20'	22	
79°	80°	81°	81°	82	82°	83°	84°	84°	85°	
0,190	0,142	0,113	0,090	0,070	0,058	0,048	0,038	0,025	0,020	
73°	75°	76°	77°	78°	79°	80	81°	81°	82°	
0,264	0,205	0,161	0,126	0,100	0,084	0,070	0,050	0,036	0,027	
68	70	72	73	74	75	76	78	79	80°	
0,320	0,249	0,198	0,159	0,130	0,107	0,090	0,064	0,047	0,037	
63	66	67	69	70	72	73	74	76	77°	
0,358	0,283	0,228	0,185	0,152	0,126	0,106	0,077	0,057	0,044	
59	61	63	66	67	68	69	71	73	75°	
0,378	0,305	0,249	0,205	0,170	0,142	0,120	0,088	0,066	0,051	
55	58	60	62	63	65	66	69	71	72°	
0,385	0,316	0,261	0,218	0,183	0,154	0,131	0,097	0,074	0,057	
51	54	56	58	60	62	63	66	68	70°	
0,381	0,318	0,267	0,225	0,191	0,163	0,140	0,105	0,080	0,063	
48	51	53	55	57	59	61	63	66	68	
0,370	0,314	0,267	0,228	0,196	0,168	0,146	0,110	0,085	0,067	
45	48	50	52	54	56	58	61	63	66°	
0,354	0,305	0,263	0,227	0,196	0,171	0,149	0,115	0,089	0,071	
42	45	48	50	52	54	56	59	61	63°	
0,335	0,292	0,255	0,223	0,195	0,171	0,150	0,117	0,092	0,074	
40	43	45	47	49	51	53	56	59	61°	
0,315	0,278	0,246	0,217	0,191	0,169	0,150	0,119	0,094	0,076	
38	40	43	45	47	49	51	54	57	59°	
0,295	0,263	0,235	0,209	0,187	0,166	0,148	0,119	0,096	0,078	
36	38	41	43	45	47	49	52	55	58°	
0,275	0,248	0,223	0,201	0,180	0,162	0,146	0,118	0,096	0,079	
34	36	39	41	43	45	47	50	53	56°	
0,256	0,233	0,212	0,192	0,174	0,157	0,142	0,117	0,096	0,079	
32	35	37	39	41	43	45	48	51	54°	
0,238	0,219	0,200	0,183	0,167	0,152	0,138	0,115	0,095	0,080	
30	33	35	37	39	41	43	47	50	52°	
0,222	0,205	0,189	0,174	0,159	0,146	0,134	0,112	0,094	0,079	
29	31	34	36	38	40	42	45	48	51°	
0,206	0,192	0,178	0,165	0,152	0,140	0,129	0,109	0,092	0,079	
28	30	32	34	36	38	40	43	46	49°	
0,192	0,180	0,167	0,156	0,146	0,134	0,124	0,126	0,090	0,077	
27	29	31	33	35	37	39	42	45	48°	
0,179	0,168	0,158	0,147	0,137	0,128	0,119	0,103	0,088	0,076	
25	28	30	32	34	36	37	41	44	46°	
0,167	0,158	0,144	0,139	0,131	0,122	0,114	0,099	0,086	0,075	
25	27	29	31	32	34	36	39	42	45°	
0,155	0,148	0,140	0,132	0,124	0,114	0,109	0,096	0,084	0,073	
24	26	28	29	31	33	35	38	41	44°	
0,146	0,139	0,132	0,125	0,118	0,111	0,105	0,092	0,081	0,071	

**Аварийное, эвакуационное и охранное освещение**

Расчет освещенности точечным методом может быть использован как проверочный расчет при проектировании ОУ методами коэффициента использования и удельной мощности.

Для улучшения качественных показателей ОУ можно пользоваться таблицами, в которых даются рекомендации, обеспечивающие условия соблюдения нормированных значений этих показателей.

Условия, обеспечивающие нормированные значения коэффициента пульсации  $K_p$ , даны в табл. 56.36, показателя ослепленности  $P$  — в табл. 56.37 и 56.38 для ОУ с лампами ДРЛ, ЛН, ДРИ, для ОУ с другими источниками — в [56.2].

Аварийное освещение устраивается в помещениях, где необходимо продолжать работу или эвакуировать людей при внезапном отключении рабочего освещения. Аварийное освещение первого вида устраивается в тех случаях, когда погасание рабочего освещения связано с возможностью возникновения взрыва, пожара, оравления и т. п.: с возможностью длительного расстройтва технологического процесса, нарушения работы объектов особой важности (электростанции, узлы связи, насосные установки, диспетчерские узлы и т. д.).

Аварийное освещение должно обеспечивать на рабочих местах освещенность не менее 5% нормы, установленной для рабочего

Таблица 56 36. Условия соблюдения нормированного значения  $K_{II}$ 

Расположение СВ и схема включения ламп	$K_{II}$ , %	Расположение СВ и схема включения ламп	$K_{II}$ , %
Лампы типа ДРЛ	30	Сплошные линии СВ и при шаге СВ до 2 м: трехфазные линии с поочередным включением СВ на разные фазы сети (любые лампы и схемы) то же, но двухфазные линии: лампы ЛБ и ЛТБ лампы ЛХБ лампы ЛДЦ и ЛД двухфазные линии с поочередным включением СВ на разные сети при числе ламп в СВ, кратном двум, с включением половины ламп по схеме опережающего и половины — по схеме отстающего тока (лампы всех типов)	10—30
совместная установка двух ламп разных фаз	10—30		
совместная установка трех ламп разных фаз	10—30		
Люминесцентные лампы при любом расположении СВ	10—30		
число ламп в СВ, кратное трем, с равномерным распределением между фазами сети	10—30		
число ламп в СВ, кратное двум, с включением половины ламп по схеме опережающего и половины — по схеме отстающего тока	10—30		
ЛБ и ЛТБ	15—30		
ЛХБ	20—30		
ЛДЦ	30		
ЛД	30		
любое число ламп в СВ и любая схема включения: лампы ЛБ и ЛТБ	30		
прочие лампы	30		

Таблица 56 37 Группировка светильников по параметру  $P$ 

Номер группы	Тип КСС по ГОСТ 13828-74	Защитный угол, не менее, в плоскости		Примеры СВ
		поперечной	продольной	

## Светильники с ЛЛ

1	К, Г	30°	—	ЛСП13
2	Д	15°	—	ЛД, ПВЛМ, ЛСП02, ЛСП06
3	Д	15°	15°	ЛД, ЛДОДР, ПВЛМ, ЛСП02, ЛСП06
4	Д	30° (условный)	30°	ШОД, ЛСО02
5	Д	90° (условный)	90° (условный)	ВЛВ, ПВЛ1, ПВЛП, УСП, ЛВП31, ЛВП33
6	Д	15° (условный)	—	ПВЛМ с лампами ЛБР и ЛХБР
7	Д	15° (условный)	15°	ПВЛМ с лампами ЛБР и ЛХБР и решеткой
8	Л	30°	30°	ЛСП13

## Светильники с ЛН, ДРЛ и МГЛ

11	К	30°	30°	30	Гк, ГСП10
12	К	15°	15°		С35ДРЛ, РСР05, РСР13, РСР18
13	Г	30°	30°		Гс, ГсУ, НСП17, НГСП10
14	Г	15°	15°		С34ДРЛ, РСР05-Г, РСР08, РСР13, РСР18
15	Д	30°	30°		ППД2, УПД
16	Д	15°	15°		«Астра», СД2, ДРЛ, РСР08, РСР05, РСР13, РСР18
17	Л	30°	30°		С, СУ
18	Л	15°	15°		РСР08
18	М (с молочным рассеивателем)	90° (условный)	90° (условный)		ПО-02, ПО-21, НСО02

## Лампы-светильники

21	К	15°	15°	ДРИЗ
22	К	—	—	ЗК
23	Г	—	—	ЗС
24	Д	—	—	ДР.ЛР

Таблица 56.38 Максимальные значения  $l/H_p$ , обеспечивающие нормируемые величины  $P$

Номер группы по табл. 56.37	P = 20		P = 40		P = 60	
	Разряд работ					
	$H_p, м$ Ia	IIa	IIб, в.г.; IIб, в.г	IIIб, в.г IVб, в.г	IIIа IVб, в.г	VI, VIIa
<i>Для ОУ с ДРЛ</i>						
12	1,7	0,7	+	+	+	+
	2,4	0,8	+	+	+	+
14	3,4-10	1,0	+	+	+	+
	12	+	+	+	+	+
16	1,7	0,6	1,1	+	1,1	+
	2,4	0,7	1,2	+	1,2	+
14	3,4	0,9	1,3	+	1,3	+
	4,8-10	1,0	+	+	+	+
16	12,0	+	+	+	+	+
	1,7	-	1,0	+	1,0	1,4
11	2,4	-	1,1	+	1,0	1,5
	3,4	-	1,1	+	1,0	1,5
12	4,8-8,8	-	1,1	+	1,0	1,5
	10,0	-	1,1	+	1,0	1,5
13	1,7	0,8	1,2	1,2	+	+
	2,4	0,9	1,3	1,3	+	+
14	3,4	1,0	1,3	1,3	+	+
	4,8-6,4	1,0	1,4	1,4	+	+
15	7,6	1,0	1,5	1,5	+	+
	8,8	1,1	+	+	+	+
16	10,0	+	+	+	+	+
	1,7	0,5	1,1	1,1	+	1,4
11	2,4	0,6	1,2	1,2	+	1,5
	3,4	0,7	1,3	1,3	+	+
12	4,8-8,8	0,8	1,3	1,3	+	+
	10,0	0,9	1,4	1,4	+	+
13	1,7	0,8	1,4	1,4	+	+
	2,4	0,9	1,5	1,5	+	+
14	3,4	1,0	+	+	+	+
	4,8-6,4	1,1	+	+	+	+
15	7,6-8,8	+	+	+	+	+
	10,0	+	+	+	+	+
16	1,7	0,5	1,1	1,1	+	1,4
	2,4	0,6	1,2	1,2	+	1,5
11	3,4	0,7	1,3	1,3	+	+
	4,8-6,4	0,8	1,3	1,3	+	+
12	7,6-8,8	0,9	1,4	1,4	+	+
	10,0	+	+	+	+	+
13	1,7	0,8	1,4	1,4	+	+
	2,4-3,4	-	1,2	1,2	+	+
14	5,2-7,6	-	1,3	1,3	+	+
	8,8-10	-	1,4	1,4	+	+
15	1,7	-	1,0	1,0	+	+
	2,4	-	1,2	1,2	+	+
16	3,4	-	1,3	1,3	+	+
	5,2	-	1,4	1,4	+	+
11	1,7	-	-	-	+	1,1
	2,4	-	-	-	+	1,2
12	3,4	-	0,8	0,8	+	1,2
	5,2	-	0,9	0,9	+	1,3

Примечание. Знак «-» означает полную неприменимость СВ данной группы, знак «+» - применение при любых значениях  $l/H_p$

общего освещения лампами накаливания, но не менее 2 лк внутри здания и не менее 1 лк для территорий предприятий. Создавать освещенность внутри зданий более 30 лк при газоразрядных лампах и более 10 лк при лампах накаливания без специального обоснования нельзя.

Эвакуационное освещение устраивается в производственных помещениях с постоянно работающими в них людьми (более 50 чел.) в местах, опасных для прохода людей, в зрительных залах, больших аудиториях (на 100 чел. и более) и т. п. Аварийное освещение должно обеспечивать не менее 0,5 лк на полу помещений по линии основных проходов и ступенях лестниц, на открытых территориях - не менее 0,2 лк. Светильники аварийного освещения для продолжения работ должны быть присоединены к независимому источнику питания. Светильники эвакуационного освещения должны быть присоединены к сети, не зависящей от сети рабочего освещения (начиная от щита подстанции или от ввода кабеля в здание).

Для аварийного и эвакуационного освещения применяются, как правило, лампы накаливания; люминесцентные лампы применяются в помещениях с температурой не менее +5 °С при условиях их питания переменным током с напряжением не ниже 90% номинального.

В помещениях, где могут находиться более 100 чел., а также в выходах из помещений, где могут находиться более 50 чел. или имеющих площадь более 150 м<sup>2</sup>, должны быть установлены световые указатели, присоединенные к сети аварийного освещения.

Охранное освещение предусматривается вдоль границ предприятий, охраняемых в ночное время. Нормируется при этом вертикальная освещенность, равная 0,5 лк в плоскости, перпендикулярной линии границы на уровне 0,5 м от земли либо на уровне земли в горизонтальной плоскости.

### 56.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

К установкам наружного освещения относятся устройства по освещению мест работы на открытых пространствах, заводских территорий (дворов, проездов, проходов), городских улиц и площадей.

В установках наружного освещения применяются как СВ (см. табл. 56.13, 56.14), так и прожекторы (в основном заливающего света, табл. 56.18, 56.19).

Последовательность проектирования установок наружного освещения следующая: выбор

нормируемого значения освещенности, выбор типов источников света и СВ (или прожекторов), установление схемы их размещения и, наконец, расчет мощности осветительной установки.

### Выбор нормируемых параметров

Освещенности рабочих поверхностей мест, расположенных на открытых территориях, должны быть не менее норм, указанных в табл. 56.39.

Освещенность площадок предприятий на уровне земли или дорожных покрытий нормируется значениями, указанными в табл. 56.40, а карьеров и строительных площадок — в табл. 56.41.

Неравномерность освещенности ( $E_{max}/E_{min}$ ) для дорог, проездов, площадок и железнодорожных путей на заводских территориях не должна превышать 15/1, а для пешеходных площадок — 25/1. Управление наружным освещением делается не зависящим от управления освещением внутри зданий.

Для ограничения слепящего действия установок наружного освещения рабочих мест и территорий промышленных предприятий высота установки (см. табл. 56.14) над уровнем земли регламентируется СНиП. Для СВ с защитным углом  $\gamma < 15^\circ$  высота должна быть не менее указанной в табл. 56.42. Для СВ с защитным углом  $\gamma \geq 15^\circ$  высота их установки должна быть не менее 3,5 м при любых источниках света.

Венчающие СВ рассеянного света (для освещения скверов, площадок перед фасадами зданий и т. п.) устанавливаются на высоте не менее 3 м при лампе до 6000 лм и на высоте не менее 4 м при лампе свыше 6000 лм.

Ограничение высоты установки приборов прожекторного типа в зависимости от нормируемой освещенности и максимальной силы света прибора регламентируется значениями, данными в табл. 56.43.

Освещение улиц, дорог и площадей в городах и поселках проектируется исходя из нормируемых значений средней яркости дорожных покрытий (табл. 56.44). Для городов и поселков, расположенных в северной зоне азиатской части СССР и севернее  $60^\circ$  северной широты в европейской части СССР, нормируется среднее значение освещенности дорожных покрытий (табл. 56.44). Средняя освещенность дорожного покрытия транспортных туннелей дана в табл. 56.45.

Неравномерность яркости ( $L_{max}/L_{min}$ ) или освещенности ( $E_{max}/E_{min}$ ) не должна превышать 3/1 при норме средней яркости не более  $0,6 \text{ кд/м}^2$  или освещенности от 4 до 6 лк.

Таблица 56.39 Освещенность рабочих поверхностей мест, расположенных вне зданий

Разряд прикладной работы	Характеристика работы	Освещенность, лк
IX	Точные работы при отношении наименьшего размера объекта различения к расстоянию до глаз менее 0,005	50
X	Работа средней точности при отношении наименьшего размера объекта различения к расстоянию до глаз от 0,005 до 0,02	30
XI	Работы малой точности при отношении наименьшего размера объекта различения к расстоянию до глаз 0,02—0,05, а также работы, требующие только общего наблюдения за ходом производственного процесса	10
XII	Грубые работы, требующие различения объектов при отношении наименьшего размера объекта различения к расстоянию до глаз 0,05 и более	5
XIII	Работы, требующие различения крупных предметов, находящихся в непосредственной близости от работающего	2

Таблица 56.40 Освещенность площадок предприятий или дорожных покрытий на уровне земли

Освещаемые объекты	Освещенность, лк
Проезды с интенсивностью движения автомобилей в обоих направлениях (в сутки)	
от 1000 до 3000	3
от 200 до 1000	2
менее 200	1
Пожарные проезды, дороги для хозяйственных нужд, подъезды к зданиям	0,5
Пешеходные и велосипедные дорожки с движением	
интенсивным	2
обычным	1
незначительным	0,5
Лестницы и мостики для переходов (на площадках и ступенях)	2
Пешеходные дорожки на площадках для отдыха и в скверах	0,5
Предзаводские участки (площадки, проезды, проходы, стоянки автотранспорта), не относящиеся к территории города	2
Железнодорожные пути	
стрелочные горюшины	2
отдельные стрелочные переводы	1
железнодорожные пути, переезды	0,5

Примечание Для автомобильных дорог, являющихся продолжением городских улиц и имеющих аналогичное покрытие проезжей части и интенсивность движения транспорта, необходимо соблюдать нормы средней яркости покрытий проезжей части, приведенные в табл. 56.44

Таблица 56.41. Нормы освещенности карьеров и строительных площадок

Наименование участков и рабочих операций	Минимальная освещенность, лк	Плоскость, в которой нормируется освещенность
<i>Территории карьеров</i>		
Карьер в районе производства работ	2	На уровне земли
Карьер в районах временного пребывания людей и районы транспортных коммуникаций	0.5	То же
Пути постоянного движения людей	1	» »
Лестницы, спуски с уступами на уступ	3	» »
Участки снятия вскрышных пород экскаватором	10	Вертикальная (со стороны машины)
Места производства ручных работ	5	На уровне земли
Конвейерная лента для транспортировки горной массы	2	На поверхности ленты
Отвалы	10	На уровне верха гусениц трактора
Хвостохранилище	0.5	На уровне земли
Измельчение глины на глинорыхлительной машине	10	Горизонтальная на уровне машины
Мостик земснаряда	2	На уровне мостика
Карта намыва	2	На уровне карты намыва
Сливной колодец	10	Вертикальная
Добыча камня	10	Горизонтальная на уровне разрабатываемой породы
<i>Строительные площадки</i>		
Монтаж высоковольтного оборудования, монтаж и сборка различных механизмов, столярные, штукатурные, малярные и опалубочные работы, установки или монтаж арматуры	50	Горизонтальная
Бетонирование блоков с большим содержанием стальной арматуры, кладка из крупных бетонных блоков, сборка и монтаж готовых частей механизмов, металлоконструкций (каркасы зданий, колонны, фермы), санитарно-технические работы	30	»

Продолжение табл. 56.41

Наименование участков и рабочих операций	Минимальная освещенность, лк	Плоскость, в которой нормируется освещенность
Бетонирование крупных простых блоков, кирпичная кладка, монтаж сборных фундаментов, крановые работы, такелажные работы, сливные (стандартные) колодцы	10	Горизонтальная
Земляные работы, производимые экскаватором, такелажные работы	5	»
Основные автодороги	10	Вертикальная
Территории котлованов сооружений, участки разгрузки, погрузки и складирования материалов, карты намыва грунта	3	Горизонтальная
Железнодорожные пути и неосновные дороги	2	»
	0.5	»

Таблица 56.42. Высота установки СВ

Светораспределение	Наибольший световой поток ламп в СВ, установленных на одной опоре, лм	Наименьшая высота установки СВ, м, при	
		ЛН	ГЛ
Полуширокое Л	Менее 5000	6,5	7
	5000—10 000	7	7,5
	10 000—20 000	7,5	8
	20 000—30 000	—	9
	30 000—40 000	—	10
	Свыше 40 000	—	11,5
Широкое Ш	Менее 5000	7	7,5
	5000—10 000	8	8,5
	10 000—20 000	9	9,5
	20 000—30 000	—	10,5
	30 000—40 000	—	11,5
	Свыше 40 000	—	13

В установках наружного освещения при средней яркости покрытия  $0,4 \text{ кд/м}^2$  и более должны применяться преимущественно СВ с газоразрядными лампами. На улицах, дорогах и площадях категорий А и Б показатель ослепленности не должен превышать 150. Для объектов категории В и осветительных установок, регламентированных уровнем средней освещенности, высота расположения СВ должна приниматься по табл. 56.42. На проезжей части улиц, дорог и площадей СВ должны устанавливаться на высоте не менее 6,5 м.

Таблица 56.43. Минимально допустимая высота установки ПР и СВ

Тип прожектора или светильника	Тип лампы	Максимальная сила света $I_0$ , ккд	Минимально допустимая высота установки, м, при нормируемой минимальной освещенности, лк							
			0,5	1	2	3	5	10	30	50
ПСМ-50-1	Г220-1000	120	35	28	22	20	17	13	7	6
ПСМ-50-1	ДРЛ-700	52	23	19	14	13	11	8	5	4
ПСМ-50-1	ДРЛ-400	20	14	11	9	8	7	5	3	3
ПСМ-50-2	ПЖ220-1000	640	80	65	50	45	40	30	17	13
ПСМ-40-1	Г220-500	70	25	21	17	15	13	10	5	4
ПСМ-40-2	ПЖ220-500	280	50	43	33	30	25	20	11	9
ПСМ-30-1	Г220-200	33	18	15	11	10	9	7	4	3
ПЗР-250	ДРЛ250	11	10	9	6	6	5	4	3	3
ПЗР400	ДРЛ400	19	14	11	8	8	7	5	3	3
ПЗС-45	Г220-1000	130	35	29	22	20	18	13	7	6
ПЗС-45	ДРЛ700	30	17	14	11	10	8	6	4	3
ПЗС-45	ДРЛ400	14	12	10	7	7	5	4	3	3
ПЗС-35	Г220-500	50	22	18	14	13	11	8	5	4
ПЗС-25	Г220-200	16	13	10	8	7	6	5	3	3
ПЗМ-35	Г220-500	40	20	16	12	11	10	7	4	4
ПЗМ-25	Г220-200	10	10	8	6	6	5	4	3	3
ПКН-1000-1	КГ220-1000-5	52	23	19	14	13	11	8	5	4
ПКН-1000-2	КГ222-1000-5	30	17	14	11	10	8	6	4	3
ПКН-1500-1	КГ220-1500	90	30	25	20	17	15	11	6	5
ПКН-1500-2	КГ220-1500	45	20	17	13	12	10	8	5	4
ИСУ01 × 2000/К-63-01	КГ220-2000-4	71	26	22	17	15	13	10	6	5
ИСУ02 × 5000/К-03-02	КГ220-5000-4	200	45	35	28	25	22	17	10	8
СКсН-10000	ДКсТ10000	165	40	33	25	23	20	15	15	15
ОУКсН-20 000	ДКсТ20 000	650	80	65	50	45	40	30	25	25
ОУКсН-50 000	ДКсТ50 000	1300	115	90	70	65	55	45	40	40
ККУ01 × 20 000/Н00 – 01	ДКсТ20 000	120	35	28	21	25	25	25	25	25

Таблица 56.44 Средние значения яркости и освещенности для улиц, дорог и площадей

Категория улиц, дорог и площадей	Улицы, дороги и площади	Наибольшая интенсивность движения транспорта в обоих направлениях, единиц/ч	Средняя яркость покрытия, кд/м <sup>2</sup>	Средняя горизонтальная освещенность покрытия, лк
А	Скоростные дороги <sup>1</sup> , магистральные улицы общегородского назначения: площади <sup>2</sup> главные, вокзальные, транспортные, предместные и многофункциональных транспортных узлов	3000	1,6	20
		От 1000 до 3000	1,2	20
Б	Магистральные улицы районного значения, дороги грузового движения общегородского назначения, площади перед крупными общественными зданиями и сооружениями (стадионами, театрами, выставками, торговыми центрами, колхозными рынками и другими местами массового посещения)	500 – 1000	0,8	15
		1000 – 2000	0,6	15
		2000	0,4	10
		1000 – 2000	0,4	10
В	Улицы и дороги местного значения улицы жилых районов, дороги промышленных, коммунальных и складских районов, поселковые улицы и дороги Поселковые улицы, площади перед общественными зданиями и сооружениями поселкового значения	500	0,4	6
		500	0,2	4
		—	—	4

<sup>1</sup> Средняя яркость покрытия скоростных дорог принимается 1,6 кд м<sup>2</sup> независимо от интенсивности движения транспорта

<sup>2</sup> Нормы средней яркости или средней освещенности покрытия проезжей части в границах транспортного пересечения в двух или более уровнях следует принимать как для освещения основной магистрали, на которой оно расположено.

Примечание Интенсивность движения транспорта должна приниматься с учетом развития на ближайшие 10 лет.

Таблица 56.45. Нормируемые значения средней освещенности для транспортных туннелей

Режим освещения	Средняя горизонтальная освещенность, лк, на расстоянии от въездного портала, м					
	5	25	50	75	100	125 и более
Дневной для туннелей*						
длинной до 100 м	1000	750	500	200	60	—
длинной более 100 м	1000	750	500	300	150	60
Вечерний и ночной*	60	60	60	60	60	60

\* Для туннелей длиной до 60 м с прямолинейной трассой освещение следует проектировать по нормам для вечернего режима освещения.

#### Проектирование установок, выполненных светильниками

Расположение СВ определяется условиями ограничения ослепленности, а также заданными уровнями яркости или освещенности. Отношение расстояния  $l$  между СВ с защитным углом  $\gamma > 15^\circ$  к высоте их подвеса  $H$  (см. табл. 56.42) должно быть не менее 6. Размещение СВ в установках наружного освещения в большинстве случаев делается равномерным. Выбор схемы размещения СВ обусловлен требуемой степенью равномерности освещения при минимальной удельной установленной мощности. Однородное одностороннее расположение применяется на улицах при ширине проезжей части не свыше 10–12 м, осевое расположение — при ширине, не превышающей 18 м. Двухрядное (шахматное и по сторонам прямоугольника) расположение СВ применяется при ширине проезжей части более 24 м.

Кроме ламп накаливания для наружного освещения стали широко применяться газоразрядные лампы. Последние требуется применять в установках при средней яркости дорожного покрытия  $0,4 \text{ кд/м}^2$  и более, а также при средней освещенности, равной или большей 4 лк. Большой экономический эффект дает применение натриевых ламп типа ДНаТ мощностью 250 и 400 Вт. В табл. 56.46 даны рекомендации по выбору источников света (ИС).

Выбор типа СВ производится в зависимости от ширины проезда, принятой схемы размещения СВ и высоты их подвеса (см. табл. 56.14 и 56.43). В установках наружного освещения, выполненных СВ, расчет освещенности при известном их размещении производится по КСС (см. табл. 56.15) точечным методом. Для этого используются формулы и методы, приведенные выше, в § 56.5 (расчет осветительных установок закрытых помещений).

При принятом расположении СВ требуемое значение светового потока лампы

$$\Phi_{\text{л}} = EK_3 \cdot 1000 / \sum E_{1000},$$

где  $E$  — нормируемое значение освещенности;  $\sum E_{1000}$  — суммарная освещенность в точке минимального ее значения, создаваемая всеми ближайшими СВ с условной лампой 1000 лм;  $K_3$  — коэффициент запаса (см. табл. 56.23).

#### Проектирование установок, выполненных прожекторами заливающего света

Когда освещение открытых пространств СВ невозможно или неэкономично, применяется целесообразное для больших территорий прожекторное освещение, которое в этом случае в 1,5–2 раза снижает эксплуатационные расходы по сравнению с освещением СВ.

Наряду с этим уменьшается загруженность территории опорами и приспособлениями для подвески СВ. Недостатками прожекторного освещения являются большая ослепленность и наличие резких теней.

Выбор типа ПР (см. табл. 56.18, 56.19) определяется размерами территории и ее формой, нормированной освещенностью и допустимым расстоянием от места установки ПР до освещаемого объекта. ПР с параболическими отражателями, имеющие почти круглоконический световой пучок, ПСМ, ПЗС (с лампами накаливания) и ДРЛ, ПГП (с лампами ДРИ) применяются для примерно квадратных по форме территорий. В случае вытянутых в одном направлении территорий выгодно применять ПР с параболическими отражателями (типов ПГЦ, ОУКсН, ПКН с лампами ДНаТ, ДРИ, ДКсТ, КГ). Для территорий площадью 4000–5000 м<sup>2</sup> при низких уровнях освещенности (менее 5 лк) применяются ПР ПЗС-25 или ПЗС-35 с лампами накаливания мощностью 200 и 500 Вт, с лампами ДРЛ 250 Вт, ПЗР — 250 Вт.

Прожекторные мачты могут быть стационарными и передвижными (для освещения отдельных участков площадок и карьеров). Мачты выполняются из металла, дерева (до 15 м) и железобетона. Данные металлических мачт приведены в табл. 56.47.

Общее равномерное освещение осуществляется ПР, устанавливаемыми по периметру площадок на мачтах высотой 10–50 м в зависимости от ширины освещаемой площадки.



Таблица 56.46 Источники света, рекомендуемые для освещения улиц различных категорий

Категория	Проезжая часть улиц и площадей	Зона массового нахождения людей
А	ДНаТ, ДРЛ, $L = 1,2 - 1,6$ кл/м <sup>2</sup> . ДРЛ, $L = 0,8 \div 1,2$ кл/м <sup>2</sup>	ДРИ ГЛН
Б	ДНаТ, ДРЛ, $L = 1,0$ кл/м <sup>2</sup> ; ДРЛ, $L = 0,6 \div 0,8$ кл/м <sup>2</sup>	ДРИ, ЛН, ГЛН. ДРЛ совместно с ДНаТ
В	ДНаТ, ДРЛ, ЛН, $L = 0,2 \div 0,4$ кл/м <sup>2</sup>	ЛН, ДРИ

При освещении больших заводских территорий и необходимости создания высоких уровней освещенности применяются ПР ПЗС-45 с лампами накаливания мощностью 1 кВт, ДРЛ мощностью 400, 700 Вт, а также типов ПГП и ПГЦ с лампами ДРИ-700—ДРИ-1500 (см. табл. 56.19). ПKN-1000, ПKN-1500 (см. табл. 56.18).

Для освещения больших карьеров с высотой бортов более 100 м и со взрывным способом добычи руды (осветительные приборы удалены от объектов освещения на расстояние более 300 м) рекомендуется применять ПР типов ПГП и ПГЦ с лампами ДРИ мощностью 1,2 и 3,5 кВт, а также приборы ОУКсН и СПКс с ксеноновыми лампами мощностью 10, 20, 50 кВт (табл. 56.18).

При освещении строительных площадок шириной до 150 м следует применять ПР типов ПЗР, ПСМ или ПЗС с лампами ДРЛ, ПР, ПKN и ИСУ с ГЛН, для площадок шириной 150—300 м — ПР ПKN и ИСУ с ГЛН, а также ДНаТ. Для более широких площадок необходимо использовать МГЛ, мощные ГЛН 15—10 кВт и лампы ДКСТ-20000 (10—20 кВт).

Таблица 56.47 Металлические прожекторные мачты

Высота мачты, м	Число прожекторов, устанавливаемых на мачте	Масса металлоконструкций, т	Объем железобетонных фундаментов, м <sup>3</sup>	Организация-разработчик
21	27	2,75	4,8	Мостипротранс
28	27	3,60	6,2	
35	28	6,11	13,6	
45	40	8,30	15,7	
10	16	1,10	4,7	Гипроур.д. Ленинград
15	16	1,34	4,7	
20	16	2,01	5,8	
25	16	2,25	5,8	
30	16	3,43	5,8	

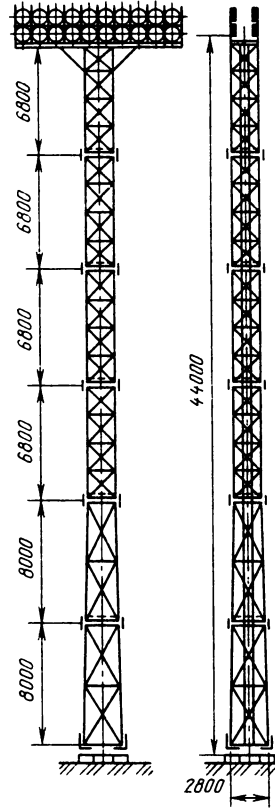


Рис. 56.14. Прожекторная мачта высотой 45 м с площадкой типа П-4

ПР могут располагаться группами до 40 шт. на мачтах высотой до 45 м (рис. 56.14).

Групповое размещение прожекторов применяется при освещении территорий, площадь которых превышает 10 000 м<sup>2</sup>, при больших уровнях освещенности и необходимости сведения числа опор к минимальному.

При площади территории, не превышающей 5000 м<sup>2</sup>, прибегают к индивидуальному расположению ПР при расстояниях между опорами 150—200 м. Наименьшая высота установки может быть определена исходя из табл. 56.43.

Оптическая ось прожектора устанавливается под некоторым углом  $\theta$  к горизонтальному направлению (рис. 56.15). Расчет оптимального угла производится по формуле

$$\theta_{\text{опт}} = \arcsin 0,01 \sqrt{m + n(E_0 H_p^2)^{0,3}},$$

где  $E_0 = E_{\text{нор}} K_3$ , если участок перекрывается световым пяном одного ПР;  $E_0 = E_{\text{нор}} K_3 / 2$ , если световые пяна ПР перекрывают друг

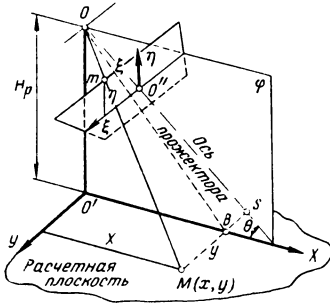


Рис. 56.15. К расчету освещенности от прожектора заливающего света

друга;  $K_3$  – коэффициент запаса, равный 1,3–1,5 (см. табл. 56.23).

Коэффициенты  $m$  и  $n$  постоянны для данного типа ПР:  $m = 300$ ,  $n = 14$  для ПЗС-35;  $m = 240$ ,  $n = 6.5$  для ПЗС-45.

Ориентировочный расчет прожекторной установки (количество ПР, выбор их размещения, выбор мачт и угла наклона  $\theta_{\text{опт}}$  оптических осей ПР) может производиться по удельной мощности (первые два параметра) с помощью табл. 56.48, более точный расчет выполняется методом компоновки кривых равных значений освещенности.

Таблица 56.48 Ориентировочное значение удельной мощности общего прожекторного освещения

Источник света (тип)	Ширина освещаемой площадки, м	Удельная мощность общего освещения, Вт/м <sup>2</sup> , при нормируемой минимальной освещенности, лк				
		0,5	1	2	5	10
ЛН	75–150	0,65	0,75	0,85	2,10	4,00
	151–300	0,40	0,55	0,70	1,70	3,20
КГ	75–125	0,18	0,45	0,55	1,40	2,70
	126–300	0,15	0,25	0,40	1,00	2,00
ДРЛ	75–250	0,20	0,35	0,45	1,20	1,80
	251–300	0,18	0,30	0,50	1,00	2,00
ДРИ	75–150	0,18	0,25	0,30	0,70	1,30
	151–350	0,13	0,15	0,20	0,45	0,80
ДКСТ-50000 (H = 50 м)	200–275	0,40	0,75	1,00	2,50	4,50
ДКСТ-20000 (H = 30 м)	276–400	0,30	0,45	0,60	1,30	2,50
ДКСТ-20000 (H = 50 м)	150–200	0,45	0,80	1,50	3,50	6,50
	201–400	0,25	0,60	1,30	3,00	5,50
ДКСТ-20000 (H = 50 м)	200–250	0,35	0,70	1,20	2,50	4,50
	251–400	0,25	0,50	0,80	1,90	4,20

Расчет освещенности в точке  $M$  (см. рис. 56.15) от ПР заливающего света производится при помощи кривых равных значений относительной освещенности (рис. 56.16, 56.17).

Кривые равных значений относительной освещенности строятся для условной плоскости (см. рис. 56.15), удаленной от фокуса

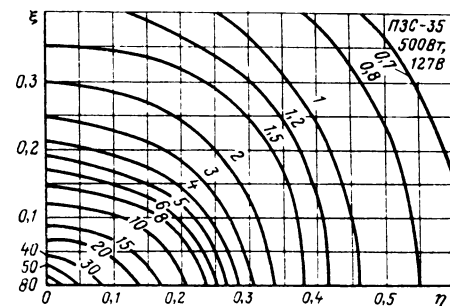
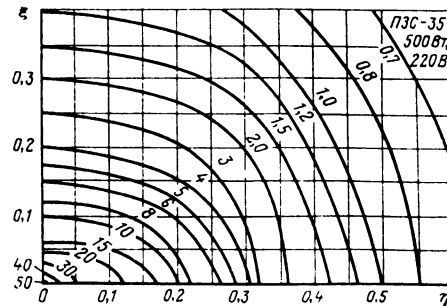
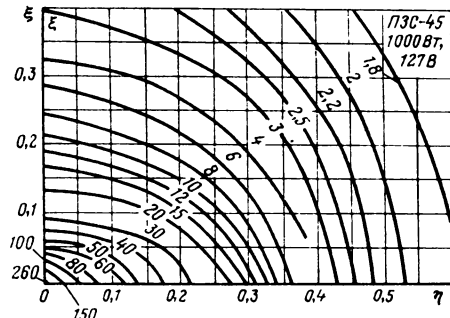
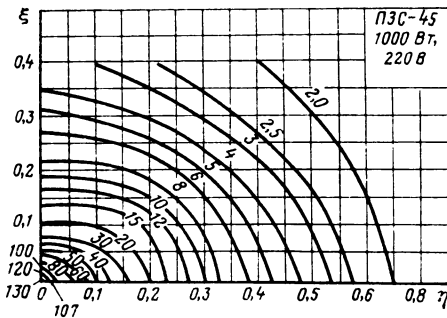


Рис. 56.16. Кривые равных значений относительной освещенности для прожекторов ПЗС-35 и ПЗС-45

Таблица 56.49. Значения  $\xi$ ,  $\rho$  и  $\rho^1$  для расчета прожекторного освещения

$\theta_{\text{онт}}$	$x/H_p$																									
	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	
8	$\xi$	0,49	0,34	0,25	0,19	0,14	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08
	$\rho$	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
	$\rho^1$	4,2	9,5	18	30	46	68	97	132	173	225	284	350	430	520	625	729	860	1000	1160	1331	1521	1728	2197	2744	3375
10	$\xi$	0,44	0,30	0,21	0,15	0,11	0,07	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
	$\rho$	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,5	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
	$\rho^1$	4,5	9,8	18	30	48	69	98	132	173	225	284	353	432	520	625	729	860	1000	1160	1331	1520	1728	2197	2744	3375
12	$\xi$	0,40	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,01	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14
	$\rho$	1,7	2,2	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5	11,9	12,9	13,9	14,9
	$\rho^1$	4,7	10	19	31	48	70	98	132	173	225	283	343	425	512	620	729	850	1000	1150	1331	1500	1700	2150	2700	3375
14	$\xi$	0,36	0,23	0,14	0,08	0,04	0	0,03	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18
	$\rho$	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	10,4	11,4	13,00	14,80	16,70	19,9	24,0
	$\rho^1$	4,9	11	19	31	48	70	98	132	173	222	280	343	425	512	610	729	845	980	1140	1300	1480	1670	1990	2400	2900
16	$\xi$	0,32	0,19	0,10	0,4	0	0,04	0,06	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21
	$\rho$	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,0	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,4	8,9	9,4	9,9	10,4	10,8	11,3	11,9	12,8	13,8	14,8
	$\rho^1$	5,1	11	19	32	48	70	97	125	172	216	277	343	415	512	600	729	830	960	1110	1280	1450	1670	1990	2400	2900
18	$\xi$	0,28	0,15	0,07	0,01	0,04	0,07	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	$\rho$	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	7,4	7,9	8,4	8,9	9,3	9,8	10,3	10,8	11,3	11,9	12,8	13,8	14,8
	$\rho^1$	5,2	11	19	32	48	69	97	130	170	216	272	343	410	495	590	700	810	940	1080	1240	1450	1670	1990	2400	2900
20	$\xi$	0,25	0,12	0,04	0,03	0,07	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,0	5,5	6,0	6,4	6,9	7,3	7,9	8,3	8,8	9,3	9,7	10,2	10,6	11,1	11,6	12,1	12,6	13,1
	$\rho^1$	5,3	11	19	32	48	68	95	125	167	216	267	330	400	485	580	680	800	920	1060	1240	1450	1670	1990	2400	2900
22	$\xi$	0,21	0,08	0,01	0,06	0,11	0,14	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,5	5,0	5,9	6,4	6,9	7,3	7,8	8,3	8,7	9,2	9,6	10,0	10,4	10,8	11,3	11,7	12,2	12,6	13,1
	$\rho^1$	5,6	11	19	31	48	68	91	125	163	210	260	320	390	470	560	660	779	890	1020	1180	1380	1600	1850	2150	2500
24	$\xi$	0,17	0,05	0,04	0,10	0,15	0,18	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,1	4,5	5,0	5,4	5,9	6,3	6,8	7,3	7,7	8,2	8,6	9,1	9,6	10,1	10,6	11,1	11,6	12,1	12,6	13,1
	$\rho^1$	5,6	11	19	31	47	67	92	125	160	205	255	315	380	460	545	640	750	870	1000	1150	1330	1550	1800	2100	2450
26	$\xi$	0,14	0,01	0,08	0,14	0,18	0,21	0,24	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	4,9	5,4	5,8	6,3	6,7	7,2	7,6	8,1	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
	$\rho^1$	5,7	11	19	31	46	64	90	120	156	198	247	305	370	445	525	620	730	850	980	1130	1310	1530	1800	2100	2450
28	$\xi$	0,10	0,03	0,11	0,17	0,22	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,4	4,9	5,3	5,8	6,2	6,6	7,1	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
	$\rho^1$	5,7	11	19	30	45	64	87	116	151	192	240	295	355	425	512	610	720	840	970	1120	1300	1530	1800	2100	2450
30	$\xi$	0,07	0,06	0,15	0,20	0,25	0,29	0,32	0,34	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
	$\rho$	1,8	2,2	2,7	3,1	3,5	4,0	4,4	4,8	5,3	5,7	6,1	6,6	7,0	7,4	7,9	8,3	8,8	9,2	9,7	10,2	10,7	11,2	11,7	12,2	12,7
	$\rho^1$	5,8	11	19	30	44	64	85	112	145	184	230	273	343	410	495	590	700	810	940	1080	1240	1450	1670	1990	2400

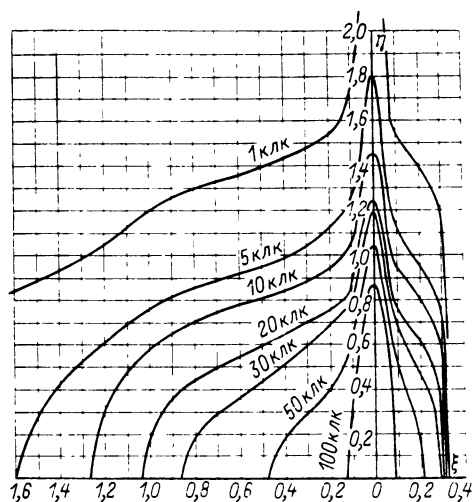


Рис. 56.17. Кривые равных значений относительной освещенности светового прибора ОУКсН-20000

отражателя ПР на расстояние 1 м и перпендикулярной оптической оси ПР.

Определяя значение относительной освещенности точки *m*, являющейся следом прямой *OM* на условной плоскости и имеющей координаты  $\xi$  и  $\eta$ , по кривым на рис. 56.16, 56.17 можно рассчитать освещенность в точке *M*.

Этот расчет при известных  $H_p$  и  $\theta_{opt}$  рекомендуется делать в следующей последовательности:

1. Расчет относительного расстояния  $\rho$  от фокуса прожектора *O* до плоскости, проходящей через расчетную точку *M* и перпендикулярной оси прожектора (см. рис. 56.15):

$$\rho = \frac{OS}{H_p} = \sin \theta + \frac{x}{H_p} \cos \theta.$$

2. Определение координат  $\xi$  и  $\eta$ :

$$\xi = \left( \frac{x}{H_p} \sin \theta - \cos \theta \right) / \rho; \quad \eta = y / \rho H_p,$$

где *x* и *y* – координаты точки *M*.

3. Определение по одному из графиков (рис. 56.16 и 56.17) значений относительной освещенности *e* для данных  $\eta$  и  $\xi$ .

4. Расчет фактического значения освещенности в точке *M*:

$$E_{Mг} = e / \rho^3 H_p^2 K_3; \quad E_{Mв} = e x / \rho^3 H_p^2 K_3,$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса;  $E_{Mг}$  – горизонтальная освещенность;  $E_{Mв}$  – вертикальная освещенность.

Для облегчения расчета значения  $\xi$ ,  $\rho$  и  $\rho^3$  для принятых  $\theta$  и  $x/H_p$  даны в табл. 56.49.

Изложенный выше метод позволяет решить и обратную задачу, т.е. по заданной освещенности  $E_{Mг}$  или  $E_{Mв}$  и известным  $\theta$  и  $x/H_p$  определить координаты *x*, *y* точки *M*.

Такие расчеты необходимы для построения кривых равных значений освещенности, создаваемой прожектором. Для определения координат *x*, *y* следует произвести такие операции:

1) задаться значением *x* и определить отношение  $x/H_p$ ;

2) по табл. 56.49 найти  $\xi$ ,  $\rho$  и  $\rho^3$  для полученного отношения  $x/H_p$  и рассчитанного  $\theta_{opt}$ ;

3) задаться некоторым значением  $E_{Mг}$  или  $E_{Mв}$  и определить значение относительной освещенности *e*;

4) по рассчитанным значениям *e* и  $\xi$ , по кривым относительной освещенности найти координату  $\eta$  (см. рис. 56.15);

5) по известным  $\eta$ ,  $\rho$  и  $H_p$  найти *y*.

Общая последовательность расчета прожекторного освещения рекомендуется следующая:

1) выбирается вариант размещения ПР (групповое или индивидуальное), а также тип применяемых ПР (см. табл. 56.18, 56.19);

2) определяется высота установки прожекторов (см. табл. 56.14)  $H_p$ ;

3) рассчитывается значение оптимального угла наклона  $\theta_{opt}$  прожекторов;

4) рассчитываются кривые равных значений освещенности от прожекторов и методом наложения этих кривых на план освещаемой территории определяется суммарная освещенность в расчетных точках;

5) проверяется значение удельной мощности по табл. 56.48.

Пути совершенствования ОУ наружного освещения определяются следующими факторами: улучшением качественных показателей – увеличением яркости освещаемых объектов и снижением ослепления рабочих, пешеходов и водителей; снижением энергоемкости ОУ с помощью применения СВ и ПР, имеющих большие коэффициенты использования и рациональные КСС.

### Список литературы

56.1. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. I. – 2-е изд. М.: Энергия, 1979, 368 с.  
 56.2. Справочная книга по светотехнике М Энергоатомиздат, 1983 469 с  
 56.3. Литвинов В. С., Рохлин Г. Н. Тепловые источники оптического излучения М Энергия, 1976. 248 с

56.4. **Естественное и искусственное освещение** Нормы проектирования СНиП 11-4-79//Светотехника. 1979. № 10. С 1—29

56.5. **Правила устройств электроустановок (ПУЭ-85)**. Разд. VI «Электрическое освещение» — 6-е изд. М. Энергоатомиздат. 1985. 640 с

56.6. **Епанешников М. М.** Электрическое освещение М Энергия, 1973. 350 с.

56.7. **Мешков В. В., Епанешников М. М.** Осветительные установки М Энергия, 1972. 360 с

56.8. **Номенклатура** светильников//Светотехника 1987. № 3 С 28—30

56.9. **ГОСТ 16703-79.** Приборы и комплексы световые Термины и определения

56.10. **ГОСТ 34169-80.** Лампы дуговые натриевые высокого давления Общие технические условия.

56.11. **ГОСТ 16809-78.** Аппараты пускорегулирующие для газоразрядных ламп. Общие технические условия

56.12. **ГОСТ 15597-82.** Светильники для производственных помещений

56.13. **ГОСТ 8045-82.** Светильники для освещения дорог и улиц.

56.14. **ГОСТ 6047-75.** Проекторы общего назначения Общие технические сведения

56.15. **ГОСТ 13.1.011-78.** Смеси взрывоопасные. Классификация.

56.16. **ГОСТ 12.2.020-76.** Электрооборудование взрывозащищенное Термины и определения Классификация. Маркировка.

56.17. **ГОСТ 8607-82.** Светильники для освещения жилых и общественных помещений

56.18. **ГОСТ 17677-82.** Светильники Общие технические условия

## Раздел 57

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

## СОДЕРЖАНИЕ

57.1. Взрывоопасные зоны. Сведения о взрывоопасных газо-, паро- и пылевоздушных смесях . . . . .	340
57.2. Классификация взрывоопасных зон . . . . .	347
57.3. Распределительные устройства и подстанции производств с взрывоопасными зонами . . . . .	349
57.4. Взрывозащищенное электрооборудование . . . . .	352

57.5. Взрывозащищенные электродвигатели	355
57.6. Взрывозащищенные электрические аппараты . . . . .	357
57.7. Электрические светильники для взрывоопасных зон . . . . .	359
57.8. Электрические сети и сети заземления электроустановок взрывоопасных зон	361
Список литературы . . . . .	364

### 57.1. ВЗРЫВООПАСНЫЕ ЗОНЫ. СВЕДЕНИЯ О ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗО-, ПАРО- ИЛИ ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

В газовой, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, электротехнической, радиотехнической, электронной промышленности, черной и цветной металлургии и в ряде других отраслей народного хозяйства имеется много установок, предназначенных для производственных операций, связанных с выделением, использованием, переработкой или хранением (накоплением) различных горючих веществ: горючих газов, паров легковоспламеняющихся жидкостей, горючей пыли или волокон, которые,

попадая в окружающую установку среду, могут образовывать газо-, паро- или пылевоздушные взрывоопасные (горючие), т. е. способные взрываться, смеси<sup>1</sup>.

Пространство — объем окружающей установку среды внутри помещений (в некоторых рассмотренных ниже, в § 57.2, случаях и рядом с помещениями) или вокруг наружных установок, в котором имеются или могут образовываться взрывоопасные смеси, называется согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ)<sup>2</sup> *взрывоопасной зоной*.

<sup>1</sup> Далее в тексте они, как правило, называются сокращенно «взрывоопасные смеси».

<sup>2</sup> Правила устройства электроустановок [57.4] содержат гл. 7.3 «Электроустановки во взрывоопасных зонах».

Электрооборудование и электрические сети во взрывоопасных зонах создают опасность поджигания взрывоопасных смесей при электрическом искрении — при искровых, дуговых или тлеющих разрядах, а также при недопустимом перегреве элементов (частей) оборудования и сетей. Поэтому надо ограничивать размещение во взрывоопасных зонах электрооборудования и электрических сетей. Когда такого рода размещения избежать по обоснованным причинам (технологическим, конструктивным, экономическим или др.) нельзя, то во взрывоопасных зонах следует использовать специально для них предназначенное электрооборудование, снабженное средствами взрывозащиты, или принимать меры, рекомендованные в § 57.4. Электрические сети во взрывоопасных зонах должны выполняться согласно специальным требованиям, приведенным в § 57.8.

При обеспечении взрывобезопасных условий работы электрооборудования и электрических сетей необходимо различать следующие физико-химические процессы.

*горение* — быстротекущий процесс преобразования вещества — соединения горючего вещества с окислителем, сопровождающийся выделением тепла, а при образовании горючих газов — также и пламенем;

*взрыв* — весьма быстрое преобразование вещества (взрывное горение) с выделением в короткий промежуток времени значительного количества тепла, сопровождающееся резким повышением температуры и образованием сжатых газов, способных производить работу;

*вспышка* — быстрое сгорание выделенных горючим веществом горючих паров или газов, не сопровождающееся образованием сжатых газов;

*тление* — медленное горение без свечения, обычно опознаваемое по появлению дыма.

При перечисленных процессах для горючих веществ характерны температуры вспышки, воспламенения, самовоспламенения, тления. Эти характерные температуры горючего вещества являются самыми низкими, при которых могут начинаться следующие процессы:

Температура	Процесс
Вспышки . . . . .	Над поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для последующего горения

Воспламенения . . . . .	Выделяются горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от источника зажигания возникает устойчивое горение
Самовоспламенения . . . . .	Происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся возникновением устойчивого пламенного горения
Тления . . . . .	Происходит увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся возникновением тления

*Взрывоопасными* согласно ПУЭ являются смеси с воздухом любых горючих газов или паров легковоспламеняющихся жидкостей и смеси с воздухом различных видов горючих пылей и волокон во взвешенном состоянии. Условие отнесения пылевоздушных смесей к взрывоопасным рассмотрено ниже. Взрывоопасными являются также смеси горючих газов и паров легковоспламеняющихся жидкостей с кислородом или другим окислителем, например хлором.

*Легковоспламеняющейся жидкостью* (ЛВЖ) считается горючая жидкость с температурой вспышки, не превышающей 61 °С\*, с давлением паров при температуре 20 °С менее 0,1 МПа. Горючие жидкости с температурой вспышки выше 61 °С относятся к пожароопасным, но нагретые в условиях производства до температуры вспышки или выше, они являются взрывоопасными.

По плотности по отношению к воздуху при температуре среды 20 °С и давлении 0,1 МПа различают газы: *легкие* — с плотностью не более 0,8 и *тяжелые* — с плотностью более 0,8.

Газы, обращенные в жидкость при температуре среды ниже 20 °С или давлении выше 0,1 МПа или при совместном действии обоих этих факторов, называются *сжиженными*.

Воспламенение газо-, паро- и пылевоздушных горючих смесей и распространение пламени зависит от ряда физико-химических факторов.

Одним из таких факторов является содержание-концентрация горючего вещества в газо-, паро- или пылевоздушной смеси, при которой возможны воспламенение, распространение пламени и взрыв смеси.

\* Ранее — до 1 апреля 1981 г. (в ПУЭ 1–4-го изд.) — к ЛВЖ относились горючие жидкости с температурой вспышки, не превышающей 45 °С.

Таблица 57.1. Концентрационные пределы воспламенения газо- и паровоздушных смесей

Горючее вещество газо- или паровоздушной смеси	Концентрационные пределы воспламе- нения <sup>1</sup> по объему, %	
	C <sub>н</sub>	C <sub>в</sub>
Амиллацетат	1,1	—
Амилен	1,6	—
Амиловый спирт	1,2	—
Амилхлорид	1,4	—
Аммиак	15,5	27,0
Ацетилен	2,5	81,0
Ацетиленхлорид	9,7	12,8
Ацетон	2,5	12,8
Бензины:		
А-74	0,8	—
Б-95/130, Б-100/130	1,0	—
«Галоша» <sup>2</sup>	1,1	—
Бензол	1,4	6,8
Бутан	1,9	8,4
Бутилацетат	2,0	—
Бугилен	1,7	9,0
Бутиловый спирт	1,7	—
Винилхлорид	4,0	21,7
Водород	4,0	75,0
Гексан	1,2	6,9
Гептан	1,0	6,0
Диоксан	2,0	22,0
Диэтиловый спирт	1,8	36,5
Изоамиловый спирт	1,2	—
Изобутан	1,8	8,4
Изобутиловый спирт	1,7	—
Изопентан	1,3	—
Изопропиловый спирт	2,6	—
Метан промышленный	5,0	15,0
Метилацетат	3,1	15,6
Метилбромид	13,5	14,5
Метилбутилкетон	1,2	8,0
Метиловый спирт	6,7	36,5
Мети.пропилкетон	1,5	8,2
Метилформинат	5,0	22,7
Метилхлорид	8,2	18,7
Метилциклогексан	1,1	—
Метилэтилкетон	1,8	9,5
Метилэтилэфир	2,0	10,0
Оксид:		
пропилена	2,0	22,0
углерода	12,5	74,0
этилена	3,0	80,0
Октан	0,9	—
Пентан	1,4	7,8
Пропан	2,4	9,5
Пропилен	2,4	11,0
Пропиловый спирт	2,1	—
Разбавитель РЭ-1	2,0	—
Растворители:		
Р-4	1,7	—
РС-1	1,4	—
№ 646, 647, 648 и 649	1,6—1,9	—
Сероводород	4,3	45,5
Сероокись углерода	11,9	28,5
Сероуглерод	1,2	50,0
Толуол	1,3	6,7

Продолжение табл. 57.1

Горючее вещество газо- или паровоздушной смеси	Концентрационные пределы воспламе- нения <sup>1</sup> по объе- му, %	
	C <sub>н</sub>	C <sub>в</sub>
Уксусный альдегид	3,9	57,0
Циклогексан	1,3	7,7
Циклопропан	2,4	10,4
Этан	3,2	12,4
Этилацетат	2,2	11,4
Этилбромид	6,7	11,3
Этилен	2,7	28,6
Этиленхлорид	6,2	15,2
Этиловый спирт	3,3	19,0
Этилформиат	2,7	16,4
Этилхлорид	4,0	14,8

<sup>1</sup> Определены при температуре 20 °С и давлении 0,1 МПа. Прочерк в данной и других таблицах означает отсутствие сведений.

<sup>2</sup> Бензин — растворитель для резиновой промышленности по ГОСТ 443-76.

Таблица 57.2. Температурные пределы воспламенения и температуры самовоспламенения паровоздушных смесей

Горючее вещество (ЛВЖ) паровоз- душных смесей	Температур- ные пределы воспламене- ния, °С		Темпера- тура са- мовос- пламене- ния, °С
	ниж- ний	верх- ний	
Ацетон	-20	6	465
Бензины:			
Б-70	-34	-4	—
Б-95/130	-37	—	380
Б-100/130	-34	—	474
«Галоша»	-17	10	350
Бензол	-14	12	534
Диэтиловый эфир	-45	13	—
Изобутиловый спирт	28	—	390
Изопропиловый спирт	14	—	400
Метилацетат	-15	10	470
Метиловый спирт	7	39	464
Пропиловый спирт	23	—	371
Разбавитель РЭ-1	14	—	455
Растворители:			
Р-4	-7	—	550
РС-1	9	—	490
№ 646	-7	—	403
№ 647	5	—	424
№ 648	13	—	388
№ 649	25	—	383
Скипидар	34	—	300
Толуол	0	30	536
Этилацетат	1	31	400
Этиловый спирт	11	40	365

Таблица 57.3. Нижний концентрационный предел воспламенения и температура самовоспламенения взрывоопасных пылевоздушных смесей, характерные температуры тления, плавления, воспламенения и самовоспламенения осевшей пыли

Горючее вещество пылевоздушной смеси	Смесь с воздухом взвешенной пыли		Характерные температуры, °С, осевшей пыли			
	С <sub>н</sub> , г/м <sup>3</sup>	Температура само- воспламенения, °С	Тле- ние	Плавле- ние	Воспла- менение	Самовос- пламене- ние
Альтакс	38	645	*	186	—	—
Алюминий	40	550	320	—	—	470
Аминопласт	52	725	264	—	—	559
Ангидрид						
маленовый	50	500	*	53	—	—
метилтетрагидрофталевый	16	488	*	64	155	482 <sup>1</sup>
полисебаценовый (отвердитель VII-607)	20	538	*	80	266	381 <sup>1</sup>
фталеый	13	605	*	150	—	—
Антрацен (чистый)	5	505	*	217	—	—
Атразин						
технический (ТУ БУ-127-69)	30	779	*	170	220	490 <sup>1</sup>
товарный	39	745	*	170	228	487 <sup>1</sup>
Белок пищевой:						
подсолнечный	26	—	193	—	212	458
соевый	39	—	**	—	324	460
Бис (трифторацетат) дибутилолова	21	554	*	50	158	577 <sup>1</sup>
Витамин						
В <sub>15</sub>	28	509	—	—	—	—
РР из плодов шиповника	38	610	—	—	—	—
Гидрохинон	7,6	800	—	—	—	—
Гороховая мука	25	560	—	—	—	—
Декстрин	38	400	—	—	—	—
2,5-Диметилгексин-3-диол-2,5	9,7	—	*	90	121	386 <sup>1</sup>
Диоксид дициклопентадиена (ТУ 6-05-241-49-73)	19	—	*	—	129	394
Древесная мука	11	430	—	—	—	255
Казеин	45	520	—	—	—	—
Какао	45	420	245	—	—	—
Камфора	10	850	—	—	—	—
Канифоль	13	325	*	80	—	—
Кероген	25	597	—	—	—	—
Кислота						
адипиновая	35	550	—	—	320	410
4-амилбензофенон-2-карбоновая	23	562	*	130	261	422 <sup>1</sup>
аминопеларгоновая	10	810	*	190	—	—
аминоэнантановая	12	740	*	195	390	450 <sup>1</sup>
Краска порошковая						
коричневая ЭП-49-Д/2 (ВТУ 605-1420-71)	34	782	*	—	318	508
красно-коричневая П-ЭП-967 (п. 884 ВТУ 3606-70)	37	848	*	—	308	538
серая П-ЭП-77 (п. 518 ВТУ 3609-70, дополнение № 1)	17	560	*	—	308	538
слоновая кость ПВЛ-212 (МПТУ 6-10-859-69)	25	580	*	—	241	325
Крахмал						
картофельный	40	430	**	—	—	—
кукурузный	32	410	**	—	—	—
Лигнин						
лиственных пород	30	775	—	—	—	300
хвойных пород	35	775	—	—	—	300
хлопковый	63	775	—	—	—	—
Малеат дибутиловый	23	649	—	—	220	458 <sup>1</sup>
Микровит-А кормовой (ТУ 64-5-116-74)	16	—	**	—	275	463
Нафталин	2,5	575	*	80	—	—
Оксид						
дибутилолова	22	752	154	—	154	523
диоктилолова	22	454	*	155	155	448 <sup>1</sup>
Полиакрилонитрил	21	505	**	—	217	—
Полизобутилалюмоксан	34	—	*	—	76	514
Полипропилен	13	890	—	—	—	—
Полистирол	25	475	*	220	—	—



Продолжение табл. 57.3

Горючее вещество пылевоздушной смеси	Смесь с воздухом взвешенной пыли		Характерные температуры, °С, осевшей пыли			
	С <sub>н</sub> , г/м <sup>3</sup>	Температу- ра само- воспламе- нения, °С	Тле- ние	Плавле- ние	Воспла- менение	Самовос- пламене- ние
Пробковая мука	15	460	325	—	—	—
Пропазин:						
технический	28	775	*	200	226	435 <sup>1</sup>
товарный (ТУ6-01-171-67)	37	763	*	200	215	508 <sup>1</sup>
Пыль:						
каменного угля Ленинск-Кузнецкого мес- торождения марки Д	31	720	149	—	159	480
мучная (пшеничная, ржаная и других зер- новых культур)	20—63	410	—	—	—	205
резиновая, промышленная	10	1000	—	—	—	200
сланцевая	58	830	—	—	—	225
целлюлозная, промышленная	28	770	—	—	—	350
эпоксидная (отходы обработки компаун- дов)	25	643	198	—	200	434
САКАП — полимер акриловой кислоты (ТУ 6-02-2-406-75)	48	—	*	—	292	448
Сахар свекловичный	8,9	360	*	160	—	350 <sup>1</sup>
Сера	2,3	235	*	119	—	—
Симазин:						
технический (ТУ БУ-104-68)	38	790	*	220	224	472 <sup>1</sup>
товарный (МРТУ-6-01-419-69)	43	740	*	225	265	476 <sup>1</sup>
Смола:						
113 (тиоэстанатдиоктиловая)	12	—	*	68	261	389 <sup>1</sup>
фенольная	25	460	*	80	—	—
эпоксидная Э-49 (ТУ 6-05-1420-71)	17	477	*	—	330	486
Соль:						
АГ	13	636	—	—	—	—
аммониевая 2,4-диоксибензосульфокисло- ты	64	—	*	—	286	470
Сополимер акрилонитрида с метилметакри- латом	19	532	**	—	214	—
Спирт поливиниловый	43	450	*	180	205	344 <sup>1</sup>
Стабилизатор 212-05	11	—	*	57	207	362
Сульфодимизин	25	900	—	—	—	—
Тиоксизтилендибутилолова	13	214	*	90	200	228 <sup>1</sup>
Титан	45	330	—	—	—	—
Трифенилтриметилциклотрисилоксан	23	515	*	60	233	552 <sup>1</sup>
Уротропин	15	683	—	—	—	—
Фенопласт	37	491	227	—	—	485
Ферроцен, бис (циклопентадиенил) железа	9,2	487	*	—	120	250
Циклопентадиенилтрикарбонилмарганец	4,6	275	—	—	96	265
Цирконий	40	253	—	—	—	190
Эбонит	7,6	360	***	—	—	—
Эпоксидные композиции:						
УП-2111 (ТУ 6-05-241-11-71)	23	654	*	—	310	465
УП-2155 (ТУ 6-05-241-26—72)	29	596	*	—	311	515
УП-2196	22	—	*	—	223	358
ЭП-49СП (ТУ 6-05-241-98—75)	33	—	*	—	325	450
2-этилантрахинон	16	—	*	107	207	574 <sup>1</sup>
Этилселексвиоксан (П1Э)	64	707	223	—	223	420
Этилцеллюлоза	38	657	*	240 <sup>2</sup>	—	—
Чай	33	925	220	—	—	—

\* Не тлеет

\*\* Обугливается, не тлеет.

\*\*\* Спекается.

<sup>1</sup> Температура самовоспламенения расплавленного вещества.<sup>2</sup> Температура разложения.

Различают верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения. *Нижним концентрационным пределом* называется такое наименьшее содержание определенного горючего газа, паров ЛВЖ (в процентах по

объему), горючей пыли или волокон (г/м<sup>3</sup>) в газо-, паро- или пылевоздушной смеси, ниже которого при любом меньшем содержании этого горючего вещества его смеси с воздухом не способны воспламениться, но выше кото-

Таблица 57.4. Категории взрывоопасных газов и паровоздушных смесей

Категория и горючее вещество взрывоопасных смесей	Ширина БЭМЗ, мм	
	Свыше	Не более
I, рудничный метан	1,0	—
II, промышленные горючие газы и пары ЛВЖ:		
ПА	0,9	—
ПВ	0,5	0,9
ПС	—	0,5

Примечание. Приведенные значения БЭМЗ используются при испытании взрывоопасных смесей для их классификации и не могут использоваться для контроля зазора оболочек при эксплуатации оборудования.

рого горят со взрывом. *Верхний концентрационный предел* воспламенения соответствует наибольшему содержанию горючего вещества, выше которого его смеси с воздухом не воспламеняются.

Концентрационные пределы воспламенения различны для взрывоопасных газо-, паровых или пылевоздушных смесей, содержащих разные горючие вещества, причем эти пределы могут изменяться в зависимости от температуры взрывоопасной смеси, ее давления, примесей инертных газов, а при воспламенении в реакционном сосуде — от его размеров и др.

Смеси с воздухом горючих пылей во взвешенном состоянии или волокон относятся к взрывоопасным, если их нижний концентрационный предел воспламенения не превышает  $65 \text{ г/м}^3$ .

Нижний  $C_n$  и верхний  $C_v$  концентрационные пределы воспламенения ряда газов и паровоздушных смесей приведены в табл. 57.1.

Воспламенение от источника зажигания смеси с воздухом паров ЛВЖ, насыщающих пространство над ней, возможно при определенных температурах ЛВЖ, т.е. в каких-то температурных пределах.

*Нижний температурный предел* воспламенения смеси с воздухом паров ЛВЖ является температурой вспышки. Воспламенение при такой температуре паровоздушной смеси не сопровождается ее устойчивым горением и воспламенением самой ЛВЖ. При более низкой температуре воспламенения вообще не происходит.

*Верхним температурным пределом* воспламенения смеси с воздухом паров ЛВЖ считается наивысшая температура ЛВЖ, при которой образуется смесь насыщенного пара, способная воспламениться. Выше этой темпе-

ратуры воспламенение такой паровоздушной смеси в закрытом сосуде не происходит.

Температурные пределы воспламенения смесей с воздухом паров ЛВЖ различны для различных ЛВЖ, они зависят также от мощности источника зажигания, давления паровоздушной смеси, примесей инертных газов.

Температурные пределы воспламенения смесей с воздухом паров некоторых ЛВЖ и их температуры самовоспламенения приведены в табл. 57.2.

Нижний концентрационный предел воспламенения  $C_n$  некоторых взрывоопасных смесей с воздухом взвешенной пыли, температуры их самовоспламенения, а также температуры тления, плавления, воспламенения и самовоспламенения осевшей пыли приведены в табл. 57.3.

Классификация взрывоопасных зон помещений и наружных установок приведена в § 57.2.

Взрывоопасные газо- и паровоздушные смеси подразделяются<sup>1</sup> на категории и группы по возрастающей степени их опасности.

Категория взрывоопасной смеси (табл. 57.4) определяется по ширине так называемого «безопасного экспериментального зазора (БЭМЗ)» между фланцами стандартной оболочки, через который при испытаниях<sup>2</sup> не происходит передача в окружающую среду инициированного внутри оболочки взрыва при любой концентрации горючего газа и паров ЛВЖ в воздухе.

Группа взрывоопасной смеси  $T_1 - T_6$  определяется в зависимости от температуры ее самовоспламенения:

Группа взрывоопасных смесей	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
Температура самовоспламенения, °С:						
свыше . . . . .	450	300	200	135	100	85
не более . . . . .	—	450	300	200	135	100

В табл. 57.5 приведено распределение некоторых газо- и паровоздушных взрывоопасных смесей по категориям и группам.

<sup>1</sup> Согласно ГОСТ 12.1.011-78. Смеси взрывоопасные. Классификация.

<sup>2</sup> Испытания для определения БЭМЗ проводятся на приборе и по методике, рекомендуемым в Приложении к ГОСТ 12.1.011-78.

Таблица 57.5. Распределение взрывоопасных газо- и паровоздушных смесей по категориям и группам

Категории	Горючие вещества, образующие с воздухом взрывоопасные смеси, отнесенные к группам						
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	
I IIA	<p>Метан на подземных горных рудоботах<sup>1</sup></p> <p>Алил хлористый, аммиак, ацетон, ацетонитрил, бензол, бензотрифторид, винил хлористый, винил хлористый, диаэтилопропиловый эфир, 1,2-дихлорпропан, дихлорэтан, диэтиламин, доменный газ, изобутан, изобутилен, изопропилбензол, кислота уксусная, ксилол, метан промышленный<sup>2</sup>, метилацетат, метилизоционаг, α-метилстирол, метил хлористый, метилхлорформат, метилхлоропропилакетон, метилэтилкетон, окись углерода, циридин, пропан, разбавитель РЭ-1, растворители Р-4 и РС-1, сольвент нефтяной, спирт диэцетонный, стирол, толуол, трифторпропен, трифторхлорпропан, трифторхлорэтилен, трифторэтан, триэтиламин, хлорбензол, циклопентадиен, этан, этил хлористый</p>	<p>Алкилбензол, амилацетат, ангидрид уксусный, ацетилацетон, ацетил хлористый, ацетонпропилхлорид, бензин Б95/130, бутан, бутилацетат, бутилпропионат, винилацетат, винилден хлористый, диатол, диэтилопропиламин, диметиламин, диметилформамид, изоктан, изопентан, изопрен, изопропиламин, кислота пропионовая, метиламин, метилэтилобутилкетон, метилмеркаптан, метилгетакрилат, 2-метилтиофен, метилтрихлорсилан, метилфурол, метилхлорметилдихлорсилан, моноизобутиламины, окись мезитила, пентадиен-1,3, пропиламин, пропилен, разбавители: РДВ, РКБ-1, РКБ-2; растворители: № 646, 647, 648, 649, АЭ, БЭФ, РС-2, спирты: бутиловый нормальный, бутиловый третичный, изоаминовый, изобутиловый, изопропиловый, метиловый, этиловый, трифторпропиламетилдихлорсилан, трифторэтилен, трихлорэтилен, хлористый изобутилен, циклогексанол, циклогексанон, этиламин, этилацетат, этилбензол, этилбутират, этилдиамин, этилхлоридрин, этилизобутират</p> <p>Дивинил, 4,4-диметилдиоксан, диметилдихлорсилан, диоксан, диэтилдихлорсилан, камфорное масло, кислота акриловая, метилакрилат, метилвинилдихлорсилан, нитрил акриловый, нитроциклогексан, окись пропилена, окись-2-метилбутилена-2, окись этилена, растворители АМР-3 и АКР, триметилхлорсилан, формальдегид, фурол, фурфурил, эпихлоридрин, этилен, этилтрихлорсилан</p> <p>Ацетилен, метилдихлорсилан</p>	<p>Алкилбензол, аммиак, ангидрид уксусный, ацетилацетон, ацетил хлористый, ацетонпропилхлорид, бензин Б95/130, бутан, бутилацетат, бутилпропионат, винилацетат, винилден хлористый, диатол, диэтилопропиламин, диметиламин, диметилформамид, изоктан, изопентан, изопрен, изопропиламин, кислота пропионовая, метиламин, метилэтилобутилкетон, метилмеркаптан, метилгетакрилат, 2-метилтиофен, метилтрихлорсилан, метилфурол, метилхлорметилдихлорсилан, моноизобутиламины, окись мезитила, пентадиен-1,3, пропиламин, пропилен, разбавители: РДВ, РКБ-1, РКБ-2; растворители: № 646, 647, 648, 649, АЭ, БЭФ, РС-2, спирты: бутиловый нормальный, бутиловый третичный, изоаминовый, изобутиловый, изопропиловый, метиловый, этиловый, трифторпропиламетилдихлорсилан, трифторэтилен, трихлорэтилен, хлористый изобутилен, циклогексанол, циклогексанон, этиламин, этилацетат, этилбензол, этилбутират, этилдиамин, этилхлоридрин, этилизобутират</p> <p>Дивинил, 4,4-диметилдиоксан, диметилдихлорсилан, диоксан, диэтилдихлорсилан, камфорное масло, кислота акриловая, метилакрилат, метилвинилдихлорсилан, нитрил акриловый, нитроциклогексан, окись пропилена, окись-2-метилбутилена-2, окись этилена, растворители АМР-3 и АКР, триметилхлорсилан, формальдегид, фурол, фурфурил, эпихлоридрин, этилен, этилтрихлорсилан</p> <p>Ацетилен, метилдихлорсилан</p>	<p>Бензины А-72, А-76, Б-70, «Галоша», экстракционный по МРТУ 12Н-20-63; бутилметакрилат, гексан, гептан, диэтилобутиламин, диэтилопропиламин, изоэвализириновый альдегид, изооктилден, камфен, ксеросин, морфолин, нефть, пентан, петролейный эфир, полиэфир ТПМ-3, растворитель № 651, скипидар, спири амиловый, Топливо Т-1 и ТС-1; триметил-амин, уайт-спирит, циклогексан, циклоэксилламин, этилхлортиофосфат, этилмеркаптан</p>	<p>Альдегиды, изомаляновый, масляный, пропионодекан, тетраметилдиаминометан, 1-1,3-триэтоксидибутан</p>	<p>—</p>	<p>—</p>
IIВ	<p>Коксовый газ, синильная кислота</p>		<p>Акролсин, винилтрихлорсилан, сероводород, тетрагидрофуран, тетраэтоксилан, топливо диэтильное (зиммес), триэтоксилан, формальдеколь, этилдихлорсилан, этилцеллозоль</p>	<p>Дибутилловый эфир, диэтиловый эфир, диэтиловый эфир этилцигнглоля</p>	<p>—</p>	<p>—</p>	
IIС	<p>Водород, водорода 75% + аюта 25%, водяной газ, светильный газ</p>		<p>Трихлорсилан</p>	<p>—</p>	<p>Сероуглерод</p>	<p>—</p>	

1 В нем кроме метана содержатся газообразные углеводы — гомологи метана C<sub>2</sub> — C<sub>4</sub> — не более 0,1 объемной доли, а водорода в пробах газов из шпуров после бурения — не более 0,002 объемной доли общию объема горючих газов.

2 В нем содержание водорода — до 0,15 (по объему).

## 57.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН

Классификация взрывоопасных зон помещений и наружных установок<sup>1</sup> приведена в табл. 57.6. Класс взрывоопасной зоны, в соответствии с которым выбирается электрооборудование, определяется совместно электриками и технологами проектных или эксплуатирующих организаций.

Условия, определяющие границы взрывоопасных зон помещений, приведены в табл. 57.7, а вне помещений (наружных) — в табл. 57.8. Под помещением подразумевается обычно часть здания или сооружения (в некоторых случаях всё), огражденное со всех сторон стенами, покрытием или перекрытием и полом, имеющее одну или несколько дверей или ворот. Помещение может иметь также окна или фонари (светоаэрационные или световые).

Пространство под навесом либо огражденное снаружи полностью или частично сетчатыми или решетчатыми конструкциями согласно ПУЭ помещением не считается, а расположенные в таком пространстве установки, так же как и расположенные вне помещений — открыто, считаются наружными.

Если в помещении или в наружной установке могут образовываться взрывоопасные смеси, но технологический процесс ведется с открытым огнем или с раскаленными частями, либо если технологические аппараты имеют поверхности, нагретые до температуры самовоспламенения горючих газов, паров ЛВЖ, горючих пылей или волокон, то зоны в пределах 5 м по горизонтали и вертикали от открытого огня или нагретого аппарата считаются невзрывоопасными. Зоны в таких случаях (за пределами 5 м) следует классифицировать в зависимости от конкретных условий с учетом технологических процессов, которые в них производятся.

Не относятся к взрывоопасным (в части электрооборудования) зоны помещений или наружных установок, в которых сжигаются в качестве топлива или утилизируются путем сжигания твердые, жидкие или газообразные горючие вещества.

Производственные помещения, в которых при операциях окраски используются материалы, способные образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, имеют (при соблюдении требований ГОСТ 12.4.005-75) взрывоопасные зоны в пределах, указанных в табл. 57.9.

<sup>1</sup> Приведенные ниже классификация и указания соответствуют требованиям ПУЭ 6-го изд. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Таблица 57.6. Классификация взрывоопасных зон

Класс зоны	Условия, определяющие класс зоны
<i>Взрывоопасные зоны по помещениям</i>	
V-I	Горючие газы или пары ЛВЖ выделяются в таком количестве и обладают такими свойствами, что могут образовывать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы, например при загрузке или разгрузке технологических аппаратов, хранении или переливании ЛВЖ, находящихся в открытых емкостях
V-Ia	Образование взрывоопасных смесей горючих газов (независимо от нижнего концентрационного предела воспламенения) или паров ЛВЖ с воздухом возможно только в результате неисправностей или аварий, а при нормальной эксплуатации места не имеет
V-Iб	То же, что и для зоны V-Ia, но при наличии следующих особенностей 1 Горючие газы в таких зонах обладают высоким нижним концентрационным пределом воспламенения (15% и более) и резким запахом при предельно допустимых концентрациях (по ГОСТ 12.1.005-76), например машинные залы аммиачных компрессорных и холодильных абсорбционных установок 2 Газообразный водород, имеющийся в герметичных аппаратах и трубопроводах, не может при вытяжной вентиляции с естественным побуждением (с дефлекторами) образовывать взрывоопасную смесь в объеме, превышающем 5% свободного объема помещения (границы зоны см. в табл. 57.7) 3 Горючие газы и пары ЛВЖ имеются (в лабораторных или других помещениях) в небольших количествах <sup>1</sup> , недостаточных для создания взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5% свободного объема помещения, причем при работе с ними не применяется открытое пламя
V-II	Горючие пыли или волокна, переходящие во взвешенное состояние, выделяются в таком количестве и обладают такими свойствами, что могут образовывать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы, например при загрузке и разгрузке технологических аппаратов
V-IIa	Образование взрывоопасных смесей горючих пылей или волокон с воздухом возможно только в результате неисправностей или аварий, а при нормальной эксплуатации места не имеет
<i>Взрывоопасные зоны вне помещений — наружные</i>	
V-Iг	Горючие газы и ЛВЖ содержатся (используются) в наружных технологических установках, подземных и надземных резервуарах, ЛВЖ транспортируются по эстакадам слива и налива К взрывоопасным зонам класса V-Iг относятся также пространства территории с открытыми нефтеловушками, прудами-отстойниками с плавающей нефтяной пленкой (границы зоны см. в табл. 57.8)

<sup>1</sup> Зона не относится к взрывоопасной при выполнении работ в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами

Таблица 577 Взрывоопасные зоны помещений

Объем взрывоопасной смеси, % свободного объема помещения <sup>1</sup>	Взрывоопасная зона помещения <sup>2</sup>
Свыше 5 Не более 5 при водородовоздушной смеси	Весь объем помещения Объем всей части помещения, расположенной выше отметки 0,75 его общей высоты <sup>3</sup> , считая от уровня пола, при наличии крана — нижняя граница зоны не выше отметки подкранового пути
Не более 5, но при других взрывоопасных смесях	Объем части помещения в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от технологического аппарата, из которого возможно выделение горючих газов или паров ЛВЖ

<sup>1</sup> Рассчитывается согласно «Указаниям по определению категорий производств по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности» (СН 463-74).

<sup>2</sup> Часть помещения за пределами взрывоопасной зоны считается невзрывоопасной, если нет других причин, создающих взрывоопасность.

<sup>3</sup> При наличии вентиляции, исключающей концентрацию водородовоздушной смеси под потолком (перекрытием, покрытием) помещения. Не распространяется на машинные залы электростанции с турбогенераторами, имеющими водородное охлаждение; такие помещения взрывоопасных зон не имеют, если они оборудованы вытяжной вентиляцией с естественным побуждением.

Таблица 578. Взрывоопасные зоны вне помещений — наружные

Устройства, строительные или другие конструктивные элементы, от которых определяются пределы взрывоопасной зоны класса В-Гг	Расстояния по горизонтали и вертикали, м
Проемы за наружными ограждающими конструкциями помещений со взрывоопасными зонами классов В-I, В-Ia, а также В-II	0,5
Закрытый технологический аппарат наружной установки, содержащий горючие газы или ЛВЖ, вытяжной вентилятор, установленный снаружи (вне здания и сооружения) и обслуживающий помещения с взрывоопасными зонами любого класса	3
Выбросные устройства предохранительных и дыхательных клапанов емкостей и технологических аппаратов, содержащих горючие газы или ЛВЖ, расположенные на ограждающих конструкциях зданий устройства для выброса воздуха из систем вытяжной вентиляции из помещений с взрывоопасными зонами любого класса	5
Резервуары с ЛВЖ или горючими газами (газгольдеры), при наличии обвалования — в пределах всей площади внутри обвалования	8
Эстакады открытого слива и налива ЛВЖ	20
Запорная арматура и фланцевые соединения трубопроводов горючих газов и ЛВЖ (при закрытых сливно-наливных устройствах) <sup>1</sup>	3

<sup>1</sup> Пространство за пределом таких зон к взрывоопасному не относится

Таблица 579 Зоны помещений, в которых при операциях окраски образуются взрывоопасные зоны

Окраска в общем технологическом потоке производства	Общая площадь		Размеры взрывоопасной зоны <sup>1</sup> по горизонтали и вертикали
	камеры или решеток	производственного помещения, м <sup>2</sup>	
В окрасочных и сушильных камерах	≤ 200 м <sup>2</sup>	≤ 2000	5 м от открытых просмов камер То же Согласно табл. 57.7 То же
	≤ 10% площади помещения > 200 м <sup>2</sup>	> 2000	
	> 10% площади помещения	≤ 2000 > 2000	
На открытых площадках-решетках	≤ 200 м <sup>2</sup>	≤ 2000	5 м от края решетки и от окрашиваемых изделий То же Согласно табл. 57.7 То же
	≤ 10% площади помещения > 200 м <sup>2</sup>	> 2000	
	> 10% площади помещения	≤ 2000 > 2000	

<sup>1</sup> Класс зоны определяется согласно табл. 57.6. Помещение за пределами такой зоны считается невзрывоопасным, если нет других обстоятельств, создающих в нем взрывоопасность

Таблица 57.10. Зоны вентиляционных установок, обслуживающих взрывоопасные зоны

Назначение и место установки вентиляторов	Класс зоны	
	обслуживаемой	вентиляционной установки <sup>1</sup>
Вытяжные вентиляторы в камере (помещении)	Любой	Тот же, что и обслуживаемой зоны
Вытяжные вентиляторы за наружными ограждающими конструкциями	B-I, B-Ia, B-II	B-Iг
Приточные вентиляторы в камере (помещении)	B-Iб, B-IIа	Тот же, что и обслуживаемой зоны
	Любой	Невзрывоопасная при самоакрывающихся обратных клапанах <sup>2</sup> Тот же, что и обслуживаемой зоны, при отсутствии обратных клапанов

<sup>1</sup> Для выбора уровня взрывозащиты или степени защиты оболочки электродвигателей

<sup>2</sup> Должны не допускать проникновения взрывоопасных смесей в камеру (помещение) приточных вентиляторов при прекращении подачи воздуха.

Таблица 57.11. Класс зоны помещения<sup>1</sup>, смежного с взрывоопасной зоной соседнего помещения

Класс зоны	Класс зоны помещения, смежного с взрывоопасной зоной другого помещения и отделенного от нее стеной (перегородкой) или находящимся в пределах взрывоопасной зоны проемом <sup>2</sup> с дверью без тамбур-шлюза <sup>3</sup>
B-I	B-Ia
B-Ia	B-Iб
B-Iб, B-IIа	Не взрыво- и не пожароопасная
B-II	B-IIа

<sup>1</sup> Кроме помещений, рассмотренных ниже, в § 57.3, и помещений, имеющих собственный источник взрыво- или пожароопасности.

<sup>2</sup> Размер зоны в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от проема двери.

<sup>3</sup> Если стена, отделяющая помещение от взрывоопасной зоны любого класса, не имеет в пределах этой зоны проемов или имеющиеся проемы оборудованы тамбур-шлюзом, то смежное помещение не имеет взрыво- и пожароопасных зон

Взрывоопасные зоны внутри окрасочных и сушильных камер действующие ПУЭ не рассматривают.

Классификация взрывоопасных зон вентиляционных установок приведена в табл. 57.10.

Класс взрывоопасности зон, содержащих

легкие несжиженные горючие газы или ЛВЖ, при наличии признаков класса B-I допускается снижать до класса B-Ia, если выполнены следующие мероприятия:

а) системы вентиляции составлены из нескольких вентиляционных агрегатов, обеспечивающих при остановке любого из них требуемую ее производительность, а также равномерность воздухообмена по всему объему помещений с взрывоопасными зонами, включая подвалы, каналы и их повороты;

б) обеспечено устройство автоматической сигнализации с достаточным числом рационально расположенных взаиморезервируемых датчиков, с безотказным ее действием при возникновении в любом пункте помещения предельно допускаемого содержания горючих газов или паров ЛВЖ не более 20 % нижнего концентрационного предела воспламенения, а для вредных горючих газов или паров ЛВЖ – также при приближении их концентрации к предельно допустимой по ГОСТ 12.1.005-76\*.

Класс зоны производственных помещений, отделенных стеной (перегородкой) с дверью от взрывоопасных зон смежных помещений, следует принимать по табл. 57.11.

### 57.3. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ПОДСТАНЦИИ ПРОИЗВОДСТВ С ВЗРЫВООПАСНЫМИ ЗОНАМИ

Распределительные устройства (РУ) напряжением до 1000 В и выше, трансформаторные и преобразовательные подстанции (ТП и ПП) запрещается размещать непосредственно во взрывоопасных зонах любого класса. Их располагают или в отдельных помещениях (в том числе примыкающих одной, двумя или тремя стенами к взрывоопасным зонам), или в специальных отдельно стоящих зданиях или выполняют открытыми.

Условия, определяющие исполнение РУ, ТП и ПП в зависимости от класса взрывоопасных зон помещений, к которым они примыкают, или установки, в которых они должны обеспечить питание электроприемников электрической энергией, приведены в табл. 57.12.

Непосредственно над и под РУ, ТП и ПП запрещается размещать помещения с взрывоопасными зонами любого класса.

Трансформаторы подстанций указанных производств могут устанавливаться как внутри, так и снаружи, у стены подстанции на территории предприятия.

Окна РУ, ТП и ПП, одна или более стен которых примыкают к взрывоопасной зоне,

Таблица 57.12 Исполнение РУ, ТП и ПП

Горючее вещество взрывоопасных смесей	Число стен помеще- ний РУ, ТП или ПП, примыкающих к взрывоопасным зонам	Классы взрывоопасных зон					
		В-I	В-Ia	В-Iб	В-Iг	В-II	В-IIa
Легкие горючие газы, ЛВЖ, го- рючие пыли или волокна	2-3	З	Д	Д	—	Д	Д
	1 0 <sup>1</sup>	Р Д	Р Д	Р Д	— Р <sup>2</sup>	Р Д	Р Д
Тяжелые или сжиженные газы	2-3	З	З	З	—	—	—
	1 0 <sup>1</sup>	Д П	Д П	Д П	— П <sup>2</sup>	— —	— —

Условные обозначения. З — запрещается; Д — допускается; Р — рекомендуется; П — должно выполняться как правило.

<sup>1</sup> Отдельно стоящее здание

<sup>2</sup> Допускается устройство открытых РУ, ТП и ПП на расстоянии от границы взрывоопасной зоны не менее указанного в табл. 57.14.

Таблица 57.13. Требования к электропомещениям РУ, ТП (включая КТП) и ПП, примыкающим одной или более стенами к взрывоопасным зонам

Системы вентиляции, строительные или другие конструкции	Класс взрывоопасной зоны, к которой примыкает электропомещение	
	Любой	Дополнительные требования при классе зон В-Ia и В-Iб с тяжелыми и сжиженными горючими газами и В-I, к которым допускается примыкание электропомещения одной стеной
Системы вентиляции приточная	Собственная, независимая, исключающая попадание через вентиляционные отверстия взрывоопасных смесей	С механическим побуждением, с пятикратным обменом воздуха в час, обеспечивающая небольшое избыточное давление в электропомещениях, исключающее доступ в них взрывоопасных смесей
вытяжная Стены, к которым примыкает взрывоопасная зона	То же Из несгораемых материалов, должны иметь предел огнестойкости не менее 0,75 ч, пылегазо- непроницаемые, без окон, дверей или других проемов	— —
Двери камер с масляными трансформаторами	Должны иметь предел огнестойкости не менее 0,6 ч, открываться только наружу	Должны иметь уплотнение притворов
Вводы кабелей и труб электропроводки через стены	Вводные отверстия должны плотно заделываться несгораемыми материалами <sup>1</sup>	Должны выполняться через наружные стены или стены соседних помещений без взрывоопасных зон

<sup>1</sup> Допускается ввод через внутренние стены непосредственно из взрывоопасных зон только классов В-Ia и В-Iб с легкими горючими газами и ЛВЖ, а также В-II и В-IIa

рекомендуется заполнять стеклоблоками толщиной не менее 100 мм.

Если нельзя избежать примыкания стены (стен) РУ, ТП или ПП к взрывоопасным зонам с тяжелыми или сжиженными газами, то необходимо обеспечить, чтобы уровни полов, дна каналов и приямков электропомещений были не менее чем на 0,15 м выше отметки уровня пола смежной с взрывоопасной зоной помещения и планировочной отметки поверхности земли.

Некоторые требования к вентиляционным системам, строительным и другим конструкциям электропомещений РУ, ТП и ПП, стена или стены которых примыкают к взрывоопасной зоне, приведены в табл. 57.13.

Расстояние по горизонтали и вертикали от наружных дверей и окон РУ, ТП и ПП до находящихся во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia и В-II наружных дверей и окон помещений должно быть не менее 6 м. Если остекленные окна неоткрывающиеся, то рас-

Таблица 57.14 Минимально допустимые расстояния, м (не более), от отдельно стоящих РУ, ТП и ПП, а также токопроводов и кабельных эстакад до стены помещения, граничащей со взрывоопасной зоной, или до границы взрывоопасной зоны наружной установки, в которых выделяются (используются, хранятся) горючие вещества

Помещения или наружные установки с взрывоопасными зонами, до которых определяется расстояние	При тяжелых или сжиженных горючих газах (кроме сжиженного аммиака)				При легких горючих газах, ЛВЖ, сжиженном аммиаке, горючей пыли или волокнах			
	От отдельно стоящих РУ, ТП или ПП		От токопроводов	От кабельных эстакад	От отдельно стоящих РУ, ТП или ПП		От токопроводов	От кабельных эстакад
	закрытых	открытых*			закрытых	открытых*		
Помещения с выходящей в сторону РУ, ТП, ПП, токопроводов или кабельных эстакад стеной из негорючих материалов, без проемов и устройств выброса воздуха системой вытяжной вентиляции с проемами	10	15	10	Не нормируется	Не нормируется	0,8 от трансформаторов	10**	Не нормируется
	40	60	20	9	6	15	15	9
Наружные установки, расположенные у стен зданий (в том числе емкости)	60	80	30	9	12	25	25	9**
Сливно-наливные эстакады со сливом или наливом:								
открытым	—	—	—	—	30***	60***	—	—
закрытым	8	100	—	—	15***	25***	25	20
Резервуары:								
с горючими газами (газгольдеры)	80	100	50	20	40	60	25	20
с ЛВЖ	—	—	—	—	30	60	—	—

\* Нормируется расстояние до ограждения открытых РУ, ТП или ПП

\*\* Допускается сокращение расстояния до 6 м при соблюдении условий, предусмотренных в главе СНиП по проектированию генеральных планов промышленных предприятий

\*\*\* Нормируется для ЛВЖ и сжиженного аммиака

стояние может быть уменьшено до 4 м. До окон, заполненных стеклоблоками толщиной 100 мм и более, расстояние не нормируется.

Приведенные значения расстояний могут использоваться и при определении взаимного расположения помещений с взрывоопасными зонами классов В-I, В-Ia и В-II и других производственных помещений, в которых устанавливается электрооборудование общего назначения.

В ТП и ПП, примыкающих одной или более стенами к взрывоопасной зоне, как правило, следует применять трансформаторы с охлаждением негорючей жидкостью. Допускается устанавливать в них трансформаторы с масляным охлаждением, размещаемые в отдельных камерах с выкаткой только наружу. Выкатка трансформаторов КТП производится или наружу, или в смежные помещения.

Герметизированные трансформаторы с усиленными баками, без расширителя, с закрытыми вводами и выводными устройствами (например, трансформаторы КТП или КПП)

с охлаждением как негорючей жидкостью, так и маслом допускается размещать в общем помещении РУ напряжением до 1000 В и выше, не отделяя трансформаторы от оборудования РУ перегородками.

Расстояния от отдельно стоящих РУ, ТП и ПП, токопроводов и кабельных эстакад до наружных взрывоопасных установок и помещений с взрывоопасными зонами всех классов, за исключением классов В-Iб и В-IIa, должны быть не менее указанных в табл. 57.14. При классах зон В-Iб и В-IIa эти расстояния определяются согласно требованиям «Строительных норм и правил» (СНиП)<sup>1</sup>.

Согласно этим же нормам можно определять расстояние от отдельно стоящих РУ, ТП и ПП до наружных установок и помещений с взрывоопасными зонами классов В-I и В-Ia с тяжелыми или сжиженными газами,

<sup>1</sup> Главы СНиП по проектированию генеральных планов промышленных предприятий.



если учтены дополнительные требования, приведенные в табл. 57.13.

К помещениям щитов и пультов управления КИПиА, примыкающим одной или более стенами к взрывоопасным зонам, или отдельно стоящим, предъявляются те же требования, что и к аналогично размещаемым помещениям РУ.

#### 57.4. ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок в основном используется электрооборудование, в котором применены специальные меры с целью устранения или затруднения возможности воспламенения окружающей взрывоопасной среды, — взрывозащищенное. Оно разделяется на две группы: рудничное (группа I), предназначенное для эксплуатации в подземных выработках угольных шахт, опасных по газу (метану) и угольной пыли, и для внутренней и наружной установки во взрывоопасных зонах других производств (группа II).

Взрывозащищенное электрооборудование выпускается серийно только при наличии у его изготовителя свидетельства, подтверждающего, что оно выполнено в соответствии с «Правилами изготовления взрывозащищенного электрооборудования» (ПИВРЭ) или ГОСТ на соответствующий вид взрывозащиты и что представительный образец этого электрооборудования выдержал испытания на взрывозащищенность в одной из испытательных организаций СССР. Этими организациями являются: МакНИИ — для электрооборудования группы I, ВНИИВЭ — для электрооборудования группы II и ВостНИИ — для электрооборудования групп I и II.

Взрывозащищенное электрооборудование может выпускаться трех уровней взрывозащиты: повышенной надежности против взрыва, взрывобезопасное и особовзрывобезопасное. Электрооборудование *повышенной надежности против взрыва* имеет взрывобезопасные свойства только в нормальном режиме работы и предназначается для применения только в тех местах, где взрывоопасная среда отсутствует при нормальном ходе технологического процесса и может появиться на непродолжительное время лишь при аварии. *Взрывобезопасное* электрооборудование безопасно не только при нормальной работе, но и при некоторых его повреждениях. Поэтому оно может применяться и в тех местах, где взрывоопасная среда может появляться на кратковременный период при нормальном ходе технологического

процесса. *Особовзрывобезопасное* электрооборудование предназначается для работы в местах, где постоянно или длительно может присутствовать взрывоопасная среда; в этом оборудовании по сравнению со взрывобезопасным уровнем приняты дополнительные меры взрывозащиты. Условные обозначения уровней взрывозащиты приведены в табл. 57.15.

Взрывозащита может быть обеспечена определенными комплексами средств и мер, различным образом препятствующих воспламенению наружной взрывоопасной среды, — видами взрывозащиты. В настоящее время нормативными документами признаны следующие виды взрывозащиты:

взрывонепроницаемая оболочка; искробезопасная электрическая цепь; вид защиты «е»; масляное заполнение; продувка под избыточным давлением; кварцевое заполнение; специальный вид взрывозащиты; их условное обозначение — в табл. 57.16.

Взрывонепроницаемая оболочка выдерживает давление взрыва и предотвращает распространение взрыва изнутри оболочки к окружающей взрывоопасную среду. Достигается это за счет высокой механической прочности оболочки и того, что щели в соединениях частей оболочки достаточно длинные и узкие, чтобы снизить температуру продуктов взрыва, выходящих из оболочки наружу, до безопасной

Таблица 57.15 Условные обозначения уровней взрывозащиты

Уровень	По ПИВРЭ	По ГОСТ 12.2 020-79
Повышенной надежности	Н	2
Взрывобезопасный	В	1
Особовзрывобезопасный	О	0

Таблица 57.16. Условное обозначение видов взрывозащиты

Вид взрывозащиты	По ПИВРЭ	По ГОСТ 12.2.020-79
Взрывонепроницаемая оболочка	В	<i>d</i>
Искробезопасная электрическая цепь	И	<i>i</i> *
Вид защиты «е»	Н	<i>e</i>
Масляное заполнение	М	<i>o</i>
Продувка под избыточным давлением	П	<i>p</i>
Кварцевое заполнение	К	<i>q</i>
Специальный вид	С	<i>s</i>

\* Искробезопасные электрические цепи в зависимости от уровня разделяются на  $i_a$  — особо взрывобезопасные,  $i_b$  — взрывобезопасные и  $i_c$  — повышенной надежности против взрыва

величины. Так как взрывоопасные газы и пары обладают различной способностью проникать через узкие щели, то по экономическим соображениям взрывонепроницаемые оболочки электрооборудования группы II делят на три подгруппы: ПА, ПВ и ПС. Эти подгруппы оболочек соответствуют категориям взрывоопасных смесей ПА, ПВ и ПС по ГОСТ 12.1.011-78. Оболочки ПС могут применяться во всех трех категориях взрывоопасных смесей – ПС, ПВ и ПА; оболочки ПВ – в смесях категорий ПВ и ПА, а оболочки ПА – только в смесях, относящихся к категории ПА.

Аналогично на подгруппы ПА, ПВ и ПС подразделяются и искробезопасные электрические цепи (ГОСТ 22782.5-78), выполненные так, что электрический разряд в этой цепи или ее нагрев не может воспламенить взрывоопасную смесь соответствующей категории. В эти цепи наряду с датчиками и другими устройствами, входящими в комплект систем автоматики, сигнализации, измерения и т. п., могут включаться различные серийно выпускаемые элементы автоматики (кнопки, контактные элементы и т. п.), не содержащие сосредоточенной индуктивности и емкости и имеющие защиту от внешних воздействий не ниже IP54. При проектировании установок с системами с искробезопасными цепями следует следить за тем, чтобы не превышались максимальная длина соединительного кабеля (если в документации на систему указаны конкретный тип кабеля и его предельная длина), индуктивность или емкость (если документацией на систему предусмотрены предельные значения этих параметров).

Для электрооборудования, не имеющего нормально искрящих частей, возможно применение вида защиты «е», заключающейся в том, что в этом оборудовании принят дополнительно к используемым в электрооборудовании общего назначения ряд мер, затрудняющих появление опасных нагревов, электрических искр и дуг. К этим мерам относятся: защита электрических частей от внешних воздействий, повышенные пути утечки и воздушные зазоры в изоляционных деталях, сниженные тепловые нагрузки на изоляцию, повышенные по сравнению с оборудованием общего назначения требования к контактным соединениям и т. п.

В электрооборудовании с видом защиты «е» в отличие от электрооборудования с традиционным видом защиты «взрывонепроницаемая оболочка» повышение безопасности автоматически сопровождается повышением и его функциональной надежности, выход из строя средств взрывозащиты в подавляющем большинстве случаев является самообнаруживаю-

щимся и ведет к отключению поврежденного оборудования электрической защитой.

Для правильного выбора средств электрической защиты электрооборудования со взрывозащитой вида «е» в документации и на его табличках указывается значение времени  $t_L$ . Время  $t_E$  – это время, в течение которого электрооборудование (например, асинхронные короткозамкнутые электродвигатели, электромагниты переменного тока и т. д.), будучи нагретым в номинальном режиме работы до установившейся температуры, нагревается пусковым током (например, при опрокидывании электродвигателя) до предельной температуры, обусловленной либо поджиганием взрывоопасной среды, либо повреждением изоляции. Электрическая защита должна быть выбрана таким образом, чтобы отключение электрооборудования в таком режиме происходило за время, меньшее  $t_E$ .

Существует несколько видов взрывозащиты по принципу изоляции токоведущих частей электрооборудования от внешней взрывоопасной среды. При использовании масляного заполнения (ГОСТ 22782.1-77) в качестве изолирующего вещества используют жидкий диэлектрик (чаще всего трансформаторное масло), высота слоя которого над искрящими элементами исключает возможность поджигания окружающей взрывоопасной среды. При продувке электрооборудования под избыточным давлением (ГОСТ 22782.4-78) в качестве изолирующего вещества используется чистый воздух или инертный газ, который находится в оборудовании под таким давлением, чтобы исключалось попадание внешней взрывоопасной среды внутрь электрооборудования. Минимальное значение избыточного давления; требуемого ГОСТ 22782.4-78, – 100 Па. Перед включением это электрооборудование должно продуваться определенным объемом воздуха или инертного газа (не менее пятикратного свободного объема электрооборудования и воздухопроводов), чтобы удалить взрывоопасные вещества, которые могли попасть в отключенное электрооборудование. Если электрооборудование не имеет подвижных частей, то его взрывозащита может быть обеспечена кварцевым заполнением (ГОСТ 22782.2-77). Слой кварцевого песка исключает поджигание наружной взрывоопасной среды при случайном обрыве проводника и даже при дуговом коротком замыкании токоведущих частей, погруженных в песок.

Для того чтобы не сдерживать прогресс в разработке новых средств взрывозащиты, введен так называемый «специальный» вид взрывозащиты (ГОСТ 22782.3-77). В этом случае взрывозащита обеспечивается методами,

Таблица 57.17 Примеры маркировки взрывозащищенного электрооборудования

Уровень взрывозащиты	Вид взрывозащиты	Категория и группа наиболее опасной смеси, в которой возможно применение электрооборудования		Маркировка	
		по ПИВРЭ	по ГОСТ 12 1011-78	по ПИВРЭ	по ГОСТ 12 2 020-76
Повышенной надежности против взрыва	Вид защиты «е», искробезопасная электрическая цепь	4Т3	IIС Т3		2ЕхеI <sub>c</sub> IIСТ3
	Масляное заполнение, вид защиты «е»	4Т4	IIС Т4		2Ехоe IIСТ4
Взрывобезопасный	Взрывонепроницаемая оболочка, вид защиты «е»	3Т4	IIВ Т4	*	1Ехed IIВТ4
	Продувка под избыточным давлением	4Т5	IIС Т5		1Ехр IIСТ5
Особовзрывобезопасный	Искробезопасная электрическая цепь	4Т5	IIС Т5		0ЕхI <sub>a</sub> IIСТ5

\* По ПИВРЭ взрывобезопасный уровень не мог быть обеспечен защитой вида «е»

отличными от указанных выше, и оценивается испытательными организациями по специально разработываемым методикам.

В зависимости от максимальной температуры поверхности электрооборудования, которая может соприкасаться с внешней взрывоопасной средой, электрооборудование может относиться к одному из шести температурных классов:

Температурный класс электрооборудования группы II

T1  
T2  
T3  
T4  
T5  
T6

Группы взрывоопасных смесей, в которых может применяться электрооборудование

T1  
T1-T2  
T1-T3  
T1-T4  
T1-T5  
T1-T6

Температурный класс электрооборудования группы II

T1  
T2  
T3  
T4  
T5  
T6

Максимальная температура поверхности, °С

450  
300  
200  
135  
100  
85

Обозначения температурных классов оборудования соответствуют обозначениям групп взрывоопасных смесей по ГОСТ 12.1.011-78.

Применение электрооборудования с различными температурными классами в группах взрывоопасных смесей:

Для правильного применения взрывозащищенного электрооборудования, а также для возможности правильной эксплуатации на взрывозащищенное электрооборудование наносится маркировка. В соответствии с ПИВРЭ маркировка содержит условные обозначения уровня взрывозащиты, наиболее опасной категории и группы взрывоопасной смеси, в которой может применяться электрооборудование (ставятся в прямоугольнике), а также условных обозначений видов взрывозащиты, используемых в электрооборудовании (ставятся в кружках).

В соответствии с ГОСТ 12.2.020-76 маркировка содержит:

условное обозначение уровня взрывозащиты;

знак Ех;

условные обозначения видов взрывозащиты, используемых в электрооборудовании; группу (или подгруппу для взрывонепроницаемых оболочек и искробезопасных цепей) электрооборудования;

температурный класс оборудования.

Примеры маркировки приведены в табл. 57.17.

### 57.5. ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Вынос электродвигателей за пределы взрывоопасных зон хотя и решает вопрос о взрывобезопасности привода технологического оборудования взрывоопасных производств, но является весьма неэкономичным, а в большинстве случаев и невозможным. Поэтому номенклатура взрывозащищенных электродвигателей достаточно широка. Выпускаемые электродвигатели имеют взрывобезопасный уровень, что дает возможность применять их во взрывоопасных зонах всех классов, предусмотренных ПУЭ (гл. 7.3).

Для обеспечения взрывозащиты электродвигателей используются в основном такие виды взрывозащиты, как продувка под избыточным давлением и взрывонепроницаемая оболочка. Продувка под избыточным давлением применяется чаще для крупных машин, для которых сравнительно трудно обеспечить взрывонепроницаемость при изготовлении и в особенности при эксплуатации.

Асинхронные продуваемые двигатели серии АТД выпускаются двух типов: с разомкнутым циклом вентиляции (2АРМП) и с замкнутым (2АЗМП). Двигатели этой серии могут иметь нормальный пусковой момент для привода механизмов с повышенными пусковыми массами (в обозначении используется буква М) и пониженный пусковой момент для привода механизмов с легкими условиями пуска (вместо буквы М используется в обозначении буква Л). Двигатели предназначены для привода насосов, компрессоров, нагнетателей и других быстроходных механизмов. Они выпускаются на напряжение 6000 В мощностью от 315 до 5000 кВт с частотой синхронного вращения 3000 об/мин, имеют маркировку по взрывозащите В4Т5-II или Н4Т5-II (если блокировка от снижения давления действует не на отключение, а на сигнал). Синхронные электродвигатели серии СДКП2 предназначены для привода поршневых насосов, выпускаются на напряжение 6000 В мощностью от 315 до 6300 кВт с частотой вращения 250, 300, 375 и 500 об/мин. Маркировка двигателей В4Т5-II

или Н4Т5-II в зависимости от способа включения блокировки: на отключение или на сигнал (соответственно) при снижении давления в двигателе ниже допустимого уровня. Двигатели имеют замкнутый цикл вентиляции. Такую же маркировку и систему вентиляции имеют и синхронные двигатели серии СТДП, выпускающиеся на напряжение 6000 или 10000 В с частотой вращения 3000 об/мин с мощностью от 630 до 12500 кВт.

Хотя вид взрывозащиты «продувка под избыточным давлением» дает возможность применять электродвигатели в любых взрывоопасных средах и во взрывоопасных зонах всех классов, его большим недостатком является то, что для продувки двигателей требуются специальные вентиляторы. Поэтому вид взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» применяется в настоящее время уже для двигателей мощностью вплоть до 2000 кВт. В табл. 57.18 приведены шкалы мощностей двигателей ВАО 132–2000 кВт. Двигатели

Таблица 57.18. Взрывобезопасные асинхронные двигатели серии ВАО

Тип	Номинальные мощности при числе полюсов				
	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8	2p=10

На напряжение 6000 В

ВАО 450	200	200	—	—	—
	250	250	200	—	—
ВАО 500	315	315	250	200	—
	400	400	315	250	—
ВАО 560	—	500	400	315	—
	—	630	500	400	—
ВАО 630	—	800	630	500	—
	—	1000	800	630	—
ВАО 710	—	1250	1000	800	—
	—	1600	1250	1000	—
ВАО 800	—	2000	—	—	—

На напряжение 380 660 и 660 В

ВАО 315	132	132	110	75.	55
	160	160	132	90	75
ВАО 355	200	200	160	132	90.
	250*	250*	200	160	110
ВАО 450	315*	315*	250*	200	132
	—	—	315*	250*	200

\* Эти двигатели изготавливаются только на напряжение 660 В

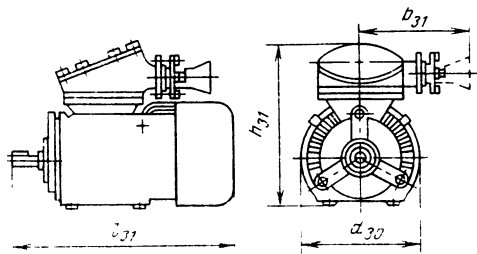


Рис. 57.1. Электродвигатели серии В

серии ВАО мощностью 0,27–100 кВт заменяются двигателями серии В (рис. 57.1), шкалы мощностей которых и габаритные размеры приведены в табл. 57.19. Эти двигатели, так же как и ВАО, имеют взрывобезопасный уровень и предназначены для сред третьей категории группы Т4 по ПИВРЭ (сред ПВ Т4 по ГОСТ 12.1.011-78).

Взрывонепроницаемые короткозамкнутые асинхронные электродвигатели, предназначенные для работы во взрывоопасных смесях третьей категории (ПВ по ГОСТ 12.1.011-78), могут в ряде случаев использоваться как двигатели повышенной надежности против взрыва (с защитой вида «е») в средах четвертой категории (ПС по ГОСТ 12.1.011-78). Для этого необходимо измерение максимальных температур на всех частях внутри взрывонепроницаемой оболочки (в том числе и на роторе) как в нормальном режиме работы, так и при нормированных перегрузках двигателей. По результатам измерений определяется время  $t_E$  для различных групп взрывоопасных смесей четвертой категории (ПС), где предполагается применение этих двигателей. В ряде случаев для получения необходимых безопасных температур требуется уменьшение нагрузки на двигатели по сравнению с их номинальной мощностью. Такие двигатели можно использовать в средах четвертой категории (ПС) с уровнем повышенной надежности при наличии защит от перегрузки, отключающих двигатели при «опрокидывании» за время, меньшее времени  $t_E$ .

В табл. 57.20 приведены результаты исследований двигателей ВАО, предназначенных для сред третьей категории (ПВ), которые могут применяться в зонах В-Ia и В-II в средах четвертой категории (ПС) группы Т1 (водородовоздушные смеси) как двигатели повышенной надежности.

Проведенные в соответствии с ГОСТ 22782.6-81 исследования двигателей серии В, указанных в табл. 57.19, показали, что они могут использоваться в зонах классов В-Ia и

Таблица 57.19. Взрывобезопасные асинхронные двигатели серии В

Тип	Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт, для 3000 об/мин	Габаритные размеры, мм (рис 57.1)				
			$h_{31}$	$l_{31}$		$b_{31}$	$d_{30}$
				$2p=2$	$2p=4, 6, 8$		
B63A2	63	0,37	220	272	140	150	
B63B2	63	0,55	220	272			
B71A2	71	0,75	238	302	140	160	
B71B2	71	1,1	238	302			
B80A2	80	1,5	256	347	140	190	
B80B2	80	2,2	256	347			
B90L2	90	3,0	346	455	160	220	
B100S2	100	4,0	366	513	160	250	
B100L2	100	5,5	366	513			
B112M2	112	7,5	415	590	230	270	
B132M2	132	11,0	460	630	230	320	
B160S2	160	15	520	690	340	400	
B160M2	160	18,5	520	740	340	400	
B180S2	180	22	570	750	340	420	
B180M2	180	30	570	795	340	420	
B200M2	200	37	610	810 840	390	470	
B200L2	200	45	610	850 990	390	470	
B225M2	225	55	650	930 930	390	470	
B250S2	250	75	630	1040 1040	500	590	
B250M2	250	90	630	1090	500	590	
B280S2	280	110	710	1110 1140	590	690	

Таблица 57.20. Значения  $t_E$  для  $P_{ном}$  и  $0,8 P_{ном}$  двигателей серии ВАО для сред Т1

Тип	$P_{ном}$ , кВт	$t_E$ , с	$0,8 P_{ном}$ , кВт	$t_E$ , с
ВАО22-2	2,2	21	1,76	24
ВАО32-2	4,0	11	3,2	13
ВАО41-2	5,5	20	4,4	23
ВАО42-2	7,5	15	6,0	17
ВАО51-2	10,0	36	8,0	42
ВАО52-2	13,0	28	10,4	33
ВАО62-2	17,0	7	13,6	8
ВАО72-2	30,0	14	24,0	16
ВАО81-2	40,0	6	32,0	7
ВАО31-4	2,2	18	1,76	21
ВАО32-4	3,0	15	2,4	18
ВАО41-4	4,0	22	3,2	26
ВАО42-4	5,5	22	4,4	25
ВАО51-4	7,5	14	6,0	17
ВАО61-4	10,0	13	8,0	16
ВАО71-4	22,0	11	17,6	12
ВАО11-6	0,4	49	0,32	57
ВАО32-6	2,2	26	1,76	31
ВАО72-6	22,0	10	17,6	12
ВАО82-6	40,0	12	32,0	14
ВАО42-8	3,0	24	2,4	28

В-Іг в средах ПСТ4 при их номинальной мощности. Для использования двигателей этой серии в зонах классов В-Іа и В-Іг, опасных по сероуглероду (ПСТ5), необходимо:

применить электрическую защиту, которая отключала бы двигатели при их «опрокидывании» после установившегося теплового режима за время не более 10 с.

снизить мощность двигателей с высотами осей вращения 160, 180, 200 и 280 мм на одну ступень.

### 57.6. ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

В соответствии с рекомендациями ПУЭ (гл. 7.3) на большинстве предприятий, имеющих взрывоопасные производства, пусковая и пускорегулирующая аппаратура вынесена за пределы взрывоопасных зон, в которых устанавливают лишь аппаратуру дистанционного управления (кнопочные посты, конечные и путевые выключатели и т. п.).

Для управления пускателями имеется ряд кнопочных постов взрывобезопасного уровня взрывозащиты с использованием взрывонепроницаемой оболочки: КУВ — для сред первой категории (ІА), КУ91 — КУ93 — для сред третьей категории (ІІВ), КУ-700 — с использованием масляного заполнения.

В настоящее время промышленностью осваивается новая серия взрывонепроницаемых постов управления и сигнализации серии ПВ для дистанционного управления электроприво-

дами машин и механизмов в передвижных и стационарных установках, а также для сигнализации о состоянии отдельных элементов электроприводов. Посты имеют взрывобезопасный уровень взрывозащиты и предназначены для работы во взрывоопасных зонах В-І, В-Іа, В-Іг, В-Іаа. Имеется две модификации постов управления ПВ-К: одна предназначена для сред второй категории по ПИВРЭ и имеет маркировку В2Т3-В, вторая — для сред всех категорий и имеет маркировку В4Т5-В. Первая предназначена для работы в сетях напряжением до 380 В переменного и 220 В постоянного тока, вторая — в электрических цепях до 660 В переменного и 440 В постоянного тока.

Контактные блоки постов ПВ-К снабжены механизмом мгновенного действия, обеспечивающим собственное время переброса подвижных контактов, не превышающее 0,04 с, и контактное нажатие, не изменяемое при движении приводного элемента до точки срабатывания подвижных контактов, номинальный ток 10 А.

Посты типа ПВ-К (рис. 57.2) выпускаются одно-, двух- и трехкнопочными. Токагель «Стоп» во всех исполнениях выполняется грибовидной формы и фиксируется в нажатом положении. Посты управления в исполнении В4Т5-В могут жестко комплектоваться друг с другом и с постами сигнализации серии ПВ. Посты сигнализации ПВ (рис. 57.3) выпускаются в пяти основных исполнениях: ПВ-А (с амперметром), ПВ-В (с вольтметром), ПВ-С1 (с тремя коммутаторными лампами),

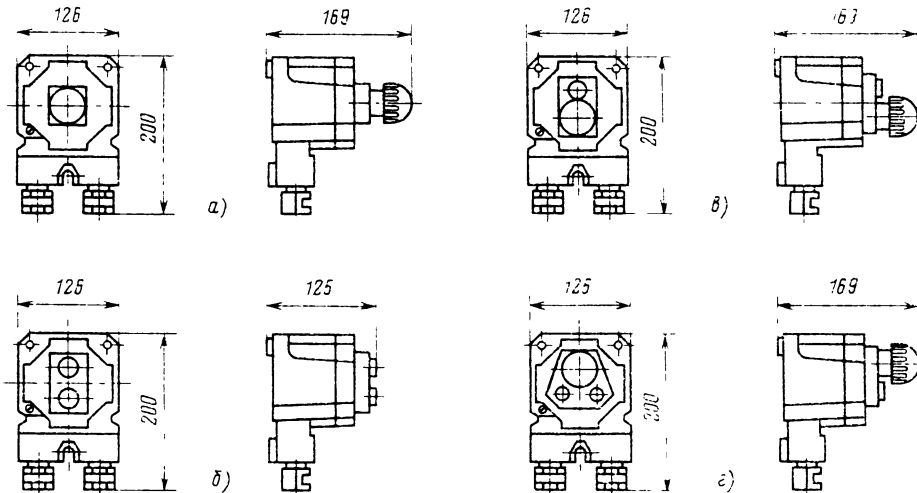


Рис. 57.2. Посты серии ПВ-К:

а — с токагелем «Пуск» или «Стоп», б — с токагелями «Пуск» и «Стоп», в — с токагелем «Пуск» и грибовидным токагелем «Стоп», г — с токагелями «Вперед», «Назад», «Стоп»

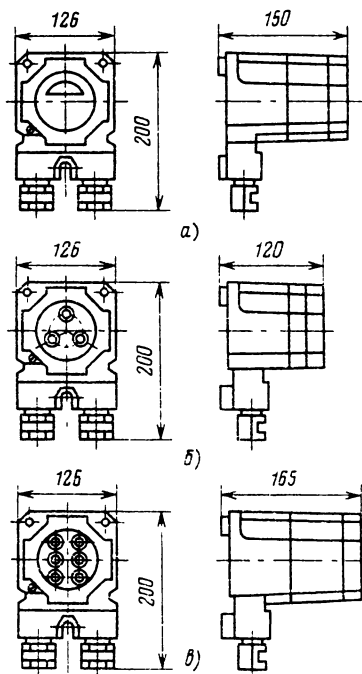


Рис. 57.3. Посты сигнализации:  
 а — ПВ-А (ПВ-В), б — ПВ-С1, в — ПВ-С2 (ПВ-С3)

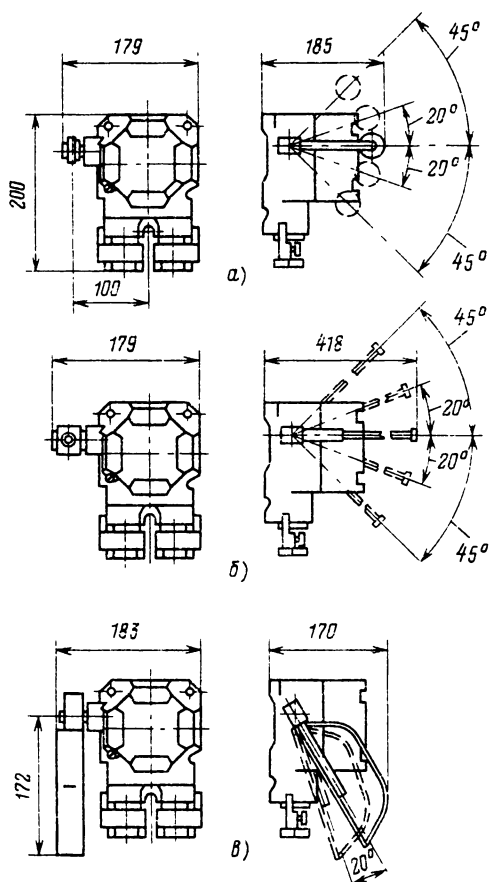


Рис. 57.5. Выключатели путевые типа ВПВ-4, ВПВ-5, ВПВ-6 (четырёхконтактные) в приводе в виде:  
 а — рычага с роликом, б — рычага с тросом, в — рычага с педалью

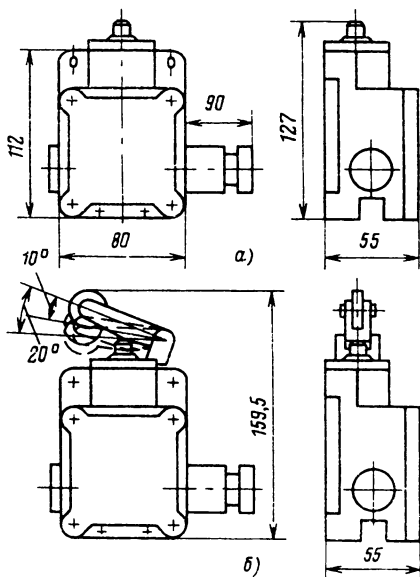


Рис. 57.4. Выключатели путевые типа ВПВ-1, ВПВ-2, ВПВ-3 (двухконтактные) с приводом в виде:  
 а — толкателя, б — рычага с роликом

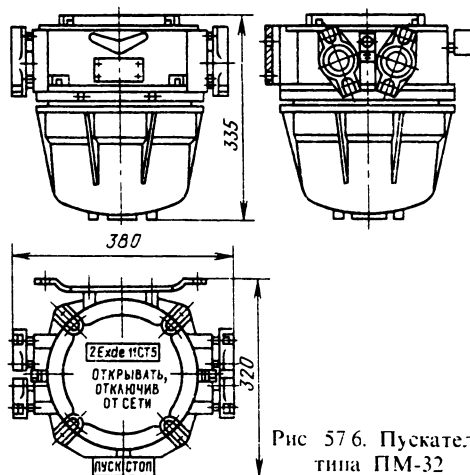


Рис. 57.6. Пускатели типа ПМ-32

ПВ-С2 (с тремя люминесцентными лампами), ПВ-С3 (с шестью люминесцентными лампами).

Все посты сигнализации имеют исполнение В4Т5-В, за исключением поста ПВ-С1, который имеет исполнение В2Т3-В. Посты сигнализации могут подключаться как проводами в трубах, так и гибким или бронированным кабелем диаметром 10–22 мм.

Путевые выключатели серии ВПВ (рис. 57.4 и 57.5) призваны заменить путевые выключатели с масляным заполнением серии ВП-701 и взрывонепроницаемые концевые выключатели типов ВК-В3Г, КВ-4, КВ-9, ВКМ, ВК-В3Г-М, которые могут применяться во взрывоопасных смесях лишь до третьей категории (ПВ) включительно. Выключатели ВПВ будут выпускаться в двух исполнениях по взрывозащите: В2Т3-В и В4Т5-В, т. е. они имеют взрывобезопасный уровень и могут применяться во взрывоопасных зонах всех классов по ПУЭ, гл. 7.3, в смесях второй категории (первое исполнение) и во взрывоопасных смесях любой категории (второе исполнение). Первое исполнение предназначено для работы в цепях переменного тока напряжением до 380 В, второе – до 660 В. Номинальный ток 10 А. Вводные устройства выключателей рассчитаны для ввода гибкого или бронированного кабеля диаметром 11–22 мм. Выключатели ВПВ-1, ВПВ-2, ВПВ-3 могут жестко комплектоваться друг с другом.

При необходимости во взрывоопасных зонах В-Ia и В-Iг могут использоваться маслонаполненные магнитные пускатели типа ПМ-700, выпускающиеся нашей промышленностью на напряжение до 500 В с номиналь-

ными токами 25, 100 и 250 А. Предельные токи короткого замыкания, которые могут отключать эти пускатели, составляют 800, 2000 и 2300 А. При установке этих пускателей в сетях с большим током короткого замыкания следует использовать модификацию этих пускателей ПМ-721, которая не имеет максимально-теплового расцепителя. Вводное устройство этих пускателей имеет вид защиты «е» уровня повышенной надежности против взрыва, поэтому пускатели типа ПМ-700 могут применяться в зонах В-Ia, В-Iг, В-Iб и В-IIa. В настоящее время пускатель ПМ-700 с номинальным током 25 А заменяется пускателем новой серии ПМ, рассчитанным на номинальный ток продолжительного режима 32 А (рис. 57.6). Этот пускатель имеет маркировку по взрывозащите 2Exde IIC T5 и предназначен для дистанционного или местного управления электродвигателем с короткозамкнутым ротором и защиты от перегрузки отходящих соединений. Максимальная мощность управляемого им электродвигателя в продолжительном режиме в категории применения АС-3 составляет 16 и 28 кВт для напряжений 380 и 660 В соответственно.

## 57.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВЕТИЛЬНИКИ ДЛЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН

Для освещения взрывоопасных зон могут применяться электрические светильники (СВ), если уровни их взрывозащиты (или степень защиты) соответствуют приведенным в табл. 57.21 или более высокие.

Некоторые типы специальных СВ для об-

Таблица 57.21 Допустимый уровень взрывозащиты или степень защиты электрических светильников в зависимости от класса взрывоопасной зоны

Класс взрывоопасной зоны	Уровень взрывозащиты или степень защиты <sup>1</sup> электрических светильников	
	стационарных	переносных
В-I В-Ia В-Iб	Взрывобезопасные Повышенной надежности против взрыва Без средств взрывозащиты Степень защиты IP5X	Взрывобезопасные » Повышенной надежности против взрыва
В-Iг В-II В-IIa	Повышенной надежности против взрыва То же <sup>2</sup> Без средств взрывозащиты Степень защиты IP5X <sup>2</sup>	То же Взрывобезопасное <sup>2</sup> Повышенной надежности против взрыва <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Степень защиты СВ от проникновения воды (X) определяется в зависимости от условий среды, в которой они устанавливаются

<sup>2</sup> Допускается при отсутствии специальных СВ, если обеспечена защита оболочки от проникновения пыли и если температура ее поверхности (без наложения пыли) будет не менее чем на 50 °С ниже температуры тления пыли (для тлеющих пылей) или не более двух третей температуры самовоспламенения (для нетлеющих пылей)



Таблица 57.22. Светильники общего освещения взрывоопасных зон с лампами накаливания (одноламповые)

Тип светильника <sup>1</sup>	Класс светораспределения <sup>2</sup>	Тип кривой силы света <sup>3</sup>	Степень защиты	Способ установки <sup>4</sup>	Классы зоны
B4A-60	П	Д	—	П	В-1
B3Г-100	П	Д	—	П	»
B3Г-200	П, Н	Д	—	С	»
B3Г, B4A-200	П, Н	Д	—	С	»
H4БН-150-1	П	Г	IP54	С	В-1а, В-1г, В-1п
H4БН-150-1П	Р	М	IP54	С	То же
H4Т2Н-300-1	П	Г	—	С	»
H4Т2Н-300-1П	Р	М	—	С	»
H4Б-300	П	Г	—	С	»
H4Б-300	Р	М	—	С	»
НСП02-100	Р	М	IP52	С	В-1б, В-1а
НСП03-60	Р	М	IP54	С	То же
НСП09-200	Р	М	IP50	С	»
НСП11-100	П	Д	IP62	С	»
НСП11-100	Р	М	IP62	С	»
НСП11-200	П	Д	IP62	С	»
НСП11-200	Р	М	IP62	С	»
НСП22-500	Н	Д	IP60	С	»
НСР01-100	Р	М	IP54	С	»
НСР01-200	Р	М	IP54	С	»
ПСХ-60	Н	Д	IP64	П, Б	»
НПП03-100	П	Д	IP64	П, Б	»
ИСП04-1000	П	К	IP54	С	»

<sup>1</sup> В обозначении типа светильника (после дефиса) указана мощность лампы, Вт.

<sup>2</sup> П — прямого, Н — преимущественно прямого, Р — рассеянного.

<sup>3</sup> Г — глубокая, Д — косинусная, М — равномерная, К — конденсированная

<sup>4</sup> С — подвесные, П — потолочные, Б — настенные, В — встраиваемые.

Таблица 57.23 Светильники подвесные с ртутными лампами ДР.1 и ДРИ для общего освещения взрывоопасных зон классов В-1б и В-1а (степень защиты IP60)

Тип	Число ламп × мощность, Вт	Класс светораспределения <sup>1</sup>	Тип кривой силы света <sup>1</sup>
РСП11-400-001	1 × 400	П	Д
РСП11-400-002	1 × 400	Р	М
РСП12-400-002	1 × 400	П	Д
РСП12-700-001	1 × 700	Р	М
РСП14-2 × 400-011	2 × 400	П	Д
РСП14-2 × 700-011	2 × 700	П	Д

С лампами ДР.1

РСП11-400-001	1 × 400	П	Д
РСП11-400-002	1 × 400	Р	М
РСП12-400-002	1 × 400	П	Д
РСП12-700-001	1 × 700	Р	М
РСП14-2 × 400-011	2 × 400	П	Д
РСП14-2 × 700-011	2 × 700	П	Д

Продолжение табл. 57.23

Тип	Число ламп × мощность, Вт	Класс светораспределения <sup>1</sup>	Тип кривой силы света <sup>1</sup>
РСП14-2 × 700-021	2 × 700	П	Г
РСП16-400-001	1 × 400	П	Д
РСП20-250-111	1 × 250	П	Д
РСП20-400-112	1 × 400	П	Г
РСП23-400-011	1 × 400	П	Д
РСП23-400-012	1 × 400	Р	М
РСП23-400-031	1 × 400	П	Д
РСП23-400-032	1 × 400	Р	М

С лампами ДРИ (металлогалогенными)

ГСП14-2 × 700-101	2 × 700	П	Г
ГСП16-400-001	1 × 400	П	Д
ГСП20-700-113	1 × 700	П	К
ГСП23-400-001	1 × 400	П	Д

<sup>1</sup> См. сноски 2—4 к табл. 57.22

Таблица 57.24. Светильники общего освещения взрывоопасных зон классов В-1б и В-1а с люминесцентными лампами

Тип светильника <sup>1</sup>	Класс светораспределения <sup>2</sup>	Тип кривой силы света <sup>2</sup>	Степень защиты	Способ установки <sup>2</sup>
ЛСП16-1 × 40	Н	Д	IP54	С
ЛСП16-2 × 40-001	Н	Д	IP54	С
ЛСП16-2 × 40-002	Н	Д	IP54	С
ПВЛ1-1 × 40	Н	Д	IP54	С
ПВЛ1-2 × 40-01	Н	Д	IP54	С
ПВЛ1-2 × 40-02	Н	Д	IP54	С
ПВЛ1-2 × 40-03	Н	Д	IP54	С
ПВЛП1-2 × 80-01	Н	Д	IP54	С
ПВЛП1-2 × 80-02	Н	Д	IP54	С
ЛВП02-2 × 65/Д53-01	П	Д	IP53	В
ЛВП02-2 × 80/Д53-01	П	Д	IP53	В
ЛВП02-4 × 65/Д53-01	П	Д	IP53	В
ЛВП02-4 × 80/Д53-01	П	Д	IP53	В
ЛВП02-3 × 65/Д53-03	П	Г	IP53	В
ЛВП02-3 × 80/Д53-03	П	Г	IP53	В
ЛВП02-4 × 65/Д53-03	П	Г	IP53	В
ЛВП02-4 × 80/Д53-03	П	Г	IP53	В
ЛВП04-4 × 65-001	П	Г	IP54	В
ЛВП04-4 × 80-001	П	Г	IP54	В
ЛВП31-4 × 80/Д53	П	Г	IP53	В
ЛВП33-2 × 80/Д53	П	Г	IP53	В
ЛВП33-4 × 80/Д53-01	П	Г	IP53	В
ВЛВ-3 × 80Б	П	Д	IP54	В
ВЛВ-4 × 80Б	П	Д	IP54	В

<sup>1</sup> В обозначении типа светильника после первого дефиса указаны число ламп и мощность каждой лампы, Вт.

<sup>2</sup> См. сноски 2—4 к табл. 57.22.

Таблица 57.25 Комплексные осветительные устройства со шелевыми световодами типа КОУ (степень защиты камер IP54)

Тип КОУ <sup>1</sup>	Канал		Тип металлогалогенных ламп	Число × мощность, Вт, ламп	Световой поток, клм	Мощность, потребляемая <sup>2</sup> , кВт	КПД, %	Рекомендуемая высота установки, м
	Диаметр, мм	Длина, м						
КОУ1-М275-1 × 250	275	6	ЛФМГ-250	1 × 250	14	0,26	40	2,5–4
КОУ1А-М275-1 × 250	275	6		1 × 250	14	0,26	30	2,5–4
КОУ1-М275-1 × 400	275	6	ЛФМГ-400	1 × 400	25	0,42	40	2,5–4
КОУ1А-М275-1 × 400	275	6		1 × 400	25	0,42	30	2,5–4
КОУ1-М275-1 × 700	275	6	ДРИЗ-700-1	1 × 700	38	0,74	40	2,5–5
КОУ1-М275-1 × 700	275	6		1 × 700	38	0,74	30	2,5–5
КОУ1-М600-1 × 700	600	6		1 × 700	38	0,74	40	2,5–5
КОУ1А-М600-1 × 700	600	6		1 × 700	38	0,74	30	2,5–5
КОУ1-М600-4 × 700	600	18		4 × 700	152	2,95	40	4–8
КОУ1А-М600-4 × 700	600	18		4 × 700	152	2,95	30	4–8
КОУ1А-М600-4 × 700/С	600	18		4 × 700	152	2,95	30	4–8

<sup>1</sup> В обозначении типа буква А означает наличие в устройстве переходного элемента, а буква С – отсутствие камеры. Для освещения взрывоопасных зон классов В-1б и В-1а предназначены КОУ без переходных элементов (типы КОУ1 и КОУ1 – .../С), а классов В-1, В-1а и В-1а – КОУ с переходными элементами (типов КОУ1А- и КОУ1А – .../С).

<sup>2</sup> Включая потери мощности в ПРА.

щего освещения взрывоопасных зон приведены в табл. 57.22 – 57.24.

Помимо применения специальных СВ могут использоваться также и СВ общего назначения, если они будут установлены вне взрывоопасной среды и будут освещать взрывоопасную зону через одну из следующих имеющих остекление конструкций:

а) неоткрывающиеся окна<sup>1</sup> без фрагуг и форточек;

б) специальные ниши в стене<sup>1</sup> с вентиляцией их с естественным побуждением наружным воздухом;

в) фонари специального типа с СВ, установленными в потолке<sup>1</sup>, и вентиляцией с естественным побуждением фонарей наружным воздухом;

г) короба<sup>2</sup>, продуваемые под избыточным давлением чистым воздухом.

Помимо использования указанных выше СВ все более широкое применение для освещения взрывоопасных зон получает светотехническое оборудование нового вида – комплексные осветительные устройства со шелевыми световодами (КОУ)

Эти устройства типов КОУ1 и КОУ1А

состоят из канала световода и камеры, в которой размещаются источники света, отражатели и блоки ПРА. Устройства типов КОУ1 – .../С и КОУ1А – .../С камер не имеют, вместо них используют ниши, проемы в различных строительных конструкциях.

В устройствах типа КОУ1А камеры устанавливаются вне взрывоопасной зоны (обычно в соседнем помещении), и они соединяются с каналами световодов через переходные элементы.

При использовании КОУ повышается надежность освещения взрывоопасных зон, сокращается потребность в электрооборудовании и материалах, уменьшается трудоемкость электромонтажных работ. При применении КОУ вместо взрывозащищенных СВ с лампами накаливания обеспечивается [57.3] снижение в 2,5–4 раза установленной мощности источников света и в 1,5–2,5 раза приведенных затрат, учитывающих капитальные вложения и эксплуатационные расходы. Основные данные по КОУ приведены в табл. 57.25.

## 57.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СЕТИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН

Для электрических сетей во взрывоопасных зонах любого класса запрещено применение голых (неизолированных) проводников, в том числе для токопроводов (троллеев) к кранам, тельферам и т. п.

<sup>1</sup> С двойным остеклением

<sup>2</sup> В местах, где возможны поломки стекол, для застекления коробов следует применять небьющееся стекло.

Жилы проводов и кабелей для электроустановок взрывоопасных зон классов В-I и В-Iа должны быть медные, для зон классов В-Iб, В-Iг, В-II и В-IIа допускаются алюминиевые.

Во взрывоопасных зонах любого класса могут применяться провода с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией с прокладкой в стальных водогазопроводных трубах (открыто и скрыто), запрещено применение в них проводов, а также кабелей с полиэтиленовой изоляцией или оболочкой. Марки кабелей, рекомендуемые для открытой прокладки силовых сетей во взрывоопасных зонах, приведены в табл. 57.26 [57.2].

Бронированные кабели могут прокладываться в зонах любого класса: открыто — по стенам и строительным конструкциям зданий и сооружений на скобах и кабельных конструкциях; в коробах, лотках, на тросах; в каналах<sup>1</sup>, на кабельных и комбинированных эстакадах; скрыто — в земле (траншеях).

Способы прокладки небронированных кабелей во взрывоопасных зонах приведены в табл. 57.27 [57.4].

Кабели, прокладываемые во взрывоопасных зонах любого класса открыто, не должны иметь наружных покрытий и покрытий из горючих материалов (джута, хлопчатобумажной оплетки, бигума и т. п.). Бронированные кабели рекомендуется выбирать без подушки.

Нулевые проводники, как рабочие, так и защитные (заземляющие), должны иметь изоля-

<sup>1</sup> Рекомендуется, как правило, избегать их устройства во взрывоопасных зонах классов В-I и В-Iа с тяжелыми или сжиженными горючими газами. При вынужденном устройстве каналов они должны засыпаться песком

цию, равноценную с изоляцией фазных проводников.

Шинопроводы с изолированными шинами в металлическом кожухе со степенью защиты не менее IP31 допускается применять во взры-

Таблица 57.26. Кабели для открытой прокладки силовых сетей во взрывоопасных зонах

Марка	Классы взрывоопасных зон					
	В-I	В-Iа	В-Iб	В-Iг	В-II	В-IIа
ВБВ	С	С	Д	Д	Д	Д
АВБВ	—	—	С	С	С	С
ВВБГ, ВББШв, ВВБбГ, ВРБГ, НРБГ, СРБГ, СБШв, СБГ, СБн	—	—	Д	Р	Р	Д
АВБбШв, АВВБГ, АВВБбГ, АВРБГ, АНРБГ, АСРБГ, АСБГ, АСБн	—	—	Д	Д	Д	Д
ААБГ, ААБбГ	—	—	Р	—	—	Р
АВВГ, АВРГ, АНРГ, АСРГ, АСШв, АСГ	—	—	Д	—	—	Д
ААГ	—	—	Д	—	—	Д
КРПС*, КРПСн*	С	С	Д	С	С	Д
КРПГ*	Р	Р	Д	Р	Р	С
КРПТ*, КРПТн*	—	Д	С	Д	Д	Р

\* Кабели к электроприемникам передвижным или установленным на виброоснованиях.

Примечания. 1. Кабели, предназначенные для прокладки во взрывоопасных зонах высших классов, допускается применять в зонах низших классов (при технико-экономической целесообразности)

2. Условные обозначения С — следует применять, Р — рекомендуется, Д — допускается (прочерк означает, что применять нельзя)

3. Кабели расположены по маркам в порядке их предпочтительного применения

4. Трех- и четырехжильные кабели должны иметь в сечении круглую форму.

Таблица 57.27. Способы прокладки во взрывоопасных зонах небронированных кабелей в резиновой, поливинилхлоридной и металлической оболочках

Способ прокладки	Классы взрывоопасных зон			
	В-I	В-Iа	В-Iб, В-Iг	В-II, В-IIа
Открыто при отсутствии возможности механических и химических воздействий по стенам и строительным конструкциям на скобах и кабельных конструкциях, в лотках, на тросах	—	О	О2С	О2С
В каналах пылеуплотненных (например, покрытых асфальтом) или засыпанных песком	—	—	—	О2С
В коробах — открыто	—	О+С	О2С	—
В стальных водогазопроводных трубах — открыто и скрыто	О2С	О2С	О2С	О2С

Примечание. Условные обозначения допустимых способов прокладки сетей О — осветительных напряжением до 380 В, С — силовых напряжением до 1000 В и вспомогательных цепей, О2С — перечисленных видов сетей (О и С), а также силовых напряжением выше 1000 В

воопасных зонах классов В-Iа и В-Iб, причем в зоне класса В-Iа — только с медными шинами. Неразъемные соединения этих шинопроводов должны быть сварными или выполнены опрессовкой, а разъемные соединения (у аппаратов и между секциями) должны быть снабжены приспособлениями, исключающими самоотвинчивание болтов. Открывание кожухов шинопроводов — только специальными торцевыми ключами.

Электропроводки в трубах, прокладываемые в помещениях с взрывоопасными зонами классов В-I и В-Iа, должны иметь разделительное уплотнение в специально для этой цели предназначенной коробке, которая установлена:

- а) в непосредственной близости от места входа трубы во взрывоопасную зону;
- б) при переходе трубы из взрывоопасной зоны одного класса во взрывоопасную зону другого класса — в помещении взрывоопасной зоны более высокого класса;
- в) при переходе трубы из одной взрывоопасной зоны в другую зону того же класса — в помещении взрывоопасной зоны с более высокими категорией и группой взрывоопасной смеси.

Допускается также установка разделительных уплотнений со стороны невзрывоопасной зоны или снаружи, если установка их во взрывоопасной зоне невозможна.

Разделительные уплотнения должны испытываться сжатым воздухом под избыточным давлением 0,25 МПа.

Проводники силовых, осветительных и вспомогательных цепей в сетях напряжением до 1000 В взрывоопасных зон классов В-I, В-Iа, В-II и В-IIа должны быть защищены от перегрузок и коротких замыканий, и их сечение должно быть выбрано по расчетному току, при этом допустимая длительная нагрузка должна быть не менее указанной в табл. 57.28. Проводники ответвлений к электродвигателям должны защищаться от перегрузок, а сечения их должны допускать длительную нагрузку не менее 125 % номинального тока электродвигателя.

Для аналогичных сетей классов В-Iб и В-Iг защита проводов и кабелей и выбор их сечений — по тем же требованиям, что и для электроустановок общего назначения.

Провода и кабели в сетях напряжением выше 1000 В, прокладываемые во взрывоопасных зонах любого класса, должны быть проверены по нагреву током КЗ. Защита от перегрузок питающих линий и присоединений должна выполняться во всех случаях независимо от мощности электроприемника. Защита электроприемников от многофазных КЗ и от

Таблица 57.28 Допустимая продолжительная нагрузка проводов и кабелей

Защитный аппарат	Допустимый продолжительный ток, % номинального тока плавкой вставки или тока трогания расцепителя	
	проводов и кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией	кабелей с бумажной изоляцией
Предохранители с плавкими вставками	125	100
Автоматические выключатели с расцепителями максимальным мгновенным	125	100
с обратозависимой регулируемой характеристикой	100	100
то же, но нерегулируемой	100	80

перегрузки должна предусматриваться двухреальной.

В сетях электрического освещения взрывоопасных зон класса В-I должны применяться двухпроводные групповые линии с рабочим нулевым проводником, с защитой от токов КЗ как фазного, так и рабочего нулевого проводника. Для одновременного отключения этих двух проводников должны применяться двухполюсные выключатели.

Во взрывоопасных зонах любого класса запрещается установка соединительных и ответвительных кабельных муфт (за исключением муфт кабелей искробезопасных цепей). Рекомендуется всемерно ограничивать установку в таких зонах соединительных и ответвительных коробок сети электрического освещения.

Наружную прокладку кабелей между взрывоопасными зонами рекомендуется выполнять открыто: на эстакадах, тросах, по стенам зданий и т. п., избегая по возможности прокладки в подземных кабельных сооружениях (каналах, блоках, туннелях).

Электроустановки напряжением до 1000 В во взрывоопасных зонах любого класса могут выполняться как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью.

Основные требования к сетям заземления и зануления электроустановок напряжением до 1000 В во взрывоопасных зонах приведены в табл. 57.29.

Во взрывоопасных зонах любых классов подлежат занулению (или заземлению) электроустановки при всех напряжениях перемен-

Таблица 57.29. Выполнение сетей заземления и зануления электроустановок напряжением до 1000 В во взрывоопасных зонах в зависимости от вида нейтрали

Вид нейтрали <sup>1</sup>	
Глухозаземленная	Изолированная
<i>Исполнение заземления (зануления)</i>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1 В силовых сетях — с использованием отдельной жилы кабеля или провода</li> <li>2 В осветительных сетях — отдельным проводником, прокладываемым от светильника и присоединяемым к нулевому рабочему проводнику в ближайшей ответвительной коробке (во взрывоопасных зонах класса В-I присоединение к нулевому рабочему проводнику должно выполняться в ближайшем групповом пункте)</li> <li>3 Нулевые защитные проводники во всех звеньях должны быть проложены в общих оболочках, трубах, коробках, пучках с фазными проводами</li> <li>4 Вне взрывоопасной зоны на участке от щита, сборки, распределительного пункта до РУ, ТП в качестве нулевого защитного проводника допускается использовать алюминиевую оболочку питающих кабелей</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Заземляющий проводник допускается прокладывать как в общей оболочке с фазными, так и отдельно от них</li> <li>2 Сечение заземляющих проводников должно составлять не менее 1/3 сечения фазных, а при проводниках из разных металлов — не менее 1/3 проводимости фазных проводников, при этом не требуется применения проводников сечением более: 25 мм<sup>2</sup> — медных, 35 мм<sup>2</sup> — алюминиевых, 120 мм<sup>2</sup> — стальных</li> </ol>
<i>Защита от замыкания на землю (на нулевой защитный проводник)</i>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Для обеспечения отключения аварийного участка, при замыкании на корпус или на нулевой защитный проводник проводимость фазных и защитных проводников должна быть такой, чтобы возникающий ток КЗ превышал не менее чем               <ul style="list-style-type: none"> <li>в 4 раза — номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя</li> <li>в 6 раз — ток расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратную зависимость от тока характеристику</li> <li>в 1,4 раза — ток уставки автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем (отсечкой) при номинальном токе автоматического выключателя до 100 А и в 1,25 раза при номинальном токе такого выключателя более 100 А</li> </ul> </li> <li>2. Полная проводимость нулевого защитного проводника должна быть не менее 50% проводимости фазного проводника</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Должен обеспечиваться автоматический контроль изоляции сети с действием на сигнал и контроль исправности пробивного предохранителя</li> <li>2. Рекомендуется применять защитное отключение в электроустановках во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia и В-II</li> <li>3 Во взрывоопасных зонах любого класса должно быть выполнено уравнивание потенциалов</li> </ol>

<sup>1</sup> В качестве нулевых защитных и заземляющих проводников должны применяться проводники, специально для этого предназначенные. Использование строительных металлических конструкций, стальных труб электропроводки, металлических оболочек кабеля и т. п. допускается как дополнительное мероприятие.

ного и постоянного тока и все их электрооборудование, включая установленное на зануленных (заземленных) металлических конструкциях.

#### Список литературы

- 571 Арнополин А. Г., Шевченко Н. Ф. Взрывозащищенное электрооборудование. М. Энергия, 1973. 208 с.  
572 Инструкция по монтажу электрооборудования силовых и осветительных сетей взрывоопасных

зон ВСН332-74/ММСС СССР (Минмонтажспецстрой СССР). М. Энергия, 1976. 145 с.

573 Пикман И. Я. Электрическое освещение взрывоопасных и пожароопасных зон — 2-е изд. М. Энергоатомиздат, 1985. 104 с.

574 Правила устройства электроустановок Минэнерго СССР — 6-е изд. М. Энергоатомиздат, 1985. 640 с.

575 Ракович И. И. Электрооборудование взрывоопасных производств. М. Энергия, 1972. 376 с.

576 Основы взрывозащитности электрооборудования, Н. Ф. Шевченко, М. В. Хорунжий, Н. А. Бойков и др. М. Энергоиздат, 1982. 320 с.

# Раздел 58 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

## СОДЕРЖАНИЕ

58.1	Обозначения . . . . .	365	
58.2	Основные характеристики электрического подвижного состава . . . . . Электровозы (366). Электропоезда, трамваи и троллейбусы (370) Основные характеристики теплоэлектрического подвижного состава (373)	366	
58.3	Тяговые электродвигатели . . . . . Основные технические данные (373) Характеристики (374)	373	
58.4	Тяговые электрические аппараты . . .	384	
58.5	Пуск и регулирование скорости электроподвижного состава постоянного тока Способы регулирования скорости при пуске (393) Расчет ступеней пусковых резисторов (395)	393	
58.6	Электрическое торможение электроподвижного состава постоянного тока . . . . . Схемы реостатного торможения с двигателями последовательного возбуждения (397) Электрическое торможение с двигателями смешанного возбуждения (397). Рекуперативное торможение с независимым возбуждением двигателей (398). Электрическое торможение при тиристорно-импульсном регулировании напряжения (399)	396	
58.7	Пуск и регулирование скорости электроподвижного состава переменного тока Виды электроподвижного состава переменного тока (400) Пусковая диаграмма выпрямительного подвижного состава (401). Электрическое торможение выпрямительного подвижного состава (402)	400	
58.8	Силовые схемы электроподвижного состава . . . . . Элементы силовых схем подвижного состава постоянного тока (403) Элементы силовой схемы подвижного состава постоянного тока с тиристорно-импульсным управлением (405) Элементы силовых схем подвижного состава с вентильными преобразователями (408) Аккумуляторный электроподвижной состав (411) Защита электрооборудова-	403	
	ния подвижного состава (411) Системы управления электроподвижным составом (411)		
58.9	Электропривод автономных транспортных машин с электромотор-колесами	412	
58.10	Тяговые расчеты . . . . . Задачи тяговых расчетов (419) Уравнения движения и характеристики его коэффициентов (419). Построение кривых движения (420). Расход энергии на движение поезда (421). Предварительный выбор мощности тягового двигателя (422). Выбор состава (массы) поезда (422)	419	
58.11	Электроснабжение электрифицированного транспорта . . . . . Методы расчета для трамваев и троллейбусов (423) Методы расчета для железнодорожного транспорта (425) Трансформаторы, выпрямители, компенсирующие устройства (429). Параметры тяговых сетей постоянного и переменного тока (430) Технико-экономические параметры и нормативы (431)	423	
58.12	Контактная сеть . . . . . Контактные подвески (434). Контактные провода (434) Опоры контактной сети железнодорожного транспорта (435) Опоры городского электрического транспорта (437) Расчетные нагрузки (438) Расчетные уравнения и методы расчета (438)	434	
58.13	Тяговые подстанции . . . . . Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта (442). Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта на переменном токе (443) Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта на постоянном токе (446) Тяговые подстанции метрополитена (450). Тяговые подстанции городского электротранспорта (454). Общие положения по проектированию тяговых подстанций (456). Потребители собственных нужд тяговых подстанций (458)	442	
	Список литературы . . . . .	458	

### 58.1. Обозначения

$B_T$ , Н	— общая тормозная сила;	$F_{д,м}$ , Н	— электромагнитная сила тяги двигателя на ободе колеса;
$B_{т,с}$ , Н	— тормозная сила двигателя на ободе колеса;	$F_{ч}$ , Н	— часовая (номинальная) сила тяги электровоза;
$b_T$ , Н	— удельная тормозная сила;	$\Delta F$ , Н	— сила тяги двигателя, идущая на преодоление магнитных и механических потерь в двигателе и передаче;
$D_{в,к}$ , мм	— диаметр ведущего колеса по кругу качения;	$f_1$ , Н/т	— удельная сила тяги;
$F_{д}$ , Н	— сила тяги двигателя на ободе колеса;	$I_{в}$ , А	— ток возбуждения последовательной обмотки;

$I_{д.}$ , А	— ток двигателя при тяге;	$z$	— количество двигателей;
$I_{д.т.}$ , А	— ток двигателя при торможении;	$n_{ч}$	— частота вращения двигателя в часовом режиме;
$I_{ср.}$ , А	— ток средний за некоторый промежуток времени;	$q$	— число перегонов на участке;
$I_{ш.}$ , А	— ток в параллельной обмотке;	$r_{д.}$ , Ом	— суммарное сопротивление обмоток двигателя;
$i$ , ‰	— уклон (подъем или спуск), знак «+» ставится при подъеме, знак «-» — при спуске;	$R_{п.}$ , Ом	— пусковое сопротивление;
$i_{п.}$ , ‰	— уклон пускового пути;	$R_{т.}$ , Ом	— тормозное сопротивление;
$i_{т.}$ , ‰	— уклон тормозного пути;	$R_{кр.}$ , Ом	— радиус кривой;
$i_{в.}$ , ‰	— уклон вредного спуска;	$t_{п.}$ , с	— ширина импульса при импульсном регулировании напряжения;
$k_{н.}$	— коэффициент неравномерности по току;	$T$ , с	— период регулирования;
$\lambda$	— коэффициент заполнения;	$U_{д.}$ , В	— напряжение источника питания, приходящееся на один тяговый двигатель;
$G_{сш.}$ , кН	— сцепной вес;	$v$ , км/ч	— скорость движения;
$G_{в.}$ , Т	— масса вагона;	$v_{т.}$ , км/ч	— скорость начала торможения;
$G_{э.}$ , Т	— масса электровоза;	$w_{о.}$ , Н/кН	— удельное основное сопротивление движению;
$G$ , Т	— масса поезда;	$n$	— количество двигателей, соединенных последовательно;
$L$ , км	— длина участка;	$\eta_{д.}$	— КПД двигателя;
$l_{в.}$ , км	— длина вредного участка;	$\eta_{м.}$	— КПД двигателя, учитывающий только механические и магнитные потери;
$l_{кр.}$ , км	— длина кривой;	$\eta_{з.}$	— КПД двигателя на ободу колеса;
$\mu$	— передаточное число;	$\eta_{п.}$	— КПД передачи;
$M_{д.}$ , Н·м	— момент на валу двигателя;	$\Phi$	— магнитный поток двигателя.
$M_{эм.}$ , Н·м	— электромагнитный момент двигателя;		
$m$	— количество двигателей, соединенных параллельно;		
$n_{д.}$ , об/мин	— частота вращения тяговых двигателей;		
$n_{в.}$	— число вагонов в поезде;		
$n_{с.}$	— число секций в электропоезде;		

Примечание. Обозначения по тяговым двигателям (см. табл. 53.8).

## 58.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Электрический подвижной (электроподвижной) состав — состав, в котором тяга на движущих колесах создается тяговыми электродвигателями, а энергия для питания их поступает от стационарных электрических станций. Для электрической тяги в СССР применяются постоянный ток и однофазный переменный ток промышленной частоты. Напряжения и токи, используемые в электрической тяге СССР, приведены в табл. 58.1.

Электроподвижной состав классифицируется по назначению, роду тока, способу питания, устройству пути и т. п.

### Электровозы

В табл. 58.2 приведены основные технические данные электровозов, предназначенных для обслуживания электрифицированных магистральных железных дорог

Электровоз ВЛ23 — постоянного тока, шестиосный, с одним кузовом на двух трехосных сочлененных тележках. На каждой оси установлен тяговый двигатель последовательного возбуждения. Контактрно-реостатная система управления обеспечивает пуск при трех группировках двигателей: последовательной, последовательно-параллельной и параллельной. На каждой из трех группировок предусмотрены четыре ступени ослабления возбуждения, т. е. всего электровоз имеет 15 ходовых позиций в режиме тяги.

Электровоз и весь состав имеют механическое торможение при помощи сжатого воздуха. Возможно движение электровоза с уменьшенной силой тяги при отключении части двигателей при их повреждении. Вся основная аппаратура управления установлена в кузове электровоза.

Электровоз ВЛ8 — постоянного тока, восьмиосный, с четырьмя сочлененными тележками и кузовом, состоящим из двух однотипных секций. На каждую тележку кузов опирается через одну плоскую центральную пятю и одну

Таблица 58.1 Номинальные напряжения и токи, используемые в электрической тяге

Область применения	Ток	Напряжение, В		
		на шинах тяговой подстанции, номинальное $U_{ном}^*$	на токоприемнике подвижного состава	
			номинальное	максимальное $U_{max}^{***}$
Магистральные и пригородные железные дороги	Однофазный, 50 Гц Постоянный	27 500 3300	25 000** 3000	29 000 3850 (4000 при рекуперации)
Промышленный транспорт подземный наземный	Однофазный, 50 Гц	11 000 (6000)	10 000 (6000)	—
	Постоянный	275 3300 1650 600	250 3000 1500 550	— 325 3850 1925 700
Городской транспорт метрополитен трамвай, троллейбус	Постоянный	825	750	975
		600	550	700 (720 при рекуперации)
Речной транспорт буксиры электроходы	Постоянный	—	—	До 1000
		—	—	До 1000
Автономный транспорт тепловозы электромобили электротележки	Постоянный	—	—	До 1000
		—	24—200	—
		—	24—200	—

\*  $U_{ном}$  — на тяговых подстанциях постоянного тока при нагрузке  $I_{ном}$ , на тяговых подстанциях однофазного тока — на выводах обмотки трансформатора при холостом ходе и при номинальном напряжении первичной обмотки трансформатора

\*\* Минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава переменного тока должно быть не ниже 19 000 В

\*\*\*  $U_{max}$  — при отсутствии рекуперативного торможения, при  $I = 0$  и переключении выводов первичной обмотки трансформатора в положение — 5%

дополнительную опору. На каждой оси установлен двигатель мощностью 525 кВт, как на электровозе ВЛ23, поэтому общая мощность двигателей 4200 кВт в 1,33 раза больше, чем на электровозе ВЛ23. В кузове каждой секции установлена тяговая аппаратура управления и вспомогательные машины.

При реостатном пуске двигатели соединяются: все последовательно (8), в две параллельные группы (4+4) и в четыре параллельные группы (2+2+2+2). Каждому из указанных соединений соответствует характеристика при полном и три характеристики при ослабленном возбуждении, т. е. всего на электровозе 15 ходовых позиций.

Кроме пневматического торможения электровоз имеет рекуперативное торможение при тех же группировках двигателей. При

повреждении части двигателей возможен тяговый режим на оставшихся исправных двигателях.

Электровоз ВЛ10 постоянного тока оборудован системой управления, аналогичной системе управления электровоза ВЛ8, а мощность установленных двигателей больше примерно на 30%. Тележки не сочленены, поэтому сила тяги передается через кузов электровоза.

В последние годы ведутся работы по созданию электровоза ВЛ15, являющегося самым мощным в современном электровозостроении.

Помимо перечисленных выше отечественных электровозов постоянного тока в СССР эксплуатируются стационарные пассажирские электровозы постоянного тока типа ЧС2 производства ЧССР.



Таблица 58.2 Основные данные магистральных электровозов

Параметры	ВЛ23	ВЛ8	ВЛ10	ЧС2	ВЛ60 <sup>к</sup>	ВЛ80 <sup>т</sup>	ЧС4
Формула ходовых частей	$3_0 + 3_0$	$2(2_0 + 2_0)$	$2(2_0 - 2_0)$	$3_0 + 3_0$	$3_0 - 3_0$	$2(2_0 - 2_0)$	$3_0 - 3_0$
Ток и номинальное напряжение на токоприемнике	Постоянный, 3000 В			Однофазный, 50 Гц, 25000 В			
Мощность часовая, кВт	3150	4200	5200	4200	4590	6520	5100
Сила тяги часовая, кН	264	353,6	390	162	318,6	451	171
Скорость часовая, км/ч	42,6	43,6	47	91,5	52	51,6	106
Конструктивная скорость (максимальная), км/ч	100	100	100	160	100	110	180
Сцепной вес, кН	1380	1840	1840	1206	1380	1840	1206
Габаритные размеры, мм:							
расстояние между осями сцепных приборов	17020	27520	30440	18920	20800	32440	9980
ширина кузова	3104	3100	3130	3030	3160	3160	3200
высота при опущенном пантографе	5100	5100	5100	5100	5100	5100	5240
Жесткая колесная база, мм	4400	3200	3000	4600	4600	3000	4600
Диаметр движущего колеса, мм	1200	1200	1250	1250	1250	1250	1250
Передаточное число	3,905	3,905	—	1,75	—	4,095	2,64
Тип тяговых двигателей	НБ-406Б	НБ-406Б	ТЛ-2К	АЛ-4846сТ	НБ-412К	НБ-418К6	АЛ-4442пР
Количество тяговых двигателей	6	8	8	6	6	8	6

Примечания 1. Количество членов формулы ходовых частей означает количество тележек, цифры — число осей в тележке, индекс «0» — индивидуальный привод ведущих осей, знак «+» — тележки сочленены между собой, «—» — тележки не сочленены между собой. В скобках заключены цифры, соответствующие тележкам, принадлежащим одной половине кузова

2. Мощность указана на валах тяговых двигателей.

3. На всех электровозах тяговые двигатели имеют независимую вентиляцию

Электровоз ВЛ60<sup>к</sup> шестисосный, переменного тока, по устройству механической части подобен электровозу ВЛ23, т. е. имеет шесть осей, каждая из которых имеет привод от своего тягового двигателя, но несколько больше мощности. Переменное напряжение питания 25 кВ на электровозе понижается при помощи трансформатора и выпрямляется полупроводниковыми выпрямителями. Тяговые двигатели постоянного тока последовательно возбуждения питаются от выпрямителя, напряжение которого за время пуска изменяется 33 ступенями от наименьшего (начального) до наибольшего путем переключения выводов вторичной обмотки трансформатора и других схемных решений. Для увеличения скорости движения предусмотрено ослабление возбуждения тяговых двигателей. Торможение электровоза — механическое.

Электровоз ВЛ80<sup>к</sup> переменного тока по механической части унифицирован с электровозами ВЛ10, а по принципиальному построению электрооборудования — с электровозами ВЛ60<sup>к</sup>. На электровозе установлены тяговые двигатели, имеющие часовую мощность на 30% больше, чем на электровозах

ВЛ60<sup>к</sup>. Электровоз восьмиосный, с четырьмя несочлененными тележками и кузовом, состоящим из двух одинаковых секций.

Электровоз ВЛ80<sup>т</sup> принципиально подобен электровозу ВЛ80<sup>к</sup>, но отличается от него наличием реостатного торможения с независимым возбуждением тяговых машин, для чего на электровозе дополнительно установлены мощные тормозные резисторы, управляемый тиристорный возбудитель тяговых двигателей и система автоматического управления тормозным режимом. Мощность двигателей увеличена до 6520 кВт, что несколько больше, чем у электровоза ВЛ80<sup>к</sup>. В настоящее время это основной магистральный электровоз переменного постоянного тока, выпускаемый в СССР. Электровоз ВЛ80<sup>т</sup> отличается от электровоза ВЛ80<sup>к</sup> только возможностью управления по системе многих единиц.

Помимо перечисленных электровозов переменного тока производства СССР, имеющих в основном грузовое назначение (наибольшая скорость 100—110 км/ч), на железных дорогах страны работают электровозы серии ЧС4 производства ЧССР для пассажирского движения при скорости до 160 км/ч.

Таблица 58.3. Основные данные вагонов метрополитена и пригородных электропоездов

Параметр	Вагоны метрополитена			Пригородные электропоезда		
	Д	Е	81-717 (81-714)	ЭР2	ЭР22	ЭР9П
Масса вагонов без пассажиров, т	36,2	31,7	34(33)	52,5 (38,3, 37)	66(41)	59 (39, 37)
Количество мест для сидения	44	40	40(44)	110 (88, 110)	116 (131)	110 (88, 108)
Количество мест при наполнении 3 чел/м <sup>2</sup>	120	120	260(277) при 8 чел/м <sup>2</sup>	185 (155, 185)	185 (155, 185)	185 (155, 185)
Ток	Постоянный			Постоянный		Перемен- ный
Напряжение сети, В	750	750	750	3000	3000	25000
Конструктивная (максимальная) скорость, км/ч	75	90	90	130	130	130
Среднее ускорение, м/с <sup>2</sup>	1,0	1,3	1,3	0,6	0,7	0,6
Среднее замедление, м.с <sup>2</sup>	1,0	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9
Тип тяговых двигателей	ДК-104Г	ДК-108Г-1	ДК-117А	УРТ-110А	РТ-113А	РТ-51Д
Передаточное число	5,73	5,33	5,33	3,17	3,42	3,17
Диаметр ведущего колеса по кругу катания у моторного вагона, мм	900	780	780	1050*	1050*	1050*

\* У всех электропоездов диаметры колес даны по кругу катания, у прицепных вагонов — 950 мм.

Примечания 1 В скобках данные для прицепного вагона, причем первые цифры — для головных вагонов

2. На каждый моторный вагон устанавливаются четыре тяговых двигателя по количеству осей вагона

3 Вагоны метрополитена типов Д и Е имеют одинаковые размеры кузова и базу ходовых частей (длина кузова 18740 мм, ширина 2700 мм, высота от головки рельсов 3696 мм, база вагона 12600 мм, база тележки 2100 мм) Головные, моторные и прицепные вагоны электропоездов ЭР2, ЭР9П имеют одинаковые габаритные размеры (длина кузова 19600 мм, ширина 3520 мм, высота 4256 мм, база вагона 13300 мм, база тележки 2600 мм моторного и 2400 мм прицепного вагона) Вагоны поезда ЭР22 имеют длину 24500 мм, высоту 4262 мм и базу вагона 18000 мм Остальные размеры, как у поезда ЭР2

Таблица 58.4 Основные данные трамвайных вагонов

Параметр	РВ3-6М	КТМ-5М	ЛМ-68	Т3
Длина кузова, мм	14 080	15 140	15 350	15 104
Ширина кузова, мм	2600	2650	2550	2500
Диаметр колес, мм	700	700	700	700
Передаточное число	7,17	7,143	7,17	7,43
Масса вагона (без пассажиров), т	16,0	18,0	19,0	17,0
Количество мест для сидения	37	32	35	38
Вместимость при наполнении 5 чел/м <sup>2</sup>	119	123	115	115
Часовой режим, мощность, кВт	172	180	180	180
ток, А	324	380	380	300
скорость, км ч	16,5	17,5	17,5	27,4
Конструктивная (максимальная) скорость, км ч	65	65	65	65
Тип тяговых двигателей	ДК-259Д	ДК-259Г	ДК-259Г	ТЕ-022
Число двигателей	4	4	4	4

Примечание. Все вагоны выпускаются для колес 1524 мм и напряжения 550 В

Таблица 58.5. Основные данные троллейбусов

Параметр	ЗИУ-5	ЗИУ-682В (ЗИУ-9)	ЗИУ-682В-1
Габаритные размеры, мм.			
длина кузова (по буферам)	11870	11905	11905
ширина кузова (по обкатателям колес)	2680	2500	2500
высота ненагруженного троллейбуса с опущенными токоприемниками	3530	3600	3600
Диаметр ведущего колеса, мм	1070	1070	1070
Передаточное число	11,3	11,4	11,4
Масса троллейбуса без пассажиров, т	9,6	10,05	10,4
Спешной вес (без нагрузки), кН	53	55	57
Число пассажирских мест для сидения	35	30	30
Вместимость при наполнении 5 чел./м <sup>2</sup>	86	91	91
Напряжение сети, В	550	550	550
Часовой режим:			
мощность, кВт	110	110	150
ток, А	220	220	300
скорость, км/ч	21	21	22,5
Максимальная скорость, км/ч	70	70	70
Тип тяговых двигателей	ДК-207Г	ДК-210А3	ДК-211Б

Примечание. Троллейбусы ЗИУ-682В и ЗИУ-682В-1 имеют унифицированную систему управления, троллейбус ЗИУ-682В-1 рассчитан для работы на трассах со сложным профилем.

Для обслуживания промышленных электрифицированных дорог применяются электрово­зы и тяговые агрегаты различных типов.

На открытых горных разработках используются поставленные из ГДР и ЧССР шестиосные 150-тонные электрово­зы с малой жесткой колесной базой и трехсекционным кузовом, что обеспечивает их работу на участках с малыми радиусами кривых. Эти электрово­зы имеют большую силу тяги, но относительно малую скорость движения.

В последние годы отечественная промышленность поставляет для открытых горных разработок промышленные агрегаты, состоящие из электровозной и тепловозной секций и моторных думпкаров. Основное преимущество этих агрегатов состоит в том, что они способны работать как на участках с контактной сетью, так и без нее. В последнем случае энергия для питания всех тяговых

машин поступает от тепловозной секции. На участке с контактной сетью энергия потребляется из сети. Тяговые агрегаты постоянного тока для напряжения в контактной сети 3 кВ пока выпускаются без тепловозной секции, а тяговые агрегаты переменного тока при напряжении в контактной сети 10 кВ в основном имеют тепловозную секцию. Сила тяги тяговых агрегатов составляет 550–870 кН. Многие из них имеют реостатное торможение.

Для откатки вагонеток в шахтах и обслуживания промышленных предприятий применяются электрово­зы со спешным весом 18–350 кН. Они выполняются для колеи 550–900 мм. По источнику питания эти электрово­зы разделяются на контактные и аккумуляторные. Последние предназначены для обслуживания шахт, опасных по газу и пыли. Для таких шахт в СССР применяются также электрово­зы с питанием от высокочастотной сети через резонансный контур, не имеющий непосредственного контакта с сетью.

Для транспортного обслуживания цехов и складов широко применяются электрокары с грузоподъемностью 0,75–3 т и аккумуляторные автопогрузчики с грузоподъемностью 0,5–1,5 т.

#### Электропоезда, трамваи и троллейбусы

В табл. 58.3–58.5 приведены основные технические данные вагонов метрополитена, пригородных электропоездов, трамвая, а также троллейбусов.

Тяговые двигатели всех вагонов и троллейбусов полностью поддрессорены. Они имеют опорно-рамную подвеску и передают вращающий момент на ведущие колеса через карданную муфту (или карданный вал) и редуктор.

Вспомогательные механизмы, тормозное пневматическое оборудование, силовая регулирующая, защитная и вспомогательная электроаппаратура размещаются под кузовом. Электрическая аппаратура монтируется в специальных закрытых камерах, которые подвешиваются через изоляторы к раме кузова. Часть электроаппаратуры, требующей воздействия или оперативного обслуживания водителем, располагают в кабине водителя.

Все современные вагоны, а иногда и троллейбусы, рассчитаны на управление по системе многих единиц, когда управление поездом осуществляется с одного поста (обычно головного) при помощи поездных проводов, идущих вдоль всех вагонов (или троллейбусов). Управление по системе многих единиц осуществляют только на подвижном

составе, оборудованном автоматической системой управления.

*Электропоезд ЭР2* состоит из пяти-шести секций, каждая из которых содержит один моторный и один прицепной вагоны. В поезде два прицепных вагона являются головными. Каждый из них имеет пост управления (кабину машиниста) и делается обтекаемой формы. Электропоезда оборудованы пневматическими и электропневматическими автотормозами с высоким коэффициентом нажатия тормозных колодок. Для предупреждения заклинивания колесных пар (юз) при малых скоростях усилие нажатия тормозных колодок автоматически снижается по мере снижения скорости при помощи инерционного регулятора.

*Электропоезд ЭР22* состоит из двух секций, каждая из которых имеет два моторных и два прицепных вагона. Каждый моторный вагон имеет пост управления. Быстрый пассажирообмен на остановках обеспечивается наличием трех дверей с двух сторон каждого вагона. Электрооборудование поезда позволяет осуществлять рекуперативно-реостатное служебное торможение, что обеспечивает значительное снижение расходов на тормозные колодки и ремонт колесных пар при существенном снижении расхода электроэнергии. Аналогичную систему управления в последние годы устанавливают на электропоездах ЭР2Р.

*Электропоезд ЭР9П* предназначен для работы на электрифицированных железных дорогах переменного тока. Механическая часть поезда ЭР9П такая же, как у поезда ЭР2. Четыре тяговых двигателя, установленных на моторном вагоне, имеют постоянное последовательно-параллельное соединение. Регулирование скорости поезда производится с помощью силового контроллера, имеющего косвенный привод, путем последовательного подключения секций вторичной обмотки трансформатора, а на последних ступенях контроллера шунтированием обмоток возбуждения тяговых электродвигателей активным сопротивлением. Постоянное напряжение, подводимое к тяговым двигателям, получают с помощью неуправляемого полупроводникового выпрямителя, собранного по мостовой схеме.

*Электропоезд ЭР200* предназначен для обслуживания скоростной пассажирской линии Москва – Ленинград со скоростью движения до 200 км/ч. Поезд оборудован плавным реостатным пуском и торможением, осуществляемыми с помощью тиристорно-импульсной системы управления. При необходимости реостатный служебный тормоз может быть дополнен рельсовыми тормозами, установленными на каждом вагоне. Управление поездом

может осуществляться автоматически с помощью автомата-машиниста и специальной системой автоблокировки.

*Поезда метрополитена* должны развивать высокие ускорения и замедления. Поэтому все вагоны поезда делаются моторными. Вагоны имеют реостатный пуск и реостатное служебное торможение, осуществляемые тяговыми электродвигателями последовательного возбуждения. При реостатном торможении в зоне малых скоростей (8 – 10 км/ч), когда эффективность торможения снижается, автоматически вступает в действие замещающее механическое торможение с пневмоприводом. Замещающее механическое торможение также автоматически вступает в действие на том вагоне, где по каким-либо причинам нарушен алгоритм сборки электрической схемы реостатного торможения. Экстренное торможение обеспечивается тем же механическим тормозом, но с большим усилием.

В последних модификациях вагонов плавное регулирование возбуждения электродвигателей обеспечивается тиристорно-импульсным регулятором.

*Трамвайные вагоны РВ3-6* оборудованы групповой автоматической системой управления, обеспечивающей реостатный пуск и реостатное служебное торможение. Применение тяговых двигателей смешанного возбуждения позволяет для подтормаживания на спусках использовать рекуперативное торможение. Остановочным тормозом является реостатный, который при своем истощении автоматически замещается механическим тормозом, имеющим пневматический привод. При экстренном торможении действуют рельсовый и реостатный (или рельсовый и механический) тормоза. Питание рельсовых тормозов, цепей управления и сигнализации осуществляется от аккумуляторной батареи.

*Трамвайные вагоны КТМ-5М* имеют групповую автоматическую систему управления тяговыми двигателями смешанного возбуждения с преобладанием обмотки последовательного возбуждения. Реостатный пуск и служебное реостатное торможение обеспечивают вагонам высокие динамические показатели – ускорение и замедление. При малых скоростях, а также при неисправностях в схеме реостатное торможение автоматически замещается механическим с соленоидным приводом. Экстренное торможение осуществляется при совместном действии рельсового и механического тормозов с соленоидным приводом. Питание катушек рельсовых тормозов, а также катушек соленоидных приводов осуществляется от аккумуляторной батареи. Эта же батарея параллельно с зарядным генератором обеспечивает

питание схемы управления и цепей сигнализации.

Трамвайные вагоны ЛМ-68 оборудованы системой управления, аналогичной системе управления вагонами КТМ-5М, поэтому указанные вагоны имеют практически одинаковые скоростные и динамические показатели. Отличие вагонов ЛМ-68 от вагонов КТМ-5М состоит в основном в наличии на нем пневмоборудования, которое обеспечивает работу приводов механического тормоза и дверей вагона.

Трамвайные вагоны «Титра» производства ЧССР эксплуатируются во многих городах СССР. Наиболее распространены трамвайные вагоны типов Т-2, Т-3 и их модификации. Вагоны оборудованы многопозиционной автоматической системой управления, которая обеспечивает плавный реостатный пуск и служебное реостатное торможение практически до полной остановки. На вагонах установлены тяговые двигатели последовательного возбуждения. Для ускорения самовозбуждения двигателей при торможении, а также сокращения времени повторного пуска используется так называемый следящий выбег. Вагоны имеют автоматиче-

ское замещение реостатного тормоза механическим колодочным с соленоидным приводом. При экстренном торможении совместно с механическим или реостатным действует релейный тормоз.

Троллейбусы ЗИУ-5 и ЗИУ-9 имеют групповую автоматическую систему управления. В качестве остановочного на всех троллейбусах используется реостатное торможение, действующее самостоятельно или в комбинации с механическим, имеющим пневматический привод. Управление режимом торможения осуществляется от одного органа (педали), глубина нажатия которого определяет интенсивность как реостатного, так и механического тормоза. Причем при малых углах поворота тормозной педали вступает в действие только реостатный тормоз. Увеличивая угол поворота педали, водитель на реостатный тормоз накладывает механический, интенсивность которого также пропорциональна глубине нажатия педали. Экстренное торможение осуществляется путем нажатия тормозной педали до упора. Режим пуска и его интенсивность зависят от угла поворота второй педали (правой).

Таблица 58 6

Параметр	ТЭ-3	2ТЭ-10	2ТЭ-40	ТЭП-60	ТЭМ-2
Назначение		Грузовой		Пассажирский	Грузовой
Формула ходовых частей	$2(3_0 - 3_0)$	$2(3_0 - 3_0)$	$2(3_0 - 3_0)$	$3_0 - 3_0$	$3_0 - 3_0$
Сцепной вес, кН	$2 \times 1230$	$2 \times 1260$	$2 \times 1230$	1260	1180
Нагрузка колесной пары на рельс, кН	210	215	210	215	200
Длина по осям автосцепок, мм	33938	—	37220	19250	16970
Передаточное число	4,41	4,93	—	2,32	4,53
Сила тяги при продолжительном режиме, кН	$2 \times 198$	$2 \times 255$	$2 \times 255$	122	200
Скорость при продолжительном режиме, км/ч	20	25	24	50	12
Максимальная скорость движения, км/ч	100	100	100	100	100
Марка дизеля	2Д100	10Д100	Д70	11Д45А	ПД-1М
Количество дизелей	2	2	2	1	1
Мощность, л. с. (при частоте вращения, об./мин)	$2 \times 2000$ (850)	$2 \times 3000$ (850)	$2 \times 3000$ (1000)	3000 (750)	1200 (750)
Тип главного генератора	МПТ99,47А	ГП-311	РП-310А	ГП-311В	ГП-300Б
Количество генераторов	2	2	2	1	1
Тип тяговых двигателей	ЭДТ-200Б	ЭД-107	ЭД-107	ЭД-108	ЭД-107
Количество двигателей	12	12	12	6	6
Конструктивная скорость, км/ч	100	100	100	160	100

Примечания 1 Все тепловозы построены для колес 1520 мм и имеют диаметры ведущих колес по кругу катания  $D_{в.к} = 1050$  мм.

2 Тепловозы ТЭ-3 (ТЭ-7), 2ТЭ-10, 2ТЭ-40 являются двухсекционными. Обе секции одинаковые, и каждая секция опирается на две трехосные тележки.

3 Мощность указана на валах тяговых двигателей

### Основные характеристики теплоэлектрического подвижного состава

Теплоэлектрическим называется подвижной состав, в котором силу тяги на движущих колесах создают тяговые электродвигатели, питающиеся от теплоэлектрической установки, расположенной на подвижном составе.

Оборудование современного теплоэлектрического подвижного состава состоит из теплового двигателя (обычно дизеля), генератора, вал которого механически соединен с валом теплового двигателя, тяговых электродвигателей, соединенных через редуктор с движущими осями, тормозных устройств, вспомогательного оборудования (вентиляторов, компрессоров, насоса, генератора управления, аккумуляторов и т. д.), аппаратов и приборов для управления и защиты оборудования.

Технические данные основных типов теплоэлектрического подвижного состава, предназначенного для обслуживания магистральных железных дорог, приведены в табл. 58.6.

Одним из главных требований, предъявляемых к электрической передаче, является использование полной мощности дизеля, т. е. генератор должен отдавать постоянную мощность при движении поезда по меняющемуся профилю дороги. В современном теплоэлектрическом подвижном составе поддержание постоянной мощности дизель-генераторной установки производится автоматически. Для обеспечения саморегулирования мощности необходимо, чтобы при повышении тока в тяговых двигателях происходило снижение, а при снижении тока двигателей — увеличение напряжения генератора.

При малой мощности дизель-генераторной установки автоматическое регулирование осуществляется путем подбора параметров обмоток возбуждения генератора. В этом случае генератор выполняют с тремя обмотками возбуждения (независимой, параллельной и последовательной). Последовательная обмотка является размагничивающей по отношению к независимой и параллельной обмоткам.

При большой мощности генераторы делают с обмоткой независимого возбуждения, питаемой от специального возбудителя, и все регулирование осуществляется воздействием на возбудитель.

## 58.3. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

### Основные технические данные

Номинальной мощностью тягового электродвигателя считается часовая мощность  $P_{\text{ч}}$ .

Таблица 58.7 Допустимые предельные превышения температуры частей тяговых двигателей, °С

Часть тягового двигателя	Класс изоляции				
	A	E	B	F	H
Обмотка якоря	85(100)*	105	120	140	160
Обмотка полюсов	85(100)*	115	130	155	180
Коллектор	95	95	95	95	105

\* Температура обмоток измеряется методом сопротивлений, коллектора — термометром. В скобках указаны превышения температуры для часового режима работы.

Иногда в качестве номинальной дается также длительная мощность  $P_{\text{дл}}$ .

Соотношение  $P_{\text{дл}} = k_{\text{в}} P_{\text{ч}}$  зависит от интенсивности вентиляции. Коэффициент вентиляции  $k_{\text{в}}$  имеет следующие значения: 0,3–0,45 для закрытых двигателей; 0,65–0,75 для самовентилируемых небыстроходных; 0,8–0,92 для двигателей с независимой вентиляцией и быстроходных с самовентиляцией.

Допустимые превышения температуры обмоток приведены в табл. 58.7. Если температура окружающего воздуха  $t_{\text{окр}}$  выше 25 °С для машины, расположенной под кузовом, или выше 35 °С для машины, расположенной в кузове, то согласно нормам превышения температуры должны быть соответственно снижены. Изоляция обмоток двигателей относительно корпуса испытывается напряжением промышленной частоты (50 Гц):  $U_{\text{исп}} = 2,25 U_{\text{ном}} + 1500$  В в течение 1 мин.

Максимальная мощность ограничивается допустимым током по коммутации. Максимально допустимый ток по коммутации должен быть не менее двойного часового тока.

Тяговые двигатели должны удовлетворительно работать при максимальной (конструкционной) скорости подвижного состава. Обычно у магистральных электропоездов и электровагонов  $n_{\text{длmax}} = 2n_{\text{ч}}$ , а у тепловозов и промышленных электропоездов  $n_{\text{длmax}} = (2,5 \div 3)n_{\text{ч}}$ .

Для электрической тяги применяются двигатели последовательного или смешанного возбуждения. Для изменения частоты вращения допускается ослабление возбуждения путем шунтирования обмотки последовательного возбуждения резистором либо катушкой реактора и резистором. Обычно возбуждение ослабляют на 50%, а для двигателей некоторых типов на 70–80% (остается 20–30% МДС). У двигателей смешанного возбуждения МДС последовательной обмотки составляет 35–70,

Таблица 58.8 Основные технические

Параметр	НБ-406А, НБ-406Б	НБ-412К <sup>7</sup>	НБ-418К <sup>7</sup>	ТЛ-2
	Для магистральных электровозов			
Напряжение, на которое выполне- на изоляция $U_c$ , В	3000	—	—	3000
Напряжение на коллекторе $U_k$ , В	1500	1600	950	1500
Мощность на валу <sup>1</sup> $P_{\text{в}}/P_{\text{г}}$ , кВт	525/470	775/675	790/740	650.557,5
Ток $I_{\text{в}}/I_{\text{г}}$ , А	380/340	515/450	880/820	466/400
Частота вращения <sup>1</sup> $n_{\text{в}}/n_{\text{г}}$ , об/мин	734/765	850/895	890/915	770, —
Коэффициент полезного действия $\eta_{\text{в}}$ , %	92,84	93,4	97,5/94,8	—
Максимальная частота вращения $n_{\text{max}}$ , об/мин	1550	1680	1950	1625
Якорь				
диаметр $D_{\text{я}}$ , мм	660	740	660	740
длина сердечника $L_{\text{д}}$ , мм	400	440	385	430
размер паза $b_{\text{п}} \times h_{\text{п}}$ , мм	13,7 × 51,0	12 × 43,5	10 × 42,2	12,7 × 47,5
число пазов $Z$	58	75	87	75
Коллектор				
диаметр $D_{\text{к}}$ , мм	565	660	520	660
число пластин $K$	406	525	348	525
Обмотка якоря				
класс изоляции	В	В/Н <sup>2</sup>	В/Н <sup>2</sup>	В/Н <sup>2</sup>
число проводников $N$	812	1050	696	1050
размер проводников $b \times h$ , мм	2(1,08 × 8,6)	2(1 × 7,4)	3,53 × 6,9	2(0,9 × 8)
число параллельных ветвей $2a$	4	6	6	6
Обмотка главных полюсов				
число полюсов $2p$	4	6	6	6
число витков на полюс $W_{\text{г.п}}$	48	20	11	29
размер меди $a \times b$ , мм	4,1 × 32	1,95 × 65	4 × 65	2,26 × 60
Обмотка добавочных полюсов				
число витков на полюс $W_{\text{д.п}}$	34	10	8	21
размер меди $a \times b$ , мм	4,4 × 28	4,1 × 32	12,5 × 12,5	4,1 × 32
Сопротивления обмоток при 100 °С, Ом				
якоря $r_{\text{я}}$	0,0625	0,0402	0,015	—
главных полюсов $r_{\text{г.п}}$	0,0585	0,0308	0,0151	—
добавочных полюсов $r_{\text{д.п}}$	0,0314	0,0129	0,0104	—
Передающее число $\mu$	3,905	3,608	4,095	3,74
Диаметр ведущего колеса $D_{\text{в.к}}$ , мм	1200	1250	1250	1250
Масса двигателя $G_{\text{д}}$ , кг	5400	4550	4350	4700

а параллельной — соответственно 65–30%. Кроме того, обмотку параллельного возбуждения обычно рассчитывают на двойную непродолжительную перегрузку по току. Изменение частоты вращения двигателей с преобладающей параллельной обмоткой осуществляется изменением тока в обмотке параллельного возбуждения, а с преобладающей последовательной обмоткой — шунтированием обмотки последовательного возбуждения. Основные технические данные тяговых электродвигателей приведены в табл. 58.8. Чертеж двигателя типа НБ-406А — см. рис. 58.1. Расчет и проектирование тяговых двигателей — см. [58.1, 58.11].

### Характеристики

Электрохимические на валу двигателя

$$n_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{д}} r_{\text{д}}}{c_1 \Phi} = f(I_{\text{д}});$$

$$M_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}} I_{\text{д}} \eta_{\text{д}}}{0,105 n_{\text{д}}} = f(I_{\text{д}});$$

$$\eta_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}} I_{\text{д}} - \Delta P}{U_{\text{д}} I_{\text{д}}},$$

где  $c_1 = pN/60a$  — постоянная величина, определяемая параметрами обмотки якоря;  $\Delta P$  — потери мощности в двигателе, Вт.

## данные тяговых электродвигателей

ЭДР-25 <sup>1</sup>	ДК-106Б	УРТ-110А	РТ-51Д	ДК-108Г1 <sup>4</sup>
Для рудничных электровозов	Для пригородных электропоездов			Для вагонов метрополитена
250	3000	3000	1650	750
250	1500	1500	825	375
25/—	220/145 (187/100)	200/—(180)	200/—	68/—
112,5/—	146/115 (136/105)	146/115 (132/100)	266/—	210/182
900/—	1140/1320 (830/1140)	1145/1315 (850/930)	1150/—	1530/—
88,5	92,8	92,8	90,5	87,6
—	2080	2080	2080	3250
280	520	520	520	280
155	300	300	230	260
9,1 × 37,5	13,5 × 43	13,6 × 52	13,8 × 43	11,1 × 31
35	47	47	47	35
245	460	460	460	245
105	329	329	235	175
А	В	В	В	В
420	658	658	470	350
2,1 × 7,4	1,08 × 13,5	1,0 × 13,5	1,81 × 14,5	1,35 × 10
2	2	2	2	2
4	4	4	4	4
32,5	78	76	70	30 (656)
5,1 × 7,4	1,81 × 22	1,68 × 22	1,95 × 22	1,81 × 22 (Ø0,59)
34,5	57	56	37	26
4,7 × 6,9	1,81 × 22	1,81 × 25	3,05 × 25	—
0,0595	0,215	0,22	0,072	0,086
0,0574	0,239	0,244	0,172	0,0710 (190)
0,0848	0,106	0,0938	0,034	0,036
10,97	3,17	3,17	3,17	5,33
680	1050	1050	1050	780
440	2200	2200	2000	615

Эти характеристики даются при постоянном напряжении на зажимах двигателя (обычно номинальном), нагретых обмотках ( $t = 75^\circ\text{C}$  при изоляции класса А и  $t = 100^\circ\text{C}$  при изоляции класса В) и постоянном коэффициенте регулирования возбуждения  $\alpha$  для двигателей последовательного возбуждения или при постоянном токе в параллельной обмотке для двигателей смешанного возбуждения. Коэффициент регулирования возбуждения  $\alpha$ , %, характеризует степень ослабления возбуждения двигателя и определяется отношением МДС при ослабленном возбуждении  $F_{\text{о,п}}$  к МДС при полном возбуждении  $F_{\text{п,п}}$

$$\alpha = \frac{F_{\text{о,п}}}{F_{\text{п,п}}} 100.$$

В двигателях последовательного возбуждения под полным возбуждением подразумевается такое возбуждение двигателя, когда весь ток якоря протекает по обмотке возбуждения. В двигателе смешанного возбуждения под полным возбуждением подразумевается такое возбуждение, когда по обмотке параллельного возбуждения протекает максимальный ток.

*Электромеханические, отнесенные к ободу колеса,*

$v = f(I_{\text{д}})$ ;  $F_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ ;  $\eta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$  строятся по характеристикам  $n_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ ;  $M_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ ;  $\eta_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$  соответственно формулам:

$$v = \frac{3,6\pi D_{\text{в,к}} n_{\text{д}}}{60\mu} = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{д}} r_{\text{д}}}{c\Phi}$$



Параметр	ДК-117	ДК-259Г <sup>5</sup>	ДК-259Д <sup>6</sup>	ДК-261А <sup>3</sup>	ДК-261Б <sup>3,5</sup>
	Для вагонов метрополитена	Для трамвайных вагонов			
Напряжение, на которое выполнена изоляция $U_c$ , В	750	550	550	550	550
Напряжение на коллекторе $U_d$ , В	375	275	275	275	275
Мощность на валу <sup>1</sup> $P_q/P_z$ , кВт	110/-	45/-	43/-	60/-	60/-
Ток $I_q/I_z$ , А	330/280	176/135 (-/2,0)	176/135	250/200	250/200 (-/2,4)
Частота вращения <sup>1</sup> $n_q/n_z$ , об/мин	1480/-	1220/-	1120/-	1700/-	1500/-
Коэффициент полезного действия $\eta_q$ , %	88,9	88,0	87,0	87,3	87,3
Максимальная частота вращения $n_{max}$ , об/мин	3600	4100	3800	4060	4060
Якорь					
диаметр $D_a$ , мм	306	280	280	280	280
длина сердечника $L_d$ , мм	300	205	205	205	205
размер паза $b_n \times h_n$ , мм	9,4 × 23,2	11,1 × 31	11,1 × 31	11,5 × 28	11,5 × 28
число пазов $Z$	42	35	35	35	35
Коллектор:					
диаметр $D_k$ , мм	256	245	245	245	245
число пластин $K$	210	175	175	139	139
Обмотка якоря:					
класс изоляции	$H$	$H/F^2$	$H/F^2$	$H/F^2$	$H/F^2$
число проводников $N$	420	350	350	278	278
размер проводников $b \times h$ , мм	1,25 × 8,5	1,45 × 10	1,45 × 10	2 × 10	2 × 10
число параллельных ветвей $2a$	4	2	2	2	2
Обмотка главных полюсов					
число полюсов $2p$	4	4	4	4	4
число витков на полюс $W_{г,п}$	26	22 (630)	8 (324)	30	19 (650)
размер меди $a \times b$ , мм	2,26 × 25	1,25 × 19,5 ( $\varnothing$ 0,96)	2,83 × 12,5 ( $\varnothing$ 1,68)	1,81 × 22	1,25 × 25 ( $\varnothing$ 1,0)
Обмотка добавочных полюсов:					
число витков на полюс $W_{д,п}$	15	26	26	20	20
размер меди $a \times b$ , мм	3,28 × 25	1,81 × 22	1,81 × 22	2,44 × 22	2,44 × 22
Сопротивление обмоток при 100 °С, Ом					
якоря $r_y$	0,041	0,075	0,072	0,0455	0,0455
главных полюсов $r_{г,п}$	0,045	0,048 (67,3)	0,018 (11,2)	0,0532	0,0443 (66,1)
добавочных полюсов $r_{д,п}$	0,0135	0,041	0,041	0,0201	0,0201
Передающее число $\mu$	5,33	7,17	7,17	7,17	7,17
Диаметр ведущего колеса $D_{в,к}$ , мм	780	700	700	700	700
Масса двигателя $G_d$ , кг	750	450	460	465	465

<sup>1</sup> В числителе приведены данные часового режима, в знаменателе — продолжительного режима. У двия для нормального возбуждения, а в скобках — для усиленного возбуждения.

<sup>2</sup> В числителе указан класс изоляции обмотки якоря, в знаменателе — обмоток главных и добавочных

<sup>3</sup> Двигатель ЭДР-25 имеет закрытое исполнение. Сопротивления обмоток этого двигателя даны при

<sup>4</sup> У двигателей ДК-108Г1, ДК-211Б имеется подмагничивающая обмотка, которая используется только

<sup>5</sup> Двигатели ДК-259Г, ДК-207Г, ДК-210А-3, ДК-261Б смешанного возбуждения с преобладанием обмотки обмотки независимого возбуждения.

<sup>6</sup> Двигатель ДК-259Д смешанного возбуждения с преобладанием обмотки параллельного возбуждения

<sup>7</sup> Двигатели НБ-412К, НБ-418К имеют компенсационную обмотку (в НБ-412К обмотка имеет шесть катушек из меди 4,4 × 35 мм по шесть витков)

Продолжение табл. 58.8

ТЕ-022	ДК-207Г <sup>5</sup>	ДК-210А-3 <sup>5</sup>	ДК-211А <sup>3</sup>	ДК-211Б <sup>3,4</sup>
Для троллейбусов				
600	550	550	550	550
300	550	550	550	550
45/—	110/—	110/—	150/—	150/—
150/—	220/185	220/185	300/250	300/250
1750/—	1470/—	1470/—	1750/—	1860/—
91,0	91,0	90,4	91,3	91,3
4200	3900	3900	3900	3900
220	280	280	306	306
220	350	310	370	370
10,5 × 28	11,1 × 31	11,35 × 31	9,4 × 23,2	9,4 × 23,2
29	35	35	42	42
185	245	245	256	256
145	175	175	210	210
—	<i>B</i>	<i>H/F<sup>2</sup></i>	<i>H/F<sup>2</sup></i>	<i>H/F<sup>2</sup></i>
290	350	350	420	420
—	1,45 × 10	1,56 × 10	2(1,25 × 8,5)	2(1,25 × 8,5)
2	2	2	4	4
4	4	4	4	4
20	19(840)	24(930)	27	25(60)
2 × 18	2,83 × 16,8 (∅ 1,0)	1,25 × 25 (∅ 0,96)	1,95 × 25	1,95 × 25 (1,25 × 2,5)
22	26	26	15	15
2 × 18	2,26 × 22	2,44 × 18	3,28 × 25	3,28 × 22
0,0745	0,092	0,0816	0,044	0,0440
0,0355	0,051(155)	0,063(126)	0,054	0,05(2,6)
0,0335	0,043	0,0465	0,016	0,018
7,43	12	11,3	11,4	11,4
700	1070	1070	1070	1070
320	725	700	900	900

двигателей ДК-106Б, УРТ-110А, РТ-51Д, ДК-108Г1, имеющих усиленное возбуждение, все значения указаны

полюсов

75°C. Сопротивления обмоток двигателей ДК-261А, ДК-261Б, ДК-211А и ДК-211Б даны при 130°C при торможении. В скобках указан диаметр (размеры) провода, число витков и сопротивление этой обмотки последовательного возбуждения. В скобках указаны ток, число витков, диаметр провода и сопротивление

В скобках указаны число витков, диаметр провода и сопротивление этой обмотки катушек из меди 3,8 × 22 мм по 10 витков, расположенных в пяти пазах, в НБ-418К то же шесть

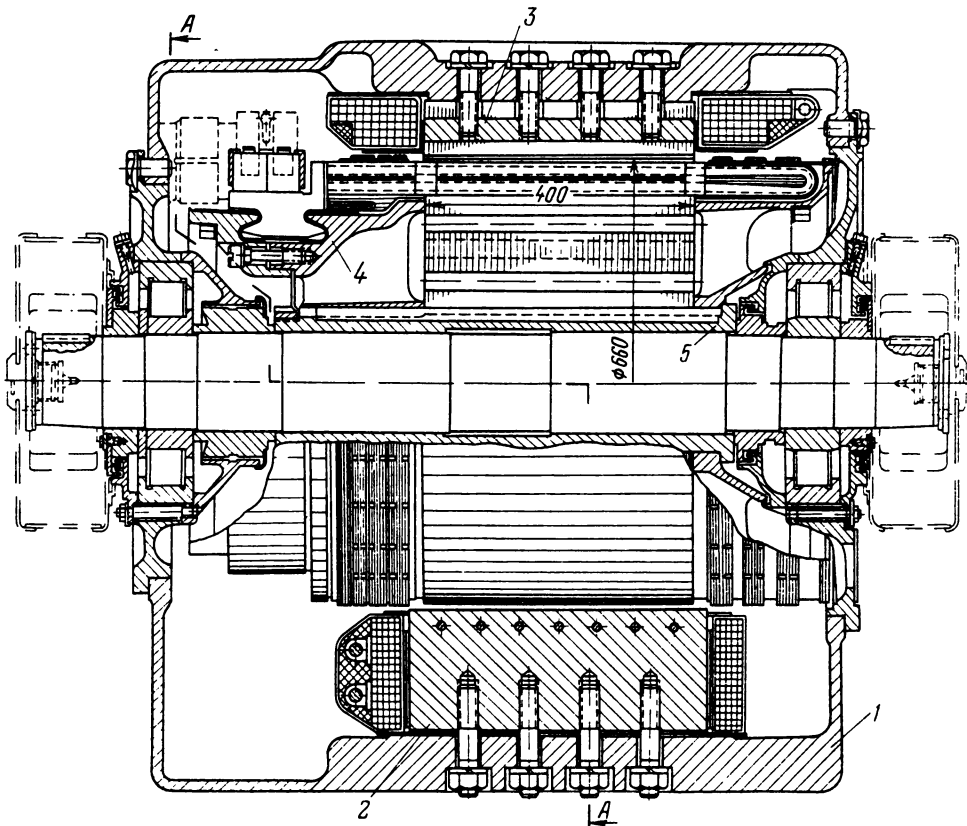
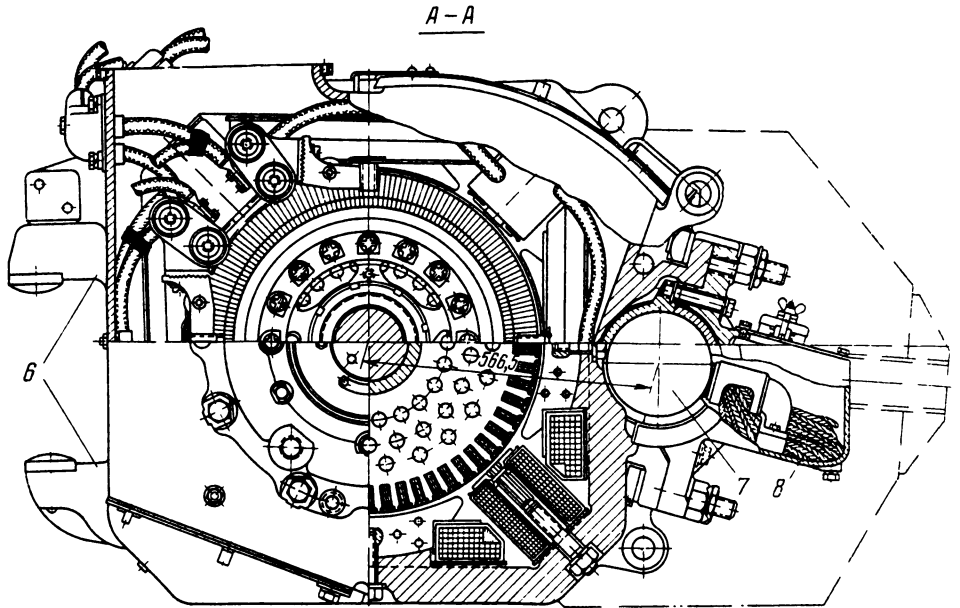


Рис. 58.1. Тяговый двигатель НБ-406А:

1 — остов, 2 — сердечник дополнительного полюса; 3 — сердечник главного полюса; 4 — корпус коллектора; 5 — втулка якоря, 6 — приливы для подвески двигателя к раме тележки; 7 — ось колесной пары; 8 — смазка польстерная

Таблица 58 9 Потери в передаче и моторно-осевых подшипниках

$P_d/P_c, \%$	25	30	40	50	60	70	100	150	200
$\Delta P_n, \%$	8,5	6,7	4,4	3,2	2,7	2,5	2,5	3,0	3,5

Примечание. Приведенные данные не распространяются на электроподвижной состав с двухступенчатыми передачами, которые применяются на троллейбусах трамвайных вагонов и рудничных электровозах

$$c = c_1 \frac{60\mu}{3,6\pi D_{в,к}}; F_d = 2 \frac{\mu}{D_{в,к}} M_d \eta_d \eta_n = 3,6 \frac{U_d I_d \eta_d \eta_n}{v}$$

где  $\eta_n = 1 - \frac{\Delta P_n}{100}$  — КПД тяговой передачи;  $\Delta P_n, \%$  — потери в передаче (табл. 58.9);  $\mu$  — передаточное число редуктора.

При построении характеристик двигателей на ободе колеса для перечисленных видов

подвижного состава потери в передаче принимаются по опытным данным.

Сила тяги двигателя на ободе колеса иногда выражается в несколько ином виде, например:

$$F_d = 3,6 \frac{E I_d}{v} \eta_m \eta_n = 3,6 c \Phi I_d \eta_m \eta_n = F_{д,эм} - \Delta F; F_{д,эм} = 3,6 c \Phi I_d; \Delta F = 3,6 \frac{U_d I_d (1 - \eta_d) - I_d^2 r_d}{v}$$

Полезная мощность на ободе колеса, кВт,  
 $P = F_d v / 3600 = U_d I_d \eta_d 10^{-3}$ .

Тяговые характеристики  $F_d = f(v)$  строятся по характеристикам  $F_d = f(I_d)$  и  $v = f(I_d)$ . При построении характеристик по оси силы тяги откладывают  $\pm F_d$ , а при построении в удельных значениях откладывают удельную силу тяги

$$f_k = \frac{F_d}{gG} z.$$

Таблица 58 10 Электромеханические характеристики тяговых двигателей НБ-406А и НБ-406Б, относенные к ободу колеса, при  $U_d = 1500$  В,  $D_{в,к} = 1200$  мм и  $\mu = 3,905$

$I_d, A$	Полное возбуждение ( $\gamma = 100\%$ )			Ослабленное возбуждение ( $\alpha = 55\%$ )			Ослабленное возбуждение ( $\gamma = 36\%$ )		
	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_d, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_d, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_d, \%$
100	78	6360	—	—	—	—	—	—	—
150	61	11 900	86,5	95	7850	87,5	—	—	—
200	53,5	18 100	90,1	76	12 900	91,1	—	—	—
250	49,5	25 500	91,5	65,5	19 100	93	90	13 250	—
300	46,2	32 000	91,6	59,2	25 000	94	80,5	18 400	93,5
350	43,7	39 200	91,2	55,5	31 500	93,8	73,3	24 000	94,1
400	42	46 500	90,3	52,5	37 700	93,3	67,5	29 400	94,2
450	40,2	53 500	89,1	50,3	44 000	92,5	64,2	35 300	94
500	38,8	60 800	87,9	48,5	50 500	91,9	60	41 200	93,3
600	36,6	77 500	85	45,5	63 500	89,9	55,6	52 500	91,3

Таблица 58 11 Электромеханические характеристики тягового двигателя НБ-412К, относенные к ободу колеса, при  $U_d = 1600$  В,  $D_{в,к} = 1250$  мм,  $\mu = 3,608$

$I_d, A$	$\gamma = 0,95$			$\alpha = 0,71$		$\gamma = 0,55$		$\alpha = 0,46$		
	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_d$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_d$
150	100	7850	0,83	—	—	—	—	—	—	—
200	80	10 750	0,87	98	10 300	—	—	—	—	—
250	70	17 600	0,89	82	13 700	100	12 750	—	—	—
300	65	24 000	0,902	74	20 600	85	18 600	96	16 650	0,908
400	58	37 200	0,910	65	31 400	72	29 400	79	26 400	0,913
500	52	49 000	0,910	69	44 100	65	40 100	70	37 300	0,915
600	50	62 700	0,908	55	56 900	59,5	52 500	64	48 500	0,910
700	48	75 500	0,895	51	68 500	55,5	62 600	59	58 800	0,909
800	46	88 200	0,89	49,5	80 500	53	74 500	55,5	68 600	0,90

Таблица 58.12. Электромеханические характеристики тяговых двигателей пригородных электропоездов, отнесенные к ободу колеса, при  $D_{в.к} = 1050$  мм,  $\mu = 3,17$ 

ДК-106Б при $U_d = 1500$ В						
$I_d$ , А	Усиленное возбуждение ( $\alpha = 100\%$ )			Нормальное возбуждение ( $\alpha = 50\%$ )		
	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$ , %	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$ , %
50	86,5	2450	81	—	—	—
70	72	4660	86,3	122	2650	86
90	63	6680	88,5	98	4360	88,5
120	55,8	10200	88,5	79,5	7300	89,5
160	49,5	15240	87,5	68	11270	88,7
200	45,7	20690	86,5	61	15580	88
240	42,7	25780	84,5	56	20090	87
280	40,3	30800	82,5	52	24300	86,3

Продолжение табл. 58.12

РТ-51Д при $U_d = 825$ В									
$I_d$ , А	Усиленное возбуждение ( $\alpha = 92,5\%$ )			Нормальное возбуждение ( $\alpha = 53,5\%$ )			Ослабленное возбуждение ( $\alpha = 32\%$ )		
	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$ , %	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$ , %	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$ , %
100	66	4070	—	90	2940	—	133	1470	—
120	58,5	5790	87,5	78	4120	87	119	2450	82,5
160	52	8040	88	65	6370	89	96,5	4410	87,5
200	48	10790	87,25	59	9120	88,75	83,5	6270	88,75
240	45	12640	86	55	11570	88	75,5	8428	89,25
280	42	16560	85	51,5	14210	87,25	69,5	10680	89
360	38	22740	82	46,5	19400	85	62	15100	87,5
440	34,5	29000	79,5	41,5	25190	83	55	21560	86

Таблица 58.13. Электромеханические характеристики тягового двигателя НБ-418К, отнесенные к ободу колеса, при  $U_d = 950$  В,  $D_{в.к} = 1250$  мм,  $\mu = 4,095$ 

$I_d$ , А	$\alpha = 0,96$			$\alpha = 0,7$		$\alpha = 0,52$		$\alpha = 0,43$		
	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$v$ , км/ч	$F_d$ , Н	$\eta_d$
300	90	5800	0,88	—	—	—	—	—	—	—
400	73	17150	0,904	90,9	14210	—	—	—	—	0,912
500	64,9	24690	0,92	77	21168	93,5	17640	—	—	0,92
600	60	31850	0,923	69	27930	80,5	24010	96,5	20580	0,93
700	56,5	39600	0,922	63	35280	72,1	31164	85	27830	0,93
800	53,5	47300	0,921	59,1	42630	67	38220	76,8	34496	0,93
880	51,2	53900	0,92	56,8	48700	63,8	44100	71,4	40180	0,928
1000	49,5	63800	0,915	54,2	57820	69,5	52920	66	48510	0,923
1200	46,4	80850	0,903	50,7	74480	55	68110	60	63200	0,918
1400	43,8	98000	0,892	47,5	91920	52	84280	56	78790	0,908
1600	41,8	116100	0,879	45	109760	49,5	29960	52,8	94080	0,893

Таблица 58.14 Электромеханические характеристики тяговых двигателей рудничных электровозов, отнесенные к ободу колеса, при  $D_{в,к} = 680$  мм,  $\mu = 10,97$ 

$I_d, A$	ЭДР-10			ЭДР-25					
	$U_d = 120$ В			$U_d = 60$ В			$U_d = 250$ В		
	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$
30	15,5	588	70,5	7,7	588	60	21,6	686	65
50	10,3	1670	80	4,9	1670	68	14,6	2450	80,4
80	7,9	3580	81	3,4	3580	69,5	11,7	5100	83,8
110	6,9	5440	79	2,9	5440	65,5	10,6	7650	83,2
140	6,3	7300	76	2,4	7300	60,5	9,8	10290	81,3
180	5,7	9900	71,5	2	9900	51,5	9	13820	78,2
220	5,2	—	66,5	1,65	—	42,5	—	—	—

Таблица 58.15. Электромеханические характеристики тягового двигателя ДК-108Г1, вагонов метрополитена, отнесенные к ободу колеса, при  $U_d = 375$  В,  $D_{в,к} = 780$  мм,  $\mu = 5,33$ 

$I_d, A$	Усиленное возбуждение ( $\alpha = 100\%$ )			Нормальное возбуждение ( $\alpha = 50\%$ )			Ослабленное возбуждение ( $\alpha = 35\%$ )		
	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$
50	72,5	686	72,5	—	—	—	—	—	—
75	51,5	1770	83	—	980	—	—	—	—
100	41,5	2940	86,2	72,5	1770	82,3	—	—	—
125	36,2	4250	87	58,4	2700	86	87	1666	82,3
150	32,5	5540	86,7	50	3730	87	71,5	2450	85,6
200	27,8	8280	85	41	5830	86,3	57	4165	86,3
250	25	11170	82,5	36,2	8090	84,5	49	6076	85
300	22,8	14210	80	32,5	10540	83	43,1	8036	83,5
350	21,2	17450	77,7	29,5	13130	81	38,3	10290	81,6
400	20	20880	75,3	26,7	25880	78,7	34	12640	79,5

Таблица 58.16. Электромеханические характеристики тягового двигателя ДК-117 вагонов метрополитена, отнесенные к ободу колеса, при  $U_d = 375$  В,  $D_{в,к} = 780$  мм,  $\mu = 5,33$ 

$I_d, A$	Усиленное возбуждение ( $\alpha = 100\%$ )			Нормальное возбуждение ( $\alpha = 50\%$ )			Ослабленное возбуждение ( $\alpha = 35\%$ )		
	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$	$v, \text{км/ч}$	$F_d, \text{Н}$	$\eta_3, \%$
100	57,5	1860	82,5	—	—	—	—	—	—
125	49	2790	84,5	—	—	—	—	—	—
150	43,8	3920	85,5	78	2350	84,3	—	—	—
200	37,5	6220	86,4	60	3820	87	91,5	2400	83,5
250	33,6	8720	86	51,5	5680	87,6	76	3680	85,8
300	31,9	11270	85,5	45,1	7840	87,8	66,7	5100	87
350	28,7	13920	84,7	41	10090	87,6	60,1	6660	87,6
400	27	16610	83,9	38	12310	87,4	55,5	8330	87,5

Таблица 58.17 Электромеханические характеристики тяговых двигателей

$I_d, A$	ДК-207Г при $\mu = 12$						
	$\alpha = 100\%, I_{ш} = 0$			$\alpha = 100\%, I_{ш} = 1,67 A$			$\alpha = 100\%$
	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$\eta_3, \%$	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$\eta_3, \%$	$v, км/ч$
0	—	—	—	48	—	—	—
50	75	980	70	32,5	2450	85	32,25
75	48	2550	85	28	4750	89,5	29,25
100	38	4700	89,5	26	6860	91	27
150	28	9210	92	23	12 150	92,5	24
200	24	14 700	90	20,5	17 640	90	21,5
250	21,5	21 170	89	19	23 520	89	20
300	19,5	27 440	87,5	17,5	29 790	87,5	18,6
350	17,5	34 300	86	16,5	36 260	86	17,5
400	16,5	41 160	84	15,5	42 630	84	16,75

Таблица 58.18 Электромеханические характеристики тягового двигателя ДК-259Г трамвайных вагонов, отнесенные к ободу колеса, при  $U_d = 275 В$ ,  $D_{в,к} = 700 мм$ ,  $\mu = 7,17$ 

$I_d, A$	$I_{ш} = 2 A, \alpha = 100\%$			$I_{ш} = 0, \alpha = 100\%$			$I_{ш} = 0, \alpha = 50\%$		
	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$\eta_3, \%$	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$\eta_3, \%$	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$\eta_3, \%$
0	48	—	—	—	—	—	—	—	—
50	27	1666	80	50	784	65	—	98	—
75	23	2940	85	34	1860	77	67	880	68
100	21	3920	86	28	2940	83	52,5	1770	78
150	19	6760	88	22	5880	87	37	3430	85
200	17	9610	85	19	8820	84	30	5684	85,5
250	15	12940	83	17	12250	82	26	7840	84,5
300	14	16470	80	15	15490	78	23	10290	82

Таблица 58.19 Электромеханические характеристики двигателя ДК-259Д трамвайных вагонов, отнесенные к ободу колеса, при  $U_d = 275В$ ,  $D_{в,к} = 700 мм$ ,  $\mu = 7,17$ 

$I_d, A$	$I_{ш} = 11,8 A$				$I_{ш} = 0,25 A$			
	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$B_d, Н$	$\eta_3, \%$	$v, км/ч$	$F_d, Н$	$B_d, Н$	$\eta_3, \%$
-300	51,5	—	6580	—	—	—	—	—
-250	40	—	6850	—	—	—	—	—
-200	32,3	—	6610	—	—	—	—	—
-150	27,2	—	5830	—	—	—	—	—
-100	24,5	—	4400	—	—	—	—	—
-50	22,5	—	2500	—	—	—	—	—
0	21	—	—	—	—	—	—	—
50	19,3	2100	—	84,5	—	—	—	—
100	18,4	4670	—	89,0	57	1470	—	81,5
150	17,5	7400	—	88,7	43,3	2950	—	86
200	16,7	10130	—	87,2	36,3	4750	—	85,8
250	16	12800	—	85,2	32,1	6600	—	84,5
300	15,5	15200	—	83,0	28,8	8620	—	83

телей троллейбусов, отнесенные к ободу колеса, при  $U_1 = 550$  В,  $D_{в.к} = 1070$  мм

ДК-210А-3 при  $\mu = 11,3$

$I_{ш} = 2,7$ А		$\alpha = 50\%$ , $I_{ш} = 1,7$ А			$\alpha = 31\%$ , $I_{ш} = 0,5$ А		
$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %
—	—	—	—	—	—	—	—
2550	80,75	38	1960	79	—	—	—
4500	85,25	34,5	3720	83,5	—	—	—
6660	88	32,25	5390	87,5	—	—	—
11650	89	29	9200	89,7	63	—	—
16650	88,5	26,75	13000	89,5	54	6560	88
21600	87,5	25,2	17000	88,5	48	9100	88,75
27000	86	24	21600	87,25	43,25	11950	88,25
33100	84,25	22,75	26200	85,75	40	15000	87,5
39500	82,25	22	31400	84,50	38	18000	86,25

Таблица 58 20 Электромеханические характеристики двигателей трамвайных вагонов, отнесенные к ободу колеса, при  $U_1 = 275$  В,  $D_{в.к} = 700$  мм,  $\mu = 7,17$

$I_{д}$ , А	ДК-261А						ДК-261Б					
	$\alpha = 100\%$			$\alpha = 30\%$			$\alpha = 100\%$ , $I_{ш} = 2,4$ А			$\alpha = 40\%$ , $I_{ш} = 2,4$ А		
	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	33,6	2840	88	—	—	—	26,8	3090	83,5	85,3	—	—
150	26,6	5180	87,5	63,6	2030	86	23,7	5450	87	61,5	2100	81,3
200	22,2	7800	86,5	52,5	3550	88	22,3	7880	86,5	50,3	3480	86,9
250	20,0	10780	85	38,2	5070	87,5	21,2	10200	85,1	44,8	4870	87,3
300	18,5	1360	83	33,4	6700	87	20,1	12600	83,2	41,2	6300	86,7
350	—	—	—	—	—	—	19,3	15200	81	38,3	7700	85,5

Таблица 58 21 Электромеханические характеристики тяговых двигателей троллейбусов, приведенные к ободу колеса, при  $U_1 = 550$  В,  $D_{в.к} = 1070$  мм,  $\mu = 11,4$

$I_{д}$ , А	ДК-211А						ДК-211Б					
	$\alpha = 100\%$			$\alpha = 35\%$			$\alpha = 100\%$			$\alpha = 29\%$		
	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %	$v$ , км/ч	$F_{д}$ , Н	$\eta_3$ , %
100	40	4169	86	—	—	—	41,3	3875	86,2	—	—	—
150	31,3	8535	89	67,3	—	—	32,3	8339	88,8	—	—	—
200	27	13 145	89,5	51	7161	92	27,2	12 949	89,5	67,2	5297	90,3
250	24,3	18 050	89,1	43,3	10 595	92,5	24,2	17 950	89,3	55	8142	91,5
300	22,7	23 152	88,5	38,7	14 323	92,2	22,4	23 152	88,6	48,2	11 282	91,7
350	21,3	28 498	87,5	35,1	18 198	91,8	21,4	28 547	87,4	43,8	14 568	91,5
400	20,4	33 746	86,2	32,2	22 367	91,2	20,8	33 845	86	40,3	17 952	91



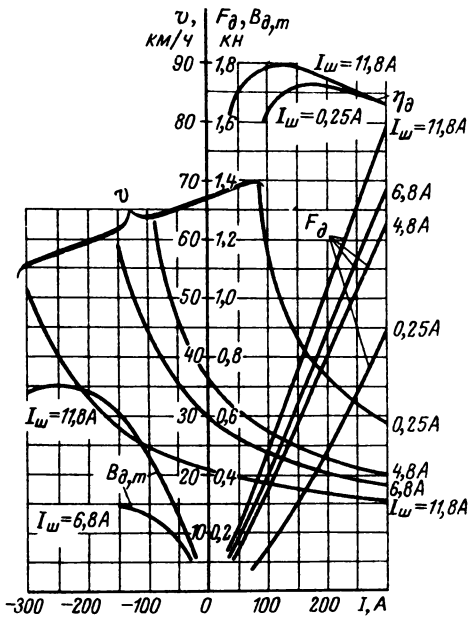


Рис. 58.2. Электромеханические характеристики тягового двигателя ДК-259А на ободу колеса без учета потерь в редукторе при  $U_d = 275$  В.  $D_{в.к} = 700$  мм,  $\mu = 7,17$

Аналогично строятся характеристики уско-ряющих сил тяги

$$f_d = f_k - w_0.$$

Процентные и универсальные характери-стики. Процентные электромеханические или тяговые характеристики строятся по соответ-

ствующим характеристикам путем деления  $I_d$ ,  $v$ ,  $F_d$  на их значения при номинальном (часовом) режиме.

Универсальные характеристики получают из процентных как средние процентные харак-теристики ряда двигателей данного вида электроподвижного состава. Электромеханиче-ские характеристики тяговых двигателей при-ведены на рис. 58.2 и в табл. 58.10–58.21.

### 58.4. ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Конструкция тяговых электрических аппа-ратов в большинстве случаев основана на тех же принципах, что и электрических аппа-ратов общепромышленного назначения, тем не менее вследствие специфических условий работы и размещения они имеют своеобраз-ные исполнения.

К тяговым электроаппаратам предъявля-ется ряд специфических требований: повышенная механическая прочность, вибростойкость элементов конструкции и креплений, компакт-ность, малая масса, стойкость к коррозии и т. п. Аппараты работают при относительно высоком номинальном напряжении в неблаго-приятных условиях окружающей среды, в том числе при высоком содержании пыли в воз-духе.

На подвижном составе применяются пре-имущественно специальные аппараты, вписы-вающиеся в схему и габарит подвижного состава. Широко применяются силовые аппа-раты с электропневматическим индивидуаль-ным и групповым приводом, а также с груп-повым электродвигательным приводом, обес-печивающими большую компактность и мень-шую массу аппаратов.

Таблица 58.22 Токоприемники

Параметр	П-3, П-3А, П-5А	П-1Б, (П-1В)	ТЛ-14М, (ТЛ-13У)	ДГ-11А
Напряжение номинальное, В	3000	3000 (25000)	25000	550, 250
Ток продолжительный, А	2100	1200	1200 (610)	100
Пределы рабочей частоты, мм	400–1900	400–1900	400–1900	—
Давление на контактный провод в преде-лах рабочей высоты, Н				
при подъеме не менее	80	70	60	50
при опускании не более	120	110	90	65
Скорость наибольшая, км/ч	110	140	160	30
Масса с изоляторами, кг	340	320 (450)	315	—
Конструктивная особенность токоприем-ника		Центральный пантограф		
Применение		Магистральные и тяжелые промышленные электровозы, электропоезда		Ручничные электровозы

Продолжение табл. 58.22

Параметр	БП-30-02-02	М-1Б	РТ-6И	ТР-3А
Напряжение номинальное, В	1500	550	550	750
Ток продолжительный, А	1000	380	190	800
Пределы рабочей частоты, мГц	1515–2115	2400	700–3000	160–185
Давление на контактный провод в пределах рабочей высоты, Н				
при подъеме не менее	20	50	95	80
при опускании не более	100	70	150	320
Скорость наибольшая, км/ч	70	65	70	90
Масса с изоляторами, кг	275	82	79	42
Конструктивная особенность гопкоприемника	Боковой пантограф	Дуговой	Штанговый	Башмачный
Применение	Промышленные электро- возы	Трамвай	Троллейбусы	Вагоны метрополи- тена

Примечания 1. Пантографы П-3, П-3А и П-5А имеют по два контактных полоза. Пантограф П-3А отличается от пантографа П-3 конструктивным исполнением некоторых узлов верхней и нижней рам подвижной системы. Пантограф П-5А отличается от пантографа П-3 конструкцией кареток. Пантографы П-1Б предназначены для электропоездов постоянного тока, а П-1В – электропоездов переменного тока. Они имеют один полоз. Пантограф ТД-14М с медными контактными накладками, а ТЛ-13У – с угловыми.

2. Высота гопкоприемников указана от их опущенного полоза, у токоприемника РТ-3А – от головки рельсов.

3. Имеются боковые токоприемники БП-30-02-03 и БП-30-02-04, которые отличаются от БП-30-02-02 рабочей высотой до контактной поверхности (830–1425 мм у БП-30-02-03 и 1765–2368 мм у БП-30-02-04).

Таблица 58.23. Контроллеры непосредственного управления

Тип контроллера	Подвижной состав	Напряжение, В	Ток длительный, А	Количество кулачковых элементов	Количество пальцев	Количество позиций			Масса, кг
						рестативных	ходовых	тормозных	
МТ-30	Вагоны трамвая	550	100	16	14	15	2	10	170
МТ-16	Рудничные электровозы	250	100	11	13	8	2	6	150
ГР-5А*	Рудничные электровозы	250	100	6	8	5	2	—	120
МТ-23Г	Промышленные электровозы	550	150	12	15	10	2	6	160

\* Для шахт, опасных по газу и пыли.

Примечание. Все контроллеры имеют две рукоятки: главную, управляющую главным барабаном, и реверсивную (съёмную), управляющую реверсивным барабаном. Главный барабан имеет кулачковые контактные элементы с дугогашением. Реверсивный барабан имеет контакты пальцевого типа без дугогашения. Все операции реверсивным барабаном осуществляются без тока (при нулевом положении главной рукоятки). Барабаны заблокированы между собой таким образом, что реверсивный вал можно повернуть в нулевое положение только при нулевом положении главного вала. Снять реверсивную рукоятку возможно только при нулевом положении барабанов. При снятой рукоятке контроллер оказывается запертым.

Таблица 58.24 Контроллеры косвенного управления

Тип контроллера	Подвижной состав	Номинальное напряжение, В	Ток длительный, А	Кулачковые элементы		Количество позиций			Масса, кг
				Тип	Количество	пусковых	ходовых	тормозных	
КМЭ-23М	Электровоз ВЛ23	50	30	КЭ-35	31	48	15	—	175
КМЭ-8Б	Электровоз ВЛ8	50	30	КЭ-35	56	37	15	15	—
КМР-2А	Электропоезд ЭР2	50	20	КР-3А	12	18	4	—	25
КВ-35А	Электровоз метрополитена типа Е	70	20	КЭ-48	2	—	—	—	—
КВ-42Г	Трамвайный вагон типа КТМ-5М	24	20	КЭ-42	28	36	2	36	50
				КЭ-42	17	17	4	7	48
КВП-22Б	Троллейбус типа ЗИУ-9	24	25	КЭ-48	—	—	—	—	—
				КЭ-42	10	18	4	3	23

Примечания 1. Контроллеры большинства электровозов и всех электровозов имеют две рукоятки: главную, управляющую главным барабаном, и реверсивную (съемную), управляющую реверсивным барабаном. У всех контроллеров реверсивный барабан имеет три положения: нулевое, вперед и назад. Контроллеры управления троллейбусов состоят из трех аппаратов: контроллера пуска, управляемого правой педалью, контроллера торможения с приводом от левой педали и реверсора с ручным приводом.

2. Контроллер типа КМР-2А имеет шесть позиций (нулевую, маневровую, четыре ходовые). При помощи силового (реостатного) контроллера типа КСП-1А с косвенным приводом получают 18 пусковых позиций. Контроллер КВ-35А имеет семь позиций (нулевую, маневровую, две ходовые, две тормозные и одну позицию для неавтоматического торможения). При помощи силового реостатного контроллера типа ЭКГ-17А с электродвигательным приводом получают 36 пусковых и тормозных позиций. При пуске и торможении используются оба направления поворота вала ЭКГ-17А. Контроллер КВ-42Г имеет 10 позиций (нулевую, четыре ходовые и пять тормозных). При помощи реостатного контроллера типа ЭКГ-22А с косвенным приводом получают 17 пусковых и 7 тормозных позиций. Контроллер КВП-22Б имеет пять позиций у контроллера пуска (нулевую и четыре ходовые) и три позиции у тормозного контроллера (нулевую и две ходовые).

3. У всех контроллеров между главным (пусковым) и реверсивным валом имеются механические блокировки, аналогичные блокировкам контроллеров непосредственного управления.

Таблица 58.25. Основные данные электромагнитных контакторов

Параметр	Типы контакторов					
	МК-310 <sup>1</sup>	ДБ-928 <sup>2</sup>	МКИ-150 <sup>3</sup>	КПД-114 <sup>4</sup> (КПП-114)	КПД-113 <sup>4</sup> (КПП-113)	КПД-110 <sup>4</sup>
Напряжение номинальное, В	3000	750—1500	750	600 (750)	600 (750)	550
Ток длительный, А	50	40	—	300	150	25
Разрыв контактов, мм	30—34	17,5—20,5, 13—16	12,5—16,5	17—18	14—16	8—11
Количество блок-контактов (размыкающих/закрывающих)	1/1	1/1	0/0	2/2	1/1	1/1
Напряжение цепи управления, В	50	30—750	70	24—70	24—70	24—50
Масса, кг	28,6	7,0	9,4	8,7 (8,9)	5,0 (5,2)	1,6

Примечания 1. Контактors МК-310 применяются для включения вспомогательных цепей магистральных электровозов и электропоездов, выполняются с разными дугогасительными катушками на ток 5—50 А.

2. Контактors ДБ-928 применяются для включения вспомогательных цепей промышленных электровозов и вагонов метрополитена, имеют шесть исполнений.

3. Импульсный контактор МКИ-150 построен на базе контактора ДБ-928 и имеет механическую защелку с восстановительным электромагнитом.

4. Контактors КПД-114 (КПП-114) и КПД-113 (КПП-113) применяются в качестве линейных, а КПД-110 — для вспомогательных цепей и переключений резисторов в цепи параллельных обмоток двигателей на троллейбусах и трамвайных вагонах. КПД-110 выполняется с разными дугогасительными катушками на ток 3—80 А.

Таблица 58.26. Основные данные электропневматических контакторов

Параметр	Типы контакторов					
	ПК-301Ж-1	ПК-21-26	ПК-350В	ПК-306Т (ПК-306Ф)	ПК-162А-1	ПК-753А-1
Напряжение номинальное, В	3000	3000	3000	3000	750	750
Ток длительный, А	350	500	250	250 (400)	400	750
Ток часовой, А	525	—	300	300	—	—
Разрыв контактов, мм	24—27	24—27	21—24	21—24	24—27	14,5—16,5
Притирание контактов, мм	4,0—5,5	10—12	9—12	9—12	4,0—5,5	13—15
Нажатие контактов начальное, Н	35—45	35—50	20—30	20—30	65—80	75—105
Нажатие контактов при давлении воздуха 0,5 МПа, Н	350—370	350—370	380—400	42—50	570—650	550—630
Тип вентиля	ВВ2	ВВ3	ВВ2	ВВ3	ВВ3	ВВ3
Напряжение номинальное цепи управления, В	50	50	50	50	70	75
Длительный ток вспомогательных контактов, А	10	5	5	5	10	5
Давление пальцев, Н	10—25	10—25	10—25	10—25	15—25	15—25
Масса контактора, кг	27	28	30	56	25,5	27
Применение	На магистральных и тяжелых промышленных электровозах		На пригородных электропоездах		На вагонах метрополитена	На тепловозах

Примечания 1. Контактор ПК-306Т двойной (имеет два силовых контакта с общим приводом). Контактор ПК-306Ф имеет дугогасительную катушку на 400 А.

2. Кроме ПК-301Ж-1 и ПК-21-26, на электровозах применяются контакторы, отличающиеся от них устройством привода, дугогашения, вспомогательных контактов.

3. Минимальное давление, при котором контакторы должны четко включаться, 0,35 МПа (3,5 кгс/см<sup>2</sup>), нормальное давление 0,5 МПа, испытательное 0,7 МПа

Таблица 58.27 Основные данные групповых аппаратов

Наименование аппарата	Тип	Число позиций	Напряжение главной цепи, В	Напряжение цепи управления, В	Ток длительный, А	
					главных контактов	вспомогательных контактов
Переключатель двигателей	ПКГ-2	2	3000	50	500	5
Переключатель двигателей	ПКГ-6	2	3000	50	500	5
Переключатель двигателей	ПКГ-13	3	3000	50	500	5
Переключатель вентиля	ПВ-78	2	2500	50	1500	35
Реверсор	РК-8А	2	3000	50	500	5
Реверсор	ПР-320А	2	3000	50	220	35
Силовой контроллер	КСП-1А	18	3000	50	220	35
Силовой контроллер	КСП-6Б	20	2200	110	350	35
Главный контроллер	ЭКГ-8	33	3100	50	1300	30
Контроллер реостатный	ЭКГ-17А	18	750	70	220	20
Переключатель положений	ЭКГ-18А	4	750	70	220	20
Контроллер реостатный	ЭКГ-33Б	17	550	24	220	20
Контроллер реостатный	ЭКГ-20Б	18	550	24	150	20

Продолжение табл. 58 27

Наименование аппарата	Контакторные элементы				Количество вспомогательных пальцев	Масса, кг
	главные		вспомогательные			
	Тип	Количество	Тип	Количество		
Переключатель двигателей	—	5	—	—	20	220
Переключатель двигателей	—	6	—	—	16	240
Переключатель двигателей	—	13	—	—	19	480
Переключатель вентиля	—	8	—	5	—	—
Реверсор	—	6	—	—	6	—
Реверсор	КЭ-4Д	8	КР-3А-2	2	—	41
Силовой контроллер	КЭ-4Д	12	КР-3А-2	10	—	88
Силовой контроллер	КР-6А	14	КР-3А-1	8	—	110
	КР-8А	2	—	—	—	—
Главный контроллер	—	30+4	—	31	—	—
Контроллер реостатный	КЭ-47	25	КЭ-42	15	—	252
	КЭ-46	2	—	—	—	—
Переключатель положений	КЭ-47	21	КЭ-42	18	—	236
Контроллер реостатный	КЭ-46	6	КЭ-42	13	—	132
	КЭ-47	16	—	—	—	—
Контроллер реостатный	КЭ-52	12	КЭ-42	9	—	75

Примечания 1. ПКГ-2, ПКГ-6, ПКГ-13, ПВ-78, РК-8А применяются на электровозах.

2. ПР-320А(Б) применяются на электропоездах ЭР2(ЭР9); ПР-320Б имеет напряжение цепи управления 110 В.

3. Контроллеры КСП-6Б и ЭКГ-8 служат для переключения ступеней вторичной обмотки трансформатора с целью изменения напряжения в цепи тяговых двигателей У КСП-6Б два, а у ЭКГ-8 четыре кулачковых контактора с дугогашением, остальные без дугогашения.

4. ЭКГ-8, ЭКГ-17А, ЭКГ-18А, ЭКГ-33Б, ЭКГ-20Б имеют электродвигательный привод, все остальные аппараты, приведенные в таблице, имеют электропневматический привод.

5. В контроллерах ЭКГ-17А при пуске и торможении используются оба направления поворота вала.

Таблица 58 28. Автоматические выключатели

Тип выключателя	АВ-8А-1	АВ-8Б-3	БВП-3А, БВП-3Б	БВП-105А	БВП-5
Напряжение номинальное, В	550	750	3000	3000	3000
Ток длительный, А	240	70	1400	250	1680
Пределы регулирования тока уставки, А	350—1000	100—300	900—2200	360—600	900—2200
Собственное время отключения, с	0,03	0,03	0,001—0,0015	0,005	0,0015—0,003
Полное время отключения, с	0,05	0,04	0,02—0,055	0,015—0,03	—
Тип привода	Ручной привод без свободного расцепления		Электропневматический привод с свободным расцеплением		
Напряжение цепи управления, В	—	—	50	50—110	50
Масса, кг	8,2	20	215	305	230

Примечания: 1. Автоматические выключатели АВ-8А-1 применяются на трамвайных вагонах КТМ-5М, РВЗ-6, троллейбусах ЗУИ-9; АВ-8Б-3 — на вагонах метрополитена Еж; БВП-3А, БВП-3Б, БВП-5 — на электровозах; БВП-105А — на вагонах пригородных электропоездов.

2. АВ-8Б-3 применяются для защиты вспомогательных цепей вагона.

3. Быстродействующие выключатели БВП-3А, БВП-3Б имеют лабиринтную камеру, позволяющую удлинить дугу до 2,5—3 м при относительно небольших размерах камеры. В верхней части камеры размещена деионная решетка, которая уменьшает выхлоп из камеры горячих ионизированных газов. Быстродействующий выключатель БВП-5 подобен выключателям БВП-3, но имеет большую мощность отключения и допускает больший длительный ток контактных частей.

4. Автоматический выключатель БВП-105А имеет электрическое устройство с двойным разрывом цепи в двух дугогасительных камерах, которые имеют деионные решетки. Выхлоп газов производится вниз. Автомат выполнен для размещения под вагоном и подвешивается на четырех изоляторах к раме кузова.

Таблица 58.29 Основные данные кулачковых контакторов, устанавливаемых в групповых аппаратах

Тип	Напряжение, В	Ток длительный, А	Разрыв контактов, мм	Притирание контактов, мм	Нажатие, Н		Масса, кг
					при касании	при полном притирании	
КЭ-1А	3000	350	24-27	11-14	45-50	160-200	-
КЭ-41	550	100	9-13	3,5-4,6	12-16	20-24	1,33
КЭ-42	550	25	10-16	2,5-3,5	-	5	0,41
КЭ-52	550	150	10	-	-	14	0,75
КЭ-54	24	20	5	3	-	3	0,32
КЭ-47	750	220	10-16	9,5-10,5	12-16	40-50	2,5
КЭ-4Д	750	220	8-10	8-10	22-28	42-50	1,8
КР-6А	750	350	8-10	4-6	25-30	50-55	1,8
КЭ-46	750	220	10-16	9,5-10,5	12-16	40-50	3,0
КР-8А	750	100	8-10	4-6	25-30	50-55	2,5
КР-9А	750	200	8-10	8-10	22-28	42-50	2,6
КР-3А	250	35	4-6	2,5-3,5	2,2-2,7	4,5-5,5	0,22
КЭ-30А	125	40	8,5-10,5	4-4,5	3-4	4-8	0,5
КЭ-35Г	125	20	4-6	2-3	1-3	5-6	0,27
КЭ-31А	125	35	8,5-10,5	4-5,5	3-4	4-8	1,2
КЭ-48	70	10	10-14	8-10	4	6	0,8
КЭ-35Д	125	15	4-6	2-3	1-3	5-6	0,8

Примечания: 1 Все кулачковые контакторы, за исключением КЭ-1А, имеют размыкающие контакты, выключаемые пружиной. Контактторы КЭ-41, КЭ-42, КЭ-52, КЭ-54, КЭ-47, КЭ-4Д, КР-6А, КР-3А, КЭ-35Г, КЭ-30А не имеют дугогашения. Остальные контакторы, приведенные в таблице, выполняются с дугогашением.

2 Контактторы КЭ-1А замыкающие с дугогашением, построены на базе контакторов ПК-301 (см рис. 58.5), применяются в переключателях двигателей ПКГ-305В и ПКГ-323 электровозов ВЛ8, ВЛ23.

3 Контактторы КЭ-41 выполняются с двумя типами контактов: медными для длительного тока 100 А и с серебряными вставками для длительного тока 150 А. КЭ-41 применяются в реостатных контроллерах троллейбусов. Там же применены контакторы КЭ-52, которые выполняются с одной включающей пружиной и металлокерамическими контактами, не требующими притирания. Контактторы КЭ-47 и КЭ-46 имеют конструкцию, подобную КЭ-41, но с более мощными пружинами и контактной частью. Они применяются в групповых аппаратах вагонов метрополитена типа Еж и трамвая КТМ-5М. В групповых аппаратах электропоездов применяются контакторы КЭ-4Д, КР-6А, КР-8А и КР-9А. Контактторы КЭ-42 применяются в качестве блокировочных контактов в групповых аппаратах и контроллерах управления троллейбусов, вагонов трамвая и вагонов метрополитена. Контактторы КР-3А применяются в качестве блокировочных в групповых аппаратах и контроллерах машиниста электропоездов. Контактторы КЭ-30А, КЭ-31А и КЭ-35 применяются в контроллерах машиниста и других групповых аппаратах вагонов метрополитена и электровозов.

Таблица 58.30. Реле перегрузки, реле контроля напряжения

Тип реле	Назначение	Напряжение номинальное, В	Ток продолжительный, А		Пределы регулирования тока, А (напряжение, В)	Раствор контактов, мм	Наличие замкнутого контакта	Масса, кг	Контакты	
			ка-гушки	кон-тактов					замы-кающие	размы-кающие
РП-1А	Реле перегрузки по току	3000	225	2	400-700	6	Нет	4,5	-	2
РТ-406В		3000	450	5	600-700	3-4	»	6,7	1	2
РП-5Б		3000	30	1	30-75	3-6	Есть	8,8	-	2
РП-5В		3000	60	1	60-150	3-6	»	8,8	-	2
РП-5Д		3000	60	1	30-75	3-6	»	5,6	1	2
РП-1,2		3000	150	6	150-400	2-6	»	-	2	1
							(общий для двух реле)			
РПО	Реле напряжения	3000	6	6	6-15	2-6	Есть	-	1	1
РМ-3001		550	150	6	150-400	2-6	Нет	-	1	1
Р-6Н		3000	0,175	1,5	(4000)	3-10	»	3,6	2	1
Р-3100		550	-	5	0,16(750)	5-7	»	-	2	0
РЭВ-825		550	-	10	150-400	2-6	»	-	1	1

Таблица 58.31 Дифференциальные реле

Параметр	Д4	P-104Б
Ток уставки при одном витке* в рамке магнитопровода и номинальном напряжении на катушках управления, А	100	40–60
Размер окна, мм	65 × 120	56 × 21
Напряжение цепи управления, В	50	50
Длительный ток контактов, А	5	5
Разрыв контактов, мм	—	5–6
Количество контактов	1	1
Масса, кг	17	—

\* Ток уставки снижается пропорционально количеству витков в окне.

Примечания: 1. Реле Д4 применяется на магистральных электровозах; реле Р-104Б — на вагонах пригородных электропоездов

2. Дифференциальные реле служат для защиты электрооборудования при малых гоках короткого замыкания (круговом огне в тяговом двигателе одной из групп и т.п.) При срабатывании действуют на отключение главного выключателя.

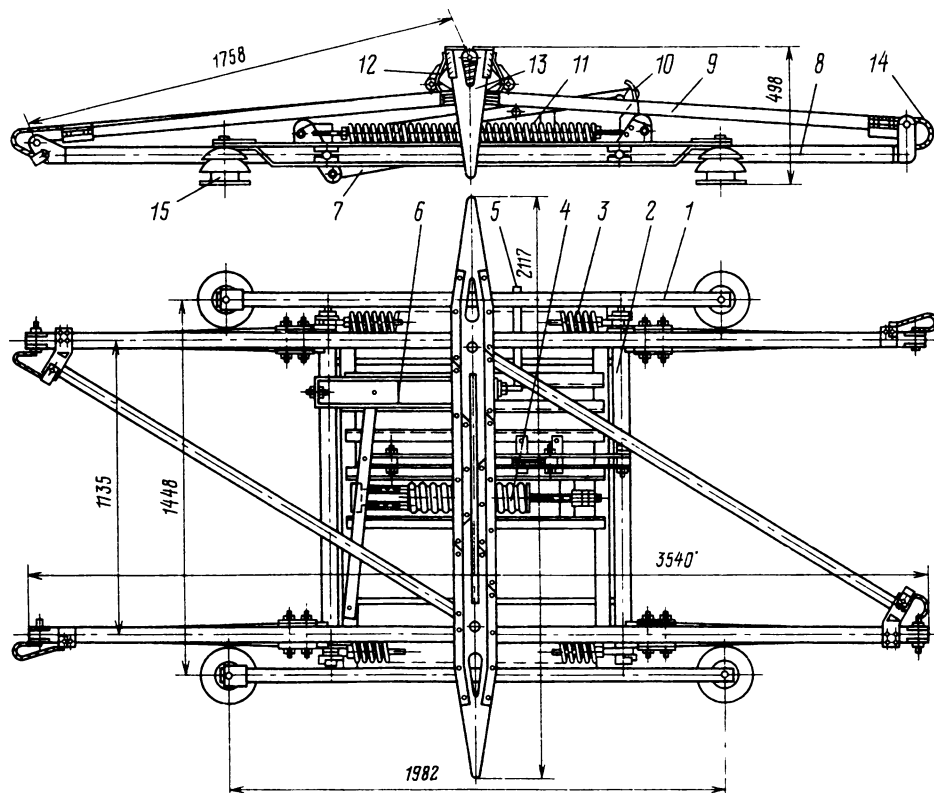
Электрические схемы и тяговые аппараты обычно разрабатываются применительно к конкретному типу подвижного состава.

При выборе электрических аппаратов, разработке технических заданий на новые аппараты и при их проектировании бывают полезны основные сведения о выполненных и хорошо работающих аппаратах. Технические данные некоторых аппаратов приводятся в табл. 58.22–58.32.

Примеры конструкций тяговых электрических аппаратов токоприемников, контроллеров управления, контакторов, аппаратов защиты и управления приведены на рис. 58.3–58.7.

Рис. 58.3. Пантограф П-1Б:

1 — продольный швеллер основания; 2 — главный вал; 3 — наружные пружины; 4 — внутренняя пружина; 5 — трубопровод; 6 — цилиндр привода; 7 — соединительные тяги; 8 — нижняя рама; 9 — верхняя рама; 10 — главная тяга; 11 — корректор; 12 — каретка; 13 — полоз; 14 — гибкие шунты; 15 — опорные изоляторы



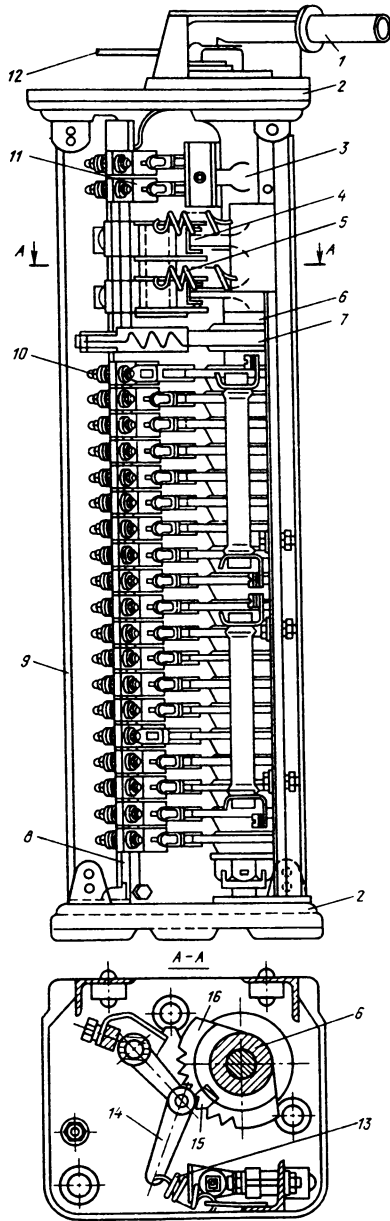


Рис. 58.4. Контроллер KB-34А:

1 — рукоятка управления; 2 — крышка контроллера; 3 — реверсивный барабан; 4 — блокирующий механизм; 5 — фиксирующий механизм; 6 — главный вал; 7, 10, 11 — кулачковые контакторы; 8 — стойка для крепления контакторов; 9 — каркас; 12 — рукоятка фиксирующего механизма; 13 — нажимная пружина фиксирующего механизма; 14 — двулучный рычаг; 15 — стопорный палец запирающего устройства; 16 — звездочка

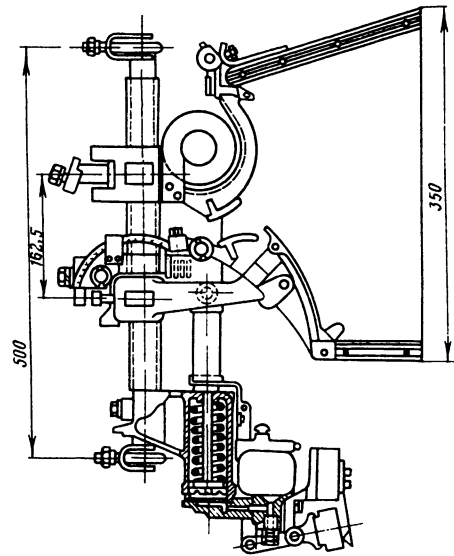


Рис. 58.5. Электропневматический контактор ПК-301В

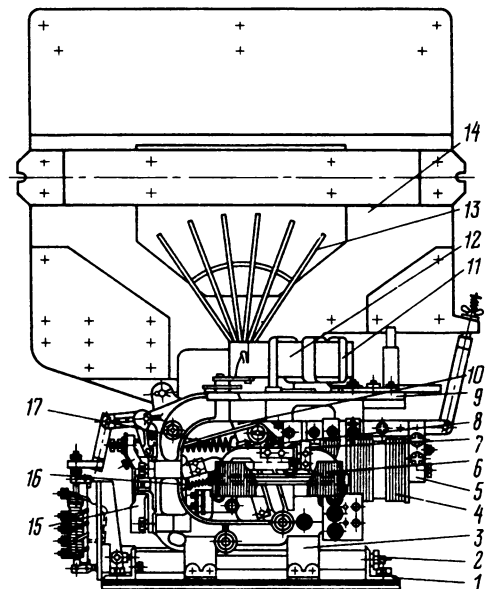


Рис. 58.6. Быстродействующий выключатель БВП-3Б:

1 — угольник основания; 2 — стержень; 3 — рама; 4 — удерживающая катушка; 5 — магнитопровод; 6 — индуктивный шунт; 7 — размагничивающий виток; 8 — рычаг якоря; 9 — плата; 10 — контактный рычаг; 11 — дугогасительная катушка; 12 — магнитопровод дугогасительной системы; 13 — полюс; 14 — дугогасительная камера; 15 — цилиндр; 16 — возвращающая пружина; 17 — выключающая контактная пружина



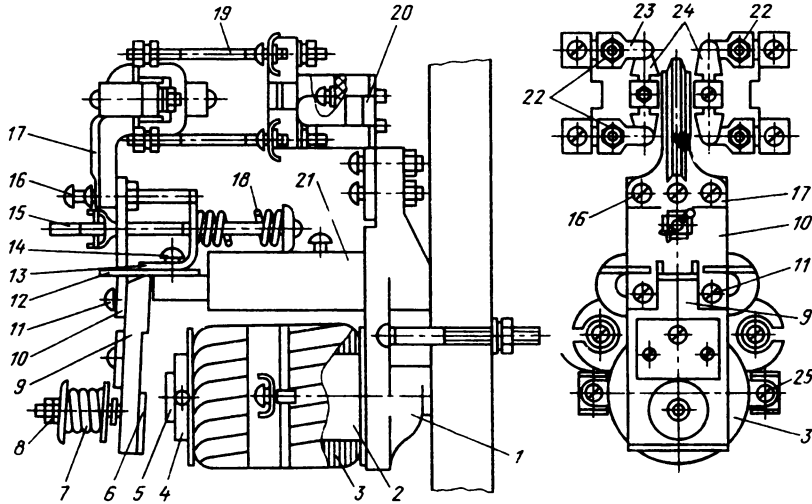


Рис. 58.7. Реле серии РЭВ-800 (РЭВ-811, РЭВ-816, РЭВ-821):

1 — ярмо магнитопровода; 2 — демпфирующее кольцо; 3 — катушка; 4 — фиксирующее кольцо; 5 — сердечник; 6 — прокладка; 7 — пружина; 8 — регулировочная гайка; 9 — опорная призма якоря; 10 — скоба; 11 — винт; 12 — пластина; 13 — угольник; 14 — винт; 15 — регулировочная гайка; 16 — упорный винт; 17 — изоляционная колодка; 18 — возвратная пружина; 19 — контактная шпилька; 20 — крепежная плата; 21 — демпфер; 22 — неподвижные контакты; 23 — размыкающий контакт; 24 — замыкающий контакт; 25 — вывод катушки

Таблица 58 32 Реле ускорения и замедления

Параметр	Р-52Б	Р-40В-2	Р-40Г	Р-52В
Напряжение номинальное, В	550	825	3000	750
Ток длительный силовых катушек, А	150	250	250	275
Число витков	3	6	6	5
Пределы регулирования тока уставки, А	160—280	365	430	220—340
Разрыв контактов, мм	2—3	1,5—2	1,5—2	1,5—3
Количество контактов:				
з замыкающие	1	—	—	1
р размыкающие	1	1	1	1
Напряжение цепи управления, В	24	50	50	70
Подъемная катушка:				
число витков	—	5900	1650	1500
сопротивление при 20 °С, Ом	—	418	44,3	28,5
Регулировочная катушка:				
число витков	—	—	—	4400
сопротивление при 20 °С, Ом	—	—	—	1260
Масса, кг	3,5	5	5	3

Примечания. 1 Реле Р-52Б применяется на троллейбусах и трамвайных вагонах, Р-40В, Р-40Г — на вагонах пригородных электропоездов, Р-52В — на вагонах метрополитена.

2 Подъемная катушка включается между позициями для увеличения чувствительности реле. Все реле ускорения имеют коэффициент возврата примерно 0,8—0,85.

### 58.5. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Способы регулирования скорости при пуске

Изменение скорости с помощью резистора  $R_n$  (пускового реостата) в цепи якоря применяется только при пуске подвижного состава.

Изменение скорости переключением двигателей с последовательного соединения на последовательно-параллельное или параллельное применяется при пуске и движении поезда. Число переключений (группировок) выбирается с учетом потребностей экономических скоростей движения, уменьшения потерь в пусковых реостатах и сложности переключающей аппаратуры.

Электромеханические и тяговые характеристики для низких скоростей получаются путем пересчета из основных характеристик.

Скоростные характеристики пересчитываются по формуле

$$v_2 = v_1 \frac{U_{a2} - I_a r_a}{U_{a1} - I_a r_a} \approx v_1 \frac{U_{a2}}{U_{a1}}$$

Характеристика  $F_a = f(I_a)$  с достаточной для практики точностью может быть принята неизменной.

Изменение скорости ослаблением возбуждения. В двигателях последовательного возбуждения ослабление возбуждения осуществляется чаще всего шунтированием обмотки возбуждения последовательно включенными резистором и индуктивным шунтом или отключением части обмотки (при секционированной обмотке возбуждения).

Степень ослабления возбуждения характеризуется коэффициентом регулирования возбуждения  $\alpha$ .

При шунтировании обмотки возбуждения  $\alpha = \frac{I_b}{I_a} = \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{г.п}}$ , где  $r_{ш}$  — суммарное сопротивление

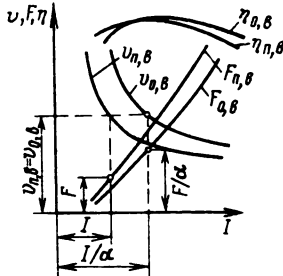


Рис. 58.8 Построение характеристик ослабления возбуждения двигателей последовательного возбуждения

тивление цепи, шунтирующей обмотку возбуждения,  $r_{г.п}$  — сопротивление обмотки главных полюсов.

При секционированной обмотке  $\alpha = w_{o,в}/w_{п,в}$ , где  $w_{o,в}$  и  $w_{п,в}$  — числа витков обмотки возбуждения при ослабленном и полном возбуждении.

Безреостатные характеристики при ослаблении возбуждения строят обычно приближенно, считая, что при полном возбуждении и токе  $I_a$  и ослабленном возбуждении и токе  $I_a/\alpha$  скорости одинаковы ( $v_{п,в} \approx v_{o,в}$ ) и  $F_{o,в} = F_{п,в}/\alpha$ .

Принцип построения характеристик показан на рис. 58.8. Для более точного построения необходимо иметь нагрузочные характеристики машины  $E/v = f(I_b)$  для ряда значений  $I_b = \text{const}$ .

В двигателях смешанного возбуждения изменение возбуждения осуществляется изменением сопротивления резисторов в цепи параллельной обмотки. Электромеханические характеристики двигателей смешанного возбуждения обычно даются для ряда значений токов  $I_{ш} = \text{const}$ .

Если требуется построить характеристику для нового промежуточного значения  $I_{ш2}$ , то за исходную характеристику берут ближайшую к новой при большем  $I_{ш1}$ . Обозначив индексом 2 значения новой, а индексом 1 — исходной характеристики и исходя из условия, что при равных магнитных потоках ( $\Phi_2 = \Phi_1$ ) равны МДС обмоток, получим

$$I_{a2} = I_{a1} + (I_{ш1} - I_{ш2})(w_{ш}/w_c) = I_{a1} + \Delta I_{ш}$$

и

$$v_2 = v_1 \frac{U_a - I_{a2} r_a}{U_a - I_{a1} r_a} = v_1 \frac{E_2}{E_1}$$

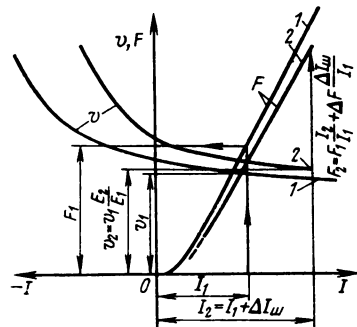


Рис. 58.9 Построение характеристик ослабления возбуждения двигателей смешанного возбуждения:

1 — исходная характеристика, 2 — новая характеристика

Здесь пренебрегаем разницей влияния реакции якоря при  $I_{ш2}$  и  $I_{ш1}$ . Принимая одинаковыми магнитные и механические потери при  $\Phi_1 = \Phi_2$  и  $v_1 = v_2$ , получаем

$$F_2 = F_1 (I_{ш2}/I_{ш1}) + \Delta F (\Delta I'_{ш}/I_{ш1}).$$

Это построение поясняет рис. 58.9.

**Изменение скорости при помощи тиристорно-импульсного преобразователя.** При импульсном регулировании среднего напряжения на тяговых двигателях постоянное напряжение источника питания преобразуется в прерывистое, которое прикладывается к тяговым двигателям в виде последовательности импульсов (рис. 58.10, б). Принципиальная схема импульсного регулирования показана на рис. 58.10, а. Схема состоит из входного фильтра  $L_\phi, C_\phi$ , тиристорно-импульсного преобразователя (ТИП), выходного фильтра  $VD_0, L_0$  и нагрузки — тягового двигателя. При включенном ТИП напряжение  $U_{C\phi,ср} = U_c$  прикладывается к цепи тягового двигателя, а диод нулевого контура  $VD_0$  заперт. В это время ток нагрузки нарастает и происходит накопление энергии в индуктивном сопротивлении цепи нагрузки. При выключении ТИП ток в двигателе продолжает протекать в том же направлении под воздействием ЭДС самоиндукции индуктивности цепи нагрузки.

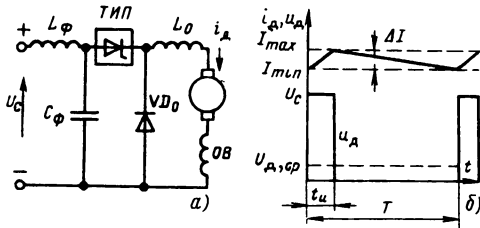


Рис. 58.10. Импульсное регулирование напряжения тягового двигателя при пуске: а — принципиальная схема включения ТИП при пуске; б — диаграмма тока и напряжения двигателя

Среднее напряжение на двигателе за период регулирования  $T$

$$U_{д,ср} = \frac{t_{н}}{T} U_c = \lambda U_c,$$

где  $\lambda$  — коэффициент заполнения ТИП.

Изменяя  $\lambda$ , регулируют напряжение  $U_d$  и, следовательно, скорость тяговых двигателей. Коэффициент заполнения  $\lambda$  можно варьировать либо путем изменения  $t_n$  при  $T = \text{const}$  (широтно-импульсный способ), либо путем изменения частоты регулирования  $f = 1/T$  при  $t_n = \text{const}$  (частотно-импульсный способ), либо путем одновременного изменения  $t_n$  и  $f$  (ком-

бинированный способ). Частным случаем комбинированного способа является двухпозиционное регулирование, когда ТИП включается и выключается при определенных значениях тока нагрузки  $I_{min}$  и  $I_{max}$ .

Так как обычно период регулирования напряжения  $T$  выбирают во много раз меньшим, чем постоянные времени цепи нагрузки, то ток в двигателе нарастает при включенном ТИП и падает при выключенном ТИП незначительно. Поэтому пульсации тока в двигателе обычно невелики.

Значение пульсаций тока нагрузки  $\Delta I = I_{max} - I_{min}$  приближенно определяется формулой

$$\Delta I \approx \frac{U_c}{fL_0} \lambda (1 - \lambda),$$

где  $L_0 = L_\Sigma + L_{лр}$  — индуктивность цепи нагрузки.

Регулирование скорости подвижного состава путем изменения возбуждения двигателей может также осуществляться с помощью ТИП. В этом случае ТИП включают параллельно обмотке возбуждения, как показано на рис. 58.11, а. На рис. 58.11, б приведены осциллограммы, поясняющие принцип действия тиристорно-импульсного регулятора возбуждения. Коэффициент регулирования возбуждения определяется следующим приближенным выражением:

$$\alpha \approx \frac{1}{1 + \frac{r_{г,н}/r_{ш}}{1 - \lambda_B r_{ш}/(r_0 + r_{ш})}},$$

где  $r_{г,н}$  — активное сопротивление обмотки главных полюсов;  $r_{ш}$  — сопротивление резистора, шунтирующего обмотку возбуждения и включаемого с целью снижения перенапряжений на полупроводниковых приборах ТИП. Обычно  $r_{ш} = (20 \div 40) r_{г,н}$ ;  $r_0$  — сопротивление резистора, ограничивающего минимальную

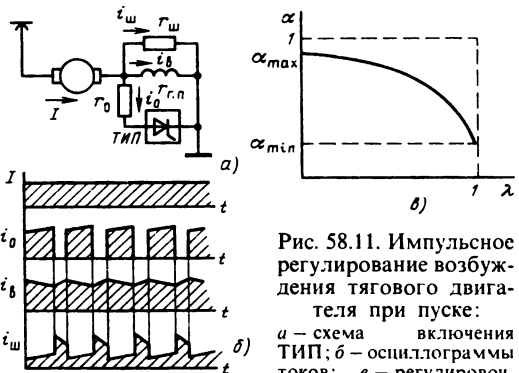


Рис. 58.11. Импульсное регулирование возбуждения тягового двигателя при пуске: а — схема включения ТИП; б — осциллограммы токов; в — регулировочная характеристика

степень ослабления возбуждения;  $\lambda_b$  – коэффициент заполнения ТИП.

Характер зависимости  $\alpha = f(\lambda_b)$  представлен на рис. 58.11, в.

**Расчет ступеней пусковых резисторов**

Процесс пуска можно разделить на две стадии: в первой – пуск осуществляется при постепенном увеличении ускорения; во второй (основной) – пуск стремятся производить с постоянным средним ускорением, не превышая максимально допустимых значений тока двигателей ( $I_{дmax}$ ).

Обычно начинают расчет со второй стадии пуска. Значения сопротивлений и количество ступеней пусковых резисторов при этом определяют графически, причем на один двигатель. Принцип графического расчета показан на рис. 58.12.

Порядок расчета:

1. Строят  $v = f(I_d)$  при  $U_{д1}$ ,  $U_{д2}$  и т. д. соответственно с выбранными соединениями двигателей.

2. Определяют пределы колебаний пускового тока  $I_{дmax}$ ,  $I_{дmin}$ .

По условиям сцепления определяют

$$F_{дmax} = \frac{1000\psi G_{сц}}{mn}$$

и по характеристике двигателя  $F_d = f(I_d)$  определяют  $I_{дmax}$  (по  $F_{дmax}$ ).

Если полученное значение  $I_{дmax} > 2I_{дч}$  (тока двигателя часового режима), то выбирают  $I_{дmax} = 2I_{дч}$ , что гарантирует удовлетворительную коммутацию при перегрузках двигателя.

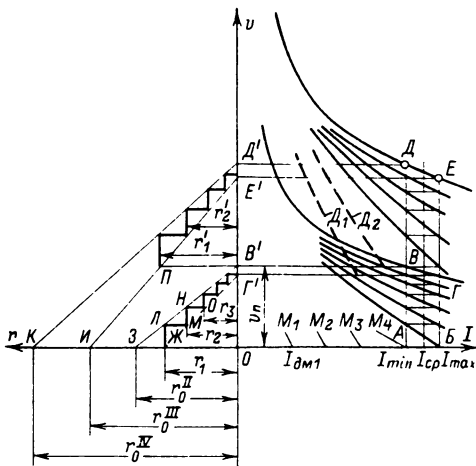


Рис. 58.12. Выбор ступеней пускового реостата

Если задано среднее ускорение подвижного состава  $a_{ср}$ , то определяют среднюю силу тяги

$$F_{д,ср} = [1000(1 + \gamma)a_{ср} + w] G/mn$$

и по характеристике  $F_d = f(I_d)$  определяют  $I_{д,ср}$ .

Далее по заданному  $k_n$  вычисляют

$$I_{дmax} = I_{д,ср}(1 + k_n);$$

$$I_{дmin} = I_{д,ср}(1 - k_n).$$

Для магистральных и промышленных электровагонов  $k_n = 0,07 \div 0,1$ , электровагонов пригородных дорог и метрополитена  $k_n = 0,07 \div 0,15$ , трамвайных вагонов и троллейбусов  $k_n = 0,08 \div 0,18$ .

Ориентировочные значения  $\psi$  и  $(1 + \gamma)$  – см. § 58.10.

3. Определяют сопротивления для первого соединения двигателей при  $v = 0$  и  $U_{д1} = U_{д1}$  для  $I_{д1} = I_{дmax}$  и  $I_{д1} = I_{дmin}$

$$r_0^I = r_1 = U_{д1}/I_{дmax} - r_d;$$

$$r_0^{II} = U_{д1}/I_{дmin} - r_d.$$

4. На рис. 58.12 в правой части наносят пределы колебания пускового тока (прямые AD и BE) и на ось ординат сносят точки B, Г, E, Д. В левой части откладывают  $r_1$  и  $r_0^{II}$  (точки Ж и З). Прямые, проведенные через точки Г, Ж, и В', З, изображают зависимости  $R_n = f(v)$  соответственно при  $I_{дmax} = \text{const}$  и  $I_{дmin} = \text{const}$ . Построенная в пределах этих прямых ступенчатая линия Ж, Л, М, Н, О... показывает, при какой скорости и какими частями необходимо выводить сопротивление, чтобы колебания пускового тока происходили в заданных пределах. Отрезки LM, NO и т. д. соответствуют значениям выводимых сопротивлений, а число вертикальных отрезков (ЖЛ, MN и т. д.) – число ступеней пускового реостата.

5. Для второго соединения двигателей порядок построения характерных прямых аналогичен. При  $v = 0$  и  $U_{д2} = U_{д2}$  находят

$$r_0^{III} = U_{д2}/I_{дmax} - r_d; r_0^{IV} = U_{д2}/I_{дmin} - r_d.$$

Построение ступеней начинают с точки П, так как пуск до скорости  $v_n$  должен происходить на первом соединении.

6. Так как расчет, приведенный в пп. 1 – 5, выполнялся для одного двигателя, то полученное значение сопротивления для  $i$ -й ступени пускового реостата пересчитывают по формуле

$$R_n = (n/m)r_i,$$

где  $r_i$  – сопротивление  $i$ -й ступени, определен-

ное для одного двигателя;  $n, m$  — числа соответственно последовательно и параллельно соединенных двигателей.

7. Для ограничения начального ускорения при пуске и для осуществления движения на низких скоростях предусматривают маневровую позицию. Сопротивление для маневровой позиции выбирают по условию трогания поезда при минимальном коэффициенте сцепления  $\psi_{\min} = 0,07 \div 0,1$  или из условия начального ускорения  $0,3 - 0,5 \text{ м/с}^2$  при  $v = 0$  и порожнем составе. Для обеспечения достаточно плавного нарастания ускорения и возможности пуска при малых токах между маневровой и первой позицией (из графического расчета) делают дополнительные ступени таким образом, чтобы при  $v = 0$  приращение ускорения при переходе с позиции на позицию было не более  $0,3 - 0,4 \text{ м/с}^2$  для порожнего подвижного состава. Для электровозов число дополнительных позиций колеблется от четырех до шести. Для остальных видов подвижного состава число дополнительных позиций обычно не превышает трех-четырех.

Для устранения толчков тока на втором и последующих соединениях двигателей при пуске с малыми токами предусматривают дополнительные ступени Д1, Д2. подробнее — см. [58.7].

## 58.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

При электрическом торможении двигатели работают в генераторном режиме. Выработанная электрическая энергия при этом или поглощается в нагрузочных реостатах (реостатное торможение), или возвращается обратно в сеть (рекуперативное торможение).

Тормозные характеристики при последовательном возбуждении двигателей можно построить по тяговым характеристикам. Принимая при обоих режимах механические и магнитные потери в машине равными при одинаковых токах в якоре, получаем при  $I_{д1} = I_{дт}$

$$\Delta F = F_{д,эм} - F_{д1};$$

$$B_{д1} = 3,6c\Phi I_{дт} + \Delta F = F_{д,эм} + \Delta F$$

или

$$B_{д1} = F_{д1} + 2\Delta F; \quad v_{т1} = \frac{I_{дт}(r_{д1} + R_{т1})}{c\Phi};$$

$$v_{т1} = v \frac{I_{дт}(r_{д1} + R_{т1})}{U_{д1} - I_{дт}r_{д1}}.$$

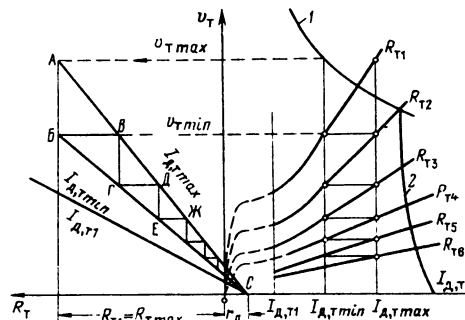


Рис. 58.13. Выбор ступеней тормозного реостата

Расчет ступеней тормозных резисторов проводится обычно для одного двигателя и чаще графическим методом (рис. 58.13).

При расчете задаются  $v_{тmax}$ ,  $I_{дтmax}$  и  $I_{дтmin}$ . По  $v_{тmax}$  и  $I_{дтmax}$  определяют максимальное тормозное сопротивление. При этом

$$R_{тmax} = \left( \frac{U_{д1} - I_{дтmax}r_{д1}}{I_{дтmax}} \right) \frac{v_{тmax}}{v} - r_{д1}.$$

По  $v_{тmax}$  и  $I_{дтmin}$  определяют

$$v_{тmin} = v \frac{I_{дтmin}(r_{д1} + R_{тmax})}{U_{д1} - I_{дтmin}r_{д1}}$$

и строят прямые  $v_{т1} = f(R_{т1})$  при  $I_{дтmax} = \text{const}$  и  $I_{дтmin} = \text{const}$  по трем известным точкам  $A, B$  и  $C$ . Отрезки  $BB', GD'$  и т. д. соответствуют значениям ступеней тормозного реостата, а количество вертикальных отрезков — числу ступеней. Для уменьшения числа контакторов реостатное торможение часто не доводят до полного выключения сопротивления, используя при малых скоростях замещающий механический тормоз. Кроме того, для использования ступеней пускового реостата при торможении на малых скоростях допускаются большие колебания тока (большие значения коэффициента неравномерности по току  $k_n$ ).

При последовательно-параллельном включении двигателей общее сопротивление реостата определяют по формуле  $R_{тi}^0 = (n/m)R_{тi}$ . Характеристики  $v_{т1} = f(I_{дт1})$  для всех ступеней  $R_{т1}$  строят графическим способом, путем построения нескольких дополнительных лучей  $v_{т1} = f(R_{т1})$  при  $I_{дт1} = \text{const}$ . Характеристики  $v_{т1} = f(I_{дт1})$  имеют ограничения по сцеплению (кривая 2) и по допустимому напряжению на коллекторе двигателя (кривая 1), последняя строится по уравнению

$$v_{тmax} = v \frac{U_{д1max} + I_{дт1}r_{д1}}{U_{д1} - I_{дт1}r_{д1}}.$$

**Схемы реостатного торможения с двигателями последовательного возбуждения**

На рис. 58.14 приведены схемы реостатного торможения, применяющиеся на электроподвижном составе с двигателями последовательного возбуждения.

Схема рис. 58.14, а (с двумя двигателями — 1, 2) имела широкое применение на двухосных трамвайных вагонах и промышленных электровозах.

Схема рис. 58.14, б (с четырьмя двигателями — 1—4) применяется на четырехосных промышленных электровозах, на моторных вагонах электропоездов (пригородных и метрополитена), на трамвайных вагонах.

Схемы реостатного торможения при нескольких двигателях должны удовлетворять условиям электрической и механической устойчивости. Для расширения диапазона скорости торможения при сохранении допустимого напряжения на коллекторе ослабляют возбуждение двигателей. Кроме того, обычно двигатели рассчитывают на напряжение, большее чем при пуске в 2—2,5 раза.

**Электрическое торможение с двигателями смешанного возбуждения**

Благодаря крутым тормозным характеристикам этих двигателей требуется небольшое количество ступеней при реостатном торможении в широком диапазоне изменения скорости.

Переход с тяги на рекуперативное торможение осуществляется без отключения двигателей от сети путем выведения резистора в цепи обмотки параллельного возбуждения. При отсутствии в сети потребителей рекуперированной энергии схемой управления предусматривается автоматическое замещение рекуперативного торможения реостатным либо механическим (на электровозах).

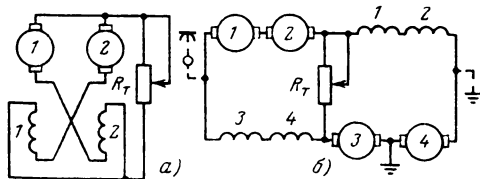


Рис. 58.14. Схемы реостатного торможения с двигателями последовательного возбуждения

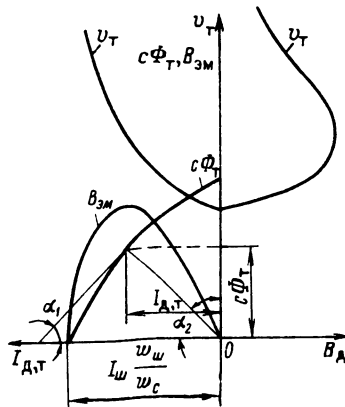


Рис. 58.15. Характеристики рекуперативного торможения двигателей смешанного возбуждения

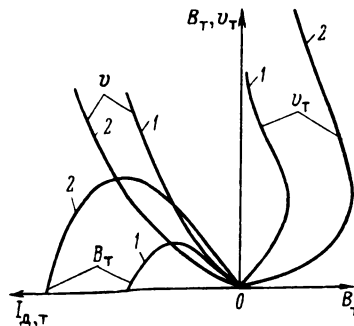


Рис. 58.16. Характеристики реостатного торможения двигателей смешанного возбуждения

Электромеханические характеристики рекуперативного торможения строят при  $I_{ш} = \text{const}$  по формулам

$$v_T = \frac{U_{Д} + I_{Д,Т}r_{Д}}{c\Phi_T};$$

$$B_{Д} = 3,6c\Phi_T I_{Д,Т} + 3,6 \frac{P_{мех} + P_{магн}}{v_T};$$

$$c\Phi_T = f(I_{ш}W_{ш} - I_{Д,Т}W_c),$$

где  $P_{мех}$ ,  $P_{магн}$  — соответственно механические и магнитные потери, Вт.

Зависимость  $B_{Д} = f(I_{Д,Т})$  имеет максимум при

$$\frac{d(c\Phi_T)}{d(I_{Д,Т})} = - \frac{c\Phi_T}{I_{Д,Т}},$$

т. е. при  $\alpha_1 = \alpha_2$  (рис. 58.15).

При реостатном торможении скоростные характеристики строят при  $I_{ш} = \text{const}$  и  $R_T = \text{const}$  по формуле

$$v_T = \frac{I_{д,Т}(R_T m/n + r_d)}{c\Phi_T}$$

Тормозные характеристики  $B_d = f(v_T)$  для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (1, 2) строят, используя соответствующие электромеханические характеристики  $B_d = f(I_{д,Т})$  и  $v_T = f(I_{д,Т})$  (см. рис. 58.16 справа).

### Рекуперативное торможение с независимым возбуждением двигателей

Основные принципиальные схемы рекуперативного торможения показаны на рис. 58.17.

В схеме рис. 58.17, а подключение возбуждателя В и стабилизирующего резистора  $R_{СТ}$  возможно без разрыва силовой цепи. Характеристики для этой схемы определяются следующими зависимостями:

$$v_T = \frac{U_c + I_{д,Т}(nr_a + kr_b) - E'_0}{nc\Phi_T};$$

$$I_B = \frac{E_0}{R_{СТ(a)} + nr_b + r_0} - kI_{д,Т};$$

$$k = \frac{R_{СТ(a)} + r_0}{R_{СТ(a)} + nr_b + r_0} = -\frac{d(I_B)}{d(I_{д,Т})};$$

$$E'_0 = E_0 \frac{r_b}{R_{СТ(a)} + nr_b + r_0},$$

где  $E_0$  — ЭДС ненагруженного возбуждателя ( $I_B = 0$ ) при  $I_n = \text{const}$ ;  $r_0 = r_{я,в} + r_p$  — эквивалентное сопротивление возбуждателя;  $r_{я,в}$  — сопротивление обмотки якоря возбуждателя;  $r_p$  — сопротивление реакции якоря возбуждателя;  $I_n$  — ток независимой обмотки возбуждателя.

Схема рис. 58.17, б позволяет иметь возбуждатель несколько меньшей мощности, чем в предыдущей схеме, а характеристики для нее определяются зависимостями

$$v_T = \frac{U_c + I_{д,Т}(nr_a + r_s) + E_0 k_1}{nc\Phi_T};$$

$$I_B = \frac{E_0}{R_{СТ(б)} + nr_b + r_0} - k_1 I_a;$$

$$r_s = \frac{R_{СТ(б)}(nr_b + r_0)}{R_{СТ(б)} + nr_b + r_0};$$

$$k_1 = \frac{R_{СТ(б)}}{R_{СТ(б)} + nr_b + r_0}.$$

Для получения одинакового наклона характеристик  $\left[ \text{одинаковы } \frac{d(I_B)}{d(I_{д,Т})} \right]$  в схеме рис. 58.17, а требуется меньшее  $R_{СТ}$  (из условия  $k = k_1$ )

$$R_{СТ(a)} = R_{СТ(б)} \frac{r_0}{r_b + r_0} - r_0.$$

В схемах со стабилизирующими резисторами достаточно просто осуществляется параллельное соединение групп двигателей (например, рис. 58.17, г), удовлетворительно происходит распределение тормозной силы между двигателями.

В схеме рис. 58.17, в мощность возбуждателя с противозабуждением при таком же наклоне характеристик, как в схемах рис. 58.17, а и б, требуется меньше, но при значительных противозабуждениях (больших ЭДС взаимной индукции между обмотками возбуждателя) схема электрически неустойчива. Для повышения устойчивости применяется стабилизирующий трансформатор СТ, который компенсирует ЭДС взаимной индукции обмоток возбуждения возбуждателя.

При параллельном соединении двигателей во время рекуперативного торможения применяют или свосенные возбуждители, или в цепь якорей включают уравнивательные сопротивления  $r_y$  для выравнивания нагрузок (схема рис. 58.17, д).

В схеме с циклической стабилизацией получают лучшее выравнивание нагрузок при том же значении сопротивлений в цепи якорей ( $R_{СТ} = r_y$ ) и лучшую устойчивость в переходных режимах, но при этом требуется больше переключающих контактов.

Расчет характеристик можно производить по формулам

$$v_T = \frac{U_c + \sum I_{д,Т} R}{nc\Phi_T};$$

$$B_d = n_d (3,6c\Phi_T I_{д,Т} + \Delta F),$$

где  $\sum I_{д,Т} R$  — падение напряжения в цепи якорей;  $\Delta F$  определяется приближенно, как при реостатном торможении.

Для выбора количества ступеней торможения строят зависимость  $I_B = f(I_{д,Т})$ . При этом можно использовать вышеприведенные формулы (соответственно для схем рис. 58.17, а и б) или магнитные характеристики возбуждателя (для схем рис. 58.17, в — д). Более подробно см. [58.11, 58.25].

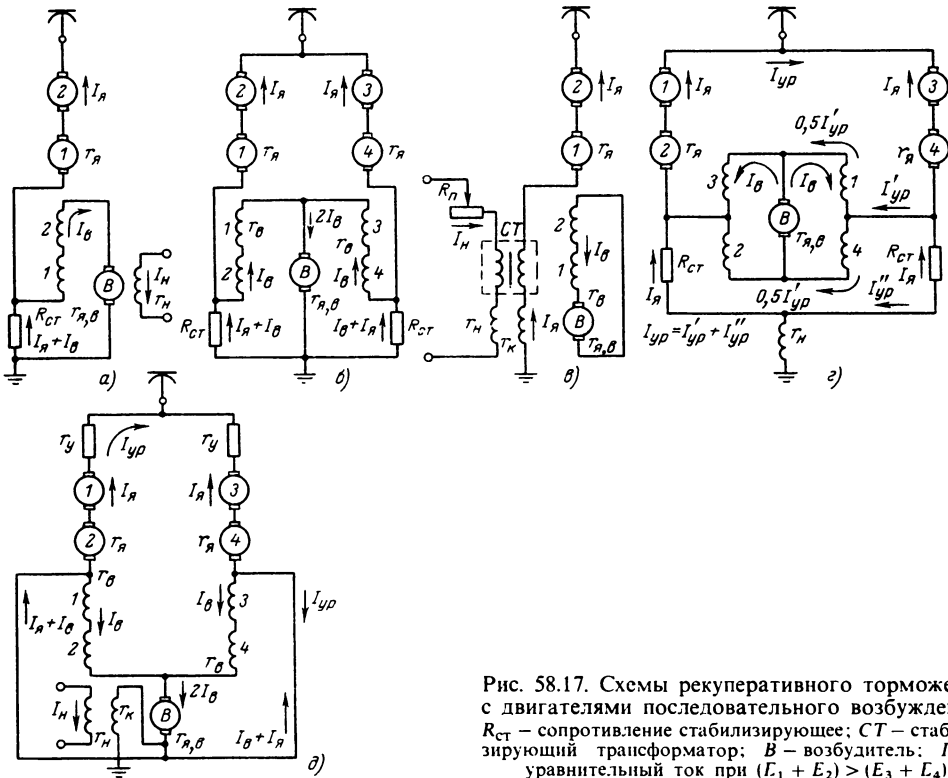


Рис. 58.17. Схемы рекуперативного торможения с двигателями последовательного возбуждения:  $R_{СТ}$  – сопротивление стабилизирующее;  $СТ$  – стабилизирующий трансформатор;  $B$  – возбудитель;  $I_{ур}$  – уравнивающий ток при  $(I_1 + E_2) > (E_3 + E_4)$

**Электрическое торможение при тиристорно-импульсном регулировании напряжения**

Принципиальная схема рекуперативного торможения показана на рис. 58.18, а. При включении ТИП тяговый двигатель, работающий в генераторном режиме, замыкается накоротко и под действием ЭДС вращения ток в нем нарастает, запасая электромагнитную энергию в индуктивности цепи нагрузки.

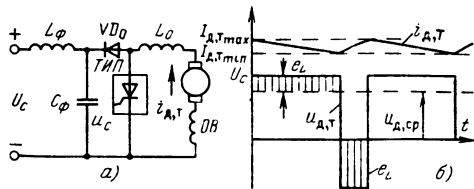


Рис. 58.18. Принцип импульсного регулирования напряжения тягового двигателя при рекуперативном торможении

При выключении ТИП за счет этой запасенной энергии возникает ЭДС самоиндукции  $e_L$  (рис. 58.18, б), которая суммируется с ЭДС вращения  $U_{д.ср}$ . Под действием суммы этих ЭДС ток в тяговом двигателе продолжает протекать в том же направлении, замыкаясь по цепи:  $VD_0$ ,  $L_\phi$ , источник питания  $U_c$  (через потребитель энергии, находящийся на данном участке питания). Далее этот процесс повторяется. При этом характеристику  $v_T = f(I_{д,Т})$  можно построить по уравнению

$$v_T = \frac{I_{д,Т} r_{д} + U_c (1 - \lambda)}{c \Phi_T}$$

Для поддержания постоянства тока  $I_{д,Т}$  по мере снижения скорости подвижного состава увеличивают коэффициент заполнения ТИП и при  $\lambda = 1$  рекуперативное торможение завершается, а двигатель переходит на режим электродинамического торможения на внутреннее сопротивление цепи нагрузки. Таким образом, рекуперативное торможение заканчи-



вается при скорости

$$v_{T \min} = I_{д,т} r_{д} / c \Phi_T.$$

Устойчивая работа двигателя последовательного возбуждения при рекуперативном торможении возможна при условии, что  $U_{д,ср} < U_c$ , поэтому при высоких скоростях движения торможение осуществляют при ослабленном возбуждении, а в ряде случаев дополнительно вводят балластный резистор в цепь двигателя или источника питания.

Для осуществления реостатного торможения при тиристорно-импульсном управлении тормозной реостат включают параллельно либо источнику питания, либо тиристорному регулятору ТИР. Если на подвижном составе используется рекуперативное торможение, а реостатное используется только как замещающее, то тормозной реостат включают с помощью быстродействующего аппарата (тиристора или отдельного тиристорного прерывателя), чтобы обеспечить быстрое замещение при отсутствии потребителя достаточной мощности и тем самым избежать возможных перенапряжений и аварийных режимов электрооборудования.

### 58.7. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Виды электроподвижного состава переменного тока

При питании подвижного состава переменным током высокого напряжения (25–50 кВ) существенно упрощаются устройства электрооборудования, но усложняется электрическое оборудование на подвижном составе. Принцип преобразования энергии зависит от типа тяговых двигателей.

Наибольшее распространение имеют двигатели постоянного тока, при которых электрооборудование подвижного состава наиболее простое, т. е. понижающий трансформатор с промежуточными отводами от обмоток, аппараты для переключения этих отводов с целью изменения выходного напряжения во время пуска и неуправляемый или управляемый выпрямитель В, от которого питаются двигатели (рис. 58.19, а).

Если тяговые двигатели асинхронные с короткозамкнутым ротором, то управление ими строится на частотном принципе (рис. 58.19, б).

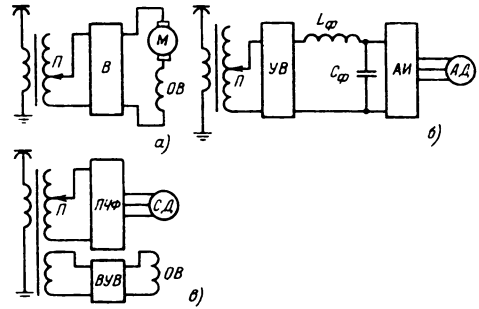


Рис. 58.19. Принципиальные схемы электроподвижного состава переменного тока: а – переменного-постоянного (выпрямительного), б – частотного (с асинхронными короткозамкнутыми двигателями), в – с вентильными двигателями

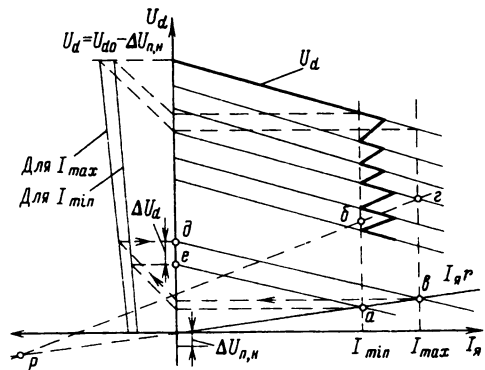


Рис. 58.20. Построение пусковой диаграммы для выпрямительного подвижного состава

Для одновременного изменения частоты и напряжения питания предусматривается автономный инвертор АИ, питаемый через сглаживающий фильтр  $L_{\phi}, C_{\phi}$  от управляемого выпрямителя УВ, который в свою очередь питается от понижающего трансформатора через переключатель выводов П или без него. В последнее время преимущественно используются бесконтактные схемы управляемых выпрямителей.

Выходная частота и напряжение, подводимые к двигателю, меняются таким образом, что обеспечивается предельное использование потенциальных возможностей тягового привода.

Если тяговый двигатель выполнен как синхронный и питается от преобразователя частоты и числа фаз ПЧФ, то такая схема называется системой вентильного двигателя (рис. 58.19, в). Ей присущи характеристики привода с двигателями постоянного тока, у которых функции коллектора выполняет ПЧФ. Возбуждение двигателей осуществляется от отдельного управляемого выпрямителя ВУВ.

Все три схемы в принципе, кроме режима тяги, позволяют осуществлять режимы реостатного и рекуперативного торможения.

Системы тягового привода с асинхронными и вентильными двигателями находятся на стадии опытных образцов и начала их освоения.

### Пусковая диаграмма выпрямительного подвижного состава

По мере увеличения скорости движения для поддержания на заданном уровне тока  $I_{\text{я}}$  якорей двигателей необходимо увеличивать напряжение выпрямителя  $U_d$ , так как

$$U_d = I_{\text{я}}r + c_1\Phi v,$$

где  $r$  – сопротивление цепи двигателя.

Наибольшее распространение имеет равноступенчатое изменение напряжения путем переключения выводов вторичной обмотки трансформатора равными секциями (рис. 58.20). При расчете ступеней напряжения исходят из допустимых наибольших отклонений тока  $\pm \Delta I_{\text{я}}$  от заданного среднего значения  $I_{\text{ср}}$  при переключениях ступеней напряжения. Соответствующие пределы колебаний тока от  $I_{\text{min}}$  до  $I_{\text{max}}$  откладывают на расчетном графике (рис. 58.20). Там же строят прямую падения напряжения в цепи двигателя  $I_{\text{я}}r$  и внешнюю характеристику выпрямителя для максимального напряжения трансформатора

$$U_d(I_{\text{я}}) = U_{d0} - \Delta U_{\text{п.н}} - I_d(2/\pi)x_2k_{\text{п}},$$

где  $U_{d0}$  – выпрямленное напряжение при  $I_{\text{я}} = 0$ ;  $\Delta U_{\text{п.н}}$  – прямое напряжение на вентильном выпрямителе;  $k_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций напряжения,  $k_{\text{п}} = 1,11$ ;  $x_2$  – приведенное ко вторичной обмотке сопротивление рассеяния обмоток трансформатора.

Сопротивление рассеяния обмоток в процессе их переключения и в зависимости от используемой схемы меняется. В простейшем случае при последовательном увеличении числа витков вторичной обмотки трансформато-

ра оно увеличивается по прямым, построенным слева от оси ординат для двух значений тока ( $I_{\text{min}}$  и  $I_{\text{max}}$ ). Пользуясь ими, можно построить внешнюю характеристику выпрямителя для любого вывода обмотки трансформатора. Первоначально это делается для построения внешних характеристик, соответствующих началу пуска ( $v = 0$ ), т. е. когда эта характеристика пересекается с прямой  $I_{\text{я}}r$  при  $I_{\text{max}}$  (точка в). Эта точка переносится (по стрелкам) на ось ординат, а затем под углом  $45^\circ$  на прямую падения напряжения при  $I_{\text{max}}$ , т. е. находится напряжение холостого хода  $U_{d0}$  при  $I_{\text{я}} = 0$  (точка д). Прямая, соединяющая исходную и конечную точки (в и д), изображает внешнюю характеристику, при которой в начале пуска ток в двигателях будет равен  $I_{\text{max}}$ .

Таким же образом производится построение внешней характеристики (точки а – е) при  $v = 0$  и  $I_{\text{min}}$ . Разность ординат обеих характеристик при  $I_{\text{я}} = 0$  (точки д, е) определяет приращение напряжения  $\Delta U_d$ , при котором ток в двигателе возрастает от  $I_{\text{min}}$  до  $I_{\text{max}}$ . Общее число ступеней  $N$  будет равно

$$N = U_{d0}/\Delta U_d.$$

Если число ступеней окажется не целым или таким, при котором схема переключения выводов нерациональна, производится корректировка  $\Delta U_d$ . Это приведет к некоторому изменению  $\Delta I_{\text{я}}$ . Ордината напряжения  $U_{d0}$  делится на уточненные интервалы  $\Delta U_d$  и через эти точки при помощи прямых падения напряжения, как и выше, строится сетка внешних характеристик для всех ступеней трансформатора (на рисунке построение сделано только для части характеристик). Переход с одной характеристики на другую происходит без изменения скорости движения и сопровождается броском тока от  $I_{\text{min}}$  до  $I < I_{\text{max}}$ , соответствующим изменению потока и ЭДС вращения двигателя. Отношение конечных исходных значений ЭДС

$$\frac{c_1\Phi I_{\text{max}}v}{c_1\Phi I_{\text{min}}v} = \frac{c_1\Phi I_{\text{max}}}{c_1\Phi I_{\text{min}}} = \frac{w_2}{ab}$$

не зависит от скорости движения. Взяв в любом масштабе отношение ординат  $w_2/ab$  и проведя через них прямую до пересечения с продолжением прямой  $I_{\text{я}}r$ , находят полюс  $P$ , через который проходят все касательные к кривым ЭДС в пределах  $I_{\text{max}} - I_{\text{min}}$  при любых значениях скорости движения. Проводя эти прямые через точки на внешних характеристиках при токе  $I_{\text{min}}$  до их пересечения

с вышележащей внешней характеристикой, получают пусковую диаграмму в координатах  $U_d(I_A)$ , которая затем может быть обычным способом перестроена в координаты  $v(I_A)$ . Для ясности рисунка построение сделано только в верхней части диаграммы. При равных  $\Delta U_d$  колебания тока по мере увеличения скорости движения уменьшаются.

### Электрическое торможение выпрямительного подвижного состава

Реостатное торможение с самовозбуждением по схемам, применяемым на подвижном составе постоянного тока, на подвижном составе переменного тока применяется сравнительно редко — только в случаях, требующих повышенной надежности торможения, например на высокоскоростных поездах, так как в этом случае для управления приходится дополнительно к пусковой аппаратуре устанавливать регулируемую тормозную аппаратуру, что обычно связано с определенными трудностями.

При реостатном торможении с независимым возбуждением дополнительная аппаратура проста: она служит только для управления возбуждением обращенных в генераторы двигателей. Обычно возбудителем является управляемый выпрямитель возбуждения ВУВ, который питает все последовательно соединенные обмотки возбуждения (рис. 58.21, а). Якори двигателей замкнуты на постоянный тормозной резистор  $R_T$ . Каждому току возбуждения соответствует своя тормозная электромеханическая характеристика, линейная при некоторых допущениях

$$v_T = I_A (R_A + R_T) / c_1 \Phi.$$

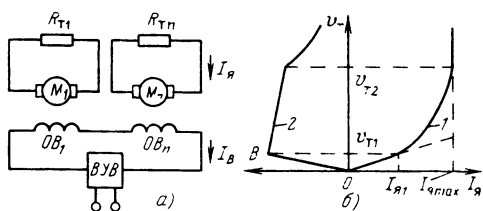


Рис. 58.21. Схема (а) и характеристики (б) при реостатном торможении тяговых электродвигателей с независимым возбуждением: 1 — зависимость тока от скорости, 2 — зависимость тормозной силы от скорости

При плавном регулировании тока возбуждения и потока  $\Phi$  может быть реализована любая тормозная характеристика в пределах ограничений тормозной силы по ряду параметров: коэффициенту сцепления, мощности тормозных резисторов, допустимым нагрузкам тяговых двигателей, скорости движения и др.

Наиболее полно возможности реостатного торможения используются при автоматическом управлении, при котором система автоматического управления воздействует на ВУВ так, что реализуется любая заданная тормозная характеристика, включая регулирование тормозной силы по любому из расчетных ограничений. В режиме остановочного торможения реализуется предельная тормозная характеристика, определяемая изменением тормозной силы  $B$  в соответствии со всеми ее ограничениями. В зоне низких скоростей движения от нулевой до  $v_{T1}$  ток якоря  $I_A$  линейно растет, так как ток возбуждения равен предельному значению. Соответственно линейно растет и тормозная сила (рис. 58.21, б). В зоне от  $v_{T1}$  до  $v_{T2}$  тормозная сила регулируется в соответствии с ее ограничением условиями сцепления. При этом рост ее замедляется благодаря уменьшению тока возбуждения, а в зоне  $v_T > v_{T2}$  тормозная сила ограничена еще и мощностью резисторов или тяговых двигателей. При дальнейшем росте скорости возможно ограничение  $B$  по условиям работы коллекторно-щеточного аппарата тяговых двигателей.

В режиме подтормаживания на спусках формируется жесткая тормозная характеристика, которой соответствует большое изменение  $B$  при малом изменении скорости.

Характеристики, аналогичные приведенным на рис. 58.21, б, реализованы на электровозах переменного тока ВЛ80<sup>Т</sup>.

Для реализации на выпрямительном подвижном составе рекуперативного торможения необходимо заменить выпрямитель  $B$  (см. рис. 58.19, а) на выпрямительно-инверторный преобразователь. Практически это означает замену неуправляемого или полууправляемого выпрямителя полностью управляемым. Это приводит к усложнению и удорожанию электрооборудования. Кроме того, определенные трудности возникают при обеспечении требуемого качества возвращаемой электроэнергии в питающую сеть.

В СССР рекуперативное торможение используется на электровозах переменного тока ВЛ80<sup>Р</sup> с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями.

### 58.8. СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

#### Элементы силовых схем подвижного состава постоянного тока

В состав силовых схем входят: тяговые двигатели; пуско-тормозные резисторы; переключающие аппараты для выключения ступеней резисторов, переключения двигателей с последовательного на параллельное соединение, переключения схемы с тяги на торможение, реверсирования двигателей, отключения их в аварийных режимах, а также аппараты защиты.

Схемы, как правило, дополняются таблицами замыкания контактов, указывающими очередность замыкания контактов при реализации заданных режимов.

При составлении схем стремятся обеспечить реализацию всех заданных режимов работы подвижного состава наименьшим числом электрических аппаратов при наименьшем количестве используемых контактов.

На рис. 58.22–58.24 приведены наиболее распространенные принципиальные схемы подвижного состава, которые изображены в упрощенном виде. Там же соответственно приведены таблицы замыкания контактов.

Схема рис. 58.22 используется при двигателях смешанного возбуждения, если в процессе пуска или торможения не требуется их перегруппировка. Для пуска и торможения здесь используют одни реостаты, регулирование возбуждения осуществляют изменением тока в параллельной обмотке возбуждения, а реверсирование направления вращения двигателей групповым аппаратом (реверсором) — с помощью контактов В1–В4, Н1–Н4. При торможении выключается линейный контактор Т1 и включается контактор Т2, а после подготовки пускового реостата — дополнительно Т3. Порядок замыкания контактов при торможении и при пуске аналогичен.

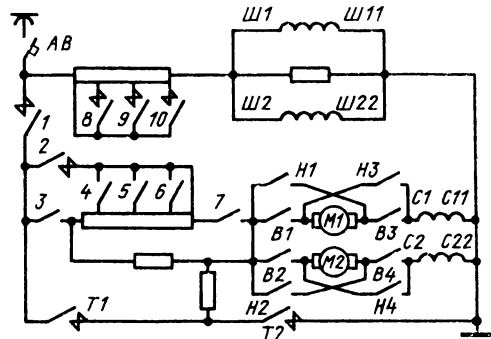
Схема рис. 58.23 осуществляет реостатный пуск при последовательном соединении двигателей (пять пусковых позиций), переход по способу «моста» на параллельное соединение (позиции П1 и П2) и затем пуск на параллельном соединении (позиции 6–8).

Для осуществления реостатного торможения вначале размыкается контакт 1, а затем размыкаются контакты Т1–Т4 и замыкаются Т5–Т8, после чего схема вновь включается, образуя перекрестную цепь реостатного торможения.

По мере снижения скорости поезда

уменьшается тормозное сопротивление с помощью тех же контактов, что и при пуске.

Контакты силовой схемы могут иметь различное конструктивное исполнение, однако чаще отдается предпочтение групповой конструкции. Так, регулирование пуско-тормозных реостатов выполняют групповым реостатным контроллером, переключение схемы с режима



Режим	Позиция	Контакты												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Пуск при полном возбуждении	1	x	x											
	2	x	x						x					
	3	x	x							x	x			
	4	x	x							x	x	x		
	5	x	x				x		x	x	x			
	6	x	x			x	x		x	x	x			
	7	x	x		x	x			x	x	x			
	8	x	x	x					x	x	x			
	8А	x	x						x	x	x			
	9	x	x						x	x	x			
	10	x	x						x	x	x	x		
	11	x	x				x	x	x	x	x			
	12	x	x	x	x				x	x	x			
13	x	x	x	x				x	x	x				
Пуск при ослабленном возбуждении	14	x	x						x	x				
	15	x	x						x	x				
	16	x	x						x					
Торможение	1		x										x	
	2		x							x			x	
	3		x							x	x		x	
	4		x						Далее, как при пуске	x	x	x	x	

Рис. 58.22. Типичная силовая схема для реостатного пуска и торможения двигателя смешанного возбуждения

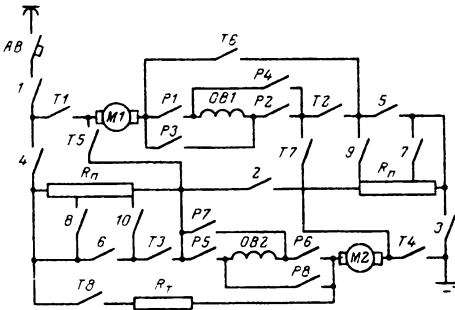


Схема	Поз	Контакты														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-14	15-18			
Пуск при последовательном соединении	1	X														X
	2	X	X													X
	3	X	X	X												X
	4	X	X	X	X											X
	5	X	X	X	X	X										X
Пуск при переключении	1	X														X
	2	X	X													X
	3	X	X	X												X
	4	X	X	X	X											X
Пуск при параллельном соединении	1	X														X
	2	X	X													X
	3	X	X	X												X
	4	X	X	X	X											X
Пуск при последовательном соединении	1	X														X
	2	X	X													X
	3	X	X	X												X
	4	X	X	X	X											X

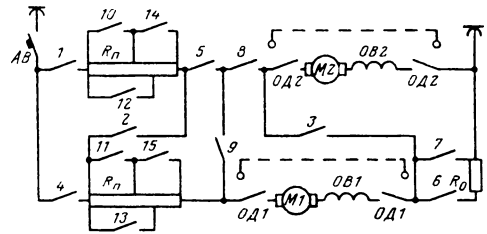


Схема	Поз	Контакты														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Пуск при последовательном соединении	1	X														
	2	X	X													
	3	X	X	X												
	4	X	X	X	X											
	5	X	X	X	X	X										
	6	X	X	X	X	X	X									
	7	X	X	X	X	X	X	X								
	8	X	X	X	X	X	X	X	X							
	9	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Перезабор	11															
	12															
	13															
	14															
Пуск при параллельном соединении	10															
	11															
	12															

Рис. 58.23. Типичная силовая схема для реостатного пуска и торможения двигателей последовательного возбуждения с перегруппировкой по способу моста

Рис. 58.24. Типичная силовая схема для реостатного пуска двигателей последовательного возбуждения с перегруппировкой способом шунтировки одного двигателя резистором

пуска на торможение – тормозным групповым переключателем (контакты  $T1 - T8$ ), а реверсирование направления вращения двигателей – реверсором или групповым аппаратом (контакты  $P1 - P8$ ). Только контакт 1, а иногда и контакты 2–4 выполняют с индивидуальным приводом. На схеме не показаны контакты для ослабления возбуждения, которые могут входить в состав группового реостатного контроллера либо иметь индивидуальный привод. Указанная схема получила распространение в СССР на вагонах электропоездов и метрополитена, где поезд состоит из нескольких моторных вагонов. Последнее обстоятельство при аварийных режимах электродвигателей позволяет отключить аварийный вагон в целом без выезда поезда из графика движения. Поэтому в схеме не предусматривают специального аппарата – отключателя моторов.

ное соединение осуществляется путем замыкания одного из двигателей на резистор  $R_0$ .

При последовательном соединении двигателей пусковые резисторы также соединяются последовательно (замкнуты контакты 1–3). Благодаря тому, что после перегруппировки двигателей на параллельное соединение пусковые резисторы тоже соединяются параллельно (замкнуты контакты 1, 4, 5, 7–9), получают одинаковое число позиций на каждой группировке двигателей. Контакты реверсора включают, как и в схеме рис. 58.23. На схеме рис. 58.24 они не показаны. Контакты  $ОД1 - ОД2$  принадлежат отключателю поврежденных двигателей и служат для разрыва цепи поврежденного двигателя и при необходимости замены его перемычкой (на рис. 58.24 показана штрихами). В первом случае пуск осуществляется на позициях параллельного соединения, а во втором – на позициях последовательного соединения.

Схема рис. 58.24 находит широкое применение на электровагонах. Здесь переключение двигателей с последовательного на параллель-

При реализации схемы рис. 58.24 возможно использование аппаратов с групповым и

индивидуальным приводами. Обычно для реверсирования, перехода с пуска на торможение, перегруппировки двигателей используют отдельные групповые аппараты. Остальные аппараты – индивидуальные. Возможны и другие конструктивные решения.

Схемы рис. 58.23 и 58.24 при большем числе двигателей, ходовых группировок и пуско-тормозных позиций соответственно усложняются, но основные принципы их построения сохраняются.

**Элементы силовой схемы подвижного состава постоянного тока с тиристорно-импульсным управлением**

В состав силовой схемы (рис. 58.25, а) входят тяговый электродвигатель (ТЭД), обозначенный *M*, тиристорно-импульсный преобразователь *ТИП*, сглаживающие фильтры, переключающие аппараты (реверсоры, переключатели с пуска на тормоз), аппараты защиты, тормозные и вспомогательные резисторы, датчики тока и напряжения и др. Регулирование напряжения двигателей осуществляет преобразователь *ТИП<sub>н</sub>*, а регулирование возбуждения – *ТИП<sub>в</sub>*. Для ограниче-

ния пульсаций тока в контактной сети, а также напряжения на полупроводниковых приборах *ТИП* служат элементы Г-образного входного фильтра  $L_{\phi}$ ,  $C_{\phi}$ . Дроссель  $Dp$  и нулевой диод  $VD_0$  служат для сглаживания тока в цепи тягового двигателя. Автоматический выключатель *AB* служит для защиты схемы от короткого замыкания. Контакты 1–4 используются как для реверсирования направления движения, так и для перехода с пуска на тормоз. Контакт *КП* включается только при пуске, а контакт *КТ* – только при торможении. При пуске вначале с помощью *ТИП<sub>н</sub>* напряжение на двигателе плавно увеличивается от некоторого минимального значения до напряжения источника питания, а затем с помощью *ТИП<sub>в</sub>* происходит плавное ослабление возбуждения двигателя. Оба тиристорных регулятора изменяют свой коэффициент заполнения под контролем тока в тяговом двигателе, среднее значение которого при пуске, как и при торможении, поддерживается постоянным. При торможении вначале тиристорный регулятор *ТИП<sub>н</sub>* работает с минимальным коэффициентом заполнения, коэффициент заполнения регулятора *ТИП<sub>в</sub>* при этом изменяется от наименьшего значения до единицы, затем начинает увеличиваться коэффициент заполнения тиристорного регулятора *ТИП<sub>н</sub>* до значения

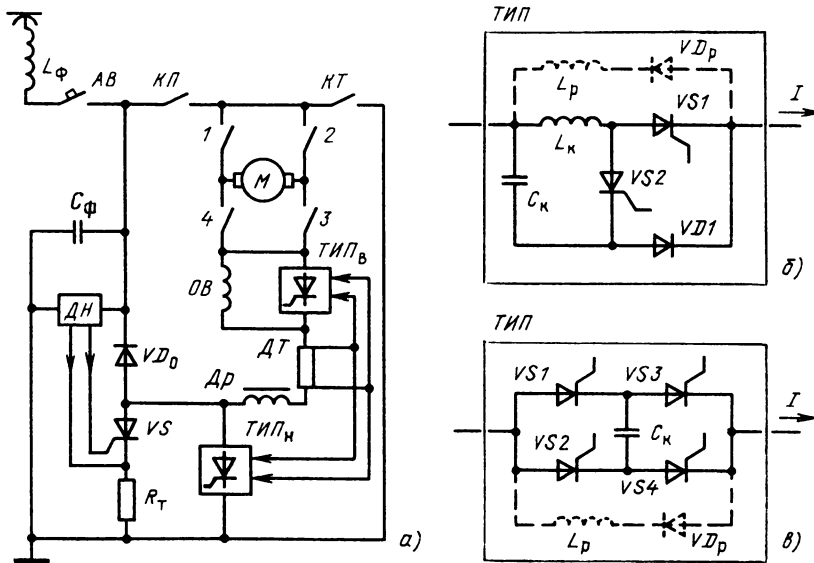


Рис. 58.25. Принцип построения силовой схемы с тиристорным управлением тяговым двигателем:

а – принципиальная силовая схема; б – принципиальная схема тиристорно-импульсного прерывателя с колебательным перезарядом коммутающего конденсатора, в – то же двухтактного тиристорно-импульсного прерывателя с общим узлом коммутации

единицы. Оба тиристорных регулятора, как и при пуске, работают под контролем тока двигателя, который измеряется датчиком тока ДТ. При этом, если в сети есть потребитель энергии, происходит рекуперативное торможение, а при отсутствии потребителя энергия, вырабатываемая двигателем, начинает поглощаться конденсатором фильтра  $C_\phi$ . В результате напряжение на нем увеличивается и при достижении максимально допустимого значения, что контролируется датчиком напряжения ДН, включается тиристор  $VS$ , который подключает тормозной резистор  $R_T$ . Выключается тиристор  $VS$  каждый период регулирования одновременно с выключением тиристорного регулятора ТИП<sub>II</sub>. Поэтому при появлении в сети потребителя, когда напряжение на  $C_\phi$  станет меньше максимально допустимого, перестает включаться тиристор  $VS$  и схема вновь переходит на режим рекуперативного торможения. Преобразователи ТИП могут выполняться по различным схемам, однако наибольшее практическое применение получили схемы с колебательным коммутирующим и двухтактным коммутирующим контурами. Известно много разновидностей этих схем, на рис. 58.25, б и в приведены примеры их исполнения.

Схема тиристорного регулятора с колебательным коммутирующим контуром (рис. 58.25, б) включает в себя главный  $VS1$  и вспомогательный  $VS2$  тиристоры, диод  $VD1$  и коммутирующие элементы  $L_K, C_K$ . Для получения минимального коэффициента заполнения регулятора управляющие импульсы сначала подают только на вспомогательный тиристор  $VS2$ . При этом предварительно заряженный от источника питания коммутирующий конденсатор  $C_K$  перезаряжается на противоположную полярность по цепи  $C_K - L_K - VS2$  в течение времени  $t_k = \pi \sqrt{L_K C_K}$ , после которого тиристор  $VS2$  выключается, так как к нему прикладывается обратное напряжение перезаряженного конденсатора. Начиная с этого момента, конденсатор вновь перезаряжается током нагрузки  $I$  на исходную полярность по цепи  $C_K - VD1$  до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет напряжения источника питания. Время перезаряда  $C_K$  током нагрузки  $I$  равно  $t_n = U_C C_K / I$ . Минимальное время импульса напряжения, прикладываемого к нагрузке, определяется суммой  $t_k + t_n$ . Для увеличения длительности импульса напряжения включают главный тиристор  $VS1$  раньше включения тиристора  $VS2$  на время задержки  $t_3$ . Причем чем больше время задержки  $t_3$ , тем шире импульс напряжения на нагрузке. Ширина импульса напряжения на нагрузке в этом режиме равна:  $t_{\text{и}} = t_k + t_n + t_3$ . Выключение

главного тиристора происходит одновременно с выключением вспомогательного тиристора.

Индуктивность  $L_K$  выбирают по допустимой скорости нарастания тока в тиристорах ( $dI/dt_{\text{доп}}$ ) при  $U_{C_{\text{max}}}$

$$L_K = U_{C_{\text{max}}} / (dI/dt)_{\text{доп}}$$

Емкость  $C_K$  определяют при  $U_{C_{\text{min}}}$  и  $I_{\text{max}}$

$$C_K = \frac{I_{\text{max}}^2}{2U_{C_{\text{min}}}^2} \left( L_K + \sqrt{\frac{4U_{C_{\text{min}}}^2}{I_{\text{max}}^2} t_{\text{сх}}^2 + L_K^2} \right),$$

где  $t_{\text{сх}} = k_3 \tau_b$  — время, предоставляемое схемой для восстановления запирающих свойств тиристоров в прямом направлении;  $\tau_b$  — время выключения тиристоров;  $k_3 = 1,2 \div 2$  — коэффициент запаса.

В схеме тиристорного регулятора на рис. 58.25, в минимальный коэффициент заполнения получают при поочередном включении тиристоров  $VS1, VS4$  и  $VS2, VS3$ . При этом коммутирующий конденсатор  $C_K$  каждый раз перезаряжается током нагрузки на противоположную полярность до напряжения источника питания. Длительность импульса напряжения на нагрузке в этом режиме  $t_n = U_C C_K / I$ . Для увеличения длительности импульса напряжения включают тиристоры  $VS1, VS3$  раньше тиристоров  $VS2, VS3$ , а тиристоры  $VS2, VS4$  — раньше тиристоров  $VS1, VS4$  на время задержки  $t_3$ . Причем ширина импульса напряжения пропорциональна времени задержки  $t_3$ . Суммарная ширина импульса напряжения  $t_{\text{и}} = t_n + t_3$ .

Емкость  $C_K$  определяется по формуле

$$C_K = I t_{\text{сх}} / U_{C_{\text{min}}}$$

Таким образом, ширина импульса напряжения в обеих схемах зависит от тока нагрузки, что при малых токах существенно ограничивает диапазон регулирования среднего значения напряжения на нагрузке. Для уменьшения этого недостатка иногда в схемах ТИП включают цепь дополнительного разрядного контура  $L_p, VD_p$  (на схемах показана штриховой линией). При включении дополнительного разрядного контура коммутирующий конденсатор будет перезаряжаться суммой токов — током нагрузки и током разрядного контура, что существенно стабилизирует время этого процесса при значительных колебаниях тока нагрузки. Правда, включение дополнительного разрядного тока требует некоторого увеличе-

ния емкости  $C_k$  и дополнительно нагружает тиристоры по току.

Выбор класса тиристоров в рассмотренных схемах производится по максимальному напряжению на  $C_k$ , которое больше максимального напряжения источника питания  $U_{сmax}$  на значение дополнительного заряда коммутующего конденсатора, обычно не превышающего 30–40% максимального напряжения источника питания. Таким же образом выбирается класс диодов ТИП. Класс нулевого диода  $VD_0$  выбирается с учетом, что максимальное напряжение на нем равно сумме напряжений источника питания и коммутующего конденсатора.

Значение индуктивности сглаживающего дросселя выбирают по заданному максимальному колебанию тока  $\Delta I_{max}$  в тяговом двигателе при  $\lambda = 0,5$

$$L_{др} = \frac{U_c}{4f \Delta I_{max}} - L_d.$$

Амплитуды переменных составляющих напряжения на конденсаторе фильтра  $\Delta U_c$  и тока источника питания  $\Delta I_L$  зависят от параметров входного фильтра, частоты регулирования  $f$  и коэффициента заполнения  $\lambda$ :

$$\Delta U_c = I \sqrt{\frac{L_\phi}{C_\phi} \frac{\sin 0,5(1-\lambda)/f \sqrt{L_\phi C_\phi}}{\sin 0,5f \sqrt{L_\phi C_\phi}} \times \sin 0,5\lambda f \sqrt{L_\phi C_\phi}}$$

$$\Delta I_L = 0,5I \left[ \frac{\cos 0,25(1-2\lambda)/f \sqrt{L_\phi C_\phi}}{\cos 0,25/f \sqrt{L_\phi C_\phi}} - 1 \right].$$

Максимальные значения амплитуд переменных составляющих  $\Delta I_{Lmax}$  и  $\Delta U_{сmax}$  соответствуют значению  $\lambda = 0,5$  и равны

$$\Delta I_{Lmax} = 0,5I \left[ \frac{1}{\cos 0,25/f \sqrt{L_\phi C_\phi}} - 1 \right]$$

и

$$\Delta U_{сmax} = 0,5I \sqrt{\frac{L_\phi}{C_\phi} \operatorname{tg} 0,25/f \sqrt{L_\phi C_\phi}}.$$

Обычно параметры фильтра выбирают так, чтобы  $f_0/f < 0,3 - 0,5$ , где  $f_0 = 1/2\pi \sqrt{L_\phi C_\phi}$  – собственная частота входного фильтра.

При этих условиях

$$\Delta U_{сmax} \approx \frac{I}{8fC_\phi}; \quad \Delta I_{Lmax} \approx \frac{I}{64f^2 L_\phi C_\phi}.$$

Размеры и масса сглаживающих устройств при прочих равных условиях определяются минимальной частотой регулирования, кото-

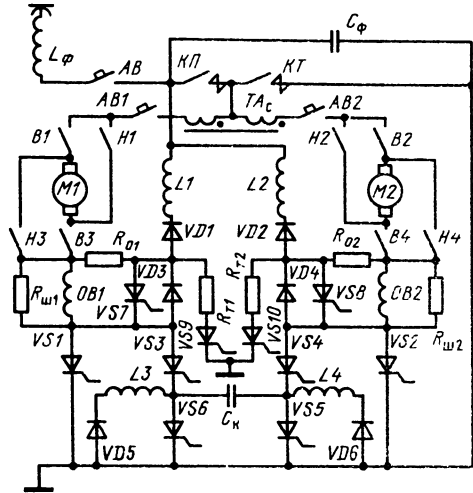


Рис. 58.26. Принципиальная схема управления тяговыми двигателями при пуске и торможении с использованием двухфазного тиристорного прерывателя с общим узлом коммутации:  $AB, AB1, AB2$  – автоматические выключатели;  $L_\phi C_\phi$  – входной фильтр;  $KП$  – пусковой контактор;  $KT$  – тормозной контактор;  $B1 - B4, H1 - H4$  – контакты тормозного переключателя и реверсора;  $VS1, VS2$  – главные тиристоры;  $VS3 - VS6$  – коммутрующие тиристоры;  $VS7, VS8$  – тиристоры ослабления возбуждения;  $VS9, VS10$  – тиристоры реостатного торможения;  $C_k$  – коммутующий конденсатор;  $L1, L2$  – реакторы;  $VD1 - VD4$  – нулевые диоды;  $VD5, VD6$  – диоды контура ускоренного перезаряда  $C_k$ ;  $TA_c$  – трансформатор связи;  $R_{т1}, R_{т2}$  – тормозные резисторы;  $R_{01}, R_{02}$  – резисторы, ограничивающие степень ослабления возбуждения;  $R_{ш1}, R_{ш2}$  – резисторы для ограничения перенапряжений на обмотках возбуждения  $OB1, OB2$

рая может быть увеличена применением многофазных систем регулирования.

На рис. 58.26 приведена схема тиристорного регулирования тяговых двигателей двухфазная с общим узлом параллельной емкостной коммутации. В ней тиристоры  $VS1$  (главный) и  $VS3, VS5$  (коммутующие) одной фазы включаются со сдвигом на  $180^\circ$  по отношению соответственно к аналогичным тиристорам  $VS2$  и  $VS4, VS6$  второй фазы. В результате частота пульсаций на входном фильтре удваивается. Для уменьшения пульсаций тока в тяговых двигателях в цепь каждого из них включены обмотки трансформатора связи  $TA_c$ , которые создают встречно направленные МДС. Поэтому магнитный поток в трансформаторе связи при равенстве средних значений токов в двигателях создается только разностью переменных составляющих этих токов, а частота пульсаций тока в двигателях удваивается по сравнению с частотой



работы тиристорного регулятора одной фазы. Пульсации тока в ТЭД при изменении  $\lambda$  от 0 до 1 достигают максимального значения дважды: при  $\lambda = 0,25$  и  $\lambda = 0,75$  и равны

$$\Delta I_{max} = U_c / 16f L_0,$$

где  $f$  – рабочая частота тиристорных регуляторов.

Особенностью схемы рис. 58.26 является и то, что тиристорные регуляторы возбуждения (тиристоры  $VS7, VS8$ ), работая также со сдвигом на  $180^\circ$ , выключаются коммутирующим контуром регулятора напряжения. Кроме того, с помощью резисторов  $R_{01}, R_{02}$  и диодов  $VD3, VD4$  обеспечивается зависимость коэффициента ослабления возбуждения  $\alpha$  от коэффициента заполнения тиристорного регулятора  $\lambda$ . При пуске эту зависимость используют для увеличения плавности трогания подвижного состава, а при торможении – для снижения напряжения в двигателях при высоких скоростях, облегчая условия коммутации в них.

Тиристоры  $VS9, VS10$  служат для подключения тормозных резисторов  $R_{11}, R_{12}$  в случае отсутствия потребителя электроэнергии на линии во время рекуперативного торможения. Диоды  $VD5, VD6$  и катушки индуктивности  $L_3, L_4$  образуют дополнительные разрядные контуры, стабилизирующие время перезаряда  $C_k$ . Катушки индуктивности  $L_1, L_2$  обеспечивают дополнительный заряд  $C_k$ , пропорциональный току двигателей, повышая тем самым нагрузочную способность ТИП.

Регулирование возбуждения двигателей в данной схеме осуществляется при пуске и торможении по-разному. При пуске ослабление возбуждения регулируют путем изменения временной задержки на включение тиристорных  $VS7, VS8$  после тиристорных  $VS1, VS2$ . Причем чем меньше эта задержка, тем больше ослабление возбуждения. Наибольшая степень ослабления возбуждения получается при одновременном включении тиристорных  $VS1$  и  $VS7$  ( $VS2$  и  $VS8$ ). При этом значение коэффициента ослабления возбуждения  $\alpha_{min}$  определяется соотношением

$$\alpha_{min} = R_0 / (R_0 + r_{i,n}).$$

При торможении регулирование возбуждения происходит по мере изменения коэффициента заполнения тиристорного регулятора за счет неодинаковых постоянных времени цепей обмоток якоря и возбуждения на интервале паузы регулятора. В результате ток возбуждения при изменении  $\lambda$  от 0 до 1 увеличивается от некоторого минимального значения, определяемого значением  $R_{01}, R_{02}$ .

до максимального значения, определяемого значением  $R_{ш1}, R_{ш2}$ .

Реверсорные контакторы  $B1 - B4$  и  $H1 - H4$  используются как для реверсирования направления движения, так и для реверсирования обмоток якорей при переходе с пуска на тормоз. После сборки силовой схемы последним включается контактор  $KП$  (при пуске) или  $KТ$  (при торможении). Автоматические выключатели  $AB, AB1, AB2$  защищают силовые цепи от короткого замыкания и перегрузок при срывах тиристорного регулятора.

При многодвигательном приводе часто применяют несколько автономно работающих тиристорных регуляторов, каждый из которых питает свою группу тяговых двигателей. Обычно для снижения пульсаций тока в контактной сети или снижения массы и стоимости входного фильтра эти регуляторы включают по многофазной схеме, в которой они работают со сдвигом на угол, кратный числу фаз. Автономная работа тиристорных регуляторов позволяет сохранить работоспособность подвижного состава при выходе из строя одного из тяговых двигателей или тиристорных регуляторов.

#### Элементы силовых схем подвижного состава с вентильными преобразователями

В состав силовой схемы входят тяговые двигатели, трансформатор, регулирующие аппараты, вентили, сглаживающие реакторы и аппараты защиты. На подвижном составе применяются однофазные мостовые схемы двухполупериодного выпрямления.

Регулирование скорости при пуске и движении осуществляется переключением секций вторичной обмотки трансформатора или по схеме регулируемого автотрансформатора на стороне ВН. В промежутках между ступенями трансформатора иногда применяется плавное фазовое регулирование напряжения.

Переключение выводов вторичной обмотки трансформатора должно осуществляться без разрыва цепи и короткого замыкания секций обмотки. Для этого используется ряд способов. На рис. 58.27,а изображена схема с переходными диодами 1–4, которые составляют небольшую часть всей выпрямительной установки. Рассмотрим ее сначала при замкнутых контактах  $K1, K2$ . При замыкании контакта 1 напряжение первой секции вторичной обмотки подводится к точкам  $a$  и  $b$  выпрямителя и выпрямляется диодами 2, 4–10. Для переключения на второй вывод трансформатора дополнительно замыкается контакт 2, т. е. к точкам  $a-b$  выпрямителя подводится большее напряжение, которое выпрямляется

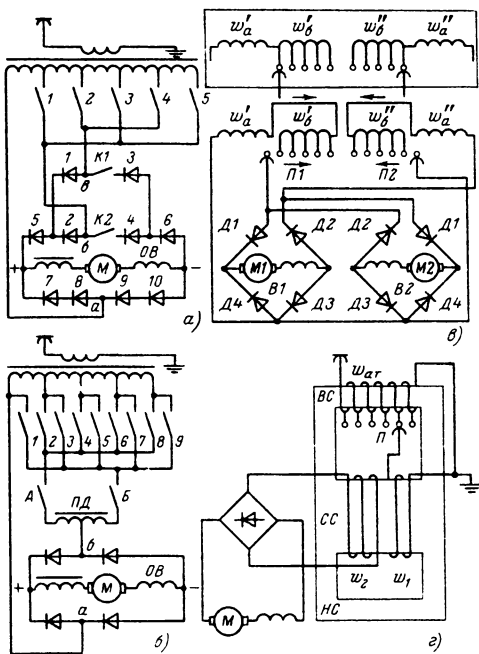


Рис. 58.27. Силовые схемы для пуска выпрямительного подвижного состава. а — с переходными вентилями; б — с переходными дросселями. в — с встречно-согласным включением обмоток трансформатора; г — с переключением на стороне высокого напряжения трансформатора

диодами 1, 3, 5–10. Диоды 2, 4 при этом находятся в закрытом состоянии. Затем размыкается контакт 1 и замыкается контакт 3, т. е. напряжение трех секций трансформатора выпрямляется диодами 2, 4–10 и т. д.

Если использовать контакты K1 и K2, число ступеней напряжения практически удваивается, так как на каждом выводе трансформатора могут быть получены две ступени напряжения. Например, при замыкании контактов 1 и K1 напряжение первой секции будет выпрямляться только один полупериод, т. е. среднее напряжение будет в 2 раза меньше, чем при замкнутых K1 и K2.

При замкнутых контактах 1, 2 и K1 в один полупериод будет выпрямляться напряжение двух секций трансформатора, а в другой полупериод — напряжение одной секции, т. е. среднее выпрямленное напряжение составит только  $\frac{3}{4}$  выпрямленного напряжения, получаемого при замыкании K1 и K2 и т. д. Эта схема используется на всех вагонах пригородных электропоездов ЭР9. В схеме двойной контакт нагружен полным током двигателя, который в цепях электропоезда невелик.

В электровозах из-за больших токов тяговых двигателей трудно использовать контакты на их полный ток. Поэтому предпочтительнее схема с переходным дросселем (рис. 58.27, б), в которой ток в контактах почти в 2 раза меньше общего тока.

В начале пуска замкнуты контакты 1 и 2, т. е. переходный реактор ПД включен на напряжение первой секции и делит это напряжение примерно пополам. Выпрямитель, таким образом, выпрямляет половину напряжения секции. Затем размыкается контакт 1 и дополнительно замыкается контакт 3, т. е. ПД присоединяется обоими концами к второму выводу трансформатора и теперь к выпрямителю подводится все напряжение первой секции трансформатора. Падение напряжения в переходном реакторе невелико, так как его обмотки включены бифилярно. Затем размыкается контакт 2 и замыкается контакт 4, т. е. обмотка дросселя включается на напряжение второй секции трансформатора и к выпрямителю подводится напряжение первой секции плюс примерно половина напряжения второй секции и т. д. При этих переключениях в каждом плече реактора проходит примерно половина общего тока.

Эта схема положена в основу переключения выводов трансформатора отечественных выпрямительных электровозов со ступенчатым регулированием напряжения. С целью резервирования выпрямительная установка разделена на выпрямители B1 и B2 (рис. 58.27, в). Питаные эти выпрямители части вторичной обмотки трансформатора также разделены на две: не имеющие промежуточных выводов ( $w'_a$  и  $w''_a$ ) и имеющие выводы ( $w'_б$  и  $w''_б$ ). Эти выводы переключаются по схеме рис. 58.27, б с переходными реакторами. На рис. 58.27, в переключатели П1, П2 изображены упрощенно.

В начале пуска обмотки  $w_a$  и  $w_б$  включены встречно, т. е. сумма их напряжений, подаваемая на выпрямители, минимальна. Переключатель П1 стоит на первом (слева) контакте, переключатель П2 контактов не касается.

При этом в один полупериод, когда результирующее напряжение в обмотках ( $w'_a - w'_б$ ) направлено слева направо, его будет выпрямлять выпрямитель B1, а напряжение выпрямителя B2 равно нулю. В другой полупериод напряжение обмоток  $w'_a - w'_б$  будет выпрямлять выпрямитель B2, а напряжение выпрямителя B1 равно нулю.

Если затем дополнительно переключатель П2 поставить на правый контакт, оба выпрямителя будут выпрямлять начальное напряжение, т. е. выпрямленное напряжение удвоится. Но по-прежнему в один полупериод выпрямители будут выпрямлять напряжение

«своих» обмоток, а в другой полупериод – «соседних» обмоток.

Для дальнейшего повышения напряжения переключатель  $П1$  передвигается на соседний контакт, т. е. напряжение обмоток  $w'_a - w'_б$  возрастает, а обмоток  $w''_a - w''_б$  сохраняется. Тогда выпрямитель  $B1$  в одном полупериоде будет выпрямлять это увеличенное напряжение обмоток  $w'_a - w'_б$ , а в другом – прежнее напряжение обмоток  $w''_a - w''_б$ .

В выпрямителе  $B2$  эти же процессы повторяются со сдвигом на  $180^\circ$ . Симметрия увеличенного напряжения восстанавливается, когда и  $П2$  передвинется на следующий контакт и т. д.

Когда переключатели  $П1, П2$  дойдут до конечных (внутренних) выводов обмоток  $w'_a$  и  $w''_б$ , происходит переключение частей обмоток на согласное включение, а переключатели займут исходное положение (рис. 58.27, в, вверху), после чего переключение выводов обмоток  $w'_б$  и  $w''_а$  повторится в прежнем порядке.

Такая схема позволяет получить наибольшее число ступеней напряжения при заданном числе контактов и выводов вторичной обмотки трансформатора.

Ходовыми являются положения контактов, когда выпрямление симметричное и концы переходных дросселей включены на общий вывод трансформатора, т. е. когда переходные дроссели не потребляют намагничивающий ток. Это имеет место только на каждой четвертой позиции пуска.

При переключениях на стороне низшего напряжения и соответственно при больших значениях тока коммутационная аппаратура достаточно громоздка. Поэтому в некоторых странах отдают предпочтение переключению на стороне высокого напряжения, используя для этого дополнительную обмотку  $w_{ат}$ , включенную на напряжение сети по схеме автотрансформатора (рис. 58.27, г).

Напряжение от автотрансформатора с помощью переключателя  $П$  подается на понижающий трансформатор с первичной  $w_1$  и вторичной  $w_2$  обмотками. Для уменьшения массы магнитопровода стержни автотрансформатора и трансформатора совмещены, причем средний стержень  $СС$  имеет в 2 раза большее сечение, чем крайние  $ВС$  и  $НС$ . Число витков обмотки автотрансформатора  $w_{ат} = 2w_1$ . При таком соотношении чисел витков и расположении обмоток в исходном положении переключателя ( $U_1 = 0$ ) весь магнитный поток автотрансформатора замыкается через верхний и нижний стержни, а в среднем поток равен нулю. При установке переключателя в среднее положение весь магнитный поток

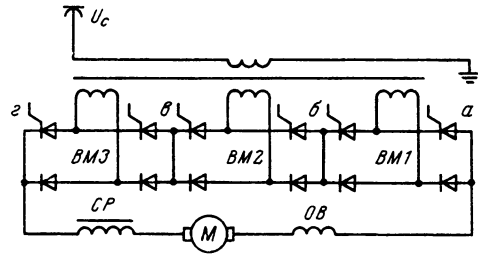


Рис. 58.28. Схема для бесконтактного трехзонного плавного изменения выпрямленного напряжения

автотрансформатора замыкается через средний стержень. В крайнем левом положении переключателя  $П$  через средний стержень проходит магнитный поток, в 2 раза больший потока автотрансформатора. Половина его замыкается через  $ВС$ , половина – через  $НС$ .

Таким образом, по мере перемещения переключателя  $П$  по выводам обмотки  $w_{ат}$  постепенно изменяются вторичное и выпрямленное напряжения.

Недостатки этой системы – большая масса объединенной магнитной системы и обмоток, а также сложность изоляции коммутационных устройств при высоком напряжении.

Тиристоры позволяют создать выпрямительные схемы для плавного управления тяговыми двигателями с достаточно высокими энергетическими показателями, в первую очередь высоким коэффициентом мощности, и без применения коммутационной аппаратуры. На рис. 58.28 изображена схема, где каждый из трех последовательно включенных полупроводниковых мостовых выпрямителей ( $ВМ1, ВМ2, ВМ3$ ) питается от своей секции вторичной обмотки.

В начале пуска все тиристоры находятся в закрытом состоянии и выпрямленное напряжение равно нулю. Затем постепенно открываются тиристоры моста  $ВМ1$  и выпрямленное напряжение на его выходе (точки  $а, б$ ) возрастает до наибольшего.

При этом возникает ток в двигателе, который в закрытых еще  $ВМ2$  и  $ВМ3$  протекает по диодам. Затем постепенно открывается  $ВМ2$ . Его напряжение (точки  $б, в$ ) суммируется с напряжением ранее открытого моста  $ВМ1$ . После полного открывания  $ВМ2$  точно так же увеличивается напряжение  $ВМ3$  (точки  $в, г$ ).

Такого вида трехзонные выпрямители в настоящее время применяют в ряде стран. В СССР по этой схеме построены электровозы ВЛ84<sup>Г</sup> для БАМ, электровозы Sr1 для Финляндии.

### Аккумуляторный электроподвижной состав

Тяговые двигатели этого вида электроподвижного состава питаются от аккумуляторов, которые по мере расходования энергии периодически заряжаются от внешних источников.

Обычно используются химические (свинцовые, щелочные и др.) и механические аккумуляторы в виде маховиков, которые раскручиваются электродвигателем на стоянках, а во время движения вращают генератор, от которого питаются тяговые двигатели. Испытываются также топливные элементы, непосредственно превращающие энергию топлива, например водорода и кислорода, в электрическую энергию для питания тяговых двигателей.

Применение этих видов транспорта будет способствовать сокращению выделения вредных газов по сравнению с автомобилями. Но пока еще область их эффективного применения весьма ограничена. Пробег экипажа на один заряд химических аккумуляторов, наиболее распространенных в настоящее время, не превышает 100 км.

Принимаются меры для уменьшения удельного расхода энергии путем уменьшения массы тары, уменьшения потерь электроэнергии, в частности, путем применения безреостатного пуска при помощи ТИП, а также рекуперативного торможения, при котором тяговые двигатели заряжают аккумуляторную батарею. Благодаря этому применение аккумуляторных видов тяги постоянно расширяется в различных видах как пассажирского (электромобили), так и грузового транспорта (электротележки, электропогрузчики, рудничные электровозы, электромобили малой грузоподъемности для внутригородских перевозок и т. д.).

#### Защита электрооборудования подвижного состава

Защита от КЗ и перегрузок применяется на всех видах подвижного состава.

На подвижном составе с напряжением 1500–3000 В защита от КЗ осуществляется при помощи быстродействующих выключателей (см. табл. 58.29) и дифференциальных реле (см. табл. 58.31). Эти реле срабатывают под действием разности токов силовых катушек, одна из которых включена в начале, а другая — в конце цепи. При замыкании цепи на корпус в любой точке по катушкам протекают разные токи, реле срабатывают и выключают автоматический выключатель. Защита от перегрузок осуществляется электро-

магнитными реле, снижающими перегрузку двигателей без отключения их от контактной сети (на электровозах реле перегрузки подает сигнал машинисту, на электропоездах снижает уставку реле ускорения).

Электрооборудование подвижного состава переменного тока защищают от чрезмерного тока воздушным выключателем, в котором дуга гасится в струе сжатого воздуха.

На подвижном составе с выпрямителями защита от КЗ и перегрузок предусматривается на стороне НН и ВН. На стороне НН реле перегрузки действуют на отключение цепей зажигания вентилей. Для общей защиты от КЗ используется автоматический выключатель.

На подвижном составе городского и промышленного транспорта защита от перегрузок и КЗ осуществляется автоматическими выключателями (см. табл. 58.29) и реле перегрузки (см. табл. 58.30), действующими на отключение двигателей от сети.

Все виды рельсового наземного транспорта защищаются от атмосферных перенапряжений вилитовыми разрядниками.

Защита вспомогательных цепей электрооборудования на подвижном составе производится электромагнитными реле, тепловыми реле или плавкими предохранителями.

На всех видах подвижного состава применяется защита от минимального напряжения (применяемые реле — см. табл. 58.30). На подвижном составе с рекуперативным и реостатным торможением устанавливается защита от чрезмерных повышений напряжения (РМН), действующего на замещение рекуперативного торможения реостатным.

На электроподвижном составе устанавливается также защита от радиопомех.

#### Системы управления электроподвижным составом

Системы управления разделяются на непосредственные и косвенные. Непосредственное управление применяется на рудничных электровозах, некоторых трамвайных вагонах и промышленных электровозах небольшой мощности (там, где напряжение сети до 600 В и установленная мощность тяговых двигателей до 200–250 кВт). Во всех остальных случаях применяется косвенное управление. В системах косвенного управления аппараты силовой схемы приводятся в действие посредством приводов, управляемых на расстоянии через электрические цепи.

Косвенное управление может быть неавтоматическим, когда все операции переключения в цепи двигателей осуществляются водите-

лем, а также автоматическим, когда водитель только задает режим пуска или торможения, а система управления эти режимы осуществляет. Автоматическое управление используется на всех электропоездах пригородных железных дорог и метрополитена. Значительная часть трамвайных вагонов и троллейбусов последних выпусков также автоматизирована. На электровозах ВЛ80<sup>Т</sup>, ВЛ84<sup>Т</sup>, ЧС2<sup>Т</sup> и ЧС4<sup>Т</sup> автоматизирован процесс торможения.

Автоматические системы управления содержат реле ускорения – торможения (см. табл. 58.32). Питание цепей управления и сигнализации производится от аккумуляторной батареи, работающей параллельно с зарядным генератором. Напряжение генератора поддерживается постоянным при помощи регулятора напряжения.

По принципу действия аппаратов системы управления разделяют на контактные и бесконтактные. По конструкции аппаратов контактные системы управления разделяют на групповые, индивидуальные и смешанные.

### 58.9. ЭЛЕКТРОПРИВОД АУТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ЭЛЕКТРОМОТОР-КОЛЕСАМИ

В настоящее время развивается производство пневмоколесных транспортных машин с электрическим приводом колес, получающих электрическую энергию от автономного источника (аккумулятора, дизель-генератора, газотурбогенератора). Они могут быть объединены общим термином «электромобили», хотя этот термин часто относят к машинам с аккумуляторами [58.32 – 58.34].

В электромобилях предусмотрена специальная конструкция механического привода типа мотор-колесо (рис. 58.29), в котором электродвигатель встроен в ступицу колеса, а вал двигателя связан с ободом колеса через редуктор с большим передаточным отношением ( $i = 20 \div 80$ ). Индивидуальный электропривод типа мотор-колесо позволяет улучшить использование сцепного веса автомобиля путем автоматического управления силой тяги каждого мотор-колеса, улучшить компоновку автомобиля за счет ликвидации коробок передач, задних мостов, карданных передач и т. д. Накопленный опыт создания автомобилей с индивидуальным электроприводом типа мотор-колесо показывает, что для мощного большегрузного автосамосвала электропередача может являться единственным типом привода. Электропривод находит применение в автомобилях и автопоездах высокой проходимости различного назначения, легковых авто-

Рис. 58.29. Схема мотор-колеса:

1 – тяговый двигатель; 2 – редуктор; 3 – тормоз; 4 – устройство подвески; 5 – рама кузова; 6 – опорные подшипники ступицы колеса

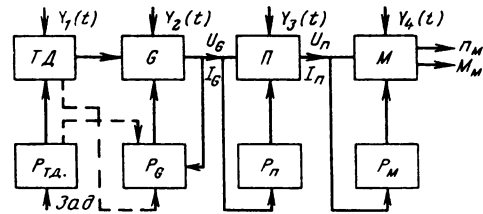
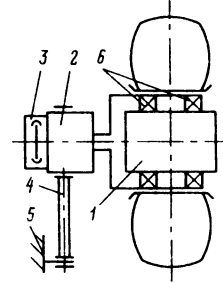


Рис. 58.30. Блочная схема транспортного средства с ТЭПС:

ТД – тепловой двигатель, G – генератор; П – преобразователь, M – тяговый двигатель, P<sub>ГД</sub>, P<sub>Г</sub>, P<sub>П</sub>, P<sub>М</sub> – регуляторы теплового двигателя, генератора, преобразователя, тягового двигателя,  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$ ,  $y_4(t)$  – возмущающие воздействия

мобилях и автобусах с улучшенными техническими характеристиками.

В СССР серийно выпускаются транспортные машины с дизель-генераторами. Ниже приводятся краткие сведения о тяговом электрооборудовании их. Блочная схема тягового электропривода электромобиля с дизель-генератором приведена на рис. 58.30.

Электропривод постоянного тока содержит генератор постоянного тока и тяговые двигатели постоянного тока различных систем возбуждения. Электропривод переменного-постоянного тока содержит генератор переменного тока, как правило синхронный, выпрямитель и тяговые двигатели постоянного тока различных систем возбуждения. Электропривод переменного тока содержит генератор переменного тока и тяговые двигатели переменного тока, в случае если частотное регулирование асинхронных машин осуществляется за счет изменения частоты вращения теплового двигателя и связанного с ним генератора. В общем случае электропривод переменного тока содержит генератор переменного тока, преобразователи частоты со звеном постоянного напря-

жения или непосредственные, тяговые двигатели переменного тока.

Для устойчивой работы теплового двигателя с генератором необходимо, чтобы момент сопротивления (генератора) на валу теплового двигателя возрастал при увеличении частоты вращения более интенсивно, чем момент теплового двигателя

$$d(M_c - M)/dn < 0 \text{ или } dM_c/dn > 0.$$

Отсюда следует, что для обеспечения устойчивой работы поток и ток генератора должны увеличиваться с ростом частоты вращения теплового двигателя. Свойство генератора устойчиво работать с тепловым двигателем без применения специальных регуляторов называется саморегулированием. При саморегулировании, как правило, генератор несколько перегружает тепловой двигатель, при этом снижается мощность и частота вращения теплового двигателя. В случае полного соответствия мощности генератора мощности теплового двигателя (при постоянной подаче топлива зависимость  $U_r$  от  $I_r$  гиперболическая) тепловой двигатель не перегружается и частота вращения не снижается.

При разработке электроприводов необходимо учитывать эластичность колес. Многочисленные исследования и разработки в области механики эластичного колеса привели к убедительным рекомендациям по проектированию, эксплуатации механических передач с эластичными шинами, однако они не могут непосредственно применяться для установления аналитических зависимостей, характеризующих режимы работы транспортных средств с индивидуальным электроприводом. При приложении к колесу различных силовых факторов радиус колеса изменятся. Радиус качения колеса  $r_k$ , т. е. радиус, определяющий частоту вращения тягового двигателя, в режимах тяги меньше, чем в режиме выбега, за счет прогиба колеса под действием вращающего момента, в режимах торможения  $r_k$  больше, чем в режиме выбега, за счет действия тормозного момента. В режимах тяги тангенциальная эластичность уменьшает расхождение нагрузок между двигателями.

Тяговые машины (ТЭД) в электромобилях способны работать в режимах двигателя, обеспечивая силы тяги, и в режимах генератора, обеспечивая электрическое торможение. В мощных электромобилях (карьерные автосамосвалы, автопоезда) используется электрическое реостатное торможение.

Тяговая характеристика, реализуемая при использовании полной мощности теплового двигателя, является предельной. Тяговые характеристики, полученные при использовании

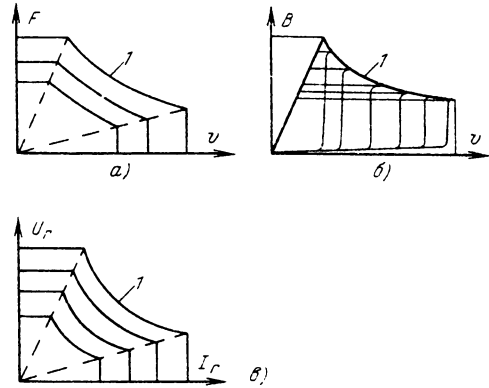


Рис. 58.31. Характеристики ТЭПС:  
а — тяговая, б — тормозная; в — зависимость напряжения генератора от тока. Цифра 1 относится к предельным характеристикам

уменьшенной по сравнению с полной мощностью теплового двигателя, называются частичными (рис. 58.31).

На рис. 58.31 приведены тормозные характеристики электромобиля с постоянным значением тормозной силы и скорости транспортной машины при движении на уклонах.

На рис. 58.31,в приведены гиперболические характеристики напряжения генератора  $U_r$  в зависимости от тока  $I_r$ , внешняя — для полной мощности теплового двигателя и частичные. Характеристики  $U_r(I_r)$  обеспечиваются с помощью специальных возбудителей, а также с помощью систем автоматического регулирования генератора, которые включают в себя датчики тока и напряжения, функциональные блоки, перемножающие сигналы по току и напряжению и обеспечивающие отсечки по току и напряжению.

При решении вопросов оптимизации характеристик автомобиля с электроприводом (в частности, улучшение его проходимости, маневренности, тяговых свойств с одновременным уменьшением производительных затрат энергии) нужно учитывать тип колесной формулы (переднеприводной, заднеприводной и полноприводной) и схемы соединения тяговых двигателей (последовательное и параллельное) и все это с учетом особенностей работы эластичных колес в режимах прямолинейного движения и при поворотах.

Результаты проведенных исследований в части мотор-колесного электропривода постоянного тока позволяют сделать выводы о том, что по потерям мощности на движение

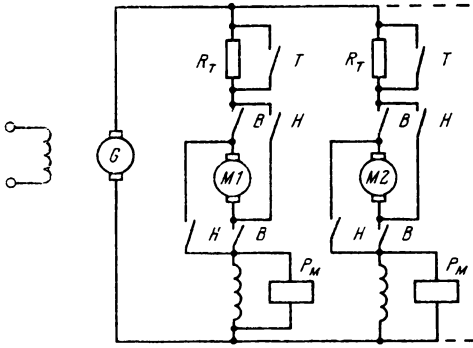


Рис. 58.32. Схема электропередачи постоянного тока;

$R_T$  – тормозные сопротивления,  $T$  – тормозные контакторы;  $B, H$  – контакты реверсора

целесообразнее выполнять транспортное средство на полноприводной схеме, поскольку в этом случае при прямолинейном движении и поворотах затраты мощности на сопротивление движению автомобиля существенно меньше по сравнению с заднеприводными и переднеприводными автомобилями.

При сравнении параллельной и последовательной схем соединения тяговых двигателей выявлено, что последовательная схема позволяет снизить затраты мощности на преодоление сопротивления движению.

На рис. 58.32 приведена схема электропривода автомобиля постоянного тока. Для перевода схемы в режим торможения необходимо реверсировать якоря тяговых двигателей и разомкнуть тормозные контакторы. Регуляторы тока двигателей и возбуждения генератора позволяют реализовать характеристики, приведенные на рис. 58.31.

Размеры и масса элементов электропередачи (электрических машин и преобразователей) пропорциональны их расчетной мощности. Расчетная мощность двигателей  $P_{р.дв}$  определяется по номинальной мощности  $P_{н.дв}$ :

$$P_{р.дв} = P_{н.дв} k_v$$

или

$$P_{р.дв} = M_{ном} n_{max}$$

где

$$k_v = \frac{V_{max}}{V_{ном}} = \frac{U_{max}}{U_{ном}} \frac{\Phi_{ном}}{\Phi_{min}} = k_r k_{тэд}$$

$k_v$  – коэффициент скоростного диапазона транспортной машины;  $V_{max}$ ,  $V_{ном}$  – максимальная и номинальная длительная скорость движения транспортной машины, км/ч;

$k_1 = \frac{U_{max}}{U_{ном}}$  – коэффициент кратности изменения напряжения генератора;  $U_{max}$ ,  $U_{ном}$  – максимальное и номинальное напряжение генератора, В;  $k_{1,1} = \Phi_{ном} / \Phi_{min}$  – коэффициент изменения потока ТЭД;  $\Phi_{ном}$ ,  $\Phi_{min}$  – номинальный и минимальный поток ТЭД, Вб;  $M_{ном}$  – номинальный момент ТЭД, Н·м;  $n_{max}$  – максимальная частота вращения ТЭД, 1/с.

Расчетная мощность генератора  $P_{р.г}$ , кВт·А, определяется по номинальной мощности  $P_{г,ном}$ :

$$P_{р.г} = \frac{P_{г,ном} k_r}{\cos \varphi_{ном}} = U_{max} I_{г,ном} \cdot 10^{-3},$$

где  $I_{г,ном}$  – номинальный ток генератора, А;  $\cos \varphi_{ном}$  – номинальный коэффициент мощности.

Расчетная мощность преобразователя во всех случаях определяется максимальной расчетной мощностью, равной произведению максимального тока на максимальное напряжение

$$P_{р.п} = U_{max} I_{max} 10^{-3}.$$

Обычно в мотор-колесных машинах  $k_v = 2 \div 6$ . Этот диапазон регулирования ТЭД обеспечивается изменением напряжения генератора и ослаблением потока ТЭД. Значения  $k_r$  и  $k_{тэд}$  находятся в пределах  $k_r = 1.3 \div 1.8$ ,  $k_{тэд} = 2.0 \div 4.0$ .

Чем больше значение  $k_1$ , тем больше масса и размеры генератора; чем больше значение  $k_{тэд}$ , тем больше масса и размеры тяговых двигателей. При проектировании электропередачи важно правильно выбрать значения  $k_1$  и  $k_{тэд}$  с целью минимизации

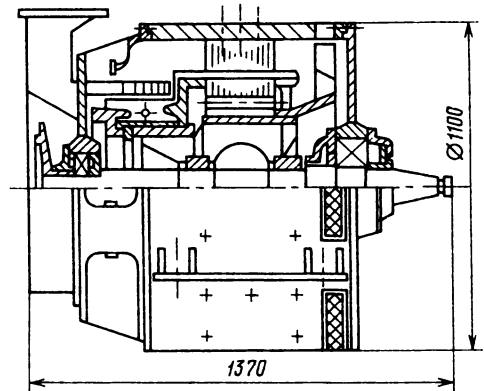


Рис. 58.33. Эскиз продольного разреза генератора ГПА-800А

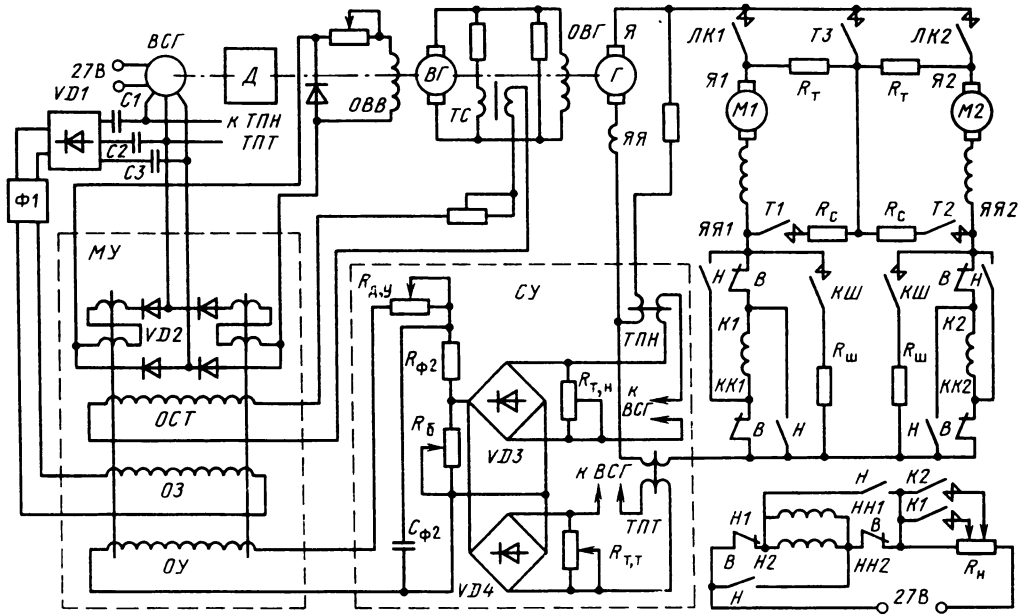


Рис. 58.34. Принципиальная схема тягового электропривода карьерного автосамосвала БелАЗ-549

общей массы электрооборудования транспортной машины.

Ниже в таблицах приводятся параметры и характеристики электрических машин теплоэлектрического подвижного состава [58.33, 58.34]. На рис. 58.33 приведен эскиз генератора ГПА-800. В табл. 58.34 – 58.36 произведение  $A_j$  (фактор нагрева) характеризует удельные потери в меди.

Принципиальная схема тягового электропривода карьерного автосамосвала БелАЗ-549

На рис. 58.34 представлена принципиальная силовая схема электропривода, используемая в карьерном автосамосвале БелАЗ-549 грузоподъемностью 75 т. Дизель Д приводит во вращение тяговый генератор постоянного тока Г, возбудитель генератора ВГ и вспомогательный синхронный генератор ВСГ.

Таблица 58.33 Основные параметры транспортных и строительно-дорожных машин с электроприводом

Параметр	Карьерные автосамосвалы и автопоезда БелАЗ				Скреперы		Колесный трактор (опытный)
	75	120	120	180	опытный	ДЗ-67	
Грузоподъемность, т	75	120	120	180	20 (объем ковша 10 м³)	45 (объем ковша 10 м³)	5 (тяговое уси.ие)
Колесная формула	4×2	4×2	6×4	4×2	4×4	4×4	4×4
Мощность дизеля, л. с	850	1200	1200	2400	375	850	300
Масса порожнего груженого	60/135	90/210	90/210	120/300	29/49	65/110	300/15
Радиус качения колеса, м	1,160	1,4	1,160	1,5	0,718	1,06	0,8
Передаточное число редуктора	21,5	21,5	21,5	21,5	31,4	34,2	48
Мощность ТЭД, кВт	230	360	230	560	80	120	35
Тип генератора	ГПА-600	ГПА-800	ГПА-800	ГСА-1250	ДК-708Д	ГПА-600А	СГ-160/400
Тип ТЭД	ДК-717А	ДК-722А	ДК-717А	ДК-724А	ДК-706А	ДК-717Б	ДК-718Б
Номинальная скорость, км/ч	16,5	16,7	16,5	18,3	–	5	9
Максимальная скорость, км/ч	60	55	60	52,5	22 – груженого, 40 – порожнего	35	36



Таблица 58.34. Основные параметры тяговых генераторов постоянного тока

Параметр	Тип генератора				
	ГПА-600	ГПА-800	ГП-311Б	ГП-300Б	ГП-312
Мощность, кВт	600	800	2000	780	1270
Напряжение номинальное/максимальное, В	625/800	570/800	465/700	645/870	356/570
Ток номинальный/максимально допустимый, А	970/2400	1400/4000	4320/6600	1210/1900	3570/6000
Частота вращения, 1/с	157	157	89	78	78
Коэффициент полезного действия номинальный	0,928	0,935	0,938	0,94	0,945
Число витков обмотки независимого возбуждения на полюс	92	81	105	99	109
Ток возбуждения, номинальный/максимальный, А	80/105	86/120	60/120	75. —	40/80
Реактивная ЭДС в номинальном режиме, В	4,8	6,5	4,0	2,94	4,85
Фактор нагрева якоря ( $A_j$ )	2640	3270	3368	2262	2745
Линейная нагрузка якоря, А/см	417	487	533	436	500
Индукция в воздушном зазоре при $U_{max}$ , Тл	0,96	0,91	0,847	0,96	1,1
Коэффициент полюсного перекрытия	0,72	0,72	0,71	0,677	0,682
Диаметр якоря, мм	0,66	0,74	1,2	0,84	0,99
Активная длина якоря, м	0,25	0,265	0,494	0,440	0,50
Длина воздушного зазора, мм	3	3	5	4	3,5
Диаметр и длина коллектора, м	0,51/0,14	0,58/0,17	0,85/0,35	0,68/0,15	0,78/0,295
Число коллекторных пластин	324	243	465	380	435
Число пазов	81	81	155	76	145
Масса, кг	2480	3170	8700	4800	7400
Коэффициент регулирования $k_r$	1,3	1,4	1,5	1,35	1,6
Расчетная мощность, кВт	770	1130	3000	1050	2050

Таблица 58.35. Основные параметры синхронных генераторов

Параметр	Тип генератора				
	ГСА-800	ГСА-1250	СТ-160/400	ГС-501А*	ГС-504А*
Мощность, кВт	800	1280	160	2190	2750
Напряжение линейное номинальное/максимальное, В	400/600	600/800	400/560	360/535	360/580
Частота вращения 1/с/частота тока, Гц	628/400	157/125	418/400	105/100	105/100
Коэффициент мощности	0,88	0,83	0,7	0,9	0,9
Коэффициент полезного действия	0,944	0,931	0,923	0,938	0,95
Возбуждение независимое	От встроеного возбудителя			От специального возбудителя	
Диаметр расточки статора, м	0,554	0,81	0,49	1,23	1,23
Активная длина статора, м	0,315	0,30	0,24	0,3	0,326
Длина воздушного зазора, мм	7	4	2,5	5	5,5
Число пазов	72	120	108	144	144
Индукция в воздушном зазоре при $U_{max}$ , Тл	1,17	0,72	0,83	1,0	1,025
Линейная нагрузка статора, А/см	271	684	221	599	680
Тепловой фактор статора, А/см · А/мм <sup>2</sup>	1500	4200	1110	2400	3750
Линейная нагрузка ротора, А/см	1017	390	156	—	—
Тепловой фактор ротора, А/см · А · мм <sup>2</sup>	5630	2660	550	—	—
Индуктивное сопротивление рассеяния: обмотки статора	0,0594	0,194	0,118	—	0,11
взаимной индукции по продольной оси	0,563	2,74	1,572	—	0,958
цепи коммутации	0,0937	0,292	0,530	—	0,15
Масса, кг	2050	3000	680	5800	6000
Коэффициент регулирования $k_r$	1,5	1,35	1,4	1,6	1,51
Расчетная мощность, кВт · А	1360	2050	320	3900	4450

\* Генератор имеет две статорные обмотки, взаимно смещенные на 30° и соединенные в звезду.

Таблица 58.36 Технические характеристики типовых двигателей постоянного тока

Параметр	Тип двигателя										
	ДК-717А	ДК-722А	ДК-724А	ДК-717Б	ДК-718Б	ЭД-118А	ЭД-114	ЭД-121А	ЭД-126	ЭД-127	ЭД-120А
Номинальная мощность, кВт	230	360	560	120	35	305	138	413	409	586	411
Частота вращения номинальная максимальная, 1/с	82 298	109 298	58/194	41/298	168/576	61/240	45 266	74/243	56/192	100/227	69/243
Коэффициент скоростного диапазона, К <sub>в</sub>	3,65	2,75	3,3	7,3	3,45	3,9	6,0	3,3	3,43	1,9	3,52
Расчетная мощность, кВт	840	1000	1850	870	120	1190	840	1360	1410	1350	1450
Напряжение длительное/максимальное, В	550/750	750/850	700/	290/750	290/385	463 700	258/435	542/750	548/725	715/980	512/750
Ток длительного режима, А	400	520	900	400	130	720	615	830	820	890	880
КПД длительного режима	0,888	0,925	0,915	0,873	0,89	0,915	0,868	0,918	0,909	0,921	0,911
Количество вентилирующего воздуха, м <sup>3</sup> /мин	60	80	125	60	65	80	65	100	100	100	110
Масса двигателя, кг	1900	2000	4000	1850	280	3100	1950	2950	3600	3100	3000
Главные полюсы, количество	4	4	6	4	4	4	4	4	6	4	4
воздушный зазор, мм	4	4	5	6	1,75	7	4	7	7	4	7
витки на полюс	40	40	80	240	276	—	—	—	—	—	—
независимые обмотки	20	17	10	—	—	19	20	20	16	16	20
последовательные обмотки	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
сопротивление при 20 °С, Ом	0,31	0,298	1,59	2,67	6,2	—	—	—	—	—	—
независимые обмотки	0,0164	0,011	0,0063	—	—	0,0105	0,0096	0,0088	0,0098	0,0087	0,0088
последовательные обмотки	7	7	7	20	20	17	19	18	11	10	18
Число витков на полюс катушек дополнительных полюсов	0,0046	0,00348	0,0053	0,0155	0,029	0,00821	0,00856	0,0079	0,0078	0,0034	0,0079
Сопротивление при 20 °С, Ом, катушек дополнительных полюсов	0,0226	0,0125	0,0079	—	—	—	—	—	—	—	—
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Размеры якоря, мм	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
диаметр	423	423	660	423	208	493	458	493	660	493	493
длина	450	450	500	450	260	420	255	380	380	380	380
Число пазов	54	54	81	54	27	54	62	58	105	58	58
Сопротивление обмоток якоря при 20 °С, Ом	0,0315	0,0159	0,0111	0,0315	0,056	0,013	0,016	0,0107	0,012	0,0107	0,0107
Число коллекторных пластин	270	216	324	270	135	216	248	232	315	232	292
Фактор нагрева якоря A <sub>1</sub>	2440	2070	2540	2440	1640	853	3450	303	4795	3485	3400

В режиме тяги от генератора получают питание два тяговых электродвигателя (ТЭД) мотор-колес  $M1$  и  $M2$ . Они подключаются к генератору параллельно с помощью электропневматических контактов  $LK1$  и  $LK2$ . Каждый двигатель имеет последовательную (основную)  $K1 - KK1, K2 - KK2$  и независимую  $H1 - HH1, H2 - HH2$  обмотки возбуждения. Тяговый генератор имеет независимое возбуждение. Цепь независимой обмотки генератора  $ОВГ$  питается от возбуждителя генератора, который также является машиной постоянного тока с независимым возбуждением.

Для автоматического регулирования напряжения тягового генератора от тока нагрузки в электрической трансмиссии самосвала применена замкнутая система управления с магнитным усилителем  $МУ$  и простым селективным узлом  $СУ$ . Система автоматического управления воздействует на ток, протекающий в независимой обмотке возбуждения  $ОВВ$  возбуждителя генератора.

Возбуждение вспомогательного синхронного генератора и питание независимых обмоток ТЭД осуществляется от аккумуляторной батареи с напряжением 27 В.

В магнитном усилителе с внутренней положительной обратной связью используются три обмотки управления:  $ОЗ$  – задающая,  $ОУ$  – управляющая и  $ОСТ$  – стабилизирующая. Последняя служит для повышения устойчивости системы управления в переходных режимах. Она подключена на зажимы стабилизирующего трансформатора  $ТС$ , и ток в обмотке управления  $ОТС$  будет пропорционален изменению напряжения возбуждителя.

Задающая обмотка магнитного усилителя питается от трехфазного синхронного генератора через выпрямитель  $VD1$  и Г-образный RC-фильтр  $\Phi 1$ . Напряжение  $BCГ$  определяется частотой вращения дизеля, следовательно, ток в задающей обмотке будет пропорционален мощности  $D$ . Для обеспечения наиболее экономичных режимов работы дизеля при  $n_{диз} < n_{диз,ном}$  (при частичных мощностях) зависимость тока в  $ОЗ$  от  $n_{диз}$  целесообразно

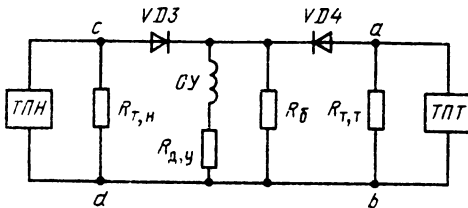


Рис. 58.35. Упрощенная схема замещения селективного узла

выполнять нелинейной. Это достигается включением конденсаторов  $C1 - C3$  на входе выпрямителя  $VD1$ . Обмотка  $ОЗ$  создает положительную МДС.

Управляющая обмотка  $МУ$  получает сигнал от схемы селективного узла; обмотка создает отрицательную МДС.

При всех рабочих режимах результирующая МДС управления  $МУ$  равна

$$F_{у.рез} = F_3 - F_y \pm F_{ст},$$

где  $F_3 = i_3 w_3$  – МДС задающей обмотки ( $i_3, w_3$  – соответственно ток и число витков обмотки  $ОЗ$ );  $F_y = i_y w_y$  – МДС управляющей обмотки;  $F_{ст} = i_{ст} w_{ст}$  – МДС стабилизирующей обмотки.

Питание рабочих обмоток  $МУ$  осуществляется от  $BCГ$  через выпрямитель  $VD2$ .

Схема селективного узла включает в себя трансформаторы постоянного тока  $ТПТ$  и напряжения  $ТПН$ , выпрямительные мосты  $VD3$  и  $VD4$ , Г-образный RC-фильтр, нагрузочные резисторы трансформатора постоянного напряжения  $R_{Т,н}$ , трансформатора постоянного тока  $R_{Т,т}$ , балластный  $R_B$  и дополнительный в цепи обмотки управления  $R_{д.у}$ .

Трансформаторы  $ТПТ$  и  $ТПН$  представляют собой магнитные усилители без самоподмагничивания и используются для получения сигналов управления, пропорциональных соответственно току и напряжению тягового генератора.

Согласно схеме два источника с большим внутренним сопротивлением ( $ТПН$  и  $ТПТ$ ) работают на индивидуальные сопротивления  $R_{Т,н}$  и  $R_{Т,т}$ , а также на общую нагрузку, которой является цепь управляющей обмотки  $МУ$  (упрощенная схема селективного узла приведена на рис. 58.35).

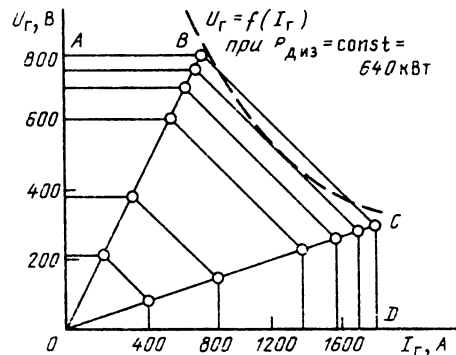


Рис. 58.36. Внешняя характеристика генератора автосамосвала БелАЗ-549

Параметры схемы выбраны таким образом, что на участке *DC* внешней характеристики тягового генератора (рис. 58.36) работает только токовый канал регулирования, так как  $U_{ab} > U_{cd}$  и, следовательно, выпрямительный мост *VD3* закрыт. Обеспечивается условие  $I_t = \text{const}$ .

При достижении напряжения генератора значения  $U_{\Gamma \text{ min}}$  имеем  $U_{ab} = U_{cd}$ , и начинается совместная работа каналов регулирования по току и напряжению. В этом случае САР формирует отсечку по мощности дизеля (участок *CB*).

При  $U_{\Gamma} = U_{\Gamma \text{ max}}$  напряжение  $U_{cd}$  становится больше чем  $U_{ab}$ , выпрямительный мост *VD4* закрывается и работает только канал регулирования по напряжению, обеспечивая условие:  $U_{\Gamma} \approx \text{const}$  – участок *BA* на внешней характеристике тягового генератора.

Питание рабочих обмоток *ТПТ* и *ТПН* осуществляется от вспомогательного синхронного генератора, что обеспечивает получение серии селективных характеристик и приблизительно пропорциональность отсечек по току и напряжению генератора частоты вращения дизеля.

К недостаткам описанной системы автоматического регулирования следует отнести: превышение мощности дизеля в зоне средних токов и напряжений (зона *BC*) вследствие прямолинейности внешней характеристики тягового генератора, что приводит к перегрузке дизеля; наличие дополнительного инерционного звена управления – возбудителя генератора.

Ослабление магнитного потока осуществляется автоматически в две ступени. На первой ступени поток ослабляется путем шунтирования последовательных обмоток возбуждения ТЭД на сопротивлении контакторами *КШ*, а на второй – за счет отключения независимых обмоток возбуждения.

Направление движения автосамосвала изменяется путем реверсирования тока как в последовательных, так и в независимых обмотках возбуждения ТЭД, контакторами *B* и *H*.

При электрическом торможении отключаются контакторы *ЛК1* и *ЛК2* и якоря каждого двигателя мотор-колеса замыкаются на свое тормозное  $R_{\Gamma}$  и стабилизирующее  $R_c$  сопротивления электропневматическими контакторами *T1* и *T2*.

На первых трех тормозных позициях (частичные тормозные характеристики) возбуждение ТЭД осуществляется только от независимых обмоток. На второй и третьей позициях контакторами *K1* и *K2* частично шунтируется сопротивление  $R_H$  в цепи независимых обмоток возбуждения. Частичные тор-

мозные характеристики предназначены для подтормаживания на уклонах.

Предельная тормозная характеристика обеспечивается при одновременном использовании независимой и последовательной обмоток возбуждения. Последняя подключается к тяговому генератору через резистор  $R_c$  контактором *T3*.

## 58.10. ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ

### Задачи тяговых расчетов

Тяговые расчеты проводятся для проверки работы поезда на заданном участке дороги. Их задачами являются: расчет времени и скоростей движения, определение зависимости потребляемого тока и мощности от пути и времени, расчет расхода электроэнергии на движение поездов, расчет нагревания тяговых двигателей и другого тягового электрооборудования, определение требуемой мощности тяговых двигателей.

На основании тяговых расчетов выбирается масса поезда и параметры электровоза. При проектировании транспорта выбираются основные параметры электроподвижного состава и электроснабжения.

### Уравнение движения и характеристики его коэффициентов

Уравнение движения поезда в удельных величинах

$$f_{\Delta} = \sigma(1 + \gamma)dv/dt$$

или

$$f_{\Delta} = \sigma'(1 + \gamma)v dv/dl,$$

где  $f_{\Delta}$  – сила, действующая на единицу веса поезда, Н/кН;  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся частей, зависящий от типа подвижного состава (см. ниже):

Тип подвижного состава	$\gamma$
Товарные вагоны двухосные:	
порожние . . . . .	0,1–0,2
груженые . . . . .	0,04–0,05
Товарные вагоны четырехосные:	
порожние . . . . .	0,08–0,09
груженые . . . . .	0,03–0,04
Пассажирские вагоны и прицепные электровагоны . . . . .	0,04–0,05
Моторные вагоны . . . . .	0,08–0,12
Электровозы . . . . .	0,2–0,4
Трамваи:	
моторные вагоны . . . . .	0,1–0,14
прицепные вагоны . . . . .	0,04–0,06
Троллейбусы . . . . .	0,1–0,15

Если  $v$  — в км/ч,  $t$  — в с и  $l$  — в м, то  $\sigma = 28,3$ ;  $\sigma' = 7,87$ .

Для тягового режима

$$f_{\text{д}} = F_{\text{д}}/gG - w,$$

для тормозного

$$f_{\text{д}} = -B_1/gG - w,$$

где  $g$  — нормальное ускорение свободного падения.

В общем случае удельное сопротивление движению

$$w = w_0 + w_i + w_{\text{кр}},$$

где  $w_0$  — основное удельное сопротивление движению;  $w_i = \pm i$  — удельное сопротивление уклона;  $w_{\text{кр}}$  — дополнительное удельное сопротивление от кривых; для магистральных дорог  $w_{\text{кр}} = 700/R_{\text{кр}}$ , Н/кН, для трамвайных линий  $w_{\text{кр}} = 4500/R_{\text{кр}}$ , Н/кН.

Эмпирические формулы удельного сопротивления движению  $w_0$ , Н/кН, приведены ниже:

Магистральные электровозы при движении под током	$w_0$ , Н/кН $1,2 + 0,025v + 0,00016v^2$
при трогании с места . . .	5,5
при движении без тока . . .	$2,3 + 0,035v + 0,0002v^2$
Магистральные пассажирские вагоны:	
двухосные и трехосные . . .	$1,4 + 0,017v + 0,0003v^2$
четырёхосные и шестиосные тележечные . . . . .	$1,4 + 0,012v + 0,0003v^2$
цельнометаллические . . .	$1,4 + 0,013v + 0,0002v^2 + 15/v$
цельнометаллические на роликовых подшипниках . . .	$1,2 + 0,012v + 0,0002v^2 + 15/v$
Магистральные грузовые вагоны:	
двухосные . . . . .	$1,4 + 0,002v^2 + 0,5v/G_B$
четырёхосные тележечные	$(v + 65)/(12 + 0,55G_B)$
Электропоезда пригородных дорог:	
при движении под током	$2,35 - 0,01v + 0,00043v^2$
при движении без тока	$2,7 - 0,017v + 0,00053v^2$
Подвижной состав промышленного транспорта:	
на подъездных путях, сходных с магистральными железными дорогами . . . .	По аналогии с магистральными железными дорогами
на внутризаводских путях:	
электровозы . . . . .	7—8
вагоны . . . . .	3—5
на подземных шахтных путях . . . . .	6—15
Вагоны метрополитена . . . .	$1,1 + (0,09 + 0,022n_B)v/G$

Трамвайные вагоны:	
моторные . . . . .	$5 + 0,005v^2$
прицепные . . . . .	$3 + 0,003v^2$
Троллейбус:	
на асфальтовых и бетонных дорогах без снежного покрова . . . . .	$12 + 0,004v^2$
на булыжных и гравийных дорогах . . . . .	$16 + 0,004v^2$
на дорогах со снежным покровом . . . . .	Удельное сопротивление увеличивается на 10—15 Н/кН

Наибольшая суммарная сила тяги поезда, не вызывающая буксования движущих колес,  $F_{\text{max}} = 1000\psi G_{\text{сц}}$ . Аналогично максимальная тормозная сила  $B_{\text{max}} = 1000\psi G_{\text{сц}}$ , где  $G_{\text{сц}}$  — сцепной вес, т. е. суммарное давление всех движущих (тормозных) колес на путь;  $\psi$  — коэффициент сцепления.

Значения коэффициентов сцепления  $\psi$  приведены ниже:

Магистральные железные дороги:	$\psi$
электровозы постоянного тока и тепловозы . . . . .	$0,25 + \frac{8}{100 + 20v}$
электровозы переменного тока . . . . .	$0,28 + \frac{8}{100 + 15v}$
Пригородные железные дороги:	
мотор-вагоны . . . . .	0,21—0,22
Промышленный транспорт на подъездных путях с полотном по типу магистральных дорог	По аналогии с магистральными железными дорогами
Подземный рудничный и внутризаводской рельсовый транспорт . . . . .	0,12—0,15
Метрополитен . . . . .	0,2—0,22
Трамвай:	
все виды . . . . .	0,1—0,19
в среднем для расчета в городе . . . . .	0,15
для обособленного полотна и загородных линий . . . .	0,18
Троллейбус:	
все виды . . . . .	0,15—0,85
в среднем для расчета . . . .	0,35

**Построение кривых движения**

Построение кривых движения сводится к интегрированию уравнений

$$t_2 - t_1 = \sigma \int_{t_1}^{t_2} \frac{dv}{f_{\text{д}}} \quad \text{и} \quad l_2 - l_1 = \sigma' \int_{t_1}^{t_2} v \, dt$$

методом конечных приращений, т. е. бесконечно малые приращения заменяют конечными и  $f_{\text{д}}$  представляют постоянным средним значением в каждом интервале  $\Delta t$ , как показано

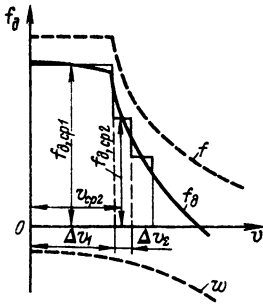


Рис 58.37. Зависимости удельных сил, приложенных к поезду, от скорости

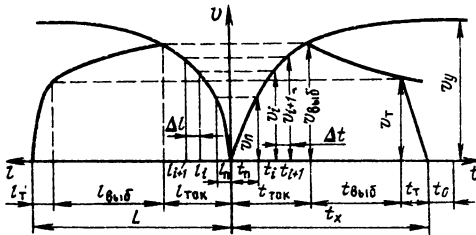


Рис. 58.38. Типичные кривые движения:

$l_n$  – скорость выхода на автоматическую характеристику при окончании реостатного пуска;  $v_{выб}$  – скорость при переходе на выбег;  $t_T$  – скорость в начале торможения;  $v_y$  – скорость установившегося движения;  $t_n$  – время реостатного пуска;  $t_{ток}$  – время движения под током;  $t_{выб}$  – время движения при выбеге;  $t_T$  – время торможения;  $l_x$  – время хода;  $t_0$  – время промежуточной стоянки;  $l_0$ ,  $l_{ток}$ ,  $l_{выб}$ ,  $l_T$  – пройденный путь соответственно при пуске, под током, при выбеге и торможении;  $L$  – длина перегона

на рис. 58.37. Тогда

$$t_2 - t_1 = \Delta t = \frac{\sigma \Delta v}{f_{д,ср}}$$

$$l_2 - l_1 = \Delta l = \sigma \frac{v_{ср} \Delta v}{f_{д,ср}}$$

$$\Delta v = v_2 - v_1; v_{ср} = 0,5(v_1 + v_2).$$

Расчет удобно вести с помощью табл. 58.37. Кривые движения показаны на рис. 58.38. Более подробно – см. [58.34].

**Расход энергии на движение поезда**

При определении расхода энергии по кривым движения кривая потребляемого тока разбивается по отдельным участкам пути, в пределах которых ток колеблется незначительно, и для каждого такого участка определяются  $I_{ср}$  и  $\Delta t$ . Тогда удельный расход энергии, Вт·ч/(т·км),

$$A_{уд} = \frac{U_{ср} [(\sum I_{ср} \Delta t)_{тяги} - (\sum I_{ср} \Delta t)_{рек}]}{3600GL}$$

где  $U_{ср}$  – среднее напряжение контактной сети, В.

Аналитически удельный расход энергии можно определить по выражению

$$A_{уд} = 2,725(w_{ср} + i_{экр}) \left( \frac{1}{\eta_{ср}} - \frac{l_T}{L\eta_{ср}} + \frac{k_n l_n}{L} \right) + \frac{10,7(1 + \gamma)}{1000L} \left( \frac{v_T^2}{\eta_{ср}} + k_n v_n^2 \right),$$

где  $i_{экр}$  – эквивалентный подъем, ‰.

Для магистральных железных дорог, где пути торможения  $l_T$  и пуска  $l_n$  малы по сравнению с общей длиной перегона  $L$ , можно пользоваться упрощенной формулой

$$A_{уд} = \frac{2,725(w_{ср} + i_{экр})}{\eta_{ср}} + \frac{10,7(1 + \gamma)}{1000L} (v_T^2/\eta_{ср} + k_n v_n^2).$$

Значениями средних КПД  $\eta_{ср}$  тягового двигателя и передачи приходится задаваться, приняв их на 1–1,5% меньше максимального значения по характеристике. Значение коэффициента  $k_n$  зависит от схемы. Без переключения двигателей  $k_n = 1$ ; при одной перегруппировке  $k_n = 1/2$ ; при двух  $k_n = 1/3$  для шестисосного и  $k_n = 3/8$  для восьмисосного электроваза.

Таблица 58.37. Пример расчета

№ п/п	$\Delta v$	$v$	$v_{ср}$	$f_{д,ср}$	$\Delta t$	$t = \sum \Delta t$	$\Delta l$	$l = \sum \Delta l$
1	$\Delta v_1$	$v = \Delta v_1$	$v_{ср1} = \frac{\Delta v_1}{2}$	$f_{д,ср1}$	$\Delta t_1$	$t_1 = \Delta t_1$	$\Delta l_1$	$l_1 = \Delta l_1$
2	$\Delta v_2$	$v_2 = v_1 + \Delta v_2$	$v_{ср2} = v_1 + \frac{\Delta v_2}{2}$	$f_{д,ср2}$	$\Delta t_2$	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$	$\Delta l_2$	$l_2 = l_1 + \Delta l_2$
.	.	.	.	.	.	.	.	.
i	$\Delta v_i$	$v_i = v_{i-1} + \Delta v_i$	$v_{срi} = v_{i-1} + \frac{\Delta v_i}{2}$	$f_{д,срi}$	$\Delta t_i$	$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$	$\Delta l_i$	$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i$

В случае применения рекуперативного торможения, которое заканчивается при скорости  $v_k$ , в выражении  $A_{уд}$  вместо  $v_T^2$  нужно подставить  $(v_T^2 - v_k^2)$ .

При подсчете энергии, переработанной тяговыми двигателями, для проверки их нагрева нужно в случае рекуперации вместо  $v_T^2$  подставить

$$(v_T^2 - v_k^2)(1 + \eta_{ср}\eta_{рек}) + v_k^2,$$

а при реостатном торможении

$$(v_T^2 - v_k^2)(1 + \eta_{ср}\eta_{реост}) + v_k^2,$$

где  $\eta_{реост}$  — средний КПД двигателя при реостатном торможении.

Эквивалентный подъем определяется по формулам:

при отсутствии рекуперативного торможения

$$i_{эв} = \frac{1000(h_k - h_n) + \sum (i_b - w_{ср})l_b + \sum w_{кр}l_{кр}}{L};$$

при наличии рекуперативного торможения

$$i_{эв} = \frac{1000(h_k - h_n) + (1 - \eta_{ср}\eta_{рек}) \sum (i_b - w_{ср})l_b + \sum w_{кр}l_{кр}}{L},$$

где  $h_n$  и  $h_k$  — высота начального и конечного пунктов участка, м,  $L$ ,  $l_b$ ,  $l_{кр}$ , м.

При подсчете энергии, переработанной тяговыми двигателями, нужно в выражении для  $i_{эв}$  вместо  $(1 - \eta_{ср}\eta_{рек})$  подставить  $(1 + \eta_{ср}\eta_{рек})$  или  $(1 + \eta_{ср}\eta_{реост})$ .

Удельный расход энергии на собственные нужды поезда, Вт·ч/(т·км),

$$A_{уд.с.н} = P_{с.н}/(Gv_3),$$

где  $P_{с.н}$  — средняя мощность, расходуемая на собственные нужды поезда, Вт;  $v_3$  — эксплуатационная скорость, км/ч.

Для приближенных (прикидочных) расчетов электровозной тяги можно принять значения  $\sum A_{уд}$ , приведенные ниже:

	$\sum A_{уд}$ , Вт·ч / (т·км)
Электровозная тяга:	
грузовые поезда на равнинных участках при невысоких скоростях . . . . .	10—15
то же на участках с более тяжелым профилем при более высоких скоростях . . . . .	До 20
пассажирские поезда . . . . .	20—30
Мотор-вагонная тяга . . . . .	25—40
То же при быстротходных секциях (до 130 км/ч) . . . . .	40—50
Метрополитен . . . . .	40—60
Трамвай . . . . .	35—80
То же при очень коротких перегонах и высоких скоростях . . . . .	До 120
Троллейбус . . . . .	150—210

Значение  $\sum A_{уд}$  можно также принять согласно выражению

$$\sum A_{уд} = A_{уд} + A_{уд.с.н} = \frac{2,725(1,1 + 1,15)}{\eta_3} (i_3 + w_{ср}),$$

где  $\eta_3 = 0,89 \div 0,9$  — КПД электровоза постоянного тока в часовом режиме;  $\eta_3 = 0,82 \div 0,84$  — то же для электровоза переменного тока;  $w_{ср}$  следует принять для скорости, на 10—15 % превышающей среднюю.

Удельный расход энергии, отнесенный к шинам первичного распределительного устройства тяговых подстанций, составляет:

$$A_{уд.п/ст} = \frac{A_{уд} + A_{уд.с.н}}{\eta_с \eta_{п/ст}},$$

где  $\eta_с$  — средний КПД тяговой сети, равный 0,9—0,92 при постоянном токе и 0,97 при переменном токе;  $\eta_{п/ст}$  — средний КПД тяговой подстанции, равный 0,92—0,94 при постоянном и 0,97 при переменном токе.

### Предварительный выбор мощности тягового двигателя

Мощность двигателя или его длительный ток  $I_x$  при заданной массе поезда  $G$  либо при максимально допустимой массе поезда по заданной мощности двигателя можно приближенно определить по выражению

$$I_x \approx \frac{A'_{уд} v_{ср}^k k_{зап}}{m U_c} G,$$

где  $A'_{уд}$  — удельный расход энергии, переработанной двигателями при  $k_n = 1$ ;  $v_{ср}$  — средняя скорость на участке;  $m$  — число двигателей, включенных параллельно;  $k_3 = I_3/l$  — коэффициент эффективности;  $k_3 = 1,5 \div 2$  для моторных вагонов,  $k_3 = 1,2 \div 1,5$  для электровозной тяги;  $k_{зап}$  — коэффициент запаса, учитывающий условия теплоотдачи при движении поезда, влияние температуры окружающей среды и неравномерность распределения нагрузок между двигателями, а также дополнительные пуски и торможения, не предусмотренные графиком движения. Можно принять  $k_{зап} = 1,05 \div 1,15$  при электровозной тяге и  $k_{зап} = 1,1 \div 1,2$  на городском электрическом транспорте.

### Выбор состава (массы) поезда

Выбор состава поезда  $G_c$ , т, производится:

1) по условиям сцепления или максимальному току тягового двигателя

$$G_c = \frac{F_{расч} - 9,8G_3(w_{0,3} + i_p)}{9,8w_{0,в} + i_p},$$

где расчетная сила тяги локомотива  $F_{расч}$ , Н, ограничивается либо сцеплением, либо максимальным током двигателя;  $i_p$  – руководящий подъем, включая сопротивление кривых, ‰;  $w_{0,з}$  – удельное основное сопротивление движению локомотива, Н/кН;  $w_{0,в}$  – то же вагонов, Н/кН;

2) по условию трогания с места (пуска) на остановочных пунктах

$$G_c < \frac{F_{сц,тр} - 9,8G_3(w_{0,з} + i_p + w_{тр})}{9,8(w_{0,в} + i_p + w_{тр})}$$

где  $i_p$  – уклон, на котором расположен остановочный пункт;  $F_{сц,тр}$  – максимальная сила тяги локомотива в момент трогания, Н;

3) по условиям нагревания тяговых двигателей

$$G_c = I_\infty U_{сн} / A'_{уд} U_{ср} k_3 k_{3ап}$$

где  $I_x$  – продолжительный ток двигателя.

### 58.11. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТА

#### Методы расчета для трамваев и троллейбусов

Расчеты систем электроснабжения транспорта выполняют на базе конкретных графиков или по заданным размерам движения, если для рассматриваемого вида транспорта характерны существенные отклонения от запланированного графика. Для наземных видов городского транспорта – трамваев и троллейбусов рекомендуется проводить расчеты электроснабжения на основе заданных размеров движения [58.35, 58.36].

Расчетные формулы для участка сети трамвая или троллейбуса с двумя короткими питающими линиями (рис. 58.39) при неизменной плотности токовых нагрузок  $i$ , А/км, приведены ниже

$$i = In_1/l_1 = In_2/l_2 = In_3/l_3 = const.$$

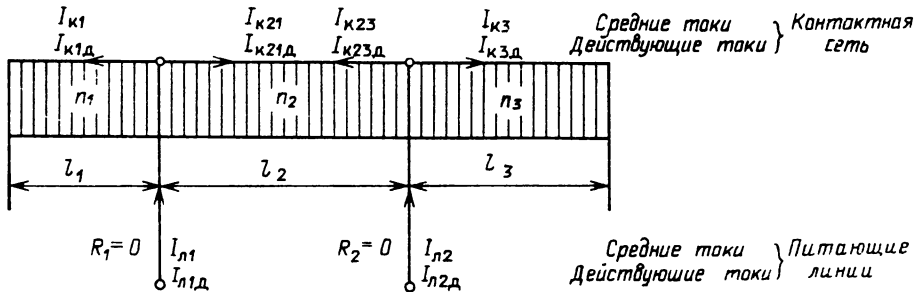


Рис 58.39. Токораспределение в сети с двумя питающими линиями

Приняты обозначения:  $I$ ,  $I_d$  – средний и действующий токи подвижной единицы (трамвая, троллейбуса);  $n$  – число подвижных единиц на участке;  $l$  – длины участков, км.

Пренебрегая сопротивлением коротких питающих линий  $R_1 = R_2 = 0$  при условии равенства напряжений на шинах питающих эти линии подстанций, находят средние токи проводов контактной сети  $I_k$  у пунктов присоединения питающих линий (питающих пунктов) на участках  $l_1, l_2, l_3$ :

$$I_{к1} = In_1; I_{к21} = I_{к23} = In_2/2; I_{к3} = In_3.$$

Коэффициент эффективности тока подвижной единицы  $k_3 = I_d/I$ . Используют обозначение  $\beta = k_3^2 - 1$ .

Действующий ток проводов контактной сети у питающих пунктов

$$I_{к1д}^2 = I^2 n_1^2 \left(1 + \frac{\beta}{n_1}\right); I_{к21д}^2 = I_{к23д}^2 = I^2 n_2^2 \left(1 + \frac{4\beta + 1}{3n_2}\right); I_{к3д}^2 = I^2 n_3^2 \left(1 + \frac{\beta}{n_3}\right).$$

Эквивалентный ток используется для проверки соответствия принятого сечения проводов экономической плотности тока на участках  $l_1, l_2, l_3$ :

$$I_{экв1}^2 = \frac{I^2 n_1^2}{3} \left(1 + \frac{3\beta + 1}{2n_1}\right); I_{экв2}^2 = \frac{I^2 n_2^2}{12} \left(1 + \frac{2\beta + 1}{n_2}\right); I_{экв3}^2 = \frac{I^2 n_3^2}{3} \left(1 + \frac{3\beta + 1}{2n_3}\right).$$

Средние потери мощности на участках контактной сети

$$\Delta P_{к1} = I_{экв1}^2 r l_1; \Delta P_{к2} = I_{экв2}^2 r l_2; \Delta P_{к3} = I_{экв3}^2 r l_3,$$

где  $r$  – параметр тяговой сети, Ом/км.



Средние и действующие токи питающих линий

$$I_{л1} = I_{к1} + I_{к21}; \quad I_{л2} = I_{к3} + I_{к23};$$

$$I_{л1д}^2 = I_{к1д}^2 + I_{к21д}^2 + 2I_{к1}I_{к21};$$

$$I_{л2д}^2 = I_{к3д}^2 + I_{к23д}^2 + 2I_{к3}I_{к23}.$$

Средняя и действующая нагрузки подстанции  $I_A, I_{Aд}$ :

$$I_A = I_{л1} + I_{л2}; \quad I_{Aд}^2 = I_{л1д}^2 + I_{л2д}^2 + 2I_{л1}I_{л2}.$$

Средние значения падения напряжения на участках контактной сети определяют за время потребления энергии подвижным составом

$$\Delta U_1 = \frac{rn_1 l_1}{3} \left( 1 + \frac{1,5\alpha - 1}{n_1} \right);$$

$$\Delta U_2 = \frac{rn_2 l_2}{12} \left( 1 + \frac{2\alpha - 1}{n_2} \right);$$

$$\Delta U_3 = \frac{rn_3 l_3}{3} \left( 1 + \frac{1,5\alpha - 1}{n_3} \right),$$

где  $\alpha$  — отношение полного времени движения по участку ко времени потребления энергии из сети на этом участке одной машиной.

Среднее значение падения напряжения в контактной сети до наиболее удаленного перегона или до точки токораздела на среднем участке, т. е. максимальное падение напряжения,

$$\Delta U_{1м} = \frac{rIn_1 l_1}{2} \left( 1 + \frac{2\alpha - 1}{n_1} \right);$$

$$\Delta U_{3м} = \frac{rIn_3 l_3}{2} \left( 1 + \frac{2\alpha - 1}{n_3} \right);$$

$$\Delta U_{2м} = \frac{rIn_2 l_2}{8} \left( 1 + \frac{2\alpha - 1}{n_2} \right).$$

В общем случае плотность нагрузки  $i$  на участках различна, сопротивления питающих линий имеют определенные значения  $R_1 \neq R_2 \neq 0$ . Расчетная схема приведена на рис. 58.40. При расчетах токораспределения определяют координату  $x_T$  условной точки

токораздела на участке  $l_2$ :

$$x_T = l_2 \frac{[I_3 n_3 R_2 + I_2 n_2 (R_2 + rl_2/2) - I_1 n_1 R_1]}{I_2 n_2 (R_1 + R_2 + rl_2)}.$$

Средние токи в контактных проводах у питающих пунктов

$$I_{к1} = I_1 n_1; \quad I_{к3} = I_3 n_3; \quad I_{к21} = i_2 x_T;$$

$$I_{к23} = i_2 (l_2 - x_T),$$

где  $I_1, I_2, I_3$  — средние токи подвижных единиц на участках  $l_1, l_2, l_3$ ;

$$i_2 = I_2 n_2 / l_2.$$

Действующие токи там же

$$I_{к1д}^2 = I_1^2 n_1^2 (1 + \beta_1 / n_1); \quad I_{к3д}^2 = I_3^2 n_3^2 (1 + \beta_3 / n_3).$$

Для участка  $l_2$  в зависимости от расположения гочки токораздела рекомендуются следующие формулы:

при  $0,35l_2 \leq x_T \leq 0,65l_2$

$$I_{к21д}^2 = I_{к21}^2 \left( 1 + \frac{4\beta_2 + 1}{3n_2} \right);$$

$$I_{к23д}^2 = I_{к23}^2 \left( 1 + \frac{4\beta_2 + 1}{3n_2} \right);$$

при  $0 \leq x_T \leq 0,35l_2$

$$I_{к21д}^2 = I_{к21}^2 \left( 1 + \frac{4\beta_2 + 1}{3n_2} \right);$$

$$I_{к23,1}^2 = I_{к23}^2 \left[ 1 + \frac{\beta_2 l_2}{n_2 (l_2 - x_T)} \right];$$

при  $0,65l_2 \leq x_T \leq l_2$

$$I_{к21д}^2 = I_{к21}^2 \left( 1 + \frac{\beta_2 l_2}{n_2 x_T} \right);$$

$$I_{к23,л}^2 = I_{к23}^2 \left( 1 + \frac{4\beta_2 + 1}{3n_2} \right).$$

Эквивалентные токи на участках  $l_1, l_3$

$$I_{экв1}^2 = \frac{I_1^2 n_1^2}{3} \left( 1 + \frac{3\beta_1 + 1}{2n_1} \right);$$

$$I_{экв3}^2 = \frac{I_3^2 n_3^2}{3} \left( 1 + \frac{3\beta_3 + 1}{2n_3} \right).$$

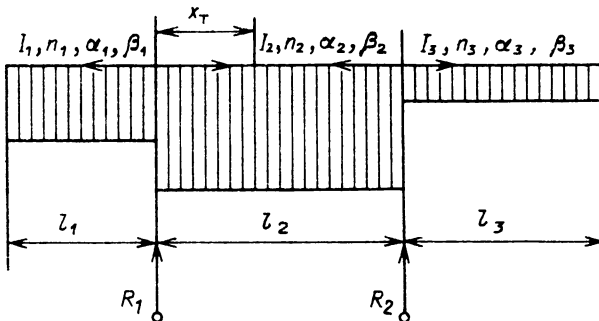


Рис. 58.40. Расчетная схема при переменной плотности нагрузок по участкам

Средние потери мощности в контактной сети на этих же участках

$$\Delta P_{к1} = I_{\text{эKB}}^2 r l_1; \Delta P_{к3} = I_{\text{эKB}}^2 r l_3.$$

Для участка  $l_2$

$$I_{\text{эKB}2}^2 = \frac{\Delta P_{к2}}{r l_2}.$$

Средние потери мощности в контактной сети участка  $l_2$  определяют по формуле

$$\Delta P_{к2} = n_2 [\Delta Q_2 + (n_2 - 1) \Delta U_{02} l_2],$$

где

$$\begin{aligned} \Delta Q_2 &= \frac{I_2^2 r l_2 (\beta_2 + 1)}{12 R^2} [2 r^2 l_2^2 + 4 r l_2 (R_1 + R_2) + \\ &\quad + 6 (R_1^2 + R_2^2)]; \\ R &= R_1 + R_2 + r l_2; \\ \Delta U_{02} &= \frac{I_2^2 r l_2}{12 R (R_1 + R_2)} [r l_2 (R_1 + R_2) + \\ &\quad + 2 R_1 R_2 + 4 (R_1^2 + R_2^2)]. \end{aligned}$$

Формулы для определения средних и действующих токов питающих линий и тяговых подстанций остаются такими же, как в предыдущем случае. Средние значения падения напряжения на участках контактной сети за время потребления энергии подвижным составом:

на участках  $l_1$  и  $l_3$

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{r n_1 I_1 l_1}{3} \left( 1 + \frac{1,5 \alpha_1 - 1}{n_1} \right); \\ \Delta U_3 &= \frac{r n_3 I_3 l_3}{3} \left( 1 + \frac{1,5 \alpha_3 - 1}{n_3} \right). \end{aligned}$$

То же до наиболее удаленных перегонов, т. е. до концов этих же участков,

$$\begin{aligned} \Delta U_{1м} &= \frac{r n_1 I_1 l_1}{2} \left( 1 + \frac{2 \alpha_1 - 1}{n_1} \right); \\ \Delta U_{3м} &= \frac{r n_3 I_3 l_3}{2} \left( 1 + \frac{2 \alpha_3 - 1}{n_3} \right). \end{aligned}$$

Для участка  $l_2$ , получающего питание с двух сторон,

$$\Delta U_2 = \frac{r n_2 I_2 l_2}{12} \left( 1 + \frac{2 \alpha_2 - 1}{n_2} + K \right),$$

где

$$K = \frac{I_{2г} R_2 - I_{1г} R_1}{I_2 n_2 r l_2}.$$

Среднее значение падения напряжения до точки токораздела с координатой  $x_T$

$$\begin{aligned} \Delta U_{2мТ} &= r n_2 I_2 x_T \frac{l_2 - x_T}{2 l_2} \left( 1 + \frac{2 \alpha_2 - 1}{n_2} + \right. \\ &\quad \left. + 2K \frac{l_2}{x_T} \right). \end{aligned}$$

Среднее значение тока  $I$  подвижной единицы может быть найдено интегрированием функции потребляемого тока от времени или по формуле

$$I = A_{уд} m v_3 / U,$$

где  $A_{уд}$  — удельный расход энергии на движение с учетом собственных нужд подвижной единицы, Вт·ч/(т·км);  $m$  — масса, т;  $v_3$  — эксплуатационная скорость, км/ч;  $U$  — среднее напряжение на токоприемнике, В.

Значение  $I$  для трамваев и троллейбусов может быть определено по базовому среднему току  $I_0$  путем его корректровки с учетом реальных условий эксплуатации [58.35]. Базовый средний ток принимается для эксплуатационной скорости трамвая  $v_3 = 16$  км/ч, троллейбуса — 17 км/ч при средней длине перегона 350–400 м для эквивалентного уклона  $i_{\text{эKB}} \leq 0,005$  с учетом потребления тока на собственные нужды единицы подвижного состава (табл. 58.38).

Расчетный средний ток определяют по формуле

$$I = I_0 \kappa_i \kappa_n \kappa_v \kappa_y + I_{с.н.}$$

где корректировочными коэффициентами учитывают  $\kappa_i$  — эквивалентные уклоны при  $i_{\text{эKB}} > 5\text{‰}$ ,  $\kappa_i = 1 + 0,02 i_{\text{эKB}}$ ;  $\kappa_n$  — длину перегона при  $l > 350$  м,  $\kappa_n = 22 \sqrt{l} - 0,175$ ;  $\kappa_v$  — эксплуатационную скорость при  $v_3 > 16$  км/ч для трамвая и  $v_3 > 17$  км/ч для троллейбуса,  $\kappa_v = 0,062 v_3$  для трамвая,  $\kappa_v = 0,058 v_3$  для троллейбуса;  $\kappa_y$  — многопусковые режимы при осложненных условиях движения,  $\kappa_y = 1,15$  для трамвая и  $\kappa_y = 1,1$  для троллейбуса.

Расчетные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяют через базовые значения  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  (табл. 58.38):

$$\alpha = \alpha_0 \left( \frac{21,5}{v_3} - 0,35 \right); \beta = \beta_0 \left( \frac{33,3}{v_3} - 1,08 \right).$$

При многопусковых режимах значения  $\alpha$  и  $\beta$  следует уменьшать в 2 раза по сравнению с полученными по формулам.

### Методы расчета для железнодорожного транспорта

Расчеты электроснабжения железных дорог выполняют методами сечений графика движения или по заданным размерам движения [58.37, 58.39]. В первом методе задача сводится к расчету определенного количества мгновенных схем нагрузок, значения и местоположение которых известны. По результатам расчета мгновенных схем с учетом их реализации во времени строят зависимости искомых величин. Во втором методе расчет

Таблица 58.38. Базовые значения средних токов и расчетных коэффициентов

Параметр	Тип подвижного состава городского электрог транспорта							
	Т-3, КТ4-СУ	КТМ-5МЗ	РВЗ-6М	РВЗ-7	ЗИУ-5	ЗИУ-9Б	ЗИУ-9В	Тр-9
Базовый ток $I_0$ , А								
зимой	78	71	80	80	74	74	92	70
летом	72	65	74	74	64	64	80	60
Базовые коэффициенты:								
$\alpha_0$	2,4	2	2,5	2,5	1,8	2,0	2,0	1,8
$\beta_0$	3,5	3,6	3,2	3,2	3	3	3,2	2,5
Средний ток собствен- ных нужд $I_{с.н.}$ , А								
зимой	27	29	15	25	11	18	18	15
летом	9	11	6	7,5	4,5	7,5	7,5	6

ведут по числовым значениям величин с учетом вероятностного характера их изменения. Расчеты для участков, электрифицированных на постоянном и переменном токах, имеют некоторые особенности.

Расчет токораспределения на участках постоянного тока при заданном расположении нагрузок. Рассчитывают токи фидеров (отходящих линий)  $I_\phi$  и токи плеч питания  $I_n$  подстанций. Под токами плеч понимают суммы токов фидеров, обеспечивающих электроснабжение контактных подвесок, расположенных справа или слева от подстанции (правое или левое плечо).

Ток фидера при одностороннем питании

$$I_\phi = \sum_{j=1}^m I_j,$$

где  $I_j$  – нагрузка с порядковым номером  $j$ ;  $m$  – общее количество нагрузок.

Расчетная схема двустороннего питания участка от подстанций  $A$  и  $B$  приведена на рис. 58.41. Упрощенные расчеты токов фидеров без учета внутреннего сопротивления питающих подстанций ведут по формуле

$$I_{\phi qA} = \sum_{j=1}^{m_q} \frac{(l_{q2} - l_{jq}) I_{jq}}{l_{q2}} + (U_{0A} - U_{0B}) \frac{F_q}{FR_{AB}},$$

где  $U_{0A}$  и  $U_{0B}$  – напряжения холостого хода подстанций  $A$  и  $B$ ;  $R_{AB}$  – сопротивление тяговой сети между подстанциями;  $F_q$  – сечение проводов контактной сети пути  $q$  в медном эквиваленте;  $F$  – то же всех путей;  $l_{q2}$  – эквивалентное расстояние между подстанциями  $A$  и  $B$  по пути  $q$ , вводится для удобства расчетов, учитывает сопротивления фидеров  $q$  подстанций  $A$  и  $B$  путем приведения их сопротивлений к сопротивлению тяговой сети;  $l_{jq}$  – то же от подстанции  $A$  до нагрузки  $I_{jq}$  пути  $q$ , учитывает

сопротивление отходящей линии  $q$  подстанции  $A$ ;

$$l_{jq} = l + (R_{\phi qA} + R_{\phi qB})/r_q,$$

где  $R_{\phi qA}$  и  $R_{\phi qB}$  – сопротивления фидеров  $q$  подстанций  $A$  и  $B$ ;  $r_q$  – сопротивление тяговой сети по пути  $q$ .

Сопротивление тяговой сети между подстанциями

$$R_{AB} = \frac{1}{\sum_{q=1}^s (l_{q2} r_q)^{-1}} + r_p l,$$

где  $r_p$  – сопротивление 1 км рельсовой сети, Ом/км.

Ток фидера  $qB$  подстанции  $B$  находят аналогично

$$I_{\phi qB} = \sum_{j=1}^{m_q} \frac{l_{jq} I_{jq}}{l_{q2}} - (U_{0A} - U_{0B}) \frac{F_q}{FR_{AB}}.$$

Токи плеч подстанций определяют по формуле

$$I_n = \sum_{q=1}^s I_{\phi q},$$

где  $s$  – количество путей или питающих их отходящих линий.

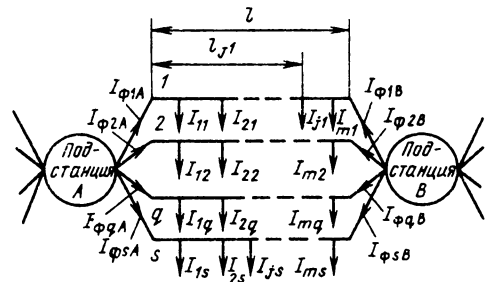


Рис. 58.41. Расчетная схема при двустороннем питании

Уточненные расчеты при двустороннем питании требуют учета сопротивлений тяговых подстанций [58.37].

Расчет токораспределения на участках переменного тока при заданном расположении нагрузок [58.37, 58.39]. Сопротивления питающих линий из-за их относительной малости не учитывают.

При одностороннем питании активная составляющая тока плеча

$$I_{па} = \sum_{q=1}^s \sum_{j=1}^{m_q} I_{jqа};$$

реактивная составляющая

$$I_{пр} = \sum_{q=1}^s \sum_{j=1}^{m_q} I_{jqр},$$

где  $m_q$  – количество нагрузок на пути  $q$ ;  $s$  – количество путей.

Полный ток плеча в комплексной форме:

$$\underline{I}_п = I_{па} - jI_{пр}.$$

При двустороннем питании (см. рис. 58.41) находят доли активных и реактивных токов каждой нагрузки, получаемые от подстанций  $A$  и  $B$ . Например, доля тока активной составляющей нагрузки  $I_{jqа}$ , расположенной на расстоянии  $l_{jq}$  от подстанции  $A$  на пути  $q$ ,

$$I_{а.а} = I_{jqа} \frac{l - l_{jq}}{l} + \gamma_1 U_{0а} - \gamma_2 U_{0в}.$$

То же для реактивной составляющей

$$I_{р.а} = I_{jqр} \frac{l - l_{jq}}{l} + v_1 U_{0а} - v_2 U_{0в}.$$

Доли токов этих же составляющих нагрузки  $I_{jqв}$ , получаемые от подстанции  $B$ :

$$I_{а.в} = I_{jqа} \frac{l_{jq}}{l} - \gamma_1 U_{0а} + \gamma_2 U_{0в};$$

$$I_{р.в} = I_{jqр} \frac{l_{jq}}{l} - v_1 U_{0а} + v_2 U_{0в}.$$

Коэффициенты  $\gamma$  и  $v$  определяют по формулам

$$\gamma_1 = R_{AB}/Z^2_{AB}; \gamma_2 = (R_{AB} \cos \delta + X_{AB} \sin \delta)/Z^2_{AB};$$

$$v_1 = X_{AB}/Z^2_{AB}; v_2 = (X_{AB} \cos \delta - R_{AB} \sin \delta)/Z^2_{AB},$$

где  $R_{AB}$ ,  $X_{AB}$ ,  $Z_{AB}$  – активное, реактивное, полное сопротивление тяговой сети между подстанциями  $A$  и  $B$ ;  $\delta$  – угол между векторами напряжений холостого хода этих подстанций.

Более точные расчеты токораспределения требуют учета внутреннего сопротивления тяговых подстанций, см. [58.37, 58.39].

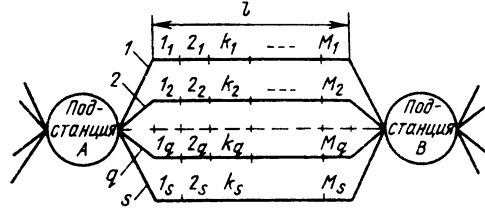


Рис. 58.42. Расчетная схема перегонов при заданных размерах движения

По результатам расчета мгновенных схем строится зависимость изменения искомой величины во времени, по которой за расчетный интервал определяют среднее и действующее ее значения.

Расчет токораспределения на участках постоянного тока по заданным размерам движения. Средний ток фидера  $q$  подстанции  $A$ , питающей путь  $q$  при раздельном питании контактных подвесок путей многопутного участка (рис. 58.42) без учета внутреннего сопротивления подстанций

$$I_{фqA} = \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq} + (U_{0A} - U_{0B}) \frac{F_q}{FR_{AB}},$$

где  $I_{kq}$  – средний ток, реализуемый на перегоне  $k$  пути  $q$ ;  $\Delta_{kq}$  – доля тока перегона  $k$ , отнесенная к расчетному фидеру  $q$ ;  $\Delta_{kq} = 1$  при одностороннем питании,  $\Delta_{kq} = 1 - l_{kq}/l$  при двустороннем питании;  $l_{kq}$  – расстояние от подстанции  $A$  до середины перегона  $k$  пути  $q$ ;  $U_{0A}$  и  $U_{0B}$  – средние за расчетный период напряжения холостого хода подстанций  $A$  и  $B$ . Число перегонов в зоне отходящей линии  $M_q$ . Для того же фидера пути  $q$  действующее значение тока в общем случае определяют по формуле:

$$I^2_{фqA1} = I^2_{фqA} + D [I]_{фqA},$$

где дисперсия тока

$$D [I]_{фqA} = \sum_{k=1}^{M_q} \Delta^2_{kq} D [I]_{kq} +$$

$$+ (D [U]_A + D [U]_B) F^2_q / F^2 R^2_{AB};$$

$D [U]_A$  и  $D [U]_B$  – дисперсии напряжений холостого хода подстанций  $A$  и  $B$ ; если эти напряжения принимают при расчете неизменными, то их дисперсии будут равны 0.

Токи плеч питания смежных подстанций  $A$  и  $B$  при двустороннем питании участка.

Средний ток правого плеча подстанции *A*

$$I_{п.А} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq} + (U_{0A} - U_{0B})/R_{AB}$$

Средний ток левого плеча подстанции *B*

$$I_{п.В} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq}) I_{kq} - (U_{0A} - U_{0B})/R_{AB}$$

Действующие токи этих же плеч

$$I_{п.А.д}^2 = I_{п.А}^2 + D[I]_{п.А}; \quad I_{п.В.д}^2 = I_{п.В}^2 + D[I]_{п.В}, \quad \text{где}$$

$$D[I]_{п.А} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq}^2 D[I]_{kq} + (D[U]_A + D[U]_B)/R_{AB}^2;$$

$$D[I]_{п.В} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq})^2 D[I]_{kq} + (D[U]_A + D[U]_B)/R_{AB}^2.$$

Средний ток *I<sub>A</sub>* подстанции равен сумме средних токов правого *I<sub>п.п.А</sub>* и левого *I<sub>п.п.В</sub>* плеч; *I<sub>A</sub>* = *I<sub>п.п.А</sub>* + *I<sub>п.п.В</sub>*. Действующий ток подстанции *A*

$$I_{A.д}^2 = I_A^2 + D[I]_{п.п.А} + D[I]_{п.п.В}$$

В общем случае средний ток фидера *I<sub>ф</sub>* =

$$I_{ф} = \sum_{k=1}^M I_k$$

Действующий ток фидера *I<sub>ф.д</sub>*:

$$I_{ф.д}^2 = \left( \sum_{k=1}^M I_k \right)^2 + \sum_{k=1}^M I_{kq}^2 - \sum_{k=1}^M I_k^2$$

где *I<sub>k</sub>*, *I<sub>kq</sub>* – средний и действующий токи *k*-го перегона; *M* – число перегонов в фидерной зоне.

Если известно энергопотребление на перегонах

$$I_{ф} = \frac{10^3}{TU} \sum_{k=1}^M W_{kT} = \frac{10^3}{TU} W_T$$

где *W<sub>kT</sub>*, *W<sub>T</sub>* – энергия, потребляемая всеми поездами на перегоне *k* и на всей зоне за расчетный интервал времени *T*: *U* – среднее напряжение в тяговой сети, при котором потребляется энергия.

Квадрат действующего тока фидера

$$I_{ф.д}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left( 1,08 T \sum_{k=1}^M \sum_{q=1}^N \frac{W_{kq}^2}{t_{kq}} + W_T^2 - \sum_{k=1}^M W_{kT} \right)$$

где *W<sub>kq</sub>* – энергия, потребляемая на *k*-м перегоне поездом с номером *q* за время *t<sub>kq</sub>*; *N* – общее число поездов.

При двустороннем питании действующий ток фидера подстанции *A*

$$I_{ф.п.А}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[ 1,08 T \sum_{k=1}^M \sum_{g=1}^N \frac{W_{kg}}{t_{kg}} \times \times (I_{kB}^2 + I_k^2/12) + \left( \sum_{k=1}^M W_{kT} \frac{l_{kB}}{l} \right)^2 - - \sum_{k=1}^M \left( W_{kT} \frac{l_{kB}}{l} \right)^2 \right],$$

где *l*, *l<sub>k</sub>*, *l<sub>kB</sub>* – соответственно расстояние между подстанциями, длина перегона *k*, расстояние от середины перегона *k* до подстанции *B* (рис. 58.43).

Расчет токораспределения на участках переменного тока по заданным размерам движения. Рассчитывают активную и реактивную составляющие средних токов плеч питания.

Для правого плеча подстанции *A*

$$I_{п.п.А} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kqa} + \gamma_1 U_A - \gamma_2 U_B$$

$$I_{п.п.В} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kqb} + \nu_1 U_A - \nu_2 U_B$$

Для левого плеча подстанции *B*

$$I_{п.п.В} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq}) I_{kqa} - \gamma_1 U_A - \gamma_2 U_B$$

$$I_{п.п.А} = \sum_{q=1}^s \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq}) I_{kqb} - \nu_1 U_A + \nu_2 U_B$$

Здесь *U<sub>A</sub>* и *U<sub>B</sub>* – средние значения напряжений подстанций за рассматриваемый интервал времени.

Действующий ток правого плеча находят по формуле

$$I_{п.п.А.д}^2 = I_{п.п.А}^2 + I_{п.п.В}^2 + D[I]_{п.п.А} + D[I]_{п.п.В}$$

Для левого плеча расчет аналогичен. Здесь *D[I]\_{п.п.А}* и *D[I]\_{п.п.В}* – дисперсии актив-

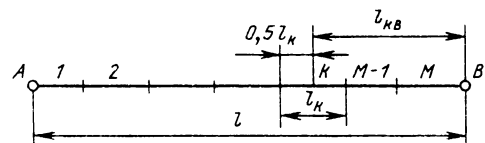


Рис. 58.43. Расчетная схема при двустороннем питании

ной и реактивной составляющих тока плеча, см [58.37].

Расчеты уровня напряжения на токоприемнике поезда. Среднее значение напряжения у  $i$ -го поезда  $U_i$  за время его хода по перегону или блок-участку при постоянном токе

$$U_i = U_{0i} - (\Delta U_A + \Delta U_p + \Delta U_k),$$

где  $\Delta U_A$ ,  $\Delta U_k$ ,  $\Delta U_p$  – средняя потеря напряжения на подстанции, в контактной и рельсовой сетях.

При двустороннем питании потеря напряжения от подстанции  $A$  до нагрузки  $I_i$  при заданном расположении нагрузок

$$\Delta U_s = r \left( \sum_{j=1}^s I_j l_j + l_s \sum_{j=s+1}^m I_j - l_s I_B \right),$$

где  $I_B$  – ток подстанции  $B$ , определяют по формуле

$$I_B = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^m I_j l_j - \frac{U_A - U_B}{rl}.$$

При одностороннем питании та же формула, но принимают  $I_B = 0$ . Сопротивление тяговой сети  $r$ , Ом/км.

При однофазном токе, допуская равенство углов сдвига фаз различных нагрузок для расчета по этим же формулам, сопротивление тяговой сети  $r$  следует заменить на полное

$$z = r_z \cos \varphi + x \sin \varphi.$$

Для учета несинусоидальности токов в тяговой сети с выпрямительными электровозами при расчетах потерь напряжения сопротивление  $z$  заменяют эквивалентным, приведенным к выпрямленному напряжению  $z_{кв} = 0,69x + + 0,80r_a$  для режима тяги и  $z_{кв} = 0,69x - - 0,85r_a$  для режима рекуперации. Действующие значения тока заменяют выпрямленными, приведенными к напряжению тяговой сети [58.39]. Действующее значение напряжения  $U$  в тяговой сети и расчетное напряжение, приведенное к выпрямленному  $U_d$  на поезде, связаны соотношением

$$U_d = 0,9U.$$

Методику расчета потери напряжения при заданных размерах движения – см. [58.39].

Потери мощности  $\Delta P$ , кВт, в тяговых сетях постоянного и переменного токов при заданном расположении нагрузок

$$\Delta P = \left[ \sum_{j=1}^m \Delta U_j I_j + \frac{(U_A - U_B)^2}{lr} \right] \cdot 10^{-3},$$

где  $\Delta U_j$  – потеря напряжения от подстанции

до потребителя  $j$  с током  $I_j$ ; второе слагаемое в квадратных скобках дает составляющую потери мощности от уравнительного тока. Формула записана для случая двустороннего питания. При  $U_A = U_B$  получим формулу, пригодную для схемы одностороннего питания. Потери мощности в линиях переменного тока при заданном расположении нагрузок определяют по аналогичным формулам, заменяя сопротивление постоянному току активным сопротивлением тяговой сети. Уравнительный ток при двустороннем питании в этом случае определяют путем деления геометрической разности напряжений смежных подстанций на полное сопротивление тяговой сети между ними.

Расчет потерь мощности в тяговой сети при заданных размерах движения. Двустороннее питание

$$\Delta W_T = \frac{r \cdot 10^3}{TU^2} \sum_{k=1}^M l_{kA} \left[ 1,08T \left( 1 - \frac{l_{kA}}{l} \right) \times \right. \\ \left. \times \sum_{j=1}^N \frac{W_{kj}^2}{t_{kj}} + 2W_{kT} \sum_{j=k+1}^M W_{jT} \left( 1 - \frac{l_{jA}}{l} \right) \right],$$

где  $l_{kA}$ ,  $l_{jA}$  – расстояния от середин перегонов  $k$  и  $j$  до подстанции  $A$ ;  $W_{jT}$  – расход энергии на перегоне  $j$  за время  $T$ , кВт·ч;  $\Delta W_T$  – потери энергии в тяговой сети за время  $T$ , кВт·ч.

Одностороннее питание

$$\Delta W_T = \frac{r \cdot 10^3}{TU^2} \sum_{k=1}^M l_{kA} \times \\ \times \left[ 1,08T \sum_{j=1}^N \frac{W_{kj}^2}{t_{kj}} + 2W_{kT} \sum_{j=k+1}^M W_{jT} \right].$$

Расчеты для более сложных схем, а также при рекуперации энергии – см. [58.39].

### Трансформаторы, выпрямители, компенсирующие устройства

Активные потери часовые в трансформаторах, кВт,

$$\Delta P_{TP} = n_{TP} \Delta P_x + \frac{\kappa_{3,п}^2}{n_{TP}} \Delta P_a \kappa_{3,т}^2,$$

где  $n_{TP}$  – число трансформаторов на тяговой подстанции;  $\Delta P_a$ ,  $\Delta P_x$  – удельные нагрузочные и холостого хода потери электроэнергии в трансформаторах, кВт;  $\kappa_{3,п}$  – коэффициент эф-

эффективности нагрузки подстанции;  $\kappa_{3,т}$  – коэффициент загрузки, определяемый по формулам для трансформаторов:

однофазных двухобмоточных

$$\kappa_{3,т}^2 = \frac{S_{ср}^2}{S_H^2};$$

трехобмоточных трехфазных понижающих

$$\kappa_{3,т}^2 = \frac{S_{ср1}^2}{S_{ном}^2} + \frac{S_{ср2}^2}{S_{ном}^2} + \frac{S_{ср3}^2}{S_{ном}S_{ном3}};$$

трехфазных трехобмоточных тяговых

$$\kappa_{3,т}^2 = \frac{S_{ср.п}^2}{S_{ном}^2} (9\mu^2 + 2\nu^2 + 3\mu\nu + 3\mu + \nu + 2);$$

$\mu = \frac{I_p}{3I_n}$ ;  $I_p$  – районная нагрузка;  $I_n$  – тяговая нагрузка наиболее загруженного плеча питания;  $\nu$  – отношение нагрузок плеч питания фаз  $a$  и  $b$ ;  $I_a/I_b = \nu$ ;  $S_{ср}$  – среднегодовая нагрузка трансформатора;  $S_{ср1}$ ,  $S_{ср2}$ ,  $S_{ср3}$  – то же по обмоткам;  $S_{ср.п}$  – то же плеча питания;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора;  $S_{ном3}$  – то же меньшей по мощности обмотки.

Для трехфазных тяговых трансформаторов действующие токи фаз при равенстве углов сдвига нагрузок плеч  $\phi_a = \phi_b$ :

$$I_{2bc}^2 = \frac{1}{9} (I_{2a}^2 + 4I_{2b}^2 + 2I_a I_b);$$

$$I_{2ac}^2 = \frac{1}{9} (I_{2b}^2 + 4I_{2a}^2 + 2I_a I_b);$$

$$I_{2ab}^2 = \frac{1}{9} (I_{2a}^2 + I_{2b}^2 - I_a I_b),$$

где  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_{2a}$ ,  $I_{2b}$  – средние и действующие токи плеч питания по фазам  $a$  и  $b$ .

Потребная мощность на тягу трансформаторов тяговых подстанций переменного тока,  $\text{kB} \cdot \text{A}$ ,

$$S_T \approx (2S_{Ta}\kappa_{3a}\kappa_{maxa} + 0,65S_{Tb}\kappa_{3b}\kappa_{maxb}) \cdot 0,8,$$

где  $S_{Ta}$ ,  $S_{Tb}$  – расчетные мощности тяги по плечам  $a$  и  $b$ ,  $\text{kB} \cdot \text{A}$ ;  $\kappa_{3a}$  и  $\kappa_{3b}$  – коэффициенты эффективности нагрузок плеч питания;  $\kappa_{maxa}$ ,  $\kappa_{maxb}$  – коэффициенты, учитывающие допустимую перегрузку трансформаторов по нагрузке плеч  $a$  и  $b$ .

Полная расчетная мощность трехфазных трехобмоточных трансформаторов,  $\text{kB} \cdot \text{A}$ ,

$$S_{расч} = S_T + S_p,$$

где  $S_p$  – районная нагрузка нетяговых потребителей:

$$S_p = \sum_{n=1}^{\tau_p} (S_{pmaxn}) \kappa_{н,р} \kappa_{м,р} \kappa_{сп},$$

где  $S_{pmaxn}$  – максимальная нагрузка  $n$ -го потребителя;  $\kappa_{н,р}$  – коэффициент неравномерности районной нагрузки;  $\kappa_{ч,р}$  – перегрузочная способность районных трансформаторов;  $\kappa_{сп}$  – коэффициент спроса;  $\tau_p$  – число районных потребителей.

Число рабочих выпрямительных агрегатов  $N_{a,р}$  для подстанций постоянного тока выбирается из условий

$$N_{a,р} \geq I_{4л}/I_{ном}; N_{a,р} \geq I_{4max}/\kappa_{пер}I_{ном},$$

где  $I_{4л}$ ,  $I_{4max}$  – действующий и максимальный токи подстанции,  $A$ ;  $I_{ном}$  – номинальный ток агрегата подстанции,  $A$ ;  $\kappa_{пер}$  – перегрузочная способность агрегата.

Потребная реактивная мощность устройств параллельной емкостной компенсации,  $\text{kвар}$ ,

$$Q_p = \frac{A_{г,т}(\text{tg} \phi_1 - \text{tg} \phi_2) \cdot 1,13 \cdot 10^6}{8000},$$

где  $A_{г,т}$  – годовое электропотребление на тягу, млн.  $\text{kBt} \cdot \text{ч}$ ;  $1,13$  – коэффициент, учитывающий потери в реакторе и искажение формы кривой приложенного напряжения. Принимают:  $\text{tg} \phi_1 = 0,62$ ,  $\text{tg} \phi_2 = 0,394$ .

Основные технические данные установок поперечной и продольной емкостной компенсации приведены в табл. 58.39.

### Параметры тяговых сетей постоянного и переменного тока

Сопротивление тяговой сети постоянного тока состоит из суммы сопротивлений проводов контактной сети и рельсовой цепи. Сопротивление  $l$  км проводов контактной сети  $r_k$

$$r_k = 1/\sum g,$$

Таблица 58.39. Компенсирующие установки

Тип конденсатора	Количество конденсаторов	Мощность конденсаторов, $\text{kвар}$	Номинальный ток, $A$	Назначение установки
КПМ-0,6-50	112	5600	155	Поперечная компенсация
КМН-1,05-25	224	5600	155	
КСА-1,05-25	160	4000	110	
КСА-1,05-37,5	128	4800	133	
КС-1,05-37,5	64	2400	67	
КСП-0,66-40	144	5760	480	Продольная компенсация
КПМ-0,6-50	80	4000	667	
КСША-0,66-40	60	2400	1212	
КС-1,05-25	72	1800	858	

Таблица 58.40 Проводимость 1 км проводов

Марка провода	Проводимость $g$ , См км
С-70	0,52
ПБСМ1-70	1,37
ПБСМ1-95	1,77
ПБСМ2-70	1,08
ПБСМ2-95	1,42
М-95	5,00
М-120	6,32
МФ-85	4,75
МФ-100	5,65
МФ-150	8,50
БрФ-100	5,07
А-150	4,75
А-185	5,90

Примечание Проводимость контактных проводов, имеющих износ, уменьшается пропорционально доле их износа

Таблица 58.41 Сопротивление рельсовой цепи  $r_p$  однопутного участка, Ом/км, без учета износа рельсов и шунтирующего действия грунта

Тип рельса	Длина рельса между стыками, м		Рельсы, сваренные в стыках
	12,5	25,0	
P75	0,0131	0,0120	0,0109
P65	0,0153	0,0140	0,0127
P50	0,0191	0,0175	0,0159
P43	0,0221	0,0203	0,0184

Примечание Для двухпутного участка приведенные в таблице значения следует уменьшить в 2 раза.

Таблица 58.42. Активное сопротивление одиночного рельса при частоте 50 Гц

Тип рельса	Сопротивление рельса, Ом км, при токе, А		
	100	200	300
P43	0,21	0,28	0,33
P50	0,18	0,24	0,29
P65	0,16	0,20	0,25
P75	0,15	0,19	0,23

где  $\sum g$  — сумма проводимостей 1 км проводов, составляющих контактную сеть.

Проводимость отдельных марок проводов приведена в табл. 58.40.

Шунтирующий эффект грунта снижает сопротивление рельсовой сети, учитывается умножением значений  $r_p$ , приведенных в табл. 58.41, на коэффициент  $\beta_p$ , определяемый по формулам [58.37]:

для консольного питания одной нагрузки от одной подстанции при практически неограниченной длине рельсов по обе стороны от рассматриваемой зоны

$$\beta_{p1} = (1 - e^{-\kappa l})/\kappa l,$$

где  $\kappa = \sqrt{r_p/r_n}$ ;  $r_p$  — сопротивление 1 км рельсовой цепи (всех путей), Ом/км;  $r_n$  — переходное сопротивление рельс — земля, Ом · км;  $l$  — расстояние от подстанции до нагрузки;

для двустороннего питания с одной нагрузкой в середине участка длиной  $l$

$$\beta_{p2} = \frac{4 \operatorname{ch}(\kappa l/2) - 1}{\kappa l \operatorname{sh}(\kappa l/2)};$$

для среднего значения сопротивления рельсов при перемещении нагрузки вдоль участка питания

$$\beta_{p3} = \{2 + 7 \operatorname{ch}(\kappa l) - 21 \operatorname{sh}(\kappa l)/\kappa l + 24 [\operatorname{ch}(\kappa l) - 1]/\kappa^2 l^2\}/\kappa l \operatorname{sh}(\kappa l).$$

Активное сопротивление рельсов переменному току в 5–10 раз больше их сопротивления постоянному току (табл. 58.42) и зависит от протекающего по рельсам тока. Весьма осложняется определение индуктивного сопротивления из-за несимметричности тяговой сети, протекания токов в грунте и изменений контуров тягового тока, связанных с перемещением тяговых нагрузок.

Полное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка при частоте 50 Гц можно рассчитывать как  $z = r_a + jx$ , двухпутных участков при раздельной работе контактных подвесок путей  $z_1 = r_{a1} + jx_1$ , двухпутных участков при параллельном соединении контактных подвесок путей  $z_2 = r_{a2} + jx_2$ . Составляющие полных сопротивлений приведены в табл. 58.43 и 58.44.

Наибольшие длительно допустимые токи контактной подвески определяются допустимым превышением температуры проводов, которое принимают 60 °С для медных, стале-медных и стальных проводов и 40 °С для алюминиевых при температуре окружающей среды 40 °С и скорости охлаждающего воздуха 1 м/с. Допустимые токовые нагрузки — см. табл. 58.45.

### Технико-экономические параметры и нормативы

Экономические плотности тока в элементах системы электроснабжения городского электротранспорта приведены в табл. 58.46, 58.47.

Сечение кабелей положительных питающих линий трамвайных и троллейбусных тя-



Таблица 58.43 Суммарное активное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка  $r_a$ , одного пути двухпутного участка  $r_{a1}$ , тяговой сети двухпутного участка при параллельном соединении контактных подвесок  $r_{a2}$ , Ом/км

Марка троса	Марка контактного провода	Тип рельса	$r_a$	$r_{a1}$	$r_{a2}$
С-70	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,328	0,282	0,173
		Р50	0,314	0,273	0,164
		Р65 и Р75	0,296	0,264	0,155
	МФ-100	Р43	0,311	0,263	0,163
		Р50	0,295	0,254	0,154
		Р65 и Р75	0,278	0,245	0,145
ПБСМ1-70 ПБСМ2-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,294	0,248	0,158
		Р50	0,282	0,239	0,148
		Р65 и Р75	0,266	0,23	0,139
	МФ-100	Р43	0,284	0,236	0,149
		Р50	0,269	0,227	0,140
		Р65 и Р75	0,253	0,218	0,131
ПБСМ1-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,279	0,232	0,148
		Р50	0,264	0,223	0,139
		Р65 и Р75	0,248	0,214	0,13
	МФ-100	Р43	0,27	0,222	0,142
		Р50	0,25	0,213	0,133
		Р65 и Р75	0,238	0,204	0,124
ПБСМ2-70	БрФ 100 МФ-85	Р43	0,316	0,263	0,163
		Р50	0,3	0,254	0,154
		Р65 и Р75	0,281	0,245	0,145
	МФ-100	Р43	0,293	0,249	0,156
		Р50	0,282	0,24	0,147
		Р65 и Р75	0,265	0,231	0,138
М-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,212	0,164	0,114
		Р50	0,197	0,155	0,105
		Р65 и Р75	0,181	0,146	0,096
	МФ-100	Р43	0,205	0,157	0,11
		Р50	0,19	0,148	0,101
		Р65 и Р75	0,173	0,139	0,092
М-120	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,203	0,154	0,108
		Р50	0,187	0,145	0,099
		Р65 и Р75	0,171	0,136	0,09
	МФ-100	Р43	0,195	0,148	0,106
		Р50	0,181	0,139	0,097
		Р65 и Р75	0,164	0,13	0,088

Примечание. Приведенные данные соответствуют средним значениям переходного сопротивления  $r_n$  между рельсами и грунтом

Таблица 58.44 Суммарное реактивное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка  $x$ , одного пути двухпутного участка  $x_1$ , тяговой сети двухпутного участка при параллельном соединении контактных подвесок  $x_2$ , Ом/км

Марка троса	Тип рельса	$x$	$x_1$	$x_2$
С-70	Р43	0,621	0,536	0,358
	Р50	0,605	0,528	0,35
	Р65 и Р75	0,593	0,520	0,342
ПБСМ1-70 ПБСМ2-95	Р43	0,554	0,469	0,327
	Р50	0,543	0,461	0,317
	Р65 и Р75	0,521	0,453	0,309
ПБСМ1-95	Р43	0,543	0,453	0,316
	Р50	0,522	0,445	0,308
	Р65 и Р75	0,505	0,437	0,3
ПБСМ2-70	Р43	0,57	0,485	0,333
	Р50	0,554	0,476	0,325
	Р65 и Р75	0,537	0,469	0,317
М-95 М-120	Р43	0,515	0,43	0,305
	Р50	0,499	0,422	0,297
	Р65 и Р75	0,48	0,414	0,289

Примечание. Приведенные данные соответствуют средним значениям переходного сопротивления  $r_n$  между рельсами и грунтом

Таблица 58.45 Допустимые токовые нагрузки на контактную сеть

Провода и тросы контактной подвески	Допустимый ток, А	
	постоянный	переменный
МФ-65	400	—
ПКСА-80/180	750	—
С-70 + МФ-85	550	550
С-70 + МФ-100	600	600
ПБСМ1-70 + МФ-85	710	—
ПБСМ1-70 + МФ-100	720	670
ПБСМ1-95 + МФ-85	760	710
ПБСМ1-95 + МФ-100	800	740
ПБСМ1-95 + 2МФ-100	1340	—
М-95 + МФ-85	1140	1110
М-95 + МФ-100	1200	1190
М-95 + МФ-150	1310	—
М-95 + 2МФ-100	1800	—
М-95 + 2МФ-100 + А-185	2370	—
М-95 + 2МФ-100 + 2А-185	3000	—
М-120 + МФ-100	1280	1230
М-120 + 2МФ-100	1880	—
М-120 + 2МФ-100 + А-185	2510	—
М-120 + 2МФ-100 + 2А-185	3140	—
М-120 + МФ-150	1440	—
М-120 + МФ-150 + А-185	2040	—
М-120 + МФ-150 + 2А-185	2640	—
М-120 + БрФ-100	1200	—
М-120 + БрФ-100 + А-185	1730	—
М-120 + БрФ-100 + 2А-185	2330	—

Таблица 58.46. Экономическая плотность тока в контактных проводах и кабелях постоянного тока

Тариф на электроэнергию, руб/(кВт·ч)	Экономическая плотность, А/мм <sup>2</sup>			
	медный провод $J_{\text{эк,п}}$	сталеалюминиевый провод* $J_{\text{эк,п}}$	кабель АСБ-2к $J_{\text{эк,к}}$	кабель ААБ-2к $J_{\text{эк,к}}$
0.01	1,35	1,3	1,35	1,2
0.02	0,95	0,9	0,95	0,85
0.03	0,75	0,7	0,75	0,7
0.04	0,67	0,65	0,67	0,6
0.05	0,6	0,58	0,6	0,54
0.06	0,55	0,53	0,55	0,49

\* Для эквивалентного сечения по меди 85 мм<sup>2</sup>

Таблица 58.47 Экономическая плотность тока в кабелях 6–10 кВ при продолжительности использования максимума нагрузки  $t_n$

Вид кабеля	$J_{\text{эк}}$ , А/мм <sup>2</sup> при $t_n$ , ч		
	1000–3000	3000–5000	5000–8700
Кабели с бумажной изоляцией с жилами: медными	3	2,5	2
	1,6	1,4	1,2
Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией, с медными жилами	3,5	3,1	2,7

Таблица 58.48 Максимально допустимое падение напряжения  $\Delta U_{\text{рmax}}$ , В

Тип основания рельсового пути трамвая	Число месяцев в году со среднемесячной температурой выше $-5^\circ\text{C}$				
	3–4	5–6	7–8	9–10	11–12
Бетонное с рельсами, уголенными в бетон	1,2	0,8	0,6	0,5	0,4
Песчаное с замощением	6	4	3	2,5	2
Щебеночное с замощением или песчаное со слоем битуминизированного песка под штучным покрытием	9,6	6,4	4,8	4	3,2
Бетонное с электроизоляцией корыта битуминизированным песком слоем 10–12 см	12	8	6	5	4
Шпально-песчаное и шпально-щебеночное без замощения	12	8	6	5	4

говых сетей и отрицательных питающих линий троллейбусной сети

$$F_{\text{эк,к}} = I_{\text{л,л}}/J_{\text{эк,к}}$$

Сечение контактных проводов

$$F_{\text{эк,п}} = I_{\text{экв}}/J_{\text{эк,п}}$$

Сечение кабелей отрицательных питающих линий трамвая

$$F_{0i} = \frac{I_{0i}l_{0i}}{J_{\text{эк,к}}} \left( \frac{\sum_{i=1}^m I_{0i}}{\sum_{i=1}^m I_{0i}l_{0i}} \right)^{1/2}$$

где  $I_{0i}$  – средний ток в  $i$ -й линии. А;  $F_{0i}$  – сечение, мм<sup>2</sup>;  $l_{0i}$  – длина, км,  $i$ -й линии;  $m$  – общее число линий;  $I_{\text{экв}}$  – эквивалентный ток участка контактной сети;  $I_{\text{л,л}}$  – действующий ток кабельной линии.

Суммарное экономическое сечение в медном эквиваленте проводов контактной сети железнодорожного транспорта [58.39]

$$F_{\text{эк,м}} = 3,38 \sqrt{cB_0}$$

где  $c$  – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч);  $B_0 = \Delta A_l/r_k l$  – потери электроэнергии в год в проводах фидерной зоны при сопротивлении их 1 Ом, кВт·ч/(Ом·г);  $\Delta A_r$  – годовые потери электроэнергии в контактной сети фидерной зоны  $l$ , кВт·ч/г;  $r_k$  – сопротивление контактных проводов, Ом/км.

На городском электротранспорте максимальное падение напряжения в рельсах до ближайшего пункта присоединения к рельсам отрицательной питающей линии, вычисленное по среднесуточной нагрузке за месяцы со среднемесячной температурой выше  $-5^\circ\text{C}$ , не должно превышать значений, указанных в табл. 58.48.

Обычно тяговые нагрузки определяют для зимнего времени и максимального графика движения. Рассчитанная по этим нагрузкам допустимая потеря напряжения в рельсовой сети  $\Delta U_{\text{р,расч}}$  связана с соответствующим значением из табл. 58.48 формулой

$$\Delta U_{\text{р,расч}} = \Delta U_{\text{рmax}} \frac{24}{t_r} \kappa_{3,л} \kappa_{\text{max}}$$

где  $t_r$  – среднегодовая продолжительность работы трамвая на линии в течение суток, ч;  $\kappa_{3,л}$  – отношение удельного расхода электроэнергии на движение в зимнее время к удельному расходу летом ( $\kappa_{3,л} = 1,1 \div 1,15$ );  $\kappa_{\text{max}}$  – отношение удельного расхода электроэнергии в часы пик к среднесуточному ( $\kappa_{\text{max}} = 1,1 \div 1,2$ ).

## 58.12. КОНТАКТНАЯ СЕТЬ

## Контактные подвески

Высота подвешивания проводов над уровнем головок рельсов (для трамвая) и над уровнем дорожного покрытия (для троллейбуса) на вводимых вновь линиях принята 5,8 м; на территориях депо и ремонтных мастерских: на открытых участках — 5,8, внутри производственных зданий — 5,2, в проемах ворот — 4,7 м. Высота контактной сети под инженерными сооружениями не менее 4,2, в туннелях линий скоростного трамвая — не менее 3,8 м.

На железнодорожном транспорте расчетная высота контактного провода в беспроводном режиме над уровнем головок рельсов принята не менее 6250, на станциях — 6600 мм. Наименьшая высота провода в любой точке пролета, если не предусмотрена стоянка, не менее 5750, на остальных путях станций — 6250 мм. Наибольшая высота контактного провода в любых условиях эксплуатации 6800 мм.

Длины пролетов контактных подвесок на прямых участках приведены в табл. 58.49.

Горизонтальные расстояния (в свету) от фундаментов опор контактной сети городского электротранспорта до подземных сооружений (инженерных сетей) следует принимать в соответствии с табл. 58.50. Расстояния от элементов контактной сети, находящихся под напряжением, до различных объектов по горизонтали должны быть не менее указанных в табл. 58.51.

## Контактные провода

Применяют следующие типы контактных проводов, изготовленных по ГОСТ 2584-75: МФ — медный фасонный; МФО — то же овальное; БрФ — бронзовый фасонный; БрФО — то же овальное; НЛФ — низколегированный фасонный; НЛФО — то же овальное. На городском электрифицированном транспорте используют также составной сталеалюминиевый контактный провод ПКСА. Легирование осуществляют присадками циркония, кадмия, магния и др. Гарантийный срок службы от момента монтажа составляет 5 лет для медных, 6 лет для низколегированных и 10 лет для бронзовых проводов. Основные физико-механические свойства контактных проводов приведены в § 18.6.

Максимальные и минимальные значения напряжений от механических нагрузок, а также натяжений в контактных проводах трамвая и троллейбуса следует принимать по табл. 58.52.

Натяжения проводов, применяемых при

Таблица 58.49 Длины пролетов контактных подвесок на городском электротранспорте

Типы контактной подвески	Пролет, м		
	Трамвай	Троллейбус	Совместное подвешивание проводов трамвая и троллейбуса
Все типы простых полужестких подвесок.			
на опорах	30 — 35	25 — 30	25 — 30
на стенах зданий	30	25	25
Простые на наклонных струнах	—	35 — 40	—
Цепные полукompенсированные и некомпенсированные	45 — 50	45 — 50	45 — 50
Простые петлевые компенсированные	40 — 45	—	—
Простые жесткие на потолочных подвесках	До 8	До 4	—

Таблица 58.50 Расстояния от фундаментов опор до подземных сооружений

Сооружение	Расстояние не менее, м
Водопровод, напорная канализация, общие коллекторы и тепловые сети	1,5
Самотечная канализация (бытовая и дождевая)	3
Дренажи и газопроводы любого давления	1
Силовые кабели и кабели связи	0,5

Таблица 58.51 Расстояния от элементов контактной сети до строительных объектов

Объект	Расстояние не менее, м
Опорные конструкции	1,5
Балконы зданий и оконные проемы	2
Изолированные кронштейны	0,25
Стволы деревьев	1,5
Ветви деревьев	1
Металлические части инженерных сооружений (в наилучшем расчетном режиме)	0,2
Металлические части разводных мостов (как исключение)	0,1

Таблица 58.52. Механические свойства проводов контактной сети трамвая и троллейбуса

Контактная подвеска	Напряжение в проводах при растяжении, МПа		Напряжение в проводах ПКСА-80/180, кН
	МФ, МФО	БрФ, БрФО	
Некомпенсированная	44 – 123	54 – 147	2 – 12
Частично компенсированная	39 – 147	54 – 147	2 – 12
Полукомпенсированная и компенсированная	78.5 – 93	103 – 113	7 – 8

Таблица 58.53. Натяжения проводов и тросов в контактной сети железных дорог

Тип провода	Натяжение, кН	
	допустимое	номинальное
М-120	19,6	17,6
М-95	15,7	14,2
ПБСМ-95	19,6	17,6
ПБСМ-70	15,7	14,2
МФ-150	17,7	14,7
МФ-100	11,8	9,8
МФ-85	10	8,3
БрФ-100	14,7	12,8
А-185	9	—
А-150	7,5	—

электрификации железных дорог, приведены в табл. 58.53.

**Опоры контактной сети железнодорожного транспорта**

Железобетонные опоры (рис. 58.44) используют в качестве стоек для жестких поперечин и для закрепления на них консолей. Опоры выполняются предварительно напряженными. Характеристики основных типов железобетонных опор приведены в табл. 58.54. Обозначение опоры расшифровывается следующим образом: С – струнобетонная; К – коническая, Ц – центрифугированная, индекс «о» – особая; цифры, следующие после буквенного обозначения, соответствуют нормативному изгибающему моменту на уровне условного обреза фундамента, тс·м и окруженной длине опоры, м. Опоры с индексом «о» имеют в нижней части дополнительную арматуру из ненапряженных стержней и предназначены для использования на участках постоянного тока с повышенной электрокоррозией.

Опоры длиной 13,6 м обычно устанавливают непосредственно в грунт (рис. 58.44, а), а

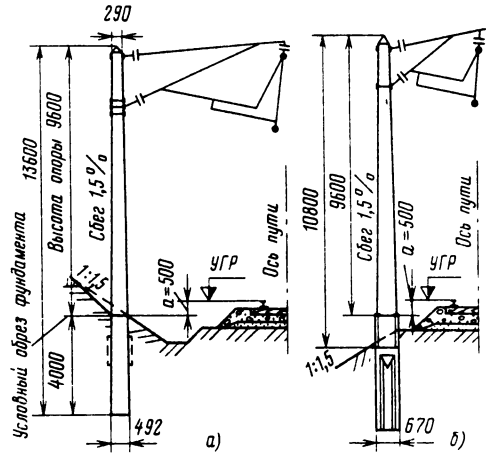


Рис. 58.44. Конические струнобетонные напряженные опоры СК:

а – длиной 13,6 м при установке в выемке, б – длиной 10,8 м при установке на насыпи

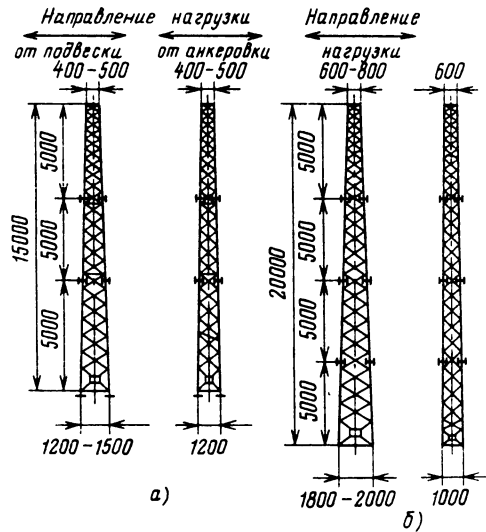


Рис. 58.45. Анкерные опоры гибких поперечин длиной 15 м (а) и промежуточные длиной 20 м (б)

опоры длиной 10,8 м устанавливают в стаканые фундаменты (рис. 58.44, б). Консоли и кронштейны удерживаются на опорах посредством закладных деталей, которые крепятся к опорам болтами, пропускаемыми через отверстия в стенках опоры. Болты и закладные детали изолируют от бетона прокладками и полиэтиленовыми втулками.

Металлические опоры (рис. 58.45, а, б) используют в качестве анкерных, для установки

Таблица 58.54. Характеристики железобетонных опор железнодорожного транспорта

Тип опоры	Нормативный момент, кН·м	Объем бетона, м <sup>3</sup>	Масса арматуры, кг	Масса опоры, т
СКЦо-6.0-13.6	59	0,85	111/82	2,1
СКЦо-8.0-13.6	78	0,85	155/116	2,1
СКЦо-4.5-10.8	44	0,63	61/51	1,6
СКЦо-6.0-10.8	59	0,63	79/65	1,6
СКЦо-8.0-10.8	78	0,63	111/91	1,6

Примечание. Масса арматуры в числителе — для опор СКЦо, в знаменателе — для опор СКЦ, остальные параметры для СКЦо и СКЦ совпадают.

Таблица 58.55. Металлические опоры железнодорожного транспорта

Тип	База, см		Вершина, см	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>1</sub>
МН 25/15	100	120	40	40
МН $\frac{35-15}{15}$	100	120	40	40
МН 45/15	100	150	50	50
МН 65/15	100	150	50	50
МН 65/20	100	180	60	60
МН 85/20	100	180	60	60
МН 105/20	100	200	60	80
МН 150, 20	100	200	60	80
М 25/15	80	130	50	50
М 35/15	80	130	50	50
М 45/15	110	100	50	50
М 65/15	110	160	50	50
М $\frac{35-25}{25}$	100	120	40	40
М $\frac{45-25}{15}$	100	150	50	50
М $\frac{65-25}{15}$	100	150	50	50
М $\frac{65-25}{20}$	100	150	50	50
М 10/13	60	100	40	50
М 15, 13	60	100	40	50
М $\frac{10-40}{10}$	100	150	67	83

Примечания. 1 Буквенное обозначение. М — металлическая, Н — направленная.

2 В числителе приведены расчетные моменты, кН·м/9,81, поперек (первая цифра) и вдоль (вторая цифра) пути, в знаменателе — высота, м.

3 *a*, *b*, *a*<sub>1</sub>, *b*<sub>1</sub> — стороны прямоугольника в сечении опоры у основания и при вершине

двухпутных консолей и подвески гибких поперечин. Основные размеры типовых металлических опор железнодорожного транспорта приведены в табл. 58.55.

**Консоли.** В зависимости от числа перекрываемых путей консоли исполняют в виде

Таблица 58.56. Неизолированные наклонные однопутные консоли

Тип консоли	Длина, м		Масса, кг
	кронштейна	тяги	
НР-0-5	3,63	1,9	44
НР-1-5	4,73	2,6	56
НР-II-5	5,23	3,4	62
НР-III-6,5	6,23	4,4	85
НР-IV-6,5	7,13	5,3	97
НС-III-6,5п	6,23	4,4	98
НС-IV-6,5п	7,13	5,3	111
НС-1-5	4,73	2,6	46
НС-II-5	5,23	3,4	56
НС-1-6,5	4,73	2,6	64
НС-II-6,5	5,23	3,4	65
НС-III-6,5	6,23	4,4	72
НС-IV-6,5	7,13	5,3	87

Примечание. Н — наклонная консоль; Р — растянутая тяга, С — сжатая тяга; римская цифра — номер типа по длине кронштейна.

Таблица 58.57. Изолированные консоли

Тип консоли	Кронштейн		Тяга		
	длина, м	масса, кг	Материал с размерами, мм	Длина, м	Масса, кг
ЖС-1	1,92	12	Сталь угловая 50 × 50 × 5	1,6	7
ЖР-1	1,92	12	Сталь Ø 12	1,45	2
ЖР-2	2,05	14	То же	1,45	2
ИТС-II	3,5	18	Сталь Ø 25	2,25	6
ИТС-III	4	21		2,75	7
ИТС-V	5	26		3,85	10
ИТС-VI	5,5	28		4,35	11
ИТР-II	3,5	18	Сталь Ø 16	2,2	4
ИТР-V	5	26		3,8	7
ИС-II	3,5	35	Сталь Ø 25	2,25	6
ИС-III	4	40		2,75	7
ИС-V	5	50		3,86	9
ИС-VI	5,5	55		4,35	11
ИР-II	3,5	35	Сталь Ø 12	2,2	5
ИР-V	5	50		3,8	7

Примечание. Ж — изолированная консоль на стойках жестких поперечин. С — сжатая тяга, Р — растянутая тяга. И — изолированная консоль, Т — трубчатая, римская цифра — тип консоли

однопутных, двухпутных и многопутных. Применяют неизолированные и изолированные консоли (табл. 58.56 и 58.57).

**Гибкие поперечины.** Используют поперечины с изолированным нижним фиксирующим тросом (рис. 58.46, а); с неизолированным по-

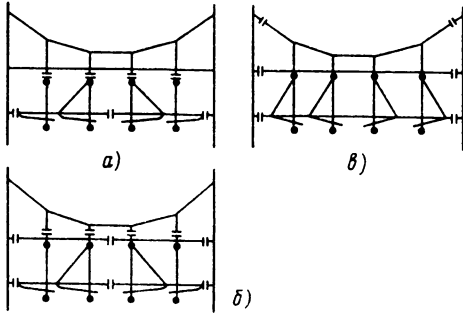


Рис. 58.46. Схемы гибких поперечин:

*а* – изолированный нижний фиксирующий трос, *б* – изолированные нижний и верхний фиксирующие тросы, *в* – изолированные поперечно-несущий и фиксирующие тросы

перечно-несущим и изолированными фиксирующими тросами (рис. 58.46, *б*); с изолированными поперечно-несущим и фиксирующими тросами (рис. 58.46, *в*).

**Жесткие поперечины.** Используют однопролетные и многопролетные конструкции.

В зависимости от числа перекрываемых путей они могут иметь длину от 16,1 до 49,2 м. В качестве опор (стоек) для них могут быть использованы железобетонные нераздельные опоры длиной 13,6 и раздельные 11,2 или 12,8 м, устанавливаемые в стаканые фунда-

менты. Стойки применяют одиночные или двойные в зависимости от длины жесткой поперечины. Применяют жесткие поперечины для перекрытия семи электрифицированных путей при двух режимах: легком – компенсированная подвеска переменного тока без установки на ригеле осветительных приборов (рис. 58.47, *а*); тяжелом – полукompенсированная подвеска постоянного тока с установкой на ригеле осветительных приборов (рис. 58.47, *б*).

Размеры поперечин без осветительных устройств составляют: ширина 0,45, высота 0,7 м и для поперечин с осветительными устройствами соответственно 0,74 и 1,2 м. Основные технические данные металлических жестких поперечин (ригелей) приведены в табл. 58.58.

### Опоры городского электрического транспорта

Железобетонная опора представляет собой полую коническую стойку с предварительно напряженной арматурой из высокопрочной стали. Из трех типов опор, предусмотренных ГОСТ 21052-75, для городского электрического транспорта применяют только тип III, предназначенный для наружного освещения и контактных сетей. Подводка питания к контактной сети предусмотрена прокладкой кабелей внутри опоры. Марки опор, основные размеры

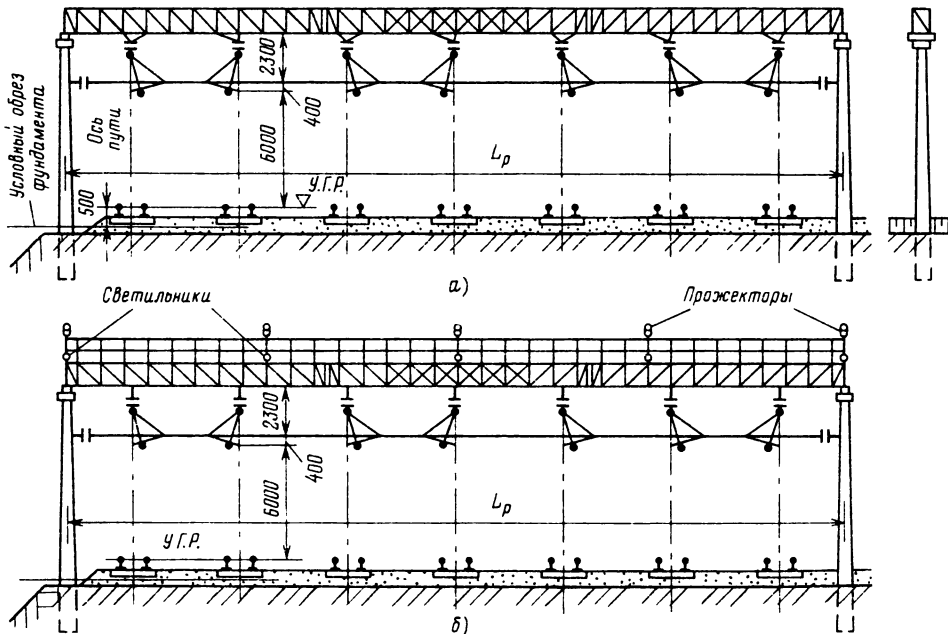


Рис. 58.47. Жесткая поперечина на семь путей без установки осветительных устройств (*а*) и с установкой осветительных устройств (*б*)

Таблица 58.58. Технические данные жестких поперечин

Марка поперечины	Масса, кг
<i>Без осветительных устройств</i>	
П 15-16,1	512
П 13-16,1	485
П 15-17,7	564
П 13-17,7	536
П 15-22,5	725
П 13-22,5	684
П 22-29,1	1145
П 17-29,1	987
П 15-29,1	921
<i>С осветительными устройствами</i>	
П 29-30,3	1320
П 26-30,3	1250
П 33-34	1511
П 29-39,2	1462
П 26-34	1341
П 23-30,3	1185
П 43-39,2	2074
П 33-39,2	1831
П 54-44,2	2659
П 43-44,2	2316
П 39-44,2	2109
П 29-39,2	1680

Примечание. П – поперечина, первая цифра – несущая способность, кН·м/9,81; вторая цифра – расчетный пролет  $L_p$ , м

Таблица 58.59. Железобетонные опоры городского электротранспорта

Опора	Наружный диаметр, мм		Толщина стенки, мм	Расстояние от места приложения нагрузки до уровня заделки, м	Нормативная горизонтальная нагрузка, кН
	верхний	нижний			
СНЦ-3,4-11,5	200	373	65	8,5	4
СНЦ-5,1-11,5	200	373	65	8,5	6
СНЦ-7,7-12	290	470	70	8,5	9
СНЦ-10-12	290	470	70	8,5	12
СНЦ-16-13	По рабочим чертежам			10	16
СНЦ-18-13			10	18	
СНЦ-20-15,5			12,5	16	
СНЦ-22,5-15,5			12,5	18	

Примечание. СНЦ – стойка с напрягаемой арматурой, центрифугированная, первая цифра – нормативный изгибающий момент на уровне заделки в грунт, кН м/9,81; вторая – длина стойки, м

и нагрузки железобетонных опор приведены в табл. 58.59.

Из стальных трубчатых опор наибольшее распространение в городском транспорте получили двухзвенные опоры, состоящие из двух

труб разного диаметра. Размеры трубчатых опор и бетонных фундаментов, принятые для условий Москвы, приведены в табл. 58.60.

**Расчетные нагрузки**

1. Нагрузка от собственного веса провода  $g$ , кН/м,

$$g = 9,81 \cdot 10^{-9} S \rho,$$

где  $S$  – расчетная площадь поперечного сечения провода, мм<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность материала провода, кг/м<sup>3</sup>.

Для многопроволочных проводов

$$g = 10,05 \cdot 10^{-9} S_p.$$

Для комбинированного провода (например, сталеалюминиевого)

$$g = 10,05 \cdot 10^{-9} (S_a \rho_a + S_c \rho_c),$$

где  $S_a$ ,  $S_c$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_c$  – соответственно площади сечений и плотности алюминиевой и стальной частей провода.

Нагрузка от струн и зажимов принимается как равномерно распределенная, равная  $10^{-3}$  кН/м при одном и  $2 \cdot 10^{-3}$  кН/м при двух контактных проводах.

2. Нагрузка от гололедных образований  $g_r$ , кН/м,

$$g_r = \rho_r b (d + b) \pi \cdot 9,81 \cdot 10^{-9},$$

где  $\rho_r$  – плотность гололедных отложений, кг/м<sup>3</sup>;  $b$  – толщина гололедной корки, мм;  $d$  – диаметр провода, мм.

На контактном проводе расчетная толщина стенки гололеда принимается в 2 раза меньше, чем на других проводах. Гололедные образования на струнах и зажимах цепной подвески не учитываются.

3. Ветровая нагрузка  $p_v$ , кН/м,

$$p_v = 0,615 \cdot 10^{-6} v^2 C_x d,$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $C_x$  – аэродинамический коэффициент (см. ниже).

Ветровая нагрузка на провод, покрытый гололедом,  $p_{v,r}$ , кН/м,

$$p_{v,r} = 0,615 \cdot 10^{-6} v_r^2 C_x (d + 2b),$$

где  $v_r$  – скорость ветра при гололеде, м/с.

Значения аэродинамического коэффициента лобового сопротивления  $C_x$ :

Одinarный провод диаметром:	
20 мм и более . . . . .	1,1
менее 20 мм . . . . .	1,2
Одinarный провод:	
покрытый гололедом . . . . .	1,2
с учетом зажимов и струн . . . . .	1,25
Контактный провод с учетом зажимов и струн:	
МФ-85, МФ-100 . . . . .	1,25
МФ-150 . . . . .	1,3

Двойной контактный провод 2МФ-100 в выемках, на равнинных участках, на насыпях до 5 м при расстоянии между проводами, мм

40 . . . . .	1,55
100 . . . . .	1,85
более 100 . . . . .	2,5

То же на насыпях высотой более 5 м, мм.

40 . . . . .	1,85
100 . . . . .	2,15
более 100 . . . . .	2,5

Для плоских элементов конструкций . . . . . 1,4  
 Для цилиндрических и конусных элементов конструкций . . . . . 0,7

Ветровая нагрузка на любой объект, воспринимаемая поверхностью, перпендикулярной направлению ветра,  $P_v$ , кН:

$$P_v = 0,615 \cdot 10^{-3} v^2 C_v S_{пов},$$

где  $S_{пов}$  — площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

4. Результирующая нагрузка  $q$ , кН/м.

$$q = \sqrt{(q + q_t)^2 + p_{в.1}^2}.$$

Результирующую нагрузку на несущий трос цепной подвески определяют без учета ветровой нагрузки на контактные провода.

Расчетные уравнения и методы расчета

Эквивалентный пролет для анкерного участка с подвижными точками закрепления контактного провода  $l_{эжв}$ , м,

$$l_{эжв} = \left( \sum_{i=1}^n l_i^3 / \sum_{i=1}^n l_i \right)^{1/2}.$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го пролета, м;  $n$  — число пролетов в анкерном участке.

Расчет комбинированных проводов производится по следующим формулам.

Эквивалентный модуль упругости  $E_{эжв}$

$$E_{эжв} = (E_c S_c + E_a S_a) / (S_c + S_a);$$

эквивалентный температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_{эжв}$

$$\alpha_{эжв} = (\alpha_c E_c S_c + \alpha_a E_a S_a) / (E_c S_c + E_a S_a),$$

где  $\alpha_c$ ,  $E_c$ ,  $S_c$ ,  $\alpha_a$ ,  $E_a$ ,  $S_a$  — соответственно температурные коэффициенты, модули упругости и сечения составляющих комбинированного провода.

Расчет комбинированного провода ведется как однородного на основании найденных эквивалентных величин. При этом под площадью поперечного сечения понимают сумму площадей составляющих частей, под натяжением — суммарное натяжение составляющих частей.

Упрощенное уравнение провисания гибкого однородного провода с постоянным сечением (рис. 58.48, а)

$$y = qx^2/2H.$$

Стрела провеса провода  $f$ , м,

$$f = ql^2/8H,$$

где  $q$  — результирующая нагрузка на провод, кН/м;  $H$  — горизонтальная составляющая натяжения провода, кН;  $y$ ,  $x$  — координаты искомой точки, м.

Уравнения провисания при расположении точек подвеса на разных уровнях (рис. 58.48, б)

$$a = l/2 - hH/ql; \quad b = l/2 + hH/ql;$$

$$f_A = qa^2/2H; \quad f_B = qb^2/2H.$$

Таблица 58.60 Металлические трубчатые опоры городского транспорта

Тип опоры	Длина опоры, м	Номинальная нагрузка, кН	Высота приложения нагрузки от зад. кн., м	Диаметр, мм		Масса опоры, кг	Глубина фундамента, м	Сторона фундамента, м, для грунта		
				верхний	нижний			слабого	среднего	плотного
II	9,5	4	7,7	168	219	380	1,8	0,9	0,8	0,8
III	9,5	6	7,7	219	273	465	1,8	1,2	1,0	0,8
IV	9,5	9	7,7	273	325	634	1,8	1,5	1,3	1,1
V	10,5	4	8,5	168	219	417	2,0	0,8	0,8	0,8
VI	10,5	6	8,5	219	273	510	2,0	1,1	0,9	0,9
VII	10,5	9	8,5	273	325	697	2,0	1,4	1,2	1,0
VIII	10,5	12	8,5	273	351	794	2,0	1,7	1,4	1,2
IX	12,5	6	10	219	325	778	2,5	0,9	0,9	0,9
X	12,5	9	10	273	351	943	2,5	1,1	1,0	0,9
XI	12,5	12	10	273	377	1017	2,5	1,3	1,1	0,9
XII	15	9	12,5	273	351	1122	2,5	1,2	1,1	1,0
XIII	15	12	12,5	273	377	1427	2,5	1,5	1,3	1,2



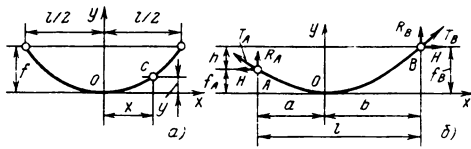


Рис. 58.48. К расчету провисания провода при закреплении точек подвеса:  
*a* – на одной высоте; *b* – на разных уровнях

Вертикальные составляющие опорных реакций

$$R_A = qa; R_B = qb.$$

Натяжения провода в точках подвеса

$$T_A = \sqrt{H^2 + R_A^2}; T_B = \sqrt{H^2 + R_B^2}.$$

Уравнение состояния провода при простой подвеске

$$q_x^2 l^2 / 24H_x^2 - q_1^2 l^2 / 24H_1^2 = \alpha(t_x - t_1) + (H_x - H_1) / ES,$$

где индекс *x* обозначает рассматриваемый режим; индекс 1 соответствует исходному режиму; *q<sub>x</sub>*, *q<sub>1</sub>* – результирующие нагрузки на провод в соответствующих режимах, кН/м; *t<sub>x</sub>*, *t<sub>1</sub>* – температуры режимов, °С; *H<sub>x</sub>*, *H<sub>1</sub>* – натяжения провода в соответствующих режимах, кН;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала провода, °С<sup>-1</sup>; *E* – модуль упругости провода, ГПа; *S* – площадь поперечного сечения провода, мм<sup>2</sup>.

Стрелу провеса провода *f<sub>x</sub>* в пролете *l* при температуре *t<sub>x</sub>* определяют по формуле

$$f_x = q_x l^2 / 8H_x.$$

В пролете критической длины *l<sub>кр</sub>* натяжения провода как в режиме минимальной температуры, так и в режиме наибольшей нагрузки при гололеде равны максимальному натяжению *H<sub>max</sub>*:

$$l_{кр} = H_{max} \sqrt{24\alpha(t_f - t_{min}) / (q_1^2 - g^2)},$$

где *t<sub>f</sub>*, *t<sub>min</sub>* – температуры гололедного режима и режима минимальной температуры соответственно, °С; *q<sub>1</sub>* – результирующая нагрузка гололедного режима, кН/м; *g* – нагрузка от собственного веса провода, кН/м.

Критическую нагрузку *q<sub>кр</sub>* для провода или троса определяют по формуле

$$q_{кр} = \sqrt{\frac{24\alpha H_{max}^2 (t_f - t_{min})}{l^2} + g^2}.$$

При критической нагрузке в режиме гололеда натяжение провода становится максимальным *H<sub>max</sub>* и равным его натяжению при минимальной температуре *t<sub>min</sub>*.

Критическая нагрузка несущего троса цепной подвески определяется по формуле

$$q_{кр} = \frac{Z_f}{Z_{fmin}} \sqrt{\frac{24\alpha_n Z_{fmin}^2 (t_f - t_{min})}{l^2} + W_{fmin}^2} - \frac{g_0 \Phi_f K_f}{T_0},$$

где *Z<sub>f</sub>* = *T<sub>max</sub>* +  $\Phi_f K_f$ ; *Z<sub>fmin</sub>* = *T<sub>max</sub>* +  $\Phi_{fmin} K_{fmin}$ ;  $\alpha_n$  – температурный коэффициент линейного расширения материала несущего троса, °С<sup>-1</sup>;

$$W_{fmin} = g_0 \left( 1 + \frac{\Phi_{fmin} K_{fmin}}{T_0} \right).$$

Обычно принимают  $\Phi_{fmin} = \Phi_f = \Phi_n = \Phi = \text{const}$ .

Для полукompенсированной подвески *K<sub>fmin</sub>* = *K* = *K<sub>f</sub>* = const, тогда *Z<sub>f</sub>* = *Z<sub>fmin</sub>* = *Z<sub>max</sub>* и

$$q_{кр} = \sqrt{\frac{24\alpha_n Z_{max}^2 (t_f - t_{min})}{l^2} + W_{fmin}^2} - \frac{g_0 \Phi K}{T_0},$$

где *g<sub>0</sub>* – нагрузка от собственного веса проводов и тросов цепной подвески; *T<sub>0</sub>* – натяжение несущего троса в беспровесном режиме (при расчете критической нагрузки значением *T<sub>0</sub>*, кН, задаются) (табл. 58.61); *T* и *K* – натяжения продольно-несущего троса и контактного провода; индекс «г» соответствует гололедному режиму; индекс «min» – режиму минимальной температуры; *t<sub>cp</sub>* – среднее значение температуры.

Уравнение состояния цепной контактной подвески с простыми струнами

$$W_x^2 l^2 / 24Z_x^2 - W_1^2 l^2 / 24Z_1^2 = \alpha_n(t_x - t_1) + \frac{T_x - T_1}{E_n S_n},$$

где *W* – приведенная нагрузка, кН/м; *Z* – приведенное натяжение, кН. Для режима  $\chi$

$$W_x = q_x \left( 1 + \frac{g_0}{g_x} \frac{\Phi_x K_x}{T_0} \right); Z_x = T_x + \Phi_x K_x.$$

Уравнение обычно решают, задаваясь значениями *T<sub>x</sub>*, и получают зависимость *t<sub>x</sub>* (*T<sub>x</sub>*).

Для рессорных контактных подвесок принимают  $\Phi = 0$ . При этом допущении натяжения троса определяют, пользуясь уравнением состояния провода простой подвески, в кото-

Таблица 58.61 Ориентировочные значения *T<sub>0</sub>*

Материал несущего троса	Число контактных проводов	<i>T<sub>0</sub></i> , % <i>T<sub>max</sub></i> , при		
		<i>t<sub>0</sub></i> = <i>t<sub>cp</sub></i> – 5 °С	<i>t<sub>0</sub></i> = <i>t<sub>cp</sub></i> – 10 °С	<i>t<sub>0</sub></i> = <i>t<sub>cp</sub></i> – 15 °С
Медь	1	70	75	80
Медь	2	75	80	85
Сталь и биметалл	–	80	83	85

ром принимают  $H = T$ ;  $q$  – результирующая нагрузка на трос от веса контактных проводов, самого троса, струн и дополнительных нагрузок. Натяжение несущего троса  $T_0$  при беспрепятственном расположении контактных проводов находят из уравнения

$$t_0 = [t_1 - W_1^2 l^2 / 24 \alpha_n Z_1^2 + T_1 / \alpha_n E_n S_n] + g_0^2 l^2 / 24 \alpha_n T_0^2 - T_0 / \alpha_n E_n S_n.$$

В качестве исходного режима (индекс 1) используют обычно режим  $t_{min}$ . Задаваясь значениями  $T_0$  (ориентируясь на данные табл. 58.61), методом интерполяции определяют значение натяжения, точно соответствующее предварительно принятой температуре  $t_0$ . Натяжение разгруженного несущего троса  $T_{р.х}$  в зависимости от температуры находят из уравнения

$$t_x = [t_0 - g_0^2 l^2 / 24 \alpha_n T_0^2 + T_0 / \alpha_n E_n S_n] + g_x^2 l^2 / 24 \alpha_n T_{р.х}^2 - T_{р.х} / \alpha_n E_n S_n,$$

где  $g_n$  – нагрузка от собственного веса несущего троса. Конструктивный коэффициент цепной подвески определяют для режима  $x$  из формулы

$$\varphi_x = T_x \frac{(l-2c)^2}{l^2} / \left\{ T_x + \left[ 1 - \frac{(l-2c)^2}{l^2} \right] K_x \right\},$$

где  $c$  – расстояние от опоры до ближайшей струны.

Стрелы провеса продольного несущего троса (рис. 58.49) цепных рессорных подвесок

$$F'_x = \frac{g_x l^2}{8 T_x} - \frac{K_x f_x}{T_x} + \frac{H_x b_x}{T_x};$$

для цепной подвески с простыми струнами

$$H_x b_x / T_x = 0.$$

В беспрепятственном режиме для рессорных подвесок

$$F_0 = \frac{g_0 l^2}{8 T_0} + \frac{H_0 b_0}{T_0};$$

для подвесок с простыми струнами

$$F_0 = g_0 l^2 / 8 T_0.$$

Стрела провеса несущего троса  $F_x$  в плоскости действия результирующей нагрузки  $q_x$

$$F_x = F'_x q_x / g_x,$$

где  $g_x$  – вертикальная нагрузка на несущий трос.

Стрела провеса  $f_x$  контактного провода в пролете длиной  $l$

$$f_x = \frac{(l-2c)^2}{8(T_x + K_x)} (g_x - g_0 T_x / T_0),$$

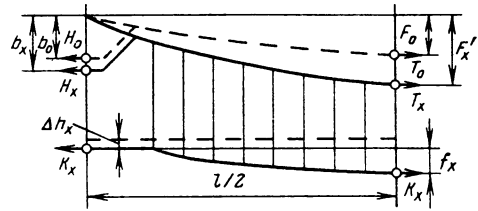


Рис. 58.49. К расчету цепной подвески

где  $c$  – расстояние от оси опоры до ближайшей простой струны, закрепленной на несущем тросе.

Вертикальное перемещение контактного провода под точкой подвеса без учета перемещения, обусловленного изменением угла наклона изолятора, на котором подвешен несущий трос,

$$\Delta h_x = \frac{c(l-c)}{2T_x} (g_x - g_0 T_x / T_0).$$

Расчеты компенсированных подвесок сводятся к расчету стрел провеса проводов и вертикальных перемещений у опор контактных проводов при отсутствии и возникновении дополнительных нагрузок.

Стрела провеса контактного провода цепной компенсированной подвески при гололеде

$$f_r = f + \frac{g_r (l-2c)^2}{8(T+K)},$$

где  $g_r$  – нагрузка от веса гололеда на проводах подвески;  $f$  – стрела провеса при отсутствии дополнительных нагрузок.

Изменение высоты контактного провода у опоры без учета поворота подвесного изолятора

$$\Delta h_1 = \frac{g_r c (l-c)}{2T}.$$

Вертикальная проекция стрелы провеса несущего троса при гололеде с ветром для рессорной подвески

$$F'_r = \frac{(g+g_r) l^2}{8T} - f_1 \frac{K}{T} + b_r \frac{H}{T},$$

где  $b_r = b_0 + \Delta h_1$ .

Стрела провеса в плоскости действия результирующей нагрузки

$$F_r = q_r l^2 / 8T - \frac{q_r (K f_1 - H b_r)}{T(g+g_r)}.$$

При простых струнах в этих формулах  $H = 0$ .

Определение суммарного сечения поперечного несущего троса  $S_n$  или проверку проч-

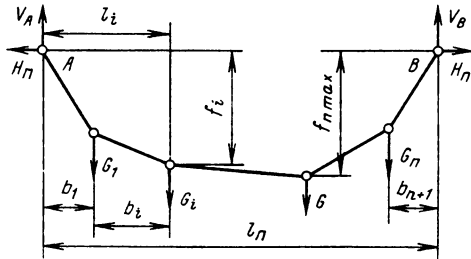


Рис. 58.50. Расчетная схема поперечно-несущего троса

ности заранее выбранного сечения производят по максимальному усилию  $T_{nmax}$ , возникающему в тросе при режиме гололеда:

$$S_n \geq T_{nmax} / [\sigma_p],$$

где  $T_{nmax} \leq n_n T_p / k_3$ ;  $[\sigma_p]$  — допустимое напряжение материала троса на растяжение;  $n_n$  — число проводов в поперечном несущем тросе;  $T_p$  — разрывное усилие для одного провода;  $k_3$  — коэффициент запаса прочности;

$$T_{nmax} = \sqrt{V_{max}^2 + H_n^2},$$

где  $V_{max}$  — наибольшая из вертикальных составляющих опорных реакций  $V_A$  и  $V_B$  (рис. 58.50);  $H_n$  — горизонтальная составляющая натяжения троса.

Вертикальная составляющая натяжения на опоре B

$$V_B = 1/l_n \sum_{i=1}^n G_i l_i;$$

на опоре A

$$V_A = \sum_{i=1}^n G_i - V_B,$$

где  $n$  — полное число нагрузок.

Горизонтальная составляющая натяжения

$$H_n = M_{max} / f_{nmax},$$

где  $M_{max}$  — максимальный момент от вертикальных сил;  $f_{nmax}$  — максимальная стрела провеса троса. принимают  $f_{nmax} = (1/8 \div 1/10) l_n$ .

Монтажная стрела провеса  $f_n$  троса в ненагруженном состоянии

$$f_n = (0,85 \div 0,9) \sqrt{3 (L_n - l_n) l_n / 8},$$

где  $L_n$  — полная длина троса.

### 58.13. ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ

#### Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта

Тяговые подстанции электрифицированных железных дорог представляют собой электроустановки, предназначенные для комплексного электроснабжения подвижного состава переменного и постоянного тока и нетяговых железнодорожных потребителей, таких как локомотивные и вагонные депо, мастерские, освещение, связь, автоблокировка и др. Одновременно тяговые подстанции обычно осуществляют электроснабжение промышленных, коммунальных, сельскохозяйственных и других предприятий, которые условно называют районными потребителями.

Для обеспечения высокой надежности и бесперебойности электроснабжения в типовых схемах питание тяговых подстанций выполняют от двух независимых источников по продольной двухцепной или одноцепной линии электропередач.

Тяговые подстанции различают по следующим признакам: по роду тока (системе электрической тяги) — тяговые подстанции переменного и постоянного токов и стыковые; по схеме подключения к питающей энергосистеме — опорные ТП1, промежуточные транзитные ТП2, промежуточные на ответвлениях (отпаечные) ТП3 и тупиковые ТП4 (рис. 58.51); по значению питающего напряжения — 6, 10, 35, 110, 150 или 220 кВ; по совмещению с другими устройствами электроснабжения — тяговые (несовмещенные), совмещенные с подстанциями энергосистем, совмещенные с дежурными пунктами дистанций контактной сети; по способу управления — телемеханизированные и нетелемеханизированные; по способу обслуживания — с постоянным дежурным персоналом, с дежурством на дому, без дежурного персонала; по конструктивному выполнению — закрытые, с открытыми распределительными устройствами (РУ), комплектные (блочные), передвижные и т. п.

Тяговые подстанции переменного тока получают электроэнергию от энергосистем по линиям электропередач 110 или 220 кВ, а тяговые подстанции постоянного тока — по линиям электропередач 6, 10, 35, 110 или 220 кВ.

Опорные подстанции, представляющие собой питающие центры для промежуточных подстанций, присоединяются к шинам 110–220 кВ районных подстанций РП1 и РП2 не менее чем по трем линиям электропередач (ЛЭП). Промежуточные транзитные подстанции включают в рассечку одной цепи ЛЭП, а отпаечные питаются глухими ответвлениями

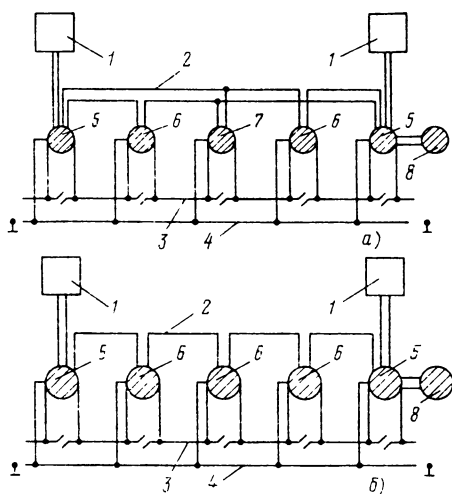


Рис. 58.51. Схема электроснабжения тяговых подстанций железнодорожного транспорта: а — двухцепная ЛЭП, б — одноцепная ЛЭП, 1 — электрическая станция или районная подстанция, 2 — ЛЭП, 3 — контактная сеть, 4 — рельсы; 5 — опорная тяговая подстанция, 6 — промежуточная транзитная тяговая подстанция; 7 — промежуточная тяговая подстанция на ответвлениях, 8 — тупиковая подстанция

от двух цепей ЛЭП. Для обеспечения надежности электроснабжения при питании подстанций по двухцепной воздушной линии с двусторонним питанием на участке между двумя опорными подстанциями допускается подключение: при напряжении 220 кВ — не более пяти тяговых подстанций как на переменном, так и на постоянном токе; при напряжении 110 кВ — не более трех на переменном токе и не более пяти на постоянном токе. При питании подстанций по одноцепной ЛЭП с двусторонним питанием число транзитных подстанций, как правило, не должно быть более трех. Присоединение отпаечных подстанций к одноцепной ЛЭП не допускается. Тупиковые подстанции питаются двумя, а иногда тремя или четырьмя (при напряжении 6, 10 или 35 кВ) радиальными линиями [58.38].

#### Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта на переменном токе

Тяговая подстанция состоит из следующих основных элементов: внешнего электроснабжения 110 или 220 кВ, распределительного устройства РУ 110–220 кВ, тяговых блоков 27,5 кВ, включающих сборные шины, тяговые трансформаторы, присоединения контактной сети с запасным выключателем, тран-

сформаторы собственных нужд, защиту. Для подключения тяговых подстанций к линиям электропередач разработаны типовые схемы главных электрических соединений РУ 110–220 кВ, унифицированные для подстанций переменного и постоянного тока.

РУ 110/220 кВ опорной тяговой подстанции выполнено с одинарной, секционированной масляным выключателем и обходной системами шин (рис. 58.52). Структурная схема тягового блока 27,5 кВ показана на рис. 58.53. Сборные шины 27,5 кВ состоят из двух секций с секционным разъединителем 18. На шины подается напряжение фаз А и В. Фаза С подключается наглухо к ходовым рельсам, обычно к рельсам подъездного пути подстанции. Фазы тяговой обмотки трансформаторов 1 подключаются к сборным шинам через разъединители 2 и 5, масляный выключатель 3.

Линии контактной сети подключаются к сборным шинам 27,5 кВ через разъединители 6 и 11, масляные выключатели 7, 12, линейные 9, 13 и обходные 10, 14 разъединители. Для подключения измерительных приборов и устройств релейной защиты служат трансформаторы тока 4 и 8. Имеется запасная шина 19, на которую напряжение можно подать от одной из рабочих фаз А и В через запасной выключатель 15. Запасной выключатель служит для замены любого фидерного выключателя в случае аварии или ремонта.

В соответствии с принятой схемой фазировки питание участков контактной сети происходит от фидеров фазы А или В, чтобы обеспечить их чередование вдоль железной дороги. Фидеры «два провода — рельс» (ДПР) служат для питания трехфазным напряжением нетяговых потребителей, расположенных вдоль железной дороги. При этом фаза С получает питание от ходовых рельсов. Трансформаторы собственных нужд присоединяются к шинам фаз А и В и к контуру заземления (фаза С). Однофазные трансформаторы напряжения ТН 17 и разрядники присоединяются к фазам А, В и к контуру заземления.

При однофазной тяговой нагрузке неизбежна несимметрия нагрузок фаз питающей трехфазной системы внешнего электроснабжения.

Для исключения неравномерности загрузки фаз применяется схема присоединения тяговых подстанций к ЛЭП, при которой первичные обмотки трансформаторов на подстанциях 1–6 включены в звезду, а вторичные — в треугольник с поворотом фаз (рис. 58.54). Поворот фаз обеспечивается чередованием подключения трансформаторов к фазам ЛЭП.

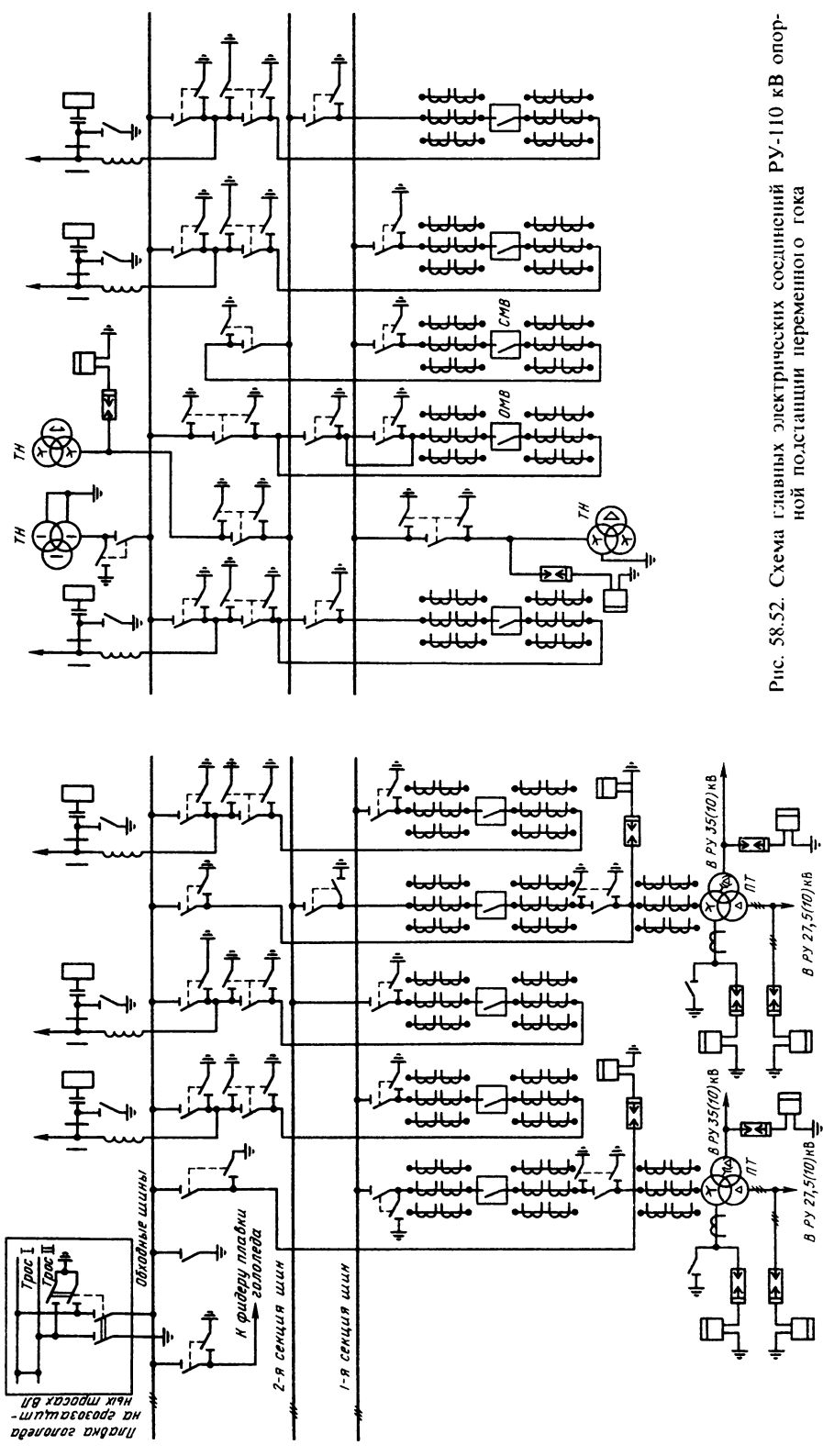


Рис. 58.52. Схема главных электрических соединений РУ-110 кВ опорной подстанции переменного тока

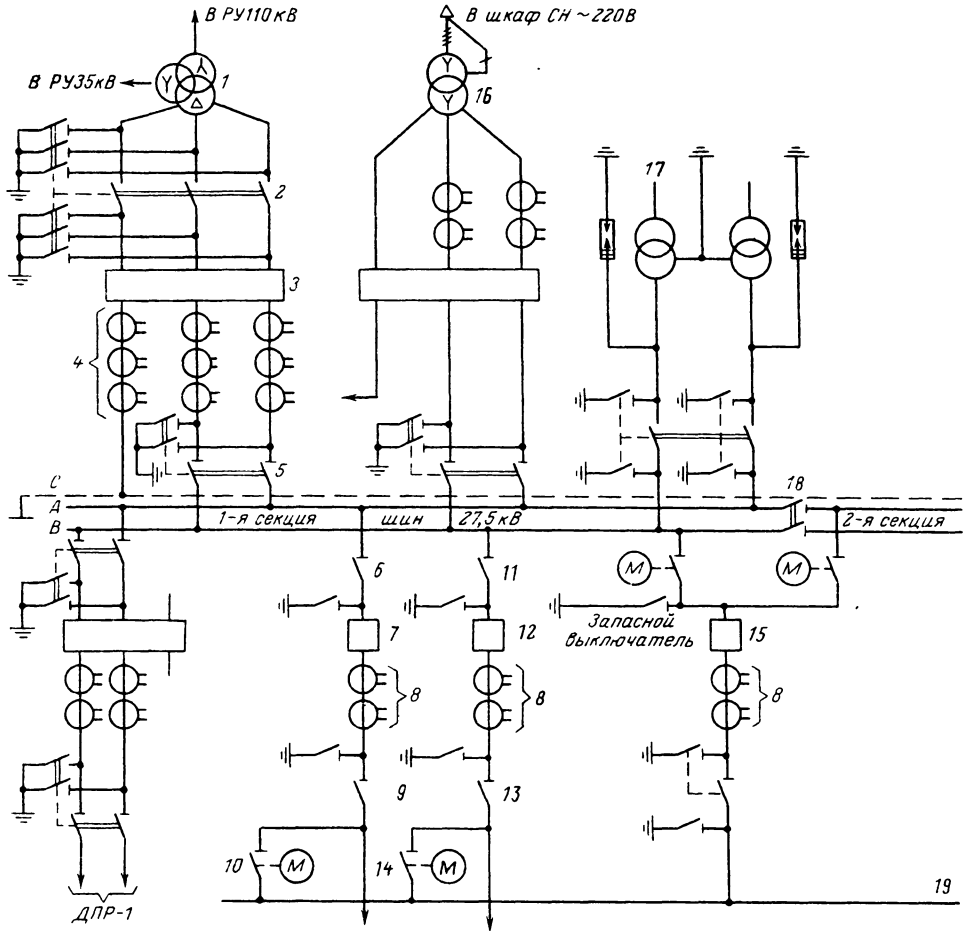


Рис. 58.53. Структурная схема тягового блока 27,5 кВ

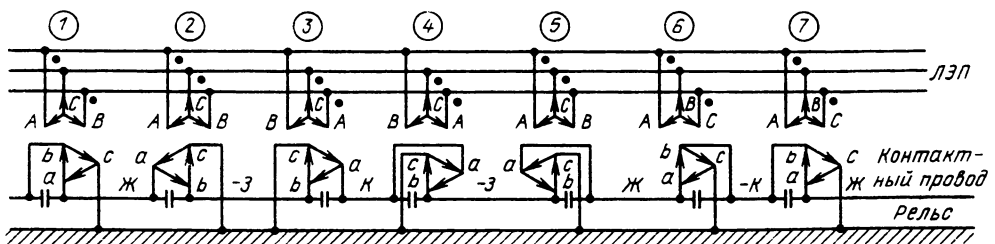


Рис. 58.54. Схемы включения обмоток тяговых трансформаторов в ЛЭП

Конструкция тяговой подстанции состоит из открытой части с распределительным устройством 110–220 кВ и тяговыми трансформаторами, а также из закрытой части. Закрытая часть подстанции – одноэтажное здание, в котором размещаются аккумуляторная батарея, щиты собственных нужд постоянного и переменного тока, щит отопления и вентиляции, устройства автоматики и телемеханики, дизель-генератор (резервное питание) и мастерская.

**Компенсация реактивной мощности.** Электроподвижной состав переменного тока является потребителем реактивной мощности. Реактивные токи приводят к увеличению потерь в линиях электропередачи, трансформаторах, контактных сетях и таким образом снижают напряжение на токоприемниках подвижного состава. Этот недостаток устраняется применением специальных установок компенсации реактивной мощности, устанавливаемых на тяговых подстанциях или на постах секционирования.

Установка поперечной компенсации обеспечивает коэффициент мощности не менее 0,93. Схема такой установки показана на рис. 58.55.

Для устранения резонансных явлений последовательно с конденсаторной батареей *КБ* включается реактор *Р*. Цепь настраивается на 150 Гц. Контроль напряжения на *КБ* осуществляется при помощи трансформатора напряжения *ТН*. Для устранения перенапряжения при отключении *КБ* масляным выключателем перед началом операции *КБ* шунтируют резистором *Р1*. Второй резистор *Р2* через разрядники шунтирует реактор.

Устройства продольной компенсации (рис. 58.56) не только компенсируют реактив-

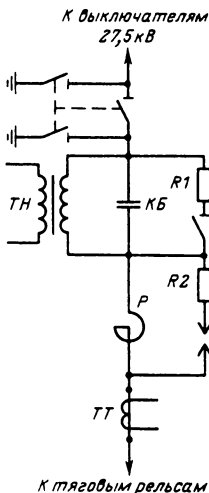


Рис. 58.55. Схема устройства поперечной компенсации реактивной мощности

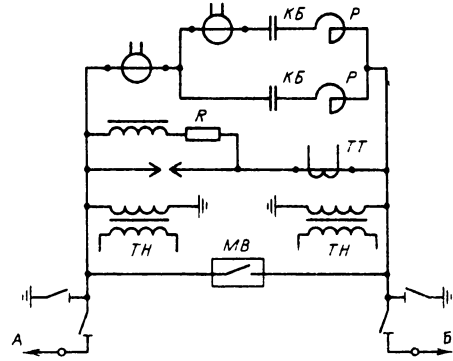


Рис. 58.56. Схема устройства продольной компенсации реактивной мощности

ную мощность, но и повышают уровень напряжения в контактной сети и уменьшают несимметрию токов. Устройство включают в разрыв контактного провода между точками *А* и *Б* (обычно в месте секционирования контактной сети). Защита от перенапряжения осуществляется разрядником, после срабатывания которого при помощи трансформаторов тока *ТТ* включается масляный выключатель *МВ*.

Технические данные трехфазных и однофазных трансформаторов приведены в табл. 58.62 и 58.63.

В обозначениях трансформаторов приняты следующие буквы: *Т* – в начале – трансформатор трехфазный, в середине – трехобмоточный; *О* – однофазный; *Д* – принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла; *Ц* – принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла; *Г* – грозоупорный; *Э* и *Ж* – электротяговый железнодорожного транспорта; *Н* – с устройством регулирования напряжения под нагрузкой; *Р* – для ртутных выпрямителей (старый тип); *У* – с уравнивающим реактором.

### Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта на постоянном токе

Тяговые подстанции постоянного тока состоят из следующих элементов: распределительных устройств (*РУ*) внешнего электроснабжения с понижающими трансформаторами, преобразовательного агрегата, распределительного устройства постоянного тока, системы собственных нужд, устройств защиты и управления. Каждая тяговая подстанция имеет свой контур заземления.

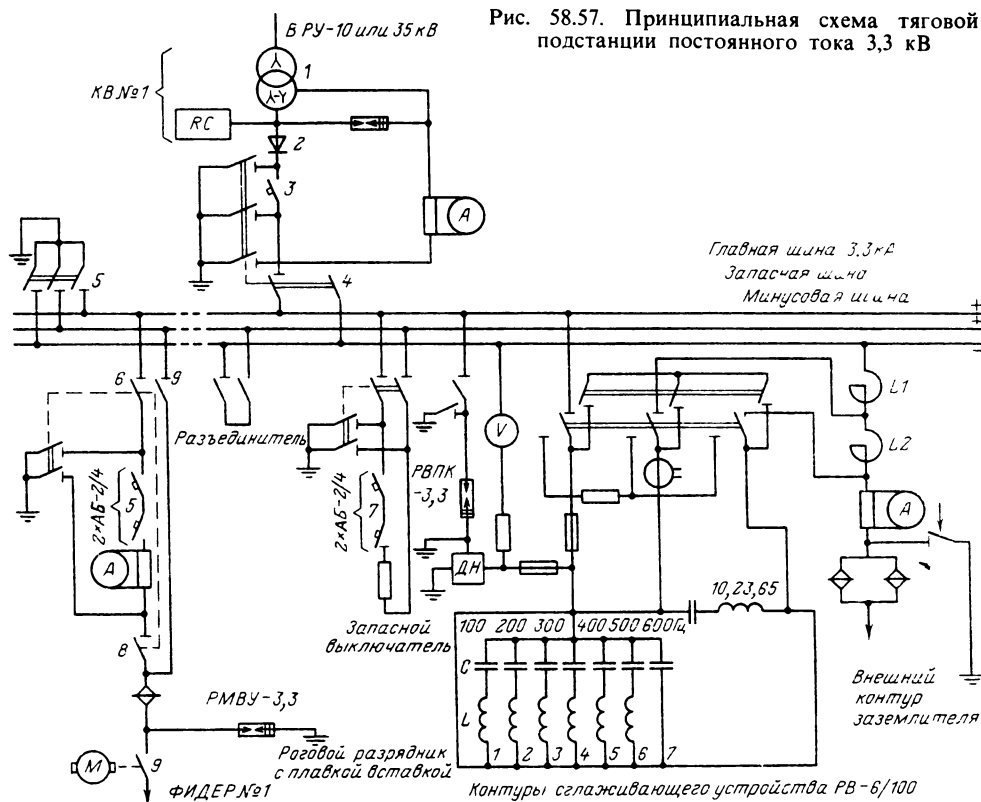


Рис. 58.57. Принципиальная схема тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ

РУ 35, 110, 220 кВ тяговых подстанций постоянного тока имеют типовые схемы главных электрических соединений. От РУ 35 кВ с первичным напряжением 35 кВ питаются преобразовательные агрегаты, трансформаторы собственных нужд и трансформаторы подогрева. В отдельных случаях от РУ 35 кВ могут питаться смежные подстанции.

РУ 10 кВ с первичным напряжением 110, 220, 10 кВ предназначено для питания преобразовательных агрегатов, трансформаторов собственных нужд, трансформаторов подогрева и линий, питающих районные нагрузки и фидеры плавки гололеда на ЛЭП 110–220 кВ.

Принципиальная схема тяговой подстанции постоянного тока представлена на рис. 58.57.

Преобразовательный агрегат состоит из преобразовательного трансформатора 1, кремниевого выпрямителя 2, катодного быстродействующего выключателя 3 и шинных разъединителей 4, заблокированных с заземляющими ножами. На переменном токе агрегат оборуудется разрядником от коммутационных перенапряжений с цепочками RC. Для обеспе-

чения техники безопасности при ремонтах шины 3,3 кВ заземляются при помощи разъединителя 5.

Для обеспечения тяговых нагрузок на подстанции применяют трехобмоточные трансформаторы. Первичная обмотка такого трансформатора присоединяется к сети 110 кВ, одна вторичная обмотка напряжением 10 кВ питает преобразовательные агрегаты, а вторая напряжением 35 кВ – нетяговые потребители. При первичном напряжении 35 кВ преобразовательные агрегаты присоединяются к напряжению 35 кВ. Трехобмоточный трансформатор на рис. 58.57 не показан.

На подстанции имеются три сборные шины постоянного тока 3,3 кВ – плюсовые (главная и запасная) и минусовая. Реакторы L1, L2, включенные в цепь обратной шины, вместе с контурами сглаживающих устройств служат для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. На схеме показано одно из присоединений, питающее контактную сеть. В цепи фидера имеются два быстродействующих выключателя 5 и шинные разъединители 6 и 8, заблокированные с заземляющими ножами. При помощи разъединителей 9 питание



Таблица 58 62. Технические данные однофазных и трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Тип	Номинальная мощность, кВ	Напряжение обмоток, кВ		Потери, кВт		Ток XX, %	Схема и группа соединений
		ВН	НН	XX	КЗ		
ОМ-10/27,5	10	27,5	0,23	0,16	0,3	15	1 1-0
ТМ-25/27,5	25	27,5	0,23,0,4	0,25	0,65	6	Y/Y-0
ТМ-100/35	100	25	0,23/0,4	0,9	2,4	8	Y/Y-0
ТМ-160/35	180	27	0,23/0,4	1,5	4,1	8	Y/Y-0
ТМ-320/35	320	27	0,23/0,4	2,3	6,2	7,5	Y/Y-0
ТМ-560/35	560	25	6,3	3,35	9,4	6,5	Y/Δ-11
ТМ-1800/35	1800	25	6,3	8,3	24	5	То же
ТСМ-60/25	60	25	0,38	0,55	1,2	9	Y/Y-0

Таблица 58 63. Технические данные трехфазных трехобмоточных трансформаторов

Тип	Номинальная мощность, МВ·А	Напряжение обмоток, кВ			Потери, кВт		Напряжение КЗ, %			Ток XX, %	Схема и группа соединения
		ВН	СН	НН	XX	КЗ	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН		
ТДТН-20000, 110Б	20	115	27,5 38,5	6,6 11	45	127	10,5	17,0	6	0,8	Y/Δ/Δ-11-11
ТДТН-25000 110-66	25	115	27,5 11	6,6 11	45	145	10,5	17	6 6	1	Y/Δ/Δ-11-11
ТДТНЭ-40000/110	40	115	27,5 38,5	6,6 11	63	200	10,5 10,5	17 17		0,9	Y/Δ/Δ-11-11
ТДТНЭ-25000, 150-70	25	158	27,5 38,5	6,6 11	34	145	17,0 18	10,5 10,5	6	0,9	Y Y Δ-0-11 Y/Δ/Δ-11-11
ТДТНЭ-40000, 220-70У1	40	230	27,5 38,5 27,5	6,6 11 6,6	66	240	10,5 12,5 22	18 22 12,5	9,5 9,5 9,5	1,1	Y/Δ/Δ-11-11 Y/Δ/Δ-11-11 Y/Δ/Δ-0-11 Y Δ, Δ-11-11

Таблица 58 64. Технические данные преобразовательных трансформаторов

Тип	Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ·А	Номинальный ток преобразователя, А	Номинальное напряжение вентиляционной обмотки, кВ	Номинальный ток вентиляционной обмотки, А	Ток XX, А	Потери, кВт		Схема соединений обмоток	
							XX	КЗ	сетевой	вентиляционной
УТМРУ-6300/35Ж	6,3 10,5 35	3700	1000	3,02	289	— 4	— 23	— 34	Звезда или треугольник	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТМПУ-6300/35ЖУ1	6 10 35	4640	1250	3,02	361	— 1,3	10	— 41	То же	То же
ТДПУ-20000 35Ж	35	11 317 (13 351)	3000	3,08 (3,634)	876	1,5 (2)	22 (34)	109 (115)	» »	» »
ТДП-12500/10ЖУ1	6 10	11 800	3200	1,52	2610	1,1	16	72,5	Треугольник или звезда	Треугольник
ТМРУ-16000/10Ж	6 10	11 840	3200	3,02	924	3,18	33	79	То же	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТМРУ-16000/10-1	6 10	11 100	3000	3,02	867	3,4	48	85	То же	То же
ТМПУ-16000 10ЖУ1	6 10	11 840	3200	3,02	924	1,2	24	73	» »	» »
ТДП-16000/10ЖУ1	10,5	11 600 (13 300)	3200	—	2620	0,47	17,5	74	Звезда или треугольник	Треугольник

Таблица 58.65 Технические данные инверторных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток сетевой обмотки, А, в режиме		Номинальная первичная мощность, кВ·А	Номинальное напряжение преобразователя, А	Номинальный ток преобразователя, А	Ток ХХ, А	Потери, кВт		Схема соединений обмоток	
		выпрямительном	инверторном					ХХ	КЗ	сетевой	вентильной
ТДПУ-20000, 10Ж	10,5	653 (783)	— (490)	11 900 (14 300)	3,25 (3,76)	3200	1,68 (2,27)	17,7 (28,3)	99,0 (106)	Треугольник или звезда	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТДРУ-2000/10И	6,3 10,5	1085 651	845 508	11 830 9240	3,3 3,7	3200 2000	2,7 3,5	29,0	101,0 53,0	То же	То же
ТДП-12500.10ИУ1	6,3 10	1086 687	855 540	11 870 3330	3,31	3200 2000	0,8	15,0	77	Треугольник	Звезда
ТМП-6300, 35ИУ1	6 10	449 268	—	4660 4660	3,3 3,3	1250 1000	1,2	9,3 —	36,0 31,6	»	»

Примечания. 1 У трансформаторов с инверторным режимом в числителе — параметры выпрямителя, в знаменателе — инвертора 2 В инверторном режиме напряжение вентильных обмоток повышается на 25% за счет ответвлений. 3 В скобках приведены цифры для режима с выведенной регулировочной обмоткой

Таблица 58.66 Технические данные основных типов полупроводниковых выпрямителей

Тип	Максимально допустимое выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Тип/количество диодов	Схема выпрямления	Охлаждение	Установка
УВКЭ-1	4000	3000 (4500)	ВК-2-200-8/ 5 × 24 × 6-720	Две обратные звезды с уравнительным реактором	Воздушное принудительное	Внутренняя
ПВЭ-3У2	4000	3000 (4500)	ВЛ-200-8Б/ 5 × 18 × 6-540	То же	То же	»
ВКМБ-1	4000	3000 (4500)	ВК-200-8/ 5 × 23 × 6-690	»	Масляное принудительное	Наружная
ПВКЕ-2	4000	3000 (4500)	ВЛ-200-10/ 5 × 14 × 6-420	Две обратные звезды с уравнительным реактором или мостовая	Воздушное естественное	»
ПВК-6	8000	1500	ВЛ-200-12/ 5 × 12 × 6-360	Мостовая	То же	Внутренняя

Примечание В скобках дан номинальный ток преобразователя с временем срабатывания защиты 0,75 с

Таблица 58.67. Технические данные полупроводниковых выпрямительно-инверторных и инверторных преобразователей

Тип и режим	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, кА	Допустимые перегрузки, % в течение			Вентили		Схема выпрямления
			15 мин	2 мин	10 с	Тип	Количество	
ВИПЭ-1 выпрямительный инверторный	3,3	2	75	—	—	ТЛ-150-6	6 × 6 × 6-216	Две обратные звезды с уравнительным реактором
	3,3–3,6	2	75	—	—	ТЛ-150-8	6 × 9 × 6-324	
ВИПЭ-2УЗ выпрямительный	3,3	2,5	25	50	100	ВЛ-2-200-8	10 × 9 × 6-540	Мостовая
	3,3–3,8	1,6	25	50	100	ТД-320-12	6 × 10 × 6-360	
ШПИ-3	3,3–4,0	2	75	—	—	ТЛ-160-8	(6 × 18) × 2 × 6-1296	Две обратные звезды с уравнительным реактором или мостовая

любого из присоединений можно переключить на запасную шину через запасной выключатель 7. Для защиты от перенапряжений, входящих с контактной сети, имеется разрядник РМВУ-3,3. Защита оборудования на напряжении 3,3 кА от коммутационных перенапряжений осуществляется разрядником РВПК-3,3.

В здании подстанции устанавливаются аккумуляторная батарея, резервный дизель-генератор, сглаживающие устройства, кремниевые выпрямители и распределительное постоянное тока 3,3 кВ. В отдельном помещении размещаются щиты управления, автоматика и телемеханика.

*Преобразовательные трансформаторы.* Технические данные преобразовательных трансформаторов приведены в табл. 58.64, инверторных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения — в табл. 58.65, полупроводниковых выпрямителей — в табл. 58.66. Номинальное выпрямленное напряжение этих преобразователей  $U_{dном} = 3,3$  кВ, максимально допустимое  $U_d = 4,0$  кВ. Номинальный выпрямленный ток  $I_{dном} = 3$  кА. При защите с временем срабатывания  $t = 0,75$  с преобразователь допускает  $I_d = 4,5$  кА. Допустимые перегрузки преобразователя: 25% — 15 мин; 50% — 2 мин; 100% — 10 с. Для защиты вентиляей от внутренних перенапряжений применяются RC-цепочки. Защита от перенапряжения, возникающего на вентиляющей обмотке, осуществляется разрядниками.

Электрические характеристики полупроводниковых выпрямительно-инверторных и инверторных преобразователей приведены в табл. 58.67 [58.41].

### Тяговые подстанции метрополитена

Подстанции метрополитена классифицируются по способу размещения — подземные и наземные, по месту расположения на трассе — основные (у станций), вестибюльные (возле машинных залов эскалаторов), туннельные (на перегонах) и деповские (при депо). По назначению подстанции бывают тяговыми, тягово-понижительными (совмещенными) и понижительными. На двух последних осуществляются питание силовых сетей и освещение пассажирских станций, питание устройств СЦБ. Номинальное выпрямленное напряжение на шинах постоянного тока 825 В.

Первичное питание подстанций метрополитена осуществляется с подстанций или распределительных пунктов энергосистем напряжением 10 кВ по кабелям. Варианты схем первичного питания приведены на рис. 58.58, структурная схема тягово-совмещенной подстанции — на рис. 58.59.

Преобразовательные агрегаты метрополитена комплектуются из преобразовательных трансформаторов и выпрямителей. Электрические данные преобразовательных трансформаторов и преобразователей приведены в табл. 58.68.

Выпрямители комплектуются из вентиляных блоков, в которых установлены 18 вентиляей В200 или ВЛ200 с силуминовыми охладителями М6 или М7 с принудительным воздушным охлаждением. В каждой фазе применяются шесть параллельных цепей вентиляей по четыре или шесть последовательно соединенных вентиляей.

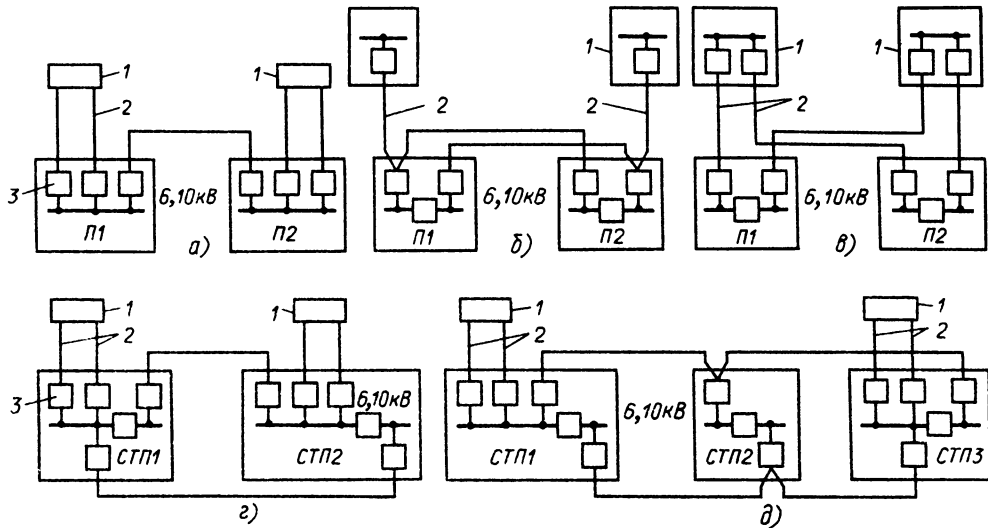


Рис. 58.58. Принципиальные схемы электроснабжения тяговых подстанций метрополитена:  
 — двух тяговых подстанций по двум линиям и перемычке; б — по двум линиям и двум перемычкам;  
 — по четырем радиальным линиям; г — двух совмещенных тяговых подстанций; д — трех совмещенных  
 тяговых подстанций; 1 — распределительный пункт; 2 — кабели; 3 — выключатели

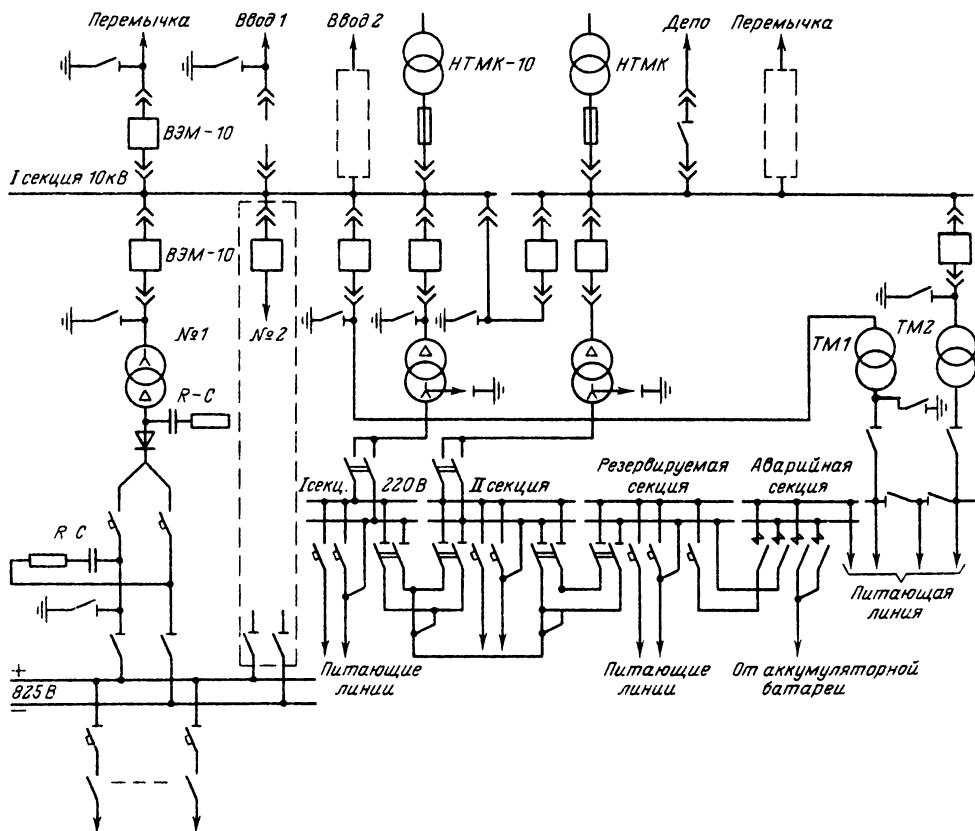


Рис. 58.59. Структурная схема совмещенной тягово-понижительной подстанции

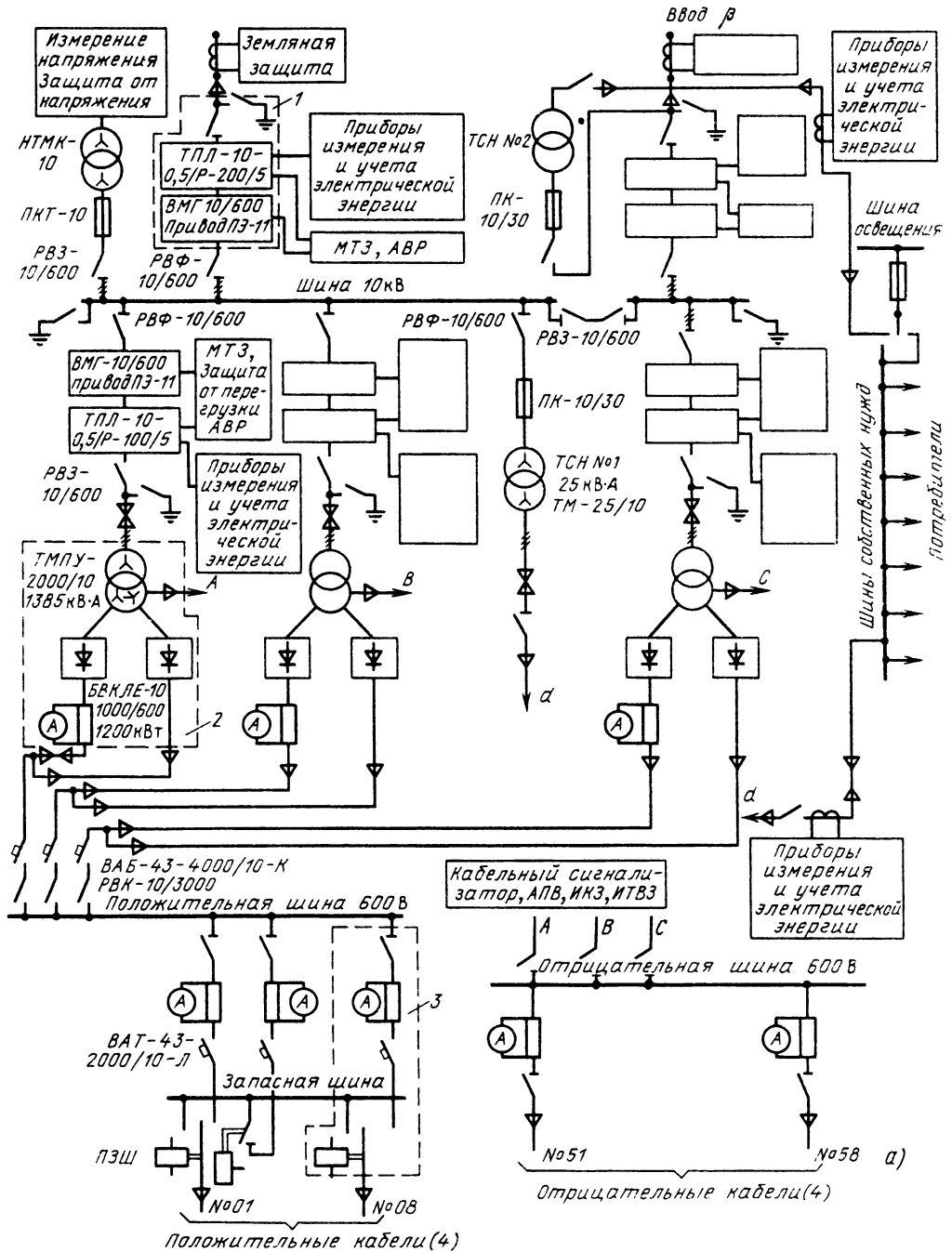


Рис. 58.60. Структурные электрические схемы трехагрегатной (а) и одноагрегатной (б) тяговых подстанций

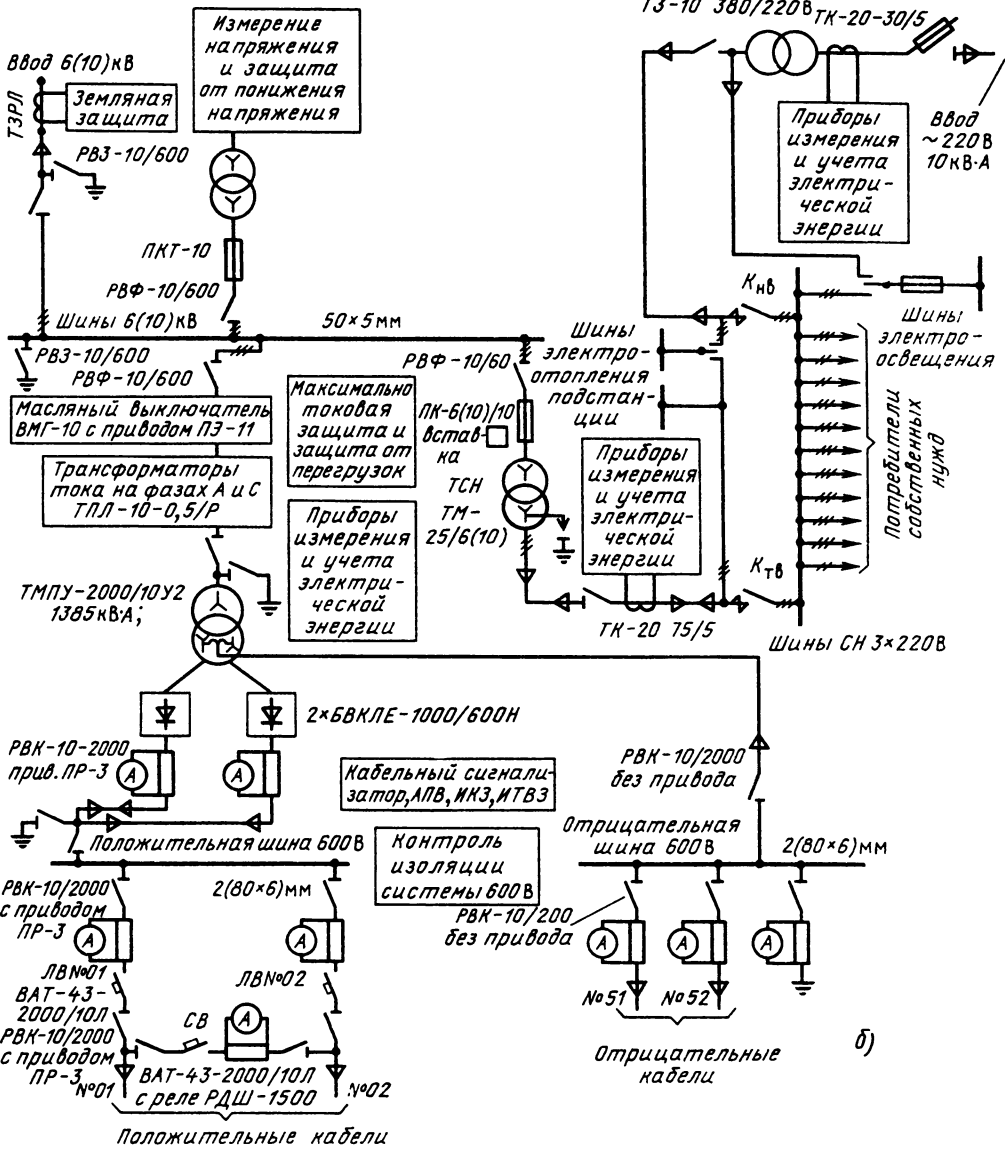


Рис. 58.60. Продолжение

На подстанциях метрополитена получают применение выпрямители УВКМ с воздушным естественным охлаждением. В этих выпрямителях применен специальный охладитель, разработанный в ЦНИИ МПС. Находят применение также сухие преобразовательные трансформаторы типа ТСЗП-1600/10 [58.42]. Подстанции имеют следующее конструктивное выполнение. Наземные подстанции выполняются двухэтажными. На первом этаже размещены

трансформаторы, РУ 10 кВ и 825 В, на втором этаже – выпрямители, щиты СН, аккумуляторная батарея.

Подземные подстанции могут быть мелкого заложения, сооружаемые открытым способом и имеющие прямоугольное сечение, и подстанции глубокого заложения круглого сечения, на этих подстанциях основной вход на подстанцию осуществляется со стороны пассажирской станции. Запасный выход выполняется в туннель.

Таблица 58.68. Технические данные преобразовательных трансформаторов метрополитена

Тип трансформатора	Тип выпрямителя	Номинальная мощность, кВт·А	Напряжение вентильной обмотки, В	Потери КЗ, кВт	Напряжение КЗ, %	Схема вентильной обмотки
УТМРУ-3500 35	УВКМ-1	2360	770	28,5–33,5	8–9,6	Две обратные звезды с уравнивающим реактором
ТМП-3200/10	УВКМ-5	3065	679	25,5–32	9,5–10,5	Мостовая
ТСЗП-1600/10	УВКМ-6	1515	670	15,5–16,5	8,5–9,5	»
ТМНПВ-5000/10	УВКМ-2	2850	668	28,3–30	9,6	12-фазная мостовая

Таблица 58.69. Технические данные преобразовательных трансформаторов

Параметр	Тип трансформатора	
	ТМПУ-1000	ТМПУ-2000
Номинальная мощность, кВт·А	692	1385
Ток вентильной обмотки, А	289	577
Напряжение вентильной обмотки, В	565	565
Напряжение короткого замыкания, %	5,6	6,60
Нагрузочные потери, кВт	10	16,9
Потери холостого хода, кВт	3,3	3,88
Масса, т.		
активной части	2,1	3,20
масла	1,1	2,05
полная	4,1	6,90

### Тяговые подстанции городского электротранспорта

Тяговые подстанции классифицируются: по назначению – трамвайные, троллейбусные и смешанные; по системе электроснабжения – централизованного электроснабжения (многоагрегатные подстанции) и децентрализованного электроснабжения (одноагрегатные подстанции).

Номинальное выпрямленное напряжение на шина постоянного тока 600 В. Упрощенные структурные схемы показаны на рис. 58.60. Через вводы высокого напряжения электроэнергия поступает в распределительное устройство высокого напряжения (1), затем в преобразовательные агрегаты (2) (преобразовательный трансформатор и выпрямительную секцию) и через распределительное устройство постоянного тока (3), питающие и отсасывающие кабели (4) в тяговую сеть для питания подвижного состава.

Отличительной особенностью одноагрегатной подстанции децентрализованного

электроснабжения (рис. 58.60, б) является отсутствие резервного оборудования. Одноагрегатные подстанции располагаются вдоль трассы движения и осуществляют двустороннее питание контактной сети. При выходе из строя любой из промежуточных подстанций включается секционный выключатель СВ и питание контактной сети осуществляется от двух смежных подстанций. Отсутствие резервного оборудования на подстанции упрощает ее конструкцию и удешевляет стоимость.

Технические данные преобразовательных трансформаторов агрегатов тяговых подстанций городского электрического транспорта представлены в табл. 58.69.

Для систем электроснабжения городского транспорта ведутся разработки преобразовательного агрегата с сухим трансформатором и управляемой преобразовательной секцией для тяговых подстанций. Внедрение такого преобразовательного агрегата позволит отказаться от катодных и линейных выключателей, а отключение линейных токов осуществляется тиристорами выпрямителя [58.43, 58.44].

Структурная схема одноагрегатной подстанции при этом незначительно отличается от предыдущего варианта (на трех и более агрегатных подстанциях питание подвижного состава также осуществляется по принципу агрегат – линия, а резервирование при помощи резервного агрегата (рис. 58.61, а, б).

Число тиристорных выпрямителей, подключаемых к одному преобразовательному трансформатору, зависит от нагрузки на каждой линии, причем каждый из выпрямителей рассчитан на максимально возможный ток КЗ в линии 600 В.

В табл. 58.70 приводятся данные преобразовательных трансформаторов с воздушным естественным охлаждением. Преобразовательные секции типа ТПЕ-800 и ТПЕ-1250 имеют в каждой фазе по две или три параллельные цепочки тиристоров Т-1000. Выпрямитель рассчитан на естественное охлаждение и имеет сле-

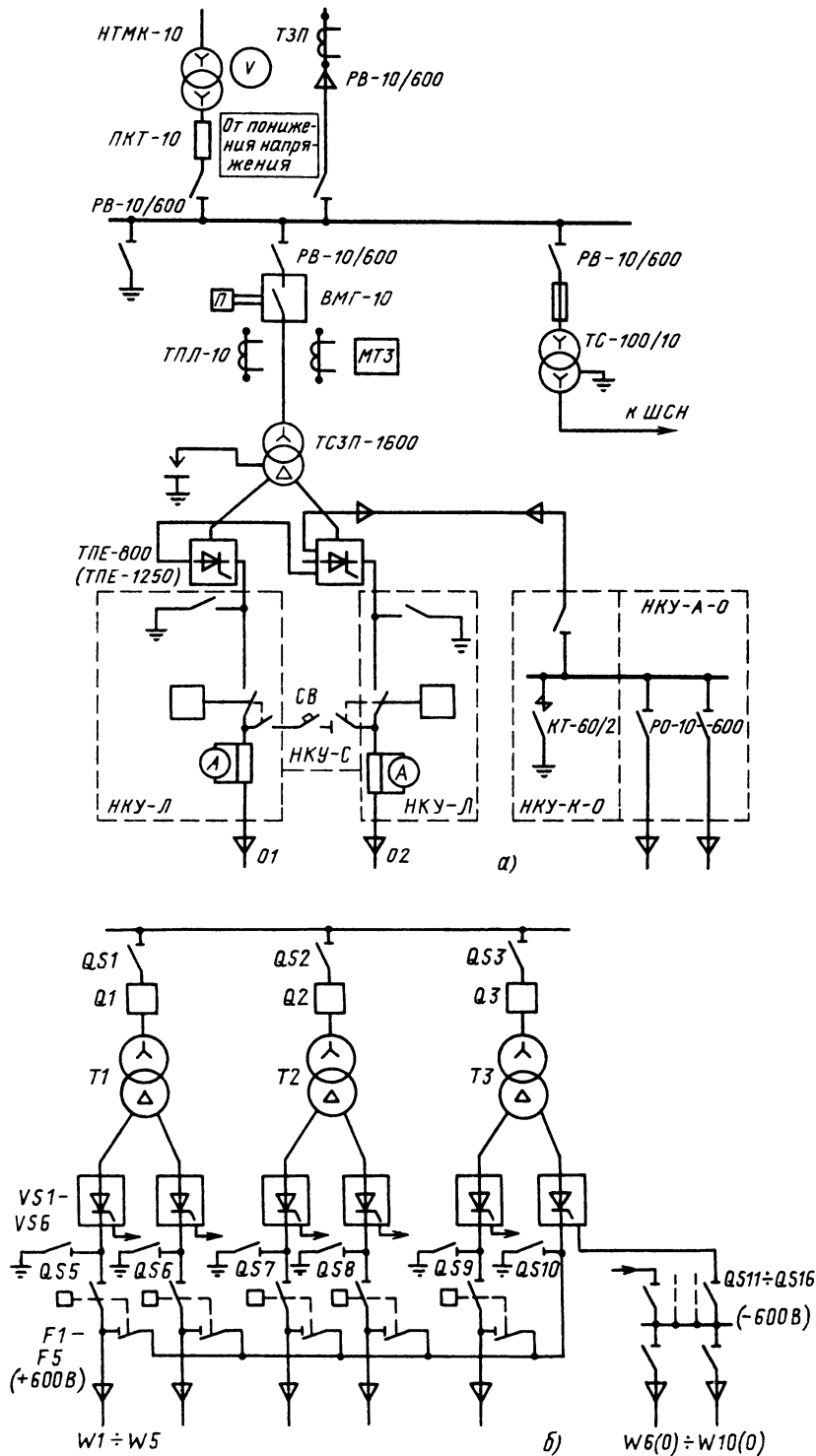


Рис. 58.61. Структурные электрические схемы одноагрегатной (а) и трехагрегатной (б) тяговых подстанций с управляемым преобразовательным агрегатом



Таблица 58 70. Электрические характеристики преобразовательных трансформаторов

Тип	Типовая мощность, кВ·А	Сетевая обмотка		Вентильная обмотка		Напряжение КЗ, %	Потери в трансформаторе, Вт		Ток XX, %	Преобразователь	
		Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		XX	КЗ		Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А
ТСЗП-630/10ГТ-УЗ*	630	10	533	471	653	60	5100	2000	1,8	600	800
ТСЗП-1000/10ГТ-УЗ	1000	10	830	471	1020	6,3	6300	2300	1,2	600	1250
ТСЗП-1600/10УЗ**	1600	10	1612	471	1635	5,9	14000	3350	1,0	600	2000

\* Схемы соединения обмоток Y/Δ-11.

\*\* Предназначен для питания тиристорных преобразователей электроприводов постоянного тока.

дующие виды защит: от пробоя, от обрыва в цепи фазы, от внешнего КЗ, от потери управляемости тиристора. Вся система защит преобразовательного агрегата, как и система управления и автоматики на тяговой подстанции, выполнена на бесконтактных элементах с применением аналоговых и цифровых интегральных микросхем.

Система собственных нужд тяговой подстанции состоит из трансформатора, сборных шин 220 В и потребителей. Резервирование осуществляется либо от второго трансформатора, либо от городского ввода 220 В. Система защиты, автоматики, сигнализации и управления осуществляется на переменном токе.

#### Общие положения по проектированию тяговых подстанций \*

Выбор аппаратов и расчеты для выбора оборудования на стороне переменного тока производятся по правилам и рекомендациям, приведенным в разд. 36. Все элементы РУ переменного тока рассчитываются на ток и напряжение номинального режима и проверяются на устойчивость при режимах внутреннего и внешнего КЗ.

Технические данные аппаратов переменного тока общего назначения, применяемых на тяговых подстанциях, приведены в разд. 27–30. Для тяговых подстанций однофазного тока выпускается специальное оборудование.

Расчет мощности тяговых трансформаторов подстанций переменного тока определяется по формулам, приведенным в § 58.11.

\* Подготовлено канд техн. наук, доц Н. А. Загайновым для шестого издания «Электротехнического справочника».

Быстродействующие выключатели постоянного тока выбираются по номинальному току и напряжению и проверяются по отключающей способности на токи КЗ

$$I_{kmax} = \frac{1,1 I_{dном} N_a}{\frac{u_k}{100} + \frac{\sum S_{п,а}}{S_k}} k,$$

где  $I_{dном}$  — номинальный ток одного выпрямителя, А;  $N_a$  — число параллельно работающих агрегатов;  $u_k$  — напряжение КЗ трансформатора, %;  $\sum S_{п,а}$  — мощность всех преобразовательных агрегатов подстанций, МВ·А;  $S_k$  — мощность КЗ на шинах 10, 35 или 110 кВ, МВ·А;  $k = 0,6 \div 0,7$  — коэффициент, учитывающий токоограничивающий эффект выключателя.

Замыкание на землю в РУ выпрямленного тока является для рельсового транспорта по существу КЗ через переходное сопротивление. Минимальный установившийся ток замыкания на землю определяется формулой

$$I_{kmin} = \frac{U_{dном} (1 + k_1 + k_2) (1 - p) - U_d - \Delta U_a - I_{dном} N_{amin} (R_{п/ст} + R_o + R_p)}{R_{п/ст} + R_3 + R_o + R_p + 1/R_{с,о} \sqrt{r_{п} + r_{пр}}}$$

Максимальный установившийся ток замыкания на землю, А, определяется формулой

$$I_{3max} = \frac{U_{dном} (1 + k_1 + k_2) (1 + p) - \Delta U_a}{\sqrt{\left( R_3 + R_o + R_p + \frac{3}{8} r + \frac{1}{k_{с,о}} \sqrt{r_{п} + r_{пр}} \right)^2 + \left( \frac{3}{8} x \right)^2}}$$

Ток КЗ за выпрямителем, или максимальный возможный ток КЗ, равен

для нулевой схемы

$$I'_{кmax} = \frac{2,3U_{d0} - \Delta U_{amax}}{\sqrt{r'^2 + x'^2}};$$

для трехфазной мостовой схемы

$$I''_{кmax} = \frac{1,15U_{d0} - 2\Delta U_{amax}}{\sqrt{r''^2 + x''^2}}.$$

В приведенных выражениях установившиеся значения тока КЗ и тока замыкания на землю приняты следующие обозначения:  $\Delta U_a$  и  $\Delta U_{amax}$  — номинальное и максимальное падение напряжения в вентильных плечах выпрямителя (разд. 32);  $U_{d0} = U_{dном}(1 + k_1 + k_2)$  — напряжение холостого хода;  $p$  — отклонение напряжения первичной сети в долях номинального (можно принять в среднем  $p = 0,05$ );  $U_d$  — потеря напряжения в дуге в месте КЗ или в месте замыкания на землю (можно принять  $U_d = 200$  В);  $R_p$  — сопротивление главного реактора фильтра, Ом;  $r_p$  — удельное сопротивление ходового рельса, Ом/км (табл. 58.43);  $k_{c,o}$  — коэффициент, зависящий от схемы отсасывания (при одностороннем отсасывании  $k_{c,o} = 1$ , при  $n$  лучах отсасывающей сети, например, на городском транспорте,  $k_{c,o} = n$ );  $R_3$  — общее сопротивление растеканию заземлителей на тяговой подстанции, Ом;  $R_{п/ст}$  — максимальное значение эквивалентного сопротивления подстанции, Ом;  $R_o$  — сопротивление отрицательного кабеля, Ом;  $R_{пр}$  — удельное переходное сопротивление рельс — земля, Ом/км;

$$R_{п/ст} = \frac{U_{dном}}{I_{dном}} \left( \frac{k_1}{N_{amin}} + \frac{k_2 N_b}{N_{a,p} N_{bmin}} \right),$$

где  $U_{dном}$  — номинальное напряжение на шинах подстанции, В;  $I_{dном}$  — номинальный выпрямленный ток одного агрегата, А;  $N_{amin}$  — минимальное возможное число агрегатов в эксплуатации на подстанции;  $N_{a,p}$  — общее число рабочих агрегатов подстанции;  $N_b$  и  $N_{bmin}$  — общее и минимально возможное число вводов переменного тока на подстанции;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий потерю напряжения в агрегате при номинальной нагрузке;  $k_2$  — коэффициент, учитывающий потерю напряжения в сети ВН, питающей подстанции;

$$k_1 = \frac{0,5u_k + \Delta p_M + \Delta u_a}{100};$$

$$k_2 = \frac{S_{ном}}{S_k},$$

где  $u_k$  — напряжение КЗ трансформатора, %;  $\Delta p_M$  — нагрузочные потери трансформатора, %, равные  $\Delta P_{ном} \times 100/S_{ном}$ ;  $\Delta u_a$  — падение напря-

жения в вентильных плечах выпрямителя, %, равное

для нулевой схемы

$$\Delta u_a = \Delta U_a \cdot 100/U_{dном};$$

для трехфазной мостовой схемы

$$\Delta u_a = 2\Delta U_a \cdot 100/U_{dном},$$

где  $S_{ном}$  — номинальная мощность одного трансформатора, кВ·А;  $S_k$  — мощность КЗ питающей сети, кВ·А;  $P_{ном}$  — номинальные потери в меди трансформатора, кВт.

При пробое вентильного плеча обратный ток в «большом» вентильном плече может быть определен как двухфазный ток КЗ на выводах вторичной обмотки трансформатора.

Номинальная мощность преобразовательного агрегата или мощность, потребляемая из сети переменного тока, кВ·А,

$$P = 1,05U_{d0}I_{dном} \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент полезного действия преобразовательного агрегата

$$\eta = \frac{k_n P_d}{k_n P_d + \sum P_{пот}},$$

где  $k_n$  — коэффициент нагрузки;  $P_d$  — номинальная мощность агрегата на стороне выпрямленного тока; сумма потерь в агрегате

$$\sum P_{пот} = k_n^2 (\Delta P_{н,тр} + \Delta P_{н,ур} + k_n \Delta P_b) + \Delta P_{xx,тр} + \Delta P_{xx,ур} + P_{xx,в},$$

$\Delta P_{н,тр}$ ,  $\Delta P_{н,ур}$  — нагрузочные потери в трансформаторе и уравнительном реакторе, кВт;  $\Delta P_{xx}$  — потери холостого хода, кВт;  $\Delta P_b$  — потери в вентилях, кВт.

Средневзвешенный КПД агрегата за определенный отрезок времени (сутки, месяц, год)

$$\eta_{ср} = A/(A + \Delta A),$$

где  $A$  — потребленная электроэнергия, определяемая по электросчетчику или по суточному типовому графику, кВт·ч;  $\Delta A$  — суммарные потери электроэнергии в агрегате, кВт·ч.

Коэффициент мощности преобразовательного агрегата

$$\chi = P_{общ}/S_{общ} = v \cos \varphi_1;$$

$$\cos \varphi_1 = P_1/S_1 = P_1/\sqrt{P_1^2 + Q_1^2};$$

$$v = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_7^2 + \dots}},$$

где  $P_{общ}$ ,  $S_{общ}$  — активная и полная мощности агрегата;  $P_1$ ,  $S_1$ ,  $Q_1$  — активная, полная и реактивная мощности первой (основной) гармоники;  $\cos \varphi_1$  — коэффициент мощности первой (основной) гармоники;  $v = 0,955$  — коэффициент искажения;  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_7$  — токи гармоник

в цепи первичной обмотки трансформатора;

$$P_1 = P_{\text{хх, тр}} + k_n^2 (\Delta P_{\text{н, тр}} + \Delta P_{\text{н, ур}}) + k_n U_d I_d;$$

$$Q = Q_{\text{хх}} + Q_v; \quad Q_{\text{хх}} = \sqrt{3} U_n I_{\text{хх, тр}};$$

$$Q_v = S_1 \sin v/2;$$

$$\cos v = 1 - \sqrt{3} k_n U_{\text{н, тр}}.$$

Приведенные формулы позволяют построить кривую коэффициента мощности первой гармоники в функции коэффициента нагрузки  $k_n$  для выпрямителей с диодами и тиристорами без регулирования напряжения ( $\alpha = 0$ ).

Для определения средневзвешенного коэффициента мощности достаточно в формулы ввести средневзвешенный коэффициент загрузки.

#### Потребители собственных нужд тяговых подстанций

Потребителями переменного тока являются вспомогательные устройства преобразовательных агрегатов, насосы, вентиляторы, зарядный и подзарядный агрегаты, электрическое отопление, освещение, устройства подогрева выключателей и приводов; система охлаждения трансформаторов, мастерская, преобразователи СЦБ, станционные и другие железнодорожные потребители.

Для питания перечисленных потребителей устанавливаются на тяговых подстанциях либо один трансформатор собственных нужд с посторонним резервным вводом низкого напряжения (на городском транспорте), либо два трансформатора. Мощность трансформаторов собственных нужд зависит от наличия и мощности перечисленных выше потребителей и обычно колеблется от 20–40 (на подстанциях городского транспорта) до 320 кВт·А.

Потребителями оперативного постоянного тока являются приборы управления, защиты и сигнализации, постоянно включенные электромагниты выключателей, приводы выключателей, реле автоматики, аварийное освещение. Длительная мощность перечисленных потребителей на тяговых подстанциях зависит от количества агрегатов и линий, от системы оперативного тока, от способа резервирования, освещения и др. Обычно эта мощность не превосходит 3 кВт. Максимальная кратковременная мощность зависит от типа привода выключателей.

Для питания потребителей постоянного оперативного тока предусматривается независимый источник в виде аккумуляторной

батареи, работающей параллельно с подзарядным агрегатом. В качестве подзарядного и зарядного агрегата применяются преимущественно полупроводниковые выпрямители. Выбор аккумуляторной батареи, подзарядного и зарядного агрегатов производится по рекомендациям, приведенным в разд. 33.

В случае применения переменного оперативного тока или батарей малой емкости для включения аппаратов используют приводы переменного тока либо приводы постоянного тока с питанием их от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

#### Список литературы

- 58.1 Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи М Энергия, 1967 432 с
- 58.2 Бирзник Л. В. Импульсные преобразователи постоянного тока М Энергия, 1974, 254 с.
- 58.3 Бондаревский Д. И., Черток М. С., Пономарев А. А. Трамвайные вагоны РВ3-6М2 и КТМ-5М3 М. Транспорт, 1975, 256 с
- 58.4 Электровоз ВЛ80Т Руководство по эксплуатации/Под ред. Б. Р. Бондаренко М Транспорт, 1977 568 с.
- 58.5 Бочаров В. И., Попов В. И., Тушканов Б. А. Магистральные электровозы переменного тока М Транспорт, 1976 480 с
- 58.6 Электровозы и тяговые агрегаты промышленного транспорта/Под ред. В. А. Браташа М Транспорт, 1977 526 с
- 58.7 Ефремов И. С., Косарев Г. В. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта М Высшая школа, 1976 580 с
- 58.8 Ефремов И. С., Косарев Г. В. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование) Ч 1, 2. М Высшая школа, 1981 248, 293 с
- 58.9 Автоматизация электрического подвижного состава Под ред. Д. Д. Захарченко М: Транспорт, 1978 280 с
- 58.10 Тяговые электрические машины и трансформаторы/Под ред. Д. Д. Захарченко М Транспорт, 1979 302 с.
- 58.11 Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины М Энергия, 1965 232 с
- 58.12 Иванов М. Д., Пономарев А. А., Иеропольский Б. К. Трамвайные вагоны Т 3 М Транспорт, 1977 240 с
- 58.13 Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Б Г В Вишняк, В. И. Шабатин, И. Г. Осипов, В. М. Березин, Н. Г. Пидяш, А. Н. Деметиевский М Транспорт, 1977 208 с.
- 58.14 Капустин Л. Д., Копанев А. С., Лозановский А. Л. Особенности устройства и эксплуатации электровозов ВЛ80Р М Транспорт, 1979 175 с.
- 58.15 Корягина Е. Е., Косыкин О. А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов М Транспорт, 1982, 296 с.
- 58.16 Легостаев Е. А., Исаев И. П., Ковальский А. Н. Автоматизация управления движением поездов на метрополитенах М Транспорт, 1976 95 с
- 58.17 Пассажирские электровозы С44 и ЧС4 Под ред. В. Д. Койтелкина М Транспорт, 1975 384 с

- 58 18 **Резник М. Я., Кулаков Б. М.** Трамвайный вагон ЛМ-68 М Транспорт, 1977 192 с
- 58 19 **Радченко В. Д.** Техника высоких напряжений устройств электрической тяги М. Транспорт, 1975 358 с.
- 58 20 **Розенфельд В. Е., Староскольский Н. А.** Высокочастотный бесконтактный электрический транспорт М Транспорт, 1975 208 с
- 58 21 **Электропоезда постоянного тока с импульсным управлением/Под ред. В. Е. Розенфельда** М Транспорт, 1976 280 с
- 58 22 **Раба Ф., Кир Л., Гончарук И.** Электродинамический тормоз электропоездов СЧ2Т и ЧС200 М Транспорт, 1978 81 с
- 58 23 **Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизельпоездам** М Транспорт, 1976 Т I 430 с, Т II 276 с
- 58 24 **Технический справочник по городскому электротранспорту (в трех томах).** М.: Изд-во МХХ РСФСР, 1960 723, 586, 727 с
- 58 25 **Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М.** Подвижной состав электрифицированных железных дорог М Транспорт, 1980 471 с
- 58 26. **Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе,** Под ред. Б. Н. Тихменева М. Транспорт, 1976 280 с
- 58 27 **Тулунов В. Д.** Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава М. Транспорт, 1976, 368 с
- 58 28 **Устройство и работа электропоездов/** З. М. Рубчинский, С. П. Соколов, Е. А. Эглоп, Л. С. Тынюк М. Транспорт, 1976, 416 с
- 58 29 **Фаминский Г. В., Ерофеев Е. В.** Автоматические устройства для ведения поездов М. Транспорт, 1978 104 с
- 58 30 **Сорин Н. А.** Экспортный советский электропоезд типа Srl Электрическая и тепловозная тяга 1976 № 1 С 42–45
- 58 31. **Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств/И. С. Ефремов, А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин** М Энергия, 1976 254 с.
- 58.32 **Погарский Н. А., Степанов А. Д.** Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин повышенной единичной мощности. М. Машиностроение, 1976 224 с
- 58 33 **Теория и расчет тягового привода электромобилей** И. С. Ефремов, А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин М. Высшая школа, 1984 384 с
- 58 34 **Теория электрической тяги/В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров** М. Транспорт, 1983 328 с
- 58.35. **Тарнижевский М. В., Томиянович Д. К.** Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса. М. Транспорт, 1986, 376 с
- 58 36 **Контактные и кабельные сети трамваев и троллейбусов/А. С. Афанасьев, Г. П. Долабериц, В. В. Шевченко** М. Транспорт, 1979 303 с
- 58 37 **Справочник по электроснабжению железных дорог Т I** Под ред. К. Г. Марквардта М. Транспорт, 1980 256 с
- 58 38. **Справочник по электроснабжению железных дорог Т II** Под ред. К. Г. Марквардта М. Транспорт, 1981 392 с
- 58 39 **Марквардт К. Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог М. Транспорт, 1982 528 с
- 58.40. **Караев Р. И., Волобринский С. Д., Ковалев И. Н.** Электрические сети и энергосистемы М. Транспорт, 1988, 326 с.
- 58 41 **Давылова Н. К., Попов Б. Н., Эрлих В. М.** Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования М. Транспорт, 1978, 416 с
- 58.42 **Электроснабжение метрополитена/** Под ред. Е. Н. Быкова М. Транспорт, 1978 431 с
- 58 43 **Загайнов Н. В., Финкельштейн Б. С.** Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса М. Транспорт, 1978, 336 с
- 58 44 **Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. Справочник** Под ред. И. С. Ефремова М. Транспорт, 1984 311 с
- 58 45. **Тяговые подстанции/Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов.** М. Транспорт, 1986, 319 с
- 58 46. **Быков Е. И., Панин Б. В., Пупынин В. Н.** Тяговые сети метрополитенов М. Транспорт, 1987, 256 с.
- 58 47 **Карякин Р. Н.** Тяговые сети переменного тока М.: Транспорт, 1987, 280 с.

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

## СОДЕРЖАНИЕ

59 1	Аккумуляторные батареи . . . . .	460	59 3.	Системы зажигания . . . . .	478
	Типы и основные показатели аккумуляторных батарей (460) Эксплуатация стартерных аккумуляторных батарей (461)			Электрические схемы и данные систем зажигания (478) Аппараты систем зажигания (482)	
59.2.	Автотракторные генераторные установки . . . . .	464	59 4	Стартеры . . . . .	486
	Генераторы (464). Регуляторы напряжения (469)			Устройство стартеров (487). Основные данные стартерных электродвигателей (487)	
				Список литературы . . . . .	489

Приводятся справочные данные по основным видам электрооборудования отечественных автомобилей и тракторов: аккумуляторным батареям, генераторным установкам, системам зажигания и стартерам.

Обозначение типов элементов электрооборудования до 1980 г. состояло из буквенного обозначения группы электрооборудования, порядкового номера и буквенного обозначения модификации разработки и шифра группы электрооборудования; например, СТ-142Б-3708 означает: стартер, номер разработки 142, модификация Б. Поскольку и первые буквы, и последние цифры обозначали одно и то же — группу электрооборудования, то последние цифры, как правило, опускались. В электрооборудовании последних разработок буквенное обозначение группы электрооборудования не пишется; например, обозначение 29.3708 означает: стартер, номер разработки 29. Группы электрооборудования имеют следующие цифры: генераторы — 3701, регуляторы напряжения и регуляторные коробки — 3702, катушки зажигания 3705, распределители зажигания — 3706, стартеры — 3708, магнето — 3728, электродвигатели и электромеханизмы — 3730.

### 59.1. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

#### Типы и основные показатели аккумуляторных батарей

Аккумуляторная батарея предназначена для запуска двигателя внутреннего сгорания и питания электропотребителей при неработающем двигателе. Автотракторные аккумуля-

торные батареи называются стартерными.

На стартерные аккумуляторные батареи имеется ГОСТ 959.0-84 «Батареи аккумуляторные, свинцовые, стартерные емкостью свыше 30 А·ч. Общие технические условия», по которому батареи классифицируются соответственно основным параметрам и конструктивному исполнению. В качестве основных параметров приняты номинальные значения напряжения и емкости батарей при 20-часовом режиме разряда ( $C_{20}$ ). По конструктивному признаку их можно подразделить на батареи обычной конструкции (в моноблоке с ячеечными крышками и перемычками над крышкой); батареи с общей крышкой (в моноблоке с перемычками под общей крышкой); батареи необслуживаемые (с общей крышкой, не требующие ухода в эксплуатации). На рис. 59.1 приведен общий вид и устройство аккумуляторной батареи обычной конструкции.

Автотракторные аккумуляторные батареи имеют условные обозначения: первые цифры — количество последовательно соединенных аккумуляторов; буквы СТ — батарея стартерная, после дефиса — значение номинальной емкости при 20-часовом режиме разряда. Затем следует буква, соответствующая конструктивному исполнению: А — для батарей с общей крышкой, З — для необслуживаемых, Н — для сухозаряженных. При обычном исполнении батареи буква не ставится.

Основные технические данные свинцовых стартерных аккумуляторных батарей, используемых на автомобилях, тракторах и сельхозмашинах, приведены в табл. 59.1. Ток разряда в стартерном режиме при температуре 20°С

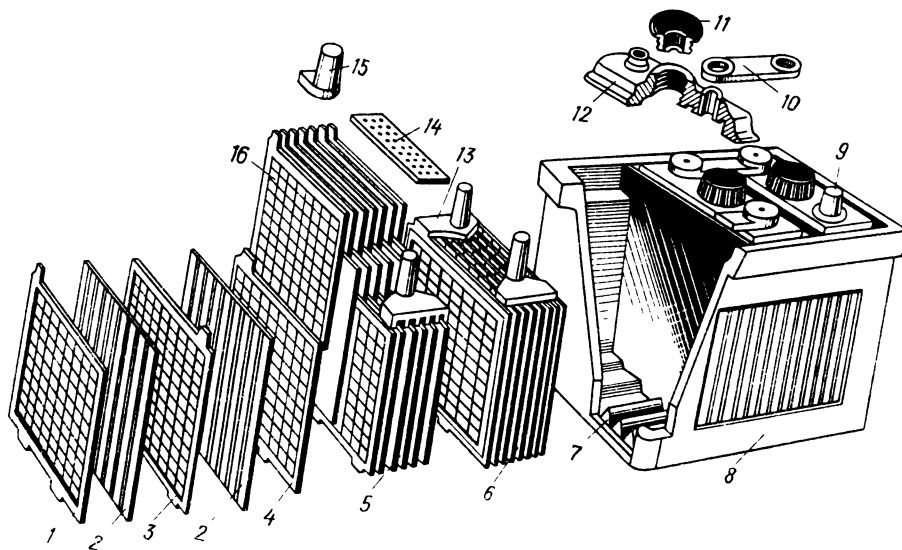


Рис. 59.1. Устройство стартерной аккумуляторной батареи:

1 — отрицательная пластина (крайняя), 2 — сепаратор; 3 — положительная пластина, 4 — отрицательная пластина, 5 — полублок положительных пластин; 6 — блок пластин; 7 — опорные призмы; 8 — моноблок, 9 — полюсный вывод; 10 — перемычка; 11 — вентиляционная пробка; 12 — крышка аккумулятора; 13 — мостик; 14 — предохранительный щиток; 15 — борн, 16 — полублок отрицательных пластин

определяется уравнением:  $I_{p,ст} = 3C_{20}$ . Разряд батарей при 10- и 20-часовом режиме ведется до конечного напряжения на выводах, соответственно равного для 6-вольтовых батарей 5,1–5,25 В и для 12-вольтовых 10,2–10,5 В.

#### Эксплуатация стартерных аккумуляторных батарей

Аккумуляторные батареи устанавливаются на легковых автомобилях под капотом двигателя на специальных кронштейнах, на

Таблица 59.1 Основные технические данные стартерных аккумуляторных батарей

Тип батареи	Условное обозначение по СТ СЭВ 166-75	Напряжение, В	Номинальная емкость при разряде, А·ч		Разрядный ток, А		Габаритные размеры, мм			Количество пластин	Количество электролита, л
			20-часовой режим	10-часовой режим	20-часовой режим	10-часовой режим	Длина	Ширина	Высота		
ЗСТ-65	6В1	6	65	60	3,25	6,0	170–180	167–177	225–245	4	2,2
ЗСТ-150*	6Н1	6	150	135	7,5	13,5	310–330	167–177	225–245	9	4,8
ЗСТ-215*	6Н3	6	215	195	10,75	19,5	415–435	167–177	225–245	13	7,0
ЗСТ-225	6Н3	6	225	202	11,25	20,1	428	195	225–245	13	7,0
6СТ-45	12М2	12	45	42	2,25	4,2	240–260	195	215–225	4	3,0
6СТ-50*	12М2	12	50	45	2,5	4,5	240–260	195	215–225	6	3,5
6СТ-55*	12М2	12	55	50	2,75	5,0	240–260	195	215–225	6	3,8
6СТ-60	12М3	12	60	54	3,0	5,4	292–312	195	215–225	4	3,8
6СТ-75*	12Н1	12	75	68	3,75	6,8	333–347	195	225–245	5	5,0
6СТ-90	12Н3	12	90	81	4,5	8,1	420–435	195	225–245	6	6,0
6СТ-105*	12Н4	12	105	95	5,25	9,5	455–485	195	225–245	7	7,0
6СТ-132	12Д2	12	132	120	6,6	12,0	505–525	200–225	230–250	8	8,0
6СТ-182	12Д3	12	182	165	9,1	16,5	505–525	250–295	230–250	11	11,5
6СТ-190*	12Д3	12	190	170	9,5	17,0	505–525	260–240	230–250	11	12,0

\* Аккумуляторные батареи выполняются обычной конструкции и с общей крышкой (исполнение А).  
Примечание. Аккумуляторные батареи типов 6СТ-44, 6СТ-65, 6СТ-77 в габаритах соответственно 6СТ-45, 6СТ-60, 6СТ-75 выполняются с общей крышкой и необслуживаемыми (исполнение З)

автобусах — в кабине или в салоне, на грузовых автомобилях — в специальных контейнерах на раме или подножке (наружная установка) или в кабине. Основные требования к размещению аккумуляторных батарей на автомобилях установлены отраслевым стандартом ОСТ 37.003.062-83, согласно которому рабочая температура электролита в любых эксплуатационных условиях не должна превышать 50 °С, а максимальная температура воздуха, непосредственно соприкасающегося с поверхностью батареи, не должна быть более 60 °С; в конструкции посадочного места должны быть предусмотрены амортизаторы или амортизационные прокладки; отсек или контейнер должен иметь хорошую вентиляцию, исключая скопление газов во взрывоопасных концентрациях и возможность попадания паров кислоты в кабину.

Аккумуляторная батарея должна располагаться по возможности ближе к стартеру, чтобы длина стартерного провода была минимальной. При этом падение напряжения в стартерной цепи не должно превышать 0,2 В на 100 А нагрузки. К аккумуляторной батарее должен быть обеспечен легкий доступ для ее регулярного осмотра и обслуживания.

Эксплуатация аккумуляторных батарей производится согласно инструкции ЖУИЦ. 563410.001 ИЭ. Заводы-изготовители выпускают аккумуляторные батареи без электролита с сухими заряженными пластинами. Поэтому аккумуляторную батарею перед эксплуатацией заливают электролитом и заряжают.

Для приготовления электролита используется дистиллированная вода (физико-химические показатели по ГОСТ 6709-72) и аккумуляторная серная кислота (ГОСТ 667-73) сорта А или Б. Плотность электролита, заливаемого в аккумуляторы, зависит от климатического района эксплуатации (табл. 59.2).

Для получения электролита соответствующей плотности следует руководствоваться данными табл. 59.3.

Рекомендуемые в табл. 59.2 значения плотности для заряженной батареи получены на основе опыта эксплуатации с учетом минимального удельного сопротивления электролита, возможности получения максимальной емкости и срока службы аккумулятора, а также приведенной ниже температуры замерзания:

Плотность электролита при +25 °С, кг/м <sup>3</sup>	Температура замерзания, °С
1090	-7
1140	-14
1180	-22
1210	-34
1230	-42

Плотность электролита при +25 °С, кг/м <sup>3</sup>	Температура замерзания, °С
1260	-58
1290	-68
1300	-60

При приготовлении электролита необходимо использовать сосуды, стойкие против действия кислоты, сначала заливать воду, а затем при непрерывном помешивании — кислоту. Плотность электролита определяют денсиметром и приводят к 25 °С. Для этого к показаниям должна быть сделана поправка соответственно приведенным ниже значениям:

Температура электролита, °С	Поправка к показаниям денсиметра, кг/м <sup>3</sup>
(-55) - (-41)	-50
(-40) - (-26)	-40
(-25) - (-11)	-30
(-10) - (+4)	-20
(+5) - (+19)	-10
(+20) - (+30)	0
(+31) - (+45)	+10
(+46) - (+60)	+20

Полученный электролит охлаждают до температуры 25 °С и заливают в каждый аккумулятор до уровня, превышающего на 10–15 мм предохранительный щиток, или до нижнего торца тубуса горловины. Если после 2 ч плотность электролита понизилась не более чем на 30 кг/м<sup>3</sup>, то аккумуляторную батарею можно эксплуатировать без подзаряда. Если наблюдается снижение плотности более чем на 30 кг/м<sup>3</sup>, то батарею следует подзарядить.

При заряде следует следить за температурой электролита, она не должна быть выше 45 °С в холодной и умеренной клима-

Таблица 59.2 Рекомендуемые значения плотности электролита свинцовых аккумуляторов

Макроклиматический район (ГОСТ 16350-80), средняя месячная температура воздуха в январе, °С	Время года	Плотность электролита, приведенная к 25 °С, кг/м <sup>3</sup>	
		заливаемого	заряженной батареи
Очень холодный, от -50 до -30	Лето	1240	1260
	Зима	1280	1300
Холодный, от -30 до -15	Круглый год	1260	1280
Умеренный, от -15 до -8	То же	1240	1260
Теплый влажный, от 0 до +4	»	1200	1220
Жаркий сухой, от -15 до +4	»	1220	1240

Примечание Допускаются отклонения на ±10 кг/м<sup>3</sup> от значений плотности, приведенных в таблице.

Таблица 59.3. Рекомендации по составу электролита

Плотность электролита при 25 °С, кг/м <sup>3</sup>	Количество воды и серной кислоты плотностью 1830 кг/м <sup>3</sup> при температуре 25 °С для получения 1 л электролита, л	
	воды	кислоты
1200	0,859	0,2
1220	0,839	0,221
1240	0,819	0,242
1260	0,8	0,263
1280	0,781	0,285

Таблица 59.4. Технические параметры зарядных устройств

Тип зарядного устройства	Выходное напряжение, В	Номинальный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
BCA-4	220 – 230	2	278 × 225 × 440	28
BCA-5	0 – 65	12	415 × 310 × 340	28
BCA-6	20 – 23	24	278 × 225 × 400	19
BCA-111	0 – 80	8	415 × 310 × 340	28
ВУ-3/1,5	0,5 – 3	1,5	152 × 123 × 108	1,5
ВУ-12/600	6	600	600 × 500 × 1000	165
	9	900	600 × 500 × 1000	165
	12	600	600 × 500 × 1000	165
ВУ-24/0,6	3 – 35	0,6	152 × 135 × 108	1,8
ВУ-42/70	0 – 40	70	450 × 450 × 830	90
ВУ-110/24	50 – 110	24	560 × 500 × 500	60

Примечание. Напряжение и ток зарядного устройства определяют тип соединения (параллельно-последовательное или смешанное) и количество аккумуляторных батарей, подлежащих заряду.

тических зонах и выше 50 °С в жаркой и теплой влажной зонах. В случае превышения указанной температуры уменьшают наполовину ток заряда или прерывают заряд на время, необходимое для снижения температуры до 30–35 °С. Заряд рекомендуется производить током, равным 10% значения емкости при 20-часовом режиме разряда, до напряжения 2,4 В на каждом аккумуляторе.

Заряд аккумуляторных батарей можно производить от зарядных устройств типа ВСА (выпрямительный селеновый агрегат) и ВУ (выпрямительные устройства). В табл. 59.4 даны их основные технические параметры.

Для легковых автомобилей серийно выпускаются выпрямительные устройства различных типов, имеющие небольшие размеры и массу.

Срок службы и исправность аккумуляторных батарей во многом зависят от своевременного и правильного ухода за ними. Аккумуляторная батарея должна содержаться в чистоте, так как загрязнение ее поверх-

Таблица 59.5. Плотность электролита, кг/м<sup>3</sup>, приведенная к температуре 25 °С, при различной степени разряженности аккумуляторной батареи

Плотность при полностью заряженной батарее	Плотность при степени разряженности батареи, %	
	25	50
1300	1260	1220
1280	1240	1200
1260	1220	1180
1240	1200	1160
1220	1180	1140

ности приводит к усиленному саморазряду. Рекомендуется при техническом обслуживании протирать поверхность батареи 10%-ным раствором аммиака или соды.

Не реже 1 раза в 15 дней (а летом в жаркую погоду 1 раз в 5–6 дней) необходимо проверять уровень электролита. Уровень проверяется с помощью стеклянной трубки диаметром 5–7 мм и считается нормальным, если он выше предохранительного щитка аккумулятора на 10–15 мм. В случае необходимости добавляется дистиллированная вода.

Периодически (не реже 1 раза в квартал), а также при участившихся случаях ненадежного запуска двигателя необходимо проверять денсиметром плотность электролита с одновременным замером его температуры, чтобы учесть температурную поправку. По результатам проверки с учетом исходной плотности электролита полностью заряженной батареи для данного климатического района и данных табл. 59.5 определяется степень ее разряженности. Аккумуляторную батарею, разряженную более чем на 25% зимой и более чем на 50% летом, необходимо подзарядить.

Более полную оценку разряженности аккумуляторной батареи может дать проверка под нагрузкой. Такая проверка осуществляется с помощью прибора ЛЭ-3 или нагрузочной вилки ЛЭ-2. При этом напряжение аккумулятора исправной, полностью заряженной аккумуляторной батареи не должно быть ниже 1,7 В и не должно снижаться в течение 5 с. Напряжение 1,5–1,7 В свидетельствует о частичном разряде батареи. При напряжении, меньшем 1,5 В, степень разряженности меньше 50%.

При эксплуатации батарей нельзя допускать их перезаряда или недозаряда, сокращающих срок их службы. Поэтому периодически (при выполнении ТО-2) необходимо производить проверку реле-регулятора. При этом зарядное напряжение должно соответствовать значению, указанному в техническом



описании и инструкции по эксплуатации автомобиля или трактора. Бесконтактные регуляторы РР-350, РР-350А, РР-132, РР-356, 11.3702, 13.3702, Я112А не регулируются в эксплуатации, и при нарушении нормальной работы они подлежат замене. Для реле-регуляторов, имеющих переключатель сезонной регулировки «Зима – Лето» (РР-315, РР-315Б, РР-315Д, РР-362Б, РР-385Б, а также бесконтактные регуляторы напряжения Я120, Я112Б и др.), подрегулировка должна вначале осуществляться путем соответствующего изменения положения указанного переключателя. Подрегулировка реле-регуляторов вибрационного типа производится изменением натяжения пружины регулировочным крючком. Максимальное значение напряжения не должно быть более 15,5 и 31,0 В соответственно для систем электрооборудования 12 и 24 В.

## 59.2. АВТОТРАКТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

### Генераторы

Автомобильная установка состоит из трехфазного синхронного генератора переменного тока с электромагнитным возбуждением, встроенного в генератор кремниевого выпрямителя, и регулятора напряжения. Регулятор напряжения может быть вибрационным, транзисторным контактным или бесконтактным, а также транзисторным интегрального исполнения (интегральным). В последнем случае регулятор напряжения встраивается в корпус генератора вместе с выпрямителем. Генераторная установка автомобиля при работе подзаряжает аккумуляторную батарею.

В табл. 59.6 приведены основные типы автомобильных генераторов и регуляторов напряжения.

Автомобильный генератор переменного тока типа Г260-Д1 показан на рис. 59.2. По данной конструктивной схеме построены все генераторные установки, за исключением установки с генератором типа 38.12.3701, предназначенной для большегрузных автомобилей ЗИЛ-133ВЯ, -133ГЯ, -4331 (рис. 59.3), в которой генерируется два номинальных уровня напряжения: +12 В для питания основных потребителей ( $R_{Н1}$ ) автомобиля и +24 В для электростартера и некоторых потребителей ( $R_{Н2}$ ), имеющих повышенное номинальное напряжение 24 В (например, радиостанции). Применение стартера на номинальное напряжение 24 В связано с трудностями создания надежного 12-вольтного стартера, для запуска двигателей большегрузных авто-

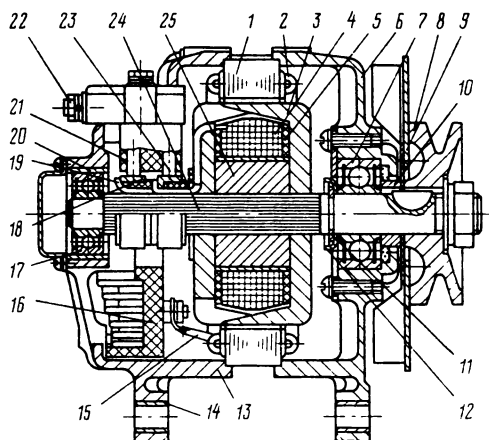


Рис. 59.2. Генератор Г250-Д1:

1 – статор; 2 – трехфазная обмотка статора; 3 – ротор; 4 – обмотка возбуждения; 5 – каркас; 6 – крышка со стороны привода; 7 – шарикоподшипник; 8 – шкив; 9 – вентилятор; 10 – опорная втулка; 11 – кольцо; 12 – опорная чашка; 13 – крышка со стороны контактных колец; 14 – втулка; 15 – вывод фазы обмотки статора; 16 – выпрямительный блок; 17 – шарикоподшипник; 18 – контактное кольцо; 19 – вывод обмотки возбуждения; 20 – стальное кольцо; 21 – шеткодержатель; 22 – зажим обмотки возбуждения; 23 – щетка; 24 – вал; 25 – втулка ротора

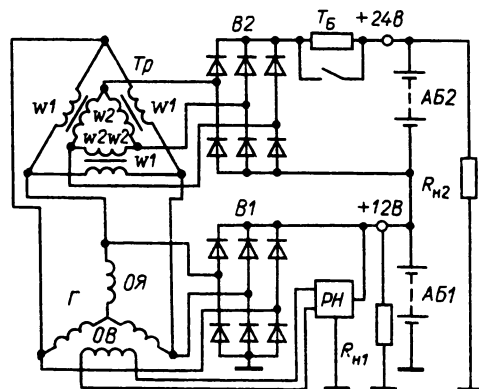


Рис. 59.3. Электрическая схема автомобильной системы электроснабжения на два уровня напряжения с трансформаторно-выпрямительным блоком:

Г – генератор; ОЯ, ОВ – обмотки якоря и возбуждения генератора; В1, В2 – выпрямительные блоки; АБ1, АБ2 – аккумуляторные батареи;  $R_{Н1}$ ,  $R_{Н2}$  – нагрузка; РН – регулятор напряжения; Тр – трансформатор; w1, w2 – первичные и вторичные обмотки трансформатора; Тб – термометаллический выключатель

Таблица 59.6. Типы генераторных установок и их применение на автомобилях

Генератор	Реле-регулятор	Выпрямитель	Автомобиль
Г160	РР139	Мост с вентилями фирмы Lucas (Великобритания)	ЗИЛ-114, -117, -118
Г221	РР380, 12.3702, РН-1, РН-2, РН-4, РН-5, РН-6	БПВ6-50	ВАЗ-2101; -2102, -2103, -2106, -21011, -21021
Г222	Я112-В, РН-5, РН-6, РН-2, РН-4	БПВ6-50	ВАЗ-2104, -2105, -2107
Г250-А1, -Б1, -В2, -Г1, -Д1	РР362	БПВ4-45	УАВ-451Д, -452, ГАЗ-54
Г250-Е1, -Н1	РР350	БПВ4-45	УАЗ-469, ГАЗ-24, -2401
Г250-Ж1	РР362-А, РН-3	БПВ4-45	«Москвич-2140, -2137, -2734»
Г254	Я112-А, РН-3	БПВ4-60	ГАЗ-51, -52, -63
Г263-А-Б	РР363	БП8-100	БелАЗ-540-548А
Г265, Г265-А, Г265-Б	РР362	ВВГ6	ПАЗ-672, КАвЗ-685, ПАЗ-652
Г266, Г266-А, Г266-Б	Я112-А, РН-3	БПВ4-60	ПАЗ-672, КАвЗ-685, ПАЗ-652
Г271	РР127	БПВ4-45	МАЗ-500, КРАЗ-255
Г272	РР356	БПВ4-45	КамАЗ, МАЗ-500
Г273	Я120-А	БПВ4-100	КамАЗ, МАЗ-500
Г284	РР350	БПВ8-100	ГАЗ-24, -14
Г286	РР362, Я112-А, РН-3	БПВ8-100	ЛАЗ-696, -697, -699
Г286-А	Я112-А, РН-3	БПВ8-100	ЛАЗ-696, -697, 699
Г286-Б	РР362	БПВ8-100	ЛиАЗ-677
Г286-Б1	Я112-А, РН-3	БПВ7-100	ЛиАЗ-677
Г287	РР132	ВВГ7-Г	ГАЗ-66, -01, -66-04
Г287-А	РР132	БПВ7-100	ГАЗ-71, -73
Г287-Б	РР132	БПВ7-100	УралАЗ-375, ЗИЛ-131, -137
Г288	РР133	БПВ7-100	ЗИЛ-130Е
Г288-А	РР133	БПВ7-100	КамАЗ
Г288-В	РР133	БПВ7-100	МАЗ, КРАЗ
Г289	Я120	БПВ8-100	ААЗ-4202
Г290-Б	РР361-А	БПВ8-100	ГАЗ-41, -49Б
Г290-В	РР390-Б	БПВ7-100	ГАЗ-4905
Г502-А	РР310-Б	ВВГ-2А	ЗАЗ-966
16 3701	13.3701	БПВ34-65	ГАЗ-2411, -3410
17 3701	Я112-А, РН-3	БПВ4-45	ЗИЛ-130К
29 3701	Я112-А, РН-3	БПВ4-45	«Москвич-2140»
29.3701-01	Я112-А, РН-3	БПВ4-60	ГАЗ-52, -53, -66-01, -66-04
32 3701	РР350-А	БПВ4-60	ЗИЛ-130
37.3701	17 3702	БПВ11-60	ВАЗ-2108, -2109
38 12 3701	РР132	ТБВ-1212.3759	ЗИЛ-133ВЯ, -133ГЯ, -4331
48.07 3701	1807 3702	Мост с вентилями фирмы Lucas (Великобритания)	ЗИЛ-4104, -4105
292.3701-01	Я112-А, РН-3	БПВ4-60	«Москвич-2140, -Люкс»
49.3701 (бесщеточный)	Я112-А, РН-3	БПВ4-45	ЗИЛ-130К, -130АН

мобилей, где требуется высокий пусковой момент и, следовательно, высокие (до 2000 А) пусковые токи стартерного электродвигателя. В установке имеются две аккумуляторные батареи: основная АБ1, которая заряжается через выпрямитель В1 от генератора Г, обмотка возбуждения которого питается через реле-регулятор РН, и дополнительная АБ2, которая заряжается через выпрямитель В2 от вторичных обмоток w2 трехфазного трансформатора Тр, первичная обмотка которого w1 присоединена к якорной обмотке ОЯ генератора. Блок, состоящий из трансформатора Тр и выпрямителя В2, имеет маркировку ТБВ-1212.3759 (см. табл. 59.6). Емкость вспомогательной батареи АБ2 выбирается из условия обеспечения необходимого количества запусков двигателя автомобиля

при его эксплуатации. Термобиметаллический выключатель Т6 включен в цепь заряда АБ2 для тепловой защиты. При сильно разряженной батарее, когда ток заряда превышает расчетное значение 8 А, Т6 входит в циклический режим, тем самым уменьшая среднее значение тока.

Генераторы переменного тока, приведенные в табл. 59.6, за исключением генератора 49.3701, устроены так же, как и генератор типа Г-250-Д1, однако имеют другую отдаваемую мощность и некоторые конструктивные отличия.

Типовая конструктивная схема бесщеточного (бесконтактного) автомобильного генератора изображена на рис. 59.4. Бесконтактность в генераторе достигается за счет неподвижного крепления разделенной на две части

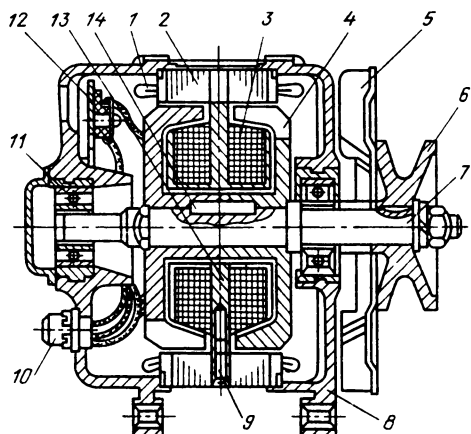


Рис. 59.4. Конструктивная схема бесщеточного автомобильного генератора с укороченными когтями:

1 — обмотка якоря; 2 — статор; 3 — неподвижная обмотка возбуждения; 4 — когти индуктора; 5 — вентилятор; 6 — шкив; 7 — вал; 8 — крышка со стороны привода; 9 — винт крепления каркаса; 10 — выходная колодка; 11 — подшипник; 12 — переходная рейка выводов; 13 — немагнитная обойма; 14 — шпонка

обмотки возбуждения 3 с помощью немагнитной обоймы 13. Когти индуктора 4 имеют осевую длину меньше половины осевой длины статора 2, так что в промежутке между левыми и правыми когтями расположен немагнитный диск обоймы 13, который винтами 9 крепится к статору 2.

Генератор 49.3701 в отличие от данной конструктивной схемы имеет не разделенную на две части обмотку возбуждения, а диск обоймы 13 закрепляется на статоре чеканкой. Также изменена посадка когтей 4 на валу 7 генератора, где вместо шпонки 14 применена втулка, к которой винтами крепится левая половина когтей, а их правая половина 4 с натягом насаживается на вал 7.

В табл. 59.7 приведены технические данные отечественных генераторов переменного тока.

В выпрямляющих устройствах автомобильных генераторов переменного тока применяются блоки с кремниевыми диодами в герметизированных ячейках (блоки ВБГ1, ВБГ2-А, ВБГ6-Г) либо блоки с применением диодов типа Д104-20 и Д104-20Х (блоки БПВ4-45, БПВ6-50, БПВ7-100). Основные данные выпрямительных блоков даны в табл. 59.8. Все блоки, указанные в табл. 59.8, имеют номинальное напряжение 14 В, кроме блока ВБГ-1, где оно равно 14 и 28 В. Максимальная рабочая частота блоков 1200 Гц.

В качестве тракторного генератора исполь-

зуется бесконтактная одноименнополюсная индукторная машина с односторонним возбуждением. На рис. 59.5 представлена конструкция генератора 13.3701.

Статор 6 генератора набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5–1,0 мм и имеет девять открытых пазов для трехфазной обмотки, соединенной в треугольник. Ротор 7 выполнен в виде шестилучевой звездочки, пакет которой также набран из стальных листов толщиной 0,5–1,0 мм. В передней крышке 10, выполненной из магнито-мягкого материала (стали 0,8 Ю), размещен индуктор, состоящий из фланца и втулки, на которой расположена неподвижная кольцевая обмотка возбуждения 9. Задняя крышка 5 выполнена из алюминиевого сплава и на ней расположен блок БПВ-13-3, содержащий интегральный регулятор напряжения и дополнительный выпрямитель для обмотки возбуждения. Основной силовой выпрямитель 11 генератора установлен на передней крышке. Генератор охлаждается собственным вентилятором, который обдувает наружную поверхность корпуса.

В тракторных генераторах, которые работают с вынесенным регулятором напряжения (генератор Г-306), блок БПВ-13-3 отсутствует. Силовые выпрямительные блоки имеют теплоотводящую плату из алюминиевого сплава, на которой крепятся специальные диоды типов Д104-20 и Д104-20Х.

Генераторы мощностью, равной или более 1 кВт, выполняются по аналогичной конструктивной схеме, но имеют пятифазную обмотку, что позволяет снизить уровень пульсаций выпрямленного напряжения и использовать в выпрямительных блоках унифицированные диоды. Силовой выпрямитель у таких генераторов (15.3701, 12.3701, 11.3701) расположен на задней крышке и охлаждается собственным вентилятором.

Генератор 46.3701, работающий в комплекте с вынесенным реле-регулятором РР362Б, имеет, как и автомобильные генераторы, внутреннюю осевую вентиляцию и комбинированное возбуждение (магнитоэлектромагнитное). Различие состоит в том, что между зубцами ротора расположены призматические магниты из феррита бария, которые залиты алюминиевым сплавом и образуют когтеобразную конструкцию. Фланец узла магнитов закрепляется на валу генератора с противоположной стороны по отношению к электромагнитному индуктору. Наличие постоянных магнитов обеспечивает улучшение массогабаритных показателей генератора и надежное самовозбуждение под нагрузкой при отсутствии аккумуляторной батареи.

Таблица 59.7. Технические данные автомобильных генераторов переменного тока

Тип генератора	Напряжение, В	Частота вращения, при которой достигается заданное напряжение, об/мин (в холодном состоянии)	Напряжение, В	Ток нагрузки, А	Частота вращения, при которой достигается заданное напряжение при заданном токе, об/мин	Максимальный ток самоограничения при 5000 об/мин, А	Мощность при 5000 об/мин, Вт	Масса генератора без шкива, кг
Г160	12,5	950	12,5	50	1800	65 ± 5	910	10,5
Г221	12,5	950	12,5	25	2000	42	580	3,9
Г222	13	1250	14	25	1900	47	658	4,3
Г250-А1, -Б1, -В2, -Г1, -Д1, -Е1, -Н1	12,5	900	12,5	28	2000	40 ± 5	500	4,71
Г250-Ж1	12,5	900	12,5	28	1900	38	475	4,71
Г254	14	1050	14	28	2150	32	410	5,2
Г263-А	28	1350	28	80	2100	150	4200	21
Г271	25	1050	25	20	2100	30	840	5,2
Г272	28	—	28	10	1500	31	870	5,4
Г273	28	—	28	20	1950	31	870	5,4
Г284	14	—	14	45	1100	90	1160	13
Г286	14	900	14	30	800	85	1200	14,2
Г286-А, -Б, -Б1	14	900	14	63	1500	85	1200	14,2
Г287-А, -Б	14	1100	14	72	2600	80	1100	9,5
Г288-А	28	1100	28	36	2600	40	1100	9,5
Г288-В	28	1100	28	18	1800	40	1100	9,6
Г289	28	1200	14	60	2200	75	2100	15
Г290-Б, -В	25	1400	12,5	150	2350	150	4200	21
Г502-А	12,5	1200	12,5	20	2500	30	420	3,5
16.3701	14	1000	14	50	2100	64	900	6,0
17.3701	14	1000	14	24	2200	40	560	4,9
29.3701	14	1000	14	32	2300	50	700	5
32.3701	12,5	900	12,5	40	2000	55	770	5
29.3701-01	12,5	950	12,5	32	2100	45	580	5,1
37.3701	13	1100	14	35	2000	55	770	4,4
38.12.3701	14	850	14	60	1800	95	1330	10
48.07.3701	14	1000	12,5	72	1950	105	1470	9,5
49.3701 (бесшумный)	12,5	950	12,5	24	2000	35	450	6,2
292.3701	12,5	1100	12,5	32	2000	50	650	5,1 ± 0,3

Таблица 59.8 Основные данные выпрямительных блоков автомобильных генераторов

Параметр											
	ВБГ1	ВБГ1-Б	ВБГ2-А	ВБГ6-Г	БПВ4-45	БПВ6-50	БПВ4-60	БПВ11-60	БПВ34-65	БПВ7-100	БПВ8-100
Максимальный выпрямленный ток, А	45	60	30	100	45	50	60	60	60	100	100
Масса, кг, не более	0,22	0,22	0,135	0,55	0,15	0,15	0,15	0,155	0,19	0,4	0,26

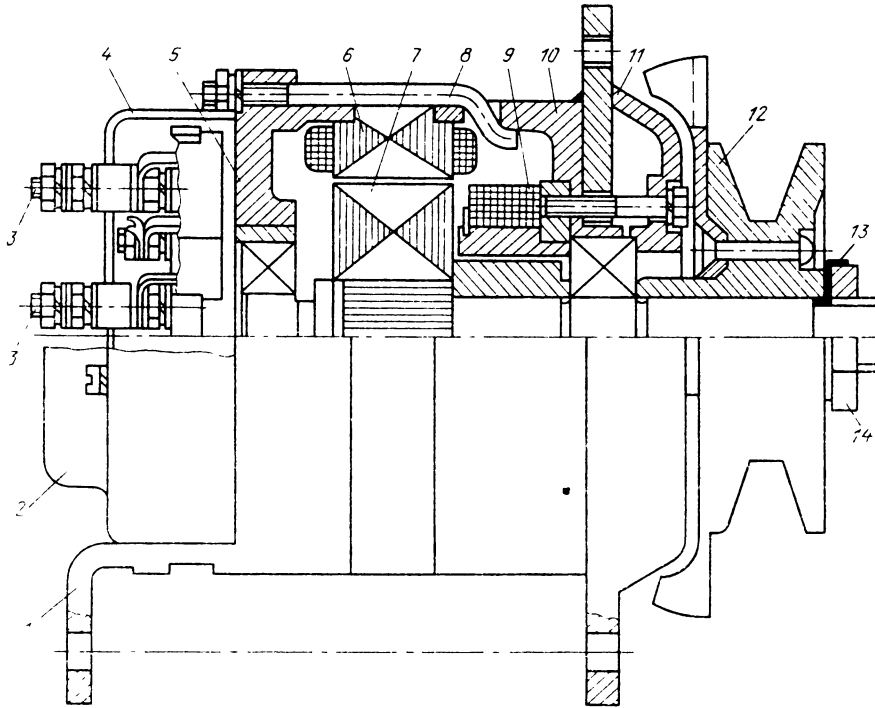


Рис. 59.5. Конструкция тракторного генератора 13.3701:

1 — лапа, 2 — блок регулятора; 3 — выводы; 4 — крышка регулятора, 5 — задняя крышка; 6 — статор; 7 — ротор; 8 — стяжная шпилька; 9 — катушка возбуждения; 10 — передняя крышка; 11 — выпрямительный блок; 12 — шкив, 13 — шайба; 14 — гайка

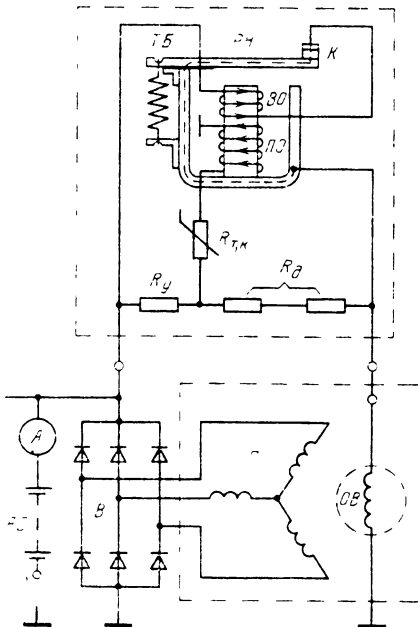


Рис. 59.6. Электрическая схема регулятора напряжения PP127:

РН — регулятор напряжения, ПО — параллельная обмотка; ВО — выравнивающая обмотка, ТБ — термометаллическая пластина (серьга);  $R_{Т,К}$  — резистор температурной компенсации (нихром);  $R_у$  — ускоряющий резистор;  $R_д$  — добавочные резисторы; ВМ — выключатель массы; ОВ — обмотка возбуждения генератора; Г — генератор; В — выпрямитель; АБ — аккумуляторная батарея; К — контакты РН

Таблица 59.9 Технические данные тракторных генераторов

Тип генератора	Тип регулятора напряжения	Максимальная мощность, Вт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Данные контрольной точки токоскоростной характеристики					Максимальная частота вращения, об/мин	Масса без шкива, кг	
					Частота вращения, об/мин, при которой достигается				Заданный ток, А			Заданное напряжение, В
					номинальный ток	заданное напряжение при заданном токе	заданное напряжение при номинальном токе	заданный ток, А				
13 3701	PP362Б	450	14	28	3600	2800	1500	23,5	14	4700	5,3	
	Я112Б	450	14	28	3600	2800	1500	23,5	14	4700	5,5	
46.3701	встроен Я112Б	780	14	50	5000	3000	1400	36	12,5	6000	5,4	
Г287Д	встроен PP385Б	1200	14	85	5000	2300	1050	60	14	8000	10	
Г287Е												
15 3701	Я112Б	1260	14	72	4500	3000	1300	60	14	6000	10	
12.3701	встроен PP356Б	1260	28	36	4500	3000	1250	30	28	6000	10,5	
11 3701	PP356Б	2700	28	72	3000	2500	1500	72	28	4000	25	
54 3701	PP362Б1	780	14	50	5000	3000	1400	36	12,5	6000	5,4	

Таблица 59.10. Типы генераторов, устанавливаемых на тракторах и сельхозмашинах

Тип генераторов	Тип трактора или сельхозмашины
13.3701* (46.3701) 54 3701 15.3701	T28X4, T16M, T25A, T40A, T30A, T70C, T90C MT3 80/82, DT75, СШ-75, T4A T150, T150K, T150KM, комбайны «Енисей», «Сибиряк», «Нива», ТТ4
11.3701 1287 12 3701 Г306Б* (541.3701)	T330 K701 T130M, комбайн «Дон-1500» DT75БВ, DT75H

\* Эти генераторы будут в ближайшие годы заменены типами, указанными в скобках.

Основные параметры тракторных генераторов и их применяемость приведены в табл. 59.9 и 59.10.

### Регуляторы напряжения

В СССР выпускаются следующие автомобильные регуляторы напряжения: вибрационные одноступенчатые PP115-В, PP127, PP310-Б и двухступенчатый PP380; контактно-транзисторные PP362 и PP362 (модернизированный), PP363; транзисторные PP132, PP133,

PP139, PP350, PP356, 12.3702, РН-1, РН-2, РН-3, РН-4, РН-5, РН-6; интегральные Я112-А, Я120-А.

На рис. 59.6 изображена электрическая схема соединений одноступенчатого вибрационного реле-регулятора PP127.

В процессе регулирования напряжения частота вибраций контактов равна или превышает 30 Гц. Резистор  $R_y$  ускоряет замыкание контактов  $K$  при работе регулятора, увеличивает частоту вибраций и уменьшает пульсацию выходного напряжения. Выравнивающая обмотка  $ВО$  служит для компенсации увеличения регулируемого напряжения, имеющего место при увеличении частоты вращения генератора. Резистор  $R_{т,к}$  уменьшает изменение регулируемого напряжения (с 30 до 17%), вызванное изменениями температуры окружающей среды и нагревом параллельной обмотки  $ПО$ . Дальнейшую термокомпенсацию осуществляет термобиметаллическая пластина (серьга)  $ТБ$ , выполненная из инвара ЭН-36 и латуни. При повышении окружающей температуры  $ТБ$  компенсирует воздействие пружины  $РН$ .

На рис. 59.7 приведена схема одноступенчатого вибрационного реле-регулятора PP310-Б, который, кроме регулятора напряжения  $РН$ , имеет еще реле включения  $РВ$ , предназначенное для подключений обмотки возбуждения генератора при включении выключателя зажигания  $ВЗ$ . Реле-регуляторы PP115 и PP115-В с аналогичной электрической схемой имеют также реле включения.

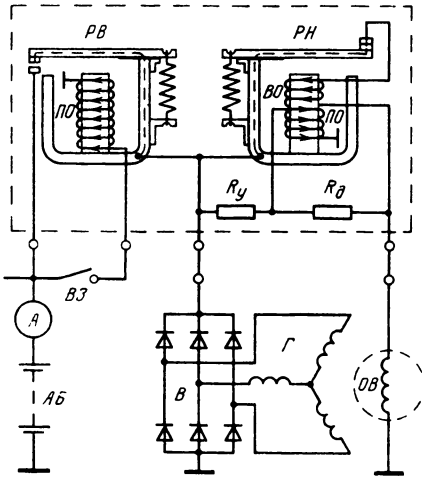


Рис. 59.7. Электрическая схема реле-регулятора PP310-Б:

*PV* – реле включения; *PH* – регулятор напряжения; *ПО* – параллельная обмотка регулятора напряжения; *ВО* – выравнивающая обмотка регулятора напряжения; *R<sub>1</sub>* – добавочный резистор; *R<sub>2</sub>* – ускоряющий резистор; *B3* – выключатель зажигания

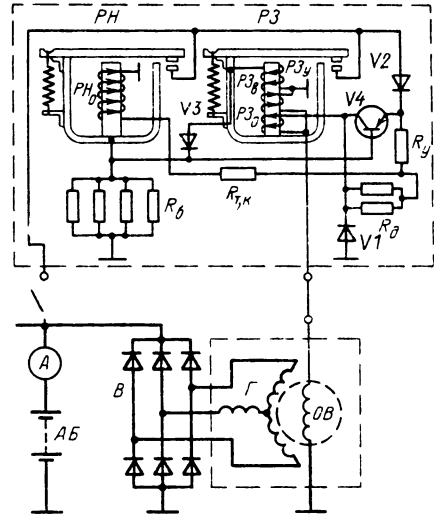


Рис. 59.9. Электрическая схема контактно-транзисторного реле-регулятора PP362:

*V1* – гасящий диод; *V2* – запирающий диод; *V3* – разделительный диод; *V4* – транзистор; *R<sub>1</sub>*, *R<sub>2</sub>* – ускоряющий и добавочный резисторы; *R<sub>6</sub>* – резисторы сопротивления базы транзистора; *PH<sub>0</sub>* – основная обмотка регулятора напряжения; *R<sub>Т,к</sub>* – резистор температурной компенсации (нихром); *P3<sub>o</sub>* – основная обмотка реле защиты; *P3<sub>y</sub>* – удерживающая обмотка реле защиты; *P3<sub>в</sub>* – выравнивающая обмотка реле защиты

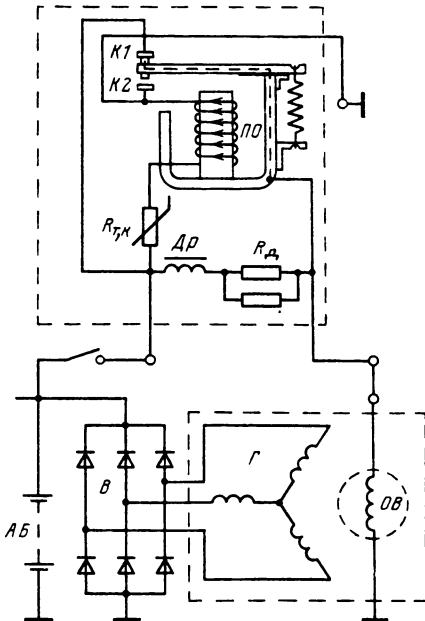


Рис. 59.8. Электрическая схема регулятора напряжения PP380:

*K1* – размыкающие контакты; *K2* – замыкающие контакты. *ПО* – параллельная обмотка регулятора напряжения. *R<sub>1</sub>* – добавочный резистор. *Др* – дроссель; *R<sub>Т,к</sub>* – резистор температурной компенсации (нихром)

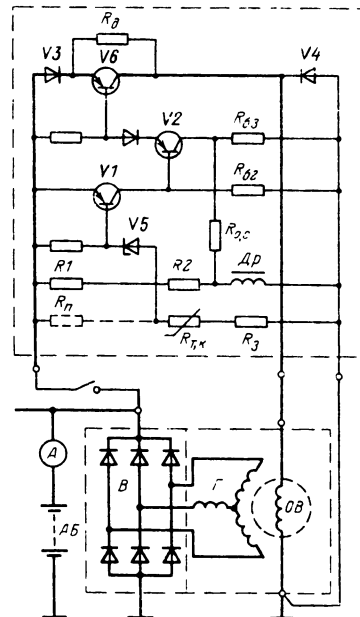


Рис. 59.10. Электрическая схема регулятора напряжения PP350





Таблица 59.11. Технические данные вибрационных реле-регуляторов

Параметр	PP310	PP127	PP115	PP115-B	PP380
Номинальное напряжение, В	14	28	14	14	14
Масса, кг	0,5	0,75	1,4	0,65	0,42
<i>Реле включения</i>					
Зазор между якорем и сердечником, мм.					
при разомкнутых контактах	0,5–0,6	—	0,5–0,6	0,5–0,6	—
при замкнутых контактах	0,2–0,3	—	0,2–0,3	0,2–0,3	
Напряжение срабатывания при температуре окружающего воздуха ( $20 \pm 5$ )°С, В	6–9	—	6–9	6–9	
<i>Регулятор напряжения</i>					
Зазор между якорем и сердечником при замкнутых контактах, мм	1,2–1,4	0,2–0,35	1,4–1,5	1,4–1,5	1,4–1,5
Регулируемое напряжение при температуре регулятора и окружающей среды 20°С, В	13,8–14,8	27,4–30,2	14–15	14–15	13,9–14,5 на II ступени; на 0,4–0,7 В меньше на I ступени
при токе нагрузки, А	10	10	20	20	7–10 на I ступени и 25–30 на II ступени
при частоте вращения, об/мин	4300	2500	3000	3000	5000

Таблица 59.12. Технические данные контактно-транзисторных реле-регуляторов

Параметр	PP362 и PP362 (модернизированный)	PP363
Номинальное напряжение, В	14	28
<i>Реле защиты</i>		
Воздушный зазор между якорем и сердечником, мм	0,7–0,8	0,8–0,9
Зазор между контактами, мм	0,2–0,3	0,7–0,8
<i>Регулятор напряжения</i>		
Воздушный зазор между якорем и сердечником, мм	1,4–1,5	1,1–1,2
Зазор между контактами, мм	0,2–0,3	0,25–0,3
Регулируемое напряжение при ( $20 \pm 15$ )°С, В:		25,5–28
при нагрузке, А	14	60
при частоте вращения, об/мин	3000 $\pm$ 150	3500 $\pm$ 150

с весьма малыми размерами, легко и удобно встраиваемые в генератор. Отечественной промышленностью выпускаются два базовых типа регуляторов: Я112 на номинальное напряжение 14 В и Я120 на 28 В. Эти регуляторы могут эксплуатироваться при перепадах температуры окружающей среды от  $-60$  до  $+85$ °С, при вибрациях до 5000 Гц с ускорением до  $400 \text{ м/с}^2$  и многократных ударах с ускорением до  $750 \text{ м/с}^2$ . Падение напряжения в выходной цепи интегральных регуляторов 1,7 В, а кратковременное максимальное допустимое напряжение 115 В. Допускается превышение температуры основания регулятора относительно температуры окружающей среды на 25°С.

Частота переключений у интегральных регуляторов составляет 25–800 Гц; рассеиваемая мощность 5,1 Вт, масса 50 г, габаритные размеры  $38 \times 58 \times 12$  мм.

Все интегральные регуляторы рассчитываются на ток обмоток возбуждения генераторов при температуре окружающей среды 25°С, не превышающий 3,3 А. Напряжение, поддерживаемое регулятором типа Я112-А, составляет  $(14,1 \pm 0,2)$  В, регулятором типа Я120-А —  $(28,5 \pm 0,3)$  В.

Таблица 59.13. Технические данные электронных регуляторов напряжения

Параметр	PP350	12.3702	PH-1	PH-2	PH-3, PH-5	PH-4	PH-6
Уровень регулируемого напряжения в номинальном режиме*1, В	13,8–14,5	13,8–14,4	13,8–14,2	13,8–14,2	13,9–14,1	13,9–14,1	13,9–14,1
Уровень регулируемого напряжения в условиях эксплуатации*2, В	13,4–14,7	13,4–14,6	13,6–14,4	13,6–14,4	13,8–14,2	13,8–14,2	13,8–14,2
Падение напряжения внутри регулятора в номинальном режиме*3, В, не более	1,8	1,8	1,8	2,0	0,9(1,8)*4	0,9(1,8)*4	0,9
Мощность контрольной лампы, Вт, не более	–	–	–	3	–	3	–
Наличие измерительного вывода	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть	Есть
Наличие устройства отключения обмотки возбуждения генератора	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть
Ток, потребляемый регулятором при выключенном зажигании, мА, не более	Не потребляет				0,5	0,5	0,5
Ток через обмотку возбуждения генератора при отключенном измерительном выводе, мА, не более	–				2,5	2,5	2,5
Температура окружающего воздуха, °С	–40 – +65	–40 – +65	–40 ÷ +65	–40 – +65	–40 – +75(+65)*4		–40 – +75
Габаритные размеры, мм, не более	138 × 115 × × 58	103 × 101 × × 74	114 × 100 × × 68	114 × 100 × × 68	100 × 94 × 69 (100 × 94 × × 63)*5	101 × 95 × 69	100 × 94 × 63
Масса, кг, не более	0,81	0,45	0,4	0,4	0,36 (0,4)*5	0,4	0,4

\*1 При температуре  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ , частоте вращения ротора генератора  $(3000 \pm 150)$  об/мин и токе нагрузки 14 А.

\*2 При изменении температуры от  $-20$  до  $+65^\circ\text{C}$ , частоте вращения ротора генератора от 2500 до 10500 об/мин и токе нагрузки от 5 до 28 А.

\*3 При температуре  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ , напряжении 12,5 В и токе обмотки возбуждения 2,5 А.

\*4 У регуляторов ранних выпусков с германиевым транзистором на выходе (до модернизации).

\*5 Для регулятора PH-5.

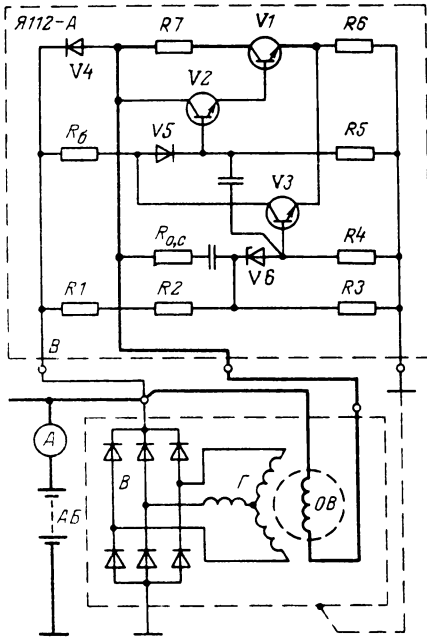


Рис. 59.13. Электрическая схема интегрального регулятора напряжения типа Я112-А

Схема регулятора напряжения типа Я112-А приведена на рис. 59.13.

Транзисторные регуляторы напряжения 12.3702 и РН-1 – РН-6 применяются вместо

регуляторов РР-380, РР-362, РР-362А, Я112-А, Я112-В в целях повышения стабильности напряжения в бортовой электросети (см. табл. 59.6 и 59.13).

Электрическая схема регулятора 12.3702 с цепями подключения на автомобиле приведена на рис. 59.14. Прибор имеет следующие основные узлы:

измерительное пороговое устройство с фильтром нижних частот на стабилитроне V1, резисторах R1 – R3 и дросселе L1;

усилитель постоянного тока на транзисторах V3, V4, нагрузкой которого является обмотка возбуждения ОБ генератора Г;

цепь нелинейной положительной обратной связи, состоящая из резисторов R4, R6 и диода V2.

Электрическая схема регулятора напряжения РН-1 с цепями подключения на автомобиле приведена на рис. 59.15. Прибор имеет два функциональных узла: измерительное пороговое устройство с фильтром нижних частот на стабилитроне V1, диоде V2, резисторах R1 – R3 и конденсаторе C1 и релейный усилитель постоянного тока на транзисторах V3 – V5, нагрузкой которого является обмотка возбуждения ОБ генератора Г.

Регулятор РН-1 состоит из тех же узлов, что и ранее описанные регуляторы РР-350 и 12.3702. Отличие его от этих регуляторов состоит в следующем. Применены современные транзисторы КТ342А и КТ608А, обладающие большими коэффициентами усиления, а также емкостный фильтр нижних частот

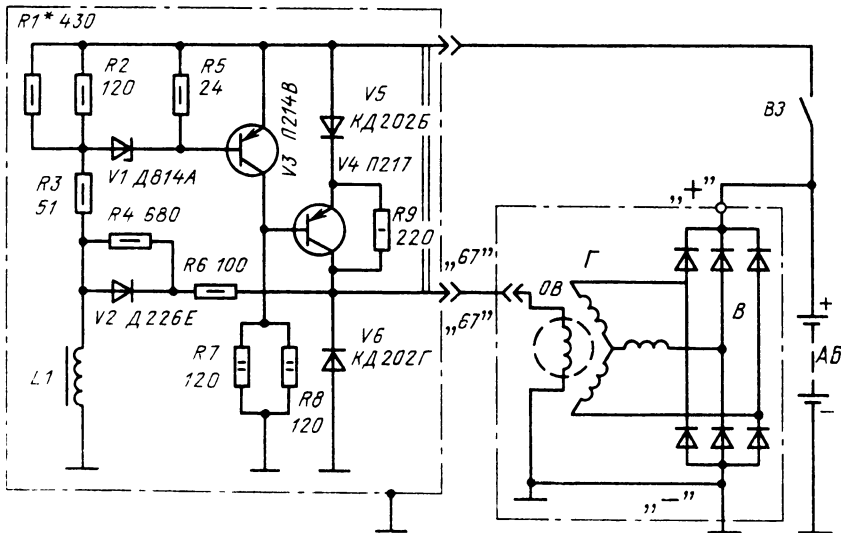


Рис. 59.14. Электрическая схема регулятора напряжения 12.3702

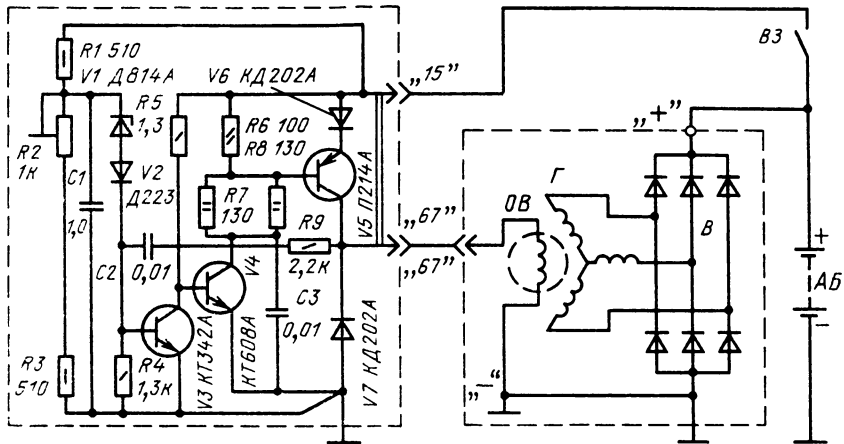


Рис. 59.15. Электрическая схема регулятора напряжения РН-1

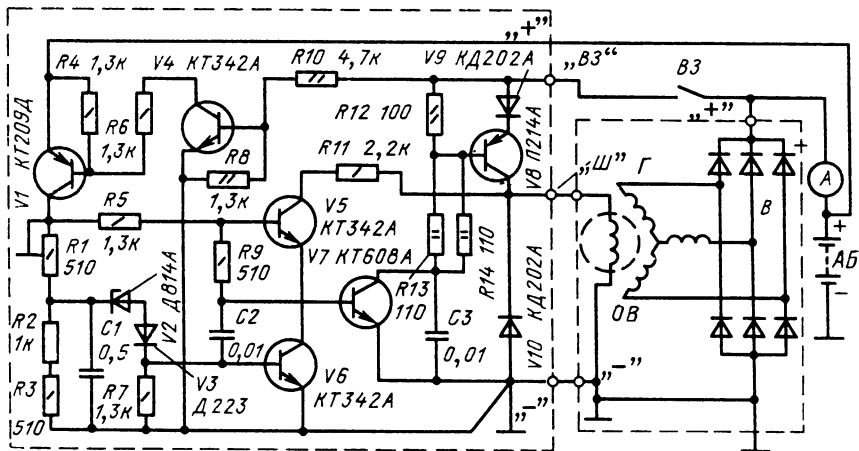


Рис. 59.16. Электрическая схема регулятора напряжения РН-3

**Р1С1.** Имеется регулировочный элемент с плавным изменением параметров (резистор R2). Последовательно со стабилитроном V1 включен диод V2, обеспечивающий компенсацию температурных изменений напряжения стабилизации стабилитрона. Цепь положительной обратной связи (R9) находится внутри усилителя постоянного тока и не охватывает пороговое устройство.

Регуляторы РН-3, РН-5, РН-6 имеют специальный измерительный вывод, подключаемый непосредственно к положительному зажиму аккумуляторной батареи, что предотвращает влияние переходных сопротивлений и нагрузок в силовой цепи регулятора на

поддерживаемое напряжение. Регуляторы РН-3, РН-5, РН-6 поддерживают напряжение в заданных пределах непосредственно на зажимах аккумуляторной батареи, а не на своих собственных, в связи с чем стабильность напряжения в бортовой электросети существенно повышается (см. табл. 59.13).

При случайном обрыве измерительного вывода регулятора, подключенного к положительному зажиму аккумуляторной батареи, обмотка возбуждения генератора обесточивается.

Регулятор РН-6 имеет, кроме того, дополнительный вывод, оканчивающийся штекером-переходником, который подключается на

автомобиле к датчику давления масла, что исключает протекание тока через обмотку возбуждения генератора при остановленном двигателе и включенном зажигании.

Регуляторы РН-3 и РН-5 имеют одинаковые электрические схемы и отличаются только конструкцией. Схема регулятора РН-6 отличается дополнительными элементами, связанными с дополнительным выводом, подключаемым к датчику масла. Конструкции регуляторов РН-5 и РН-6 одинаковы.

Электрическая схема регулятора напряжения РН-3 приведена на рис. 59.16.

Регулятор РН-3 имеет следующие основные узлы:

измерительное пороговое устройство с фильтром нижних частот на стабилитроне *V2*, диоде *V3*, резисторах *R1* – *R3* и конденсаторе *C1*;

релейный усилитель постоянного тока на транзисторах *V6* – *V8*, нагрузкой которого является обмотка возбуждения *ОВ* генератора *Г*;

ключевое устройство на транзисторах *V1*, *V4*, *V5*.

Как видно из схемы, измерительное пороговое устройство и релейный усилитель постоянного тока такие же, как и в регуляторе РН-1. Новым в схеме является ключевое устройство, состоящее из двух транзисторных ключей *V1*, *V5* и транзистора *V4*, обеспечивающего развязку измерительной и силовой цепей регулятора.

Транзисторный ключ *V1* включен в цепь измерительного порогового устройства и ре-

зистора *R5* в целях отключения их от положительного зажима аккумуляторной батареи при выключении зажигания.

Транзисторный ключ *V5* включен в цепь положительной обратной связи релейного усилителя постоянного тока и разрывает эту цепь при обрыве провода «+» регулятора, при включенном выключателе зажигания *B3*, обеспечивая тем самым запирающие транзисторов *V7*, *V8*.

Когда выключатель *B3* разомкнут, транзистор *V4* заперт, так как к его базе положительное напряжение не поступает. Следовательно, транзисторы *V1* и *V5* тоже заперты, так как первый из них отпирается током коллектора транзистора *V4*, а второй – током коллектора транзистора *V1*.

Регуляторы напряжения РН-2 и РН-4 помимо основной функции поддержания напряжения в бортовой электросети автомобиля выполняют дополнительную функцию – включают и отключают контрольную лампу заряда аккумуляторной батареи.

Электрическая схема регулятора РН-2 с цепями подключения на автомобиле приведена на рис. 59.17. Прибор имеет три функциональных узла:

измерительное пороговое устройство с фильтром нижних частот на стабилитроне *V1*, диоде *V2*, резисторах *R1* – *R3* и конденсаторе *C1*;

релейный усилитель постоянного тока на транзисторах *V3* – *V5*, нагрузкой которого является обмотка возбуждения *ОВ* генератора *Г*;

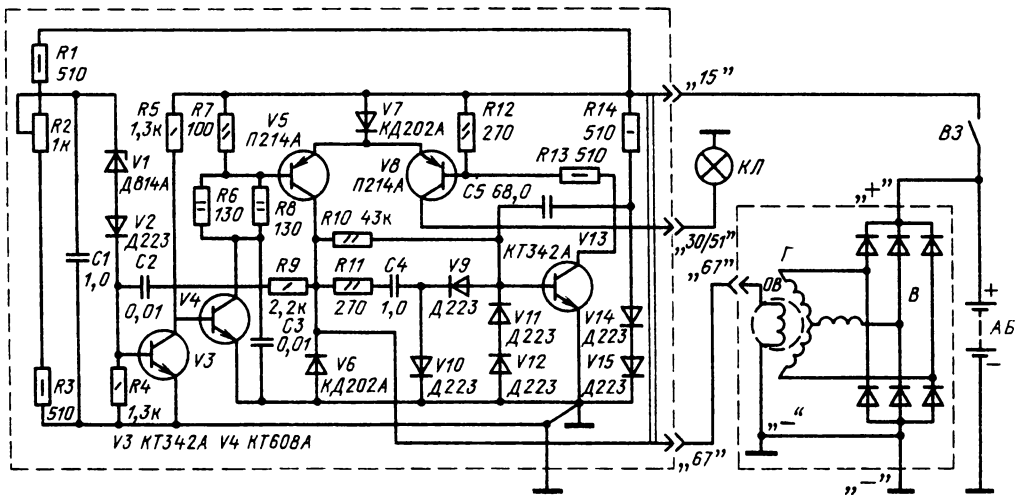


Рис. 59.17. Электрическая схема регулятора напряжения РН-2

каскад включения контрольной лампы заряда аккумуляторной батареи, состоящий из выпрямителя на диодах  $V9$ ,  $V10$  и усилителя постоянного тока на транзисторах  $V8$ ,  $V13$ , нагрузкой которого является контрольная лампа заряда аккумуляторной батареи  $КЛ$ .

Отличие регулятора РН-4 от РН-2 состоит в том, что он имеет специальный измерительный вывод, аналогичный выводу регуляторов РН-3, РН-5, РН-6, подключаемый непосредственно к положительному зажиму аккумуляторной батареи, что устраняет влияние переходных сопротивлений и нагрузок в силовой цепи регулятора на поддерживаемое напряжение.

Для стабилизации выходного напряжения тракторных генераторов используются те же типы регуляторов напряжения, что и для автомобильных генераторов, за исключением вибрационных регуляторов, которые для тракторных генераторов не применяются. Тракторные регуляторы напряжения в большинстве случаев разрабатываются как модификации автомобильных с учетом ряда особенностей.

В настоящее время для тракторных генераторов еще используются контактно-транзисторные реле-регуляторы типа РР362-Б, РР385-Б и др. Принцип их построения, назначение элементов и конструкция аналогичны регуляторам, устанавливаемым на автомобилях. Отличие схем тракторных регуляторов напряжения от автомобильных заключается в том, что в них предусмотрено изменение уровня регулируемого напряжения переключателем посезонной регулировки ППР (переключатель «Зима – Лето»). Он представляет собой винт с контактом, параллельно которому включено добавочное сопротивление в цепи основной обмотки регулятора. При разомкнутом контакте («Зима») напряжение, поддерживаемое регулятором, повышается, а при замкнутом («Лето») понижается. Этим достигается изменение напряжения настройки в пределах 0,8–1,0 В. Шлиц винта расположен на наружной части корпуса реле-регулятора.

Вместо контактно-транзисторных реле-регуляторов были разработаны бесконтактные РР356Б, РР362Б1. Схема РР356Б незначительно отличается от схемы автомобильных регуляторов РР356 и РР132 (рис. 59.11). Бесконтактный регулятор напряжения РР362Б1 предназначен для замены регулятора РР362Б. Принципиальная схема его изображена на рис. 59.18. Отличительной особенностью данного реле-регулятора является наличие в нем устройства защиты выходного транзистора  $V5$  от короткого замыкания между зажимами «-» и Ш, реализованного на транзисторах

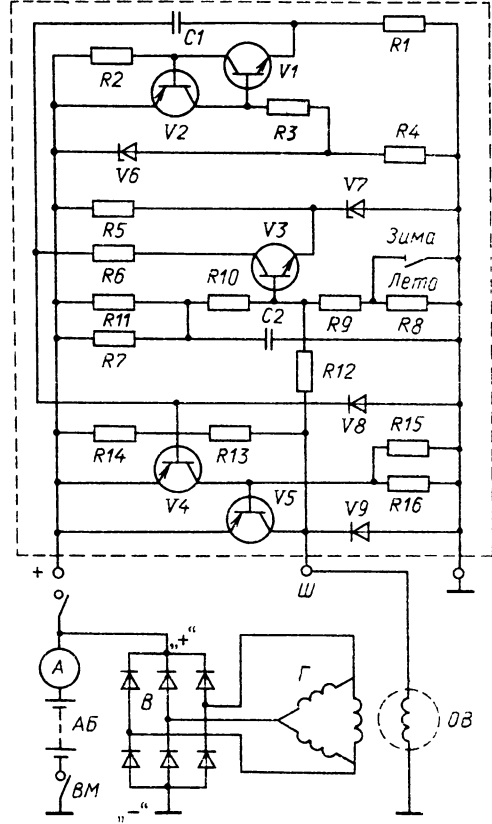


Рис. 59.18. Электрическая схема регулятора напряжения РР362Б1

$V1$ ,  $V2$ , резисторах  $R1 - R4$ , стабилитроне  $V6$ , конденсаторе  $C1$  и резисторе  $R13$ . Это устройство представляет собой тактовый генератор кратковременных импульсов длительностью 10–20 мкс с частотой 250–400 Гц, который воздействует на  $V4$ , а тем самым и на  $V5$ . Указанные параметры импульсов обеспечиваются выбором постоянных времени заряда и разряда конденсатора  $C1$ . При нормальной работе в силу малой длительности импульсов и достаточно высокой их частоты устройство защиты не влияет на работу реле-регулятора. При коротком замыкании между зажимами «-» и Ш транзистор  $V4$  из-за наличия  $R13$  находится в открытом состоянии большую часть периода тактовых импульсов и запирается только во время действия импульса. Следовательно, транзистор  $V5$  открыт также во время действия импульса, а так как оно мало, то потери мощности в  $V5$  незначительны и он не выходит из строя.

Реле-регулятор РР362Б1 обеспечивает поддержание выходного напряжения в диапазоне 13,6–14,2 В (в положении переключателя «Лето»). Конструктивно он выполнен в виде отдельного блока; его масса составляет 0,2 кг.

В настоящее время для стабилизации выходного напряжения тракторных генераторов используются гибридные интегральные регуляторы напряжения, которые непосредственно встраиваются в генератор. Их принципиальная схема и элементы аналогичны интегральным регуляторам типов Я112А и Я112АТ, устанавливаемым на автомобилях. Они выпускаются в обычном (Я112Б) и тропическом (Я112БТ) исполнениях.

В отличие от автомобильных в них вход и выход разделены и предусмотрен специальный дополнительный вывод для «навесного» подключения сопротивления посезонной подрегулировки напряжения и конденсатора фильтра. Последний необходим из-за высокого уровня пульсаций выпрямленного напряжения тракторных генераторов.

Так как замок зажигания на тракторах и сельхозмашинах в большинстве случаев отсутствует, то с целью устранения разряда аккумуляторной батареи через обмотку возбуждения генератора при неработающем двигателе питание регулятора напряжения осуществляется от генератора не через основной силовой выпрямитель, а через двухполупериодный трехфазный выпрямитель, состоящий из трех силовых диодов отрицательной полярности основного выпрямителя и трех дополнительных диодов положительной полярности.

Точность стабилизации выходного напряжения такими регуляторами в режиме «Лето» составляет (13,6 ± 0,2) В. Изменение напряжения при переходе от режима «Зима» к режиму «Лето» составляет 0,8 В.

### 59.3. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

#### Электрические схемы и данные систем зажигания

Системы зажигания, устанавливаемые на поршневых двигателях внутреннего сгорания, предназначены для воспламенения топливной рабочей смеси в цилиндрах двигателя. Наибольшее распространение на автомобильных двигателях нашли батарейные системы зажигания.

На рис. 59.19 приведена принципиальная схема контактной (классической) системы батарейного зажигания, которая состоит из следующих элементов: источника питания — аккумуляторной батареи 1; катушки зажигания 3, преобразующей низкое напряжение аккумуля-

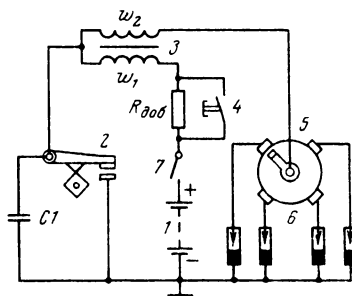


Рис. 59.19. Электрическая схема батарейной системы зажигания

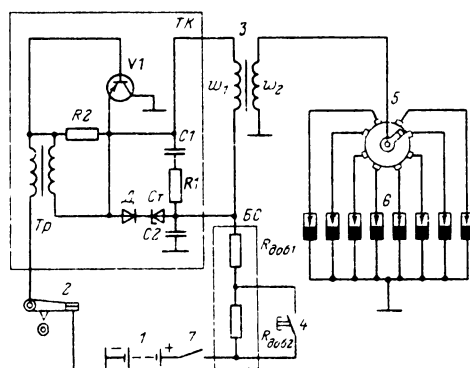


Рис. 59.20. Электрическая схема контактно-транзисторной системы зажигания на одном транзисторе

ляторной батареи в импульсы высокого напряжения; искровых свечей зажигания 6; распределителя зажигания, имеющего низковольтный прерыватель 2 и распределитель 5 импульсов высокого напряжения; выключателя (замка) зажигания 7; выключателя 4; добавочного резистора Rдоб, заблокированного с выключателем стартера.

Параллельно контактам прерывателя 2 подключен конденсатор C1 для уменьшения искрения на контактах. Кроме того, конденсатор C1 является необходимым элементом колебательного контура.

При пуске двигателя на период включения стартера резистор Rдоб замыкается накоротко. При этом уменьшается сопротивление первичной цепи катушки зажигания для компенсации снижения напряжения питания. Напряжение на свечах составляет 12–23 кВ.

Условия применения и общие технические требования к батарейным системам

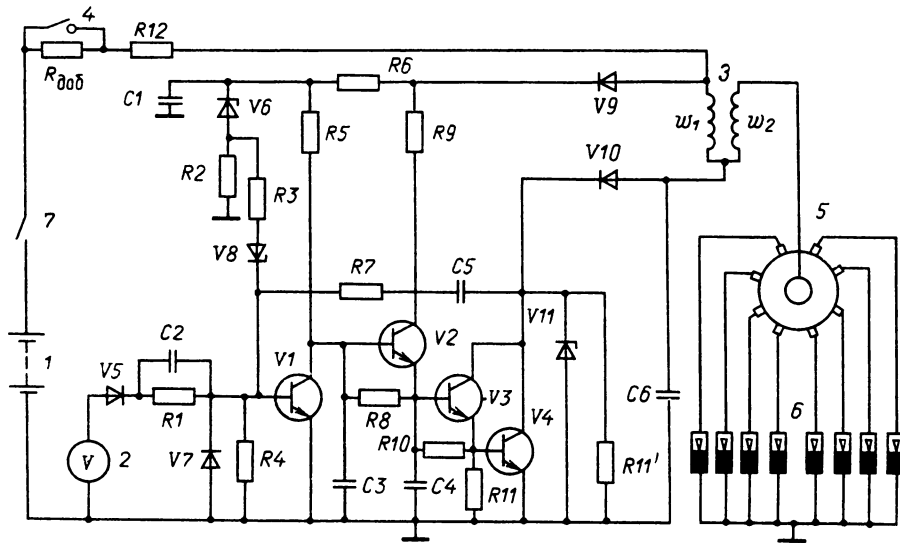


Рис. 59.21. Электрическая схема системы зажигания «Искра»

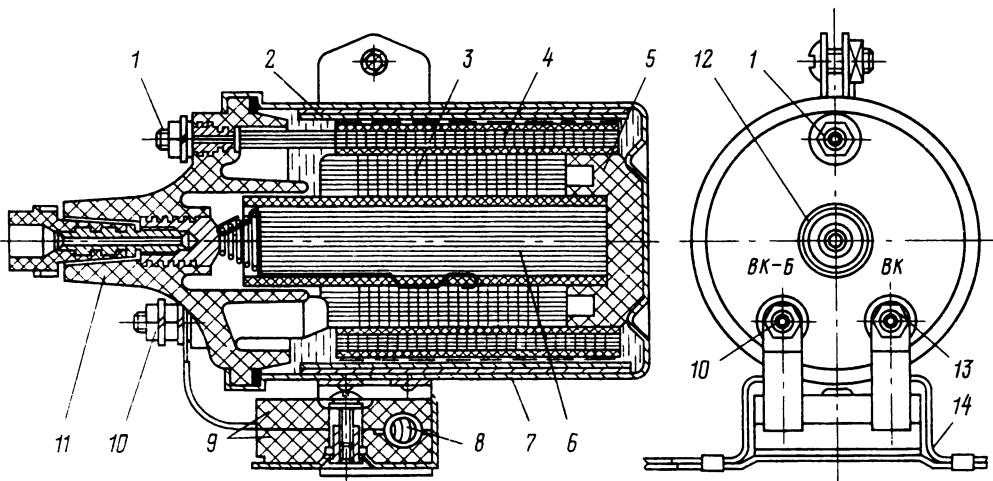


Рис. 59.22. Катушка зажигания типа Б115:

1 – низковольтный вывод (соединяется с прерывателем); 2 – наружный магнитопровод, 3 – вторичная обмотка; 4 – первичная обмотка; 5 – торцевой изолятор; 6 – сердечник; 7 – кожух; 8 – добавочный резистор, 9 – изолятор добавочного резистора; 10 – низковольтный зажим ВК-Б (присоединяется к аккумуляторной батарее); 11 – высоковольтная крышка; 12 – вывод высокого напряжения; 13 – низковольтный зажим ВК (присоединяется к добавочному резистору), 14 – установочная скоба

зажигания определяются, как и для всего автотракторного электрооборудования, по ГОСТ 3940-84 «Электрооборудование автотракторное». Присоединительные размеры для распределителей батарейного зажигания автомобильных двигателей определяются ГОСТ 3286-75 «Распределители батарейного

зажигания автомобильных двигателей». Параметры, размеры, технические требования на искровые свечи определяются ГОСТ 2043-74 «Свечи зажигания искровые», допустимые напряженности поля радиопомех – ГОСТ 17822-78.

Появление полупроводниковых приборов



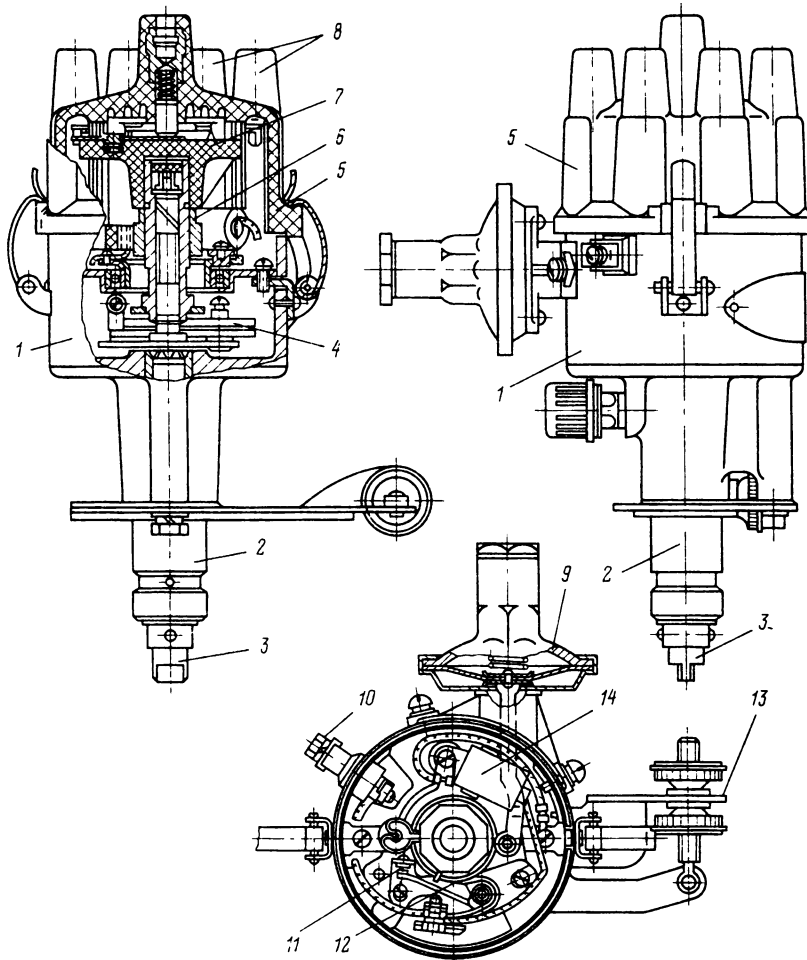


Рис. 59.23. Восьмикровый распределитель типа P-137:

1 – корпус; 2 – посадочный палец; 3 – валик; 4 – центробежный автомат; 5 – изоляционная крышка. 6 – кулачок прерывателя; 7 – бегунок; 8 – гнезда для высоковольтных проводов, 9 – вакуумный автомат. 10 – низковольтный зажим; 11 – неподвижный контакт прерывателя, 12 – втулка, 13 – октан-корректор

с необходимыми характеристиками позволило создать более надежные контактно-транзисторные системы батарейного зажигания.

На рис. 59.20 приведена электрическая схема контактно-транзисторной системы зажигания с транзисторным коммутатором на одном мощном транзисторе. Основными элементами системы являются катушка зажигания 3 (типа Б114); распределитель зажигания, состоящий из прерывателя 2 и распределителя 5; выключатель зажигания 7; транзисторный коммутатор ТК (ТК102); блок резисторов БС (СЭТ107), состоящий из двух резисторов:  $R_{\text{доб1}}$  (0,5 Ом) и  $R_{\text{доб2}}$  (0,5 Ом);

выключатель 4 резистора  $R_{\text{доб2}}$ , заблокированный с выключателем стартера; свечи 6.

Транзисторный коммутатор ТК содержит мощный транзистор  $V1$  (ГТ701А); стабилитрон  $St$  (Д817В); диод  $D$  (Д7Ж); специальный двухобмоточный трансформатор  $Tr$ , конденсаторы  $C1$  (1 мкФ) и  $C2$  (50 мкФ), резисторы  $R2$  (20 Ом) и  $R1$  (2 Ом). Система питается от аккумуляторной батареи 1 с напряжением 12 В. Первичная обмотка катушки зажигания включена в цепь эмиттера транзистора, а контакты прерывателя – в цепь его базы. Трансформатор  $Tr$  предназначен для активного запирающего транзистора  $V1$ .

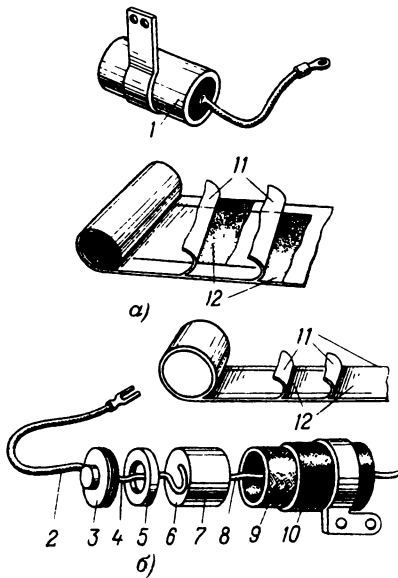


Рис. 59.24. Крупногабаритный (а) и малогабаритный (б) конденсаторы:

1 — корпус; 2 — подводящий провод; 3 — текстолитовая шайба; 4 — гибкий проводник; 5 — пластмассовая шайба; 6 — торец рулона; 7 — рулон; 8 — гибкий проводник; 9 — кабельная бумага; 10 — корпус; 11 — конденсаторная бумага; 12 — алюминиевая лента

Находят применение также еще более надежные бесконтактные транзисторные системы зажигания, например система «Искра», предназначенная для автомобилей ЗИЛ-131, Урал-375Д и др. Система «Искра-ГАЗ» (рис. 59.21), являющаяся модификацией систе-

мы «Искра», состоит из следующих элементов: аккумулятора 1; катушки зажигания 3 (Б116); датчика-распределителя зажигания (Р351), включающего в себя магнитоэлектрический бесконтактный датчик 2 импульсов момента зажигания и высоковольтный распределитель 5; искровых свечей 6; выключателя зажигания 7; транзисторного коммутатора (13.3734), добавочного резистора  $R_{доб}$  (проволочного сопротивлением 0,6–0,8 Ом) и выключателя, сблокированного с выключателем стартера.

В транзисторном коммутаторе использованы мощный высоковольтный транзистор V4 (КТ848) и транзисторы управляющего каскада V1–V3 марки КТ630. В цепь коллектора V4 включена первичная обмотка w1 катушки зажигания 3. Диод V5 и резистор R1 защищают переход база–эмиттер от перенапряжений и перегрузок по току. Резисторы R8, R10, R11 обеспечивают надежное запирающее действие транзисторов V2–V4 при отпирании V1. Конденсаторы C3, C4 защищают базовые переходы V2 и V3 от перенапряжений. Диод V9 защищает транзисторы V1 и V2 от перегрузок при случайной перемене полярности аккумуляторной батареи в эксплуатации. Диод V10 предохраняет транзистор V4 от инверсного включения во время переходного процесса в катушке зажигания 3. Стабилитрон V11, резистор R11' и конденсатор C6 защищают коллектор–эмиттерный переход транзистора V4 от перенапряжений.

Для улучшения работы схемы в режиме пуска при малой частоте вращения валика распределителя для ускорения процесса переключения транзистора V4, когда скорость

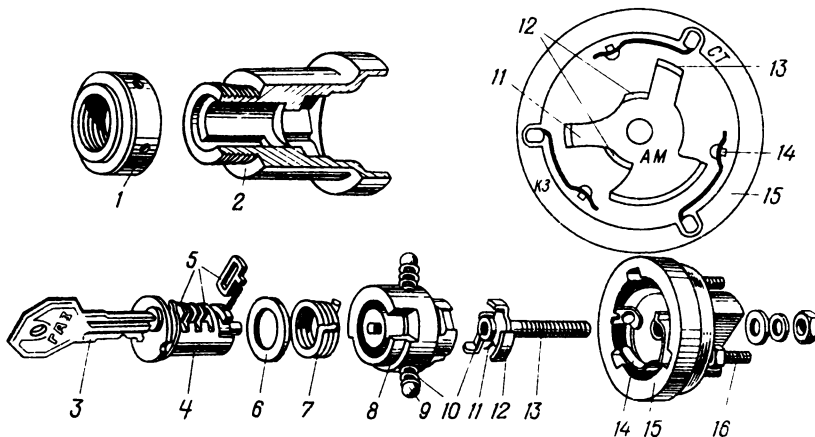


Рис. 59.25. Выключатель зажигания:

1 — гайка; 2 — корпус; 3 — ключ; 4 — цилиндр; 5 — замочные пластины; 6 — упорное кольцо; 7 — возвратная пружина; 8 — пластмассовая колодка; 9 — шариковый фиксатор; 10 — пружина; 11 — ротор; 12 — поводки ротора; 13 — контактные сегменты ротора; 14 — пружинящая пластина с контактом; 15 — пластмассовая панель; 16 — 4М, КЗ, СТ, Пр — зажимы выключателя

Таблица 59.14. Основные данные

Параметр	Контактная (классическая) система багарейного зажигания					
	Б1	Б5-А	Б7-А	Б13	Б115	
Автомобили	«Москвич-402, -407, -408»; ЗАЗ-965, -996, УАЗ-451; ЗИЛ-164, ГАЗ-51, -53	ГАЗ-66, ЗИЛ-158	ГАЗ-21	ГАЗ-13, -53, ЗИЛ-111, -130,	«Москвич-412, -2138, -2140», ГАЗ-24, ЗАЗ-968	
Число витков первичной обмотки	330	320	330	270	330	
Диаметр провода, мм	0,72	0,77	0,72	0,72	0,72	
Число витков вторичной обмотки	19000	17500	22500	26000	22500	
Диаметр провода, мм	0,1	0,09	0,07	0,07	0,07	
Сопротивление добавочного резистора, Ом	1,40	1,06	1,05	1,85	1,05	
Масса катушки, кг	0,875	0,970	0,845	0,84	0,95	

Таблица 59.15. Основные

Параметр	Р119-Б	Р125, Р125-Б	Р107, Р118	Р3-Б	Р4-В, Р4-В2, Р4-Д, Р137
Автомобили	ГАЗ-24	ВАЗ-2101 и модификации	«Москвич-408, -412»	ГАЗ-21	ЗИЛ-130 и модификации
Число выступов кулачка прерывателя	4	4	4	4	8
Зазор между контактами прерывателя, мм	0,35—0,45	0,40—0,45	0,35—0,40	0,35—0,40	0,30—0,40
Емкость конденсатора, мкФ	0,17—0,25	0,20—0,25	0,17—0,25	0,25—0,35	0,25—0,35
Диапазон регулировки угла опережения зажигания, град:					
с центробежным регулятором	0—19	0—16	0—17	0—19	0—19
с вакуумным регулятором	0—9,5	—	0—9,5	0—13	0—14

нарастания напряжения датчика является недостаточной, введена положительная обратная связь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора *C5* и резистора *R7*.

Для защиты транзисторного коммутатора от перенапряжений в цепи питания применена цепь *V6*, *V8*, *R2*, *R3*. При повышении напряжения питания свыше 18 В стабилитрон *V6* пробивается и транзистор *V1* открывается, вследствие чего *V2* — *V4* оказываются запертыми в течение времени действия импульса перенапряжения. Питание системы осуществляется от аккумуляторной батареи.

Достоинством системы «Искра-ГАЗ» являются значительно меньшие по сравнению с системой «Искра» углы смещения момента искрообразования (в пределах 1—2°). Про-

мышленностью выпускаются помимо транзисторных также конденсаторно-тиристорные системы зажигания, предназначенные для установки на легковых автомобилях [59.10].

#### Аппараты систем зажигания

К аппаратам систем зажигания относятся катушка зажигания, распределитель, искрогасящий конденсатор, выключатель и свечи зажигания.

Общий вид катушки зажигания приведен на рис. 59.22. Основные данные выпускаемых в настоящее время отечественных автомобильных катушек для батарейных систем зажигания приведены в табл. 59.14.

## автомобильных катушек зажигания

	Транзисторная система зажигания				
	Б117-А	Б111	Б114	Б118	Б-116
ВАЗ-2101, -2102, -2103, -2106	ЗИЛ-111, -114, -117, ГАЗ-14, -24	ЗИЛ-130; ГАЗ-53, -56, ПАЗ-612	УралАЗ-375; ЗИЛ-130Е, -131, -137	ВАЗ-2108, ЗИЛ-130	
302	185	180	260	200	
0,53 23 700	1,35 40 000	1,25 41 000	1,06 30 250	1,02 18 000	
0,07 —	0,06 1,00	0,06 1,00	0,06 0,60	0,071 0,6	
1,705	1,060	1,060	0,880	0,88	

## данные распределителей

Р13-В, В13-Д, Р133	Р20	Р21-А	Р23-Б	Р32	Р114, Р114-Б	40.3706
ГАЗ-53 и модификации	ГАЗ-51, -52, -66	ЗИЛ-150, -157, -158В	ГАЗ-69; УАЗ-450	УралАЗ-355М и модификации	ЗАЗ-965А, -966В, -968	ВАЗ-2108
8	6	6	4	6	4	4
0,30—0,40	0,35—0,45	0,35—0,45	0,35—0,45	0,35—0,45	0,35—0,45	—
0,25—0,35	0,17—0,25	0,17—0,25	0,17—0,25	0,17—0,25	0,17—0,25	—
0—15,5	0—13,5	0,10	0—9	0—12	0—16	0—16
0—10	0—10	0—12	0—9	0—12	0—6	0—9

На рис. 59.23 приведен чертеж распределителя типа Р-128.

Основные данные распределителей зажигания приведены в табл. 59.15.

Конденсаторы выпускаются в крупногабаритном и малогабаритном исполнениях (рис. 59.24). Для первичной цепи систем зажигания применяют конденсаторы емкостью 0,17—0,35 мкФ.

В настоящее время выпускаются выключатели зажигания типов ВК21-Д, ВК21-Е и ВК-21-К. Общий вид выключателя зажигания приведен на рис. 59.25.

Общий вид свечи зажигания приведен на рис. 59.26.

Маркировка свечей следующая (ГОСТ 2043-74): а) диаметр ввертной части

18 мм обозначается буквой М, 14 мм — буквой А и 10 мм — буквой Т; б) число после буквы обозначает длину нижней части конуса изолятора, мм; в) буквенные обозначения после числа обозначают материал изолятора (У — уралит, Б — боркорунд, С — синоксаль, Х — силумин).

Технические характеристики свечей зажигания приведены в табл. 59.16.

На тракторах и дорожных машинах с карбюраторными двигателями, у которых отсутствует аккумуляторная батарея или требуется повышенная надежность и независимость зажигания от аккумуляторной батареи, используется зажигание от магнето.

Магнето представляет собой магнитоэлектрическую машину небольшой мощности,

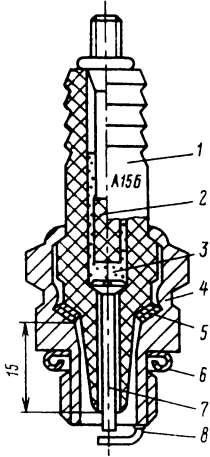


Рис. 59.26. Свеча зажигания:  
 1 — изолятор; 2 — контактный стержень; 3 — токопроводящий стеклогерметик; 4 — металлический корпус; 5 — теплоотводящая шайба, 6 — керамическая втулка, 7 — центральный электрод, 8 — боковой электрод

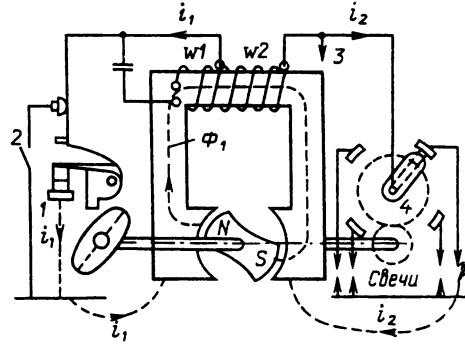


Рис. 59.27. Электрическая схема магнето:  
 1 — прерыватель, 2 — выключатель зажигания; 3 — предохранительный промежуток, 4 — распределитель; w1, w2 — первичная и вторичная обмотки трансформатора; С — конденсатор первичной контура

в которой конструктивно объединены магнитоэлектрический генератор, индукционная катушка (трансформатор) и прерыватель с распределителем. По своему устройству магнитная система магнето может выполняться с вращающимся якорем, вращающимся коммутатором и вращающимся магнитом. Последняя получила наибольшее распространение. Электрическая цепь у магнето всех систем одинакова (рис. 59 27), в нее входит первичная w1 и вторичная w2 обмотки трансформатора, прерыватель 1, конденсатор С, выключатель зажигания 2, предохранительный промежуток 3, распределитель высокого напряжения 4.

При вращении ротора магнитный поток  $\Phi_1$  в сердечнике трансформатора периодически изменяет свое значение и направление, за счет чего в обмотке w1 возникает ЭДС, которая создает первичный ток  $i_1$ . Этот ток создает свой магнитный поток. В момент максимума  $i_1$  прерыватель 1 размыкает первичную цепь, при этом ток и созданный им поток резко уменьшаются до нуля. Благодаря этому в обмотке w2, так же как и в системе батарейного зажигания, индуцируется высокая ЭДС, которая через распределитель 4 подается на свечи.

Таблица 59.16. Технические данные свечей зажигания

Тип свечи зажигания по ГОСТ 2043-74	Калильное число	Искровой зазор, мм	Длина резьбы, мм	Размер под ключ, мм	Грузовой и/ли легковой автомобиль
A17B	17	0,7—0,85	12	20,8	ГАЗ-24Д Все модификации двигателя ВАЗ Автомобили с двигателями МемЗ-968, -968-А
A17ДВ	17	0,5—0,6	19	20,8	
A23	23	0,7—0,85	12	20,8	
A11	11	0,7—0,85	12	20,8	ЗИЛ-130 и его модификации, УАЗ-451, ГАЗ-24, УралАЗ-377 АЗ-965, -966, -968-Б «Москвич-408, -426, -2138», ГАЗ-53, МемЗ-965
A13H	13	0,6—0,75	12	22	
A11H	11	0,6—0,75	12	22	
A10H	10	0,8—0,95	12	22	УАЗ-451, ГАЗ-53, ПАЗ-672 ЗИЛ-152, -157, -164 ЗИЛ-130 и его модификации «Москвич-412, -2140»
A16У	7	0,6—0,75	11	22	
A15	15	0,8—0,95	12	20,8	
A20Д	20	0,8—0,95	19	20,8	ГАЗ-51, -69, УАЗ-450, Урал АЗ-355М
M8T	8	0,6—0,75	12	24	

Примечания 1 Искровые свечи имеют массу примерно 0,06 кг  
 2. Резьба на корпусе свечей M14 × 1,25 (у M8T — M18 × 1,5)

Таблица 59.17. Пределы изменения частоты вращения при бесперебойной работе магнето

Тип двигателя	Марка магнето	Частота вращения, об/мин	
		минимальная	максимальная
ПД-10У, П10-УД, П-350	М124-Б3	250	4500
ПД-10У, П10-УД, П-350	М24-Б	200	3500
Д-300	М25-Б	200	3000
М-600	М27-Б2	200	4500
2СД-В	М30-Б1	200	4500
П46, П23	М47-Б1	200	3000
П23М, СМ557Л	М48-Б2	200	3000
УД2-М1	М-68-Б	250	3500
ПД23, ПД-46	М10-А	200	4500
ПД8М	М130	200	5200
МП-800	М135	250	4500
УД-15	М137	200	5400
УД-25	М151	150	4500
П23М, П700	М148	200	4500
П701, П23, П46	М149	200	3000
	15.3728	200	5700
	13.3728	200	4000

Важным параметром магнето является минимальная частота вращения, при которой обеспечивается бесперебойно искрообразование. Чем меньше эта частота, тем выше пусковые качества магнето. Диапазон частот вращения при бесперебойном искрообразовании приведен в табл. 59.17, где также указаны типы двигателей, для которых используется зажигание от магнето.

Разработаны два типа бесконтактных магнето (для пусковых двигателей типа 15.3728, для стационарных — 13.3728), в которых контактный прерыватель заменен тиристорным и которыми заменят 15 модификаций, используемых ранее.

В магнето всех марок предусматривается защита от перенапряжения с помощью предохранительного разрядника. Электрод его располагается на расстоянии 10–12 мм от вывода высокого напряжения.

При установке магнето на двигатель важно точно зафиксировать установочный угол опережения зажигания.

Для улучшения пуска дизелей используют систему калильного зажигания, обеспечивающую воспламенение рабочей смеси непосредственно в камере сгорания. В каждом цилиндре помещается по одной калильной свече, свечи соединяются между собой последовательно или параллельно. При прохождении тока через спираль свечи она раскаляется докрасна (800–900°C), что и обеспечивает воспламенение рабочей смеси. По своей кон-

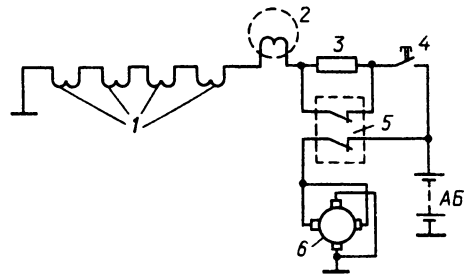


Рис. 59.28. Схема включения калильных свечей зажигания:

1 — свечи накаливания; 2 — контрольный элемент; 3 — добавочное сопротивление; 4 — кнопка включения; 5 — выключатель стартера; 6 — стартер

струкции калильные свечи бывают однополюсными и двухполюсными. У первых один конец нагревательной спирали выведен к наружному зажиму, второй соединен с массой. Такие свечи включаются только параллельно. У двухполюсных оба конца спирали изолированы от массы, поэтому они могут соединяться и последовательно.

Спираль накаливания изготавливается из нихрома или других хромоникелевых, а также железоникелевых сплавов. Материал спирали должен обладать высоким удельным сопротивлением и стойкостью против коррозии при высоких температурах.

Основными характеристиками калильных свечей зажигания являются: время нагрева до температуры, необходимой для воспламенения (500–900°C), и срок службы. Время нагрева обычно не превышает 1 мин. Срок службы зависит от материала спирали и температуры ее нагрева. Спирали, изготовленные из хромоникелевой стали, выдерживают до 500 тыс. включений. Тепловая мощность калильных свечей составляет 70–120 Вт.

Двухполюсные свечи накаливания 1 (рис. 59.28) включаются последовательно с контрольным элементом 2 и добавочным сопротивлением 3. Контрольный элемент служит для проверки степени нагрева свечей накаливания при включенной кнопке 4, а добавочное сопротивление — для ограничения тока. В момент пуска двигателя добавочное сопротивление частично или полностью закорачивается дополнительными контактами выключателя 5 стартера 6, чтобы скомпенсировать падение напряжения аккумуляторной батареи.

Однополюсные свечи подключаются к аккумуляторной батарее через кнопку, контрольный элемент и дополнительное сопротивление (не всегда).

Калильные свечи могут быть расположены не только в камере сгорания, но и во

впускном трубопроводе (коллекторе), где подогревают входящий воздух.

## 59.4. СТАРТЕРЫ

### Устройство стартеров

Двигатели внутреннего сгорания автомобиля не имеют пускового момента, т. е. для начала самостоятельной работы вал двигателя необходимо раскрутить пусковым устройством до вполне определенной минимальной частоты вращения, называемой пусковой. При проворачивании вала двигателя пусковому устройству приходится преодолевать момент сопротивления, определяемый трением поршней о стенки цилиндра, трением в подшипниках и потерями на компрессию. Произведение пусковой частоты вращения и момента сопротивления определяет мощность пусковой системы.

Пусковая частота вращения определяется типом двигателя (для дизелей 100–200 об/мин, карбюраторных двигателей 40–70 об/мин), температурой двигателя при запуске, наличием средства облегчения запуска (для дизелей).

Для автомобилей в качестве пусковых устройств используются электрические стартеры. Электрический стартер состоит из электродвигателя, привода стартера (механизма сцепле-

ния и расцепления и редуктора) и аппаратуры управления.

Для согласования характеристики стартерного электродвигателя и пусковой характеристики двигателя внутреннего сгорания между валами этих двигателей устанавливают редуктор. Редуктор обычно состоит из шестерни на валу стартера (с малым числом зубцов) и шестерни на венце маховика двигателя внутреннего сгорания. Имеются конструкции стартеров с добавочным встроенным редуктором с еще одной парой шестерен. Для увеличения передаточного отношения редуктора необходимо выполнять шестерню стартера с возможно малым числом зубцов — от 9 до 13, а в отдельных случаях с семью и даже пятью зубцами. Передаточное отношение редуктора при этом равно 13–18. Чтобы избежать при таком малом числе зубцов подрезания ножки зубца, применяют так называемое коррегированное эвольвентное зацепление шестерен.

Чтобы облегчить вхождение шестерни стартера в зацепление с шестерней маховика, между зубцами шестерен за счет увеличения межцентрового расстояния создается боковой зазор 0,4–1,0 мм. Наличие бокового зазора приводит к увеличению износа шестерен и потерь в редукторе. Поэтому КПД передачи с учетом еще наличия открытых

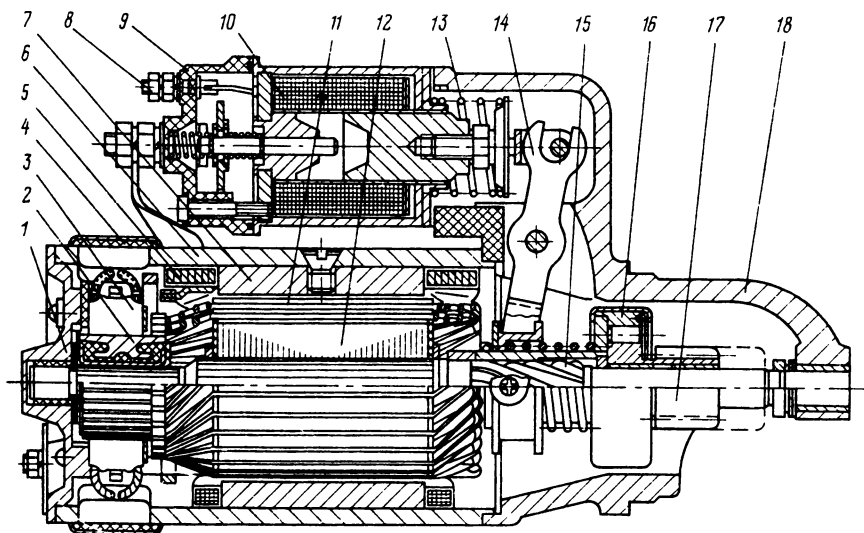


Рис. 59.29. Стартер.

1 — крышка со стороны коллектора, 2 — коллектор; 3 — щетка; 4 — защитная лента; 5 — обмотка возбуждения; 6 — корпус; 7 — полюс, 8 — вывод реле стартера; 9 — крышка реле стартера РС, 10 — обмотка реле РС; 11 — обмотка якоря, 12 — пакет якоря; 13 — возвратная пружина привода; 14 — рычаг привода; 15 — вал; 16 — муфта свободного хода; 17 — шестерня; 18 — крышка со стороны привода

для загрязнения поверхностей шестерен составляет в среднем 0,83–0,87.

Механизм сцепления и расцепления служит для ввода шестерни стартера в зацепление с шестерней маховика двигателя и расцепления их после запуска. Ввод шестерни в зацепление производится принудительно. Автоматическое расцепление обеспечивается или муфтами свободного хода, или специальным механизмом.

Общий вид стартера приведен на рис. 59.29.

Управление стартером может быть непосредственным, когда водитель педалью замыкает механический выключатель в цепи стартера и вводит шестерню в зацепление, и дистанционным, когда водитель для запуска замыкает цепь вспомогательного реле (рис. 59.30).

При дистанционном управлении подключение стартерного электродвигателя к аккумуляторной батарее *АБ* обеспечивается реле стартера *РС*, укрепленным на корпусе стартера и служащим одновременно тяговым реле привода для введения шестерни стартера в зацепление с маховиком. Реле *РС* с двумя обмотками – включающей *В* и удерживающей *У* – имеет большой ход (10–12 мм), большое усилие (200–300 Н). Наличие включающей обмотки, работающей одновременно только в процессе включения стартера и шунтируемой затем контактами *РС*, позволяет заметно снизить размеры и массу реле (за счет выбора высокой плотности тока в этой обмотке). Стартеры для пусковых двигателей дизелей и стартеры тяжелых мотоциклов выполняются и без привода. Для уменьшения осевой длины стартеров они иногда выполняются без подшипникового щита со стороны привода.

Чтобы сделать невозможным включение стартера при работающем двигателе автомобиля (при таком включении разрушаются шестерни стартера и маховика), требуется специальная защита или блокировка. Эта блокировка достигается различными способами. На рис. 59.30 представлена одна из возможных схем, применяемая на автомобилях. В этой схеме имеется реле блокировки *РБ* с размыкающими контактами и вспомогательное реле *ВР* с замыкающими контактами. Шунтовая обмотка *Ш* реле *РБ* включена через выпрямитель *В2* на две фазы обмотки якоря генератора, а обмотка *П* включена последовательно с обмоткой реле *ВР*. Обмотка *П* служит для обеспечения более четкого срабатывания реле (снижения коэффициента возврата). После заводки двигателя начинает работать генератор, появляется напряжение на его выводах, и при определенной частоте вращения двигателя про-

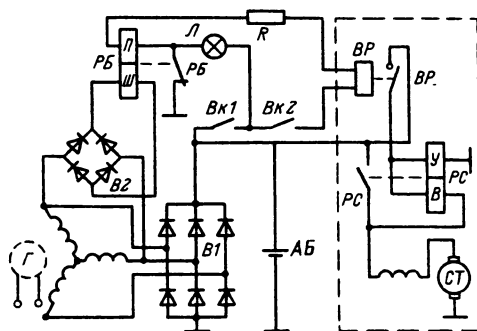


Рис. 59.30. Электрическая схема дистанционного управления стартером:

*Г* – генератор; *В1* – силовой выпрямитель; *В2* – выпрямитель реле блокировки; *R* – балластный резистор; *ВК1* и *ВК2* – контакты замка зажигания; *ВР* – вспомогательное реле; *АБ* – аккумуляторная батарея; *СТ* – стартер; *РС* – реле стартера; *РБ* – реле блокировки; *Л* – сигнальная лампа; *Ш* – шунтовая обмотка; *П* – последовательная обмотка

исходит срабатывание реле *РБ*, его размыкающие контакты разрывают цепь обмотки реле *ВР*, которое отключает стартер от батареи. При этом уменьшается разряд батареи, уменьшается время проскальзывания муфты свободного хода и уменьшается ее износ. Размыкание контактов *РБ* делает невозможным включение стартера (при замыкании контактов *ВК1* и *ВК2* в замке зажигания) при работающем двигателе автомобиля. Реле блокировки выполняет еще и другую функцию – управляет сигнальной лампой *Л*. После срабатывания реле *РБ* цепь лампы *Л* разрывается, лампа гаснет, указывая, что напряжение генератора достигло номинального и он включился на параллельную работу с аккумуляторной батареей.

#### Основные данные стартерных электродвигателей

Основные технические данные электростартеров приведены в табл. 59.18.

В качестве электродвигателей стартеров обычно используются коллекторные электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения, и только в электродвигателях быстроходных и мощных стартеров для ограничения частоты вращения холостого хода применяют смешанное возбуждение. Двигатели выполняются обычно четырехполюсными с цилиндрическим арочным коллектором. Для уменьшения осевой длины и расхода меди стартерные электродвигатели малой мощности (при диаметре корпуса не более 100 мм)



Таблица 59 18 Технические данные стартеров

Тип стартера	Тип автомобиля или трактора	Наружный диаметр корпуса, мм	Номинальное напряжение, В	Емкость батареи, А·ч	Номинальная мощность, кВт	Частота, соответствующая номинальной мощности, об/мин	Пусковая мощность, кВт, не менее	Холостой ход		Режим полного торможения			Масса, кг
								Ток, А, не более	Частота враще-ния, об/мин, не менее	Ток, А, не более	Момент, Н·м, не менее	Напряжение, В, не более	
СТ362	Пусковые двигатели П-350, -10УД	80	12	50	0,67	2400	0,37	65	5000	250	4,9	9	4,25
СТ368	ЗА3-968А	90	12	55	0,87	1980	0,61	70	5000	260	6,6	7	5,2
СТ117А	Москвич-412, -2140	100	12	55	1,32	2000	0,8	85	5000	550	16	7,5	8
23.3708	«Москвич-2140»	100	12	55	1,5	1600	0,83	85	—	600	15,7	7	7
СТ221	ВАЗ (все модификации)	100	12	55	1,3	1750	0,88	35	5000	500	13,72	6,5	8,5
35.3708	То же	100	12	55	1,3	1750	1	60	5800	500	13,72	7	7,5
29.3708	ВАЗ-2108	100	12	55	1,3	1750	1	60	5000	500	13,72	7	6
СТ230А (Б, В)	ГАЗ-53А, -66, -71, -73, -66-01, КавЗ-685; ПАЗ-672, ГАЗ-24	115	12	75	1,5	1200	0,85	85	4000	530	22	7	11,5
СТ130А3	ЗИЛ-130	115	12	90	1,8	1400	1,03	90	3400	700	22	8	10,5
СТ222	Трактор Т25А	115	12	150	2,2	1200	1,4	120	5000	950	39,2	9	14,5
СТ-142Б	КамАЗ-5320, -5410	130	24	190	7,7	1500	4,8	130	—	800	49	8	27
24.3708	Трактор МТЗ-80	130	12	215	4	1300	2,3	150	5000	1700	68,6	8,5	18
25.3708	МАЗ-500, КрАЗ-255	150	24	182	8	1800	4	110	5000	825	58,8	7	31,5
16.3708	БелАЗ-540, -548А	180	24	380	15,5	1040	9	160	2600	950	64	7,5	50
26.3708	ЗА3-1102	90	12	55	1,15	1730	0,8	60	5500	350	10	7	4,6
20.3708	МТЗ-100, ЛТЗ-145, «Беларусь-611»	130	24	132	5,9	1790	2,9	120	5000	1200	58,8	13,0	19,5

выполняют иногда с торцевыми коллекторами. Источниками электрической энергии для питания стартеров служат специальные стартерные аккумуляторные батареи (см. § 59.1).

В соответствии с государственными и отраслевыми стандартами на автотракторные двигатели и их системы пуска стартер должен обеспечивать надежный запуск двигателя при использовании штатных аккумуляторных батарей, заряженных на 75%, не более чем за 3 попытки пуска длительностью по 10–20 с с интервалом между попытками в 1 мин. Стартерные электрические двигатели являются высокоиспользуемыми машинами кратковременного режима работы. Высокое использование определяет выбор рабочей точки вблизи точки максимальной мощности. Стартерный электродвигатель работает с конкретным источником питания, причем ограниченной мощности и ограниченного запаса энергии. Это означает, что при нормировании характеристик стартерного электродвигателя

необходимо учитывать и внутреннее сопротивление источника ( $R_6$ ) и сопротивление сети ( $R_c$ ). Максимальная мощность стартерного электродвигателя равна

$$P_{2max} = \frac{(E_6 - \Delta U_{ш})^2 \eta_2}{4(R_6 + R_{ст} + R_c)},$$

где  $E_6$  – ЭДС батареи;  $\Delta U_{ш}$  – падение напряжения под щетками;  $R_{ст}$  – сопротивление стартера;  $\eta_2$  – электромагнитный КПД электродвигателя.

Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи обычно близко сопротивлению стартера и увеличивается с увеличением степени разряженности и снижением температуры.

За номинальную (каталожную) мощность стартера принимают максимальную полезную мощность в кратковременном режиме работы при питании от штатной полностью заряженной батареи, при температуре электролита 25 °С и без учета падения напряжения в сети.

Для оценки свойств стартера при более

тяжелых условиях запуска (не полностью заряженной батарее, отрицательной температуре) вводят в технические условия и понятия пусковой мощности. Согласно ГОСТ 9944-77 за пусковую мощность принимают максимальную полезную мощность стартера в кратковременном режиме работы при питании от штатной батареи, заряженной на 75 %, температуре электролита  $-15^{\circ}\text{C}$ , в конце третьей попытки запуска\* и с учетом сопротивления сети (падение напряжения 0,2 В на каждые 100 А). Соотношение между пусковой и номинальной мощностью, как видно из приведенного выражения для максимальной мощности, зависит от соотношения между сопротивлением стартера и сопротивлением батареи, закона изменения последнего при положительной и отрицательной температурах и разной заряженности батареи. Как видно из табл. 59.18, в среднем можно принять  $P_{\text{пуск}} = (0,6 \div 0,7) P_{\text{ном}}$ .

Характеристики электродвигателей стартеров в основном подобны характеристикам любых электродвигателей последовательного возбуждения, но из-за большого внутреннего сопротивления источника и самого стартера отличаются большей мягкостью механической характеристики, меньшей кратностью пусковых моментов (обычно 2–2,8), меньшей кратностью тока короткого замыкания (обычно не более 2).

Номинальное напряжение стартера, как правило, равно номинальному напряжению системы электрооборудования. Но на ряде автомобилей большой грузоподъемности и

тракторов с дизельными двигателями с системой электрооборудования на напряжение 12 В стартеры выполняются на напряжение 24 В, чем достигается уменьшение массы стартера и проводов к нему и повышение КПД стартера. В этом случае при пуске две аккумуляторные батареи переключаются из параллельного соединения на последовательное или устанавливается еще одна добавочная батарея на 12 В, включенная последовательно с основной и работающая только во время запуска.

При испытаниях стартера он питается от генератора постоянного тока с регулируемой внешней характеристикой. Параметры внешней характеристики задаются ГОСТ 9944-77 (или техническими условиями) в соответствии с режимом испытаний.

### Список литературы

- 59 1 ГОСТ 3940-84 (СТ СЭВ 3264-81) Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия.
- 59 2 ГОСТ 9590-84. Батареи аккумуляторные, свинцовые, стартерные емкостью свыше 30 А ч. Общие технические условия.
- 59.3. ГОСТ 13054-80. Тракторные генераторы. Общие технические условия.
- 59 4 ГОСТ 9944-77. Стартеры электрические автотракторные. Общие технические условия.
- 59 5 Баников С. П. Электрооборудование автомобилей. М. Транспорт, 1977. 288 с.
- 59 6 Боровских Ю. И. Электрооборудование автомобилей. Справочник инженера-механика. М. Транспорт, 1971. 192 с.
- 59 7 Василевский В. И., Купеев Ю. А. Автомобильные генераторы. М. Транспорт, 1978. 160 с.
- 59 8 Резник А. Р., Орлов В. П. Электрооборудование автомобилей. М. Транспорт, 1983. 248 с.
- 59 9 Новые тракторы и автомобили, Под ред В. А. Скотникова. М. Колос, 1983. 224 с.
- 59 10 Синельников А. Х. Электронные приборы для автомобилей. М. Энергоатомиздаг, 1986. 239 с.
- 59 11. Акимов С. В., Боровских Ю. И., Чешков Ю. П. Электрическое и электронное оборудование автомобилей. М.: Машиностроение. 1988. 280 с.

\* Замечание о конце третьей попытки запуска указывает на фактическую разряженность батареи к этому моменту и значение внутреннего сопротивления, т. е. на определенную внешнюю характеристику батареи.

# ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

## СОДЕРЖАНИЕ

60.1	Основные определения и типовые структурные схемы источников вторичного электропитания (ИВЭП) . . . . .	490	60.4	Двухтактные преобразователи напряжения (ДПН) . . . . .	513
	Основные определения и классификация ИВЭП (490) Типовые структурные схемы ИВЭП (491)			Разновидности ДПН (513). Простейший автогенераторный ДПН (514) Автогенераторные ДПН с внутренней синхронизацией (515). Автогенераторные ДПН с магнитным накопителем на первичной стороне трансформатора (518). Автогенераторный ДПН по мостовой схеме (523). ДПН с внешним управлением (523)	
60.2	Импульсные регуляторы постоянного напряжения . . . . .	495	60.5.	Системы управления импульсными регуляторами и преобразователями постоянного напряжения . . . . .	524
	Основные типы регуляторов (495) Характеристики регуляторов I рода (496) Характеристики регуляторов II рода (500) Регуляторы с гальваническим разделением входной и выходной цепей (503). Регуляторы с конденсаторным разделением входной и выходной цепей (504)			Способы стабилизации выходного напряжения ИВЭП с импульсным регулированием (524). Система управления стабилизированным регулятором напряжения I рода (526). Система управления стабилизированными регуляторами напряжения II рода (528) Система управления стабилизированным регулятором напряжения III рода (532)	
60.3	Однотактные преобразователи постоянного напряжения (ОПН) . . . . .	506		Список литературы . . . . .	534
	Основные типы преобразователей напряжения (506). ОПН с передачей энергии в импульсе (507) ОПН с передачей энергии в паузе (508) ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе (510) Однотактные преобразователи напряжения с магнитно-связанными дросселями (512)				

### 60.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТИПОВЫЕ СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ (ИВЭП)

#### Основные определения и классификация ИВЭП

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) — устройства, предназначенные для преобразования входной электроэнергии переменного или постоянного напряжения с целью обеспечения электропитанием отдельных цепей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при заданном виде и качестве электроэнергии на выходе (нестабильности и пульсации напряжения при выходе на постоянном напряжении, отклонения частоты и искажения формы кривой напряжения при выходе на переменном напряжении).

ИВЭП могут быть выполнены в виде единой конструкции — блока вторичного электропитания (блока питания) и состоять из отдельных блоков, соответствующих функциональным узлам (субблокам), выполняющих одну или несколько функций (выпрямление, фильтрацию, инвертирование,

стабилизацию и др.), или могут быть конструктивно включены в состав РЭА, для питания которой они предназначены.

Система вторичного электропитания — совокупность функционально связанных источников или, в частном случае, одного источника вторичного электропитания, устройств управления, коммутации, распределения, защиты, контроля и сигнализации, предназначенная для подключения к промышленным сетям переменного тока или автономным источникам электроснабжения и обеспечивающая по заданной программе электропитание всех цепей РЭА, формируя необходимые для их работы питающие напряжения с требуемыми параметрами.

ИВЭП классифицируются по следующим основным признакам.

По виду входной электроэнергии — на работающие от источника (сети) переменного напряжения (одно- или многофазного), от источника (сети) постоянного напряжения и от источников переменного и постоянного напряжения; ИВЭП, предназначенные для работы от промышленной сети переменного напряжения 220 или 380 В с частотой 50 Гц, часто называют сетевыми.

*По выходной мощности* — на микромощные (выходная мощность до 1 Вт), малой мощности (от 1 до 10 Вт), средней мощности (от 10 до 100 Вт), повышенной мощности (от 100 до 1000 Вт) и большой мощности (свыше 1000 Вт).

*По числу выходов* — на одноканальные, имеющие один выход, и многоканальные, имеющие два и более выходов для подключения различных цепей РЭА, питаемой от данного ИВЭП.

*По виду выходной электроэнергии* — на ИВЭП с выходом на переменном напряжении (одно или многофазном), с выходом на постоянном напряжении и комбинированные — с выходом на переменном и постоянном напряжении; последние являются многоканальными.

*По номинальному значению выходного напряжения* — на ИВЭП с низким (до 100 В), средним (от 100 до 1000 В) и высоким напряжением (свыше 1000 В).

*По наличию стабилизации выходного напряжения* — на нестабилизированные и стабилизированные.

*По методу стабилизации выходного напряжения (тока)* — с параметрической и компенсационной стабилизацией. При параметрической стабилизации отсутствует цепь обратной связи по выходному напряжению и стабилизация осуществляется за счет использования нелинейных элементов (например, кремниевого стабилитрона), при компенсационной — за счет воздействия на регулирующий элемент в функции отклонения выходного напряжения (или тока) от номинального значения.

*По характеру работы регулирующего элемента (РЭ)* (только для ИВЭП с компенсационной стабилизацией) — с непрерывным регулированием (РЭ работает в непрерывном режиме) и с импульсным регулированием (РЭ работает в импульсном, ключевом, режиме).

*По допустимому отклонению выходного напряжения от номинального* — низкой (относительное отклонение свыше 5%), средней (от 1 до 5%) и высокой (от 0,1 до 1%) точности, а также прецизионные (менее 0,1%).

*По значению пульсаций выходного напряжения* (для ИВЭП с выходом на постоянном напряжении) — на устройства с малым (менее 0,1%), средним (от 0,1 до 1%) и большим (свыше 1%) коэффициентами пульсаций.

В многоканальных ИВЭП номинальное значение, метод стабилизации, характер работы РЭ, отклонение и коэффициент пульсаций выходного напряжения могут в различных каналах различаться.

Главное направление совершенствования ИВЭП связано с их миниатюризацией. Акту-

альность этого направления определяется сложившимся несоответствием в массогабаритных показателях современной РЭА, которые из-за широкого применения интегральных микросхем существенно уменьшились, и ИВЭП, масса и габариты которых значительно труднее поддаются снижению. В результате масса и габариты ИВЭП в настоящее время иногда составляют 50–100% соответствующих показателей питаемой от него РЭА. Для устранения указанного несоответствия проводится интенсивная работа, связанная с выбором рациональных схем, применением преобразователей и регуляторов напряжения с высокой частотой переключения полупроводниковых приборов, широким использованием интегральных микросхем, новых видов магнитных материалов, новых типов конденсаторов и более эффективных способов отвода тепла.

Важно отметить, что все меры, направленные на уменьшение массы и габаритов ИВЭП, находятся в прямой связи с повышением их КПД, так как именно мощность потерь часто определяет их объем или наружную теплоотдающую поверхность. Однако проблема повышения КПД современных ИВЭП имеет и большое самостоятельное значение, поскольку в связи с более широким распространением промышленных электронных систем управления, средств вычислительной техники, устройств связи, бытовой радио- и телевизионной аппаратуры и других видов РЭА суммарная потребляемая ими мощность составляет по стране многие миллиарды киловатт-часов в год.

### Типовые структурные схемы ИВЭП

Несмотря на то, что в зависимости от типа ИВЭП (в соответствии с вышеприведенной классификацией), определяемого его назначением, он может иметь различную структуру (и даже ИВЭП одного типа, как будет показано ниже, могут быть построены по различным структурным схемам), в настоящее время определилось несколько наиболее часто применяемых структурных схем, которые можно считать типовыми.

При питании от сети или от автономных генераторов переменного напряжения ИВЭП с выходом на постоянном напряжении часто выполняются по структурной схеме, показанной на рис. 60.1. В этом случае основными функциональными узлами являются: выпрямитель *В*, в свою очередь состоящий из трансформатора *Т* (одно- или многофазного) и вентиляционного блока *ВВ* (который может быть выполнен по одно- или многофазной нулевой или мостовой схеме выпрямления, см. § 32.4).

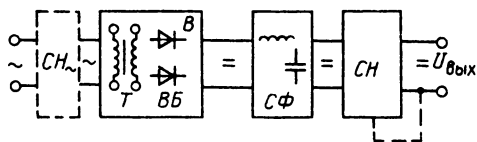


Рис. 60.1. Структурная схема сетевого ИВЭП с выпрямителем, имеющим входной трансформатор

сглаживающего фильтра  $СФ$  и стабилизатора напряжения  $СН$ . В зависимости от мощности, номинального значения, допустимой нестабильности и коэффициента пульсаций выходного напряжения может применяться  $СН$  параметрического или компенсационного типа (возможны и комбинации этих типов), а в последнем случае — с непрерывным или импульсным режимом работы регулирующего элемента. В любом случае  $СН$  способствует также сглаживанию пульсаций выходного напряжения.

Следует отметить, что в структурной схеме по рис. 60.1 трансформатор  $T$  необходим не только для согласования уровней входного и выходного напряжений, но и для гальванической развязки выходной цепи от сети, которая почти всегда требуется для того, чтобы один из выходных выводов ИВЭП мог быть заземлен (это необходимо для снижения степени воздействия помех на РЭА, питаемую от заданного ИВЭП, а также для безопасности обслуживающего персонала).

Если ИВЭП является многоканальным, то необходимо иметь соответствующее число отдельных вторичных обмоток трансформатора  $T$ , вентиляльных блоков  $ВБ$ , фильтров  $СФ$  и стабилизаторов напряжения  $СН$ , причем схемы включения вентиляльных блоков и типы  $СФ$  и  $СН$  в отдельных каналах могут быть различными. В случае значительных колебаний входного напряжения, а также для исключения

или упрощения стабилизаторов отдельных каналов может использоваться стабилизатор на стороне переменного напряжения  $СН$  (показан на рис. 60.1 штриховой линией). В качестве такого стабилизатора напряжения может быть применен феррорезонансный стабилизатор (являющийся параметрическим — см. § 29.8) или тиристорный регулируемый преобразователь (регулятор переменного напряжения, см. § 32.19).

Наиболее существенным недостатком структурной схемы по рис. 60.1 являются значительные масса и размеры ИВЭП, обусловленные наличием трансформатора ( $T$ ) с рабочей частотой 50 Гц, и фильтра  $СФ$ , рассчитанного на сглаживание низкочастотных пульсаций, содержащихся в кривой напряжения на выходе  $В$ .

С целью существенного снижения массы и размеров ИВЭП, питаемых от сети или от автономных источников переменного напряжения, в последнее время большое распространение получила структурная схема, показанная на рис. 60.2. В этой схеме входное переменное напряжение, например одно- или трехфазное напряжение сети 220 или 380 В, выпрямляется бестрансформаторным выпрямителем  $В_1$ , сглаживается фильтром  $СФ_1$  и подается на вход преобразователя  $П$ , осуществляющего преобразование постоянного напряжения в высокочастотное переменное. Необходимым элементом  $П$  является высокочастотный трансформатор  $Tr$ , к вторичной обмотке которого подключен второй выпрямитель  $В_2$ , имеющий на выходе фильтр  $СФ_2$ . В многоканальных ИВЭП имеется соответствующее число отдельных вторичных обмоток у  $T$ , выпрямителей  $В_2 \dots В_N$  и сглаживающих фильтров  $СФ_2 \dots СФ_N$ , а узлы  $В_1$ ,  $СФ_1$  и  $П$  являются общими.

ИВЭП по схеме рис. 60.2 часто называют «бестрансформаторным», чтобы подчеркнуть отсутствие на входе громоздкого трансформатора, рассчитанного на работу при частоте

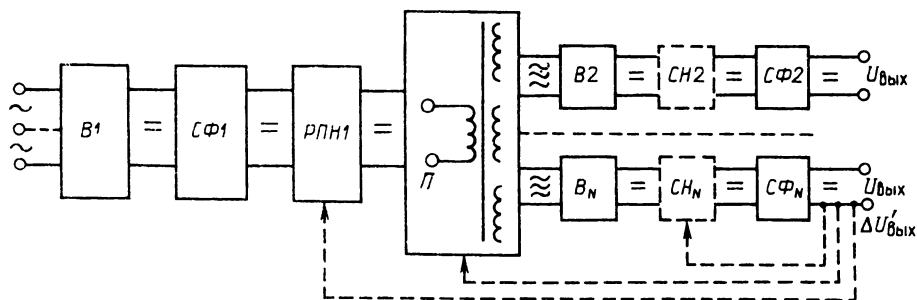


Рис. 60.2 Структурная схема сетевого ИВЭП с выходом на постоянном напряжении, содержащая выпрямитель с бестрансформаторным входом и высокочастотный преобразователь постоянного напряжения

50 Гц. Конечно, это название неточное, поскольку необходимым элементом такого ИВЭП является высокочастотный трансформатор  $T$ , одна из важнейших функций которого — гальваническое разделение входной и выходной цепей. Поэтому иногда в этих случаях применяются термины «квазибестрансформаторные» ИВЭП или ИВЭП «с бестрансформаторным входом».

Стабилизация выходного напряжения осуществляется или в преобразователе  $\Pi$  (например, методом широтно-импульсного регулирования — ШИР), или с помощью непрерывного или импульсного регулятора постоянного напряжения  $РПН_1$ , включенного до  $\Pi$  (см. рис. 60.2); для этого на  $\Pi$  или  $РПН_1$  подается управляющее воздействие, пропорциональное отклонению выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  (показано на рис. 60.2 штриховыми линиями). Если на выходе отдельных каналов многоканального ИВЭП требуются особо малые отклонения напряжения, применяются дополнительные стабилизаторы  $СН_2 \dots СН_N$ .

Несмотря на то что в структурной схеме рис. 60.2 имеется большое число функциональных узлов и имеет место по крайней мере трехкратное преобразование энергии полупроводниковыми преобразователями ( $B_1$ ,  $\Pi$  и  $B_2 \dots B_N$ ), масса и размеры такого ИВЭП получаются меньше, чем ИВЭП по схеме рис. 60.1. Это объясняется значительно меньшими массой и размерами, во-первых, высокочастотного трансформатора  $T$  (его рабочая частота 20–100 кГц, если  $\Pi$  выполнен на транзисторах, и 1–10 кГц — на тиристорах) и, во-вторых, выходных фильтров  $СФ_2 \dots СФ_N$ , рассчитанных на сглаживание высокочастотных пульсаций напряжения. Масса и размеры фильтра  $СФ_1$  также сравнительно невелики, поскольку от него не требуется высокого сглаживания (в связи с чем в качестве  $СФ_1$  обычно применяется простой емкостный фильтр) и он работает при напряжении 300–500 В (получаемом при выпрямлении однофазного 220 В или трехфазного напряжения 380 В соответственно одно- или трехфазным

мостовым выпрямителем) и относительно небольшого токе (1–2 А при выходной мощности 0,3–1 кВт).

При питании от источников постоянного напряжения (бортовой сети на подвижных объектах либо отдельных вращающихся, электрохимических или иных первичных генераторов) типовая структура ИВЭП с выходом на постоянном напряжении показана на рис. 60.3. Здесь основными функциональными узлами являются преобразователь  $\Pi$  постоянного напряжения в высокочастотное с выходным трансформатором  $T$ , выпрямитель  $B$  и выходной сглаживающий фильтр  $СФ_2$ . Для стабилизации выходного напряжения можно использовать отдельные регуляторы напряжения во входной  $РПН_1$  или выходной  $РПН_2$  цепи, либо регулирование осуществляется в преобразователе  $\Pi$  за счет какого-либо импульсного метода регулирования. Фильтр  $СФ_1$  на входе применяется, если необходимо исключить прохождение через первичный источник электроэнергии импульсной составляющей тока, обусловленной работой  $\Pi$  или стабилизатора напряжения импульсного типа.

Если отношение выходного и входного напряжений (с учетом изменений одного из них или обоих) лежит в диапазоне от 0,25–0,3 до 3–4 и не требуется гальваническая изоляция выходной цепи от входной, возможно применение ИВЭП на базе регулятора постоянного напряжения  $РПН$  с выходным и входным сглаживающими фильтрами  $СФ_2$  и  $СФ_1$  (рис. 60.4). В этом случае могут быть применены импульсные РПН I, II или III рода (в зависимости от конкретных требований), которые были кратко рассмотрены в § 32.21, а особенности и модификации которых описаны ниже в § 60.2.

Структурные схемы ИВЭП с выходом на переменном напряжении при питании от сети переменного напряжения показаны на рис. 60.5 и 60.6. Такие ИВЭП необходимы в случаях, когда частота, число фаз, колебания напряжения либо форма его кривой или сразу несколько из перечисленных показателей для какого-

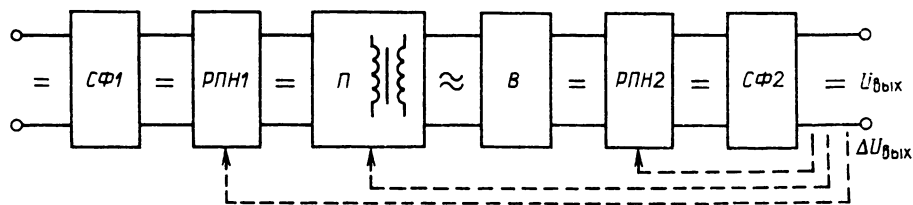


Рис. 60.3. Структурная схема ИВЭП с входом и выходом на постоянном напряжении, содержащая высокочастотный преобразователь  $\Pi$

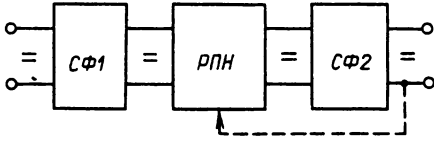


Рис. 60.4. Структурная схема ИВЭП со входом и выходом на постоянном напряжении без промежуточного высокочастотного преобразователя

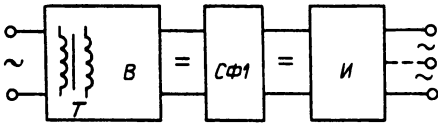


Рис. 60.5. Структурная схема сетевого ИВЭП с выходом на переменном напряжении, содержащая выпрямитель с входным трансформатором

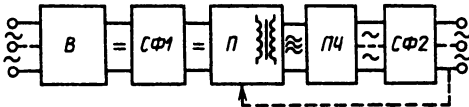


Рис. 60.6. Структурная схема сетевого ИВЭП с выходом на переменном напряжении, содержащая выпрямитель с бестрансформаторным входом

либо потребителя отличаются от соответствующего показателя (показателей) промышленной сети 50 Гц. Схема на рис. 60.5 отличается от схемы рис. 60.1 наличием автономного инвертора *И* на выходе, формирующего переменное напряжение с требуемыми показателями. Из-за входного трансформатора *Т*, работающего при частоте 50 Гц, масса и размеры всего устройства получаются значительными. Для их уменьшения может быть применен бестрансформаторный одно- или трехфазный выпрямитель (как в схеме рис. 60.2), а трансформатор для согласования напряжений и гальванического разделения цепей может быть применен на выходе инвертора (на рис. 60.5 не показан). Если требуемая на выходе частота  $f_{\text{вых}}$  заметно больше чем 50 Гц (например, 400 или 1000 Гц), масса и размеры такого трансформатора и всего преобразователя в целом получаются меньше, чем в первом случае.

В структурной схеме на рис. 60.6 постоянное напряжение после выпрямителя сначала преобразуется в переменное (как правило, однофазное) с частотой, значительно (в 10 раз и более) превышающей ту, которую необхо-

димо иметь в нагрузке (преобразователе *П*). Затем с помощью преобразователя частоты *ПЧ* (называемого иногда коммутатором) из этого высокочастотного напряжения формируется одно- или трехфазное напряжение нужной частоты, кривая которого «очищается» от высокочастотных составляющих с помощью фильтра *СФ*<sub>2</sub>. Благодаря тому, что в этой схеме согласующий и разделительный трансформаторы работают на весьма высокой частоте (единицы и десятки килогерц), возможен выигрыш в массе и размерах по сравнению со схемой рис. 60.4, несмотря на то что в схеме по рис. 60.6 имеет место трехкратное преобразование энергии.

В рассмотренных схемах с выходом на переменном напряжении регулирование или в частном случае стабилизация выходного напряжения возможны или с помощью отдельного *РПН*, включенного в звено постоянного напряжения, или за счет импульсных методов регулирования в инверторе *И* или преобразователе *П*.

Все три последние структурные схемы с выходом на переменном напряжении могут применяться и при питании от источников постоянного напряжения, когда из схемы исключаются выпрямители *В*. Сглаживающие фильтры *СФ*<sub>1</sub> при этом обычно необходимо оставить для того, чтобы предотвратить прохождение через источник питания высокочастотных составляющих тока, однако требования к этим фильтрам в этих случаях существенно облегчаются. Такие функциональные узлы рассмотренных типовых схем, как выпрямители, сглаживающие фильтры, автономные инверторы (*И* в схеме рис. 60.5), преобразователи частоты (*ПЧ* в схеме рис. 60.6), рассмотрены в разд. 32. Специфичными для большинства ИВЭП являются:

а) импульсные регуляторы (регулируемые преобразователи) постоянного напряжения, с помощью которых осуществляется в общем случае регулирование отношения выходного и входного постоянных напряжений и, в частном случае, стабилизация выходного напряжения ИВЭП при изменении напряжения источника питания, тока нагрузки, температуры и других величин. Импульсные регуляторы применяются взамен параметрических или непрерывных компенсационных стабилизаторов напряжения при мощности свыше нескольких ватт, поскольку последние имеют гораздо худший КПД;

б) преобразователи постоянного напряжения в высокочастотное с трансформаторным разделением цепей (в структурных схемах рис. 60.2, 60.3, 60.6). Эти функциональные узлы рассматриваются в § 60.2–60.4.

### 60.2. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

#### Основные типы регуляторов

Три основных типа импульсных регуляторов постоянного напряжения (РПН), часто называемых регуляторами I, II и III рода и широко используемых на практике, были кратко рассмотрены в § 32.21\*. Ниже дается более подробное описание и сопоставление свойств этих регуляторов, а также рассматриваются их модификации.

Схемы РПН I, II и III рода (называемые ниже для краткости РН I, РН II и РН III) приведены на рис. 60.7, а–в. В качестве ключей К I, К II, К III могут использоваться транзисторы, запираемые двуоперационные тиристоры или незапираемые тиристоры, снабженные соответствующими узлами принудительной коммутации (см. § 32.23).

Регулировочные характеристики трех основных схем РПН в предположении, что ключ *K* идеален (т. е. падение напряжения на нем во включенном состоянии и времена включения и выключения равны нулю) и ток в дросселе *Dp* непрерывен, описываются соотношениями для РН:

для РН I  $U_n = \gamma E$ ;

для РН II  $U_n = E/(1 - \gamma)$ ;

для РН III  $U_n = \gamma E/(1 - \gamma)$ ,

где  $U_n$  – среднее значение выходного напряжения (для схем рис. 60.7, б и в – при наличии на выходе сглаживающего конденсатора); *E* – напряжение источника питания;  $\gamma = t_n/T$  – относительное время включенного состояния ключа *K* (коэффициент регулирования);  $T = t_n + t_p = 1/f$  – период частоты коммутации *f*;  $t_n$ ,  $t_p$  – время включенного (время импульса) и выключенного (время паузы) состояния ключа.

\* На рис. 32.48, а и б, § 32.21 вместо схемы и кривых напряжений и токов для регулятора (преобразователя) I рода ошибочно приведены схема и соответствующие кривые для регулятора (преобразователя) II рода, дублирующие рис. 32.49, а и б; правильные схемы и кривые указаны в списке опечаток, помещенном в т. III, кн. 1.

Для реальных РН, элементы которых имеют потери (из-за падения напряжения на ключе и на диоде во включенном состоянии, наличия сопротивления у обмотки дросселя и др.), КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{U_n I_n}{U_n I_n + \sum P_n},$$

где  $\sum P_n$  – суммарные потери мощности во всех элементах. Тогда в правые части соотношений, описывающих регулировочные характеристики всех трех основных типов регуляторов, следует ввести сомножитель  $\eta$ .

Поскольку диоды *VD* в РН II и РН III проводят ток только на интервале  $t_n$ , на выходе этих регуляторов необходимо применение сглаживающих конденсаторов *C*<sub>2</sub> (рис. 60.7, б и в); в РН I выходной ток сглаживается дросселем *Dp* (либо индуктивностью, входящей в состав самой нагрузки, например, при питании электромагнитов) и конденсатор *C*<sub>2</sub> может в принципе отсутствовать.

Регуляторы I и III рода потребляют от источника питания ток только на интервале  $t_n$ . Если такое импульсное потребление тока от реального источника нежелательно или недопустимо, следует применить сглаживающий конденсатор *C*<sub>1</sub> (или Г-образный фильтр) на входе (рис. 60.7, а и в).

Так как относительное выходное напряжение  $U_n^* = U_n/E$  РН III равно произведению  $U_n^*$  для РН I и РН II, регулятор III рода может быть получен путем последовательного соединения регуляторов I и II рода. Такое соединение РН I и РН II после исключения промежуточного конденсатора, поскольку речь идет о средних напряжениях, и объединения двух последовательно включенных дросселей в один, поскольку средние токи в них одинаковые, показано на рис. 60.8, а.

РПН по схеме рис. 60.8, а, построенный на двух базовых регуляторах, позволяет реализовать любой закон регулирования. Действительно, если регулирование осуществляется ключом *KI*, а ключ *KII* разомкнут, то имеем РН I; если ключ *KI* замкнут, а регулирование осуществляется ключом *KII*, то имеем РН II; если регулирование осуществляется одновре-

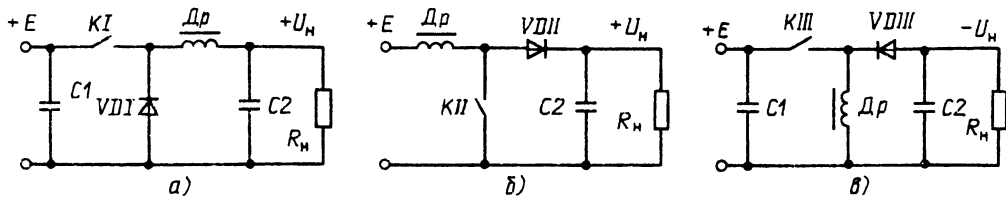


Рис. 60.7. Схемы РН I (а), РН II (б) и РН III (в)



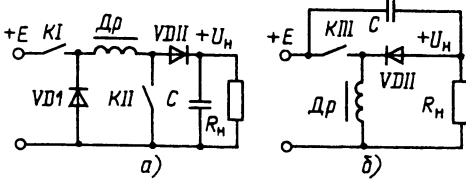


Рис. 60.8 Схемы РНII в виде последовательного соединения РНI и РНII (а) и с фильтрующим конденсатором между выводами входа и выхода, имеющие непрерывные входной и выходной токи (б)

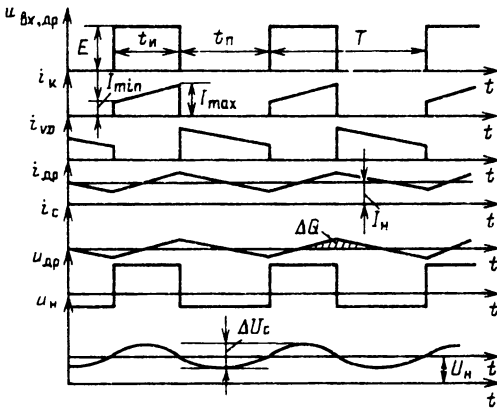


Рис. 60.9 Диаграммы токов и напряжений при работе РНI в режиме непрерывного тока

менным замыканием и размыканием ключей *KI* и *KII*, то имеем РНIII. Для получения общезвестной схемы регулятора РНIII на рис. 60.7, в из схемы регулятора на рис. 60.8, а необходимо исключить некоторые функционально лишние элементы, так как нет необходимости иметь два регулирующих ключа и два диода, включенных для протекающих токов последовательно и работающих синхронно. Исключение функционально лишних элементов можно провести, закоротив ключ *KII*, разомкнув диод *VDII* и подключив анод диода *VDI* к выходной шине (по переменной составляющей анод диода *VDI* равноправно может быть подключен к любой шине выходного напряжения); в результате получим известный регулятор РНIII (рис. 60.7, в), знак выходного напряжения при этом инвертируется. Особенностью этого регулятора, как отмечалось выше, является импульсное потребление тока от источника входного напряжения с амплитудой, равной  $I_n/(1 - \gamma)$  (в предположении, что пульсации тока в дросселе *Dr* малы). Если в полученной схеме положительную

обкладку конденсатора фильтра *C* подключить к положительной шине входного напряжения (по переменной составляющей эта обкладка равноправно может быть подключена к любой шине источника входного напряжения), то получим другой вариант РНIII (рис. 60.8, б). Особенностью этого регулятора является непрерывное потребление тока от источника входного напряжения, среднее значение которого за период рабочей частоты равно  $I_n\gamma/(1 - \gamma)$ .

Таким образом, базовыми являются лишь регуляторы I и II рода. Их принципиальное различие заключается в том, что в РНI имеет место ограниченное накопление энергии в дросселе, определяемое при  $\gamma \rightarrow 1$  лишь значениями *E* и *Rн*, в то время как в РНII при  $\gamma \rightarrow 1$  энергия, накапливаемая в дросселе (а также и конденсаторе выходного фильтра), стремится к бесконечности. Поэтому РНII и ряд других схем с аналогичным свойством, рассматриваемых ниже, относят к регуляторам с неограниченным накоплением энергии в реактивных элементах.

### Характеристики регулятора I рода

В РНI (рис. 60.7, а) основным является режим непрерывного тока в дросселе. Однако при малых  $\gamma$  или выходном токе такой регулятор может перейти в режим прерывистого тока в дросселе.

*Режим непрерывного тока в дросселе.* На рис. 60.9 показаны временные диаграммы токов и напряжений для этого режима.

Если принять, что пульсации напряжения на конденсаторе *C*<sub>2</sub> достаточно малы, а постоянная времени дросселя  $\tau_{Dr} = L/r \gg T$  (где *r* – сопротивление его обмотки), то можно считать линейным закон изменения тока в обмотке дросселя на соответствующих интервалах времени (рис. 60.9). Тогда на интервалах замкнутого и разомкнутого состояний регулирующего ключа ток через обмотки дросселя, а следовательно, и токи через ключ *K* и через диод изменяются в соответствии с выражениями

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_1(t) = I_{min} + \frac{E - U_n}{L} t = i_K;$$

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_2(t) = I_{max} - \frac{U_n}{L} t = i_{VD},$$

где *I<sub>min</sub>* и *I<sub>max</sub>* – минимальное и максимальное значения тока *i<sub>VD</sub>*. Для того чтобы найти эти значения, приравняем энергию, потребленную от источника питания за время *t<sub>n</sub>*, и энергию,

выделенную в нагрузке за период  $T$ :

$$\int_0^{t_n} E i_1(t) dt = U_n I_n T.$$

Отсюда с учетом  $i_s(t_n) = I_{max}$

$$I_{min} = I_n \mp \frac{(E - U_n) \gamma}{2Lf},$$

где знак минус соответствует минимальному, а плюс — максимальному значению тока.

Среднее значение тока через дроссель за период

$$I_{Др} = (I_{min} + I_{max})/2 = I_n.$$

Средние значения тока через регулирующий ключ и через диод

$$I_{ср,к} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_1(t) dt = I_n \gamma;$$

$$I_{ср,д} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_2(t) dt = I_n (1 - \gamma).$$

Напряжение на регулирующем ключе и на шунтирующем диоде в выключенном состоянии

$$U_K = U_d = E.$$

Расчетная мощность ключа, показывающая степень использования ключа по отношению к мощности в нагрузке, при пренебрежении пульсациями тока в дросселе по сравнению со средним током дросселя

$$P_K = U_{Kmax} I_{Kmax} = P_n / \gamma.$$

Отсюда следует, что наилучшее использование регулирующего ключа по мощности имеет место при  $\gamma \rightarrow 1$ .

Найдем критическое значение тока нагрузки, которое при заданной индуктивности дросселя еще поддерживает режим непрерывного тока. С этой целью полагаем  $I_{min} = 0$ , тогда

$$I_{н,кр} = E \gamma (1 - \gamma) / 2Lf.$$

Аналогично можно найти критическую индуктивность, которая при заданном токе нагрузки еще поддерживает режим непрерывного тока в регуляторе

$$L_{кр} = E \gamma (1 - \gamma) / 2I_n f.$$

**Режим прерывистого тока в дросселе.** Если ток нагрузки  $I_n < I_{н,кр}$  при заданной индуктивности дросселя либо  $L < L_{кр}$  при заданном токе нагрузки, то регулятор переходит в режим прерывистых токов в дросселе. Для этого

случая регулировочная характеристика отличается от регулировочной характеристики в режиме непрерывных токов и может быть получена в предположении, что  $I_{min} = 0$ . Обозначая время проводящего состояния диода через  $t'_n$  и полагая, что к концу работы шунтирующего диода в режиме прерывистого тока в дросселе  $i_2(t'_n) = 0$ , находим  $t'_n = (E - U_n) t_n / U_n$ .

Среднее значение тока в нагрузке за период  $T$  найдем в виде

$$I_n = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} \frac{(E - U_n)}{L} t dt + \frac{1}{T} \int_0^{t'_n} \left[ \frac{(E - U_n) t_n}{L} - \frac{U_n t}{L} \right] dt.$$

Отсюда после умножения обеих частей равенства на сопротивление нагрузки  $R_n$  и ряда преобразований получим регулировочную характеристику регулятора в режиме прерывистого тока.

$$\frac{U_n}{E} = \frac{\gamma^2}{4\tau_n f} \left[ \sqrt{1 + \frac{8\tau_{Др,н} f}{\gamma^2}} - 1 \right],$$

где  $\tau_{Др,н} = L/R_n$ .

Регулировочная характеристика изображена на рис. 60.10 для двух значений  $\tau_{Др,н}$  штриховыми линиями 2 и 3. Видно, что режим непрерывных токов в дросселе наступает тем раньше, чем больше  $\tau_{Др,н}$ . Заменяв левую часть на  $\gamma$ , находим  $\gamma_{кр}$ , при котором наступает критический режим

$$\gamma_{кр} = 1 - 2\tau_{Др,н} f.$$

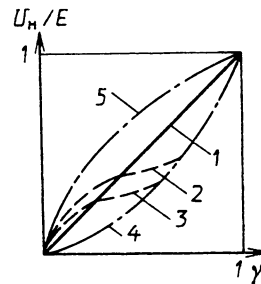


Рис. 60.10. Регулировочные характеристики РН1:

1 — для основной схемы регулятора в режиме непрерывного тока, 2 и 3 — то же в режиме прерывистого тока при двух значениях  $\tau_{Др,н1}$  и  $\tau_{Др,н2} > \tau_{Др,н1}$ ; 4 и 5 для варианта по схеме 60.12 при  $n < 1$  и  $n > 1$

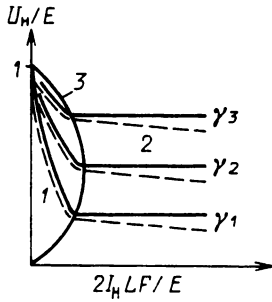


Рис. 60.11. Внешние характеристики РНТ при различных  $\gamma$  для режимов прерывистого (область 1) и непрерывного (область 2) тока. Граничная линия 3 построена по формуле для  $I_{н,кр}$  в тексте

Раскрывая  $\tau_{др,н}$  и заменяя  $R_n = U_n/I_n$ , преобразуем это выражение к виду

$$U_n/E = \gamma^2 / \left( \gamma^2 - \frac{2LI_n f}{E} \right),$$

которое является по существу внешней характеристикой идеального РНТ в режиме прерывистого тока. Эти характеристики при различных  $\gamma$  показаны в относительных единицах на рис. 60.11. При  $I_n > I_{н,кр}$  внешняя характеристика идеального регулятора не зависит от тока нагрузки.

Внешняя характеристика реального РНТ в режиме непрерывного тока зависит от тока нагрузки и при  $I_n > I_{н,кр}$  и обусловлено неидеальностью компонентов регулятора и в первую очередь наличием сопротивления обмотки дросселя. Эту характеристику РНТ определим из условия равенства вольт-секундных площадей в установившемся режиме, действующих на индуктивности дросселя на интервалах  $t_n$  и  $t_p$ , в предположении, что сопротивление  $r$  обмотки дросселя отлично от нуля. Тогда

$$(E - U_n - I_n r) t_n = (U_n + I_n r) t_p,$$

откуда

$$U_n/E = \gamma - I_n r/E.$$

Эти характеристики показаны на рис. 60.11 штриховыми линиями в области 2. Выходное сопротивление РНТ

$$R_{вых} = -\partial U_n / \partial I_n = r.$$

**Пulsации выходного напряжения.** Для определения пульсаций выходного напряжения в режиме непрерывных токов необходимо при ранее принятых допущениях найти изменение заряда  $\Delta Q$  в фильтрующем конденсаторе  $C_2$ , обуславливающее изменение выходного напря-

жения от минимального его значения до максимального

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{(E - U_n) t_n}{2L} \left( \frac{t_n}{2} + \frac{t_n}{2} \right).$$

Учитывая, что  $\Delta Q = C_2 \Delta U_{C2}$ , находим

$$\Delta U_{C2} = \frac{E \gamma (1 - \gamma)}{8LC_2 f^2} = \frac{U_n (1 - \gamma)}{8LC_2 f^2}.$$

Отсюда следует, что радикальным способом уменьшения пульсаций выходного напряжения при заданных значениях  $L$  и  $C_2$  или уменьшения массы и размеров фильтра  $L, C_2$  при заданных пульсациях  $\Delta U_{C2}$  является повышение рабочей частоты для РНТ.

Выше при определении пульсаций выходного напряжения предполагалось, что внутреннее сопротивление конденсатора фильтра для переменной составляющей тока равно нулю. Поэтому такой расчет пульсаций выходного напряжения дает заниженные значения по сравнению с экспериментальными. Реальный электролитический конденсатор в большинстве практических случаев может быть представлен последовательным соединением трех элементов: емкости  $C$ , активного сопротивления  $r_C$  и индуктивности  $L_C$ . Последние две составляющие полного сопротивления обусловлены физическими явлениями и конструктивными особенностями электролитических конденсаторов и обычно лежат в пределах

$$r_C = (4 \div 11) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \quad L_C = (12 \div 18) \cdot 10^{-12} \text{ Гн}.$$

Расчет пульсаций выходного напряжения с учетом этих дополнительных составляющих и в предположении треугольной формы кривой тока через конденсатор дает дополнительную «паразитную» составляющую пульсаций

$$\Delta U_{C \text{ паразит}} = \frac{r_C U_n (1 - \gamma)}{L f} + \frac{L_C}{L} \frac{U_n}{\gamma}.$$

В большинстве случаев именно эта составляющая определяет пульсации выходного напряжения. Поэтому уменьшение пульсаций может быть достигнуто за счет параллельного включения нескольких конденсаторов, так как при этом уменьшаются эквивалентные паразитные параметры  $r_C$  и  $L_C$ .

На практике емкость конденсатора фильтра необходимо выбирать также из условия получения достаточно малых динамических пульсаций, обусловленных ступенчатым изменением тока нагрузки. Уменьшение динамических пульсаций возможно только за счет увеличения емкости конденсатора фильтра. Анализ процессов при ступенчатом изменении тока позволяет получить следующее выражение для выбора емкости фильтра по заданной амплитуде динамических пульсаций выходного

напряжения  $\Delta U_{C_{дин}}$

$$\frac{t_{нараст}}{r_C} \geq C_2 \geq \frac{\Delta I_n t_{нараст}}{2 \Delta U_{C_{дин}} - \Delta I_n r_C},$$

где  $t_{нараст} \approx \epsilon T$  — время нарастания тока в дросселе до нового установившегося значения;  $\epsilon = L/L_{кр}$  — превышение индуктивности дросселя над критическим значением индуктивности;  $T$  — период работы регулируемого ключа;  $\Delta I_n$  — ступенчатое изменение тока нагрузки от установившегося значения.

Из левого неравенства можно сделать вывод о нецелесообразности выбора емкости конденсатора больше чем  $t_{нараст}/r_C$ , ибо это не приведет к уменьшению динамических пульсаций, правое неравенство дает значение необходимой емкости. Коэффициент  $\epsilon$  выбирается из условия компромисса между значением потерь в сердечнике дросселя и потерь в сопротивлении его обмотки. С ростом  $\epsilon$  потери в сердечнике уменьшаются из-за уменьшения амплитуды пульсаций тока дросселя, а потери в сопротивлении обмотки растут из-за увеличения числа витков. Значение  $\epsilon = 10 \div 15$  является разумным компромиссом.

*Модификации регулятора с промежуточным отводом у обмотки дросселя.* Кроме основной схемы рис. 60.7, а известны модификации РН1, характеризующиеся наличием отвода у обмотки дросселя, к которому подключается либо диод (рис. 60.12), либо регулирующий ключ  $K$ . Последний случай можно считать вариантом схемы рис. 60.12 при  $w_{23} > w_{12}$ .

Регулировочную характеристику для схемы рис. 60.12 при идеальных элементах можно получить из соотношения

$$\frac{E - U_n}{w_{13}} t_n = \frac{U_n}{w_{23}} t_n,$$

откуда

$$U_n = E \frac{n\gamma}{1 - (1 - n)\gamma},$$

где  $n = w_{23}/w_{13}$  — коэффициент трансформации.

Последнее выражение справедливо и при подключении к отводу дросселя регулирующего ключа, в этом случае  $n > 1$ . Регулировочные характеристики для этих двух случаев показаны на рис. 60.10 штрихпунктирными линиями 4 (при  $n < 1$ ) и 5 (при  $n > 1$ ). Включение шунтирующего диода к отпайкам дросселя позволяет расширить возможности использования регуляторов напряжения с точки зрения не только получения желаемых регулировочных характеристик, но и некоторого перераспределения токов и напряжений

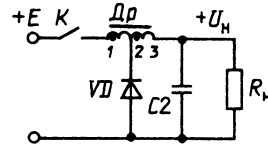


Рис. 60.12. Модификация РН1 с отводом на обмотке дросселя

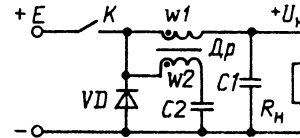


Рис. 60.13. Схема РН1 с магнитно-связанным фильтром

на регулирующем ключе и шунтирующем диоде. Однако трудность получения хорошей магнитной связи между секциями обмоток дросселя и связанное с этим явление перекрытия времени работы регулирующего ключа и шунтирующего диода, а также ухудшение регулировочной и внешней характеристик привели к тому, что такие модификации РН1 не получили столь широкого использования, как простейшая базовая схема.

*РН1 с магнитно-связанным сглаживающим фильтром.* Радикальным способом уменьшения пульсаций выходного напряжения является использование регуляторов с магнитно-связанным сглаживающим фильтром. На рис. 60.13 показана схема РН1 с магнитно-связанным фильтром, работа такого РН практически ничем не отличается от работы простейшего РН1. Однако введение на дросселе дополнительной обмотки  $w_2$ , магнитно-связанной с  $w_1$  и образующей совместно с конденсатором  $C_2$  дополнительную ветвь, существенно влияет на пульсации выходного напряжения. За счет выбора определенного коэффициента трансформации и степени магнитной связи между обмотками  $w_1$  и  $w_2$  можно всю переменную составляющую тока направить по ветви  $w_2 - C_2$ , сведя при этом переменную составляющую тока в обмотке  $w_1$  к нулю. Приняв, что суммарный ток в обмотках  $w_1$  и  $w_2$  изменяется на каждом из интервалов  $t_n, t_n$  по линейному закону, разложим переменную составляющую этого тока в ряд Фурье для режима полной компенсации пульсаций выходного напряжения

$$\Delta i = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{2E \sin \pi \gamma}{\pi m \omega_1 L_{11}} \right) \sin m \omega_1 t,$$

где  $L_{11} = L_{S1} + L_{\mu}$  — полная индуктивность обмотки  $w_{11}$ , равная сумме индуктивности рассеяния  $L_{S1}$  и индуктивности связи  $L_{\mu}$ ;  $m$  — номер гармоники. Если вся переменная составляющая тока протекает через  $C_2$ , переменная составляющая напряжения на этом конденсаторе равна

$$\Delta u_{C2} = \frac{1}{C_2} \int \Delta i \, dt = \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{-2E \sin \pi \gamma}{\pi m^2 \omega_1^2 L_{11} C_2} \right) \cos m \omega_1 t.$$

Составляя уравнения для напряжений, приложенных к обмоткам  $w_1$  и  $w_2$ , получаем

$$u = L_{11} di_1/dt + L_{\mu} di_2/dt; \\ u + \Delta u_{C2} = L_{\mu} di_1/dt + L_{22} di_2/dt,$$

где

$$u = \begin{cases} (E - U_n) & \text{на интервале } t_n; \\ -U_n & \text{на интервале } t_n. \end{cases}$$

$L_{22} = L_{S2} + L_{\mu}$  — полная индуктивность обмотки  $w_2$ , а  $L_{S2}$  — индуктивность рассеяния, при этом принято, что  $w_2 \approx w_1$ .

Отсюда находим

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{u(1 - L_{22}/L_{\mu}) + \Delta u_{C2}}{L_{\mu} - L_{11}L_{22}/L_{\mu}}.$$

Следовательно, пульсации тока в обмотке  $w_1$  дросселя обусловлены приложенным к этой обмотке напряжением (первое слагаемое в числителе) и пульсациями напряжения на конденсаторе  $C_2$  (второе слагаемое). С учетом этого пульсации напряжения на нагрузке можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\Delta u_{C1} = \Delta u'_{C1} + \Delta u''_{C1}.$$

Первая составляющая определяется вышеприведенным соотношением для пульсаций выходного напряжения РН при учете в этом соотношении эффективного значения индуктивности обмотки  $w_1$  с учетом магнитной связи с обмоткой  $w_2$ :

$$\Delta u'_{C1} = \frac{E\gamma(1-\gamma)(1-K/n)}{8f^2 L_{11} C_1 (1-K^2)},$$

где  $K = L_{\mu} \sqrt{L_{11}L_{22}}$  — коэффициент связи между обмотками;  $n = \sqrt{L_{11}/L_{22}}$  — коэффициент трансформации.

Эта составляющая пульсаций напряжения может быть легко скомпенсирована при выполнении условия  $K = n$  либо может иметь любой знак при отклонении от этого условия.

Вторая составляющая пульсаций напряжения  $\Delta u''_{C1}$  может быть найдена путем интегрирования второго слагаемого в формуле для  $di_1/dt$  с учетом выражения для  $\Delta u_{C2}$ . При этом получим

$$\Delta i_1'' = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{2E \sin \pi \gamma}{\pi m^3 \omega_1^3 L_{11} C_2 L_{\mu} (1 - 1/K^2)} \right) \sin m \omega_1 t$$

и, следовательно,

$$\Delta u''_{C1} = \frac{1}{C_1} \int \Delta i_1'' \, dt = \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{2E \sin \pi \gamma \cos m \omega_1 t}{\pi m^4 \omega_1^4 L_{11} L_{\mu} (1 - 1/K^2) C_1 C_2} \right).$$

Тогда пульсации напряжения «от пика до пика»

$$\Delta u''_{C1} \approx \frac{4E \sin \pi \gamma}{\pi \omega_1^4 L_{11} L_{\mu} (1 - 1/K^2) C_1 C_2}.$$

Поскольку  $\Delta u''_{C1}$  всегда отрицательно, а  $\Delta u'_{C1}$  может принимать любой знак, возможна их компенсация. Положив  $\Delta u_{C1} = 0$ , найдем условие такой компенсации

$$\frac{\sin \pi \gamma}{\gamma(1-\gamma)(1/Kn - 1/K^2)} = 0,5\pi^5 f^2 L_{\mu} C_2.$$

Видно, что полную компенсацию пульсаций выходного напряжения во всем диапазоне регулирования получить невозможно. Осуществляя полную компенсацию в наилучшей точке регулирования  $\gamma = 0,5$ , нетрудно найти, что отклонения от полной компенсации в крайних точках диапазона регулирования не превышают 10%. Естественно, полную компенсацию можно осуществить в любой другой точке  $\gamma$ .

Для реализации условия компенсации необходимо иметь возможность изменять  $n$  и  $K$ . Подстройка  $n$  легко осуществляется небольшим изменением числа витков одной из обмоток, а изменение  $K$ , например, включением небольшой индуктивности последовательно с обмоткой  $w_1$ . Рассмотренный вариант магнитно-связанного фильтра не является единственным, возможны и другие пути его реализации.

### Характеристики регулятора II рода

Простейшая схема регулятора РНII показана на рис. 60.7, б, а временные диаграммы, поясняющие его работу в режиме непрерывного тока в дросселе, — на рис. 60.14. При включении регулирующего ключа  $K$  через него

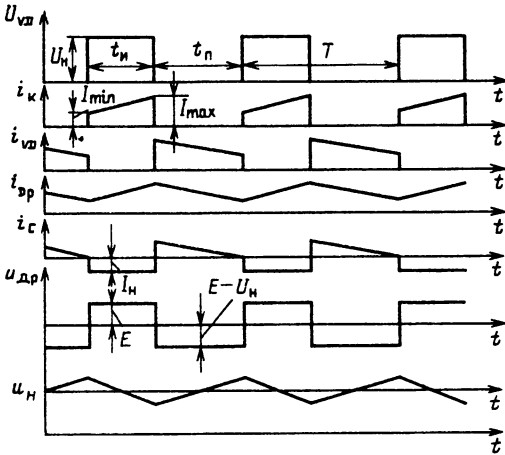


Рис. 60.14. Диаграммы токов и напряжений при работе РНП в режиме непрерывного тока

начинает протекать ток дросселя. На этом интервале времени диод находится под обратным напряжением, равным  $U_n$ . Энергия, потребляемая от источника входного напряжения, идет на увеличение накопленной энергии в дросселе. Необходимая энергия в нагрузке обеспечивается ранее заряженным фильтровым конденсатором  $C_2$ , через который протекает весь ток нагрузки.

При размыкании ключа ток дросселя переключается на диод, а на регулирующем ключе действует напряжение  $U_n$ . Энергия, потребляемая от источника входного напряжения на этом интервале времени, идет в нагрузку и на дозаряд конденсатора фильтра. Ток конденсатора фильтра равен разности тока дросселя и нагрузки. В отличие от РН в РНП сглаживание пульсаций выходного напряжения выполняет только конденсатор фильтра.

**Режим непрерывного тока.** Будем считать, что все ранее принятые допущения справедливы и для РНП. Тогда на интервалах замкнутого и разомкнутого состояний регулирующего ключа ток через обмотку дросселя, а следовательно, и ток через ключ и через диод изменяются по линейному закону

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_1(t) = I_{\min} + \frac{E}{L} t;$$

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_2(t) = I_{\max} + \frac{(E - U_n)}{L} t.$$

Подставив  $i_1(t_n) = I_{\max}$ , а  $i_2(t_n) = I_{\min}$ , получим из этих двух соотношений регулировочную характеристику РНП, которая в относительных единицах имеет вид

$$U_n/E = 1/(1 - \gamma).$$

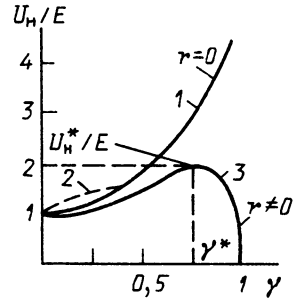


Рис. 60.15. Регулировочные характеристики РНП:

1 – в режиме непрерывного тока для идеальных элементов; 2 – в режиме прерывистого тока, 3 – для реального регулятора в режиме непрерывного тока

На рис. 60.15 показана регулировочная характеристика РНП (линия 1). Определим минимальное и максимальные значения тока дросселя. С этой целью приравняем энергию, запасенную в дросселе за время  $t_n$ , и энергию, отданную источником питания за период  $T$ ,

$$\int_0^{t_n} E i_1(t) dt = (U_n - E) I_n T.$$

Отсюда

$$I_{\min} = \frac{I_n}{1 - \gamma} \mp \frac{E \gamma}{2L f}.$$

Среднее значение тока через дроссель

$$I_{\text{др}} = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} = \frac{I_n}{1 - \gamma}.$$

Токи через регулирующий ключ и через диод соответственно

$$I_{\text{срК}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_1(t) dt = I_{\text{др}} \gamma = \frac{I_n \gamma}{1 - \gamma};$$

$$I_{\text{срДр}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_2(t) dt = I_{\text{др}} (1 - \gamma) = I_n,$$

причем  $I_{\text{др}} = I_{\text{срК}} + I_{\text{срД}}$ .

Напряжение на регулирующем ключе в разомкнутом состоянии и обратное напряжение на диоде

$$U_K = U_D = U_n = \frac{E}{1 - \gamma}.$$

Расчетная мощность регулирующего ключа

$$P_K = I_{K \max} U_{K \max} = \frac{I_H}{1-\gamma} U_H = \frac{P_H}{1-\gamma}.$$

Следовательно, использование регулирующего ключа по мощности при  $\gamma \rightarrow 1$  ухудшается.

Найдем критические значения тока нагрузки и индуктивности дросселя, при которых еще поддерживается режим непрерывного тока. Подставив  $I_{\min} = 0$ , получим

$$I_{H, \text{кр}} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2Lf};$$

$$L_{\text{кр}} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2I_H f}.$$

**Режим прерывистого тока дросселя.** Если  $I_H < I_{H, \text{кр}}$  при заданной индуктивности дросселя либо  $L < L_{\text{кр}}$  при заданном  $I_H$ , то РНП переходит в режим прерывистого тока в дросселе. Для определения регулировочной характеристики в этом режиме примем  $I_{\min} = 0$  и из условия  $i_2(t'_n) = 0$  найдем время проводящего состояния диода

$$t'_n = Et_n / (U_H - E).$$

Среднее значение тока в нагрузке в режиме прерывистого тока, как и ранее, есть среднее значение тока через диод

$$I_H = \frac{1}{T} \int_0^{t'_n} i_2(t) dt.$$

После умножения обеих частей равенства на  $R_H$  и преобразований получим регулировочную характеристику

$$\frac{U_H}{E} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\gamma^2}{2\tau_{\text{Др.н}} f}},$$

где  $\tau_{\text{Др.н}} = L/R_H$ .

Регулировочная характеристика в режиме прерывистого тока изображена на рис. 60.15 штриховой линией 2. Последнее соотношение можно преобразовать к виду

$$\frac{U_H}{E} = 1 + \frac{\gamma^2}{2LI_H f/E}.$$

Это выражение, по существу, описывает внешнюю характеристику идеального РНП в относительных единицах, в режиме прерывистого тока. Эти характеристики при различных  $\gamma$  показаны на рис. 60.16 сплошными линиями в области 1.

**Внешние характеристики регулятора.** Для

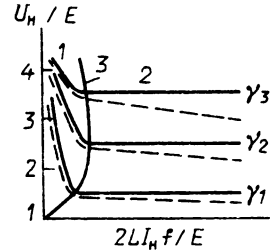


Рис. 60.16. Внешние характеристики РНП при различных  $\gamma$  для режимов прерывистого (область 1) и непрерывного (область 2) токов. Граничная линия 3 построена по формуле для  $I_{H, \text{кр}}$  в тексте

определения внешней характеристики реального РНП в режиме непрерывного тока воспользуемся равенством вольт-секундных площадей, действующих на обмотке дросселя на соответствующих временных интервалах, при учете конечного сопротивления  $r$  обмотки

$$(E - I_{\text{Др}}) t_n = (U_H - E + I_{\text{Др}}) t_p,$$

откуда с учетом  $I_{\text{Др}} = I_H / (1 - \gamma)$  получим внешнюю характеристику в относительных единицах в виде

$$\frac{U_H}{E} = \frac{1}{1-\gamma} - \frac{I_H r}{(1-\gamma)^2 E}.$$

Внешние характеристики при различных  $\gamma$  показаны на рис. 60.16 штриховыми линиями в области 2. Выходное сопротивление РНП равно

$$R_{\text{вых}} = - \frac{\partial U_H}{\partial I_H} = \frac{r}{(1-\gamma)^2}.$$

Заменяв  $I_H = U_H / R_H$ , запишем внешнюю характеристику в другой форме

$$\frac{U_H}{E} = \frac{(1-\gamma)}{(1-\gamma)^2 + r/R_H}.$$

Дифференцируя это выражение по  $\gamma$ , находим  $\gamma^*$ , при которой характеристика имеет максимум

$$\gamma^* = 1 - \sqrt{r/R_H}.$$

При этом максимум выходного напряжения равен

$$U_H^*/E = 0,5 \sqrt{r/R_H}.$$

Таким образом, учет конечного сопротивления обмотки дросселя показывает, что в режиме непрерывного тока внешняя характеристика зависит как от  $I_H$ , так и в сильной степени от  $\gamma$ , а уровень выходного напряже-

ния не может превысить некоторого максимального значения и становится тем меньше, чем больше отношение  $r/R_H$ .

Регулировочная характеристика при  $r = 0,625R_H$  показана на рис. 60.15 линией 3.

**Пульсации выходного напряжения.** Из временной диаграммы тока в конденсаторе фильтра (см. рис. 60.14) можно видеть, что  $\Delta Q = I_H \gamma / f$ , где  $\Delta Q$  — заряд, отбираемый от конденсатора фильтра за время работы регулирующего ключа. Тогда

$$\Delta U_{C2} = I_H \gamma / (f C_2).$$

Наличие у электролитических конденсаторов активной и индуктивной составляющих внутреннего сопротивления вызывает значительные пульсации выходного напряжения, причем влияние этих составляющих из-за импульсного характера тока через конденсатор в РНП сильнее, чем в РН.

**Модификации регулятора с промежуточным отводом у дросселя.** Кроме основной схемы рис. 60.7, б, возможны модификации РНП, отличающиеся наличием у обмотки дросселя отвода, к которому подключен либо диод (рис. 60.17), либо регулирующий ключ  $K$  (в этом случае  $w_{12} > w_{13}$ ). Для получения регулировочной характеристики напишем равенство

$$\frac{E t_n}{w_{13}} = \frac{(U_H - E) t_n}{w_{12}},$$

откуда

$$U_H = E \left[ 1 + \frac{\gamma}{(1 - \gamma)n} \right],$$

где  $n = w_{13}/w_{12}$ .

По тем же причинам, которые были указаны для РН с отводом у обмотки дросселя, модификация РНП по схеме рис. 60.17 не получила большого распространения.

**РНП с магнитно-связанным фильтром.** Существенное уменьшение пульсаций выходного напряжения может быть достигнуто в РНП с магнитно-связанным фильтром, схема которого показана на рис. 60.18. Работа данного регулятора практически не отличается от работы ранее рассмотренного РНП по рис. 60.13. Однако в отличие от последнего здесь имеет место и непрерывное потребление энергии от источника входного напряжения и непрерывная передача энергии в нагрузку. Как и в случае РН с магнитно-связанным фильтром, здесь имеются два контура, составленные магнитно-связанными обмотками дросселя и конденсаторами  $C_2$  и  $C_1$ . Изменяя коэффициенты трансформации и магнитной связи между обмотками, можно добиться,

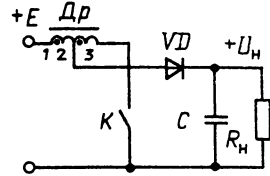


Рис. 60.17. Модификация РНП с отводом на обмотке дросселя

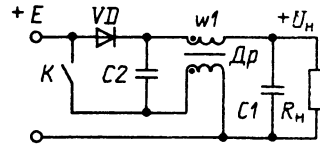


Рис. 60.18. Схема РНП с магнитно-связанным фильтром

чтобы в одной из ветвей, например в ветви  $w_1 - C_1$ , отсутствовали изменения тока и, следовательно, чтобы пульсации выходного напряжения были сведены к нулю. Соотношения для пульсаций напряжения на конденсаторах в схеме рис. 60.13 могут быть использованы и в случае РНП по схеме рис. 60.18.

### Регуляторы с гальваническим разделением входной и выходной цепей

Простейшая схема РПН с гальваническим разделением входной и выходной цепей показана на рис. 60.19. Когда ключ  $K$  включен, в индуктивности первичной обмотки трансформатора  $w_{12}$  накапливается энергия. На этом интервале  $t_n$  диод  $VD$  заперт обратным напряжением, равным сумме напряжения на обмотке  $w_{34}$  и напряжения на конденсаторе  $C$ ; последний при этом разряжается на нагрузку. При размыкании  $K$  напряжение на обмотке  $w_{34}$  изменяет знак, диод  $VD$  отпирается и накопленная в магнитном поле энергия передается в нагрузку и в конденсатор.

Таким образом, данный РПН является развитием регулятора III рода (см. рис. 60.7, в) на случай трансформаторного включения выходной цепи (возможно также ее автотрансформаторное включение). Поэтому регулировочная характеристика такого регулятора описывается выражением

$$U_H = E \frac{\gamma n}{1 - \gamma},$$

где  $n = w_{34}/w_{12}$  — коэффициент трансформации.



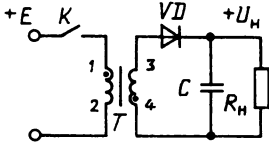


Рис. 60.19 Схема РНИИ с двухобмоточным дросселем, осуществляющим трансформаторное разделение входной и выходной цепей

Из сопоставления со схемой рис. 60.7, в следует, что трансформатор *T* в схеме рис. 60.19 работает по сути дела в режиме дросселя: на интервале  $t_n$  происходит в нем накопление энергии, а на интервале  $t_n$  накопленная энергия отдается.

Схему на рис. 60.19 часто рассматривают также как однокатный преобразователь напряжения (поскольку здесь энергия постоянно напряжения преобразуется в постоянное с промежуточным звеном переменного высокочастотного напряжения, которое при этом подвергается трансформации) с передачей энергии в паузе. В связи с этим основные показатели и характеристики этой схемы приведены в § 60.3, где рассмотрены различные типы однокатных преобразователей напряжения.

Рассматривая схему рис. 60.19 как РНИИ, необходимо отметить ее худшие массогабаритные показатели по сравнению с РНИ и РНИИ. Это объясняется тем, что вся передаваемая в нагрузку энергия должна быть предварительно запасена в виде энергии магнитного поля (тогда как в РНИ и РНИИ часть энергии передается в нагрузку непосредственно из источника питания), и тем, что в РНИИ требуются выходной и входной сглаживающий конденсатор, так как этот регулятор характеризуется импульсным током в выходной и входной цепях. Кроме того, необходимо отметить, что в простейшей схеме на рис. 60.19 при размыкании ключа *K* к нему прикладываются значительные перенапряжения, вызванные наличием магнитного рассеяния между обмотками; в связи с этим в реальной схеме необходимы дополнительные элементы для ограничения этих перенапряжений (см. § 60.3).

**Регуляторы с конденсаторным разделением входной и выходной цепей**

В некоторых случаях, когда не требуется полной гальванической развязки входной и выходной цепей, а достаточно лишь их разделение по постоянному току, могут применяться РПН по схемам рис. 60.20, а или б. Рассмотрим их основные особенности.

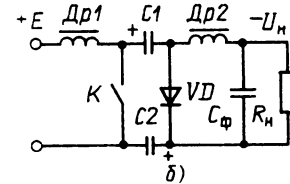
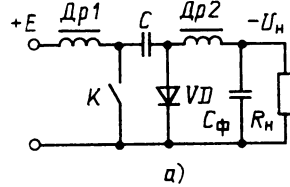


Рис. 60.20. Варианты схем РНИИ с одним (а) и двумя (б) разделительными конденсаторами

При включении ключа *K* одновременно протекают два процесса – накопление энергии в дросселе  $Dp_1$  и передача энергии из конденсатора  $C_1$  (или в схеме рис. 60.20.б из  $C_1, C_2$ ) в фильтр  $Dp_2 - C_ф$  и в нагрузку  $R_n$ . На этом этапе диод *VD* закрыт. При выключении ключа *K* включается диод *VD* и снова одновременно протекают два процесса: передача энергии, накопленной в дросселе  $Dp_1$ , в конденсатор  $C_1$  (или в  $C_1$  и  $C_2$ ) и передача энергии, накопленной в фильтре  $Dp_2 - C_ф$ , в нагрузку  $R_n$ . Таким образом, в процессе работы регулятора ток, потребляемый от источника входного напряжения, непрерывен, как в РНИ, а пульсации выходного напряжения определяются Г-образным фильтром  $Dp_2 - C_ф$ , как в РНИ.

Регулировочная характеристика рассматриваемых регуляторов в режиме непрерывного тока в обоих дросселях имеет вид

$$U_n = -E \frac{\gamma}{1 - \gamma}$$

Минимальное и максимальное значения тока через дроссель  $Dp_1$ , определяемые из соотношений

$$(U_{C1} - E) I_{n t_n} = \int_0^{t_n} E i_1(t) dt;$$

$$i_1(t) = I_{Dp1 min} + \frac{E}{L_1} t,$$

где  $t_n$  – время проводящего состояния ключа *K*;  $L_1$  – индуктивность дросселя  $Dp_1$ , равны:

$$I_{Dp1 max} = \frac{I_n \gamma}{1 - \gamma} \mp \frac{E \gamma}{2 L_1 f}$$

Среднее значение тока через дроссель  $Dp_1$

$$I_{Dp1} = \frac{I_{Dp1\min} + I_{Dp1\max}}{2} = \frac{I_n \gamma}{1 - \gamma}.$$

Критический ток нагрузки  $I_{н,кр}$  и критическую индуктивность  $L_{1кр}$  найдем из условия  $I_{Dp1\min} = 0$ :

$$I_{н,кр} = \frac{E(1 - \gamma)}{2L_1 f}; \quad L_{1кр} = \frac{E(1 - \gamma)}{2I_n f}.$$

Минимальное, максимальное и среднее значения тока через дроссель  $Dp_2$ , определяемые из соотношений

$$U_n I_n T = \int_0^{t_n} U_{C1} i_2(t) dt;$$

$$i_2(t) = I_{Dp2\min} + \frac{U_{C1} - E}{L_2} t,$$

где  $L_2$  — индуктивность дросселя  $Dp_2$ , равны:

$$I_{Dp2\max} = I_n \mp \frac{E\gamma}{2L_2 f}.$$

Критический ток нагрузки  $I_{н,кр}$  через дроссель  $Dp_2$  и критическую индуктивность  $L_{2кр}$  определим из  $I_{Dp2\min} = 0$

$$I_{н,кр} = E\gamma/2L_2 f; \quad L_{2кр} = E\gamma/2I_n f.$$

Минимальное и максимальное значения тока через регулирующий ключ и диод

$$I_{K\max} = I_{Dp1\max} + I_{Dp2\max} =$$

$$= \frac{I_n}{1 - \gamma} \mp \left( \frac{E\gamma}{2L_1 f} + \frac{E\gamma}{2L_2 f} \right).$$

Для случая  $L_1 = L_2 = L$

$$I_{K\max} = \frac{I_n}{1 - \gamma} \mp \frac{E\gamma}{Lf}.$$

Отсюда средние значения тока через  $K$  и  $VD$

$$I_K = \frac{I_n \gamma}{1 - \gamma}, \quad I_{VD} = I_n.$$

Напряжения, действующие на ключе  $K$  и диоде  $VD$  в выключенном состоянии,

$$U_K = U_{VD} = U_{C1} = \frac{E}{1 - \gamma}.$$

Изменение напряжения на выходе регулятора определяется выражением  $\Delta U_{C2} = E\gamma/(8L_2 C_2 f^2)$ .

Внешняя характеристика регулятора с учетом конечных сопротивлений обмоток дросселей  $Dp_1, Dp_2$ , полученная по той же мето-

дике, что и для РНІ и РНІІ, имеет вид

$$\frac{E\gamma}{1 - \gamma} - I_n \left[ \frac{r_1 \gamma^2}{(1 - \gamma)^2} + r_2 \right] = U_n,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — сопротивления обмоток дросселя  $Dp_1$  и  $Dp_2$ .

Для случая одинаковых дросселей  $r_1 = r_2 = r$  регулировочная характеристика имеет вид

$$\frac{E\gamma}{1 - \gamma} - I_n r \left[ 1 + \frac{\gamma^2}{(1 - \gamma)^2} \right] = U_n.$$

Выходное сопротивление регулятора

$$R_{\text{вых}} = r_2 + \frac{r_1 \gamma^2}{(1 - \gamma)^2}.$$

Из анализа работы регулятора следует, что в любой момент времени напряжения, действующие на обмотках дросселей  $Dp_1$  и  $Dp_2$ , равны и имеют одинаковую форму. Это позволяет использовать один двухобмоточный дроссель  $Dp_1$  с одинаковым числом витков (рис. 60.21). Все полученные выше соотношения для схем рис. 60.20, а и б справедливы и для данного регулятора. Однако в этой схеме за счет оптимального выбора коэффициента связи между обмотками  $K = L_n / \sqrt{(L_{S1} + L_n)(L_{S2} + L_n)}$  ( $L_{S1}$  и  $L_{S2}$  — индуктивности рассеяния обмоток,  $L_n$  — индуктивность намагничивания в Т-образной схеме замещения) и коэффициента трансформации  $n = w_1/w_2$  можно получить весьма сильное ослабление пульсаций тока в обмотке  $w_2$  и тем самым резкое снижение пульсаций напряжения на выходе.

Можно показать, что при определенных  $K$  и  $n$  скорости изменения токов в первичной и вторичной обмотках дросселя будут иметь разные знаки на каждом из интервалов времени  $\gamma T$  и  $(1 - \gamma) T$ , что эквивалентно отрицательной эффективной индуктивности одной из обмоток.

Обозначим

$$L_{\text{эф1}} = L_{S1} + L_n + L_n L_{S1}/L_{S2};$$

$$L_{\text{эф2}} = L_{S2} + L_n + L_n L_{S2}/L_{S1}.$$

Условия отрицательной эффективной

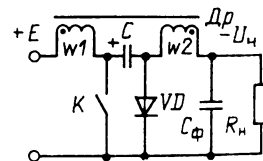


Рис. 60.21. Вариант схемы РНІІ с разделительным конденсатором и двухобмоточным дросселем

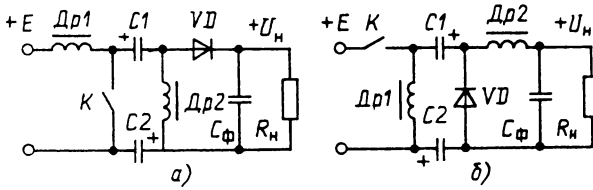


Рис. 60.22. Варианты РНИИ с разделительным конденсатором и двумя дросселями

индуктивности имеют вид

$$L_{\text{эф}} < 0, L_{\text{эф}} > 0 \text{ при } n > 1/K;$$

$$L_{\text{эф}} < 0, L_{\text{эф}} > 0 \text{ при } n < K.$$

Для выполнения этих неравенств коэффициент трансформации  $n$  может быть сделан несколько большим, чем единица, путем незначительного уменьшения числа витков вторичной обмотки, поскольку коэффициент связи не может быть больше единицы.

Наиболее важным является случай  $K \rightarrow 1$ ,  $n \rightarrow 1$ , например  $n = 0,996$ ,  $K = 0,995$ , при этом  $L_{\text{эф}1} = 1,11L_{11}$ ,  $L_{\text{эф}2} = 10L_{22}$ , т. е. имеет место значительное возрастание эффективной индуктивности  $L_{\text{эф}2}$ , а следовательно, существенное снижение пульсаций выходного напряжения, в то время как пульсации входного тока остаются практически неизменными.

На основе рассмотренного регулятора могут быть построены различные модификации, две из которых показаны на рис. 60.22, а и б. Обе эти схемы могут быть реализованы с помощью одного двухобмоточного дросселя.

### 60.3. ОДНОТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ (ОПН)

#### Основные типы преобразователей напряжения

Один из важнейших путей разработки и создания современных малогабаритных ИВЭП, как указывалось в § 60.1, связан с применением транзисторных преобразователей постоянного напряжения в постоянное с трансформацией напряжения в промежуточном звене повышенной частоты.

К одноктактным относят преобразователи, у которых только на одном интервале времени, входящем в период частоты коммутации, образуется контур, в котором энергия от источника питания передается через силовой транзисторный ключ в обмотку трансформатора. При этом в контур (контур), образующийся на другом (других) интервалах периода частоты коммутации и содержащий обмотку (обмотки) трансформатора, источник питания не входит. В результате магнитный поток трансформатора в одноктактных преобра-

зователях напряжения (ОПН) всегда содержит постоянную составляющую и перемагничивание сердечника происходит по несимметричному частному циклу.

Существует несколько основных типов ОПН. В одном из них энергия от источника питания передается через трансформатор в нагрузку во время замкнутого состояния транзисторного ключа, управляющего этой передачей, или, как говорят, «в импульсе». Простейшая схема такого ОПН, называемого иногда ОПНИ, показана на рис. 60.23, а, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 60.23, б.

В ОПН другого типа энергия от источника питания передается при замкнутом состоянии транзисторного ключа, т. е. на интервале импульса, в обмотку трансформатора и запасается в его магнитном поле, а на другом интервале во время разомкнутого состояния ключа накопленная энергия из магнитного поля трансформатора передается в нагрузку. Схема такого ОПН, часто называемого преобразователем с передачей энергии «в паузе», и диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 60.24, а и б. Поскольку такой ОПН по сути дела является импульсным регулятором постоянного напряжения III рода с трансформаторным разделением цепей (см. выше соответствующий раздел в § 60.2), его иногда называют ОПНИИ. Существуют также ОПН, в которых энергия передается в нагрузку как во время импульса, так и во время паузы. Такие ОПН, как будет показано ниже, являются комбинацией ОПНИ и ОПНИИ.

Двухтактными называют преобразователи постоянного напряжения, в которых на периоде частоты коммутации имеются два интервала, на которых в контур, образованный обмоткой (обмотками) трансформатора и силовыми транзисторными ключами, входит источник питания, причем магнитный поток в трансформаторе на этих двух интервалах изменяется в противоположную сторону. В результате при нормальном установившемся режиме сердечник трансформатора перемагничивается по симметричному частному циклу. Такие преобразователи называются для краткости ДПН.

Рис. 60.23. Схема ОПН с передачей энергии в импульсе (а) и диаграммы токов и напряжений (б)

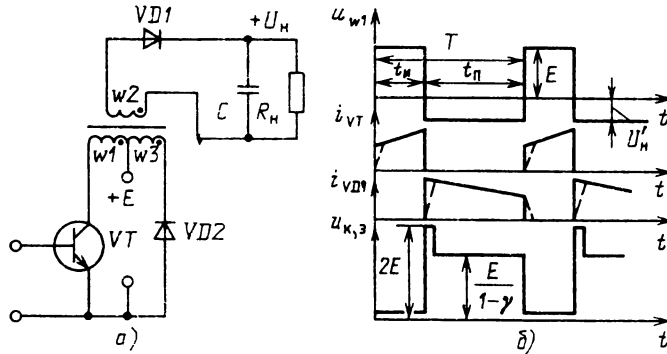
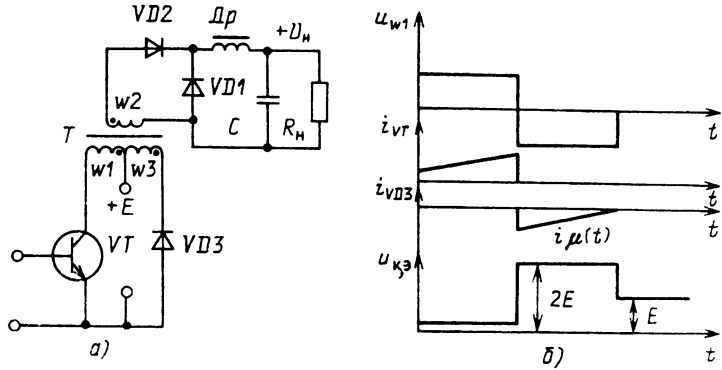


Рис. 60.24. Схема ОПН с передачей энергии в паузе (а) и диаграммы токов и напряжений (б)

На рис. 60.25 в координатах «выходная мощность  $P_n$  — выходное напряжение  $U_n$ » показаны области, где целесообразно применение названных основных видов преобразователей — ОПШ, ОПН и ДПН [60.10]. Видно, что ОПШ целесообразно применять при малых мощностях, однако в области повышенных и высоких напряжений граница по мощности сдвигается вправо. При  $P_n$  порядка десятков и сотен ватт более предпочтительными становятся ОПН, а при  $P_n$  около 1 кВт и выше — ДПН. Режимы работы и характеристики последних описаны в § 60.4.

**ОПН с передачей энергии в импульсе**

При включенном транзисторе  $VT$  (см. рис. 60.23, а и б) энергия от источника питания  $E$  через трансформатор и диод  $VD2$  поступает в нагрузку и идет на накопление энергии в индуктивности дросселя фильтра. При выключенном транзисторе  $VT$  накопленная в индуктивности дросселя энергия отдается в нагрузку через шунтирующий диод  $VD1$ , а накопленная в индуктивности намагничивания трансформатора энергия возвращается

в первичный источник напряжения  $E$  обмоткой  $w_3$  через диод  $VD3$ , за счет чего происходит ограничение перенапряжений на коллекторе  $VT$  в момент его выключения.

Регулировочная характеристика ОПН в режиме непрерывного тока в дросселе фильтра может быть получена из условия равенства вольт-секундных площадей на обмотке этого дросселя на интервалах импульса  $t_n$  и паузы  $t_p$

$$(nE - U_n)t_n = U_n t_p,$$

откуда

$$U_n = E\gamma n,$$

где  $n = w_2/w_1$ ;  $\gamma = t_n/T$ .

Отличием ОПН от описанного в § 60.2 РН является только наличие трансформатора. Поэтому все соотношения, полученные ранее для РН, справедливы и для ОПН. Основное внимание уделим анализу работы трансформатора.

Наличие трансформатора ограничивает возможный диапазон изменения коэффициента  $\gamma$ , который обычно не превышает  $\gamma_{max} = 0,5$ ; на практике  $\gamma_{max} \leq 0,45$ .

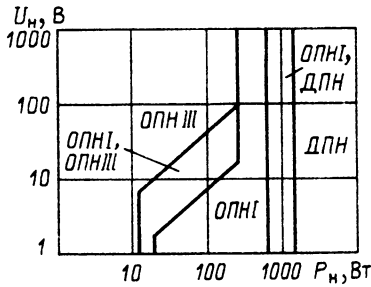


Рис. 60.25. Области целесообразного использования ОПН с передачей энергии в паузе (ОПН III), в импульсе (ОПН I) и двухтактных ПН (ДПН) в зависимости от мощности  $P_n$  и напряжения  $U_n$  на нагрузке

При работе преобразователя в режиме стабилизации выходного напряжения справедливо соотношение  $E_{min}\gamma_{max} = E_{max}\gamma_{min}$  и, следовательно,

$$\gamma_{min} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \gamma_{max}$$

Коэффициент трансформации трансформатора может быть определен по соотношению

$$n = \frac{E_{min}\gamma_{max}}{U_n}$$

где  $U'_n$  — напряжение, превышающее  $U_n$  примерно на 1,5 В и учитывающее потери напряжения в диодах  $UD_1$ ,  $VD_2$ , в обмотках дросселя и трансформатора.

Число витков первичной обмотки  $w_1$  трансформатора равно

$$w_1 = \frac{E_{max}\gamma_{max}}{\Delta B_{max} S f}$$

где  $S$  — сечение магнитопровода;  $\Delta B$  — максимальное изменение индукции в сердечнике трансформатора;  $f$  — рабочая частота. Для большинства ферритовых магнитопроводов, если не применяются специальные меры,  $\Delta B_{max} \leq 0,2$  Тл.

С целью уменьшения возможного перенапряжения на коллекторе транзистора  $VT$  выбираем  $w_3 = w_1$  и эти обмотки наматываются одновременно в два провода.

Определив  $w_1$ , найдем  $w_2$ :

$$w_2 = w_1 n$$

Индуктивность первичной обмотки

$$L_\mu = \frac{\mu_a \mu_0 w_1^2 S}{l}$$

где  $\mu_a$  — усредненная магнитная проницаемость

при изменении индукции на величину  $\Delta B_{max}$ ;  $l$  — средняя длина магнитопровода.

Максимальное значение тока намагничивания в первичной обмотке трансформатора

$$I_{\mu max} = \frac{E_{max}\gamma_{min}}{L_\mu f}$$

Обычно  $I_{\mu max}$  составляет 5–10% тока первичной обмотки трансформатора. Объем магнитопровода трансформатора определим из соотношения

$$E = \frac{w_1 \Delta B_{max} S}{\gamma T} = \frac{L_\mu I_{\mu max}}{\gamma T}$$

откуда  $w_1 \Delta B_{max} S = L_\mu I_{\mu max}$ .

Возводя в квадрат обе части равенства и учитывая соотношение для  $L_\mu$ , находим соотношение для расчета объема магнитопровода

$$V = Sl = \frac{\mu_0 \mu_a L_\mu I_{\mu}^2}{\Delta B_{max}^2}$$

#### ОПН с передачей энергии в паузе

Как уже отмечалось выше, работа ОПН с передачей энергии в паузе, схема которого и диаграммы, поясняющие работу, показаны на рис. 60.24, а и б соответственно, практически ничем не отличается от работы регулятора напряжения III рода с трансформаторным разделением входных и выходных цепей.

Примем, что токи в обмотке  $w_1$  на интервале  $t_n$  и в обмотке  $w_2$  на интервале  $t_n$  изменяются по линейному закону

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_1(t) = I_{1min} + \frac{E}{L_1} t;$$

$$\text{при } 0 \leq t \leq t_n \quad i_2(t) = I_{2max} - \frac{U_n}{L_2} t.$$

Токи в начале и конце этих интервалов, а также индуктивности обмоток дросселя связаны соотношениями

$$I_{1max} w_1 = I_{2max} w_2;$$

$$I_{2min} w_2 = I_{1min} w_1;$$

$$L_2 = L_1 (w_2/w_1)^2 = L_1 n^2.$$

Из этих соотношений при условии, что  $i_1(t_n) = I_{1max}$ ,  $i_2(t_n) = I_{2min}$ , находим регулировочную характеристику в режиме непрерывного тока

$$\frac{U_n}{E} = \frac{n\gamma}{1-\gamma}.$$

Из равенства энергии в нагрузке, усред-

ненной за период  $T$ , и энергии, потребляемой от источника  $E$  за время  $t_n$ ,

$$U_n I_n T = \int_0^{t_n} E i_1(t) dt$$

найдем

$$I_{1\ min} = \frac{n I_n}{1 - \gamma} \mp \frac{E \gamma}{2 L_1 f}$$

Значения  $I_{2\ min}$  и  $I_{2\ max}$  находятся умножением соответственно  $I_{1\ min}$ ,  $I_{1\ max}$  на  $n$ .

Средние значения тока через транзистор и через диод определяем соответственно в виде

$$I_{ср,к} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_1(t) dt = \frac{I_n \gamma n}{1 - \gamma};$$

$$I_{ср VD} = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} i_2(t) dt = I_n$$

Напряжения на транзисторе и на диоде при их разомкнутом состоянии

$$U_K = E + U_n/n;$$

$$U_{VD} = U_n + nE.$$

С целью определения критических значений тока и индуктивности первичной обмотки полагаем  $I_{1\ min} = 0$ . Отсюда

$$I_{н,кр} = \frac{E \gamma (1 - \gamma)}{2 L_1 f n}; \quad L_{кр} = \frac{E \gamma (1 - \gamma)}{2 I_n f n}.$$

Если ток нагрузки  $I_n < I_{н,кр}$  при заданной индуктивности  $L_1$  или  $L_1 < L_{кр}$  при заданном токе нагрузки, то преобразователь переходит в режим прерывистого тока. Регулировочная характеристика в этом случае может быть найдена из вышеприведенных соотношений в предположении, что  $I_{1\ min} = 0$ :

$$\frac{U_n}{E} = \gamma \sqrt{\frac{1}{2 \tau_{LH} f}},$$

где  $\tau_{LH} = L_1/R_H$ .

Критическое значение  $\gamma_{кр}$  определяется выражением

$$\gamma_{кр} = 1 - n \sqrt{2 \tau_{LH} f}.$$

Регулировочная характеристика в режиме прерывистого тока изображена на рис. 60.26 для двух значений  $\tau_{LH}$  штриховыми линиями. Из последнего выражения можно получить соотношение

$$U_n/E = \gamma^2 / (2 L_1 I_n f / E),$$

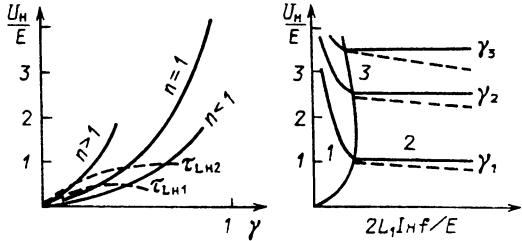


Рис. 60.26. Регулировочные характеристики ОПН с передачей энергии в паузе при различных значениях  $n$  в режиме непрерывного (сплошные) и прерывистого (штриховые линии) токов

Рис. 60.27. Внешние характеристики ОПН с передачей энергии в паузе при различных  $\gamma$  в режиме прерывистого (область 1) и непрерывного (область 2) токов. Граничная линия 3 определяется формулой для  $I_{н,кр}$  в тексте

являющееся внешней характеристикой идеального РНП в режиме прерывистого тока. Внешние характеристики для разных  $\gamma$  показаны на рис. 60.27 сплошными линиями в области 1.

Внешнюю характеристику в режиме непрерывного тока при учете сопротивлений обмоток трансформатора определим из условия равенства вольт-секундных площадей в установившемся режиме, действующих на соответствующих индуктивностях и на соответствующих интервалах времени:

$$U_n = \frac{E \gamma n}{1 - \gamma} - \frac{I_n [r_1 n^2 \gamma + r_2 (1 - \gamma)]}{(1 - \gamma)^2}.$$

Эти внешние характеристики показаны на рис. 60.27 штриховыми линиями. Последнее выражение можно переписать в виде

$$\frac{U_n}{E} = \frac{R_H \gamma (1 - \gamma) n}{R_H (1 - \gamma)^2 + r_1 \gamma n + r_2 (1 - \gamma)}.$$

Дифференцируя это выражение по  $\gamma$ , можно показать, как и в случае РНП, что существует некоторое  $\gamma^*$ , при котором  $U_n/E = f(\gamma)$  достигает максимума, после чего при  $\gamma \rightarrow 1$  монотонно стремится к нулю.

Поскольку в рассматриваемом ОПН ток намагничивания равен среднему значению тока в обмотке  $w_1$ , т. е.  $I_m = I_n n / (1 - \gamma)$ , объем магнитопровода в ОПНП будет всегда больше, чем в ОПН, при прочих равных условиях.

Из-за неполной магнитной связи между первичной и вторичной обмотками ток во вторичной обмотке при выключении регулирующего транзистора  $V_T$  изменится скачком

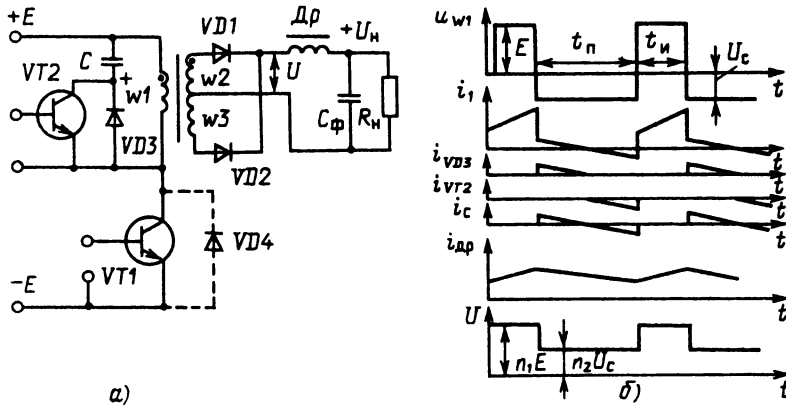


Рис. 60.28. Схема ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе (а) и диаграммы токов и напряжений (б)

не может. Поэтому на коллекторе  $VT$  возможно появление сильных перенапряжений, способных вывести транзистор из строя. Для их устранения вводятся рекуперационная обмотка  $w_3 = w_1$  и диод  $VD2$ . Обмотки  $w_3$  и  $w_1$  наматываются одновременно в два провода для обеспечения между ними полной магнитной связи. В этом случае при выключении транзистора  $VT$  возникает в первый момент времени импульс тока в  $w_3$ , направление которого встречно полярности напряжения источника  $E$  (в связи с чем этот источник должен быть зашунтирован высокочастотным конденсатором), а затем по мере нарастания тока диода  $VD$  до установившегося значения этот ток в  $w_3$  спадает к нулю. При этом напряжение на коллекторе транзистора  $VT$  не превышает  $2E$ .

Коэффициент трансформации  $n = w_2/w_1$  в режиме стабилизации выходного напряжения можно выбрать различными путями. При этом следует иметь в виду, что увеличение длительности проводящего состояния транзистора и уменьшение длительности работы диода приводит к резкому возрастанию потерь мощности и к снижению КПД преобразователя. Поэтому обычно на практике  $\gamma \leq 0,5$ . Тогда из (2.10) после преобразования

$$n = U_H / (U_{Kmax} - E_{max});$$

$$\gamma_{max} = (U_{Kmax} - E_{max}) / (U_{Kmax} - E_{max} + E_{min}),$$

где  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  — минимальное и максимальное значения входного напряжения, а  $U_{Kmax}$  — максимальное допустимое напряжение на коллекторе  $VT$ .

### ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе

Как уже указывалось, ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе основан на объединении свойств ОПНИ и ОПНИИ. Такое объединение позволяет существенно улучшить характеристики преобразователя.

Возможно несколько вариантов построения ОПН рассматриваемого типа. Схема одного из них показана на рис. 60.28, а, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 60.28, б. В установившемся режиме конденсатор  $C$  заряжен с показанной на рисунке полярностью до некоторого уровня, зависящего от напряжения  $E$  и относительного времени проводящего состояния  $\gamma$  транзистора  $VT1$ . Транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$  включаются противофазно, т. е. если включен  $VT1$ , то  $VT2$  выключен, и наоборот. На интервале, когда включен  $VT1$ , наличие  $C$ ,  $VT2$ ,  $VD3$ ,  $VD2$  не сказывается, и преобразователь по своей структуре является полным аналогом ОПНИ. На этом интервале, обозначенном  $t_n$ , энергия от источника питания передается в нагрузку, а также накапливается в магнитном поле обмотки дросселя и трансформатора. При выключении транзистора  $VT1$  и включении  $VT2$  возникает структура, аналогичная ОПНИИ. На интервале  $t_n$ , когда включен  $VT2$ , энергия, накопленная в индуктивности намагничивания трансформатора, передается через диод  $VD2$  в нагрузку. При этом ток, равный разности тока намагничивания трансформатора и приведенного к первичной обмотке тока дросселя, замыкается через конденсатор  $C$ . Этот разностный ток в течение первой половины проводящего состояния  $VD2$  замыкается через диод  $VD3$ , а в течение второй половины — через

транзистор  $VT2$ . Как следует из рис. 60.28, б, в кривой напряжения  $U_1$ , действующего на входе сглаживающего фильтра, имеются ступеньки, высота которых зависит от соотношения коэффициентов трансформации  $n_1 = w_2/w_1$  и  $n_2 = w_3/w_1$ . Такая форма напряжения позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели сглаживающего фильтра.

Согласно рис. 60.28, б токи через обмотки трансформатора  $w_1$  и дросселя (в режиме, когда эти токи непрерывны) на интервалах времени замкнутого и разомкнутого состояния транзистора  $VT1$  изменяются в соответствии с выражениями

$$i_{1н}(t) = I_{1\min} + \frac{Et}{L_1} \text{ при } 0 \leq t \leq t_n;$$

$$i_{1п}(t) = I_{1\max} - \frac{U_C t}{L_1} \text{ при } 0 \leq t \leq t_n;$$

$$i_{др}(t) = I_{др\min} + \frac{(n_1 E - U_n)t}{L_{др}} \text{ при } 0 \leq t \leq t_n;$$

$$i_{др,п}(t) = I_{др\max} - \frac{(U_n - n_2 U_C)t}{L_{др}} \text{ при } 0 \leq t \leq t_n,$$

где  $L_1$  и  $L_{др}$  — индуктивности обмотки  $w_1$  трансформатора и дросселя. Отсюда среднее напряжение  $U_C$  на конденсаторе  $C$  и регулировочная характеристика ОПН характеризуются выражениями

$$U_C/E = \gamma/(1 - \gamma);$$

$$U_n/E = (n_1 + n_2)\gamma.$$

Найдем минимальные и максимальные токи в обмотках дросселя и трансформатора. Для интервала времени, соответствующего включенному состоянию транзистора  $VT1$ ,

$$n_1 E \gamma I_n T = \int_0^{t_n} n_1 E i_{др,п}(t) dt.$$

Отсюда

$$I_{др\max} = I_n \mp \frac{(n_1 E - U_n)\gamma}{2L_{др}f}.$$

Для интервала времени, соответствующего включенному состоянию транзистора  $VT2$ ,

$$n_2 E \gamma I_n T = \int_0^{t_n} \frac{E\gamma}{1 - \gamma} i_{1п}(t) dt.$$

Отсюда

$$I_{1\max} = n_2 I_n \mp \frac{E\gamma}{2L_1 f}.$$

Минимальное и максимальное значения тока через транзистор  $VT1$

$$I_{VT1\max}^{\min} = n_1 I_{др\max}^{\min} + I_{1\max}^{\min}.$$

Напряжения на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  и диодах  $VD3$ ,  $VD2$ ,  $VD1$  в выключенных состояниях:

$$U_{кVT1} = U_{кVT2} = U_{VD3} = \frac{E}{1 - \gamma};$$

$$U_{VD1} = (n_1 + n_2) \frac{E\gamma}{1 - \gamma};$$

$$U_{VD2} = (n_1 + n_2)E.$$

Расчетная мощность регулирующего транзистора  $VT1$

$$P_K = \frac{P_n}{\gamma(1 - \gamma)}.$$

Полагая  $I_{1\min} = 0$ ,  $I_{др\min} = 0$ , находим критические значения индуктивностей, соответствующие переходу к режиму прерывистого тока:

$$L_{1кр} = \frac{E\gamma}{2n_2 I_n f};$$

$$L_{др,кр} = \frac{E\gamma [n_1 - (n_1 + n_2)\gamma]}{2I_n f}.$$

Введение диода  $VD4$ , показанного на рис. 60.28, а штриховой линией, позволяет исключить режим прерывистого тока в обмотке  $w_1$  и переводит преобразователь в обратимый режим. В этом режиме преобразователь поддерживает уровень выходного напряжения и при холостом ходе на выходе.

Двойная амплитуда пульсаций напряжения  $\Delta U_C$  на конденсаторе  $C$  равна

$$\Delta U_C = \frac{I_{C\max}(1 - \gamma)T}{2C} = \frac{E\gamma(1 - \gamma)}{8f^2 C} \times \left\{ \frac{1}{L_1} - \frac{n_2 [n_1 - (n_1 + n_2)\gamma]}{L_{др}} \right\}.$$

Двойная амплитуда пульсаций напряжения на выходе преобразователя, т. е. на конденсаторе  $C_\Phi$ ,

$$\Delta U_{C\Phi} = \frac{E\gamma [n_1 - (n_1 + n_2)\gamma]}{8L_{др} C_\Phi f^2}.$$

Нетрудно видеть, что  $\Delta U_{C\Phi} = 0$  при  $\gamma = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$ . При изменении  $\gamma$  в определенном диапазоне можно за счет соответствующего выбора коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$  существенно снизить пульсации выходного напряжения. Для получения хорошей магнитной



связи между обмотками целесообразно выбрать  $n_1 = n_2 = n$ . Тогда  $\Delta U_{C\phi} = 0$  при  $\gamma = 0,5$ . Коэффициент трансформации  $n$  при изменении входного напряжения от  $E_{min}$  до  $E_{max}$  и при  $\gamma = 0,5$  равен

$$n = \frac{U_H}{2} \left( \frac{1}{E_{min}} + \frac{1}{E_{max}} \right).$$

### Однотактные преобразователи напряжения с магнитно-связанными дросселями

Преобразователи напряжения с магнитно-связанными дросселями (МОПН) разработаны с целью существенного снижения массы и габаритных размеров реактивных элементов.

В МОПН в принципе возможно полное устранение пульсаций тока в обмотках дросселя, а следовательно, и пульсаций выходного напряжения. Выделить такие компоненты, как трансформатор и дроссель сглаживающего фильтра, во многих схемах МОПН трудно, поскольку их функции могут быть объединены в одном узле. К настоящему времени разработано много различных преобразователей, в которых использованы полезные свойства магнитно-связанных цепей. Однако все их многообразие сводится к двум способам приведения к нулю пульсаций тока в обмотках дросселя, которые условно будем называть последовательной и параллельной компенсацией.

**МОПН с последовательной компенсацией.** Схема МОПН с последовательной компенсацией пульсаций показана на рис. 60.29. Достоинствами данного МОПН являются: широкий диапазон регулирования уровня выходного напряжения; высокий КПД; непрерывность потребления энергии от первичного источника напряжения и непрерывность передачи энергии в нагрузку; исключение несимметричной работы трансформатора; возможность сведения к нулю пульсаций выходного напряжения или пульсаций входного тока. В рассматриваемом МОПН с целью

снижения влияния индуктивностей рассеяния на работу преобразователя целесообразно выбирать коэффициент трансформации разделительного трансформатора равным единице.

Работа МОПН, показанного на рис. 60.29, практически ничем не отличается от работы рассмотренного в § 60.2 регулятора с конденсаторным разделением входных и выходных цепей и одним двухобмоточным дросселем (см. рис. 60.21). Справедливыми остаются и все основные соотношения для РПН с конденсаторным разделением цепей. Напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  при  $n = 1$  определяются из выражений

$$U_{C1} = E; \quad U_{C2} = \frac{E\gamma}{1-\gamma}.$$

Регулировочная характеристика МОПН, как и для РПН, имеет вид:

$$U_H/E = \gamma/(1-\gamma).$$

**МОПН с параллельной компенсацией.** Схема МОПН с параллельной компенсацией пульсаций показана на рис. 60.30. В отличие от МОПН с последовательной компенсацией в данной схеме возможно одновременно свести к нулю пульсации выходного напряжения и пульсации входного тока.

При включении регулирующего транзистора  $VT1$  одновременно протекают два процесса: накопление магнитной энергии в индуктивности  $L_{11}$  обмотки  $w_1$  входного дросселя и передача энергии из разделительного входного  $C_1$  и выходного  $C_2$  конденсаторов через изолирующий трансформатор  $T$  и сглаживающий фильтр, образованный индуктивностью выходного дросселя  $L_{22}$  и конденсатором  $C_\phi$ , в нагрузку  $R_H$ . При выключении транзистора  $VT1$  также одновременно протекают два процесса: передача энергии, накопленной в индуктивности  $L_{11}$ , во входной разделительный конденсатор  $C_1$  и через изолирующий трансформатор  $T$  в выходной разде-

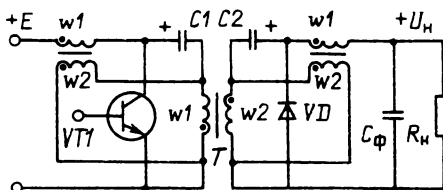


Рис. 60.29. ОПН с магнитно-связанными дросселями и последовательной компенсацией пульсаций

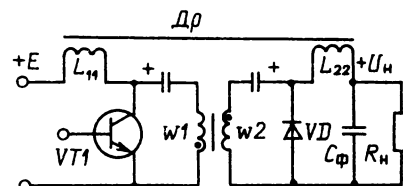


Рис. 60.30. ОПН с магнитно-связанными дросселями и параллельной компенсацией пульсаций

лительный конденсатор  $C_2$ , а также передача энергии, накопленной в индуктивности  $L_{22}$ , через включенный шунтирующий диод  $VD$  в нагрузку.

Наличие вторичных обмоток и обеих дросселей влияет на значение пульсаций тока в их первичных обмотках и как результат на значение пульсаций входного тока и выходного напряжения. При определенном соотношении параметров обеих дросселей указанные пульсации токов могут быть сведены к нулю и, следовательно, могут быть исключены пульсации напряжения первичного источника и пульсации выходного напряжения. Как и для ранее рассмотренного МОПН с последовательной компенсацией пульсаций тока в обмотках дросселей, напряжения на разделительных конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$  определяются выражениями  $U_{C1} = E$ ,  $U_{C2} = \frac{E\gamma}{1-\gamma}$ . Обычно выбирают  $n = w_2/w_1 = 1$ .

Регулировочная характеристика преобразователя

$$\frac{U_n}{E} = \frac{\gamma}{1-\gamma}.$$

С целью одновременного сведения к нулю пульсаций выходного напряжения и входного тока в схеме рис. 60.30 следует определенным образом выбрать коэффициенты трансформации и коэффициенты магнитной связи между обмотками  $w_1$  и  $w_2$  каждого из дросселей, чтобы обеспечить значительное возрастание эффективной индуктивности их обмоток  $w_1$  (подобно выбору коэффициентов  $n$  и  $K$  в схеме РНШ с двухобмоточным дросселем, рис. 60.21).

## 60.4. ДВУХТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ (ДПН)

### Разновидности ДПН

Определение ДПН было дано в § 60.3 «Основные типы преобразователей напряжения». Напомним, что для ДПН характерно близкое к симметричному перемагничиванию сердечника трансформатора по частному или по полному циклу, причем на обоих интервалах, когда происходит перемагничивание в прямом и обратном направлении, образуются одинаковые контуры за счет противофазно работающих ключевых приборов и энергия передается от источника первичного напряжения через трансформатор в нагрузку.

В дальнейшем без специальных оговорок принято, что нагрузка подключается ко вторичной обмотке трансформатора ДПН через

двухтактный выпрямитель, выполненный по схеме с выводом нулевой точки обмотки (нулевая схема) или по мостовой схеме. В большинстве случаев между нагрузкой и выпрямителем дополнительно включают элементы сглаживающего фильтра.

Если с помощью преобразователя осуществляется регулирование мощности, передаваемой в нагрузку (чаще всего широтно-импульсное – ШИР, реже частотно-импульсное – ЧИР), ДПН называют регулирующим.

По способу управления ключевыми приборами, которыми в реальных ИВЭП в большинстве случаев являются биполярные или полевые транзисторы вместе со вспомогательными элементами и которые в дальнейшем называем силовыми транзисторными ключами (СТК), различают ДПН автогенераторного типа и с внешним управлением. В первом случае сигналы управления СТК формируются цепью положительной обратной связи (ПОС), чаще всего трансформаторной. Во втором – специальными устройствами управления, являющимися «внешними» по отношению к силовой части ДПН. Промежуточным по отношению к указанным двум способам управления является такой, при котором в автогенераторном ДПН переход от такта к такту происходит под действием внешних синхронизирующих импульсов, мощность которых, как правило, существенно меньше мощности, необходимой для управления СТК.

По способу соединения первичной обмотки трансформатора с СТК различают: а) ДПН с первичной обмоткой, имеющей вывод средней (нулевой) точки, и двумя СТК (рис. 60.31, а), через которые секции этой обмотки  $w_{11}$  и  $w_{12}$  поочередно подключаются к источнику питания; б) ДПН мостового типа (рис. 60.31, б), в которых первичная обмотка трансформатора в нечетные такты работы через два СТК из четырех, соединенных по схеме моста, подключается началом к первой шине питания, а концом – ко второй, а в четные такты подключение обмотки обратно и осуществляется через два других СТК; в) ДПН полумостового типа (рис. 60.31, в), где один вывод первичной обмотки имеет связь с шинами питания через конденсаторы, а другой вывод поочередно по тактам соединяется с первой шиной питания через первый СТК и со второй шиной – через второй СТК. На рис. 60.31 под  $B$  понимается выпрямитель, выполненный по мостовой схеме, хотя при низком выходном напряжении часто применяется также выпрямитель с выводом нулевой точки обмотки  $w_2$ .

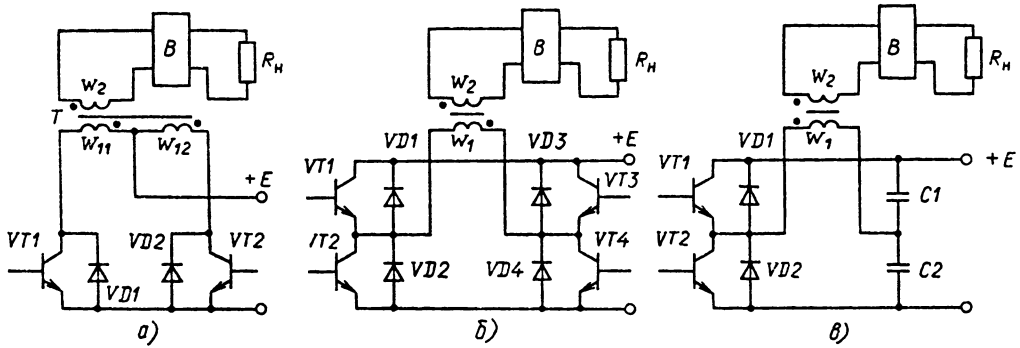


Рис. 60.31. Варианты выполнения силовой части ДПН:  
 а — с первичной обмоткой трансформатора, имеющей средний вывод; б — по мостовой; в — по полумостовой схеме

За время каждого такта в сердечнике трансформатора накапливается энергия магнитного поля. Для ее вывода в источник питания и для исключения перенапряжений на СТК в моменты их запитания во всех перечисленных схемах ДПН используется включение диодов  $VD$  встречно-параллельно СТК («обратные» или «рекуперационные» диоды).

### Простейший автогенераторный ДПН

Одна из наиболее простых схем ДПН автогенераторного типа представлена на рис. 60.32. Цепь обратной связи образована обмоткой  $w_{\text{пос}}$  и элементами  $R_2$ ,  $VD1$ ,  $VD4$ . Для возбуждения генерации служит резистор  $R_1$ , через который в базу  $VT1$  от источника питания  $E$  задается отпирающий ток смещения. При отпирании  $VT1$  к первичной обмотке  $w_{11}$  прикладывается напряжение, которое трансформируется в обмотку  $w_{\text{пос}}$  и вызывает появление тока через  $R_2$  и тем самым увеличение тока базы  $VT1$ . Это увеличивает коллекторный ток  $VT1$  и, как следствие, напряжение на обмотке  $w_{\text{пос}}$ . Таким образом, процесс отпирания силового транзистора происходит лавинообразно. В результате транзистор переходит в режим насыщения, а время его переключения, зависящее от инерционности прибора, обычно значительно меньше длительности тактов работы схемы. Аналогичные процессы имеют место, если первым включить транзистор  $VT2$ .

После перехода транзистора в состояние насыщения он удерживается в этом состоянии, пока выполняется неравенство

$$I_{\text{Б1}} = I_{\text{пос}} \geq i_{\text{К1}}(t)/B_1,$$

где  $B_1$  — коэффициент передачи по току транзистора при его включении по схеме с

общим эмиттером, а токи  $I_{\text{пос}}$ ,  $i_{\text{К1}}(t)$  равны:

$$I_{\text{пос}} = \frac{n_{\text{пос}}(E - U_{\text{К,Э1}}) - U_{\text{Б,Э1}} - U_{VD4}}{R_2},$$

$$i_{\text{К1}}(t) = \frac{H(t)I_c}{w_1} + n_{\text{пос}}I_{\text{пос}} + n_2i_2(t).$$

Здесь  $n_{\text{пос}} = w_{\text{пос}}/w_1$ ;  $U_{\text{К,Э1}}$  — падение напряжения между коллектором и эмиттером силового транзистора в режиме насыщения, а  $U_{\text{Б,Э1}}$  — падение напряжения в его входной цепи;  $U_{VD4}$  — падение напряжения на диоде  $VD4$ , шунтирующем входную цепь транзистора  $VD4$ , находящегося в состоянии отсечки;  $H(t)$  — мгновенное значение напряженности поля в сердечнике трансформатора;  $I_c$  — средняя длина магнитной линии в сердечнике;  $n_2 = w_2/w_1$  — коэффициент трансформации обмотки на вторичной стороне трансформатора,  $i_2(t)$  — мгновенное значение тока этой обмотки.

Если даже предположить, что  $i_2(t) = \text{const}$ , что характерно для случая активной нагрузки, то  $i_{\text{К1}}(t)$  будет возрастать вследствие увеличения  $H(t)$  по мере перемагничивания сердечника под действием напряжения  $E$ , приложенного к первичной обмотке  $w_{11}$ . Из-за нелинейности магнитной характеристики сердечника темп роста  $H(t)$  вначале низкий и приведенное выше неравенство выполняется. При насыщении сердечника  $H(t)$  стремительно возрастает, соответственно возрастает  $i_{\text{К1}}(t)$ , что выводит транзистор из режима насыщения. При этом увеличивается  $U_{\text{К,Э1}}$ , следствием чего является уменьшение тока базы. Это, в свою очередь, вызывает еще большее увеличение  $U_{\text{К,Э1}}$  и т. д. Происходит снова лавинообразный процесс, в ходе которого уменьшаются базовый и коллекторный токи транзистора  $VT1$ . Напряжения на обмотках трансформатора в течение этого процесса

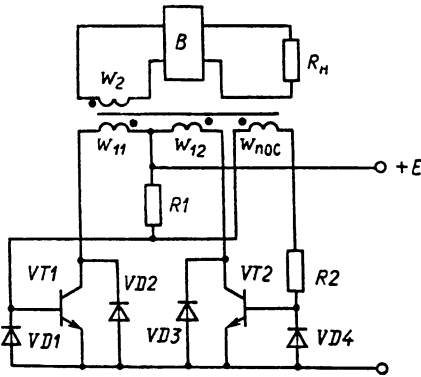


Рис. 60.32. Автогенераторный ДПН по схеме с первичной обмоткой трансформатора, имеющей средний вывод

сначала уменьшаются по абсолютному значению, а затем происходит инверсия знака напряжения на обмотках, вызванная явлением самоиндукции за счет энергии магнитного поля, переданной в сердечник трансформатора за время, когда VT1 находился в состоянии насыщения.

Инверсия знака напряжения на обмотке  $w_{noc}$  приводит к появлению отпирающего сигнала во входной цепи VT2 и запирающего — во входной цепи VT1. Таким образом, запирающие VT1 благодаря накопленной в сердечнике трансформатора энергии влечет за собой начальное отпирание VT2, которое затем происходит лавинообразно аналогично рассмотренному выше процессу отпирания VT1. Далее процессы повторяются.

В момент запирающего VT1 индукция магнитного поля в сердечнике близка к значению индукции насыщения  $+B_s$ , а через такт работы, когда запирается VT2, к значению  $-B_s$ . Следовательно, за время такта, составляющего половину периода  $T$  работы преобразователя, изменение индукции равно  $2B_s$ .

Тогда из соотношения  $\Delta B = \frac{1}{S w_1} \int_0^{T/2} U_1 dt$ , где

$U_1 \approx E$ , следует  $T/2 = 2B_s S w_1 / E$ .

Поскольку амплитудное значение коллекторного тока транзисторов в моменты переключения зависит от усилительного параметра  $B$  конкретных приборов, который от образца к образцу имеет значительный технологический разброс, в ДПН по схеме рис. 60.32 возможны существенные перегрузки силовых транзисторов по току. Для их исключения иногда осуществляют синхронизацию

ДПН внешними импульсами, период повторения которых меньше длительности такта работы схемы. Следует отметить, что такое решение позволяет устранить двустороннее насыщение сердечника трансформатора, но не дает возможности избежать его одностороннего насыщения. Переход в режим с односторонним насыщением сердечника происходит в силу неизбежного в реальных условиях разброса параметров в двух плечах двухтактной схемы.

**Автогенераторные ДПН с внутренней синхронизацией**

Избежать перегрузки по току силовых транзисторов в момент переключения возможно за счет такой синхронизации ДПН, при которой сигнал для запирающего проводящего в данном такте силового транзистора вырабатывается в момент, когда его ток достигает некоторого порогового значения. Возможные варианты схем, обеспечивающих управляемое синхронными импульсами записание СТК, представлены на рис. 60.33–60.35.

В устройстве по рис. 60.33 внешний сигнал синхронизации подается на базу транзистора VT1. Его эмиттерным током отпираются транзисторы VT2, VT5, шунтирующие входные цепи силовых транзисторов VT3, VT4, что обеспечивает их запирающие в конце каждого такта. Источником, обеспечивающим необходимый для их запирающего ток, служит обмотка цепи ПОС, напряжение которой выпрямляется диодами VD3–VD5, VD8–VD10. После того, как один из силовых транзисторов выходит из насыщения и напряжение на обмотках трансформатора начинает уменьшаться по абсолютному значению, источником энергии, обеспечивающим продолжение

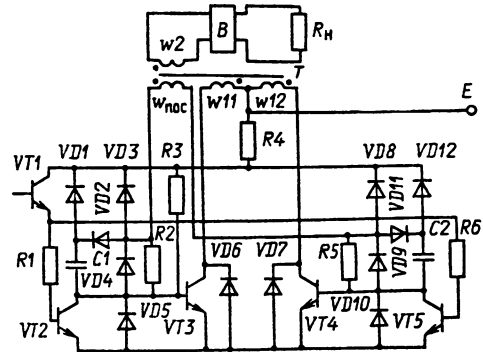


Рис. 60.33. Схема для запирающего силовых транзисторов путем шунтирования их входных цепей

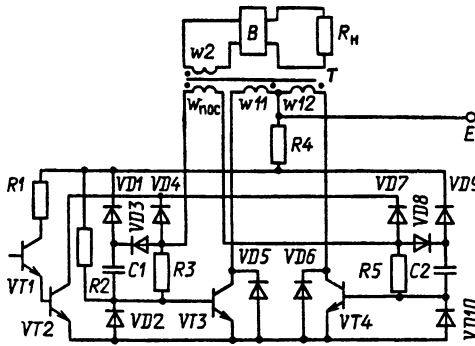


Рис. 60.34. Цепь запирания силовых транзисторов за счет формирования отрицательного тока базы

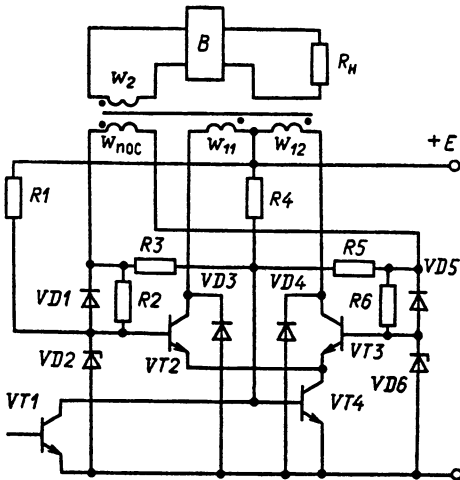


Рис. 60.35. Цепь запирания силовых транзисторов прерыванием их эмиттерного тока (запирание «по эмиттеру»)

процесса запирания, становятся заряженные конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ . Их подзаряд током обмотки цепи ПОС одновременно форсирует процесс отпирания того силового транзистора, который должен перейти в проводящее состояние в очередном такте работы ДПН.

Цепь запирания СТК, выполненная по схеме на рис. 60.33, может помимо синхронизации на каждом такте обеспечить также в случае необходимости срыв генерации колебаний. Для этого надо увеличить длительность импульса управления, задаваемого на базу  $VT1$ . В этом случае после разряда  $C_1$  и  $C_2$  через выходную цепь  $VT1$  и входные цепи  $VT2$ ,  $VT5$  последние будут

удерживаться в состоянии проводимости, необходимом для предотвращения режима автогенерации, за счет тока смещения, задаваемого источником питания через резистор  $R_4$ . По окончании управляющего импульса генерация колебаний возобновляется за счет тока, протекающего через  $R_3$ ,  $R_4$  и входную цепь  $VT3$ .

Не останавливаясь детально на методике определения параметров элементов цепи запирания, следует только отметить, что токоограничивающие резисторы  $R_1$ ,  $R_6$  целесообразно рассчитывать из условия протекания по ним тока

$$I_{R1} \geq (1,5 \div 2) I_{\text{пос}}/B_2,$$

где  $I_{\text{пос}}$  — базовый ток силовых транзисторов, необходимый для их насыщения и обеспечиваемый цепью ПОС;  $B_2$  — коэффициент передачи по току шунтирующих транзисторов  $VT2$ ,  $VT5$ . Затем по  $I_{R1}$  находим сопротивление  $R_1$  (или  $R_6$ ) по соотношению

$$I_{R1} = \frac{1}{R_1} [n_{\text{пос}}(E - U_{\text{К,Э3}}) - U_{\text{VD10}} - U_{\text{VD9}} - U_{\text{VD3}} - U_{\text{К,Э1}} - U_{\text{Б,Э2}}],$$

в котором учтены падения напряжения на входной и выходной цепях соответствующих транзисторов в режиме насыщения и прямые падения напряжения на диодах. Без существенной погрешности при оценочных расчетах можно принять  $U_{\text{К,Э}} \approx 0,5$  В,  $U_{\text{Б,Э}} = U_{\text{VD}} \approx 1$  В.

Цепь запирания силовых транзисторов, представленная на рис. 60.34, обеспечивает во время действия синхроимпульса прерывание тока цепи ПОС и задание вместо него запирающего тока в базовую цепь силового транзистора, находящегося в данном такте в состоянии проводимости.

При поступлении синхроимпульса на базу  $VT1$  отпираются  $VT1$ ,  $VT2$ . Переход  $VT2$  в состояние насыщения означает, что через него замыкается ток обмотки ПОС, который ограничивается резистором  $R_5$ , если в момент поступления синхроимпульса в проводящем состоянии был силовой транзистор  $VT3$ . При этом практически прекращается протекание тока по  $R_3$ , а значит, и поступление отпирающего тока в базу  $VT3$ . Вместе с тем начинается разряд  $C_1$  через  $VT1$ ,  $VD1$ ,  $R_1$ , и ток разряда является запирающим для входной цепи  $VT3$  и отпирающим для  $VT2$ . При действии синхроимпульса разряжается именно  $C_1$ , а не  $C_2$ , так как потенциал верхней обкладки  $C_1$  выше, чем  $C_2$ . Это обеспечивается, во-первых, тем, что в данном такте, во время которого ток по обмотке ПОС про-

текал от ее конца к началу, этим током зарядился именно  $C_1$ , и, во-вторых, тем, что на базе  $VT3$  потенциал положителен, а на базе  $VT4$  отрицателен.

Ток через  $R_1$  должен отвечать неравенству

$$I_{R1} \geq 2I_{\text{нос}}/B_2,$$

где

$$I_{R1} \approx \frac{1}{R_1} \{ [n_{\text{нос}}(E - U_{K,Э3}) - U_{Б,Э3} - U_{VD10}] \frac{1}{2} - U_{VD3} - U_{VD1} - U_{K,Э1} - U_{Б,Э2} \},$$

если емкость конденсатора  $C_1$  выбрана так, чтобы постоянная времени ее разряда через  $R_1$  была много больше длительности синхросимпульса.

В представленной на рис. 60.35 схеме ДПН реализован принцип эмиттерного запираания силовых транзисторов, который, как известно, является эффективным способом устранения явления вторичного пробоя и повышения надежности работы ключевых схем. Этот способ, кроме того, позволяет существенно сократить продолжительность процесса запираания транзистора и тем самым уменьшить в нем коммутационные потери.

В схеме рис. 60.35 цепь ПОС помимо поочередного отпираания силовых транзисторов  $VT2$ ,  $VT3$  поддерживает на каждом такте проводящее состояние коммутирующего транзистора  $VT4$ . Последнее обеспечивается за счет питания его входной цепи выпрямленным током обмотки ПОС через диоды  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD5$ ,  $VD6$ . Для возбуждения процесса автогенерации на  $VT2$ ,  $VT4$  подается начальное отпирающее смещение через  $R_1$ ,  $R_4$ . При этом лавинообразный переход в проводящее состояние происходит одновременно в двух соединенных последовательно транзисторах — силовом  $VT2$  (или  $VT3$ ) и коммутирующем  $VT4$ .

Запираание коммутирующего транзистора может быть реализовано путем шунтирования его входной цепи управляющим транзистором  $VT1$  (как на рис. 60.35) или подачей запирающего тока, если применить решение, подобное использованному в схеме на рис. 60.34. При запираании транзистора, включенного в эмиттерной цепи СТК, до этого находившегося в состоянии насыщения, коллекторный ток последнего начинает протекать через его базовый вывод, замыкаясь на отрицательную шину питания через стабилитрон (на рис. 60.35 это  $VD2$ ). При этом запираание  $VT2$  вызывается отрицательным базовым током, равным по значению коллекторному, причем за счет этого тока базы происходит рассасывание накоплен-

ного в базе заряда. Это приводит к малой продолжительности процесса запираания силового транзистора.

Во время процесса запираания напряжение на коллекторе коммутирующего транзистора незначительно превышает падение напряжения на стабилитроне, через который во время запираания  $VT2$  протекает ток коллектора силового транзистора и ток обмотки цепи ПОС. Напряжение пробоя стабилитрона должно удовлетворять неравенству

$$U_{VD2\text{проб}} \geq U_{Б,Э2} + U_{K,Э4},$$

что необходимо для предотвращения шунтирования стабилитроном входной цепи силового транзистора  $VT2$ . Следовательно, напряжение, которое приложено к выходной цепи запятого коммутирующего транзистора, не превышает 5–10 В. Поэтому этот транзистор может быть рассчитан на низкое напряжение. Для таких транзисторов характерно высокое быстродействие, поэтому задержка начала запираания силового транзистора незначительна, и в целом продолжительность коммутационного процесса под действием синхронизирующих импульсов получается небольшой.

Как уже отмечалось, запираание силовых транзисторов целесообразно осуществлять в каждом такте в моменты, когда ток через них достигает некоторого порогового значения. Для этого необходимо использовать датчики тока (ДТ), протекающего через транзисторы, и устройства, вырабатывающие сигнал синхронизации в течение времени, пока напряжение с выхода ДТ превышает пороговый уровень. Таким устройством может быть компаратор на основе интегральных операционных усилителей (ОУ).

Простейшим является резистивный ДТ. С целью снижения потерь сопротивление резистора, у которого снимается сигнал, пропорциональный току силовых транзисторов, должно быть малым. Пример цепи формирования сигнала синхронизации представлен на рис. 60.36. Компаратор на основе интегрального ОУ  $D_1$  выполнен по схеме триггера Шмидта с ПОС через резистор  $R_5$ . Порог срабатывания компаратора и значение сопротивления резистора  $R_{Д,Т}$ , обтекаемого током  $I_1$ , который ДПН потребляет от источника  $E$ , определяют значение коллекторного тока силовых транзисторов, при котором формируется сигнал внутренней синхронизации, снимаемый с выхода  $D_1$ . С целью повышения помехоустойчивости следует общую шину компаратора и общую шину силовой части ДПН соединить в одной точке, к которой подключен резистор  $R_{Д,Т}$ , а сигнал, передаваемый с этого резистора на вход компара-

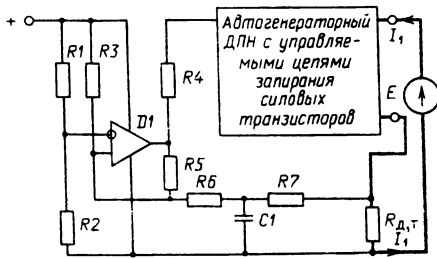


Рис. 60.36. Формирование сигнала внутренней синхронизации ДПН с помощью резистивного датчика тока и триггера Шмитта

тора, целесообразно проинтегрировать с постоянной времени порядка долей микросекунды, что осуществляется с помощью печочки  $R_7 - C_1$ .

Для повышения КПД автогенераторного ДПН, наряду с ПОС по напряжению, осуществляемой с помощью обмотки  $w_{\text{пос}}$  трансформатора, применяют ПОС по току, используя для этой цели трансформаторы тока (ТТ). В этом случае основная доля базового тока силовых транзисторов обеспечивается ТТ с минимальными потерями мощности, а цепь ПОС по напряжению выполняет вспомогательные, хотя и необходимые функции. К ним относятся: обеспечение поочередного отпирания силовых транзисторов за счет использования ЭДС самоиндукции, возникающей на обмотках силового трансформатора при каждой коммутации; питание цепей управляемого запираания силовых транзисторов; питание компаратора цепи внутренней синхронизации и т. п. Применение трансформаторов тока в цепи ПОС делает целесообразным возложить на них также функцию ДТ. Трансформаторный ДТ позволяет с меньшими потерями и более просто, чем резистивный ДТ, реализовать внутреннюю синхронизацию автогенераторного ДПН. Следует сразу отметить, что использование одного ТТ, первичные обмотки которого включены последовательно с коллекторными цепями силовых транзисторов с противоположной фазировкой, недопустимо. Можно показать, что при таком решении несимметрия амплитуд коллекторных токов транзисторов по тактам, вызванная разбросом параметров теоретически симметричной двухтактной схемы, будет усугубляться погрешностью ДТ, возникающей вследствие подмагничивания ТТ.

На рис. 60.37 представлен пример подключения цепей ПОС по току с одновременным их использованием для обеспечения режима внутренней синхронизации автогенера-

торного ДПН. Часть устройства, ограниченная на рис. 60.37 прямоугольником, представляет собой ДПН, выполненный, например, по схеме рис. 60.33, из которого вынесены только силовые транзисторы  $VT_3, VT_4$ .

В устройстве на рис. 60.37 коллекторный ток  $VT_3$  вызывает пропорциональный ему ток во вторичной обмотке  $ТТ1$ . Этот ток поступает в базу  $VT_3$  и протекает по резистору  $R_{д,т}$ , создавая на последнем сигнал, пропорциональный току коллектора  $VT_3$ . Когда сигнал достигнет порога отпирания транзистора  $VT_2$ , выполняющего функцию компаратора с фиксированным порогом срабатывания, коллекторный ток  $VT_2$  вызывает отпирание  $VT_1$ . Выходная цепь  $VT_1$  шунтирует входную цепь силового транзистора  $VT_3$ , вызывая его запираение. Несмотря на то что базы шунтирующих транзисторов  $VT_1$  и  $VT_5$  объединены, отпирается только  $VT_1$ , так как силовой транзистор  $VT_3$  в данном такте был в проводящем состоянии, а  $VT_4$  — в состоянии отсечки. Поэтому потенциал эмиттера  $VT_1$ , соединенного с базой  $VT_3$ , выше, чем потенциал эмиттера  $VT_5$ , соединенного с базой  $VT_4$ .

После запираания  $VT_3$  во время второго такта происходит восстановление исходного состояния трансформатора тока  $ТТ1$ , а его ток намагничивания замыкается через диод  $VD_2$ . При этом диод  $VD_1$  предотвращает влияние процесса восстановления  $ТТ1$  на работу схемы во втором такте.

#### Автогенераторные ДПН с магнитным накопителем на первичной стороне трансформатора

Возрастание коллекторного тока СТК, обусловленное насыщением сердечника трансформатора ДПН, происходит весьма быстро. Однако от момента формирования сигнала запираания до начала спада коллекторного тока биполярного транзистора проходит время, определяемое скоростью вывода и рассасывания накопленного заряда и составляющее единицы микросекунд. Из-за этой задержки при запираании транзистора коллекторный ток успевает существенно возрасти против порогового значения.

Для гарантированной защиты силовых транзисторов от перегрузки по току необходимо снизить темп роста коллекторного тока при насыщении сердечника силового трансформатора. Один из возможных путей для достижения этой цели — использование на первичной стороне трансформатора магнитного накопителя переменного тока (МНПТ). Конструктивно он может быть выполнен в виде

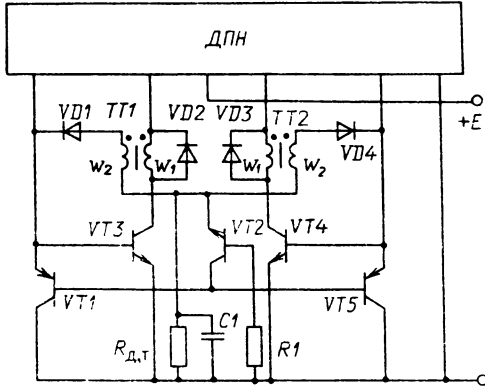


Рис. 60.37. Формирование сигнала внутренней синхронизации ДПН с помощью трансформаторной цепи токовой ПОС и транзисторного компаратора

отдельного дросселя  $D_p$ , обмотки которого включаются согласно с первичными обмотками силового трансформатора (рис. 60.38). Другой способ выполнения МНТП – специальная конструкция трансформатора, при которой магнитный поток, сцепленный с витками первичной обмотки, распадается на две соизмеримые части. Первая из них  $\Phi_L$  сцеплена только с витками первичной обмотки, пропорциональна намагничивающему току  $I_L$

$$\Phi_L = L_1 I_L / w_{1L}$$

Вторая часть магнитного потока  $\Phi_T$  сцеплена с витками вторичных обмоток силового трансформатора, и тогда ЭДС, наводимая на нагрузочной обмотке  $w_2$ , связана с  $\Phi_T$  уравнением

$$e_2 = -w_2 (d\Phi_T / dt)$$

Независимо от конструктивного выполнения МНТП для напряжений на первичной стороне ДПН справедливо уравнение

$$U_{1L} + U_{1T} = w_{1L} (d\Phi_L / dt) + w_{1T} (d\Phi_T / dt) = E - U_k \approx E,$$

где  $w_{1L}$ ,  $w_{1T}$  – числа витков первичных обмоток магнитного накопителя и трансформатора, а  $U_k$  – падение напряжения на СТК в состоянии проводимости. При совмещении конструктивно накопителя и трансформатора  $w_{1L} = w_{1T} = w_1$ .

Если вторичная обмотка  $w_2$  через выпрямитель  $B$  подключена к нагрузке, шунтированной конденсатором фильтра, то в течение времени, пока по этой обмотке замыкается ток,  $e_2 = -w_2 (d\Phi_T / dt) = -(U_H + U_B)$ , где  $U_H$  –

напряжение на нагрузке,  $U_B$  – падение напряжения на выпрямителе.

Тогда

$$L_1 (dI_L / dt) = E - U_k - (U_H + U_B) / n_2 \approx E - U_{1T}$$

Для трансформатора справедливо соотношение

$$I_1 = \frac{H_T I_T}{w_{1T}} + I_{\text{пос}} n_{\text{пос}T} + I_2 w_2,$$

в котором первое слагаемое – ток намагничивания трансформатора, второе – ток цепи ПОС, трансформируемый в первичную обмотку, третье – приведенный к первичной обмотке ток вторичной обмотки трансформатора. Аналогичное соотношение может быть записано для токов в дросселе

$$I_1 = I_L + I_{\text{пос}} n_{\text{пос}L}$$

Целесообразно коэффициенты трансформации обмотки ПОС на дросселе и трансформаторе делать одинаковыми. В этом случае независимо от распределения напряжений  $U_{1L}$ ,  $U_{1T}$  между первичными обмотками дросселя и трансформатора напряжение  $U_{\text{пос}}$  на соединенных последовательно обмотках  $w_{\text{пос}L}$ ,  $w_{\text{пос}T}$  будет определяться только состоянием проводящего ток СТК. Это следует из выражения  $U_{\text{пос}} = U_{1L} n_{\text{пос}L} + U_{1T} n_{\text{пос}T}$ , которое при

$$n_{\text{пос}L} = n_{\text{пос}T} = n_{\text{пос}}$$

записывается в виде

$$U_{\text{пос}} = n_{\text{пос}} (U_{1L} + U_{1T}) = n_{\text{пос}} (E - U_k).$$

Теперь находим

$$n_2 I_2 = I_L - \frac{H_T I_T}{w_{1T}} = I_L - I_{\mu T},$$

где  $I_{\mu T}$  – ток намагничивания. Обычно выбирают параметры трансформатора так, чтобы  $I_{\mu T} \ll I_L$ . Тогда

$$I_2 \approx I_L / n_2,$$

где

$$I_L = (E - U_k - U_{1T}) t / L_1 \approx \frac{E - U_{1T}}{L_1} t.$$

Эти выражения справедливы при ненасыщенном сердечнике трансформатора. Состоянию насыщения соответствует  $(d\Phi_T / dt) \rightarrow 0$ , т. е.  $U_{1T} \rightarrow 0$  и  $U_2 \rightarrow 0$ . Это означает, что ток во вторичной обмотке падает до нуля и тем самым передача энергии в нагрузку прекращается.

Характеристики автогенераторного ДПН с МНТП в первичной цепи. Промежутки времени  $\Delta t_T$ , в течение которого сердечник трансформатора не насыщен и через него



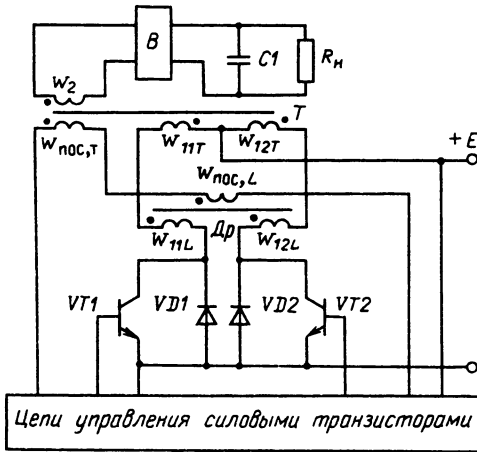


Рис. 60.38. Подключение обмоток магнитного накопителя на первичной стороне автогенераторного ДПН

передается энергия в нагрузку, зависит от напряжения  $U_{1T} = (U_n + U_B)/n_2$

$$\Delta t_T = 2B_{ST}S_T w_{1T}/U_{1T},$$

где  $S_T$  — сечение магнитопровода, на котором намотаны вторичные обмотки;  $B_{ST}$  — индукция насыщения трансформатора.

В зависимости от значения  $U_{1T}$  возможны три режима работы ДПН. В первом режиме насыщение сердечника трансформатора происходит во время роста тока на первичной и вторичной сторонах. Для этого режима характерно, что до насыщения сердечника скорость роста тока в первичной обмотке определяется выражением  $L di_1/dt = E - U_{1T}$ , а после насыщения — тем же выражением, но при  $U_{1T} = 0$ . При этом передаваемый на вторичную сторону ток  $I_2 = I_1/n_2$  линейно нарастает до момента насыщения сердечника, а с момента насыщения и до тех пор, пока в следующем такте не начнется перемагничивание сердечника в обратном направлении,  $I_2$  остается равным нулю.

Когда ток на первичной стороне трансформатора достигнет значения  $I_{1m}$ , цепь управления выключает транзистор ( $VT1$  на рис. 60.38) и энергия, переданная в МНПТ, начинает возвращаться в источник питания. При этом ток на первичной стороне переключается из обмоток  $w_{11L}$ ,  $w_{11T}$  в обмотки  $w_{12L}$ ,  $w_{12T}$  и замыкается через обратный диод  $VD2$  и источник питания  $E$ . В силу того, что ток  $w_{12T}$  протекает в прежнем направлении (от начала обмотки к концу), сердечник

трансформатора на этапе рекуперации энергии остается в насыщенном состоянии и спад тока в обмотках  $w_{12L}$ ,  $w_{12T}$  происходит в соответствии с уравнением

$$i_L(t) = I_{Lm} - \frac{E + U_{VD2} + U_{1T}}{L_1} t \approx \\ \approx I_{Lm} - \frac{E + U_{1T}}{L_1} t,$$

в котором следует принять  $U_{1T} = 0$ , так как сердечник трансформатора насыщен; время  $t$  здесь отсчитывается от момента коммутации транзисторов.

Анализ показывает, что первый режим работы реализуется, если  $E/(1+F) \leq U_{1T} \leq E$ , где

$$F = L_1 I_{Lm} / 2B_{ST} S_T w_{1T}.$$

При работе в этом режиме выходная характеристика ДПН, связывающая между собой средние значения тока и напряжения на нагрузке, определяется выражением

$$I_n = \frac{I_{Lm} (E/U_{1T}) (E/U_{1T} - 1)}{2n_2 F (1 + 2F)},$$

где  $I_{Lm} = I_{1m} - n_{\text{нос}} I_{\text{нос}}$ ;  $U_{1T} = (U_n + U_B)/n_2$ , а длительность полупериода

$$T/2 = (2B_{ST} S_T w_{1T} + 2L_1 I_{Lm})/E.$$

При напряжении

$$U_{1T} = U_{1T}^* = E/(1+F),$$

соответствующем границе первого режима, ток  $I_n$ , отдаваемый в нагрузку, равен

$$I_n = \frac{I_{Lm}}{2n_2} \frac{1+F}{1+2F}.$$

Второй режим характеризуется тем, что переход сердечника трансформатора в состояние насыщения происходит после того, как ток на первичной стороне достигнет значения  $I_{1m}$ , и устройство управления выключит соответствующий транзистор. Второй режим возникает, если

$$E(\sqrt{1+F^2} - F) \leq U_{1T} \leq E/(1+F).$$

При работе ДПН в третьем режиме насыщение сердечника вообще не происходит. Поэтому ток, передаваемый во вторичную обмотку, линейно нарастает до момента, пока на первичной стороне ток не достигнет значения  $I_{1m}$  и устройство управления не выключит соответствующий транзистор (например,  $VT1$  в схеме рис. 60.38). Как и для первого режима, после запираания  $VT1$  из магнитного накопителя начинает выводиться энергия. При этом ток протекает по обмотке

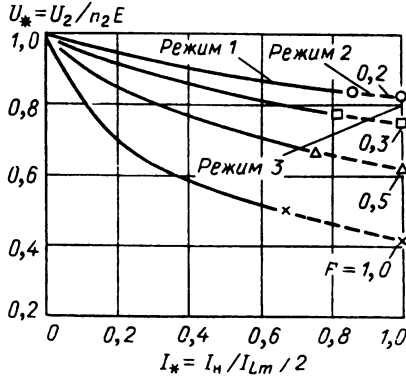


Рис. 60.39. Нагрузочные характеристики автогенераторного ДПН с МНПТ

$w_{12T}$  в том же направлении, в каком до записи  $VT1$  ток протекал по обмотке  $w_{11T}$ . В силу этого направление тока  $i_2 = I_{Lm}/n_2 - (E + U_{1T})t/(n_2 L_1)$  на вторичной стороне трансформатора не изменяется. Таким образом, при работе ДПН в третьем режиме, ток вторичной обмотки имеет треугольную форму с амплитудой

$$I_{2m} = I_{Lm}/n_2.$$

Вследствие этого среднее значение тока нагрузки при переходе в третий режим работы ДПН перестает зависеть от напряжения на нагрузке и нагрузочная характеристика схемы записывается в виде

$$I_n(U_n) = \text{const} = I_{Lm}/2n_2,$$

если

$$U_{1T} = (U_n + U_B)/n_2 \leq E(\sqrt{1 + F^2} - F).$$

Длительность полупериода в третьем режиме

$$\frac{T}{2} = \frac{2L_1 I_{Lm}}{E} [1 - (U_{1T}/E)^2].$$

На рис. 60.39 представлены нагрузочные характеристики, построенные в относительных единицах при нескольких значениях параметра  $F$ . Участки характеристики, соответствующие второму режиму работы, показаны штриховыми линиями.

Чтобы увеличить передаваемую в нагрузку мощность  $P_n = U_n I_n$ , целесообразно при проектировании ДПН выбирать его параметры так, чтобы  $F \leq 0,2 \div 0,3$ . Следует, однако, иметь в виду, что уменьшению  $F$  соответствует увеличение  $S_T, w_{1T}$ , т. е. увеличение размеров силового трансформатора.

*Регулирование мощности с помощью авто-*

*генераторных ДПН с МНПТ в первичной цепи.* Регулирование передаваемой мощности в ДПН с МНПТ возможно двумя основными способами: путем воздействия на амплитуду тока  $I_{1m}$  (амплитудно-импульсный способ регулирования) и путем периодического возбуждения и срыва генерации преобразователя (позиционно-импульсный способ регулирования).

Преимуществом первого способа является непрерывность передачи мощности в нагрузку и, как следствие, меньший уровень пульсации напряжения на нагрузке. Однако, как следует из вышеприведенных соотношений, при уменьшении  $I_{1m}$  растет частота коммутации, что накладывает ограничения на минимальный уровень  $I_{1m}$ , так как при чрезмерно высокой частоте возрастают коммутационные потери. Таким образом, амплитудно-импульсный способ дает возможность варьировать передаваемую мощность в ограниченных пределах.

Позиционно-импульсный способ позволяет регулировать передаваемую мощность практически от нуля, но вызывает необходимость увеличивать емкость конденсаторов фильтра для получения требуемого уровня пульсации. Достоинством способа является сохранение высокого КПД в широком диапазоне изменения мощности, так как поддерживаемый неизменным уровень тока  $I_{1m}$  может быть выбран из условия получения наиболее высокого КПД. Такая возможность обусловлена тем, что зависимость КПД от выходного тока для любых энергетических устройств имеет максимум. В режиме отсутствия (срыва) генерации мощность, потребляемая от источника питания, обычно меньше 1% максимальной передаваемой мощности, и поэтому она слабо влияет на результирующий КПД.

Выходное напряжение ДПН рассматриваемого типа при холостом ходе и выходной ток при коротком замыкании, как видно из рис. 60.39, ограничены. Это позволяет соединять последовательно и параллельно выходные цепи нескольких преобразователей, т. е. создавать многоячейковые источники вторичного электропитания (МИВЭП). В этом случае возможен способ регулирования, основанный на изменении соотношения между числом ДПН (ячеек МИВЭП), находящихся в состоянии «Включено» (генерации) и передающих мощность в нагрузку, и числом ячеек, находящихся в состоянии «Выключено». Такой способ регулирования мощности позволяет:

при ограниченной нагрузочной способности элементной базы (транзисторов, диодов, магнитных элементов и т. п.) обеспечить за счет увеличения числа ячеек практически неограниченный уровень мощности в нагрузке;

за счет выбора энергетически оптимального режима работы преобразователей в состоянии «Включено» и малого потребления ими мощности в состоянии «Выключено» обеспечить высокий КПД при вариации передаваемой мощности в широких пределах;

для реально существующего ограниченно-го уровня надежности отдельно взятого преобразователя (ячейки) обеспечить любой требуемый уровень надежности МИВЭП при относительно невысокой избыточности установленной мощности оборудования;

за счет статистического разброса во времени моментов коммутации в отдельных преобразователях, составляющих МИВЭП, обеспечить малый уровень пульсации тока, потребляемого от сети, и тока, передаваемого в нагрузку, что упрощает сглаживание пульсаций во входной и выходной цепях.

К числу достоинств МИВЭП относятся также возможность унификации оборудования, упрощение индикации неисправностей и проведения ремонта, в частности возможность замены неисправных ячеек без перерыва питания нагрузки, возможность снижения стоимости ИВЭП за счет массового производства типовых модулей относительно невысокой мощности.

*Уменьшение коммутационных потерь в автогенераторном ДПН с МНПТ.* Индуктивный характер цепи каждого из силовых транзисторов в ДПН остро ставит проблему уменьшения коммутационных потерь мощности при запирании. Обычно с этой целью параллельно выходной цепи силовых транзисторов включают демпфирующие конденсаторы, уменьшающие скорость нарастания напряжения на приборе при запирании. Однако при этом возникает задача перезаряда конденсаторов без существенных потерь энергии при коммутации в каждом такте.

Поскольку энергия, передаваемая в каждом такте в МНПТ, сравнительно велика, ее можно использовать для перезаряда демпфирующих конденсаторов. С этой целью после начала запирания очередного силового транзистора вырабатывается сигнал, который запрещает отпирание любого из остальных силовых транзисторов, пока не произойдет полный перезаряд демпфирующих конденсаторов за счет энергии, переданной во время такта в МНПТ. После перезаряда, когда отпирается обратный диод и напряжение на выходной цепи силового транзистора, который в очередном такте должен быть открыт, снижается до нуля, запирающий сигнал снимается. Такой сигнал запрета наиболее просто сформировать путем выделения в каждом такте интервала, когда мгновенное значение выпрям-

ленного напряжения с последовательно соединенных обмоток  $w_{\text{пос}L}$ ,  $w_{\text{пос}T}$  (см., например, рис. 60.38) выше некоторого порогового значения, полученного, например, с помощью конденсатора, заряжаемого тем же выпрямленным напряжением и выполняющим роль элемента памяти.

Применение демпфирующих конденсаторов позволяет задержать нарастание напряжения на запирающемся силовом транзисторе так, что в момент спада его коллекторного тока до нуля напряжение на нем успевает возрасти только до 20–30% напряжения питания. Это, помимо уменьшения коммутационных потерь и повышения надежности работы силовых транзисторов, позволяет уменьшить уровень помех, передаваемых с первичной стороны на вторичную за счет паразитной емкости связи между ними.

Снижение крутизны нарастания напряжения на запирающемся транзисторе за счет увеличения емкости демпфирующего конденсатора  $C_d$  ограничено условием достаточности переданной в МНПТ энергии для перезаряда конденсатора. Для ДПН с первичной обмоткой, имеющей вывод средней точки, емкость  $C_d$  должна быть ограничена неравенством

$$C_d \leq L_1 I_m^2 / 16 E^2.$$

Зависимость от  $C_d$  энергии потерь, выделяющейся в транзисторе на интервале запирания, определяется как

$$A_k = I_{1m}^4 / 96 C_d (dI_k/dt)^2,$$

где  $dI_k/dt$  – скорость спада тока транзистора при запирании.

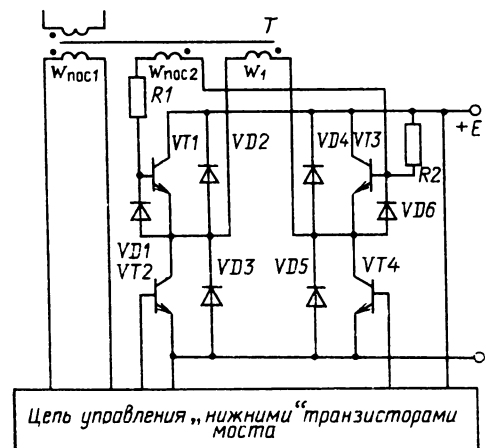


Рис. 60.40. Управление «верхними» транзисторами в мостовом автогенераторном ДПН

Мощность коммутационных потерь в транзисторах равна  $P_k = 2A_k f$ , где множитель 2 учитывает потери за два такта.

Коммутационные потери при отпирании в схеме ДПН с МНПТ практически отсутствуют, так как плавное нарастание тока через транзистор начинается, когда он уже переведен в режим насыщения током цепи ПОС.

В результате КПД преобразования постоянного напряжения питания в переменное на вторичной стороне силового трансформатора, в частности, при использовании трансформаторной цепи токовой ПОС (см. рис. 60.37) может быть доведен до значения 92–95% при входном напряжении 50–300 В. Результирующий КПД определяется также потерями в выпрямителе на вторичной стороне трансформатора.

#### Автогенераторный ДПН по мостовой схеме

Мостовой автогенераторный ДПН можно построить на основе рассмотренных выше схем с первичной обмоткой трансформатора, имеющей средний вывод. С этой целью первичная обмотка выполняется без среднего вывода и в схему добавляются «верхние» транзисторы моста, шунтированные обратными диодами и снабженные соответствующими цепями управления. Для управления верхними транзисторами моста удобно использовать обмотку  $w_{\text{пос2}}$  (рис. 60.40), отдельную от цепи управления «нижними» транзисторами, формируя в каждом такте с ее помощью отпирающий ток в базу одного верхнего транзистора моста и создавая запирающее смещение на базе другого верхнего транзистора. Поскольку между эмиттерами этих транзисторов  $VT1$ ,  $VT3$  включена первичная обмотка трансформатора, коэффициент трансформации второй обмотки ПОС следует делать большим единицы

$$n_{\text{пос2}} = w_{\text{пос2}}/w_1 \cong 1 + w_{\text{пос1}}/w_1 = 1 + m.$$

При таком построении схемы ток, задаваемый в базу верхнего транзистора, находящегося в данном такте в состоянии проводимости, определяется выражением

$$I_{\text{пос2}} = [(1/m)(E - 2U_{K,Э}) - U_{Б,Э} - U_{VD}]/R_1.$$

Для мостового ДПН в кривой напряжения на обмотках силового трансформатора характерно наличие паузы между тактами. Это происходит потому, что запирающее смещение на базе транзистора вызывает за счет накопленной в трансформаторе энергии быстрое повышение потенциала на его коллекторе и отпирание того верхнего обратного диода, который

соединен последовательно с выходной цепью нижнего транзистора, перешедшего в состояние отсечки. При этом ток первичной обмотки трансформатора, протекающий за счет накопленной в сердечнике энергии магнитного поля, циркулирует по замкнутому контуру, образованному верхним транзистором (например,  $VT3$  в схеме на рис. 60.40), проводившим ток в заканчивающемся такте, и обратным (рекуперационным) диодом  $VD2$ , включенным параллельно другому верхнему транзистору моста. На этом интервале напряжение на первичной обмотке близко к нулю, а следовательно, близко к нулю напряжение на обмотках цепи ПОС.

Пауза в напряжении цепи ПОС обуславливает возможность паразитного самоотпирания силовых транзисторов, что может вызвать дополнительные потери мощности. Устранить это явление можно путем создания динамического запирающего смещения, заряжая в каждом такте конденсатор и используя накопленную в нем энергию для запирающего транзистора на интервале нулевой паузы в напряжении на обмотках ПОС.

Для возбуждения генерации в мостовом ДПН начальное отпирающее смещение следует подавать на два силовых транзистора, образующих противоположные плечи моста.

По сравнению с ДПН по нулевой схеме мостовой вариант более сложен и обладает меньшим КПД. Однако преимуществом мостового преобразователя является то, что напряжение на силовых транзисторах в запертом состоянии равно напряжению питания  $E$  в то время как в ДПН по схеме с первичной обмоткой трансформатора, имеющей нулевой вывод, оно вдвое превышает  $E$ . Это преимущество становится решающим, если постоянное напряжение первичного источника равно 700–1000 В или более.

#### ДПН с внешним управлением

Силовая схема ДПН с внешним управлением не отличается от схемы автогенераторного ДПН (см. рис. 60.31). Если каждый из силовых транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  отпирать сразу после запирающего предыдущего, ДПН по отношению к нагрузке будет источником постоянного напряжения ( $n_2 E - U_B$ ). Если в каждом такте отпирание одного СТК задерживать по отношению к моменту запирающего другого на регулируемое время  $t_n$ , то напряжения на вторичных обмотках трансформатора будут равны  $n_2 E$  на интервалах проводимости СТК  $t_n$  и близки к нулю во время пауз  $t_n$ . Поэтому ДПН с таким способом управле-

ния и при включении на выходе выпрямителя фильтра с дроссельным входом обладают такой же регулировочной характеристикой, как преобразователь напряжения с передачей энергии в импульсе при широтно-импульсном регулировании (ШИР)

$$U_H = \gamma (n_2 E - U_B),$$

где  $\gamma = t_H / (t_H + t_H)$ .

Для ДПН с внешним управлением характерно существование двух опасных режимов. Первый из них – периодические КЗ на первичной стороне, возникающие на интервалах времени, когда одновременно в состоянии проводимости оказываются два СТК, принадлежащие к разным плечам двухтактной схемы ( $VT1$  и  $VT2$  на рис. 60.31,  $a - в$ ). Такой режим в автогенераторных схемах невозможен, поскольку в них отпирание одних СТК является следствием запираания других. В ДПН с внешним управлением при парафазных управляющих сигналах длительностью строго по  $T/2$  неизбежно вследствие инерционности процесса запираания транзисторов возникают интервалы, когда одновременно проводят ток два СТК, которые номинально должны работать в разные такты.

Возможно два способа устранения этого опасного режима. При первом парафазные сигналы управления имеют длительность меньше  $T/2$ , причем длительность пауз должна превышать максимальное (с учетом изменяющихся режимов работы транзисторов и разброса их параметров) время задержки запираания СТК по отношению к моменту окончания сигнала, которым СТК удерживается в состоянии проводимости. Другой способ основан на запрете подачи отпирającego сигнала на СТК, который в данный такт должен работать в состоянии проводимости, до тех пор, пока не произойдет запираание СТК, бывших в состоянии проводимости в предыдущем такте.

Второй нежелательный режим, возможный в ДПН с внешним управлением, – режим несимметричного намагничивания сердечника силового трансформатора, приводящий к его насыщению и связанному с этим перегрузкам СТК по току. Несимметрия процесса намагничивания, возникающая даже в случае, если устройство управления формирует строго идентичные парафазные сигналы, связана с неравенством падений напряжения на СТК в состоянии проводимости и, главным образом, с неодинаковой длительностью их проводящего состояния, вызванной разной инерционностью СТК. В результате действия этих двух факторов от такта к такту будет происходить «сползание» цикла намагничивания в одну

сторону. Устранение несимметрии возможно путем измерения токов СТК в разные такты и воздействия на длительность тактов таким образом, чтобы среднее значение тока за время первого и второго тактов было одинаковым. Для этого необходимо применить датчики тока (ДТ) в каждом плече двухтактной схемы и затем сравнить сигналы этих ДТ с помощью интегрирующего операционного усилителя. Дополнительно к интегрирующему усилителю должна быть введена система внутренней синхронизации, аналогичная приведенной на рис. 60.36,  $a$ , 60.37,  $a$ , устраняющая мгновенные перегрузки СТК по току, возникающие потому, что интегрирующий усилитель реагирует на появление несимметрии с задержкой.

Для ДПН полумостового типа (см. рис. 60.31,  $в$ ) несимметрия цикла намагничивания приводит к перераспределению напряжений на  $C_1$  и  $C_2$  так, что автоматически выравниваются средние значения тока, потребляемого схемой в разные такты. Это качество «саморегулирования» явилось одной из главных причин широкого распространения полумостовых ДПН, несмотря на то что по сравнению с мостовой схемой их выходная мощность вдвое меньше.

## 60.5. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

### Способы стабилизации выходного напряжения ИВЭП с импульсным регулированием

В ИВЭП, выполненных на основе импульсных регуляторов и преобразователей, стабилизация выходного напряжения осуществляется изменением относительной длительности  $\gamma$  проводящего состояния регулирующего прибора (транзистора), называемого далее регулирующим ключом (РК). В таких ИВЭП возможно широтно-импульсное (ШИР), частотно-импульсное (ЧИР) и позиционное (иначе, следящее, релейное) регулирование. Наиболее широко распространены ИВЭП с широтно-импульсным регулированием, в которых при постоянной частоте коммутации ( $f = 1/T = \text{const}$ ) изменяется длительность включенного состояния РК. Системы управления именно такими ИВЭП и рассмотрены в настоящем параграфе.

По способам построения систем управления, обеспечивающих стабилизацию выходного напряжения, различают компенсационные, параметрические и компенсационно-параметрические импульсные стабилизаторы [2, 3].

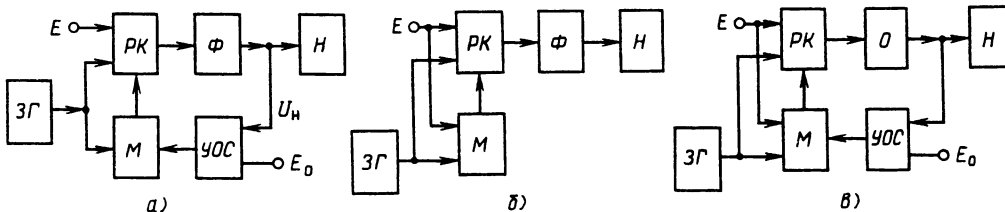


Рис. 60.41. Функциональные схемы компенсационного (а), параметрического (б) и компенсационно-параметрического (в) импульсных стабилизаторов постоянного напряжения: РК – регулирующие ключи; Ф – фильтр, Н – нагрузка; УОС – усилитель обратной связи; М – модулятор длительности; ЗГ – задающий генератор; E – источник входного напряжения; E<sub>0</sub> – опорное напряжение

Функциональные схемы их представлены на рис. 60.41. а – в соответственно. Частота коммутации ключей РК и синхронизация работы модулятора длительности М определяются задающим генератором ЗГ постоянной частоты.

Компенсационные стабилизаторы содержат замкнутый контур регулирования по отклонению выходного напряжения U<sub>н</sub> от заданного значения, определяемого опорным напряжением E<sub>0</sub>, с усилителем отрицательной обратной связи (УОС) в этом контуре. Усиленный сигнал рассогласования с выхода УОС воздействует на модулятор, изменяя тем самым длительность включенного состояния РК. Стабильность выходного напряжения здесь целиком определяется коэффициентом усиления УОС, а также стабильностью E<sub>0</sub>.

Основным дестабилизирующим фактором в ИВЭП является нестабильность входного напряжения, достигающая 40% и более. При этом компенсационный способ оказывается практически не приемлемым, так как обеспечение необходимой стабильности выходного напряжения требует увеличения коэффициента усиления УОС, следствием чего является уменьшение области устойчивой работы.

Наряду с простейшими параметрическими системами, основанными на применении нелинейных элементов (например, стабилитронов) в силовой цепи, известны параметрические стабилизаторы с управлением «по входу». В них входное нестабилизированное напряжение E непосредственно воздействует на модулятор длительности, изменяя необходимым образом значение γ. Важным достоинством таких стабилизаторов является уменьшение динамической нестабильности, вызванной возмущениями входного напряжения, что достигается благодаря высокому быстродействию параметрического звена стабилизации, непосредственно реагирующего на эти возмущения. Основной недостаток параметрических стабилизаторов состоит в том, что любые изменения параметров, характеризующих цепь

передачи входного возмущения, приводят к изменению U<sub>н</sub>.

Сохранение высокой точности и устойчивой работы при значительном диапазоне изменения входного напряжения достигается применением комбинированных компенсационно-параметрических стабилизаторов. Сущность такой стабилизации сводится к разделению функций отработки различных дестабилизирующих факторов между параметрическим и компенсационным каналами: параметрический канал должен обеспечивать постоянное среднее значение выходного напряжения регулятора при изменениях E, а компенсационный – обрабатывать сравнительно малые изменения U<sub>н</sub>, обусловленные изменениями тока нагрузки и характеристик параметрического канала.

Таким образом, в компенсационно-параметрических стабилизаторах модуляторы должны формировать временные интервалы, длительность которых зависит как от входного напряжения, так от сигнала обратной связи.

Наиболее широко используются модуляторы длительности, выполненные с применением генераторов линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) и компараторов напряжения (КН). В модуляторе длительности, принцип построения которого показан на рис. 60.42, к одному из входов КН подключен источник напряжения U<sub>ср</sub>, задающий порог срабатывания компаратора, а ко второму – источник тока I<sub>с</sub>, время-задающий конденсатор С и схема фиксации (СФ) начального напряжения U<sub>с0</sub> на конденсаторе. До поступления сигнала управления СУ напряжение на конденсаторе фиксировано на уровне U<sub>с0</sub> < U<sub>ср</sub>, а в момент поступления СУ схема фиксации СФ отключается. После этого начинается заряд конденсатора С, напряжение на котором возрастает. В момент равенства напряжений на обоих входах КН формирует на выходе сигнал сравнения. Если считать входное сопротивление компаратора бесконечно большим и предположить, что процесс

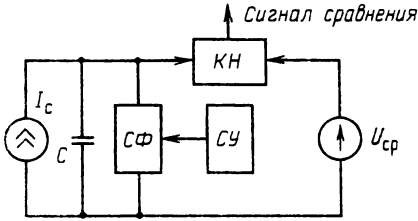


Рис. 60.42. Структура модулятора длительности на основе ГЛИН и компаратора

происходит периодически с периодом  $T$ , то относительное время между появлением СУ и сигнала сравнения будет определяться соотношением

$$\gamma = \frac{t_{\text{ср}}}{T} = C \frac{U_{\text{ср}} - U_{\text{с0}}}{I_C T}$$

В приведенной схеме источник тока  $I_C$  и конденсатор  $C$  образуют генератор линейно нарастающего напряжения. Можно использовать и генератор линейно убывающего напряжения, в которых  $I_C < 0$  и  $U_{\text{ср}} < U_{\text{с0}}$ .

Если модулятор задает длительность включенного состояния РК, то момент появления сигнала управления, отключающего схему фиксации, должен совпадать с моментом включения РК, а сигнал сравнения с выхода КН должен обеспечивать выключение РК.

Ниже описаны компенсационно-параметрические схемы управления импульсными стабилизаторами, выполненными на базе основных типов регуляторов, и даны соотношения, характеризующие их работу. Во всех случаях рассматривается установившийся режим работы при непрерывных токах дросселей и считается, что ключевые элементы идеальны, напряжения на прямосмещенных переходах транзисторов и диодов в схемах управления равны нулю, пульсации выходного напряжения пренебрежимо малы и скорость изменения входного нестабилизированного напряжения мала, так что на периоде  $T$  его можно считать постоянным.

#### Система управления стабилизированным регулятором напряжения I рода

Сравнивая выражение для регулировочной характеристики РН  $U_H/E = \gamma$  с приведенным выше выражением для  $\gamma$  в схеме модулятора длительности по схеме рис. 60.42, можно сделать вывод, что требуемый закон управления значением  $\gamma$  реализуется путем задания обратного пропорциональной зависимости  $U_{\text{ср}} - U_{\text{с0}}$  от  $E$  при постоянных  $C$  и  $I_C$  либо путем

задания прямо пропорциональной зависимости  $I_C$  от  $E$  при постоянных  $U_{\text{ср}} - U_{\text{с0}}$  и  $C$ . Поскольку смоделировать линейную зависимость всегда легче, чем нелинейную, целесообразно остановиться на втором способе, т. е. для заряда конденсатора  $C$  в модуляторе длительности использовать постоянный ток  $I_C$ , пропорциональный входному напряжению  $E$ .

Один из самых широко распространенных способов стабилизации тока в процессе заряда конденсатора — использование параметрических стабилизаторов тока, выполненных на биполярных транзисторах, включенных по схеме с общей базой.

На рис. 60.43, а представлена схема компенсационно-параметрического стабилизатора с регулятором I рода, в котором в качестве управляемого входным напряжением источника тока используется транзистор  $VT$ . На рис. 60.43, б приведены временные диаграммы, иллюстрирующие работу стабилизатора. На схеме не конкретизировано выполнение задающего генератора, регулирующего ключа, компаратора напряжения и усилителя обратной связи. Предполагается, что РК управляется сигналами «Включено» и «Выключено», условно изображенными на рис. 60.43, б.

Когда РК выключен и проводит диод  $VD1$ , коллекторный ток  $VT$  замыкается через диод  $VD2$  и напряжение на конденсаторе  $C$  фиксируется на нулевом уровне.

Включение РК сигналом от ЗГ приводит к запиранию диодов  $VD1$  и  $VD2$ . При этом конденсатор  $C$  начинает заряжаться коллекторным током  $VT$  и напряжение на нем увеличивается по линейному закону. Когда  $U_C$  станет равно напряжению  $E_0$ , на выходе КН сформируется сигнал на выключение ключа. Поскольку  $I_C$  зависит от входного напряжения  $E$ , то при изменениях последнего будет обратно пропорционально изменяться время включенного состояния ключа и тем самым осуществляться стабилизация выходного напряжения.

В рассмотренной схеме автоматическая синхронизация работы ключа и модулятора осуществляется схемой фиксации начального уровня напряжения на конденсаторе  $C$  (диод  $VD2$ ), управляемой выходным напряжением ключа. Такое построение схемы управления наиболее целесообразно, так как в этом случае автоматически учитываются задержки переключения реальных ключей.

После выключения РК ток дросселя фильтра  $Dp$  в первый момент замыкается через диод  $VD2$ , так как потенциал его анода выше потенциала анода шунтирующего диода  $VD1$ . Поскольку ток дросселя существенно больше тока заряда  $I_C$ , конденсатор начнет

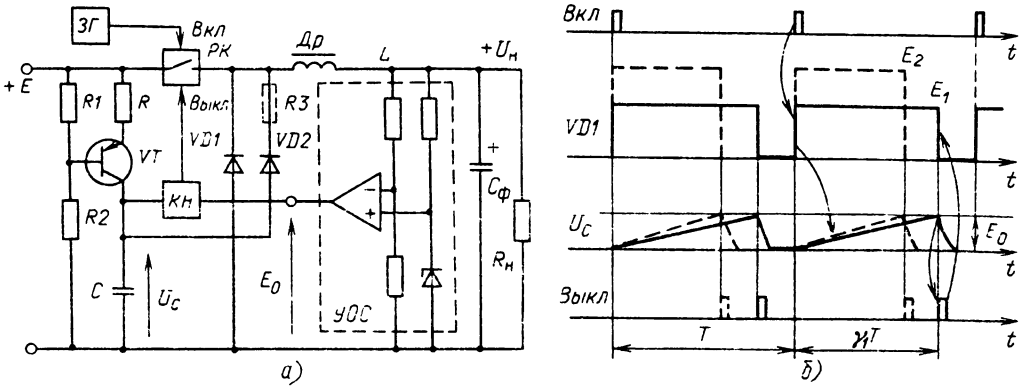


Рис. 60.43. Схема компенсационно-параметрического стабилизатора напряжения на основе РНИ (а) и временные диаграммы, иллюстрирующие его работу (б)

разряжаться. Процесс разряда продолжается до тех пор, пока не откроется диод  $VD1$ . После этого напряжение  $U_C$  фиксируется на нулевом уровне, и с приходом очередного сигнала  $ЗГ$  описанные процессы повторяются.

Отметим, что диод  $VD2$  и конденсатор  $C$  являются слаботочными элементами схемы управления. Поэтому протекание через них, хотя бы и кратковременно, тока дросселя является недопустимым. Поэтому в реальных устройствах в цепь разряда конденсатора  $C$  следует включить ограничивающий резистор  $R_3$ .

Найдем связь выходного напряжения регулятора с величинами, характеризующими работу параметрического звена стабилизации.

Согласно принятым на рис. 60.43, а обозначениям ток заряда конденсатора определяется соотношением

$$I_C = E a / R.$$

Здесь и далее для всех рассматриваемых схем  $a = R_1 / (R_1 + R_2)$ .

Учитывая, что  $U_{C0} = 0$  и  $U_{Cp} = E_0$  (напряжение  $E_0$  задается УОС компенсационной цепи стабилизации, влияние которой мы пока не рассматриваем), получаем

$$\gamma = E_0 C R / (a T E).$$

С учетом внутренних сопротивлений  $PK$  и дросселя  $Др$ , обозначаемых через  $r$ , имеем

$$U_H = E_0 C R / (a T) - I_H r.$$

Поскольку  $\partial U_H / \partial E = 0$ , коэффициент стабилизации по входному напряжению равен бесконечности. При этом параметрический канал обрабатывает любые изменения входного напряжения, в том числе и те, которые могут быть обусловлены падением напряжения на

внутреннем сопротивлении источника питания  $E$ .

Из последнего выражения следует, что при параметрическом способе стабилизации любые изменения величин, характеризующих работу схемы управления, непосредственно влияют на значение  $U_H$ , а выходное сопротивление стабилизатора равно выходному сопротивлению регулятора. Для оценки влияния изменений каждой из величин можно воспользоваться частными производными  $\partial U_H / \partial \Pi$ , где через  $\Pi$  обозначен параметр, влияние которого оценивается.

Уменьшение зависимости  $U_H$  от изменений этих величин и тока нагрузки достигается введением компенсационного канала стабилизации. Взаимодействие параметрического и компенсационного каналов должно быть таким, чтобы требуемый закон управления значением  $\gamma$  сохранялся. В рассматриваемой схеме такое взаимодействие осуществляется за счет задания порога срабатывания  $KH$  с выхода УОС.

Учитывая, что  $\Delta E_0 / \Delta U_H = -K$ , где  $K$  — коэффициент усиления УОС с учетом входного делителя напряжения, можно, дифференцируя последнее соотношение для  $U_H$ , оценить влияние любого из параметров на значение выходного напряжения

$$\Delta U_H = \frac{(\partial U_H / \partial \Pi)_0 \Delta \Pi}{1 + K C R / a T}.$$

Здесь  $\Delta U_H$  — изменения  $U_H$  при изменении параметра на значение  $\Delta \Pi$ , а  $(\partial U_H / \partial \Pi)_0$  — частная производная, полученная в предположении  $E_0 = \text{const}$ .

Пусть, например, необходимо оценить влияние изменения тока нагрузки, иными словами, найти выходное сопротивление стабилизатора. Учитывая, что  $R_{\text{вых}} = -\partial U_H / \partial I_H$ , на-



ходим

$$R_{\text{вых}} = r(1 + KCR/aT),$$

откуда при заданном  $r$ , определенном ранее при расчете регулятора, можно найти требуемое значение коэффициента усиления.

Следует отметить, что источник тока, обеспечивающий заряд конденсатора  $C$  на интервале  $t_n$  в схеме на рис. 60.43, *a*, может быть включен после  $PK$ , для чего верхние выводы резисторов  $R$  и  $R_1$  соединяются с катодом диода  $VD1$ . В этом случае параметрический канал будет также обрабатывать изменения выходного напряжения, обусловленные падением напряжения на  $PK$ . Подобное же включение можно рекомендовать для стабилизаторов, выполненных на базе преобразователей напряжения, имеющих аналогичные внешние характеристики, в частности для ОПН1 и ОПН2.

Расчет элементов системы управления может быть проведен следующим образом.

Пусть заданы  $U_n$ ,  $E_{\text{min}}$ ,  $I_{n \text{ max}}$ ,  $T$ ,  $R_{\text{вых}}$  и предварительным расчетом регулятора определено его выходное сопротивление  $r$ . При выбранной элементной базе значение максимального напряжения срабатывания компаратора  $E_0$  вполне определено, а минимальный коллекторный ток транзистора (ток заряда конденсатора  $I_C$ ) находится из соображений его температурной стабильности. Поэтому

$$a/R = I_{C \text{ min}}/E.$$

Чтобы транзистор  $VT$  в процессе заряда конденсатора  $C$  оставался в активном режиме работы, следует задать минимальным напряжением между коллектором и базой  $U_{k \text{ min}}$ . После этого можно определить коэффициент

$$a = 1 - (E_0 + U_{k \text{ min}})/E_{\text{min}}.$$

Из двух последних соотношений находим

$$R = (E_{\text{min}} - E_0 - U_{k \text{ min}})/I_{C \text{ min}}.$$

Затем определяем емкость

$$C = T I_{C \text{ min}} \frac{U_n + r I_{n \text{ max}}}{E_0 E_{\text{min}}}.$$

Коэффициент усиления  $UOC$  можно найти, если задано суммарное допустимое изменение выходного напряжения  $\Delta U_{\Sigma}$  при воздействии различных дестабилизирующих факторов. При этом могут быть вычислены изменения соответствующих параметров  $\Delta \Pi$ . Поскольку  $\Delta U_{\Sigma}$  определяется суммированием приращений  $\Delta U_n$ , определяемых приращениями различных влия-

ющих параметров, имеем

$$K = \frac{aT}{CR} \left[ \frac{\sum_{\Pi} \left( \frac{\partial U_n}{\partial \Pi} \right)_0 \Delta \Pi}{\Delta U_{\Sigma}} - 1 \right].$$

Практические расчеты показывают, что в реальных устройствах значение  $K$  не превышает несколько десятков. Такие небольшие значения коэффициента усиления в цепи обратной связи обусловлены наличием параметрического канала стабилизации и способствуют повышению устойчивости в большом диапазоне изменения входного напряжения.

При определении сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  исходят из соображений наилучшей температурной стабильности эмиттерного тока транзистора  $T$ . Обычно полагают  $R_1 = R$  и по найденному значению  $a$  определяют  $R_2$ .

#### Система управления стабилизированными регуляторами напряжения II рода

Из регулировочной характеристики простейшего идеального РНП  $U_n = E/(1 - \gamma)$  следует, что необходимая для стабилизации выходного напряжения  $U_n = U_{n0}$  зависимость  $\gamma(E)$  имеет вид

$$\gamma = (U_{n0} - E)/U_{n0}.$$

Требуемый в данном случае закон управления значением  $\gamma$  может быть получен двумя путями: а) при использовании генератора линейно нарастающего напряжения при постоянном токе заряда конденсатора ( $\partial I_C / \partial E = 0$ ) и постоянном напряжении срабатывания компаратора за счет изменения уровня, на котором фиксируется начальное напряжение на конденсаторе, пропорционально входному напряжению  $E$ ; б) при использовании генератора линейно падающего напряжения и при постоянном токе разряда конденсатора начальное напряжение должно быть постоянным, а порог срабатывания пропорционален  $E$ .

На рис. 60.44, *a* и *б* представлены схема, реализующая второй путь, и диаграммы, поясняющие ее работу (штриховой линией показаны диаграммы для большего значения входного напряжения). Транзистор  $VT$  выполняет роль источника тока разряда конденсатора  $C$ , стабилитрон  $VD4$  является источником опорного напряжения  $E_0$ , диоды  $VD2$ ,  $VD3$  и резистор  $R_5$  осуществляют фиксацию начального напряжения на конденсаторе  $C$ , а делитель напряжения  $R_1$ ,  $R_2$  задает напряжение срабатывания компаратора  $KH$ .

Работа схемы сводится к следующему. Когда  $PK$  выключен и диод  $VD1$  проводит

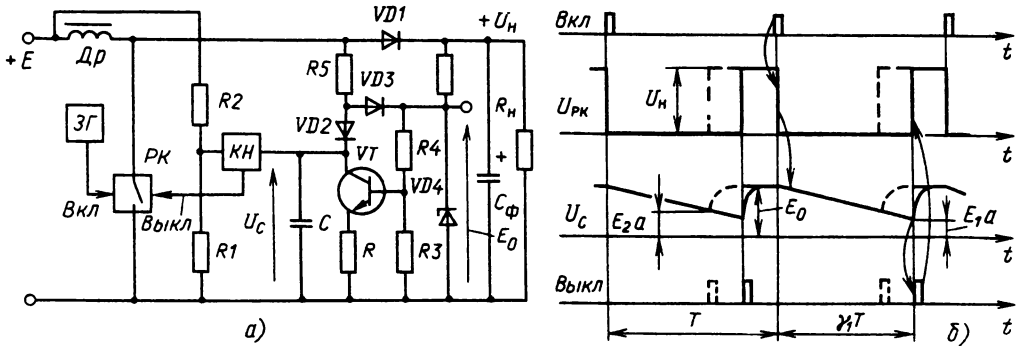


Рис 60.44. Схема параметрического стабилизатора напряжения на основе РНП (а) и временные диаграммы, иллюстрирующие его работу (б)

гок, напряжение на ключе равно  $U_n$ . Если ток, протекающий по резистору  $R_5$ , больше коллекторного тока транзистора  $VT$ , то диоды  $VD2$  и  $VD3$  открыты и напряжение на конденсаторе  $C$  равно  $E_0$ . После включения  $PK$ , происходящего в момент поступления сигнала от  $ЗГ$ , диоды  $VD1$ ,  $VD2$  и  $VD3$  закрываются и конденсатор  $C$  начинает разряжаться коллекторным током транзистора  $VT$ . В момент равенства напряжений на входах  $КН$  формируется сигнал на выключение  $PK$ . После этого диод  $VD1$  вновь открывается и конденсатор  $C$  через диод  $VD2$  и резистор  $R_5$  начинает заряжаться. Когда напряжение на конденсаторе достигает  $E_0$ , открывается диод  $VD3$  и напряжение на  $C$  фиксируется на уровне  $E_0$ . При изменении входного напряжения  $E$ , например при его увеличении, повышается и порог срабатывания  $КН$ , задаваемый делителем напряжения  $R_1, R_2$ . Поэтому  $\gamma$  уменьшается, т. е. происходит стабилизация выходного напряжения.

Найдем соотношения между параметрами схемы, обеспечивающие получение идеальной стабилизации при изменениях входного напряжения. Обозначим  $a = R_1/(R_1 + R_2)$ ,  $b = R_3/(R_3 + R_4)$ ,  $I_C$  — ток разряда конденсатора на этапе  $\gamma T$ . Тогда напряжение срабатывания компаратора  $U_{cp} = aE$ , ток разряда  $I_C = bE_0/R$ . Учитывая, что  $U_{C0} = E_0$ , получаем выражение для относительной длительности проводящего состояния  $PK$

$$\gamma = \frac{C(E_0 - aE)}{I_C T}$$

Исключив  $\gamma$  с помощью выражения для регулировочной характеристики, продифференцировав полученное соотношение по  $E$  и приравняв производную нулю, определим, что идеальная стабилизация при изменениях вход-

ного напряжения ( $\partial U_n / \partial E = 0$ ) осуществляется при

$$E_0 C / I_C T = 1.$$

При этом

$$U_{н0} = E_0 / a$$

Следует отметить, что если  $E_0 C / I_C T > 1$ , то  $\partial U_n / \partial E < 0$ , а при  $E_0 C / I_C T < 1$   $\partial U_n / \partial E > 0$ .

Практическая настройка стабилизатора сводится к одновременному изменению величин  $a$  и  $E_0$ .

Условие идеальной стабилизации можно переписать в виде

$$CR / bT = 1.$$

Расчет элементов схемы управления при выбранном  $E_0$ , заданном диапазоне изменения входного напряжения ( $E_{min}, E_{max}$ ) и выходном напряжении  $U_{н0}$  сводится к следующему.

По значениям  $U_{н0}$  и  $E$  определяем коэффициент деления  $a = R_1 / (R_1 + R_2)$ . Ток  $I_C$  выбирается много больше теплового коллекторного тока транзистора  $VT$ :  $I_C \gg I_{к0}$ . Затем по  $I_C$ ,  $T$  и  $E_0$  определяется  $C$ . Для определения коэффициента  $b = R_3 / (R_3 + R_4)$  следует иметь в виду, что транзистор должен работать в активном режиме во всем диапазоне изменения  $E$ . Если задаться некоторым минимальным напряжением между коллектором и эмиттером  $U_{кmin}$ , последнее условие можно выразить соотношением

$$bE_0 + U_{кmin} \leq aE_{min}$$

Тем самым определено  $b$ . Как и в схеме рис. 60.43, обычно выбирают  $R = R_3$ , поэтому, зная  $I_C$ , можно найти сопротивление резисторов  $R_1, R_3$  и  $R_4$ . Резистор  $R_5$  должен быть рассчитан так, чтобы к моменту появления очередного сигнала  $ЗГ$  напряжению на конден-

саторе достигло значения  $E_0$ . Минимальное время для восстановления начального состояния равно  $(1 - \gamma_{max})T$ , где  $\gamma_{max}$  соответствует режиму при  $E = E_{min}$ . Поскольку начальное напряжение, от которого начинает заряжаться конденсатор  $C$  на этом этапе, равно  $aE_{min}$ , сопротивление резистора  $R_5$  должно удовлетворять неравенству

$$R_5 \leq (1 - \gamma_{max})T / \left[ C \ln \frac{U_{н0} - I_C R_5 - aE_{min}}{U_{н0} - I_C R_5 - E_0} \right].$$

По этому выражению  $R_5$  может быть найдено, например, методом последовательных приближений. В качестве первого приближения следует выбрать  $R_5 = (U_n - E_0)/2I_C$ , при котором в установившемся режиме через диоды  $VD2$  и  $VD3$  протекают равные токи. В этом случае практически устраняется влияние температуры на значение начального напряжения на конденсаторе  $C$ , поскольку при одинаковых диодах  $VD2$  и  $VD3$  и равных токах температурные изменения напряжений на диодах взаимно компенсируются ( $U_{C0} = E_0 + U_{VD3} - U_{VD2}$ ).

Рассмотрим теперь влияние конечного выходного сопротивления регулятора на работу параметрической схемы стабилизации выходного напряжения.

Если считать, что сопротивления  $RК$  и диода  $VD1$  постоянно току одинаковы, то внешняя характеристика РНП имеет вид

$$U_n = \frac{E}{1 - \gamma} - I_n \frac{r}{(1 - \gamma)^2}.$$

Здесь  $r$  равно сумме сопротивлений дросселя и  $RК$ .

Зависимость выходного сопротивления регулятора от  $\gamma$  [ $r_{вых} = r/(1 - \gamma)^2$ ] приводит к тому, что обеспечение условий идеальной стабилизации при изменениях входного напряжения ( $\partial U_n / \partial E = 0$ ) возможно только при некоторых вполне определенных значениях входного напряжения  $E$  и тока нагрузки  $I_n$ .

Для определения этих значений продифференцируем выражение для внешней характеристики по  $E$ , имея в виду, что  $\gamma$  является функцией  $E$

$$\partial U_n / \partial E = \left[ (1 - \gamma) \left( 1 - \gamma + E \frac{\partial \gamma}{\partial E} \right) - 2rI_n \frac{\partial \gamma}{\partial E} \right] / (1 - \gamma)^3.$$

Подставив  $\gamma$  и  $\partial \gamma / \partial E = -aCR/I_C T$ , получим

$$(\partial U_n / \partial E)_0 = \left[ \left( 1 - \frac{E_0 C}{I_C T} + E \frac{aC}{I_C T} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left( 1 - \frac{E_0 C}{I_C T} \right) + 2I_n r \frac{aC}{I_C T} \right] / (1 - \gamma)^3,$$

откуда следует, что при выполнении найденного выше условия идеальной стабилизации в реальном стабилизаторе (т. е. при  $r \neq 0$ ) имеем  $\partial U_n / \partial E > 0$ . Значение этой производной, равное нулю, можно получить для некоторых  $E$  и  $I_n$  только тогда, когда  $E_0 C / I_C T > 1$ .

Однако на практике всегда справедливо соотношение  $U_n \approx U_{н0} \gg I_n r / (1 - \gamma)^2$ , и поэтому значение  $E_0 C / I_C T$ , при котором  $\partial U_n / \partial E = 0$ , близко к единице. Пренебрегая величиной второго порядка малости  $(1 - E_0 C / I_C T)^2$  и считая  $(1 - \gamma) \approx E / U_{н0}$ , получаем приближенное равенство

$$\left( \frac{\partial U_n}{\partial E} \right)_0 \approx \frac{aC}{I_C T} \frac{\left( 1 - \frac{E_0 C}{I_C T} \right) E + 2I_n r}{(E / U_{н0})^3},$$

в котором  $U_{н0} = E_0 / a$ .

Полагая  $E = E_{ном}$  и  $I = I_{ном}$ , находим, что  $\partial U_n / \partial E = 0$ , если выполняется соотношение

$$E_0 C / I_C T = 1 + 2r (I_{ном} / E_{ном})$$

или с учетом значения  $I_C$

$$CR / bT = 1 + 2r (I_{ном} / E_{ном}).$$

При этом выходное напряжение определяется выражением

$$U_n = E_0 / a - (E_0 / a)^2 r I_{ном} / E_{ном}^2.$$

Из последних соотношений можно получить простое выражение

$$(\partial U_n / \partial E)_0 = 2r (U_{н0} / E)^2 (I_n / E - I_{ном} / E_{ном}),$$

позволяющее найти пределы изменения выходного напряжения при изменениях  $E$  и  $I_n$ , необходимые для расчета коэффициента стабилизации.

Как указывалось выше, для увеличения стабильности выходного напряжения при изменении характеристик параметрического канала, частоты задающего генератора и тока нагрузки вводится компенсационный канал. Взаимодействие этих двух каналов регулирования должно быть таким, чтобы сохранился закон управления относительной длительностью  $\gamma$ , определяемый приведенными выше выражениями для идеальной стабилизации (с учетом  $r \neq 0$ ). В компенсационно-параметрической схеме управления, приведенной на рис. 60.45, такое взаимодействие достигнуто благодаря тому, что начальное напряжение на конденсаторе  $C$  фиксируется во время паузы на уровне  $E_{0v}$ , определяемом выходным напряжением усилителя отрицательной обратной связи. При изменении, например увеличении,

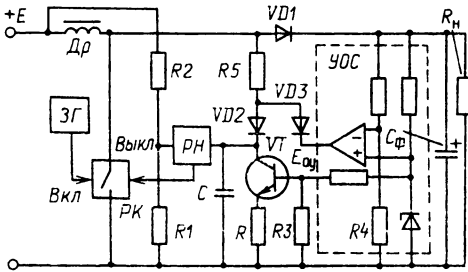


Рис. 60.45. Схема компенсационно-параметрического стабилизатора напряжения на основе РНИ

$U_n$  начальное напряжение на конденсаторе уменьшается, приводя к уменьшению  $\gamma$ , а следовательно, к стабилизации выходного напряжения. Поскольку для номинальных значений  $I_{ном}$  и  $E_{ном}$  всегда можно выбрать  $E_0 = E_{оу}$ , для такой компенсационно-параметрической схемы управления остаются справедливыми все полученные выше соотношения.

Учитывая, что в компенсационно-параметрической схеме рис. 60.45  $\partial\gamma/\partial E = -C(K\partial U_n/\partial E + a)/I_C T$ , где  $K$  — коэффициент усиления УОС с учетом входного делителя напряжения, и предполагая, что  $U_{н0} \gg I_{нr}/(1-\gamma)^2$ , из выражения для  $\partial U_n/\partial E$  можно получить соотношение

$$\partial U_n/\partial E = (\partial U_n/\partial E)_0 / (1 + KU_{н0}^2/EE_0),$$

в котором  $(\partial U_n/\partial E)_0$  — частная производная  $U_n$  по  $E$  при  $E_{оу} = \text{const}$ , которая, таким образом, определяется выражениями, полученными для параметрической схемы управления.

Можно показать, что аналогичное выражение получается при оценке влияния на стабильность выходного напряжения любого из дестабилизирующих факторов. При этом вместо  $\partial U_n/\partial E$  и  $(\partial U_n/\partial E)_0$  следует подставить частные производные напряжения  $U_n$  по соответствующим параметрам. Например, учитывая, что выходное сопротивление РНИ  $r_{вых} = r/(1-\gamma)^2$  и что  $1-\gamma \approx E/U_{н0}$ ,  $U_{н0} \approx E_0/a$ , получаем выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{вых} = \frac{r}{\frac{E}{U_{н0}} \left( \frac{E}{U_{н0}} + \frac{K}{a} \right)}$$

Суммарное изменение выходного напряжения при комплексном воздействии дестабилизирующих факторов определяется выраже-

нием

$$\Delta U_{\Sigma} = \sum_n \left( \frac{\partial U_n}{\partial \Pi} \right)_0 \Delta \Pi / (1 + KU_{н0}^2/EE_0).$$

Расчет схемы на рис. 60.45 ничем не отличается от расчета рассмотренной выше параметрической схемы управления. Коэффициент усиления усилителя обратной связи при этом определяется по требуемому значению  $\Delta U_{\Sigma}$ .

Взаимодействие компенсационного и параметрического каналов стабилизации может быть и иным. Например, в схеме на рис. 60.45 можно фиксировать начальное напряжение конденсатора на постоянном уровне, определяемом напряжением стабилитрона, а разрядный ток конденсатора сделать зависимым от выходного напряжения, подключив резистор  $R_4$  к выходу усилителя обратной связи. При этом необходимо изменить полярность подключения входов УОС с тем, чтобы с изменением, например увеличением, входного напряжения увеличивался ток разряда.

В этом случае работу компенсационного канала можно характеризовать крутизной усиления  $\partial I_C/\partial U_n = S_y$ , которая для рассмотренной схемы  $S_y = bK/R$ , где  $K$  — коэффициент усиления УОС с учетом входного делителя напряжения. Последнее справедливо, поскольку  $I_C = bE_{оу}/R$ .

Разумеется для такой схемы управления справедливы все полученные выше соотношения, характеризующие работу параметрического канала. Учитывая зависимость  $I_C(U_n)$  и принятые выше допущения, можно найти

$$\Delta U_{\Sigma} = \sum_n \left( \frac{\partial U_n}{\partial \Pi} \right)_0 \Delta \Pi / [1 + S_y U_{н0} (U_{н0}/E - 1)/I_C].$$

Полученное соотношение можно использовать для оценки стабильности выходного напряжения в любых компенсационно-параметрических схемах управления, в которых начальное напряжение конденсатора постоянно, а ток разряда является функцией выходного напряжения.

Рассмотренный принцип управления реализован в схеме на рис. 60.46. Здесь дифференциальный каскад на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  совмещает в себе функции разрядного элемента и усилителя обратной связи.

Делитель напряжения  $R_5, R_6$  следует выбрать из соотношения  $bE_0 = mU_n$ , где  $E_0$  — напряжение стабилитрона  $VD4$ ,  $b = R_3/(R_3 + R_4)$ ,  $m = R_5/(R_5 + R_6)$ . Коллекторный ток разрядного транзистора  $VT1$  определяется вы-

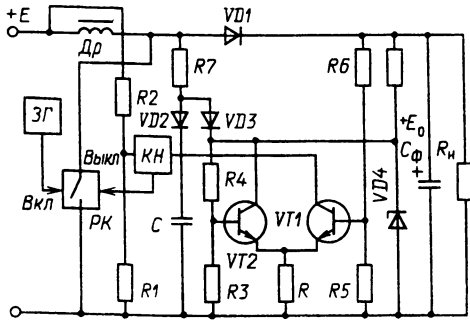


Рис. 60.46. Вариант схемы компенсационно-параметрического стабилизатора напряжения на основе РНИИ

ражением

$$I_C = bE_0/R + S(mU_H - bE_0),$$

в котором  $S = \beta/2r_{\text{вых}}$  — крутизна собственно дифференциального каскада ( $\beta$  и  $r_{\text{вх.э}}$  — коэффициент передачи тока базы и входное сопротивление транзистора  $VT1$  в схеме с ОЭ). Для того чтобы воспользоваться выражением для  $\Delta U_{\Sigma}$ , необходимо в нем положить  $S_y = mS$ . При этом получим для производной по любому из параметров

$$\frac{\partial U_H}{\partial \Pi} = \left( \frac{\partial U_H}{\partial \Pi} \right)_0 / [1 + 2mSR(U_{H0}/E - 1)].$$

С помощью этого выражения можно оценить изменение  $U_H$  при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

**Система управления стабилизированным регулятором напряжения III рода**

Регулировочную характеристику простейшего регулятора III (РНИИ) при учете сопротивлений  $RK$  и дросселя можно записать следующим образом:

$$U_H = E \frac{\gamma}{1 - \gamma} - I_H \frac{r}{(1 - \gamma)^2}.$$

Для стабилизации выходного напряжения параметрический канал управления должен обеспечивать постоянство  $U_{H0} = E\gamma/(1 - \gamma)$ . Поэтому алгоритм управления относительной длительностью должен удовлетворять равенству

$$\gamma = U_{H0}/(E + U_{H0}).$$

Для этого порог срабатывания компаратора напряжения должен быть постоянным, а ток заряда конденсатора наряду с состав-

ляющей, пропорциональной  $E$ , должен иметь постоянную составляющую.

Схема компенсационно-параметрического стабилизатора, в котором осуществлен требуемый закон управления, показана на рис. 60.47.

Делитель напряжения  $R_1, R_2$  включен между положительной шиной источника входного напряжения и отрицательной шиной выходного. Если обозначить  $a = R_1/(R_1 + R_2)$ , то коллекторный ток транзистора  $VT$ , определяющий скорость заряда конденсатора  $C$  на интервале регулирования  $\gamma T$ , равен

$$I_C = a(E + U_H)/R,$$

где  $a = R_1/(R_1 + R_2)$ .

При выключенном состоянии  $PK$  открыт диод  $VD1$ , а через диод  $VD2$  протекает коллекторный ток транзистора. Поэтому напряжение на конденсаторе  $C$  равно нулю.

После включения  $PK$ , происходящего в момент поступления сигнала от  $ZГ$ , оба диода запираются и конденсатор  $C$  начинает заряжаться. Когда напряжение на нем достигнет значения  $E_0$ , определяемого усилителем обратной связи, компаратор формирует сигнал на выключение  $PK$ . После выключения  $PK$  ток дросселя  $Dr$  вначале протекает через открывающийся  $VD2$ , разряжая конденсатор  $C$ . При  $U_C = 0$  открывается  $VD1$  и напряжение на конденсаторе перестает изменяться. После поступления очередного сигнала от  $ZГ$  описанные процессы повторяются. Следует отметить, что протекание большого тока дросселя через диод  $VD2$  и конденсатор  $C$  схемы

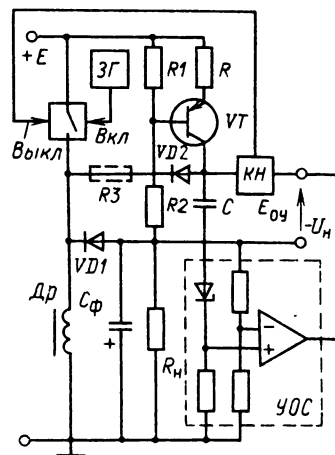


Рис. 60.47. Схема компенсационно-параметрического стабилизатора напряжения на основе РНИИ

управления нежелательно. Для предотвращения этого последовательно с диодом  $VD2$  устанавливается резистор  $R_{огр}$  (сопротивление которого составляет десятки см). При наличии этого резистора после выключения  $PK$  сразу открываются диоды  $VD1$  и  $VD2$ , а конденсатор разряжается через  $R_{огр}$ .

Отметим, что подключение делителя напряжения  $R_1, R_2$  к выходной шине здесь возможно только потому, что выходное напряжение РНII имеет отрицательную (т. е. противоположную  $E$ ) полярность относительно общей точки. При этом через транзистор  $VT$  осуществляется неглубокая отрицательная обратная связь. В самом деле, при росте (по абсолютному значению) выходного напряжения увеличивается и ток заряда конденсатора  $C$ , что приводит к уменьшению  $\gamma$  и, следовательно, к уменьшению  $U_n$ .

Рассмотренный принцип работы схемы управления позволяет записать выражение

$$\gamma = \frac{E_0 CR}{aT(E + U_n)}.$$

Продифференцируем  $U_n = f(\gamma)$  с учетом того, что  $\gamma$  само зависит  $E$ ,

$$\frac{\partial U_n}{\partial E} = \frac{(1 - \gamma) [\gamma(1 - \gamma) + E \partial \gamma / \partial E] - 2r I_n \partial \gamma / \partial E}{(1 - \gamma)^3}.$$

Обозначим  $CRE_0/aT = U_0$  и, рассматривая работу только параметрического канала управления, будем считать, что  $\partial E_0 / \partial U_n = 0$ . Тогда

$$\left( \frac{\partial \gamma}{\partial E} \right)_0 = \frac{1 + (\partial U_n / \partial E)_0}{(E + U_n)^2} U_0.$$

Из двух последних соотношений после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + U_0 \frac{E(E + U_n - U_0) - 2r I_n (E + U_n)}{(E + U_n - U_0)^3} \right] \times \\ & \quad \times \left( \frac{\partial U_n}{\partial E} \right)_0 = \\ & = U_0 \frac{(E + U_n - U_0)(U_n - U_0) + 2r I_n (E + U_n)}{(E + U_n - U_0)^3}. \end{aligned}$$

Если регулятор напряжения идеален ( $r = 0$ ), то выходное напряжение  $U_{н0}$  не зависит от входного, когда выполняется равенство  $U_{н0} = U_0$ . Следовательно, параметры цепи управления необходимо рассчитывать так, чтобы выполнялось соотношение

$$U_{н0} = E_0 CR / aT.$$

Зависимость выходного сопротивления регулятора  $r/(1 - \gamma)^2$  от  $\gamma$  приводит к тому, что

при выполнении условия последнего соотношения равенство  $(\partial U_n / \partial E)_0 = 0$  нарушается. Поскольку при работе стабилизатора изменяются как входное напряжение  $E$ , так и ток нагрузки  $I_n$ , добиться этого равенства можно только для вполне определенных значений  $I_n$  и  $E$ . Однако аналитическое определение этих значений приводит к весьма громоздким выражениям, неудобным для практического использования. Поэтому поступим так, как это делалось для РНII. Так как в реальных условиях всегда справедливо соотношение  $U_n \gg r I_n / (1 - \gamma)^2$ , то, следовательно,  $U_n \approx U_{н0} = U_0$ . Пренебрегая величиной второго порядка малости  $(U_n - U_0)^2$  при  $I = I_{ном}$ ,  $E = E_{ном}$ , получаем следующее условие для выбора элементов цепи управления:

$$E_0 \frac{CR}{aT} = U_n + 2r \left( 1 + \frac{U_n}{E_{ном}} \right) I_{ном}.$$

Тогда, учитывая, что  $E \gg U_n - U_0$ , находим

$$\left( \frac{\partial U_n}{\partial E} \right)_0 = 2r \frac{U_n}{E^2} \left( I - I_{ном} \frac{1 + U_n/E_{ном}}{1 + U_n/E} \right).$$

Это выражение может быть использовано для расчета изменений выходного напряжения при вариациях  $I_n$  и  $E$  относительно номинальных значений.

Учет влияния канала обратной связи может быть проведен аналогично тому, как это было сделано применительно к стабилизаторам на основе РНI и РНII. При этом суммарная нестабильность напряжения оценивается выражением

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{\sum_{\Pi} \left( \frac{\partial U_n}{\partial \Pi} \right)_0 \Delta \Pi}{\left( 1 + K \frac{CR}{aT} \right) \left( 1 + \frac{U_n}{E} \right)},$$

где  $(\partial U_n / \partial \Pi)_0$  — производная по любому из параметров. Поскольку выходное сопротивление регулятора определяется соотношением  $r/(1 - \gamma)^2$ , а  $1 - \gamma \approx E/(E + U_n)$ , выходное сопротивление стабилизатора  $R_{вых} = -\partial U_n / \partial I_n$  равно

$$R_{вых} = \frac{r \left( 1 + \frac{U_n}{E} \right)}{\left( 1 + K \frac{CR}{aT} \right)}.$$

Расчет отдельных элементов цепи управления может быть проведен так же, как для стабилизаторов на основе РНI и РНII.

## Список литературы

60.1 **Справочник** по источникам электропитания РЭА Под ред. Г. С. Найвельта М. Радио и связь, 1985 576 с

60.2 **Микроэлектронные** электросистемы/Под ред. Ю. И. Конева М. Радио и связь, 1987 239 с

60.3 **В. С. Моин.** Стабилизированные транзисторные преобразователи М. Энергоатомиздат, 1986 375 с.

60.4 **Источники** вторичного электропитания Справочное пособие/Под ред. Ю. И. Конева М. Радио и связь, 1983 279 с.

60.5 **А. Г. Поликарпов, Е. Ф. Сергиенко.** Импульсные регуляторы и стабилизаторы напряжения М. МЭИ, 1983 71 с

60.6 **В. В. Сазонов.** Компенсационно-параметрические импульсные стабилизаторы постоянного напряжения М. Энергоатомиздат, 1982 85 с

60.7 **Б. А. Глебов.** Магнитно-транзисторные преобразователи напряжения для питания РЭА М. Радио и связь, 1981 96 с

60.8 **В. А. Голубяцкий.** Транзисторные импульсные усилители и стабилизаторы постоянного напряжения М. Советское радио, 1974 158 с

60.9 **Ф. И. Александров, А. Р. Сиваков.** Импульсные преобразователи и стабилизаторы М. Энергия, 1970 188 с.

60.10 **Современное** состояние и перспективы развития источников вторичного электропитания/М. Я. Бочарников, С. С. Букрев, В. Г. Журавский и др. Зарубежная электронная техника Сборник обзоров № 2 (297) М. ЦНИИ «Электроника», 1986 31 с

## Раздел 61

## БЫТОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ

## СОДЕРЖАНИЕ

61.1. Общие требования к электромеханическим бытовым приборам . . . . .	534	61.6. Приборы косметики и гигиены . . . . .	548
61.2. Приборы микроклимата . . . . .	535	Автомассажеры (548). Маникюрные машины (550). Электробритвы (550).	
Холодильники (535). Кондиционеры (538). Увлажнители воздуха (538). Вентиляторы (538). Тепловентиляторы (541). Напольный воздухоочиститель (542).		61.7. Бытовые нагревательные электроприборы . . . . .	550
61.3. Приборы для уборки помещений . . . . .	542	Классификация. Основные термины и определения (550). Электроприборы для приготовления пищи (551). Электроприборы для отопления (555). Электроприборы для нагрева воды (556). Прочие бытовые нагревательные электроприборы (558). Рекомендации по выбору ТЭНов для бытовых нагревательных электроприборов (561).	
Пылесосы (542). Полотеры (543)		Список литературы . . . . .	561
61.4. Приборы для обработки белья . . . . .	544		
61.5. Приборы для приготовления пищи . . . . .	546		
Универсальные кухонные машины (546). Электромясорубки (547). Электровзбивалки (547). Электрокофемолки (547). Электроножи (547). Электросоковыжималки (548).			

### 61.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ БЫТОВЫМ ПРИБОРАМ

К электромеханическим бытовым электроприборам [61.1] условно относят те приборы, в которых основные функции выполняются с помощью электромеханических преобразователей — электродвигателей, вибраторов и т. п.

К электромеханическим приборам предъ-

являются следующие основные требования: эффективное выполнение технологических функций прибора; электробезопасность, пожаробезопасность; максимальная безопасность оператора; нормализованные габаритные размеры (для холодильников, стиральных машин, кондиционеров и т. д.).

Общие требования к электромеханическим приборам устанавливаются ГОСТ 14087-80 [61.2].

Общие требования по безопасности для электромеханических и электронагревательных приборов и методы использования устанавливаются СТ СЭВ 1110-78. Согласно этому стандарту электрическая изоляция приборов подразделяется на следующие виды:

*основная изоляция* — изоляция токоведущих частей, предназначенная для основной защиты от поражения электрическим током; основная изоляция не должна обязательно состоять только из функциональной изоляции;

*дополнительная изоляция* — независимая изоляция, предусмотренная дополнительно к основной для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения основной изоляции;

*двойная изоляция* — изоляция, состоящая из основной и дополнительной изоляции;

*усиленная изоляция* — единая система изоляции токоведущих частей с механическими и электрическими свойствами, обеспечивающими такую же степень защиты от поражения электрическим током, как и двойная изоляция.

Для электротехнических изделий, в том числе и электромеханических приборов, установлено пять классов защиты:

*класс 0* — электроприборы на номинальное напряжение свыше 42 В, у которых все части, доступные для прикосновения, отделены от частей, находящихся под напряжением, основной изоляцией и отсутствует устройство для заземления;

*класс 01* — электроприборы на номинальное напряжение свыше 42 В, у которых все части, доступные для проникновения, отделены от частей, находящихся под напряжением, основной изоляцией и соединены с заземляющим зажимом, расположенным с внешней стороны прибора;

*класс I* — электроприборы на номинальное напряжение свыше 42 В, у которых все части, доступные для прикосновения, отделены от частей, находящихся под напряжением, основной изоляцией и соединены с заземляющим зажимом или контактом заземления, расположенным внутри прибора;

*класс II* — электроприборы на номинальное напряжение свыше 42 В, у которых все части, доступные для прикосновения, отделены от частей, находящихся под напряжением, двойной или усиленной изоляцией и отсутствует устройство для заземления;

*класс III* — электроприборы на номинальное напряжение до 42 В, у которых нет ни внутренних, ни внешних частей, работающих при более высоком напряжении.

По степени защиты электромеханические приборы подразделяются следующим образом:

*незащищенные* — не имеющие специальной защиты внутренних частей от попадания воды;

*капельзащищенные* — имеющие защиту внутренних частей от попадания капель воды, падающих отвесно;

*брызгозащищенные* — имеющие защиту внутренних частей от попадания брызг, падающих под углом к вертикали;

*водонепроницаемые* — имеющие защиту внутренних частей от проникновения воды при полном их погружении в воду.

Для электромеханических приборов предусмотрено работать в одном из следующих режимов: *продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном, перемежающемся.*

Номинальные напряжения для приборов соответствуют значениям из ряда ГОСТ 721-77: 12; 24; 42; 127; 220 В переменного однофазного тока частотой 50 Гц; 380/220 В трехфазного тока частотой 50 Гц; 6; 12; 24; 110; 220 В постоянного тока.

Все приборы должны нормально работать при колебаниях напряжения сети в пределах  $\pm 10\%$  номинального значения, а холодильники и морозильники при колебаниях сети  $+10 \div -15\%$  номинального значения.

## 61.2. ПРИБОРЫ МИКРОКЛИМАТА

Приборы микроклимата предназначены для изменения или поддержания постоянства параметров окружающей среды (температуры, влажности) в жилом помещении или в замкнутом объеме, предназначенном для хранения продуктов, химических веществ, киноленок, лекарств и т. п.

### Холодильники

Холодильники (табл. 61.1, 61.2, рис. 61.1 и 61.2) предназначены для хранения продуктов и веществ в охлажденном виде.

В компрессионном холодильнике камера охлаждается вследствие изменения агрегатного состояния хладагента (при испарении) хладона-12 (фреона-12). Пары хладагента отсасываются из испарителя компрессором, который, сжимая, подает их в охлаждаемый воздухом конденсатор, где сжатый и охлажденный хладагент переходит в жидкое состояние. Жидкий хладагент поступает через фильтр и капиллярную трубку в испаритель, расположенный в холодильной камере. Испаряющийся хладагент отбирает тепло от стенок и воздуха холодильной камеры и отсасывается компрессором. Компрессор поршневого или ротационного типа приводится в движение однофазным асинхронным электродвигателем.



Таблица 61.1. Технические данные компрессионных холодильников и морозильников

Название	Тип	Объем, дм <sup>3</sup>		Температура в низкотемпературном отделении, °С	Номинальная мощность, Вт	Общая площадь полок, м <sup>2</sup>	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
		холодильной камеры	низкотемпературного отделения					
ЗИЛ-85 (трехкамерный)	КШТ-350	225	85/90	-18	155	1,82	1560 × 790 × 600	135
«Минск» (двухкамерный)	КШД-350	270	30	-18	155	1,36	1450 × 570 × 600	65
«Минск-16»	КШ-280	280	27	-18	155	1,36	1450 × 570 × 600	62
«Минск-11»	КШ-280	280	27	-12	155	1,36	1450 × 570 × 600	65
«Минск-15» (двухкамерный)	КШД-260	215	45	-18	155	1,18	1450 × 570 × 600	68,5
«Минск-12»	КШ-240	240	27	-18	155	1,21	1225 × 573 × 600	60
ЗИЛ	КШ-240	240	26	-12	180	1,36	1410 × 590 × 685	95
«Апшерон»	КШ-240	240	21	-6	180	1,6	1435 × 570 × 600	65
«Донбасс-5»	КШ-240	240	24	-6	155	1,2	1435 × 570 × 600	70
«Самарканд-2»	КШ-240	240	21	-6	165	1,2	1435 × 570 × 600	67
«Минск-18» (морозильник)	МШ-220	—	220	-18	155	—	1450 × 570 × 600	75
«Минск-10»	КШ-220	220	27	-12	155	1,8	1140 × 570 × 600	57
«Донбасс-8»	КШ-200	200	20	-12	155	1,1	1210 × 570 × 600	70
«Донбасс-7»	КШ-180	180	20	-12	155	1,1	1140 × 570 × 600	57
«Минск-17» (морозильник)	МШ-160	—	160	-18	155	—	1160 × 570 × 600	75
«Саратов-1614»	КШ-160	160	15	-12	155	—	1130 × 470 × 585	54
«Кодры»	КШ-160	160	15	-12	130	0,75	1085 × 570 × 600	60
«Океан-2»	КШ-160	160	16	-6	155	1	1172 × 560 × 585	68
«Саратов-1524»	КШ-150	150	15	-12	155	—	1040 × 470 × 585	45
«Саратов-1408»	КШ-140	140	15	-12	155	—	1040 × 470 × 585	53
«Саратов-1212»	КШ-120	120	15	-12	155	0,8	850 × 470 × 585	52,5
«Саратов-1209»	КШ-120	120	15	-12	155	0,8	850 × 470 × 585	52,5
«Смоленск-2»	КШ-120	123,5	14,3	-12	90	0,7	990 × 560 × 577	50
«Снайге-2»	КС-120	120	17	-12	150	0,79	850 × 650 × 600	70
«Саратов» (морозильник)	МШ-80	—	80	-24	155	—	850 × 470 × 585	45
«Минск» КШД-280	КШД-280	350	80	-18	155	1,20	1750 × 600 × 600	47
«Бирюса-22»	КШД-255П	255	85	-18	155	1,35	1450 × 580 × 600	69
«Гиочел» (морозильник)	МС-120	—	120	-18	155	—	850 × 600 × 600	52
«Бирюса-14»	МШ-120	—	120	-18	155	—	850 × 580 × 600	53

Примечание. Для марки ЗИЛ (трехкамерного) даны объемы двух низкотемпературных отделений

Таблица 61.2. Технические данные абсорбционных холодильников

Название	Тип	Объем, дм <sup>3</sup>		Температура в низкотемпературном отделении, °С	Номинальная мощность, Вт	Общая площадь полок, м <sup>2</sup>	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
		холодильной камеры	низкотемпературного отделения					
«Кристалл-9» (двухкамерный)	АШД-200П	205	31	-18	200	1,1	1360 × 570 × 600	63
«Иней»	АШ-120	120	—	+5	175	0,7	990 × 560 × 600	60
«Ладога-3М»	АС-40	40	—	+7	75	0,13	800 × 1140 × 432	60
«Морозко-3М»	АМ-30	30	—	+5	75	0,13	580 × 420 × 450	20

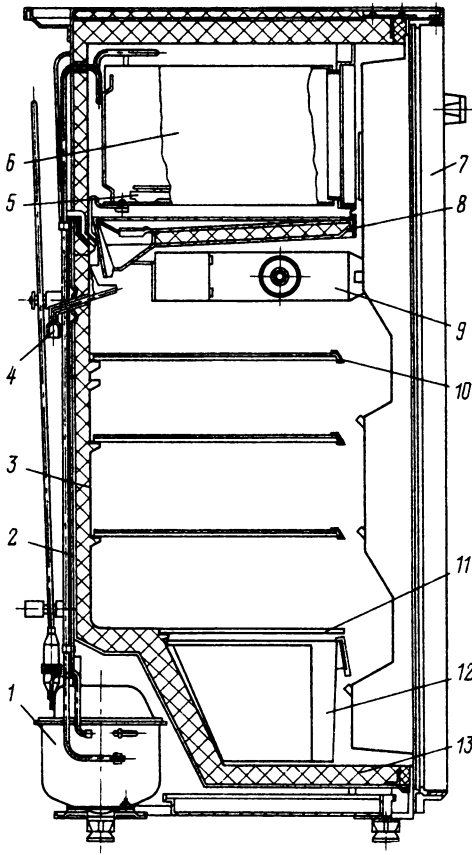


Рис. 61.1. Общий вид (разрез) бытового компрессионного холодильника «Минск-12» типа КШ-240:

1 – холодильный агрегат; 2 – наружный шкаф; 3 – внутренний шкаф; 4 – система для отвода талой воды; 5 – форма для льда; 6 – испаритель; 7 – дверь; 8 – поддон; 9 – панель; 10 – полка; 11 – полка-стекло; 12 – сосуд для фруктов; 13 – теплоизоляция

В абсорбционном холодильнике камера охлаждается за счет испарения хладагента аммиака, смешанного с водородом. Испарившаяся тяжелая водородно-аммиачная смесь диффундирует в абсорбер, где поглощается слабым водно-аммиачным раствором. Концентрированный раствор аммиака стекает через теплообменник в термосифон, подогреваемый электрическим нагревателем. Испаряющийся в термосифоне аммиак попадает в конденсатор, где отдает тепло окружающему воздуху. В конденсаторе пары конденсируются в жидкий аммиак, который стекает в испаритель, расположенный внутри холодильной камеры.

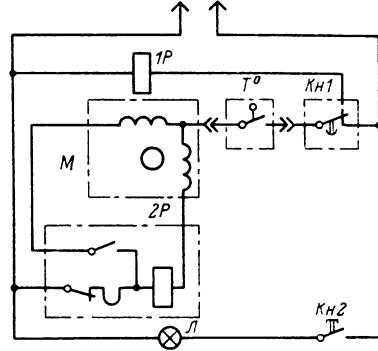


Рис. 61.2. Принципиальная электрическая схема компрессионного холодильника «Минск-12» типа КШ-240 с полуавтоматическим управлением оттаиванием:

*M* – электродвигатель; *1P* – электромагнитный клапан оттаивания; *2P* – пуско-защитное реле; *T<sup>0</sup>* – терморегулятор; *K<sub>H1</sub>* – прибор полуавтоматического оттаивания; *K<sub>H2</sub>* – дверной выключатель; *L* – лампа освещения камеры

В термоэлектрическом холодильнике холодильная камера охлаждается вследствие разности температур на противоположных спаях термоблоков при прохождении через них постоянного электрического тока низкого напряжения. Они применяются для хранения продуктов в автомобилях, хранения лекарств, охлаждения бутылок с напитками и т. п. Для интенсификации процесса охлаждения «горячей» стороны термоблоков некоторые модели имеют встроенный электровентилятор.

В соответствии с ГОСТ 16317-76Е [61.3] холодильники классифицируются и индексируются:

*по способу получения холода*

*K* – компрессионные, *A* – адсорбционные;  
*по способу установки*

*Ш* – встраиваемые напольные в виде шкафа, *С* – встраиваемые напольные в виде стола, *Н* – встраиваемые настенные, *Б* – блочно-встраиваемые;

*по степени комфортности*

обычные, *П* – повышенной комфортности;  
*по числу камер*

однокамерные, *Д* – двухкамерные, *Т* – трехкамерные.

На дверку низкотемпературного отделения наносится маркировка: \* – при температуре минус 6 °С, \*\* – при температуре минус 12 °С, \*\*\* – при температуре минус 18 °С, \*\*\*\* – при температуре минус 24 °С.

Внутренний объем холодильника, дм<sup>3</sup>, соответствует ряду: 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 240; 260; 280; 300; 350; 400; 450; 500.

Технические данные автомобильного термомолекулярного холодильника ХАТЭ-12МУ2 приведены ниже:

Общий объем холодильной камеры, дм <sup>3</sup> . . . . .	12
Перепад температуры между камерой и окружающей средой, °С:	
в основном режиме . . . . .	19
во вспомогательном режиме	15
Потребляемая мощность, Вт:	
в основном режиме . . . . .	65
во вспомогательном режиме	30
Напряжение, В . . . . .	12 ± 10%
Габаритные размеры, мм . . . . .	140 × 280 × 500
Масса, кг . . . . .	8

### Кондиционеры

Кондиционеры предназначены для вентиляции, охлаждения воздуха, очистки его, уменьшения влажности и автоматического поддержания заданной температуры в помещении. Наиболее совершенные модели кондиционеров могут работать в режиме «теплого насоса» и выполнять функции высокоэффективных обогревательных приборов.

Бытовые кондиционеры (БК) выполняются как в виде отдельно стоящих агрегатов, соединенных между собой и сообщающихся с наружной атмосферой и охлаждаемыми помещениями с помощью гибких шлангов (раздельно-агрегатное исполнение), так и в виде приборов встроенного (оконного) типа, размещаемых в специальных проемах оконных рам или наружных стен помещений (моноблочное исполнение).

Основные требования, предъявляемые к кондиционерам, регламентируются ГОСТ 19455-83Е [61.4]. Технические данные БК приведены на рис. 61.3 и в табл. 61.3. Основные рабочие узлы кондиционера — компрессионный холодильный агрегат, осевой и центробежный вентиляторы с общим электродвигателем,

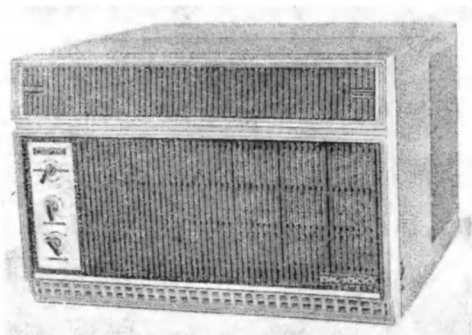


Рис. 61.3. Кондиционер БК-1500

пульт управления с пускозащитным устройством, фильтры для очистки воздуха.

### Увлажнители воздуха

Предназначены для повышения влажности в помещениях (объемом не более 50 м<sup>3</sup>) с очень сухим воздухом, а также для распыления водных растворов ароматических веществ и лекарственных препаратов в лечебных целях.

В корпусе электромеханического увлажнителя расположен насос-распылитель, приводимый в действие электродвигателем. Налитая в резервуар корпуса жидкость распыляется в воздухе в виде аэрозоля. Технические данные увлажнителей воздуха приведены ниже:

	«Бриз»	«Комфорт»	«Ион»
Напряжение, В . . . . .	220	220	220
Мощность, Вт . . . . .	25	30	40
Подача, л/ч . . . . .	0,35	0,35	0,5
Класс защиты . . . . .	II	II	II
Габаритные размеры, мм . . . . .	∅ 225 × × 200	∅ 285 × × 245 × × 225	∅ 312 × × 320 × × 210
Масса, кг . . . . .	1,8	2,5	3,5
Наличие насадки для ингаляции . . . . .	Есть	Нет	Есть

### Вентиляторы

Электровентиляторы (табл. 61.4—61.6 и рис. 61.4) предназначены для создания циркуляции воздуха внутри помещения, притока воздуха в помещение или удаления воздуха

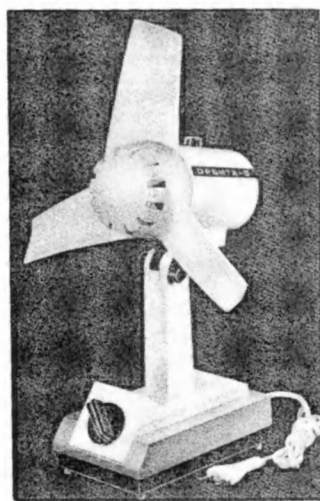


Рис. 61.4. Вентилятор «Орбита-5»

Таблица 61.3. Технические данные бытовых кондиционеров

Параметр	БК-1500, КБ-0,4-0,1-УЗ	БК-1200		
		КБ-1-0,5-0,2-13, КБ1-0,5-0,1-13	КБ-1-0,5-0,2-13, КБ1-0,5-0,3-УЗ	КБ1-0,5-0,4-ТЗ
Хладопроизводительность, ккал/ч (Вт)	1500 (1740)	2000 (2300)	2240 (2600)	2000 (2300)
Теплопроизводительность, ккал/ч (Вт)	—	—	—	—
Воздухопроизводительность, м <sup>3</sup> /ч				
максимальная	400	500	500	500
минимальная	320	350	350	350
Хладагент	Хладон-22	Хладон-22	Хладон-22	Хладон-22
Мощность, Вт	1000	1100	1300	1100
Уровень шума, дБ	58	58	58	58
Площадь помещения для наиболее эффективной работы, м <sup>2</sup>	25	30	30	30
Габаритные размеры, мм.				
высота	400	400	400	400
ширина	600	600	600	600
глубина	585	585	585	585
Масса, кг	51	54	54	54
Дополнительные данные	—	—	—	—

Продолжение табл. 61.3

Параметр	БК-1200		
	БК-2000Т, КБ2-0,5-01-УЗ	БК-2000Р, КБ1-224-РП-01-УЗ	БК-2500, КБ1-0,63-0,1-УЗ
Хладопроизводительность, ккал/ч (Вт)	2000 (2300)	2000 (2300)	2500 (2900)
Теплопроизводительность, ккал/ч (Вт)	1600 (1850)	—	—
Воздухопроизводительность, м <sup>3</sup> /ч			
максимальная	500	500	500
минимальная	350	350	350
Хладагент	Хладон-22	Хладон-22	Хладон-22
Мощность, Вт	1100/1000*	1100	1600
Уровень шума, дБ	58	55	60
Площадь помещения для наиболее эффективной работы, м <sup>2</sup>	30	30	35
Габаритные размеры, мм.			
высота	400	645/411*	460
ширина	600	610/660	660
глубина	602	230/412	615
Масса, кг	55	24/42,5**	63
Дополнительные данные	С тепловым насосом	Раздельного типа	—

\* Данные в числителе относятся к режиму охлаждения, в знаменателе — к режиму нагрева.

\*\* Данные в числителе относятся к воздухообрабатывающему отсеку, в знаменателе — к компрессорному.

Таблица 61.4. Технические данные настольных вентиляторов

Название	Тип	Номинальная мощность, Вт	Максимальная подача, м <sup>3</sup> /мин	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
«Аншерон»	—	55	25	220 × 156 × 443	3,2	Автоматическое поворотное устройство и трехскоростной переключатель
«Орбита-3»	—	45	17	—	2	Автоматическое поворотное устройство
«Орбита-4»	—	45	17	—	1,5	То же
«Орбита-5»	—	45	17	—	2	Автоматическое поворотное устройство и трехскоростной переключатель
«Орбита-8»	ВНС20-УЧ ВН-16	45	20	243 × 172 × 450	2,5	Ручка автоматического поворотного устройства и трехскоростной переключатель расположены на пульте, находящемся в безопасной зоне
«Орбита-10А»		45	16	243 × 172 × 450	3	
«Эфир»	—	22	6	218 × 110 × 221	1	Ручка двухскоростного переключателя вынесена за пределы зоны крыльчатки
Вентилятор	ВЭ-2Н	55	20	220 × 150 × 395	3,6	Автоматическое поворотное устройство
Вентилятор	ВЭ-6	52	25	217 × 290 × 408	3,5	Автоматическое поворотное устройство и двухскоростной переключатель
Вентилятор	ВН-10 —	35	10	210 × 275 × 95 ∅ 262 × 210	1	То же
Вентилятор с круговым обдувом		30	8		2,0	

Таблица 61.5 Технические данные потолочных вентиляторов

Продолжение табл. 61.5

Название	Тип	Номинальная мощность, Вт	Максимальная подача, м <sup>3</sup> /мин	Размах лопастей, мм	Масса, кг	Название	Тип	Номинальная мощность, Вт	Максимальная подача, м <sup>3</sup> /мин	Размах лопастей, мм	Масса, кг
«Союз»	ВПК-18	67	350	1800	8,4	«Союз»	ВПК-12	60	270	1200	8,1
«Сюю»	ВПК-15	74	370	1500	8,0	«Эребуни»	ВПК-9	60	170	900	5,0

Таблица 61.6 Технические данные вентиляторов специального назначения

Название	Тип	Номинальная мощность, Вт	Максимальная подача, м <sup>3</sup> /мин	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
«Э.10и» (вытяжной)	ВК-8	32,5	8	260 × 260 × 135	2	Крепится в вентиляционном канале, имеет ступенчатое регулирование частоты вращения
«Анси-3» (вытяжной)	ВО-10	35	10 (вытяжка): 8 (приток)	234 × 234 × 101	2,5	Крепится на оргстекле, имеет реверс и две ступени частоты вращения
«Авторали»	—	6	1,8	140 × 120 × 230	0,6	Предназначен для работы в салоне автомобиля от сети постоянного тока 12 В. Имеет две частоты вращения. Снабжен присосами для крепления к ветровому стеклу
«Воронжец»	—	3	3	∅ 120 × 140	0,35	То же

из помещения. Согласно ГОСТ 7402-84Е [61.5] вентиляторы изготавливаются следующих исполнений:

по месту установки: Н – настольные, С – настенные, Нс – настольно-настенные, Т – торшерные, О – оконные, К – кухонные (для вентиляционных каналов), А – автомобильные, Р – ручные (сувенирные), У – универсальные;

по принципу действия: осевые, центробежные, тангенциальные (турбинные);

по количеству скоростей: односкоростные, многоскоростные;

по изменению направления потока воздуха: без изменения направления потока воздуха, с неавтоматическим изменением направления потока воздуха в вертикальной плоскости, с неавтоматическим изменением направления потока воздуха в вертикальной и горизонтальной плоскостях, с автоматическим изменением направления потока воздуха в плоскости, положение которой может меняться неавтоматически, с круговым изменением направления потока воздуха, реверсивные – с электрическим реверсом вращения крыльчатки, с механическим поворотом допастей крыльчатки или механическим поворотом вентилятора вокруг собственной оси;

по назначению: для обдува, для обдува и перемешивания воздуха, для вытяжки воздуха, для притока и вытяжки воздуха.

Номинальные напряжения вентиляторов соответствуют: для переменного тока частотой 50 Гц – 220 В; для постоянного тока – 6; 12; 110 В. Ряд номинальных напряжений до 6 В не регламентируется.

Вентиляторы соответствуют приборам класса 0 незащищенного исполнения и предназначаются для работы в климатических условиях по ГОСТ 15150-69: У, ХЛ, О, кате-

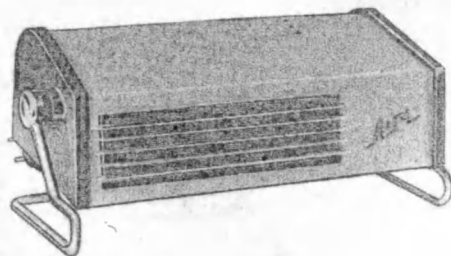


Рис. 61.5. Тепловентилятор «Луч»

гории 4 – все исполнения; У, ХЛ, О, категорий 1 и 2 – автомобильные.

Потолочные вентиляторы (табл. 61.5) согласно ГОСТ 19131-86 [61.6] обозначаются буквами: В – вентилятор; П – потолочный; К – с конденсаторным двигателем. Цифра, дм, соответствует диаметру (размеру) крыльчатки. Потолочные вентиляторы снабжаются регулятором, обеспечивающим ступенчатое или плавное регулирование частоты вращения крыльчатки. Потолочные вентиляторы соответствуют приборам класса 01 незащищенного исполнения и предназначаются для работы в климатических условиях У или Т, категорий 4, 2 по ГОСТ 15159-76.

### Тепловентиляторы

Электрические тепловентиляторы (рис. 61.5, табл. 61.7) предназначены для создания потока подогретого воздуха в тех же помещениях, что и электровентиляторы. Нагреватели воздуха включаются только при работающем

Таблица 61.7. Технические данные электрических тепловентиляторов

Название	Тип	Максимальная мощность, Вт	Подача, м <sup>3</sup> /мин	Температура выходящего воздуха, °С	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
«Луч»	ЛН-1-1,25	1250	2,5	+85	335 × 190 × 150	3	Две ступени регулирования мощности нагревателя
«Луч-3» «Климат-4»	ТВУ-1,25/1,6 ЛП-2,0/220-4,0	1250 2000	1,6 4	+85 +60	370 × 200 × 173 230 × 140 × 280	3,6 4	То же Две ступени регулирования мощности нагревателя и две ступени скорости двигателя (автоматический термовыключатель)
«Араги»	ТВУ-1,25/2,5	1250	2,5		205 × 120 × 253	3,5	Две ступени регулирования мощности и отсек для шнура

электродвигателе. Согласно ГОСТ 17083-81Е [61.7] электротепловентиляторы имеют следующие обозначения: ЛН – настольные; ЛП – напольные; ЛС – настенные.

Тепловентиляторы соответствуют приборам класса 0 незащищенного исполнения.

### Надплитный воздухоочиститель

Надплитный воздухоочиститель представляет собой электровентилятор специального исполнения, снабженный фильтрами для очистки проходящего воздуха от аэрозольных загрязнений, частиц жира, копоти, нейтрализации продуктов сгорания и стерилизации воздуха в кухонных помещениях.

Воздухоочиститель устанавливается над электрической плитой на высоте 700–900 мм от поверхности плиты. Для подсветки плиты в нижнюю часть воздухоочистителя встроены лампы накаливания.

Технические данные надплитного воздухоочистителя БЭВ-2 приведены ниже:

Напряжение, В . . . . .	220
Мощность, Вт . . . . .	160/200
Подача, м <sup>3</sup> /ч . . . . .	150/240
Эффективность очистки от механических примесей (аэрозолей), % . . . . .	80
Эффективность очистки от углекислого газа, % . . . . .	60
Класс защиты . . . . .	1
Габаритные размеры, мм . . . . .	605 × 556 × 170
Масса в зависимости от исполнения, кг . . . . .	10–13

### 61.3. ПРИБОРЫ ДЛЯ УБОРКИ ПОМЕЩЕНИЙ

Приборы для уборки помещений работают по принципу удаления пыли движущимися частями (щетками) вместе с потоком

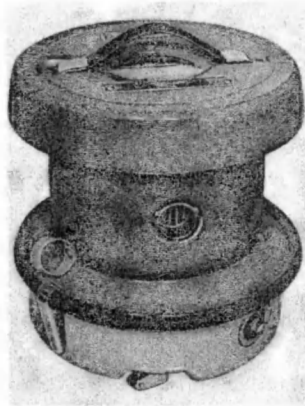


Рис. 61.6. Пылесос «Урал»

воздуха или комбинации движения щетки и воздуха (рис. 61.6, табл. 61.8). Движение щеток создается электродвигателем (или вручную), воздушный поток – воздуховсасывающим агрегатом, состоящим из электродвигателя и многоступенчатого компрессора.

### Пылесосы

Выпускаются пылесосы прямооточного (горизонтального) и вихревого (вертикального) типа на базе унифицированных воздуховсасывающих агрегатов. С помощью различных приспособлений (щеток, сопел и т. п.) ими можно удалить пыль с поверхностей, включая пористые материалы (одежду, подушки, мебель и т. д.), а также применять для различных вспомогательных работ (побелки и окраски, дезинфекции и т. п.).

Пылесосы повышенной комфортности имеют механическое устройство для намотки

Таблица 61.8. Технические данные пылесосов

Название	Напряжение, В	Пылеочистительная способность, %		Статическое разряжение, кПа	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
		на полу	на ковре				

Вихревые пылесосы ПН-600 мощностью 600 Вт

«Урал»	220	85	70	12,74	∅ 360 × 370	8	С индикатором запыленности. При хранении используется как сдвиг
«Уралец»	127, 220	85	70	13,23	∅ 355 × 318	8	С микрофильтром и роликами
«Уралец-4»	220	85	70	13,72	∅ 320 × 350	7,5	С индикатором запыленности
«Буран-5М»	220	85	70	12,74	∅ 330 × 300	7	То же
«Аудра»	127, 220	85	70	12,74	∅ 345 × 350	8	С приспособлением для прессования пыли

Продолжение табл. 61.8

Название	Напряжение, В	Пылеочистительная способность, %		Статическое разряжение, кПа	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
		на полу	на ковре				
«Витязь»	220	85	70	12,74	300 × 317 × 312	8	С индикатором запыленности
«Электросила»	220	85	70	12,72	∅ 360 × 400	9,4	С индикатором запыленности. При хранении используется как сиденье
«Электросила-2»	220	96	77,7	13,46	450 × 236 × 370	6,45	С устройством для механической намотки шнура и индикатором запыленности. Шланг и насадки хранятся в верхней части корпуса. При хранении используется как сиденье
«Буран-7»	220	85	70	12,72	252 × 282 × 535	8	С индикатором запыленности
«Циклон-стандарт»	220	96	88	—	520 × 320 × 250	7,2	Корпус приспособлен для хранения принадлежностей
«Циклон-М»	220	96	88	—	316 × 300 × 333	5,8	С механизмом смотки шнура

*Прямоточные пылесосы ПН-400 мощностью 400 Вт*

«Ракета-9»	220	—	—	11,00	—	—	Снабжен приспособлением для прессования пыли, индикатором запыленности, регулятором расхода воздуха, механизмом смотки шнура
«Ракета-12»	220	—	—	11,0	—	—	То же без механизма смотки шнура

*Ручные пылесосы ПР-140 мощностью 140 Вт*

«Шмель»	220	—	—	0,8	370 × 130 × 170	1,8	С постоянной насадкой на корпусе
---------	-----	---	---	-----	-----------------	-----	----------------------------------

Таблица 61.9. Технические данные электрополотеров

Исполнение	Производительность, м <sup>2</sup> /ч	Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг	Высота корпуса от пола, мм
ЭП-1	28	220	6	180
ЭП-2	70	350	9	180
ЭП-3	80	450	9	180
ЭПО-2	70	450	9	240
ЭПО-3	80	550	12	240

шнура, индикатор запыленности пылесборника, приспособление для прессования пыли. На корпусах некоторых пылесосов имеются держатели для хранения шлангов и насадок.

В соответствии с ГОСТ 10280-83Е [61.8] пылесосы изготавливаются следующих типов: НП — напольные, ПР — ручные.

**Полотеры**

В соответствии с ГОСТ 7834-75 [61.9] бытовые электрополотеры (табл. 61.9) изготавливаются следующих типов: ЭП — без отсоса пыли, ЭПО — с отсосом пыли.

Электрополотеры имеют следующие исполнения: ЭП-1 — однощеточный, ЭП-2, ЭПО-2 — двухщеточные, ЭП-3, ЭПО-3 — трехщеточные.

Электрополотеры изготавливаются незащищенного исполнения, класса I или II (класса I изготавливаются по закону потребителя), для климатических условий У и ХЛ, категории 4.



#### 61.4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БЕЛЬЯ

Электромеханические приборы для обработки белья предназначаются для стирки, отжима, сушки и глажения белья в домашних условиях со сниженными затратами труда и времени.

В соответствии с ГОСТ 8051-83Е [61.10] стиральные машины (рис. 61.7, табл. 61.10 и 61.11) осуществляют стирку механическим перемешиванием белья в стиральном растворе. Стиральные машины изготавливаются следующих типов: СМА – автоматическая стиральная машина; СМП – полуавтоматическая стиральная машина; СМР – стиральная машина с ручными отжимными валками; СМ – стиральная машина без отжимного устройства.

Машины изготавливаются на напряжения 220 и 127 В каплезащищенного исполнения для климатических условий У, ХЛ, категории 4, ГОСТ 15150-69.

Водный модуль для стиральных машин составляет: 10 л/кг – для барабанных машин; 22 л/кг – для машин с лопастным диском; 28 л/кг – для машины типа СМ.

Показатель отстирываемости составляет не менее: 62% – для машин с лопастным диском; 52% – для барабанных машин с электроподогревом жидкости; 45% – для барабанных машин без электроподогрева жидкости.

Потеря прочности белья после проведения 20 циклов стирки составляет не более: 20% – для машин с односторонним вращением лопастного диска; 15% – для барабанных машин и машин с реверсивным вращением диска.

Остаточная влажность белья после отжима в стиральных машинах составляет: 115% – для машин с отжимом в барабане; 98% – для машин с отжимом ручными отжимными

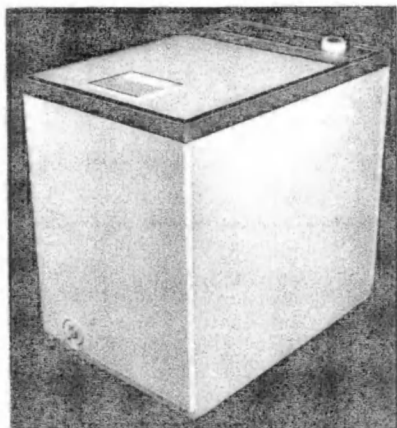


Рис. 61.7. Автоматическая стиральная машина СМА-3 «Эврика»

Таблица 61.10. Основные технические данные стиральных машин

Тип машины	Номинальная загрузка сухим бельем, кг	Потребляемая мощность, кВт		Масса, кг, не более
		электропривода	электронагревательного устройства	
СМП	1,5; 2,0	0,6	2,5	55
	3,0	0,65	2,5	65
	4,0	0,7	2,6	75
СМР	1,5, 2,0	370	2,5	40
СМ	0,75, 1,0	250	1,5	10
	1,5	370	1,5	36

Таблица 61.11. Габаритные размеры стиральных машин в нерабочем положении

Типоразмеры машин	Длина, мм	Глубина, мм	Высота, мм	
Машины с лопастным диском: СМП-2; СМП-1,5 СМР-2; СМР-1,5 СМ-1; СМ-0,75 СМ-1,5	750	480	850	
	480	500	850	
	580	550	500	
	480	550	700	
	Барабанные машины: СМП-4; СМП-3; СМП-2	670	600	850
		750	480	850
Барабанные машины с центрифужной				

валками; 55% – для машин с отжимом в центрифуге; 40% – для машин, имеющих устройство для подсушки белья.

**Автоматические стиральные машины.** В автоматических стиральных машинах (рис. 61.8, табл. 61.12) всеми процессами управляет программное запоминающее устройство, подающее команды на элементы автоматики в определенной временной последовательности, определяющей программу стирки белья. Программные устройства имеют от 3 до 14 программ, выбираемых в зависимости от вида белья (белое, цветное), вида ткани (хлопок, шерсть, синтетика) и степени его загрязненности. Класс защиты I.

**Полуавтоматические стиральные машины.** В полуавтоматических стиральных машинах (табл. 61.13) процессы стирки и отжима белья механизированы. Машины снабжены таймера-

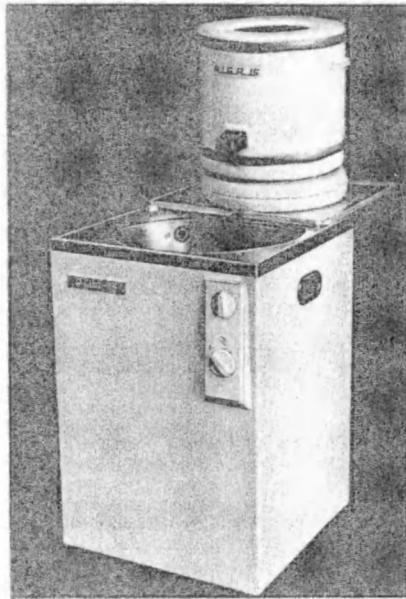


Рис. 61.8. Стиральная машина СМ-15 «Рига-15»

ми (реле времени), автоматически ограничивающими время стирки и отжима, и насосами для удаления жидкости из баков. Переключение режимов работы (стирки, отжима, заливки и слива раствора) и перемещение белья из стирального бака в центрифугу (в двухбаковых машинах) осуществляются вручную. Класс защиты II.

Таблица 61.12. Технические данные автоматических стиральных машин

Параметр	СМА-4 «Вятка»	СМА-3 «Эврика»
Конструктивная схема	Барабанная, консольная, с боковой загрузкой	Барабанная, двухпорная, с верхней загрузкой
Напряжение, В	220	220
Мощность, Вт	2200	2000
Мощность нагревателя, Вт	1900	1800
Частота вращения барабана, об/мин. при стирке	54	56
при отжиме	480	380
Номинальная загрузка сухого белья, кг	4	3
Число основных программ	12	9
Расход воды, л. для замачивания	26	15–20
для стирки	21	15–20
для полоскания	130	100
Габаритные размеры, мм	850 × 545 × 590	600 × 610 × 410
Масса, кг	90	80

*Стиральные машины с ручным отжимом.* В стиральных машинах с ручным отжимом (рис. 61.8, табл. 61.14) механизирован процесс стирки белья. Большинство машин с ручным отжимом снабжено насосом для слива раствора из бака и таймером для ограничения времени стирки.

Отжим белья производится отдельной малогабаритной центрифугой или валковым устройством. Машины малой емкости (табл.

Таблица 61.13. Технические данные полуавтоматических стиральных машин

Название	Тип	Напряжение, В	Мощность, Вт	Емкость (сухого белья), кг	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Конструктивная схема
«Эврика-3»	СМП-3	220	600	3	615 × 415 × 615	80	Барабанная, двухпорная, с верхней загрузкой
«Эврика»	СМП-2	220	800	2,5	670 × 480 × 580	80	То же
«Золушка»	СМП-2	220	500	2	675 × 400 × 710	50	Двухбаковая, с центрифугой, с боковым лопастным диском
«Золушка-3»	СМП-2	220	500	2	680 × 410 × 700	45	Имеет два режима стирки
«Сибирь-5Мк»	СМП-2	220	500	2	670 × 380 × 700	40	Двухбаковая, с центрифугой, с боковым лопастным диском
«Сибирь-6ЭТ»	СМП-2	220	600	2	680 × 390 × 700	40	Имеет два режима стирки
ЭВИ	СМП-1,5	220	600	1,5	670 × 432 × 810	52	Двухбаковая, с центрифугой, с донным лопастным диском
«Элита»	СМП-2	220	100 (стирка) 900 (сушка)	2	553 × 450 × 515	12	Однобаковая со временем стирки 10–30 мин, временем сушки 20–120 мин

Таблица 61.14 Технические данные стиральных машин на 220 В с ручным отжимом и центрифуги к ним

Название	Тип	Мощность, Вт	Емкость (сухого белья), кг	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Техническое описание
«Рига-8»	СМР-1,5	350	1,5	∅ 425 × 600	25	Цилиндрическая, с донным лопастным диском и отжимным валковым устройством
«Рига-12»	СМР-1,5	350/1250	1,5	∅ 425 × 600	27	Цилиндрическая, с донным лопастным диском, электроводонагревателем и отжимным валковым устройством
«Рига-13»	СМР-1,5	350	1,5	∅ 425 × 600	26	Цилиндрическая, с донным лопастным диском, работающим в «основном» и «мягком» режимах, с отжимным валковым устройством
«Рига-15»	СМ-1,5	350	1,5	445 × 445 × 720	36	Цилиндрическая, в прямоугольном корпусе, с донным диском, работающим в «основном» и «мягком» режимах, с отжимом белья в отдельной малогабаритной центрифуге, устанавливаемой над баком
«Белоснежка-2»	СМР-2	300	2	435 × 490 × 800	35	Прямоугольная, с боковым лопастным диском
«Цента» (центрифуга)	Ц-1,5	160	1,5	∅ 340 × 375	11,5	Имеет жесткую подвеску двигателя и надувной амортизатор

Таблица 61.15. Технические данные малогабаритных стиральных машин СМ

Название	Тип	Номинальное напряжение, В		Емкость су-хого белья, кг
		220	330	
«Малютка»	СМ-1	220	200	1
«Фея»	СМ-1,5	220	330	1,5
«Ивушка»	СМ-1,5	220	330	1,5

61.15) отжимных устройств не имеют. На время хранения малогабаритная центрифуга может укладываться в стиральный бак. Класс защиты II.

## 61.5. ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ

Электромеханические приборы для приготовления пищи предназначаются для механической обработки пищевых продуктов (резка, рубка, взбивание, перемалывание и т. д.). Они соответствуют ГОСТ 2503-81 [61.11].

## Универсальные кухонные машины

Универсальная кухонная машина (УКМ) имеет регулируемый электропривод, к которому непосредственно или через редуктор присоединяются различные насадки и приспособления, позволяющие механизировать процессы обработки пищевых продуктов. УКМ изготавливаются каплезащищенного исполнения, класса защиты II, для климатических условий У и ХЛ, категории 4.

УКМ имеет коллекторный двигатель переменного тока с тремя ступенями скорости. Максимальная потребляемая мощность 360 Вт.

Технические данные УКМ «Мрия» приведены ниже:

Скорость . . . . .	I	II	III
Мощность на валу электродвигателя, Вт . . . .	120	150	180
Частота вращения, об/мин	5000	8000	12000

Двигатель соединяется непосредственно или через редуктор с одной из следующих насадок: миксером, соковыжималкой, кофемолкой, мясорубкой, овощерезкой, тестомесилкой.

Универсальная кухонная машина «Центр» предназначена для механизации ручного труда при первичной обработке пищевых продуктов.

Машина вмонтирована в шкаф-стол, в котором в выдвижных кассетах хранятся насадки: соковыжималка центробежная; соковыжималка для citrusовых; миксер; тестомесилка; мясорубка шнековая; кофемолка жерновая; овощерезка; приспособление для перетирания пищевых продуктов.

Электродвигатель мощностью 350 Вт имеет три частоты вращения.

#### Электромясорубки

Электромясорубки выпускаются двух видов: шнековые, горизонтальные, тихоходные, с набором решеток и вихревые вертикальные быстроходные (табл. 61.16). Требования к шнековым электромясорубкам регламентируются ГОСТ 20469-81Е [61.12]. Электромясорубки шнекового типа комплектуются ножом и решеткой типа I по ГОСТ 4025-83Е.

Электромясорубки изготавливаются класса II, каплезащищенного исполнения и предназначены для работы в климатических условиях У и ХЛ, категории 4.

#### Электровзбивалки

Электровзбивалки (электромиксеры) предназначены для приготовления взбитых пищевых смесей и перемешивания жидких пищевых продуктов.

В зависимости от исполнения электровзбивалки обозначаются: ЭВ – ручные, ЭВН – настольные.

Электровзбивалки (рис. 61.9, табл. 61.17) соответствуют требованиям ГОСТ 18710-80Е [61.13], выполняются класса II электробезопасности, незащищенного исполнения, для климатических условий У и ХЛ, категории 4.

#### Электрокофемолки

Электрокофемолки (рис. 61.10, табл. 61.18) соответствуют требованиям ГОСТ 19423-81Е [61.14]. Они работают на принципе измельчения зерен ударным способом с помощью быстровращающейся пластинки. Разрушение зерен происходит как под действием пластин-

Таблица 61.16 Технические данные электромясорубок напряжением 220 В

Тип	Вид	Мощность, Вт	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
ЭМ-1	Вихревая	900	6,5	150 × 150 × 250
ЭМ-Л2	Шнековая	100	5	270 × 225 × 135 315 × 206 × 180 (с овощерезкой)

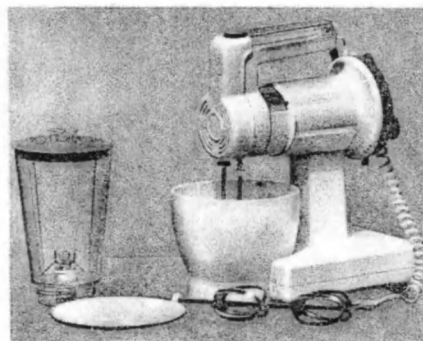


Рис. 61.9. Электровзбивалка «АРМАВИР»

ки, так и за счет соударения частиц, находящихся во взвешенном состоянии в рабочем объеме кофемолки. Кофемолки изготавливаются незащищенного исполнения класса II электробезопасности для климатических условий У и ХЛ, категории 4.

#### Электроножи

Электроножи предназначены для резки пищевых продуктов, (хлеба, колбасы, замороженного мяса и т. п.) и работают на принципе взаимодействия двух плоских ножей, один из которых неподвижен, а другой совершает возвратно-поступательные движения с помощью электродвигателя.

Электроножи выпускаются незащищенного исполнения класса II для климатических условий У и ХЛ, категории 4.

Технические данные электроножа «Страуме»: напряжение 220 В, мощность 90 Вт, масса 0,6 кг, габаритные размеры со снятыми ножами 250 × 100 × 70 мм, в рабочем положении 440 × 100 × 70 мм.

Таблица 61.17. Технические данные электровзбивалок 220 В

Название	Тип	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
«Армавир»	ЭВН	150	12 000	1,4	125 × 220 × 297 (со сбивалкой) 125 × 132 × 160 (с соковыжималкой)
«Метер-2»	ЭВ	130	12 000, 8 000, 5 000, 570, 380, 240	1,5	130 × 195 × 86



Рис. 61.10. Электрокофемолка ЭЛМАС

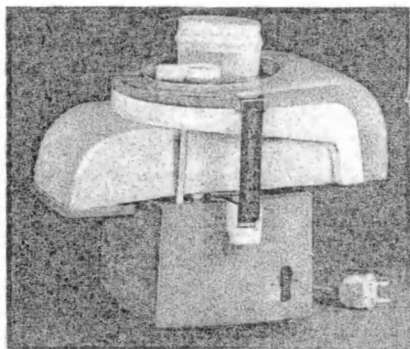


Рис. 61.11. Соковыжималка СВЧ-2УЧ «Журавинка»

### Электросоковыжималки

Электросоковыжималки по принципу работы разделяются на шнековые и центробежные. Шнековые, как правило, выпускаются в качестве приставок к электромясорубкам и УКМ. Центробежные соковыжималки изготавливаются как в виде приставок к УКМ, так и в виде прибора с собственным электроприводом. Они представляют собой цилиндрическую центрифугу, на дне барабана которой расположен диск-размельчитель. Сок из размельченных фруктовых овощей отжимается центрифугой, а затем сливается в специальную емкость.

В соответствии с ГОСТ 18199-83Е [61.15] электросоковыжималки изготавливаются следующих типов: СВА – с автоматическим удалением выжимок; СВП (рис. 61.11, табл. 61.19) – с полуавтоматическим удалением выжимок (удаляются периодически с помощью

Таблица 61.18. Технические данные электрокофемолок напряжением 220 В

Название	Мощность, Вт	Масса разовой загрузки, кг	Время размола одной загрузки, мин	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
«Страуме»	90	0,03	0,5	0,8	∅ 80 × 176
«ЭЛМАЗ»	120	0,05	0,5	0,76	90 × 80 × 168
«Рось»	150	0,05	0,5	1,0	110 × 85 × 175

Таблица 61.19. Технические данные электросоковыжималок типа СВП-294 напряжением 220 В, мощностью 250 Вт

Название	Производительность, кг/мин	Эффективность отжима, %	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
Электросоковыжималка-шинковка	0,45	60	5,5	310 × 215 × 308
Электросоковыжималка «Журавинка»	0,45	60	5,5	345 × 300 × 220
Электросоковыжималка СВСП	0,33	50	5,0	300 × 232 × 342

приспособления по мере заполнения сборника).

Электросоковыжималки изготавливаются каплезащищенного исполнения, класса II электробезопасности, для климатических исполнений У и ХЛ, категории 4.

### 61.6. ПРИБОРЫ КОСМЕТИКИ И ГИГИЕНЫ

В эту группу входит большое количество электромеханических приборов, предназначенных для различных косметических операций и медицинских процедур, проводимых в домашних условиях.

#### Автомассажеры

В автомассажер (рис. 61.12) встроен электромеханический генератор колебаний, передаваемый на рабочие органы, прикладываемые к телу с целью получения косметического или медицинского эффекта. Автомассажеры относятся к классу II.

Автомассажеры «Тонус» и «Спорт» осуществляют массаж за счет вибрации эластичного

Таблица 61.20. Технические данные электробритв

Название	Потребляемая мощность, Вт	Напряжение		Время непрерывной работы, мин	Толщина неподвижного ножа, мм	Масса, кг	Двигатель	Ножи (неподвижный – подвижной)
		переменное	постоянное					
ЭРА-100	10	127/220	—	10	0,06	0,3	Вибрационный	Сетка-гребенка
ЭРА-10	10	127/220	—	10	0,06	0,3	»	Сетка-гребенка
МИКМА	9	127/220	—	10	0,06	0,3	—	То же
«Чайка-2»	12	127/220	—	10	0,06 – 0,11	0,35	Обращенный	» »
«Нева-303»	16	127/220	—	12	0,06	0,31	»	Сетка-гребенка с двумя дорожками
«Нева-302»	18	127/220	—	12	0,1	0,3	Вибрационный	Сетка-гребенка с четырьмя дорожками
«Киев»	10	127/220	—	10	0,1	0,28	»	Сетка-гребенка с двумя дорожками
«Агидель»	12	127/220	110/220	12	0,05 – 0,08	0,25	Коллекторный	Две головки с плавающими ножами
«Уфа»	12	127/220	110/220	12	0,05 – 0,08	0,3	»	Две головки с плавающими ножами
«Бердск-2М»	14	127/220	110/220	10	0,05 – 0,08	0,25	»	То же
«Бердск-6»	12	127/220	110/220	10	0,05 – 0,08	0,3	Коллекторный	Три головки с плавающими ножами
«Бердск-9»	12	127/220	110/220	10	0,05 – 0,08	0,3	»	То же
«Харьков-102»	13	127/220	110/220	12	0,06	0,25	»	Сетка – вращающийся цилиндр с лезвиями, расположенными по винтовой линии
«Харьков» Олимпиада-80	13	127/220	110/220	12	0,06 – 0,11	0,3	»	Две головки с плавающими ножами
«Харьков-33»	12	127/220	110/220	10	0,06 – 0,11	0,3	»	То же
«Харьков-30»	12	127/220	110/220	10	0,06 – 0,11	0,3	»	» »
«Харьков-61»	13	127/220	110/220	12	0,06 – 0,11	0,25	»	» »
«Харьков-22М»	12	127/220	110/220	10	0,06 – 0,11	0,23	»	» »
«Харьков-5У»	13	127/220	110/220	12	0,06 – 0,11	0,23	»	—
«Харьков-15», авто	10	—	12	12	0,06 – 0,11	0,23	Коллекторный, имеет устройство для подключения к автомобильной сети	Две головки с плавающими ножами
«Таир»	12	127/220	3 – 5	12 – 15	0,06 – 0,11	0,26	Коллекторный, имеет преобразователь напряжения 127/220 В в постоянное 3 – 5 В	Две головки с плавающими ножами

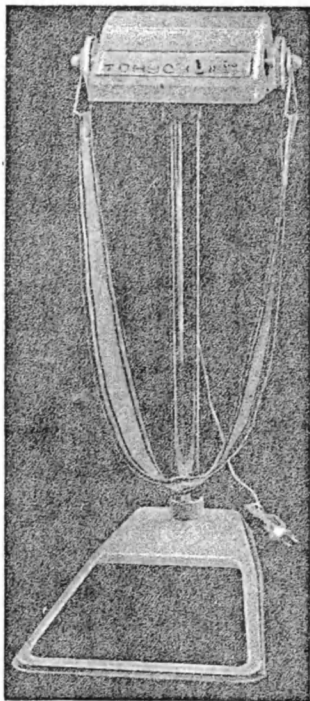


Рис. 61.12. Автомассажер «Тонус»

пояса. Технические данные автомассажеров приведены ниже:

	«Тонус»	«Спорт»
Напряжение, В . . . . .	220	220
Мощность, Вт . . . . .	60	180
Число колебаний в минуту . . . . .	2500 – 3500	2700 – 2900
Длина и ширина массажного пояса, мм . . . . .	1500 × 95	1500 × 95
Габаритные размеры, мм . . . . .	770 × 390 × 950	760 × 472 × 1150
Масса, кг . . . . .	14	25

Массажный прибор ЭЛМАЗ предназначен для массажа ног, рук, спины, поясницы и живота с помощью вибраторов, расположенных на корпусе прибора. Технические данные прибора приведены ниже:

Напряжение, В . . . . .	220
Мощность, Вт . . . . .	17
Частота колебаний, Гц . . . . .	50 и 100
Время непрерывной работы, мин . . . . .	40
Число режимов работы . . . . .	2
Габаритные размеры, мм . . . . .	360 × 140 × 100
Масса не более, кг . . . . .	2

### Маникюрные машины

Маникюрная машина представляет собой универсальный электропривод с набором насадок — инструментов для механической обра-

ботки ногтей. Технические данные ее приведены ниже:

Мощность, Вт . . . . .	50
Напряжение, В . . . . .	220
Габаритные размеры, мм . . . . .	∅ 220 × 115
Масса, кг . . . . .	1,7

### Электробритвы

Электробритвы (табл. 61.20) работают по принципу ножниц. В режущих головках подвижные ножи совершают вращательное или возвратно-поступательное движение относительно неподвижных ножей. Подвижные ножи выполняются в виде гребенки с рядом лезвий, цилиндра с ножами, расположенными по спирали, или в виде плоской звездочки с лезвиями на концах лучей. Неподвижные ножи выполняются в виде решетки с линейным или радиальным расположением продолговатых отверстий или в виде тонкой пластины (сетки) с большим количеством круглых, продолговатых или многоугольных отверстий. Подвижные ножи перемещаются с помощью вибрационного или коллекторного электродвигателя. Некоторые бритвы имеют дополнительную систему ножей для стрижки волос на висках и шее. Большинство бритв имеет переключатели для работы от сети с разным напряжением. Требования к электробритвам регламентируются ГОСТ 9357-81Е [61.16]. Электробритвы предназначаются для индивидуального пользования в климатических условиях У и ХЛ, категории 4. Сетевые электробритвы выполняются по классу II защиты, батарейные — по классу III.

### 61.7. БЫТОВЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Согласно ГОСТ 15047-78 применяемые в быту нагревательные электроприборы разделяются на четыре группы:

1. *Электроприборы для приготовления пищи*, к которым относятся электроплиты — нагревательные электроприборы с электроконфорками и жарочным электрошкафом напольной конструкции; электроплитки — нагревательные электроприборы с одной или несколькими электроконфорками переносного типа; жарочные электрошкафы для приготовления пищевых продуктов внутри их рабочего объема со встроенным вентилятором и без него; электрогрили для приготовления пищевых продуктов внутри их рабочего объема с применением инфракрасного излучения; электротостеры — нагревательные приборы для под-

жаривания ломтиков хлеба; электроростеры — нагревательные приборы для поджаривания бутербродов; электромармиты — приборы для поддержания постоянной температуры разогретой пищи; электрофритюрницы — приборы для приготовления пищевых продуктов в горячем масле; электрокастрюли (скороварки для приготовления пищевых продуктов при повышенном давлении; пароварки — для приготовлений на пару); электросковороды; электровафельницы; электрошашлычницы; электрожаровни; электройцварки.

2. *Электроприборы для отопления*, к которым относятся электрорадиаторы — отопительные электроприборы с теплоотдачей излучением и конвекцией от поверхности корпуса; электроконвекторы — отопительные электроприборы преимущественно с естественной конвекцией непосредственно от нагревательного элемента; электротеплоiventилляторы — приборы с вынужденной конвекцией от нагревательного элемента (см. § 61.2); аккумуляторные отопительные электроприборы — приборы, обеспечивающие аккумуляцию тепла в течение длительного времени с последующей теплоотдачей в окружающее пространство; электрокамины — приборы с преимущественной теплоотдачей направленным инфракрасным излучением.

3. *Электроприборы для нагрева воды*, к которым относятся и электроводонагреватели — приборы стационарного типа для нагрева воды до температуры 85 °С; проточные электроводонагреватели — приборы для быстрого нагрева струи водопроводной воды; емкостные аккумуляторные электроводонагреватели — приборы с теплоизолированным баком, предназначенные для нагрева и сохранения горячей воды длительное время; емкостные быстродействующие электроводонагреватели — приборы с баком без теплоизоляции, предназначенные для быстрого нагрева воды; погружные электрокипяильники — приборы, работающие погруженными в подогреваемую воду; электроподогреватели для аквариумов — приборы для поддержания заданной температуры воды в аквариуме; электроподогреватели детского питания; электрочайники; электросамовары; электрокофеварки (перколяционные для приготовления кофе в направленном потоке воды или пара; компрессионные, в которых кофе готовится при давлении выше атмосферного).

4. *Бытовые санитарно-гигиенические электроприборы, электроинструменты и электроприборы для бытовых целей*, включающие в себя электроодежда; электробинты; электрогрелки; электроподушки; электроковрики; электрорефлекторы медицинские — приборы с

направленным тепловым потоком для лечебных целей; электросушители для рук; электросушилки для белья; фены — приборы, создающие направленный поток теплого воздуха для сушки волос; электрофототеплоулавливатели; электрошипцы и электробигуди; электроприборы для сваривания полиэтиленовой пленки; электровыжигатели по дереву; электропаяльники; электроутюги (с парообразователями, обеспечивающими автоматическое увлажнение в процессе глажения с помощью пара; с автоматическим увлажнением при глажении).

Данные по расходу электроэнергии на 1 человека в год, кВт·ч, при различной степени электрификации быта приведены ниже [61.17]:

Электрическое освещение . . . . .	120 — 140
Электрическое освещение, мелкие нагревательные приборы и машины, приборы культурно-бытового назначения . . . . .	300 — 350
Электрическое освещение, мелкие нагревательные приборы и машины, приборы культурно-бытового назначения и электроплита . . . . .	600 — 700
Электрическое освещение, мелкие нагревательные приборы и машины, приборы культурно-бытового назначения, электроплита и электрический водонагреватель для полного снабжения горячей водой . . . . .	1400 — 1600
Полная внутриквартирная электрификация быта . . . . .	3000 — 3500

#### Электроприборы для приготовления пищи

*Электроплита напольная* является универсальным прибором для приготовления пищи в домашних условиях. Усредненные данные по расходу электроэнергии при приготовлении пищи с использованием электроплиты [61.17] приведены ниже:

Число членов семьи	2	3	4	5	6
Расход электроэнергии в сутки, кВт·ч/чел	1,38	1,14	0,95	0,85	0,78

Электроплита состоит из корпуса, электроконфорок и жарочного шкафа. Корпус электроплиты изготавливается из стали и покрывается силикатной эмалью, габаритные размеры электроплит (высота × ширина × глубина) равны (850 ± 50) × (400 — 600) × 600 мм. Электроплиты изготавливаются с двумя, тремя или четырьмя конфорками и жарочным шкафом общей мощностью 5 — 12 кВт. В СССР в основном выпускаются плиты с конфорками, снабженными электронагревателями сопротивлением. На рис. 61.13 приведена конструкция бытовой напольной четырехконфорочной электроплиты. Левая передняя конфорка предназначена для быстрого приготовления пищи и имеет повышенную мощность (до 2 кВт).





Рис. 61.13. Напольная бытовая электроплита

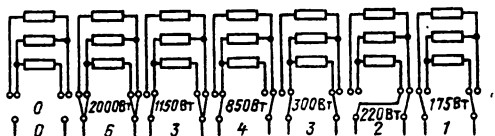


Рис. 61.14. Схема семиступенчатого переключателя нагревателей электроконфорки

Для предохранения от перегрева эта конфорка снабжается термоограничителем биметаллического типа. Электроплита имеет сигнализатор включения конфорки и шкафа. Температура нагрева конфорки изменяется с помощью многоступенчатого переключателя, позволяющего изменять мощность, потребляемую конфоркой. На рис. 61.14 приведена схема семиступенчатого переключателя нагревателей конфорки.

Жарочный шкаф электроплит изготавливается в виде металлического короба размерами (высота  $\times$  ширина  $\times$  глубина)  $(220 \div 230) \times (300 \div 460) \times (280 \div 460)$  мм, обогреваемого сверху и снизу нагревателями мощностью 1–2 кВт. Включение нагревателей осуществляется через трехступенчатый переключатель, позволяющий включать либо один из нагревателей, либо оба одновременно. Температура внутри шкафа поддерживается автоматически с помощью dilatометрического терморегулятора в пределах 50–300 °С. Для уменьшения тепловых потерь жарочного шкафа снаружи его короб покрывается теплоизоляцией из

стекловолокна, обернутого алюминиевой фольгой [61.18]. Передняя дверца жарочного шкафа застеклена ударпрочным стеклом, в шкафу предусмотрена лампа внутренней подсветки. Нагреватели жарочного шкафа выполняются либо из трубчатых электронагревателей (ТЭНов), либо в виде плоских стальных коробок, в которых в изоляционной набивке (кварцевом песке, периклазе) запрессованы нихромовые спирали. В ряде конструкций для интенсификации нагрева в жарочный шкаф встраивается вентилятор, обеспечивающий принудительную теплопередачу от нагревателей шкафа к обрабатываемому изделию.

Для предотвращения загрязнения воздуха кухни при подгорании пищевых продуктов современные конструкции жарочных шкафов оборудуются системой пиролизической или каталитической очистки, обеспечивающих разрушение загрязняющих воздух выделений.

Схема включения электроплит предусматривает возможность подключения к однофазной сети напряжением 380/220; 380; 220 В или трехфазной 220 В. В электроплитах используются три типа конфорок – чугунные со спиральными нагревателями из нихрома, запрессованными в изоляционную массу (периклаз, кварцевый песок), трубчатые из профилированных ТЭНов и пирокерамические с инфракрасным нагревателем и стеклокерамическим покрытием. В табл. 61.21 приведены основные данные конфорок, используемых в

Таблица 61.21. Типы и основные параметры конфорок [61.19]

Тип конфорки	Диаметр конфорки, мм	Номинальная мощность, Вт	Время разогрева, мин, не более	КПД, %, не менее
Чугунные	145	1000	10	65
		1500*	5	70
	180	1200	15	65
		1500	10	65
		2000	5	70
Трубчатые из ТЭНов	220	2000	15	65
		145	1000	
	180	1200		
		1800	4	70
		2000*		
Пирокерамические	145	800		
		1000		
	180	1200		
		1200	5	70
		1500		
220	2000			

\* Автоматические экспресс-конфорки ускоренного нагрева за счет дополнительно установленной мощности (с самостоятельным переходом из режима разогрева в заданный тепловой режим)

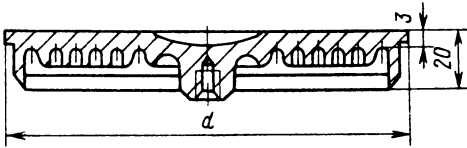


Рис. 61.15. Основные размеры чугунных электроконфорок

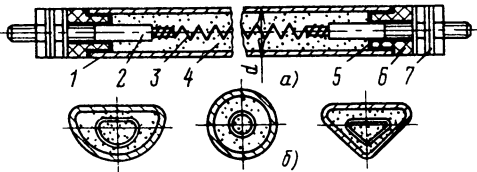


Рис. 61.16. Трубчатый электронагреватель (ТЭН):

*а* – продольный разрез; *б* – поперечные сечения; 1 – оболочка нагревателя, 2 – токоподвод, 3 – спираль из нихрома; 4 – наполнитель (периклаз); 5 – герметик; 6 – изолятор; 7 – контактное устройство

конструкциях электроплит и электроплиток. Основные размеры чугунных конфорок приведены на рис. 61.15 [61–19].

Трубчатые конфорки изготавливаются из профилированных ТЭНов треугольного или D-образного сечения (рис. 61.16). Под ТЭНом устанавливается металлический экран-отражатель, препятствующий распространению тепла от ТЭНа вниз. Нагреваемая посуда ставится непосредственно на ТЭН и нагревается от него за счет теплопроводности и излучения. Пиро-керамические конфорки имеют плоскую рабочую поверхность, покрытую стеклокерамикой толщиной 5,5 мм, на которой рисунком обозначена зона нагрева, под которой располагаются инфракрасные нагреватели мощностью 1,5–2 кВт. Внизу под нагревателями располагается слой теплоизоляционной стекловаты. В табл. 61.22 приведены основные данные наиболее распространенных электроплит.

Согласно ГОСТ 14919-83Е [61.20] бытовые электроплитки изготавливаются на напряжение 220 В на номинальные мощности 800; 1000; 1200 и 1500 Вт – одноконфорочные и 1600; 1800; 2000 и 2200 Вт – двухконфорочные. На рис. 61.17 приведен общий вид электроплитки типа ЭПТ1-1/220 мощностью 1000 Вт с ступенчатым регулированием температуры и трубчатым нагревателем D-образного сечения. В табл. 61.23 приведены характеристики электроплиток.

Электрогрили, жарочные шкафы с инфракрасным (ИК) нагревом, выполняются закрытого и открытого исполнения мощностью 1–1,5 кВт; ИК излучателем являются либо

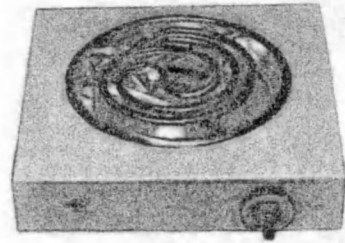


Рис. 61.17. Электроплитка с конфоркой из ТЭНа



Рис. 61.18. Электросковорода

ТЭН, либо трубчатые кварцевые лампы с вольфрамовой спиралью. Размеры рабочего пространства согласно ГОСТ 21621-83 по ширине 300–425 мм, по глубине и высоте 200–250 мм для закрытого исполнения, по ширине 500–375 мм и по глубине 260–225 мм для открытого исполнения гриля. В рабочем пространстве находятся приспособления для крепления приготавливаемых продуктов (вертела, шампуры, сетки), частота вращения привода составляет 3–4 об/мин [61–18, 61.21].

Электротостеры выполняются с ручным, полуавтоматическим и автоматическим управлением. При ручном управлении закладка и извлечение ломтиков поджариваемого хлеба выполняются вручную, время обжаривания устанавливается произвольно. При полуавтоматическом управлении время обжаривания контролируется либо термоограничителем, либо реле времени. В автоматическом тостере автоматически контролируется время обжаривания, извлечение обжаренных ломтиков хлеба осуществляется толкателями. Мощность тостера 0,7–1,2 кВт, время обжаривания не превышает 2–3 мин [61.18].

Электрокастрюли согласно ГОСТ 21620-76 [61.22] должны соответствовать параметрам, приведенным в табл. 61.24. Электрокастрюли изготавливаются на напряжение 220 В, оборудуются терморегулятором, позволяющим регулировать температуру воды в диапазоне 65–5 °С при минимальной уставке и 95+5 °С при максимальной уставке терморегулятора; КПД электрокастрюль [61.22] не менее 75%. Время нагрева до 95 °С – 20 мин. Применение

Таблица 61.22. Технические характеристики кухонных электроплит

Плита	Общая мощность, кВт	Конфорки					Мощность жарочного шкафа, Вт	Масса плиты, кг	Габаритные размеры (ширина × высота × глубина), мм	Примечание
		Число	Диаметр, мм	Мощность, Вт	Регулирование мощности	Время разогрева, мин				
«Мечта-9» (ЭСТШ5.2 3,4/2-220)	3,4	2	145	1000	Ступенчатое	3	1400	40	500 × 850 × 430	Средний ресурс работы 15 000 ч; гарантийный срок 2,5 года
«Эльмета» (ЭПЧШ4 2.2.2/220)	4,0	2	145 180	1000 1200	Ступенчатое (7 ступеней)	4	1800	41,5	650 × 850 × 400	То же
«Нева-320» (ЭБТ-6 3 3,8/220)	3,8	3	145 180	2 × 1000 1800	Бесступенчатое 25–100%	2		16	600 × 622 × 157 (без тумбочки)	Гарантийный срок 2 года
«Лысьва-9» «Томь» (ЭВЧШ 5.3 5,8/220)	5,8	3	145 180	1000 1500	Ступенчатое (7 ступеней)	10	1800	47	500 × 850 × 600	То же
	5,8	3	145 180 180	1000 1500 1500	Ступенчатое (7 ступеней)	10	1800	48	500 × 850 × 626	Гарантийный срок 2 года
«Электра 1001» (ЭБЧШ-6-4-8/220)	8	4	145 180 220 180	1000 1500 2000 1500	Ступенчатое (7 ступеней)	9	2000	62,5	600 × 850 × 600	То же

Примечание. Плита «Электра 1002» в отличие от «Электра 1001» оснащена двумя чугунными и двумя трубчатыми конфорками мощностью по 1000 Вт.

Таблица 61.23. Технические характеристики электроплиток

Плитка	Число конфорок	Мощность, Вт	Характер и диапазон регулирования мощности	Время разогрева, мин	Габаритные размеры (ширина × высота × глубина), мм	Масса, кг
ЭПТ-1,0/220 «Нева-110»	1	1000	Бесступенчатое, 15–100%	2	270 × 300 × 91	2,2
ЭПТ-2-2,0/220 «Нева-210»	2	2000	Бесступенчатое, 15–100%	2	500 × 300 × 91	4,2
ЭПТ-1-1,0/220 «Фея-1»	1	1000	Бесступенчатое	4	280 × 280 × 70	2,7
ЭПТ-2-2,0/220 «Фея-2»	2	2000	»	4	485 × 275 × 70	5,6
ЭПТ-1-1,0/220 «Мизла-2»	1	1000	»	4	280 × 265 × 85	2,5
ЭПТ-1-1,0/220 «Ала-Тоо»	1	1000	5-ступенчатое	4	277 × 260 × 91	2,5
ЭПТ-1-1,0/220 «ХЭЛП-1»	1	1000	»	4		2,3
ЭПТ-2-2,0/220 «Мечта-4»	2	2000	»	3	500 × 330 × 100	6,5

Таблица 61.24 Основные параметры и размеры электрокастрюль

Внутренний диаметр, мм	Номинальная емкость, л	Номинальная мощность, кВт
120	0,6	0,5
140	1,25	0,6
160	1,6	0,8
180	2,0	1,0
200	3,0	1,25
220	4,0	1,6

Таблица 61.25 Основные параметры электровафельниц и электрожаровен

Прибор	Номинальная мощность, кВт	Площадь рабочей поверхности, см <sup>2</sup>	Диапазон рабочей температуры, °С	Время разогрева до рабочей температуры, м
Электровафельница	0,8	315	170–200	10
	1,0	445		
	1,25	475		
Электрожаровня	0,8	315	180–250	12
	1,0	445		

Таблица 61.26. Основные параметры электрошашлычницы

Электрошашлычница	Номинальная мощность, кВт	Масса одной порционной загрузки, кг	Температура излучателя, °С	Время разогрева до рабочей температуры, м
С горизонтальным расположением шампуров	1,2	0,9	700	5
	1,4	1,25		
	1,6	1,4		
	1,2	0,9		
С вертикальным расположением шампуров	1,4	1,25		

электрокастрюли-сковорядки ускоряет на 70% приготовление пищи и на 40% уменьшает расход электроэнергии.

Электросковороды изготавливаются согласно ГОСТ 22470-77 [61.23] на напряжение 220 В и номинальные мощности 0,8; 1,0; 1,25; 1,4; 1,6 кВт, оборудуются терморегулятором, предназначенным для регулирования температуры рабочей поверхности в диапазоне: при минимальной уставке не более 100 °С, при максимальной уставке  $230 \pm 45$  °С, неравномерность нагрева рабочей поверхности не более 40 °С, время разогрева рабочей поверхности до температуры 185 °С не более 6 мин. Средняя на-

работка электросковороды до отказа не менее 1000 ч. На рис. 61.18 приведен внешний вид электросковороды типа ОКБ-2255 «Волга-1».

Электросковорода состоит из корпуса с крышкой и съемного терморегулятора. Корпус сковороды литой, в его дно залит ТЭН. Масса сковороды 2,1 кг, диаметр жарочной поверхности 308 мм.

Электровафельницы, электрожаровни и электрошашлычницы согласно [61.21, 61.24] выпускаются на рабочее напряжение 220 В, оборудуются встроенным терморегулятором (кроме шашлычниц). Основные параметры этих приборов приведены в табл. 61.25, 61.26.

Средняя наработка приборов до первого отказа не менее 1000 ч.

### Электроприборы для отопления

Преимуществами электрического отопления по сравнению с другими видами являются: упрощение строительных работ при возведении зданий; возможность автоматического поддержания заданной температуры в помещении; простота обслуживания; отсутствие необходимости в топливных складах; незагрязняемость окружающей среды продуктами сгорания топлива.

Недостатком являются повышенные расходы, поэтому электроотопление экономически оправдано при тарифе не выше 0,5 коп/(кВт·ч) [61.17]. Ввиду этого широкое распространение получили переносные электроприборы местного отопления, служащие либо для местного, либо для дополнительного обогрева.

Электрорадиаторы отдают тепло преимущественно конвекцией, выполняются в виде металлического герметичного корпуса, заполненного минеральным маслом, нагреватель располагается в нижней части корпуса и работает при удельной поверхностной мощности до 3 Вт/см<sup>2</sup>. Температура рабочей поверхности в условиях нормальной эксплуатации 60–70 °С (максимум 105 °С). Радиаторы снабжаются регулятором температуры его рабочей поверхности, сигнализатором включения нагревателя. Согласно ГОСТ 16617-80Е электрорадиаторы выпускаются мощностью 0,5–1,25 кВт при напряжении 127 и 220 В и мощностью 1,6 и 2,0 кВт при напряжении 220 В. В зависимости от типа радиаторы оборудуются автоматическим регулятором температуры воздуха в помещении, либо регулятором мощности, либо термоограничителем [61.25]. Срок службы электрорадиатора не менее 3000 ч. В табл. 61.27 приведены характеристики выпускаемых отечественной промышленностью электрорадиаторов.

Таблица 61.27 Технические характеристики электрорадиаторов

Тип радиатора	Мощность, Вт	Объем отапливаемого помещения, м <sup>3</sup>	Габаритные размеры (ширина × × глубина × × высота), мм	Масса, кг
ЭРМБ-1 «Термо-1»	500	12–15	670 × 540 × 240	9
ЭРМБ-2 «Термо-2»	750	20–24	850 × 590 × 240	14
ЭРМБ-3 «Термо-3»	1250	30–40	1200 × 650 × × 240	18,5
ЭРМБС-1,0/220	1000	30	505 × 200 × 675	25
ЭРМБС-1,25/220	1250	35	560 × 200 × 675	30

**Электроконвекторы** (ГОСТ 18476-81Е) предназначены для дополнительного отопления жилого помещения, при мощности 0,5 и 0,8 кВт используются без регулирования мощности, номинальное напряжение 127 и 220 В, при 0,8–2,0 кВт имеют ступенчатое или бесступенчатое регулирование мощности [61.26].

Нагрев воздуха осуществляется за счет активной естественной конвекции, что обеспечивает максимальную теплоотдачу от нагревателей; температура воздуха, нагретого конвектором, не превышает температуру окружающего воздуха более чем на 85 °С; средняя наработка прибора до отказа не менее 4000 ч.

**Аккумуляционные отопительные электроприборы** (печи) до 70% всей энергии отдают тепловым излучением. Печь имеет сердечник большой теплоемкости, в который заделаны электрические нагреватели [61.17]. Изолированный от окружающей среды теплоаккумулирующий сердечник разогревается до 300–600 °С, температура облицовки печи не превышает 60–70 °С. В зависимости от конструкции печи отопление осуществляется за счет теплоотдачи либо только от облицовки печи, либо дополнительно от теплоаккумулирующего сердечника за счет естественной или вынужденной конвекции через воздушные каналы сердечника. Печи выпускаются мощностью 3–6 кВт и работают при восьмичасовой ночной зарядке. Масса аккумуляторной отопительной печи равна 75–100 кг на 1 кВт мощности, занимаемая площадь 0,1–0,15 м<sup>2</sup>.

**Электрокамины** предназначены для дополнительного обогрева помещения. Согласно ГОСТ 308-78Е [61.27] бытовые электрокамины изготавливаются на номинальное напряжение 220 В и мощность электронагревателя 0,5–2,0 кВт в напольном, настенном и универсаль-

ном исполнениях. Применяются нагреватели открытого типа – спирали в кварцевых трубках с толщиной стенки 1–2 мм либо закрытого типа – ТЭНы, помещаемые в фокусе параболического рефлектора из полированного алюминия или стали с покрытием, обеспечивающих направленный поток теплового излучения. Температура спирали в открытых электронагревателях или рабочей поверхности ТЭНа составляет 650–900 °С. Интенсивность теплового потока, создаваемого камином, выбирается из условий – установившаяся температура поверхности, находящейся на расстоянии 0,5 м от электрокамина, на которую направлен лучистый поток, не должна превышать температуру окружающей среды более чем на 65 °С, средний срок службы электрокамина не менее 4000 ч. Эффективный радиационный КПД (величина, характеризующая количество тепла, полученного объектом направленным инфракрасным излучением) прибора составляет 10–22%.

В конструкции электрокамина мощностью 0,75 кВт и выше предусматривается ступенчатое регулирование мощности.

#### Электроприборы для нагрева воды

**Электрические водонагреватели** существенно превосходят топливные в санитарно-гигиеническом отношении. Степень распространенности их в быту зависит от тарифа на электроэнергию, а объем и электрическая мощность водонагревателей определяются из нормы суточного потребления горячей воды на 1 человека, равной 33 л при 65 °С. Они применяются в домах без централизованного горячего водоснабжения для нагрева воды до 85 °С для бытовых нужд. Электроводонагреватели применяются и при наличии централизованного горячего водоснабжения при температуре подаваемой воды до 50 °С и необходимости ее подогрева.

**Проточные электронагреватели** предусматривают отбор горячей воды одновременно с нагревом, имеют высокую установленную мощность (18–21 кВт), работают при КПД до 97%.

**Емкостные аккумуляционные электронагреватели** имеют внутренний бак, объем которого соответствует потребности в горячей воде. Бак имеет высококачественную тепловую изоляцию (из стекловаты, полиуретана, натуральной пробки), предотвращающую снижение температуры горячей воды в течение дня на 5–10 °С. Оптимально подогрев воды осуществляется в ночное время в течение 6–8 ч либо с частичным подогревом днем. Оптимальной считается температура горячей воды

Таблица 61.28. Основные параметры бытовых электрокипятильников

Тип	Мощность, кВт	Время нагрева воды в сосуде от 20 до 95 °С		Габаритные размеры	Масса, кг
		Объем сосуда, л	Время, мин		
ЭПМ	0,3	0,25	6	67 × 32 × 88	0,115
	0,5	0,5	10	106 × 68 × 29	0,11
	0,7	1,5	20	118 × 92 × 58	0,19
ЭПО	1,0	3,0	20	260 × 60 × 20	0,3
	1,2	4,0	20	310 × 140 × 68	0,49
ЭПОТ	1,6	5,0	25	330 × 80 × 58	0,6
	2,0	7,0	30	345 × 80 × 58	0,65

85 °С. Мощность нагревателя выбирается из расчета 110–120 Вт на 10 л объема водонагревателя. Объем аккумуляционного водонагревателя рекомендуется определять по выражению [61.28]:  $V = 1,3Q_{уд}n$  – нагрев в ночное время, где  $Q_{уд}$  – удельный расход горячей воды, л/(чел. день);  $n$  – количество человек в квартире;  $V = 0,975Q_{уд}n$  – нагрев в ночное время с частичным подогревом днем;  $V = 0,819Q_{уд}n$  – нагрев со свободным режимом.

Данные по расходу горячей воды для бытовых целей приведены в [61.28].

Для центральных районов СССР оптимальным является нагрев воды в ночное время, для районов Восточной Сибири – в ночное время с подогревом днем.

Емкостные быстродействующие водонагреватели вместимостью до 25 л предназначены для установки на кухне; обычно выполняются настенной конструкции; рассчитываются на время нагрева воды 30–60 мин; мощность нагревателя выбирается из условия до 1,5 кВт на каждые 5 л емкости. Для получения воды с температурой в пределах 45–90 °С водонагреватели снабжаются терморегуляторами и смесителями. В качестве нагревателей используются ТЭНы.

Погружные электрокипятильники предназначены для подогрева и кипячения воды в бытовых условиях, представляют собой ТЭН со спиралью диаметром 30–50 мм, с 3–4 витками. Прямолинейные концы ТЭНа заключены в пластмассовую герметичную ручку, соединяющую нагреватель со шнуром электропитания. Согласно ГОСТ 14705-83Е [61.29] выпускаются трех типов: ЭПМ – электрокипятильник малого габарита; ЭПО – основного габарита; ЭПОТ – основного габарита с термовыключателем. Погружные электрокипятильники изготавливаются на номинальное

напряжение 220 В, основные параметры электрокипятильников приведены в табл. 61.28.

Электроподогреватели детского питания предназначены для разогрева до 36 °С бутылочек с питанием диаметром 53 мм и вместимостью 200 мл. Согласно ГОСТ 22788-77 подогреватели выпускаются на номинальное напряжение 220 В, мощностью 75 Вт, рассчитаны на работу с промежуточным теплоносителем – водой. Средняя наработка подогревателя не менее 300 ч [61.30].

Широкое распространение для кипячения воды получили электрочайники, электросамовары и электрокофеварки, так как нагрев воды в них происходит значительно быстрее и экономичнее, чем в обычной посуде на конфорках электроплит.

Электрочайники (рис. 61.19) согласно ГОСТ 7400-81Е [61.31] выполняются типов: ЭЧ – электрочайник без термоограничительного устройства; ЭЧТ – с термоограничительным устройством; ЭЧЗ – с устройством отключения при закипании; ЭЧЗТ – с термоограничительным устройством и устройством отключения при закипании воды. Корпус чайника изготавливается из латуни или алюминия, самовара – из латуни, нагревателем служит ТЭН диаметром 10 мм, выгнутый в форме петли. Электрочайники и электросамовары изготавливаются на напряжение 220 и 127 В, мощность нагревателя 800–1250 Вт.

Мощность нагревателя электрочайника или электросамовара определяется выражением

$$P = 7,3 \cdot 10^3 m / \tau_{\text{доп}},$$

где  $m$  – номинальная вместимость прибора по

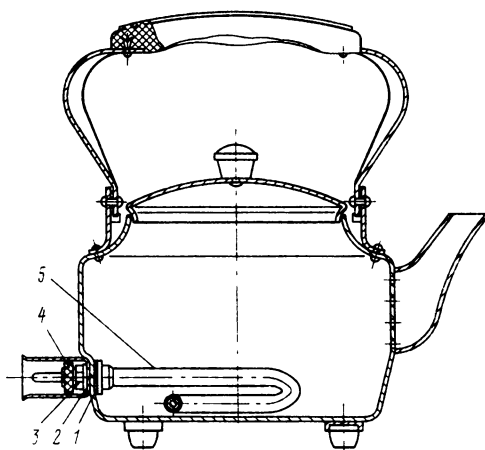


Рис. 61.19. Электрочайник:  
1 – сальник, 2 – прокладка фибровая, 3 – гайка;  
4 – фарфоровая колодка, 5 – ТЭН

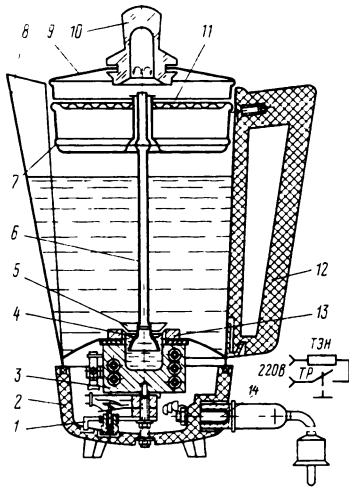


Рис. 61.20. Электрокофеварка перколяционная: 1 — терморегулятор ТР; 2 — подставка; 3 — ТЭН, 4 — подвижная шайба; 5 — клапан; 6 — гейзер; 7 — сетчатый цилиндр; 8 — корпус, 9, 11 — крышки, 10 — смотровое окно, 12 — ручка; 13 — гайка; 14 — контакты

воде, кг;  $\tau_{\text{доп}}$  — допустимое время нагрева воды до кипения, мин.

Средний ресурс работы электрочайников и электросамоваров не менее 2500 ч.

Электрочайники выпускаются вместимостью 1; 1,6; 2; 2,5; 3 и 4 л, электросамовары — 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 л. Время нагрева воды до кипения 7,5–20 мин в электрочайниках и 17–30 мин в электросамоварах.

Электрокофеварки (рис. 61.20) предназначены для приготовления кофе, чая, а также быстрого кипячения воды в домашних условиях. Корпус и крышка кофеварки изготавливаются из нержавеющей стали, в корпусе размещен стояк гейзера с дозатором для молотого кофе или чая. Нагрев воды осуществляется ТЭНом, встраиваемым в основание корпуса. Большинство конструкций кофеварок снабжается термоограничителем, отключающим нагреватель при включении прибора в сеть без воды или при полном ее накопании. Основные параметры электрокофеварок приве-

Таблица 61.29. Основные параметры электрокофеварок

Номинальная вместимость, л	Потребляемая мощность, Вт, не более	Время приготовления кофе, мин, не более
0,3	500	15
0,5	500	15
0,8	1250	25
1,2	1250	25
1,5	1250	25

дены в табл. 61.29. Средний ресурс электрокофеварок не менее 1000 ч.

#### Прочие бытовые нагревательные электроприборы

Основные параметры электроприборов для обогрева человеческого тела приведены в табл. 61.30.

Нагревателем в приборах для обогрева тела служат спирали из нихромовой проволоки, вплетенные в асбестовую ткань, которая закрепляется в малорастягивающейся ткани, либо трубки из нагревостойкой пластмассы с графитовым заполнением. Приборы выпускаются на рабочее напряжение сети 220 В, для регулирования температуры нагрева применяются трехступенчатые переключатели мощности. В одеялах, грелках дополнительно устанавливаются термоограничители, размыкающие цепь нагревателя при 50–70 °С.

Рефлекторы электрические медицинские бытовые, в качестве источника тепла в них применяется электрическая лампа накаливания из стекла синего цвета мощностью 20–60 Вт, температура светового пятна рефлекторов до 40 °С.

Фены бытовые представляют собой электровентиляторы с нагревателем, размещенные в пластмассовом корпусе и предназначенные для сушки волос струей подогретого воздуха. Основные параметры фенов приведены в табл. 61.31.

Фены изготавливаются на номинальное напряжение 220 В, средняя наработка фена до отказа не менее 500 ч, потребляемая мощность 250–500 Вт, мощность электродвигателя вентилятора 50 Вт.

Таблица 61.30. Электроприборы для обогрева человеческого тела

Наименование	Тип	Потребляемая мощность, Вт	Рабочая температура, °С	Размеры, мм	Масса, кг
Электроковрик	ЭГУР-70	25, 50, 100	До 70	465 × 365	0,50
Электроматрац	ЭМФ-20	30, 60, 120	45	2000 × 1000	3,5
Электроодеяло	ЭОФ-20	30, 60, 120	45	2000 × 1400	1,5
Электрогрелка	ГЭУ-2-60	40, 60	40–55	410 × 285	0,3
Электробинт	БЭ-1	60, 120, 250	45	2100 × 160 × 20	0,5
Электрогрелка для ног	ЭГН-1	15, 30, 60	70	335 × 270 × 160	0,65

Таблица 61.31 Основные параметры бытовых фенов

Тип	Количество режимов работы	Рабочая температура, °С	Потребляемая мощность, Вт	Производительность, м³/мин	Масса, кг
«Алеся»	2	40; 65	150; 300	0,4; 0,7	0,34
«Кудесник-М»	3	40; 50; 60	360	1,2	1,315
«Юность»	2	40; 65	180; 450	0,7; 1,0	0,26
«Фигаро-2»	2	40; 60	330	0,7	0,34
«Аэлита-3»		70–80	330	0,1	2,5 (с насадками) 0,4
«Ведуга»	3	70	170		
«Сура»		40; 65; 90	700		

Электропаяльники бытовые выпускаются непрерывного нагрева (для работы в продолжительном режиме), форсированного нагрева (для работы в продолжительном режиме, снабженные устройством для скоростного разогрева до рабочей температуры) и импульсного нагрева (прибор малой теплоемкости для работы в повторно-кратковременном режиме). Условные обозначения паяльников состоят из букв и цифр, обозначающих [61.35]: ЭП – электропаяльник; С – сменный паяльный стержень; Ц – несменный паяльный стержень; Н – непрерывный нагрев; И – импульсный нагрев; Ф – форсированный нагрев; цифры в

числителе – номинальная мощность, Вт; в знаменателе – номинальное напряжение, В.

Срок службы электропаяльников непрерывного и форсированного нагрева не менее 1500 ч, импульсного нагрева – не менее 3000 циклов включено – выключено. Основные параметры бытовых электропаяльников приведены в табл. 61.32.

Электрические утюги являются одним из наиболее распространенных и широко применяемых бытовых электроприборов. В современных конструкциях утюгов нагревателем служит ТЭН, размещенный в алюминиевой подошве утюга. Утюги снабжаются терморегулятором, некоторые модели снабжаются разбрызгивателем воды и пароувлажнителем; выполняются на рабочее напряжение 220 и 127 В. Температура подошвы утюга, °С, при глажении различных тканей регулируется терморегулятором и приведена ниже:

Вискозный шелк, капрон, нейлон	80–100
Натуральный шелк . . . . .	140–160
Шерсть, шерсть в смеси с хлопком, вискозным волокном, лавсаном	160–180
Хлопок . . . . .	180–200
Лен . . . . .	210–230

Время разогрева утюга с подошвой из алюминиевого сплава составляет 3–4 мин, в конструкциях утюгов с пароувлажнителем время разогрева до начала парообразования не более 4 мин. Согласно ГОСТ 307-81Е [61.37] изготавливаются утюги типов: УТ – с терморегулятором; УТП – с терморегулятором и пароувлажнителем; УТПР – с терморегулятором, пароувлажнителем и разбрызгивателем; УТМ – с терморегулятором, малогаба-

Таблица 61.32. Основные параметры бытовых электропаяльников

Электропаяльник	Режим нагрева паяльника	Номинальная мощность, Вт	Время разогрева до 300 °С не более, мин	Температура рабочая, °С
ЭПЦН, ЭПСН	Непрерывный	10, 16	5	300–400
	»	16, 25	7	
	»	40, 65, 100, 160 (200)*, 250	8	
ЭПЦФ	Форсированный	40/20, 100/50, 250/125**	2	500
ЭПЦИ	Импульсный	40, 65, 100, 160	0,2	650
ЭПСИ	»	40, 65		

\* Указанное в скобках значение мощности относится к ЭПСН

\*\* Цифра в знаменателе указывает мощность в установившемся режиме работы



Таблица 61.33 Основные параметры бытовых электроутогов

Тип	Мощность, Вт	Время разогрева до максимальной температуры, мин	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Примечание
УТ-1000-1,2-220	1000	1,6	231 × 114 × 115	1,2	С терморегулятором, подвижным вводом шнура
УТ-1000-1,2-220	1000	2,5	235 × 121 × 115	1,2	Ручка консольного типа
УТП-1000-1,8-220	1000	3	240 × 124 × 131	1,8	С терморегулятором и паровлажнителем
УТП-1000-1,8-220 «Элис-202»	1000	2,6	245 × 120 × 145	1,8	То же
УТ-400-0,8-220	400	4	168 × 94 × 100	0,8	С терморегулятором
УТ-100-0,4-220 «Малыш»	100	5	255 × 85 × 60	0,4	С термоограничителем

Таблица 61.34 Допустимая удельная поверхностная мощность для ТЭНов [61.38, 61.39]

Нагреваемая среда	Условия нагрева	Удельная нагрузка, Вт/см <sup>2</sup>		Рекомендуемые материалы для оболочки ТЭНа
		рекомендуемая	максимально допустимая	
Вода	Нагрев в проточном водоподогревателе	8–12	15	Алюминиевые сплавы, луженая медь и латунь, нержавеющая сталь, стали 10 и 20 с противокоррозионным покрытием
	Нагрев, кипячение в емкостном водоподогревателе	6–10	11	
Воздух	Нагрев в спокойной среде до 400 °С на оболочке ТЭНа	1,2–1,8	2,3	Стали 10 и 20
	То же свыше 400 °С	2,3–5	6,0	Нержавеющая сталь
	При скорости движения воздуха до 6 м/с и свыше 400 °С на оболочке ТЭНа	3–4,5	6,0	То же
	Нагрев в калорифере, скорость движения воздуха свыше 6 м/с, до 400 °С на оболочке ТЭНа	5–5,5	7,0	Стали 10 и 20
Пищевые жиры, масло	Нагрев в ванне	2,5–3	3,5	То же
Молоко	Нагрев в емкости	1,5–2	2,5	Нержавеющая сталь
Конфорки для бытовых электроплит	–	4–6	8	То же
Подшва утюга из алюминиевого сплава	Нагреватели установлены в подошве, нагрев с термоограничителем до 250 °С	11–12	13	Стали 10 и 20
Бытовые электроплиты	Нагреватели залиты в металл конфорки	5–7	8,0	То же
Жарочные и сушильные шкафы	–	0,5–1,5	–	

ритный. Основными параметрами, определяющими способность утюга к глажению, являются его мощность (указана в обозначении типа), масса (указана в обозначении типа), пределы и точность регулирования температуры подошвы, время разогрева подошвы утюга. Качество и надежность утюга определяются по его КПД и долговечности. Основные параметры бытовых электроутюгов приведены в табл. 61.33. Утюги мощностью 1000 Вт выпускаются только на 220 В, остальные — на 127 и 220 В.

Допустимые колебания температуры подошвы утюга не более 30 °С, допустимая неравномерность нагрева подошвы не превышает 15 °С. Средний ресурс электроутюгов не менее 2000 ч, КПД составляет 80–85 %.

### Рекомендации по выбору ТЭНов для бытовых нагревательных электроприборов

Мощность ТЭНов выбирается соответственно определяемой тепловым расчетом потребной мощности прибора

$$P_{\text{ТЭН}} = 1,2P_{\text{потр}}$$

Оптимальная поверхность ТЭНа определяется выражением

$$F_{\text{ТЭН, опт}} \geq P_{\text{ТЭН}}/w_{\text{доп}}$$

где  $w_{\text{доп}}$  — допустимая по условиям эксплуатации удельная поверхностная мощность ТЭНа, Вт/см<sup>2</sup>. Рекомендуемые значения  $w_{\text{доп}}$  приведены в табл. 61.34. Окончательный выбор ТЭНов, выпускаемых электротехнической промышленностью по ГОСТ 19108-81Е [61.38], производится по [61.39].

### Список литературы

- 61.1. Зайцев В. Г. Товароведение электротоваров, бытовых машин. М. Экономика, 1971. 286 с.
- 61.2. ГОСТ 14087-80 (СТ СЭВ 1110-78). Электроприборы бытовые. Общетехнические условия
- 61.3. ГОСТ 16317-76. Холодильники бытовые электрические. Общие технические условия
- 61.4. ГОСТ 19455-83. Кондиционеры бытовые автономные. Типы и основные параметры
- 61.5. ГОСТ 7402-84. Вентиляторы электрические. Общие технические условия
- 61.6. ГОСТ 19131-86. Вентиляторы потолочные.
- 61.7. ГОСТ 17083-81Е. Электротепловентиляторы бытовые
- 61.8. ГОСТ 10280-83Е. Пылесосы электрические бытовые
- 61.9. ГОСТ 7834-75. Электрополотеры бытовые
- 61.10. ГОСТ 8051-83Е. Машины стиральные бытовые.
- 61.11. ГОСТ 25036-81. Электроприборы бытовые. Машины электромеханические кухонные. Общие технические условия
- 61.12. ГОСТ 20469-81Е. Электромясорубки бытовые
- 61.13. ГОСТ 18710-80Е. Электровзбивалки бытовые
- 61.14. ГОСТ 19423-81Е. Электрокофемолки бытовые.
- 61.15. ГОСТ 18199-83Е. Электросоковыжималки бытовые.
- 61.16. ГОСТ 9357-81Е. Электробритвы
- 61.17. Чукаев Д. С. Электрификация городского быта. М.: Высшая школа, 1974. 213 с.
- 61.18. Лепав Д. А. Устройство и ремонт бытовых электроприборов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 271 с.
- 61.19. ГОСТ 14163-78. Электроконфорки чугунные. Технические условия
- 61.20. ГОСТ 14919-83Е. Электроплиты.
- 61.21. ГОСТ 21621-83. Электрогрили и электрошашлычницы бытовые.
- 61.22. ГОСТ 21620-76. Электрокастрюли бытовые.
- 61.23. ГОСТ 22470-77. Электросковороды бытовые.
- 61.24. ГОСТ 21622-84Е. Электровафельницы и электрогрили контактные
- 61.25. ГОСТ 16617-80Е. Электрорадиаторы масляные бытовые
- 61.26. ГОСТ 18476-81Е. Электроконвекторы бытовые.
- 61.27. ГОСТ 308-78Е. Электрокамины бытовые.
- 61.28. Староверова В. М. Сб. Электротехническая пр-сть. Сер. Электротермия, 1970. Вып 96
- 61.29. ГОСТ 14705-83. Электрокипятильники погружные бытовые
- 61.30. ГОСТ 22788-77Е. Электроподогреватели детского питания
- 61.31. ГОСТ 7400-81Е. Электрочайники и электросамовары бытовые
- 61.32. ГОСТ 20888-81. Электрокофеварки бытовые
- 61.33. Бытовые электротехнические изделия. М.: Информэлектро, 1984. 54 с.
- 61.34. ГОСТ 22314-84Е. Электрофены бытовые
- 61.35. ГОСТ 7219-83. Электропаяльники бытовые
- 61.36. Варшавский А. С., Драницкая В. П., Герчук Ю. М. и др.//Сб. Электротехническая пр-сть. Сер. Электротермия, 1965. Вып 45.
- 61.37. ГОСТ 307-81. Электроутюги бытовые.
- 61.38. ГОСТ 19108-81. ТЭНы для электробытовых нагревательных приборов
- 61.39. Трубочатые нагреватели ТЭН. Каталог 12 15 04 77. М. Информэлектро, 1977. 40 с.
- 61.40. Крюков В. И. Эксплуатация электроустановок жилых домов. М.: Стройиздат, 1984. 263 с.

## Раздел 62

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РУЧНЫЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ МАШИНЫ (ЭЛЕКТРОИНСТРУМЕНТ)

### СОДЕРЖАНИЕ

62 1	Классификация машин . . . . .	562	62.4.	Конструкция машин . . . . .	566
62 2	Общие требования к конструкции машин . . . . .	563	62 5.	Источники питания ручных и переносных машин . . . . .	573
62 3	Основные положения публикации МЭК 745-1-82 . . . . .	564		Список литературы . . . . .	573

Ручной электрической машиной (электроинструментом) называется машина, предназначенная для выполнения механической работы, приводимая в действие электрическим двигателем или электромагнитом, составляющими с машиной единое целое, вес которой полностью или частично воспринимается руками оператора. Движение рабочего органа ручной машины осуществляется двигателем или электромагнитом, а подача и управление — вручную.

Ручные электрические машины (в дальнейшем — машины) получили широкое распространение во многих отраслях народного хозяйства и в особенности при выполнении строительно-монтажных, отделочных, санитарно-технических и сборочных работ. Применение ручных машин позволяет в 4—20 раз повысить производительность труда, улучшить качество работы и значительно облегчить условия труда.

### 62.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАШИН

Машины разделяются:

*по назначению и области применения*

общего применения (сверильные, шлифовальные, полировальные, фрезерные),

для обработки металла (развертывающие, зенковальные, ножницы, кромкорезы, опилочные, шаберы, пилы, зачистные),

для обработки древесины (пилы, рубанки, долбежники, лобзики, сучкорезы),

для обработки каменных материалов, грунта и горных пород (молотки, перфораторы, бетоноломы, бороздоделатели),

для отделочных работ (штукатурно-затирочные, краскораспылители, пескоструйные, плоскошлифовальные, ленточно-шлифовальные, герметизаторы),

для сборочных работ (резьбонарезные, гайковерты, шпильковерты, шуруповерты, клепальные молотки, скобозабивные, гвоздезабивные);

*по принципу действия*  
на непрерывно-силовые и импульсно-силовые (ударного, ударно-вращательного и ударно-поворотного действия);

*по виду движения рабочего органа*  
вращательного и возвратно-поступательного действия;

*по конструктивному исполнению машины*  
вращательного действия

на прямые, у которых оси двигателя и рабочего органа параллельны, и угловые, у которых эти оси располагаются под углом;

*по роду тока, частоте и числу фаз*  
постоянного тока, переменного тока нормальной и повышенной частоты (200—400 Гц) однофазные и трехфазные;

*по типу привода*  
с коллекторным двигателем, с асинхронным двигателем, с электромагнитами;

*по степени защиты оператора от поражения электрическим током*

на три класса — I, II и III.

К классу I относится машина, у которой хотя бы одна доступная для прикосновения металлическая деталь отделена от частей, находящихся под напряжением, только основной\* изоляцией и которая имеет кабель с заземляющей жилой или электрический соединитель с заземляющим контактом.

К классу II относится машина, у которой все доступные для прикосновения металлические детали отделены от частей, находящихся под напряжением, двойной\* или усиленной\* изоляцией и которая не имеет устройств для заземления.

К классу III относится машина на номинальное переменное напряжение не свыше 42 В или постоянное не свыше 50 В, не

\* Термины «основная», «двойная», «усиленная» изоляция поясняется на с 535 (см разд. 61 «Бытовая электротехника»).

имеющая устройств для заземления и предназначенная для питания либо от трансформатора или преобразователя, вторичные обмотки которых не имеют гальванической связи ни с первичными обмотками, ни с землей, либо от автономного источника тока (гальванических элементов, аккумулятора, двигатель-генераторной установки). Напряжение холостого хода источника питания машины класса III не должно превышать 50 В.

Если машины с признаками классов II и III имеют устройства для заземления, то они относятся к классу I.

Важнейшим показателем технического уровня ручной машины является удельная (на единицу массы) мощность. Задача повышения мощности машины при снижении ее массы потребовала применения высокоскоростных двигателей: однофазных коллекторных нормальной частоты и трехфазных асинхронных повышенной частоты. Наибольшее распространение получили однофазные коллекторные двигатели. Они изготавливаются на номинальное напряжение 220 В мощностью 60–1500 Вт при частоте вращения под нагрузкой от 12 до 20 тыс. об/мин. Достоинствами этих двигателей являются: возможность непосредственного подключения к электрической сети общего пользования без применения трансформаторов и преобразователей частоты, способность переносить значительные перегрузки и колебания напряжения, работать в режиме частых пусков. К их недостаткам относятся: небольшой ресурс (300–400 ч), относительные сложность и высокая стоимость и необходимость в периодических ремонтах, связанных с поддержанием в исправности щеточно-коллекторного устройства.

Широкое распространение также имеют трехфазные асинхронные двигатели повышенной частоты. Их номинальные параметры 36 (42) В, 200 Гц, мощность 120–1500 Вт при 12 тыс. об/мин. На автозаводах применяются машины с двигателями на 135 и 220 В, 200 Гц, а в лесной промышленности 220 В, 400 Гц при 12 тыс. об/мин. Достоинствами этих двигателей являются простота конструкции, повышенный ресурс (600 ч) и постоянство частоты вращения, что особенно эффективно применительно к шлифовальным машинам. Недостатками являются необходимость применения преобразователя частоты, ограничение по частоте пусков (поскольку пусковой ток превышает номинальный в семь раз), относительно малая способность к перегрузкам.

Трехфазные двигатели нормальной частоты (50 Гц) имеют ограниченное применение, в основном на тяжелых машинах ударного действия (молотках, перфораторах, бетоноло-

мах, гайковертах), на которых применение коллекторных двигателей затруднено из-за снижения надежности работы щеток и коллекторов при воздействии повышенной вибрации. Иногда эти двигатели применяются и на тяжелых машинах безударного действия (сверлильных при диаметре сверла 23 мм и выше, рубанках, долбежниках, пилах). Достоинствами этих двигателей являются простота и надежность, а также возможность непосредственного питания от сети общего пользования, но большие размеры и масса снижают потребительские качества машин с такими двигателями.

Однофазные асинхронные двигатели в ручных машинах не применяются из-за низкой удельной мощности. Их основное применение – в стационарных и переносных машинах (точилах, вибростагах, заточных станках).

Электромагнитный привод получил применение в однофазных машинах ударного действия (молотках, перфораторах). Достоинствами этого привода являются возможность питания от однофазной сети общего пользования и повышенная надежность, обусловленная отсутствием обмоток на движущихся частях.

## 62.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ МАШИН

Конструкция машины должна обеспечить наилучшие потребительские качества (высокую производительность, удобство в работе, минимальные размеры и массу); полную безопасность (электрическую, механическую); защиту от шума и вибрации, отсос пыли и т. п.; пригодность для массового производства: высокую надежность; простоту обслуживания и ремонта.

Электрическая безопасность оператора обеспечивается тем, что машина любого класса защиты имеет не менее двух независимых защитных средств, одновременное повреждение которых признано маловероятным. Этими защитными средствами являются наличие основной изоляции всех металлических частей, доступных для прикосновения, и, кроме того, у машины класса I – заземление этих частей у машины класса II – наличие дополнительной изоляции; а у машины класса III – особо низкое напряжение и разделение цепей в источнике питания.

Предусмотрены следующие меры безопасности: исключение возможности случайного прикосновения к элементам, находящимся под напряжением, и к внутренним движущимся частям; исключение возможности электрического удара при разряде конденсаторов, встроенных в машину; сведение к минимуму вероятности

механической травмы оператора при работе машины; обеспечение надежности защиты оператора от поражения током даже при возникновении неисправности.

Для исключения возможности случайного прикосновения к элементам, находящимся под напряжением, машины должны исполняться по степени защиты не ниже JP20 по ГОСТ 14254-80, причем защита должна действовать даже при удалении деталей, которые могут быть сняты без помощи инструмента. Не считается достаточной изоляция, обеспечивающая эту защиту, если она выполнена из ткани, пряхи, бумаги, картона, эмали и подобных им материалов. Оси кнопок, рукояток, рычагов не должны находиться под напряжением. В машинах класса II недоступными для прикосновения должны быть не только элементы, находящиеся под напряжением, но и любые металлические детали, отделенные от элементов, находящихся под напряжением, только основной изоляцией (например, сердечник статора). Доступность для прикосновения оценивается испытательным пальцем и штифтом по ГОСТ 12.2.013-87 (СТ СЭВ 789-86). В машинах класса II не должно быть гальванической связи доступных для прикосновения деталей с конденсаторами, встроенными в машину, и с их кожухами. Электрический соединитель ручных машин должен быть таким, чтобы исключалась возможность неправильного или неполного включения штифтов в гнезда розетки.

Для защиты оператора от поражения током при разряде конденсаторов их емкость должна быть ограничена. Машина считается безопасной, если через 1 с после отключения разность потенциалов между штифтами вилки не превышает 34 В.

В целях защиты от механической травмы внутренние движущиеся части должны быть недоступны для прикосновения. Наружные движущиеся части не должны иметь острых кромок и выступов (требование не относится к рабочему инструменту). Ключи к зажимным патронам должны свободно выпадать из гнезд; крепление ключей к машине при помощи цепочки или другим подобным способом не допускается. Должна быть обеспечена надежность крепления рабочего инструмента к движущимся частям машины. Кожухи и ограждения рабочего инструмента должны иметь достаточную механическую прочность. Выключатель должен быть расположен так, чтобы возможность его случайного включения была маловероятной. Отключение выключателя должно быть возможным без ослабления силы захвата машины руками. Выключатель должен обладать достаточной разрывной мощностью от-

ключения для обеспечения возможности отключения машины в случае заклинивания рабочего инструмента в обрабатываемом изделии. Особо опасные машины, например дисковые и цепные пилы, должны иметь выключатели без фиксации включенного положения.

Ограничения вредного воздействия вибрации и шума, создаваемых машиной, являются одной из сложнейших задач при конструировании и изготовлении машин. Допустимые уровни вибрации регламентированы ГОСТ 17770-72 (СТ СЭВ 715-77), а уровни шума — ГОСТ 12.2.030-83.

Надежность защиты оператора от поражения электрическим током и механической травмы обеспечивается выполнением машины в соответствии с международными требованиями безопасности, изложенными в публикации Международной электротехнической комиссии МЭК 745-1-82 «Техника безопасности ручных электроинструментов с приводом от электродвигателей. Часть 1. Общие требования». Кроме того, должны быть учтены специфические требования к машинам конкретных видов, изложенные в группе публикаций МЭК 745-2, например к резьбонарезным машинам — МЭК 745-2-9-84. Общие требования безопасности содержатся также в СТ СЭВ 789-86, а также в ГОСТ 12.2.013-87.

### 62.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПУБЛИКАЦИИ МЭК 745-1-82

*Номинальные параметры* — параметры, обозначенные на машине ее изготовителем.

*Номинальное напряжение* не должно превышать 250 В у машин постоянного тока и 440 В у машин переменного тока, у которых разность потенциалов между землей и любым проводом источника питания должна быть не более 250 В.

*Номинальная мощность* — мощность, потребляемая машиной из сети.

*Пуск* машины без нагрузки должен быть возможен при напряжении в пределах 0,85—1,1 номинального, и при этом не должны срабатывать защитные устройства, встроенные в машину. При десятикратной проверке не должно быть ни одного отказа пуска.

*Нормальная нагрузка* — испытательная нагрузка, по которой оценивается безопасность машины. Например, для сверлильных машин нормальной нагрузкой является тормозной момент, приложенный к шпинделю машины до достижения полезной мощности (в ваттах), равной 15 диаметрам сверла (в миллиметрах).

*Мощность и ток*, потребляемые машиной при нормальной нагрузке и номинальном напряжении, не должны превышать номиналь-

ных значений более чем на 15 % (для машин с номинальной мощностью менее 300 Вт допуск увеличивается).

*Нагревание отдельных частей машины проверяют, как правило, при работе с нормальной нагрузкой при напряжении 0,94; 1 и 1,06 номинального. При этом превышение температуры над температурой окружающей среды не должно быть больше 75, 90, 95 и 115 °С для обмоток классов нагревостойкости А, Е, В и F соответственно.*

*Ток утечки из любого полюса источника питания в металлические детали, доступные для прикосновения, не должен превышать 0,75; 0,25; 0,5 мА соответственно для машин классов защиты I, II и III, а в недоступные для прикосновения металлические части машин класса II – 5 мА у машин, не защищенных от проникновения воды, и 3,5 мА у брызгозащищенных и водонепроницаемых машин. Ток утечки проверяют на нагретой машине, работающей при напряжении 1,1 номинального.*

*Изоляция машины должна оставаться исправной после выдержки машины в камере при влажности 91–95 % при 20–30 °С в течение 48 ч, а для брызгозащищенных и водонепроницаемых машин – в течение 168 ч. Сопротивление изоляции и электрическая прочность ее проверяются сразу же после выдержки в камере влажности. Сопротивление изоляции должно быть не менее 2; 5 и 7 МОм для основной, дополнительной и усиленной изоляции соответственно.*

*Основная, дополнительная\* и усиленная изоляция машин классов защиты I и II должна выдерживать в течение 1 мин испытательное напряжение 1250, 2500 и 3750 В соответственно, а изоляция машин классов III – 500 В.*

*Указанные выше испытательные напряжения должны прикладываться к машине только при типовых (периодических) испытаниях, после которых машина к эксплуатации не допускается, поскольку столь высокое напряжение является разрушающим.*

*На прямо-сдаточных испытаниях, которым подвергается каждая готовая машина, испытательное напряжение должно быть 1000, 2500 и 400 В для машин классов I, II, III соответственно. Это напряжение прикладывается в течение 3 с между контактом штепсельной вилки и металлической деталью, доступной для прикосновения, например шпинделем машины. Выключатель должен быть включен.*

*Машины должны выдерживать без повреждений циклическую работу на холостом ходу в течение 24 ч при напряжении 1,1 номинального и 24 ч при напряжении 0,9 номинального. Каждый цикл должен состоять из 100 с работы и 20 с перерыва. После этого машины*

*должны повторно выдержать испытание электрической прочности изоляции. Машины с автоматическими выключателями должны выдерживать 10 000 пусков при напряжении 0,9 номинального. Машины с коллекторным двигателем должны проработать на холостом ходу в течение 1 мин при напряжении 1,3 номинального. Машины с электронными устройствами должны выдерживать работу в течение 1 мин при напряжении 1,3 номинального с отключенными и с закороченными электронными устройствами. Реверсивные машины должны выдерживать 25-кратное реверсирование без остановки машины при работе на номинальном напряжении.*

*Наружные части машины должны выдерживать три удара энергией 1 Дж (а колпачки щеткодержателей – 0,5 Дж), которые наносятся пружинным молотком. Машины, за исключением пил, рубанков, долбежников, а также молотков и перфораторов массой свыше 10 кг, должны выдержать 4-кратный удар о стальную плиту при падении с высоты 0,5 м. После испытания на удар машины должны выдержать повторное испытание электрической прочности изоляции.*

*Элементы конструкции. Дерево, ткань, бумагу и другие волокнистые или гигроскопичные материалы можно использовать в качестве изоляции только в том случае, если они пропитаны лаками или компаундами. Приводной ремень не считается изоляцией независимо от материала, из которого ремень изготовлен. Внутренние изоляционные и токоведущие детали должны быть защищены от воздействия смазки; исключение составляют изоляционные детали механизма передач, при этом смазка должна обладать изоляционными свойствами.*

*Машины классов защиты I и II должны быть изготовлены так, чтобы в случае ослабления или выпадения какой-либо детали исключались возможность нарушения изоляции и уменьшения зазора на пути утечки тока ниже допустимого значения. Машины класса II с металлическим корпусом должны иметь внутреннюю изоляционную футеровку, охватывающую все детали, находящиеся под напряжением. Детали машин класса II, составляющие дополнительную изоляцию, должны быть сконструированы так, чтобы их было невозможно установить в неправильном положении, и если они ошибочно не будут установлены, то машина должна быть неработоспособной или явно не укомплектованной. Усиленную изоляцию можно применять только в том случае, когда невозможно применение основной и дополни-*

\* Термин – см. с. 535

тельной изоляции (например, в выключателе и в щеткодержателе). Стыки в основной и дополнительной изоляциях машин класса II должны быть взаимно смещены, а место разъема в усиленной изоляции должно исключать возможность прямолинейного доступа к элементам, находящимся под напряжением. Доступ к электрощеткам должен быть невозможным без применения инструмента. Резьбовые крышки щеткодержателей должны быть завернуты до упора и при этом не должны выступать над поверхностью машины.

Машины с подачей воды должны быть класса III или эксплуатироваться совместно с разделительным трансформатором (преобразователем) на напряжение не выше 115 В. Фильтры подавления радиопомех должны размещаться внутри машины.

**Комплектующие изделия.** Номинальные параметры комплектующих изделий должны соответствовать параметрам машины. Выключатели не должны устанавливаться на гибком кабеле (шнуре). Запрещается применение выключателей с контактнымзором менее 3 мм. Выключатели должны выдерживать 50 включений на номинальное напряжение и отключений машины с застопоренным ротором (якорем). Запрещается применение аппаратов защиты с самовозвратом после срабатывания. Вилка электрического соединителя машины класса III не должна допускать включения в розетку на напряжение выше 50 В. Электрический соединитель машины на частоту выше 60 Гц не должен допускать включения в розетку для нормальной частоты.

**Внутренняя проводка** должна быть выполнена так, чтобы исключалась возможность ее соприкосновения с движущимися частями. Каналы для прокладки проводов не должны иметь острых кромок и выступов. Отверстия в металле, через которые проходят провода, должны иметь изоляционные втулки. В машинах классов I и II должна быть исключена возможность непосредственного механического контакта изоляции проводов с металлическими частями, доступными для прикосновения.

**Гибкие кабели (шнуры).** Сечение жил кабеля (шнура) должно быть не менее 0,75; 1; 1,5; 2,5 мм<sup>2</sup> для машин, номинальный ток которых не превышает 6; 10; 16 и 25 А соответственно. У машины массой свыше 2,5 кг сечение жил кабеля должно быть не менее 1 мм<sup>2</sup>. Кабель должен быть закреплён в машине так, чтобы жилы его были защищены от натяжения и скручивания. Устройство крепления кабеля машин класса II должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к дополнительной изоляции. От резких перегибов в месте ввода в машину кабель должен




быть защищен эластичной трубкой, которая должна выступать из машины на длину не менее чем пять диаметров кабеля. Крепление кабеля к трубке вне машины не допускается. Жилы кабеля должны крепиться к винтовым зажимам. Контактное нажатие не должно передаваться через изоляционный материал. Для электрических соединений не должны применяться самонарезающие винты.

**Пути утечки тока и воздушные зазоры** не должны быть меньше 2 мм в машинах класса III, а в машинах классов I и II — 3; 4 и 8 мм по основной, дополнительной и усиленной изоляции соответственно.

Толщина основной изоляции не нормируется. Толщина дополнительной и усиленной изоляции в машинах класса II должна быть не менее 1 и 2 мм соответственно.

**Пластмассовые детали** должны быть нагревостойкими. Нагревостойкость считается достаточной, если стальной шарик диаметром 5 мм, прижатый к нагретой детали с силой 20 Н в течение 1 ч, оставляет отпечаток диаметром не более 2 мм. Наружная деталь должна быть нагрета до 85 °С, а детали, предназначенные для крепления элементов, находящихся под напряжением, — до 125 °С. Кроме того, последние должны быть огнестойкими. Газы, выделяемые из пластмассы при соприкосновении с металлическим стержнем, нагретым до 300 °С, не должны воспламеняться от электрических искр в течение 5 мин. Детали, составляющие дополнительную изоляцию машин класса II, должны быть стойкими к образованию токопроводящих мостиков.

Маркировка должна быть расположена на основной части машины так, чтобы ее можно было ясно увидеть, когда машина готова к работе. На маркировке должны быть обозначены: изготовитель и тип машины, напряжение, частота (если она выше 60 Гц), потребляемая мощность или ток. Кроме того, на машинах должны быть знаки:

класса II .....	
брызгозащищенных	IPX 
водонепроницаемых	IPX7 

#### 62.4. КОНСТРУКЦИЯ МАШИН

Ручные электрические машины состоят из корпуса, двигателя, механизма передач и устройств управления.

Корпус служит для крепления всех частей машин и осуществляет защиту оператора от прикосновения к частям, находящимся под напряжением, и к движущимся частям. У машин классов I и III корпус, как правило, литой алюминиевый, а у машин класса II — пластмассовый или алюминиевый с пластмассовой футеровкой. Наибольшее распространение имеют машины класса II с неармированным корпусом, отлитым из термопластичного материала (поликарбоната, стеклонаполненного полиамида и др.), например у сверильной машины типа ИЭ-1035. Достоинствами таких корпусов являются малая масса, высокая технологичность. Их недостаток — нередкие случаи деформации, приводящие к нарушению соосности подшипников, что снижает надежность машины. У машин, подверженных значительным механическим нагрузкам, корпус имеет алюминиевый каркас. При этом значительно повышается жесткость конструкции. Для изготовления армированных корпусов поликарбонат применять не рекомендуется из-за опасности появления трещин. Достоинствами армированных корпусов являются высокая прочность, малая масса и удовлетворительная технологичность. Некоторые зарубежные фирмы изготавливают машины класса II, корпуса которых выполнены из термоактивных материалов. Их достоинство — высокая прочность, а недостаток — большая трудоемкость. Корпус угловой машины Ш1-230 (производства НРБ) отлит из магниевого сплава и имеет внутреннюю футеровку из термоактивного пресс-материала (аралдита).

У некоторых машин корпус отливается заодно с рукояткой. У малых машин (массой до 2 кг) рукоятка pistolетного типа, а у более тяжелых — замкнутого типа. В рукоятке размещаются ввод кабеля, выключатель и фильтр подавления радиопомех.

**Электродвигатели.** Однофазный коллекторный двигатель применяется в основном в машинах класса II. Сердечники индуктора и якоря набираются из листов электротехнической стали. Обмотки изготавливаются из медного эмалированного провода и пропитываются эпоксидным компаундом. Основная изоляция — пленка или пленкокартон, расположенные в пазах сердечника. Дополнительную изоляцию составляют: у индуктора — пластмассовый корпус или пластмассовая футеровка металлического корпуса машины, а у якоря — втулка из высокопрочной термоактивной пластмассы (аралдит, АГ4С, УП284 и др.), расположенная между сердечником и валом. Коллектор, окружная скорость которого достигает 50 м/с, усилен стальными армированными кольцами. Корпус коллектора из

стеклонаполненной термоактивной пластмассы является основной изоляцией, дополнительной — изоляционная втулка вала. Вентилятор осевой или центробежный расположен со стороны, противоположной коллектору. Динамическая балансировка якоря достигается фрезеровкой поверхности сердечника или с помощью балансировочных колец, установленных по обоим концам вала. Электрощетки — типов ЭГ14, Г21, Г33 и др. Ресурс щеток 150–200 ч. На машинах некоторых фирм применяются щетки с автоматическим отключением, т. е. щетки отрываются от поверхности коллектора при достижении предельного износа, чем предотвращается повреждение коллектора.

Трехфазные асинхронные электродвигатели нормальной частоты применяются в основном в машинах класса I, а двигателя на частоту 200 и 400 Гц — в машинах классов I и III. Эти двигатели по конструкции принципиально не отличаются от двигателей общего применения.

**Механизмы передач** служат для передачи вращающего момента от вала двигателя к рабочему механизму машины. При этом частота вращения понижается. Механизм передачи представляет собой одно-, двух- или трехступенчатый редуктор. Возвратно-поступательное движение рабочего органа достигается применением кривошипно-шатунного или эксцентрикового механизма. В машинах ударно-вращательного действия установлены храповик и муфты включения и отключения храпового механизма.

**Сверильные машины** — наиболее распространенный вид ручных машин. Основное исполнение — прямые односкоростные. Кроме того, изготавливают многоскоростные со ступенчатым и с плавным регулированием частоты вращения, ударно-вращательные и угловые машины.

ГОСТ 8524-80 устанавливает номинальный ряд машин по максимальному диаметру сверла: 6; 8; 10(9); 13(14); 23 и 32 мм. В машинах до 13 мм сверло закрепляется в патроне, насаженном на укороченном конусе шпинделя. В машинах 14–32 мм сверло устанавливается во внутренний конус шпинделя. Машины до 9 мм имеют рукоятку pistolетного типа, у машин 10–14 мм рукоятка замкнутого типа, а более тяжелые машины имеют две рукоятки для облегчения восприятия реактивного момента. Тяжелые машины должны комплектоваться механизмом подачи. Для возможности крепления машины в штативе и для монтажа сменных насадок на корпус редуктора имеется цилиндрическая проточка, соосная со шпинделем. Насадки расширяют



область применения сверлильных машин. Большинство машин имеет двухступенчатый редуктор. Трехступенчатый применяется на машинах для сверл 23–32 мм, а одноступенчатый – только на машинах до 6 мм. Многоскоростные машины служат для увеличения производительности при сверлении отверстий, диаметр которых меньше максимального. У двухскоростных машин переключением зубчатых колес изменяют передаточное отношение редуктора, а у четырехскоростных, кроме того, изменением электрической схемы (уменьшением числа витков в обмотках полюсов) увеличивают частоту вращения якоря. Плавное регулирование частоты вращения достигается применением тиристорov. Курок выключателя воздействует на переменный резистор. Последний управляет тиристорами, изменяющими напряжение на выводах двигателя от 130 до 220 В. В некоторых системах для стабилизации частоты вращения

используется обратная связь по скорости, для чего на валу имеется тахогенератор. При повышении частоты вращения напряжение на двигателе снижается. При росте нагрузки напряжение на двигателе повышается.

Ударно-вращательные сверлильные машины предназначены для сверления отверстий в камне, кирпиче, бетоне. Производительность труда при обработке этих материалов возрастает, когда резание сочетается со скалыванием. Поэтому такие машины имеют два режима работы: вращательный и ударно-вращательный, обеспечиваемый специальным храповым механизмом. При использовании корончатых сверл с помощью машины ударно-вращательного действия можно образовывать отверстия диаметром до 100 мм. На таких машинах патроны закрепляются не на конусе, а на резьбе.

Угловые машины предназначены для сверления отверстий в труднодоступных местах.

Таблица 62 I. Сверлильные машины

Вид	Индекс	Максимальный диаметр сверла (по стали), мм	Частота вращения, об/мин	Мощность потребляемая номинальная, Вт	Масса, кг	Электродвигатель
<i>Однофазные коллекторные класса II 220 В, 50 Гц (с двойной изоляцией)</i>						
Односкоростные	ИЭ-1038	6	2300	270	1,5	КНП-120-15
	БЭС-1-1	9	1500	250	1,3	
	ИЭ-1032	9	940	420	1,6	ЕД-210
	ИЭ-1032А-1	10	940	400	1,6	ЕД-210
	ИЭ-1036	10	850	350	1,5	КНП-180-15
	ИЭ-1035	13	600	420	2,5	КНП-250-15
Двухскоростные	ИЭ-1023А	23	240	600	4,0	КНП-370-15
	ИЭ-1202А	10,6	940/2000	420	1,85	ЕД-210
	ИЭ-1204	13/10	480/940	420	3,0	КНП-250-15
	ИЭ-1205	23/13	240/480	600	4,1	КНП-370-15
	ИЭ-1206	32/23	150/240	860	6,3	КНП-550-12
С электронным регулированием частоты вращения	ИЭ-1038Э	6	0–2300	300	1,5	КНП-120-15
	ИЭ-1036Э	10	0–850	350	1,7	КНП-180-15
	ИЭ-1204Э	13/9	0–500/ 0–1000	420	3,0	КНП-250-15
			0–1000			
	ИЭ-1207Э	13/9	0–500/ 0–1000	420	3,0	КНП-370-15
<i>Трехфазные класса I, 220 В, 50 Гц (с заземлением)</i>						
Односкоростные реверсивные	ИЭ-1301А	23 (32 по дереву)	450	830	10,0	АН1-550
<i>Трехфазные класса III, 42 и 36 В, 200 Гц</i>						
Односкоростные	ИЭ-1025Б	6	1230	210	1,6	АПШ-120-12
	ИЭ-1026Б	9	800	285	1,7	АПШ-180-12
	ИЭ-1033А	13	510	370	2,4	АПШ-250-12
	ИЭ-1017Б	23	420	860	4,0	АПШ-550-12

Примечание. Здесь и во всех последующих таблицах масса машин указана без рабочего инструмента, патронов и кабеля.

Изготавливаются они на базе прямых машин и отличаются от последних только редуктором. Нередко применяют угловую насадку к прямой сверлильной машине. Кроме машин общепромышленного применения, изготавливают специальные машины, например для сверления алмазными сверлами. Сверлильная машина является базовой при комплектации универсальных наборов с комплектом насадок.

В табл. 62.1 приведены параметры сверлильных машин отечественного производства.

*Шлифовальные машины* предназначены для шлифования и полирования изделий, зачистки отливок и сварных швов и для резки металла. Различают машины радиальные (с вращательным движением рабочего органа), а также плоско- и ленточно-шлифовальные. ГОСТ 11096-80 предусматривает изготовление прямых машин с кругом диаметром 40, 63, 80, 100, 125, 150 и 200 мм на рабочую скорость 50 м/с и угловых машин с кругом диаметром 180 и 230 мм на рабочую скорость 80 м/с. Машины должны иметь защитный кожух, охватывающий круг на дуге не меньше 180°. На машине должно быть обозначено направление вращения шпинделя.

Во избежание разрыва круга частота вращения шпинделя на холостом ходу при номинальном напряжении не должна превышать 110% номинальной. У машин с коллекторным двигателем частота вращения при нагрузке до номинальной потребляемой мощности составляет 0,6–0,7 номинальной. Поэтому шлифование ведется на скоростях, более низких, чем допускает абразивный круг, что отрицательно сказывается на производительности. Некоторые зарубежные фирмы встраивают электронный (тиристорный) стабилизатор частоты вращения, принцип работы которого аналогичен описанному выше в устройстве плавного регулирования сверлильных машин. Машины с электронной стабилизацией частоты вращения должны иметь защиту от чрезмерного превышения частоты вращения на холостом ходу в случае повреждения стабилизатора. Такую функцию осуществляет калиброванное пластмассовое кольцо, надетое на якорь. При частоте вращения, равной 115% номинальной, кольцо разрывается и прерывает цепь питания двигателя машины. Шлифовальная машина с асинхронным двигателем не требует стабилизирующего устройства.

К радиальным машинам относятся и машины с гибким проволочным валом. Последние имеют трехфазный асинхронный двигатель нормальной частоты. Гибкий вал соединяется с валом двигателя через изоли-

рующую муфту, удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к дополнительной изоляции.

Разновидностью радиальных шлифовальных машин являются машина для шлифовки шпаклевки и штукатурно-затирачная машина, у которой рабочим инструментом является диск из пенопласта или древесностружечной плиты. Если машина имеет два затирачных диска, то они располагаются концентрично и вращаются в разные стороны. У машины для шлифования шпаклевки рабочим инструментом является абразивная шкурка.

Параметры шлифовальных машин приведены в табл. 62.2.

В плоско- и ленточно-шлифовальных машинах используют в качестве рабочего инструмента абразивную шкурку. Платформа плоскошлифовальной машины совершает возвратно-поступательное движение при помощи эксцентрикового механизма. У ленточно-шлифовальной машины бесконечная абразивная лента натянута между двумя валиками, один из которых является ведущим. Эти машины имеют устройства для отсоса пыли.

*Резьбозавертывающие машины* (табл. 62.3) предназначены для заворачивания, затяжки и отворачивания резьбовых соединений. В эту группу машин входят гайковерты, шуруповерты, шпильковерты. Различают гайковерты статического и ударного действия. Последние получили наибольшее распространение, так как имеют меньшую массу и не передают реактивный момент на руки оператора. Ударно-вращательный механизм гайковерта преобразует непрерывное вращение вала двигателя в серию периодически повторяющихся ударов. Импульсное приложение энергии к резьбовому соединению позволяет повысить выходную мощность. Основной тип механизма — шариковый с винтовым движением ударника.

Принцип работы редкоударного гайковерта конструкции М. Л. Гельфанда и др. состоит в периодическом разгоне маховой массы ударника до достижения заданной частоты вращения, после чего происходит сцепление ударника с кулачками шпинделя и накопленная кинетическая энергия передается в резьбовое соединение. Энергия удара стабильна. Отсчитывая заданное число ударов, осуществляют тарированную затяжку ответственных резьбовых соединений. Понижение частоты ударов при повышении энергии единичного удара способствует уменьшению вредного вибрационного воздействия на оператора. ГОСТ 21692-76 устанавливает ряд редкоударных гайковертов по номинальной энергии единичного удара: 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100 и 160 Дж. Эти гайковерты пред-

Таблица 62.2. Шлифовальные машины

Вид	Индекс	Диаметр круга, мм	Скорость резания, м/с	Частота вращения, об/мин	Мощность потребляемая номинальная, Вт	Масса, кг	Электро-двигатель
-----	--------	-------------------	-----------------------	--------------------------	---------------------------------------	-----------	-------------------

*Однофазные коллекторные класса II 220 В, 50 Гц (с двойной изоляцией)*

Прямые	ИЭ-2008	63	50	6800	600	3,8	КНИ-370-12
	ИЭ-2009	125	30	2600	1150	6,5	КНИ-750-15
Для шлифовки шпаклевки	ИЭ-2201	130	8	1200	340	3,5	КНИ-180-12
	Ш-1-178	178	80	8800	1900	6,5	ЕД-1400
Угловые (НРБ)	Ш-230	230	80	6500	1900	6,5	ЕД-1400

*Трехфазные класса I, 220 В, 50 Гц (с заземлением)*

С гибким валом и двумя головками	ИЭ-6103	200	30	2900	1020	34,0	ЭВ-147
		150		4080			
	ИЭ-8201А	200	30	2900	1020	30,0	ЭВ-147
		150		4080			

*Трехфазные класса III, 42 и 36 В, 200 Гц*

Прямые	ИЭ-2004А	150	50	3800	1070	6,5	АПИИ-750-12
--------	----------	-----	----	------	------	-----	-------------

Таблица 62.3. Резьбозавертывающие машины и шуруповерты

Вид	Индекс	Максимальный диаметр резьбы, мм	Момент затяжки, Н·м	Энергия удара, Дж	Мощность потребляемая номинальная, Вт	Масса, кг	Электро-двигатель
-----	--------	---------------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------------------	-----------	-------------------

*Однофазные коллекторные класса II, 220 В, 50 Гц (с двойной изоляцией)*

Гайковерты: частоударный неререверсивный	ИЭ-3113А	M16	125	—	340	3,8	КНИ-180-12	
	редкоударные реверсивные	ИЭ-3115Б	M30	320	25	420	5,1	ЕД-210РП
		ИЭ-3119	M36	430	40	450	7,4	ЕД-250РП
		ИЭ-3120А	M42	620	63	600	9,5	ЕД-370РП
		ИЭ-3122	M48	840	100	1000	12,5	КНИ-750-15
Шуруповерты: реверсивный	ИЭ-3604Э	M6	10	—	230	1,9	КРРР-II-180-15	
	ИЭ-3605Э	M6	10	—	320	1,6	То же	

*Трехфазные класса III, 42 и 36 В, 200 Гц*

Гайковерты: частоударные неререверсивные	ИЭ-3114Б	M16	125	—	270	3,6	АПИИ-180-12
	ИЭ-3123	M20	250	—	270	4,5	АПИИ-270-12
	ИЭ-3118	M30	320	25	385	5,5	АПИИ-250-12
Шуруповерт реверсивный	ИЭ-3601В	M6	—	—	210	2,3	АПИИ-120-12

назначены для затяжки высокопрочных болтов диаметром от 6 до 36 мм или обычных резьбовых соединений диаметром от 10 до 52 мм.

**Шурупверты.** Рабочий механизм машины имеет муфту, одна часть которой укреплена на шпинделе, а другая через редуктор соединена с валом двигателя. Шпиндель, в который вставлена сменная отвертка, может перемещаться в осевом направлении. Пружина удерживает муфту в расцепленном состоянии, при этом шпиндель неподвижен. Постоянный магнит, вставленный в шпиндель, притягивает головку шурупа (винта) к лезвию отвертки. Центрирование шурупа осуществляется либо крестообразным лезвием, либо ловителем. Параметры шурупвертов приведены в табл. 62.3.

**Резьбонарезные машины.** Рабочий механизм машины имеет устройство для механического реверсирования. Пока к машине не приложено осевое усилие, шпиндель под действием пружины находится в переднем положении и вращается против часовой стрелки. При приложении усилия подачи шпиндель перемещается в глубь редуктора, переключая зубчатые колеса. Метчик, закрепленный в патроне и заправленный в отверстие, вращается по часовой стрелке (прямой ход), нарезаая резьбу. При прекращении подачи происходит автоматическое переключение на ускоренный обратный ход. Метчик вывертывается из отверстия.

**Машины ударного действия.** Молотки и перфораторы предназначены для разрушения горных пород, мерзлого грунта и конструкций из различных строительных материалов. Отличительная особенность машин состоит в том, что удар, создаваемый механизмом машины, направлен вдоль оси рабочего инструмента. У перфораторов при этом инструмент вращается или поворачивается. Различают электромеханические и электромагнитные молотки и перфораторы. ГОСТ 12443-79 и ГОСТ 19475-80 устанавливают ряд электро-механических ударных машин по номинальной энергии удара: 1; 2; 4; 10; 25; 40 Дж при частоте ударов от 40 до 16 Гц.

У электромагнитных молотков и перфораторов имеется электромагнит с сердечником Ш-образной формы. Пакеты листов сердечника охватывают двоянный каркас катушек. Каждая из катушек питается через соответствующий диод. В один полупериод ток проходит через катушку переднего хода. Боек разгоняется и ударяет по хвостовику инструмента. В следующий полупериод ток проходит по второй катушке, боек возвращается назад до удара в буфер, нагруженный пружиной. Последняя уменьшает вибрацию и способствует повышению скорости прямого хода, а следовательно, повышению энергии удара. Вращение бура перфоратора осуществляется электродвигателем.

Трамбовки служат для уплотнения грунта. Двигатель через редуктор, кривошип и

Таблица 62.4. Машины для обработки грунта и каменных материалов

Вид	Индекс	Энергия удара, Дж	Частота ударов, Гц	Мощность потребляемая номинальная, Вт	Масса, кг	Двигатель	
<i>Однофазные класса II, 220 В, 50 Гц (с двойной изоляцией)</i>							
Молотки:	электромагнитный	ИЭ-4207А	4,8	50	600	6,7	Электромагнит
	электромеханические	ИЭ-4213А	10	18	450	7,8	ЕД-250
		ИЭ-4216	40	18	1500	20,0	ЕД-1700
универсальный электромагнитный	ИЭ-4217	5,0	50	950	7,0	Электромагнит	
Перфораторы	электромагнитный	ИЭ-4709А	2,5	50	650	6,4	Электромагнит
	электромеханические	ИЭ-4713	1	40	330	3,2	ЕД-210Д
		ИЭ-4714	2	35	420	4,5	ЕД-210Д
		ИЭ-4712	2	35	420	4,2	ЕД-210Д
		ИЭ-4716	2	55	450	3,0	ЕД-210Д
<i>Трехфазные класса I, 220 В, 50 Гц (с защитно-отк. поочающим устройством)</i>							
Молотки	ИЭ-4211	25	18	1050	21	АН1-600-3	
Перфораторы	ИЭ-4707А	25	18	1350	26	АН1-800-3	
	ИЭ-4505А	—	9	600	28	АН1-600-3	
Трамбовки	ИЭ-4502А	—	9	1600	80	4АВ80А2	

Таблица 62.5 Машины для работы по дереву и листовому металлу

Вид	Индекс	Максимальная глубина или толщина реза, мм	Ширина строгания, мм	Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг	Двигатель
<i>Однофазные коллекторные класса II, 220 В, 50 Гц (с двойной изоляцией)</i>						
Пилы.						
дисковые	ИЭ-5108	45	—	800	5,2	КНИ-550-15
	ИЭ-5107	65	—	1100	6,8	КНИ-750-15
цепная	ЭП-50К	450	2	2100	9	КНИ-1500-17
Долбежник	ИЭ-5607	160	12 × 60	1150	10	КНИ-750-15
Рубанки	ИЭ-5701А	2	75	600	6	КНИ-370-12
	ИЭ-5708	3	100	1150	8	КНИ-750-15
Ножницы						
ножевые	ИЭ-5404	1,6	—	230	3	КНИ-120-12
	ИЭ-5403	2,5	—	400	4,8	КНИ-250-12
вырубные	ИЭ-5502	1	—	230	2,9	КНИ-120-12
<i>Трехфазные класса I, 220 В, 50 Гц (с заземлением)</i>						
Пила дисковая	ИЭ-5102В	65	—	820	10,5	АН1-600-3
Долбежник	ИЭ-5601А	160	12 × 60	1070	22	АН1-800-3
Рубанок	ИЭ-5701А	3	100	800	14,5	АН1-600-3

шатун перемещает шток, на котором расположена пружина. Деформируя пружину, усилие передается на трамбующий башмак.

Параметры машин ударного действия приведены в табл. 62.4.

*Деревообрабатывающие машины* (табл. 62.5). Для этих машин характерны высокая скорость резания (до 50 м/с) и возможность большой подачи, поэтому на них устанавливаются более мощные двигатели, чем на машинах по обработке металла. Рабочие инструменты деревообрабатывающих машин имеют множество острых кромок, движущихся с высокой скоростью, и поэтому составляют особую опасность в отношении травмы оператора; поэтому необходимы меры специальной защиты. Одной из них является применение выключателей без фиксации включенного положения.

ГОСТ 11094-80 устанавливает номинальный ряд дисковых пил по максимальной глубине пропила 35; 45; 65 и 85 мм при диаметрах пильного диска 125; 160; 200 и 250 мм соответственно. Пилы должны допускать регулировку и фиксацию глубины пропила, а также угла наклона пильного диска к опорной поверхности от 90 до 45°.

Цепные пилы применяются в основном в лесной промышленности для раскряжовки хлыстов, обрезки вершин и крупных сучьев. Консольная конструкция пильного аппарата позволяет распиливать дерево, диаметр которого в два раза больше рабочей длины пилы. Режущим инструментом является пильная цепь, натянутая между ведущей и ведомой звездочками. Первая из них укреплена на

шпинделе редуктора, а вторая располагается на шине. На шине размещены устройство натяжения пильной цепи и амортизатор.

ГОСТ 8306-86 устанавливает номинальный ряд рубанков по ширине строгания 40, 75 и 100 мм при глубинах строгания 2 и 3 мм. Рубанки должны допускать регулировку глубины строгания и ее фиксацию. Конструкция фрезы рубанка должна исключать возможность выброса ножей даже в случае ослабления их крепления.

Долбежники служат для образования пазов и гнезд. Их рабочим инструментом является зубчатая цепь, натянутая между двумя звездочками.

Лобзик предназначен для фасонной вырезки деталей из досок и плит. Его рабочим инструментом является ножовочное полотно. Возвратно-поступательное движение ползуна с полотном осуществляет эксцентриковый механизм.

Фрезерные машины предназначены для фасонной обработки деревянных и пластмассовых деталей. Рабочим инструментом является торцевая фреза. Параметры деревообрабатывающих машин приведены в табл. 62.5.

*Прочие машины.* Ножницы (см. табл. 62.5) предназначены для резки листового металла и проката. По типу рабочего механизма различаются ножевые, вырубные и прорезные ножницы. У ножевых ножниц один из ножей неподвижен, а другой движется ползуном. У вырубных — неподвижная матрица, а на ползуне укреплен пуансон. В прорезных ножницах подвижный нож располагается между двумя неподвижными. Ползун приводится в движение

эксцентриком. ГОСТ 20524-86 устанавливает номинальный ряд ножиц по максимальной толщине разрезаемого листа: 1,0; 1,6; 2,5 и 3,2 мм.

Кромкорезы предназначены для подготовки кромки листа под сварку. Эти машины являются модификацией вырубных ножиц.

Бороздоделы и бороздофрезы предназначены для выборки пазов и гнезд в кирпичной кладке. У бороздоделов рабочим органом является цилиндрическая трехсторонняя фреза с твердосплавными зубьями. У бороздофрез рабочий инструмент – высокоскоростной алмазный диск.

Электрошприц предназначен для нанесения герметизирующей мастики в стыки панелей при строительстве зданий. Электрошприц имеет нагреватель и шнек, направляющий размягченную мастику в сопло.

Заточные станки служат для заточки инструмента (ножей рубанков, долбежных цепей и т. п.). Приводом служит трехфазный асинхронный двигатель, а рабочим инструментом – шлифовальный круг.

Точила – машины бытового назначения. Приводом является однофазный асинхронный двигатель с рабочим конденсатором.

## 62.5. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ РУЧНЫХ И ПЕРЕНОСНЫХ МАШИН

*Трансформаторы серии ТСЗИ* (трехфазные сухие защищенные для электроинструмента). ТУ 16-517.855-75 устанавливают ряд трансформаторов по номинальной выходной мощности 0,63; 1,0; 1,6; 2,5 и 4,0 кВ·А. Первичные напряжения 220; 380 и 660 В, вторичные напряжения 12; 36; 42; 127; 220 и 380 В. Изоляция вторичной обмотки от первичной выдерживает испытательное напряжение 4000 В.

*Преобразователи частоты.* Основным источником питания для ручных машин на номинальную частоту 200 Гц являются электромашинные преобразователи частоты. Различают двух- и одномашинные преобразователи. Двухмашинный преобразователь частоты ИЭ-9406 изготовливается по ТУ 22-4557-79. Преобразователь состоит из трехфазного асинхронного двухполюсного двигателя с короткозамкнутым ротором (АИРВ100S2) и трехфазного асинхронного шестиполюсного генератора с фазным ротором. Обе машины имеют общий вал и корпус. Обмотка ротора генератора подключена к первичной сети (220 или 380 В, 50 Гц). Ток, протекающий по ней, создает вращающееся магнитное поле с направлением, совпадающим с направлением вращения вала. В обмотке статора генератора индуцируется вторичное напряжение 36 или 42 В, 200 Гц.

Номинальная отдаваемая мощность преобразователя 4 кВ·А.

Одномашинный преобразователь частоты ИЭ-9406 (ТУ 22-5152-81) выполнен на принципе синхронно-реактивного двигателя. На статоре этого преобразователя располагаются две обмотки: первичная двухполюсная 380 В, 50 Гц и вторичная восьмиполюсная 36 или 42 В, 200 Гц. Ротор с асимметричным магнитопроводом имеет литую короткозамкнутую обмотку. Номинальная отдаваемая мощность 1,5 кВ·А. Достоинство этого преобразователя – стабильность выходной частоты, недостаток – резкое падение напряжения при нагрузке. Статические преобразователи частоты, предназначенные для питания ручных машин, находятся в стадии разработки. Экспериментальные образцы тиристорных и транзисторных преобразователей показали высокие удельные параметры.

### Список литературы

- 62.1 Публикации Международной электротехнической комиссии МЭК 745 «Безопасность ручных электроинструментов» с приводом от электродвигателей» МЭК 745-1-82 Ч 1 Общие требования  
62.2 То же Ч 2. Частные требования  
62.3 Публикация МЭК 745-2-1-85. Сверлильные машины  
62.4 Публикация МЭК 745-2-2-82. Гайковерты и шуруповерты.  
62.5 Публикация МЭК 745-2-3-84. Шлифовальные и полировальные машины.  
62.6 Публикация МЭК 745-2-4-83. Плоско- и ленточно-шлифовальные машины.  
62.7 Публикация МЭК 745-2-5-83. Дисковые пилы и ножи.  
62.8 Публикация МЭК 745-2-8-82. Ножницы по металлу.  
62.9 Публикация МЭК 745-2-9-84. Резьбонарезные машины  
62.10 Публикация МЭК 745-2-11-84. Лобзики и ножовки.  
62.11 Публикация МЭК 745-2-12-82. Глубинные вибраторы  
62.12 Публикация МЭК 745-2-14-84. Электро-рубанки  
62.13 Публикация МЭК 745-2-15-84. Газонокосилки  
62.14. СТ СЭВ 789-86. Машины ручные электрические Общие требования безопасности и методы испытания  
62.15 ГОСТ 10084-73. Машины ручные электрические. Общие технические условия  
62.16 ГОСТ 12.2.013-87.ССБТ. Машины ручные электрические Общие требования безопасности  
62.17 ГОСТ 8306-86. Рубанки ручные электрические Технические требования.  
62.18 ГОСТ 8524-80. Машины ручные сверлильные электрические. Технические условия  
62.19. ГОСТ 11094-86. Пилы ручные электрические дисковые по дереву. Технические условия  
62.20. ГОСТ 11096-86. Машины ручные шлифовальные электрические Технические условия

- 62 21 ГОСТ 12443-79. Молотки ручные электрические Технические условия.  
 62 22 ГОСТ 19475-80. Перфораторы ручные электрические Технические условия.  
 62 23 ГОСТ 20524-86. Ножницы ручные электрические Технические условия  
 62 24 ГОСТ 21692-76. Гайковёрты ручные электрические ударные Технические условия  
 62 25 ГОСТ 25988-83. Перфораторы ручные электромагнитные Технические условия

- 62 26 ГОСТ 25989-83. Молотки ручные электромагнитные Технические условия.  
 62 27 Электрические ручные машины с двойной изоляцией Б Г Гольдштейн, М А Шнейдерман, Б М Левин, К Х Дубов М Машиностроение 1975 232 с  
 62 28 Однофазные коллекторные двигатели для ручных электрических машин Ю А Савинский, В Н Батуев, Л Л Злотников, В И Баранов Обзорная информация Вып 2 Министройлормаш ЦНИИТЭстроймаш. 1986 60 с

## Раздел 63

# ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ РАДИОПОМЕХИ

## СОДЕРЖАНИЕ

63 1. Введение . . . . .	574	Помехоподавляющие конденсаторы (581) Помехоподавляющие дроссели (584) Помехоподавляющие фильтры (586) Искрогасители (589) Помехоподавляющие провода (590) Помехоподавляющие экраны (591)
63 2 Нормирование ИРП . . . . .	578	63.5. Подавление ИРП в отдельных источниках . . . . .
63 3 Испытания источников ИРП . . . . .	579	63 6. Комплексное и групповое подавление ИРП . . . . .
Условия испытаний (580). Измерительные приборы (580). Обработка и оценка результатов испытаний (581)		Список литературы . . . . .
63 4 Помехоподавляющие элементы и устройства . . . . .	581	

### 63.1. ВВЕДЕНИЕ

Борьба с индустриальными радиопомехами (ИРП) в странах с развитой промышленностью приобретает всю большую значимость в связи с двумя ведущими тенденциями, обусловленными научно-техническим прогрессом:

повышением энерговооруженности всех отраслей промышленности, транспорта, сельского хозяйства, быта;

стремительным развитием радиоэлектроники и вычислительной техники, сопровождаемым повышением требований к чувствительности радиоэлектронных средств (РЭС), устойчивости их работы, массогабаритным показателям, позволяющим размещать РЭС в непосредственной близости с энергетическими и другими установками.

Различие используемых уровней энергии силовых установок и совмещаемых с ними РЭС связи, контроля и управления сегодня очень велико, что определяет сложность защиты РЭС от ИРП.

Проблема борьбы с ИРП как часть проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) охватывает все области электротехники в связи с тем, что практически все виды оборудования, связанные с получением, передачей, потреблением и преобразованием электрической и электромагнитной энергии, создают электромагнитные колебания, которые могут оказывать мешающее воздействие на другое оборудование (проводные и радиосредства вещания, связи, контроля, управления, вычислительные комплексы и пр.).

С другой стороны, паразитные высокочастотные колебания, которые относятся к ИРП, наносят значительный вред самим изделиям – источникам радиопомех, вызывая старение изоляции обмоток, обгорание контактов, пробой изоляторов и даже выход из строя.

Вопросы изучения, регламентации и подавления ИРП рассматриваются различными Техническими комитетами Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международным специальным комитетом по радиопомехам (МСКР), Постоянной комиссией по

стандартизации Совета Экономической Взаимопомощи, Организацией стран социалистического содружества в области связи (ОСС).

В СССР нормы на ИРП устанавливаются Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ СССР), контроль за их выполнением и согласование технических условий на все виды продукции – источников помех осуществляет Государственная инспекция электросвязи (ГИЭ) Министерства связи СССР.

#### Основные термины и определения

*Индустриальная радиопомеха* – радиопомеха, которая создается электрическими или электронными устройствами [63.1]. Под радиопомехой понимается электромагнитная помеха в диапазоне радиочастот; к индустриальным радиопомехам не относятся помехи, создаваемые ВЧ-трактами радиопередатчиков.

*Длительная (непрерывная) индустриальная радиопомеха* – ИРП, длительность которой, измеренная в регламентированных условиях, не менее 1 с.

*Кратковременная индустриальная радиопомеха* – ИРП, длительность которой, измеренная в регламентированных условиях, не более 0,2 с.

*Источник ИРП* – устройство, создающее ИРП в окружающих его электрических сетях, конструкциях, пространстве.

*Помехообразующий элемент* – элемент источника ИРП, непосредственно участвующий в ее создании.

*Рецептор* – устройство, на которое ИРП может оказать мешающее действие.

*Квазипиковое значение напряжения ИРП* – значение напряжения индустриальных радиопомех, оцененное с помощью измерителя индустриальных радиопомех с квазипиковым вольтметром.

*Измеритель ИРП* – селективный микровольтметр, для которого регламентирована величина отношения синусоидального напряжения к спектральной плотности напряжения импульсов на входе, вызывающих одинаковое показание измерительного прибора, содержащий инерционные детекторы и позволяющий измерять напряжение, напряженность поля, ток и мощность при использовании дополнительных устройств.

*Квазипиковый детектор измерителя ИРП* – детектор с регламентированными электрическими постоянными времени, на нагрузку которого при воздействии регулярно повторяющихся импульсов с постоянной амплитудой создается выходное напряжение, являющееся частью пикового значения амплитуды импульсов, причем значение этого напряжения

увеличивается по мере возрастания частоты повторения импульсов, приближаясь к пиковому значению.

*Эквивалент сети* – устройство, используемое при измерении радиопомех, включаемое в сеть питания источников ИРП для создания регламентированного сопротивления нагрузки на частоте измерения.

*Поглощающие клещи* – устройство, предназначенное для измерения мощности индустриальных радиопомех, состоящее из трансформатора тока и магнитопровода, охватывающее провод питания электроустройства и перемещаемое вдоль него при измерениях.

*Токощельник для измерения тока ИРП* – устройство, содержащее магнитопровод с обмоткой, к которой подключается измеритель радиопомех, охватывающее токнесущий провод и перемещаемое вдоль него при измерениях.

*Помехозащищенность устройства от ИРП* – свойство устройства препятствовать при помощи экранов и фильтров проникновению ИРП в его тракт.

*Нормы на ИРП* – допускаемые значения напряжения, напряженности поля, тока и пересчитанные значения мощности ИРП, выраженные в децибелах относительно 1 мкВ, 1 мкВ/м, 1 мкА, 1 пВт, установленные на статистической основе и регламентированные в нормативно-технической документации.

*Испытания на ИРП* – определение соответствия индустриальных радиопомех требованиям, указанным в нормативно-технической документации.

*Помехоподавляющий элемент* – элемент, непосредственно осуществляющий подавление или перераспределение энергии помех (дрессель, конденсатор, резистор и т. п.).

*Помехоподавляющее устройство* – совокупность помехоподавляющих элементов, конструктивно объединенных в одно изделие.

*Помехоподавляющий провод* – помехоподавляющий элемент в виде провода с распределенным сопротивлением, обеспечивающего ослабление помех.

*Помехоподавляющий конденсатор* – помехоподавляющий элемент, имеющий в полосе рабочих частот емкостный характер полного сопротивления.

*Помехоподавляющий дроссель* – помехоподавляющий элемент, имеющий в полосе рабочих частот индуктивный характер полного сопротивления.

*Полоса рабочих частот помехоподавляющего элемента* – полоса частот, в которой вносимое затухание элемента не ниже заданного.



Вносимое затухание помехоподавляющего элемента (фильтра) — затухание, вносимое элементом (фильтром) при включении его в регламентированную схему.

#### Возникновение и распространение ИРП

Все источники ИРП в зависимости от причины их возникновения делятся на две группы:

а) устройства, в которых высокочастотные электромагнитные колебания необходимы для обеспечения их функционирования. К этой группе относятся высокочастотные генераторы промышленного, научного, медицинского и бытового назначения (ПНМ-установки); гетеродины радиовещательных и телевизионных приемников, а также некоторые импульсные устройства, системы зажигания двигателей внутреннего сгорания, ЭВМ, аппаратура связи и пр.;

б) устройства, в которых высокочастотные электромагнитные колебания являются паразитными и не имеют информационного или функционального содержания. К этой группе относятся трамваи, троллейбусы, электропоезда, тяговые подстанции электротранспорта, высоковольтные линии электропередач и их подстанции, станки с электроприводом, крановое оборудование, лифты, промышленные и медицинские рентгеновские аппараты, коммутируемая электрореклама, люминесцентные светильники, устройства регулирования дорожного движения, кассовые аппараты, торговые автоматы, электрохолодильники и термостаты, электронные инструменты и другие бытовые приборы, в которых имеются коллекторные электродвигатели или автоматические регуляторы, периферийные электро-механические устройства ЭВМ и т. д.

ИРП от устройств группы «а», как правило, содержат не только функционально необходимые для данных устройств спектральные составляющие, но и составляющие вне необходимой полосы частот. Так, ИРП, создаваемые ПНМ-установками, вследствие нелинейности элементов схемы содержат составляющие спектра на гармониках основной частоты. Кроме того, вследствие применения в ПНМ-установках предельно простых схем нагрузка вносит значительную расстройку в контур задающего каскада установки и частота колебаний изменяется в ходе технологического процесса. Импульсные ИРП со сплошным спектром, как правило, имеют повышенные уровни на высоких частотах вследствие излишне малой длительности фронтов применяемых импульсов.

Основную часть источников ИРП группы «б» составляют контактные коммутирующие

устройства различных электрических цепей (коллекторы электрических машин, контакторы магнитных станций, переключатели, автоматы силовой аппаратуры и т. д.). Процесс единичного срабатывания контактного коммутирующего устройства состоит из серии последовательно чередующихся замыканий и размыканий электрической цепи, обусловленных как чисто механической коммутацией при вибрации (и «дребезге») контактов, так и электрическими пробоями межконтактного промежутка, сопровождающимися образованием и погасанием дуги. Длительность процессов пробоя межконтактного промежутка может составлять 1–3 нс (стримерный пробой), что приводит к созданию интенсивных помех на частотах до 300–1000 МГц. Неизбежное наличие реактивных составляющих в сопротивлении коммутируемой цепи является причиной значительных перенапряжений на контактах при их размыкании, в десятки и даже сотни раз превышающих номинальное напряжение коммутируемой цепи. Такие перенапряжения не только значительно увеличивают уровень ИРП, но и являются опасными для прочности изоляции сети и аппаратуры, вызывают усиленное обгорание и износ коммутируемых контактов.

Из других механизмов образования ИРП наиболее распространенными являются следующие:

коронирование элементов конструкций, имеющих высокий потенциал по отношению к окружающему пространству (например, в высоковольтных линиях электропередач), частичные пробой изоляторов, находящихся под высоким напряжением, вследствие их загрязнения и наличия микротрещин, разряд в люминесцентных светильниках, многократные электрические пробой и дуга в сварочных аппаратах и токосъемных устройствах электротранспорта.

Многочисленные факторы, влияющие на уровень ИРП, определяют их случайный характер. Распределения вероятностей уровней напряжения ИРП,  $U_{изм}$  от устройств одного типа, измеренных в стандартных условиях, носят устойчивый характер и аппроксимируются логарифмически нормальным законом (нормальным при выражении результатов измерений в децибелах). Среднеквадратичное отклонение  $\sigma \{20 \lg U_{изм}\}$  является устойчивым параметром и для партии однотипных устройств (например, электродвигателей одного типа) составляет 4–6 дБ; для совокупности близких по назначению устройств (например, электродвигателей, используемых в устройствах бытового назначения) оно равно 8–10 дБ.

В качестве основной характеристики источ-

ников ИРП, определяющей их мешающее действие на большинство РЭС с аналоговыми сигналами, используется частотная характеристика математического ожидания измеренной величины  $\mu \{20 \lg U_{\text{ИМ}}\}$ .

Для оценки мешающего действия источников ИРП на рецепторы, использующие дискретные сигналы (ЭВМ, аппаратура передачи данных, импульсные управляющие устройства), кроме частотной характеристики  $\mu \{20 \lg U_{\text{ИМ}}\}$ , необходимо знание средней частоты следования импульсов помехи, имп/с, значения которой для типичных источников представлены ниже:

	Средняя частота следования импульсов, имп/с
Электродвигатель . . . . .	$10^3 - 10^4$
Люминесцентная лампа . . . . .	$10^4 - 10^5$
Автомобиль . . . . .	$10^3$
Линия электропередачи . . . . .	$10^4 - 10^5$
Сварочный аппарат . . . . .	$10^4 - 10^5$
Трамвай, троллейбус на выезде (то-коусьем) . . . . .	$3 \cdot 10^2 - 10^3$
Телевизионный приемник . . . . .	$1,5 \cdot 10^4$

Средой распространения ИРП является сочетание пространственной решетки электрических сетей, конструкций и свободного пространства. В случаях, когда размеры помехонесущих цепей и расстояния до источников помех значительно меньше длины волны, преобладают распространение ИРП вдоль электрических цепей и наводка на цепи рецептора за счет индуктивных и емкостных связей. При этом на частотах ниже 100–200 кГц основным контуром, определяющим значения наводки на цепи рецептора, является симметричный контур, образуемый проводами помехонесущей цепи. На более высоких частотах уровни магнитных и электрических полей определяются несимметричными контурами «провод – земля».

На частотах выше 30 МГц ИРП излучаются непосредственно корпусом источника помех и ближайшими к источнику отрезками помехонесущих цепей.

Основной параметр среды распространения ИРП – коэффициент переноса помех  $K_{\text{п}}$  – величина, характеризующая затухание помехи при распространении из заданных точек вблизи источника помех до точек на «входе» рецептора, измеренная по регламентированной схеме. В зависимости от преобладающего вида механизма распространения помехи в качестве точек вблизи источника выбираются либо точки свободного пространства, либо зажимы питающей источник помех сегги. Аналогично точками на входе рецептора могут быть

сигнальный вход, зажимы питающей сети, точки свободного пространства в зависимости от вида воздействия электромагнитной энергии помехи на рецептор и соответствующей ему схемы измерения помехозащищенности рецептора. В общем случае  $K_{\text{п}}$  является случайной величиной, статистические характеристики которой расчету не поддаются и определяются экспериментально. Распределение вероятностей  $K_{\text{п}}$  в большинстве случаев логарифмически нормальное. Среднеквадратичное отклонение для однопипных условий (например, для морского судна или жилого района с однотипной застройкой и одного вида источника помех) составляет  $\sigma \{20 \lg K_{\text{п}}\} = 12 \div 15$  дБ. В тракт радиоприемного устройства (РПУ) ИРП могут попадать следующими основными путями:

- а) по сети питания РПУ;
- б) при воздействии на антенну электрического, магнитного или электромагнитного полей, создаваемых помехонесущими цепями;
- в) при воздействии перечисленных в п. «б» полей на фидеры антенны;
- г) при воздействии перечисленных в п. «б» полей на высокочастотные контуры РПУ;
- д) по контуру заземления РПУ и последующей наводкой на высокочастотные каскады приемника вследствие гальванических, емкостных и магнитных связей.

Для проводных средств связи, контроля, управления, ЭВМ основными путями проникновения ИРП в аппарат являются:

- а) наводка электромагнитным полем на несимметричные (или плохо отсимметрированные) соединительные пары и магнитные элементы запоминающих устройств;
- б) воздействие помех через сеть питания и контур заземления.

Основной характеристикой помехозащищенности рецепторов по отношению к узкополосной непрерывной помехе является частотная характеристика максимального значения помехи, вводимой в рецептор по регламентированной схеме и не вызывающей недопустимого искажения сигнала.

Помехозащищенность по отношению к импульсной помехе характеризуется одной величиной – максимальной амплитудой импульсов, соответствующей допусжаемому ухудшению работы рецептора. Схема ввода помехи при испытаниях и ее спектральная характеристика или параметры модуляции оговариваются нормативно-технической документацией.

Совокупность трех характеристик – помех от отдельных электроустройств, коэффициентов переноса помех и помехозащищенности рецепторов – служит исходным материалом для нормирования ИРП.

### 63.2. НОРМИРОВАНИЕ ИРП

Нормы на допускаемые уровни ИРП носят статистический характер. Это означает, что нормируется совокупность статистических параметров  $\mu\{20\lg U_{изм}\}$ ,  $\sigma\{20\lg U_{изм}\}$  так, чтобы с определенной надежностью обеспечивалась качественная работа рецепторов при наличии источников ИРП.

Для расчета нормы используется соотношение

$$R = U_c - U_{изм} + K_n,$$

где  $R$ ,  $U_c$ ,  $U_{изм}$ ,  $K_n$  — выраженные в децибелах отношение сигнал/помеха, эффективное значение напряжения сигнала на входе рецептора, измеренное квазипиковое значение нормируемой величины помехи на «источнике» и коэффициент переноса ИРП соответственно.

Нормируется квантиль  $U_{изм}(p)$  в распределении вероятностей значения  $U_{изм}$ , соответствующий условно выбранному уровню вероятности  $p$ . Значение нормы  $L$  выбирается таким, чтобы при  $U_{изм}(p) = L$  обеспечивалась заданная надежность  $\beta$  работы рецептора с отношением  $R \geq R_{доп}$  ( $R_{доп}$  — допускаемое отношение сигнал/помеха):

$$L_{p,\beta}(U_{изм}) = \mu_{U_c} + \mu_{K_n} - R_{доп} - t_\beta \sqrt{\sigma_{U_c}^2 + \sigma_{K_n}^2 + \sigma_{U_{изм}}^2} + t_p \sigma_{U_{изм}},$$

где  $t_\beta = \Phi^{-1}(\beta)$ ;  $t_p = \Phi^{-1}(p)$  — аргументы функции нормального распределения, равной соответственно  $\beta$  и  $p$ .

Для норм СССР и МСКР принято  $p = 0,8$ , соответственно  $t_p = 0,84$ . Это означает, что в партии изделий, точно соответствующей норме [ $U_{изм}(p) = L$ ], 80 % изделий создает уровень ИРП  $U_{изм}$ , не превышающий  $L$ .

Значение  $\beta$  выбирается в интервале 0,8–0,99 в зависимости от требований к надежности функционирования рецепторов.  $\beta = 0,95$  означает, что при включении любого источника помех из группы (партии), удовлетворяющей норме, для рецептора, находящегося в зоне действия источника помех, с вероятностью, не меньшей 0,95, будет выполняться условие  $R \geq R_{доп}$ . Наибольшая величина в подкоренном выражении  $\sigma_{K_n}$ . Уменьшение  $\sigma_{K_n}$  дает возможность ослабить норму на  $U_{изм}$ . Поэтому расчет норм ведется для оборудования, размещаемого в однотипных условиях относительно рецепторов. Так, в целях защиты приема сигналов радиовещания и телевидения в жилых зданиях нормы разрабатываются отдельно для оборудования, размещаемого в жилых зданиях и вне жилых зданий.

Вторая группа оборудования по экономи-

ческим соображениям и условиям удаления разделяется на подгруппы: линии электропередач, электротранспорт, автомобили, промышленное оборудование и т. д.

При таком делении среднеквадратичные отклонения составляют:  $\sigma_{K_n} = 12$  дБ,  $\sigma_{U_{изм}} = 6$  дБ.

В качестве защищаемого сигнала обычно принимается номинальный или минимальный гарантированный сигнал, тогда  $\sigma_{U_c} = 0$ .

Ориентировочные значения  $R_{доп}$  для обеспечения удовлетворительного качества радиовещательного и телевизионного приема равны:

26 дБ для радиовещательного приема частотно-модулированных сигналов;

30–35 дБ для радиовещательного приема амплитудно-модулированных сигналов;

40–45 дБ для телевизионного приема.

В наиболее ответственных случаях применяется «предельная» норма, которая должна выполняться не на партии, а на каждом источнике помех.

Основные технические особенности действующей в настоящее время системы норм и стандартов на допускаемые ИРП состоят в следующем:

а) основным нормируемым параметром является квазипиковое значение напряжения или напряженности поля; в ряде случаев, когда чувствительность измерителя ИРП недостаточна, разрешается пользоваться пиковым детектором при соответствующем пересчете нормы;

б) нормы на кратковременные ИРП задаются в виде коэффициента ослабления нормы на непрерывную ИРП для соответствующей группы оборудования; значение коэффициента зависит от частоты следования кратковременных ИРП;

в) для оборудования с сетевым питанием, за исключением приемников ультракоротковолнового радиотелевизионного вещания, нормируется несимметричное (между проводом и землей) напряжение ИРП в полосе частот 0,15–30 МГц (для светильников с люминесцентными лампами в полосе частот 0,15–1,605 МГц); для телевизионных приемников нормируется общее несимметричное (между системой проводов и землей) и симметричное (между проводами) напряжение в полосе частот 0,15–1,605 кГц;

г) напряженность поля ИРП нормируется, как правило, во всей полосе частот 0,15–1000 МГц; для ПНМ-установок нормируемая полоса частот расширена до 12,5 ГГц; в полосе частот 0,15–30 МГц нормируется вертикальная составляющая напряженности электрического поля и (или) горизонтальная составляющая напряженности магнитного

поля; в полосе частот 30–1000 МГц нормируется вертикальная и (или) горизонтальная составляющие электрического поля;

д) для всех норм и стандартов установлена сетка измерительных расстояний при контроле напряженности поля 1–3–10–30–100 м.

Системой норм и стандартов на допускаемые ИРП охвачены в СССР все виды промышленной продукции, являющейся источниками ИРП. Она распространяется как на вновь проектируемые, разрабатываемые, выпускаемые, так и находящиеся в эксплуатации электро- и радиооборудование, аппаратуру, агрегаты, станки и другие изделия, создающие индустриальные радиопомехи, а также на комплексные источники радиопомех, такие, например, как сложная электроустановка, промышленное предприятие, линия электропередачи и т. п.

Нормы и ГОСТ на радиопомехи обязательны для выполнения всеми министерствами, ведомствами, научно-исследовательскими, конструкторскими, проектными, строительно-монтажными организациями и производственными предприятиями.

Оборудование, приборы и любые другие устройства, заказываемые и приобретаемые по импорту, также должны удовлетворять действующим в СССР нормам и стандартам на допускаемые индустриальные радиопомехи, а оборудование и другие изделия, предназначенные для экспорта в другие страны, по требованию заказчика должны удовлетворять нормам на радиопомехи, действующим в этих странах, или особым техническим требованиям. В том случае, когда страна-поставщик и страна-покупатель присоединились к соответствующему стандарту СЭВ, продукция должна соответствовать этому стандарту.

Действующие в СССР нормы и стандарты на ИРП в основном соответствуют международным нормативным документам, стандартам СЭВ и Рекомендациям МСКР. Расхождения, имеющие место, например, в нормах на ИРП от ПНМ-установок, бытовых и других устройств, обусловлены специфическими условиями эксплуатации радиосетей в СССР.

На протяжении 1983–1987 гг. разработан и утвержден ряд нормативных документов на помехозащищенность радиоэлектронной аппаратуры: Нормы 21-86 ГКРЧ СССР на помехозащищенность бытовой радиоэлектронной аппаратуры, Нормы 22-86 на помехозащищенность радиоприемников декаметрового диапазона волн и др.

Значительно более узкой остается номен-

клатура нормативных документов, регламентирующих коэффициенты переноса помех. В настоящее время она содержит только нормы на коэффициенты переноса для морских и речных судов.

Основными тенденциями дальнейшего совершенствования системы международных и отечественных норм и стандартов в области борьбы с ИРП являются:

расширение нормируемой полосы частот; расширение номенклатуры защищаемых радиоэлектронных средств.

### 63.3. ИСПЫТАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИРП

Испытания изделий на соответствие нормам и стандартам на допускаемые ИРП проводятся в соответствии с ГОСТ 16842-82 [63.2], с нормами и стандартами на соответствующие группы источников ИРП ([63.3] и др.).

Испытаниям подлежат серийно выпускаемые устройства и опытные образцы устройств. При необходимости (например, при наличии жалоб на радиопомехи) испытываются устройства, находящиеся в эксплуатации. При этом к каждому устройству предъявляется требование соответствия норме.

Испытания проводят в специально оборудованных местах и в необходимых случаях в условиях эксплуатации (на месте установки устройства). В условиях эксплуатации испытываются ЛЭП, контактные сети электрифицированных железных дорог и городского электротранспорта, электрические и тяговые подстанции, высокочастотные промышленные, научные и медицинские установки перед вводом в эксплуатацию, а также по согласованию с ГИЭ Министерства связи СССР некоторые типы устройств, относящиеся к промышленному оборудованию и к аппаратуре проводной связи.

Испытания серийно выпускаемых устройств проводят службы технического контроля предприятия-изготовителя или отраслевой организации министерства или ведомства. Приемочные испытания опытных образцов проводят организации, назначаемые министерствами и ведомствами.

Испытания устройств, находящихся в эксплуатации, проводят предприятия, эксплуатирующие эти устройства, или службы ГИЭ.

При испытаниях серийно выпускаемых устройств производят случайную выборку устройств из партии готовой продукции, принятой техническим контролем предприятия-изготовителя.

Устройства единичного выпуска испытывают каждое в отдельности.

### Условия испытаний

Испытания проводят на специальных стендах, оборудованных поворотными устройствами, общим контуром заземления, измерительной аппаратурой, измерительными устройствами.

Стенд размещается либо в измерительном помещении, экранированной или безэховой камере, либо на специальной измерительной площадке. Выбор места размещения стенда определяется условием: на частоте измерения уровень посторонней помехи, измеренный при выключенном источнике ИРП, должен быть не менее чем на 10 дБ ниже нормы. Обычно для контроля напряжения ИРП удовлетворительным является любое из перечисленных мест размещения стенда при условии достаточной фильтрации питающей сети. Основным вариант размещения стенда для контроля напряженности поля ИРП — измерительная площадка. К ней предъявляются требования в соответствии с ГОСТ 16842-82. Подвод электрического питания от сети к испытуемым изделиям и к измерителю помех должен осуществляться кабелем, проложенным в земле, при этом щит коммутации кабеля располагается возможно дальше от границы площадки.

В случаях, когда уровни посторонних радиопомех не позволяют проводить испытания на открытой измерительной площадке, разрешается размещать стенд в безэховой камере с соблюдением определенных метрологических требований, оговоренных в нормах. Этот вид размещения стенда применяется все более широко, так как обеспечивает наибольшую повторяемость результатов измерений и независимость от внешних условий.

### Измерительные приборы

Основным измерительным прибором, используемым при контроле ИРП, является стандартный измеритель ИРП, характеристики которого отвечают требованиям ГОСТ 11001-80 «Приборы для измерения промышленных радиопомех». Измеритель ИРП представляет собой селективный измерительный приемник с квазипиковым детектором, обеспечивающим пропорциональность отсчета уровня помех ее звуковому восприятию на выходе радиовещательного приемника с амплитудной модуляцией.

Для применения в СССР Госстандартом СССР разрешены следующие измерители ИРП на разные полосы частот: NLMZ-4 — 10–150 кГц; FSM-6 — 0,15–30 МГц; FSM-11 — 10 кГц — 30 МГц; FSM-7, ULMZ — 30–

300 МГц; FSM-8 — 30–1000 МГц; DLMZ — 300–1000 МГц.

В настоящее время предприятие RFT, ГДР, осуществляющее поставки измерителей ИРП в СССР, приступило к выпуску модернизированных измерителей ИРП, обеспечивающих возможность электронного управления, автоматического вывода результатов на цифropечать и графopостроители, что позволяет частично автоматизировать процесс контроля ИРП. Первая партия измерителей ИРП FSM-11 на полосу частот 10–30 МГц поступила в СССР в 1983 г., FSM-21 (30–1000 МГц) — в 1990 г. Одновременно предприятием RFT начата разработка перспективных измерителей ИРП с встроенными микропроцессорами, обеспечивающими автоматический режим работы всех элементов измерительного стенда на протяжении полного цикла испытаний источника ИРП.

В случаях оперативных полевых измерений взамен измерителей ИРП применяются измерители-искатели радиопомех, обладающие меньшими габаритами, но дающие меньшую точность измерения: BSM-301 — 0,15–30 МГц и BSM-401 — 30–300 МГц. Предприятием RFT планируется модернизация и этих измерителей.

Стандартные измерители ИРП содержат в своем составе следующие измерительные устройства: эквиваленты сети, пробники напряжения, магнитные (рамочные) и электрические (штыревые, дипольные, биконические, логопериодические) антенны на соответствующие полосы частот. Вновь разрабатываемые измерители ИРП содержат также в своем составе поглощающие клеши и токосъемники.

Основные недостатки современных измерителей ИРП — их громоздкость, недостаточную диапазонность антенн, малую чувствительность измерителей по полю — планируется преодолеть в ближайшие годы путем разработки и выпуска малогабаритных активных измерительных антенн на широкие полосы частот, перехода на новую элементную базу.

Для контроля кратковременных ИРП на выход промежуточной частоты измерителя ИРП подключается специальный прибор: анализатор кратковременных ИРП. Анализатор осуществляет временной анализ выбросов огибающей процесса ИРП и регистрирует ряд параметров этих выбросов, регламентированных Нормами 4-87. Из стран — членов СЭВ анализатор кратковременных помех KTMZ-5 выпускает предприятие INCO ПНР.

С целью расширения парка приборов, используемых для контроля ИРП, в СССР ведется работа по оценке возможности использования спектроанализаторов для конт-

роля ИРП. Отечественные спектроанализаторы нового поколения С4-82 (300 Гц – 1,5 ГГц), С4-83 (10 Гц – 1 мГц) обладают значительным динамическим диапазоном и абсолютной калибровкой тракта, что позволяет использовать их для контроля по крайней мере таких источников однородных по структуре ИРП, как радиоприемники, телевизоры, автомобили, устройства с электродвигателями, при условии оснащения спектроанализаторов широкополосными измерительными антеннами, блоками предварительной селекции, соответствующими детекторами.

#### Обработка и оценка результатов испытаний

Соответствие продукции требованиям стандартов или норм на ИРП устанавливаются на каждой частоте в отдельности.

Исходя из методики задания норм для оценки продукции на соответствие норме необходимо сравнить с  $L$  следующую величину:  $\mu_{U_{изм}} + t_p \sigma_{U_{изм}}$ . Однако продукция проходит испытания выборочно, и размеры выборки  $n$  ограничены исходя из экономических соображений. Ограниченность выборки не позволяет получить точные значения параметров  $\mu_{U_{изм}}$ ,  $\sigma_{U_{изм}}$ . По результатам измерений вычисляются их оценки  $\mu_{U_{изм}}^*$  и  $\sigma_{U_{изм}}^*$ :

$$\mu_{U_{изм}}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 20 \lg U_{изм i};$$

$$\sigma_{U_{изм}}^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [20 \lg U_{изм i} - \mu_{U_{изм}}^*]^2}.$$

В качестве условия приемки партии принимается выполнение неравенства:  $\mu_{U_{изм}}^* + k \sigma_{U_{изм}}^* \leq L$ . При этом в силу случайности  $\mu_{U_{изм}}^*$  и  $\sigma_{U_{изм}}^*$  существует некоторый риск браковки кондиционной партии  $\alpha$  (риск изготовителя) и риск приемки некондиционной партии  $1 - \alpha$  (риск потребителя). Конкретные значения  $k$  в зависимости от  $n$  и  $\alpha$  определяются по таблицам нецентрального  $t$ -распределения. В настоящее время в нормах СССР и МСКР приняты значения  $k$ , соответствующие риску потребителя  $1 - \alpha = 0,2$  и риску изготовителя соответственно  $\alpha = 0,8$  [63.2].

Равнозначные результаты контроля партии получаются при применении процедуры контроля по доле «дефектной» продукции, основанной на биномиальном законе распределения числа источников помех в случайной выборке  $n$ , для которых  $(20 \lg U_{изм i}) > L$ . В этом случае, исходя из того же значения риска потребителя

Таблица 63.1

Число испытанных устройств при		Допускаемое число устройств, у которых значение радиопомех превышает нормируемое
$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,95$	
7	13	0
14	22	1
20	29	2
26	36	3
32	43	4
38	50	5

$1 - \alpha = 0,2$ , оговаривается допустимое число таких источников помех в выборке (табл. 63.1). Такая же процедура применяется при контроле источников кратковременных ИРП, где фиксируется не уровень ИРП, а факт превышения нормы.

#### 63.4. ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА

Основными помехоподавляющими элементами являются помехоподавляющие конденсаторы, дроссели, провода, помехоподавляющими устройствами – помехоподавляющие фильтры, экраны, экранированные камеры и помещения. устройства заземления.

##### Помехоподавляющие конденсаторы

Обычные конденсаторы малоэффективны для фильтрации ИРП ввиду относительно большого индуктивного сопротивления токам высокой частоты и большой добротности резонансного контура, образуемого элементами конденсатора на высоких частотах, поэтому для помехоподавления применяются специальные помехоподавляющие конденсаторы.

По конструкции помехоподавляющие конденсаторы подразделяются на следующие виды [63.4]:

двухполюсные с двумя изолированными от корпуса выводами;

двухполюсные опорные, одним из выводов которых является металлический корпус;


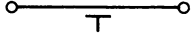
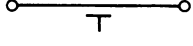

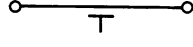
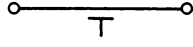
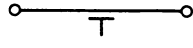

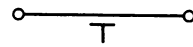
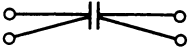
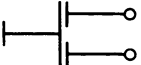
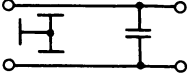
проходные некоаксиальные, все выводы которых являются токонесущими;

проходные коаксиальные, одним из выводов которых является металлический корпус, а другим – токонесущий центральный проводник или стержень;

блоки конденсаторов, конструктивно объединенных в одном корпусе.

В табл. 63.2 представлена номенклатура типовых помехоподавляющих конденсаторов,

Таблица 63 2 Помехоподавляющие конденсаторы

Тип конденсатора	ТУ	Классификация	Максимальное напряжение, В	Емкость, мкФ	Максимальный проходной ток, А	Схема
К10У-1	ОЖО.460 052 ТУ	Проходной	350	0,00015 – 0,00033	–	
КТП	ОЖО.460 038 ТУ	»	2000	0,00033	10	
КТП-Е	ОЖО 460 032 ТУ	»	250	$8 \cdot 10^{-6} - 0,01$	15	
КО-Е	ОЖО 460 032 ТУ	Опорный	250	$1,5 \cdot 10^{-5} - 0,0047$	–	
К10-51	ОЖО.460.186 ТУ	Проходной	350	$3,9 \cdot 10^{-6} - 0,0047$	10	
К10П-4	ОЖО 460.035 ТУ	»	350	$3,9 \cdot 10^{-6} - 0,0068$	10	
КТПМ-1	ОЖО.460.112 ТУ	»	160	$68 \cdot 10^{-5}$	5	
КО-1	ОЖО.460.153 ТУ	Опорный	500	$6,8 \cdot 10^{-6} - 0,0047$	–	
К10-54	ОЖО.460 199 ТУ	Проходной	350	$4,7 \cdot 10^{-6} - 6,8$	–	
К50-33	ОЖО.464.222 ТУ	Четырехвыводной	160	470 – 22 000	–	
КЗ	ОЖО 462 026 ТУ	Защитный	500; 1600	0,1 – 1	–	
ЗБ	ОЖО 462 005 ТУ	»	250	0,022 – 1	20	

Продолжение табл. 63.2

Тип конденсатора	ТУ	Классификация	Максимальное напряжение, В	Емкость, мкФ	Максимальный проходной ток, А	Схема
ОКП	ОЖО 462 096 ТУ	Проходной	125	0,047 – 0,22	40	
КБП	ОЖО.462 103 ТУ	»	500; 1600	0,022 – 2	70	
ОКБП	ОЖО.462.014 ТУ	»	500, 1600	0,022 – 2	42	
КБПС-Ф	ОЖО 462 096 ТУ	»	250	0,1 – 0,22	40	
ОБПТ	ОЖО 462 096 ТУ	»	50	0,22 – 1	300	
МБП	ОЖО.462 048 ТУ	»	36	2 – 10	600	
ОППТ	ОЖО.461.026 ТУ	»	50	0,1 – 0,25	60	
К73-18	ОЖО.461.113 ТУ	»	30	0,27	10	
К75-37	ОЖО 464 129 ТУ	Защитный	250	0,1 – 0,68	10	
К75-41	ОЖО.464.145 ТУ	»	250	0,228 – 0,5	–	
К75-42	ОЖО.464.152 ТУ	Проходной	1600	0,0047 – 10	160	
К75-43	ОЖО 464 153 ТУ	Защитный	1600	0,1 – 10	–	
К73-28	ОЖО 461 157 ТУ	Проходной	1600	0,022 – 2,2	100	
К73-27	ОЖО 461 145 ТУ	»	80	10	–	



Продолжение табл. 63.2

Тип конденсатора	ТУ	Классификация	Максимальное напряжение, В	Емкость, мкФ	Максимальный проходной ток, А	Схема
K53-28	ОЖО.464.216	Защитный	40	15,0–470	—	
K73-21	ОЖО.461.147 ТУ	»	250; 500	0,1–10	10	
K75-П-4	ОЖО 464 019 ТУ	Опорный	500; 1000	0,022–1	—	

выпускаемых отечественной промышленностью.

Двухполюсные конденсаторы можно использовать для ослабления помех на низких частотах. Такие элементы при малой длине выводов способны эффективно подавлять помехи до частоты 5–10 МГц.

Опорные помехоподавляющие конденсаторы могут использоваться до частот 30–50 МГц.

Для подавления помех, распространяющихся по несимметричному контуру «провод–земля», в полосе частот до 1000 МГц, применяются проходные коаксиальные конденсаторы, представляющие собой отрезок коаксиальной линии с малым волновым сопротивлением.

Симметричный проходной коаксиальный конденсатор (блок из двух несимметричных проходных конденсаторов) является по существу отрезком двухпроводной электрической линии с очень малым волновым сопротивлением, а его электрическая схема соответ-

ствует схеме уравновешенного Т-образного звена симметричного фильтра нижних частот. Такие конденсаторы могут использоваться для эффективного подавления помех в двухпроводных симметричных цепях до частоты 100 МГц.

В 1978 г. начал выпуск серии малогабаритных и надежных в эксплуатации металлопленочных проходных некоаксиальных конденсаторов K73-21, предназначенных для подавления ИРП до частоты 100 МГц в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов K73-21 представлены на рис. 63.1, внешний вид – на рис. 63.2.

Конденсаторы K10-44 имеют высокие удельные массогабаритные характеристики (среди керамических конденсаторов), что делает их перспективными для использования в малогабаритной аппаратуре. Характеристики вносимого затухания конденсаторов представлены на рис. 63.3, внешний вид – на рис. 63.2. Конденсаторы K53-17 отличаются высокой эффективностью в широкой полосе частот – от сотен герц до тысячи мегагерц (рис. 63.4, 63.2).

### Помехоподавляющие дроссели

При подавлении ИРП на частотах ниже 30 МГц применяют витковые дроссели (катушки на ферромагнитных сердечниках). В цепях с рабочими токами до 3 А рекомендуется использовать высокочастотные дроссели типа ДМ (ГИО-477.605 ТУ). Частотные характеристики вносимого затухания дросселей типа ДМ приведены на рис. 63.5. При токе более 3 А можно применять дроссели фильтров

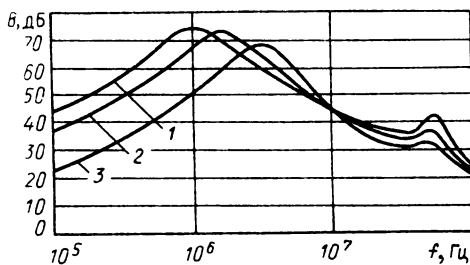


Рис. 63.1. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов типа K73-21: 1 – 10 мкФ, 50 В; 2 – 2,2 мкФ, 250 В; 3 – 0,47 мкФ, 250 В

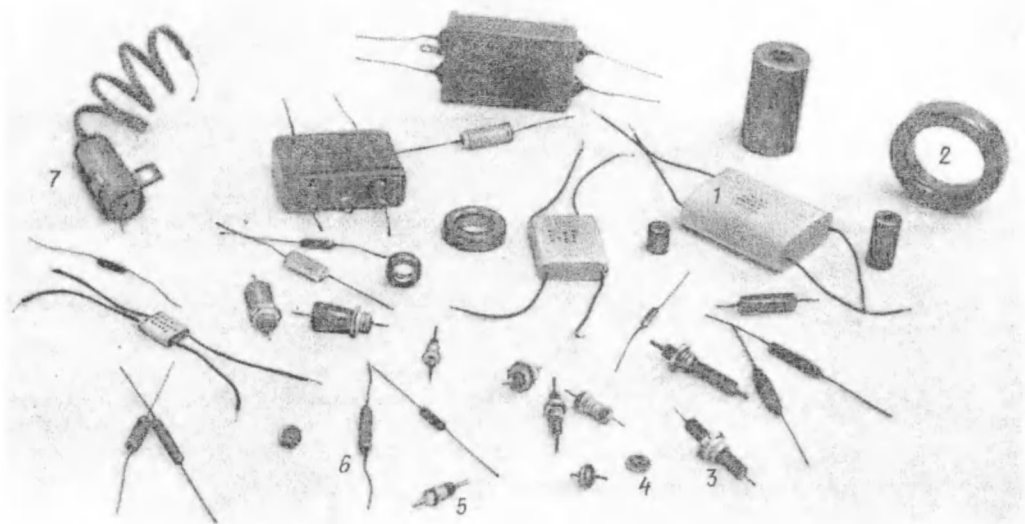


Рис. 63.2. Помехоподавляющие конденсаторы, дроссели, сердечники, фильтры:  
 1 – конденсатор К73-21; 2 – сердечник ПП-90; 3 – фильтр Б23; 4 – конденсатор К10-44; 5 – фильтр Б23Б;  
 6 – дроссель ДМ; 7 – фильтр Б15-2

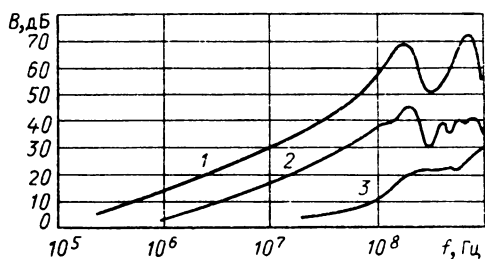


Рис. 63.3. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов типа К10-44:  
 1 – 0,022 мкФ; 2 – 3000 пФ; 3 – 100 нФ

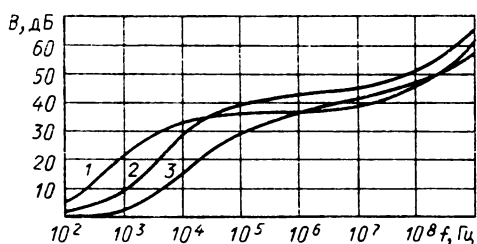
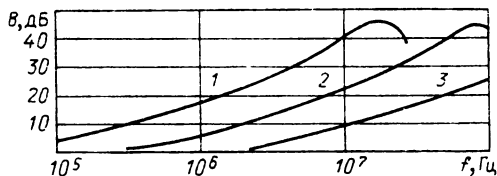


Рис. 63.4. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов типа К53-17:  
 1 – 68 мкФ, 6,3 В; 2 – 15 мкФ, 16 В; 3 – 2,2 мкФ, 6,3 В

Рис. 63.5. Частотные характеристики вносимого затухания дросселей типа ДМ:  
 1 – ДМ-0.1. 600 мкГн; 2 – ДМ-0.1. 50 мкГн; 3 – ДМ-3. 10 мкГн



выпрямителей типа Д (ОЖО.475.013 ТУ), выполненные на броневых ленточно-разрезных сердечниках типа ШЛ. Для рабочих токов 1–25 А применяют дроссели соответственно типов Д222, Д245, Д253, Д262 и Д270. В цепях с частотами питающей сети 5–50 кГц и амплитудами пульсаций до 25 В применяют дроссели типа Д5 (ОЖО.475.020 ТУ).

Приведенная номенклатура дросселей не может удовлетворить все существующие потребности. Важным моментом при самостоятельной разработке помехоподавляющих дросселей является выбор ферромагнитного материала сердечника. Учитывая широкий диапазон частот, в котором должны работать дроссели, и значительные токи подмагничива-

ния, предпочтение следует отдавать сравнительно низкопроницаемым ферромагнитным материалам: никель-цинковым ферритам с относительной магнитной проницаемостью от 100 до 600 и альсиферу марки ТЧ-90. На частотах до 100 МГц используются кольцевые и трубчатые сердечники из МО-пермаллоя марок ПП-90 и ПП-250 (ПЯО.707.394 ТУ-ЛУ). Сердечники марок ПП-90 и ПП-250 имеют следующие конструкции и типоразмеры: кольцевые —  $K10 \times 6 \times 5$ ;  $K15 \times 7 \times 6,7$ ;  $K19 \times 11 \times 6,7$ ;  $K24 \times 13 \times 7$ ;  $K36 \times 25 \times 9,7$ ;  $K44 \times 28 \times 10,3$ ; трубчатые —  $T5 \times 1,5 \times 7$ ;  $T8 \times 2,8 \times 10$ ;  $T10 \times 4 \times 20$ ;  $T16 \times 8 \times 30$ ;  $T22 \times 10 \times 40$ .

Высокочастотное сопротивление виткового дросселя рассчитывается по формуле

$$Z_L = j\omega L + R_{\Pi} / (j\omega C_{\Pi} R_{\Pi} - \omega^2 C_{\Pi} L + 1),$$

где  $L$  — индуктивность дросселя;  $R_{\Pi}$  — активное сопротивление дросселя;  $C_{\Pi}$  — паразитная межвитковая емкость.

При подавлении ИРП на частотах выше 30–50 МГц, особенно в цепях с рабочими токами выше 40 А, применяются безвитковые дроссели, дающие значительный выигрыш в размерах, массе, расходе меди, технологичности изготовления. Безвитковый дроссель представляет собой прямолинейный токонесящий проводник с надетым на него трубчатым магнитопроводом из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Для безвиткового дросселя сопротивление в омах

$$Z_L = 2\omega(\mu'' + j\mu') h \ln D/d \cdot 10^{-10},$$

где  $\mu''$  — относительная вязкая магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника;  $\mu'$  — относительная упругая магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника;  $h$  — длина сердечника, мм;  $D$  — внешний диаметр сердечника, мм;  $d$  — внутренний диаметр, равный диаметру токонесящего стержня, мм.

Практически можно получить безвитковые дроссели с номинальными индуктивностями от десятых долей до единиц микрогенри.

Конструктивно ферромагнитные части безвитковых дросселей имеют самую различную конфигурацию (трубки, шайбы, бусы и пр.) в зависимости от их размещения: на открытых участках проводов, на штырях многопроводных разъемов, в местах прохода через стенки экранов и пр.

Безвитковые дроссели могут включаться не только в однопроводную цепь. Широкое применение они получили для подавления синфазных составляющих токов в многопроводных кабелях и в оплетках экранированных и коаксиальных кабелей. С этой целью набор ферритовых шайб или трубок с возможно меньшим диаметром отверстия (составной сердечник) надевается непосредственно на кабель с изолирующей оболочкой. Вносимое затухание ферритовой трубки длиной 30 см с относительной проницаемостью материала  $\mu_r = 600$  для синфазной составляющей тока достигает 30–50 дБ на частотах соответственно 100–1000 МГц.

### Помехоподавляющие фильтры

В случаях, когда требуется большее помехоподавление, чем обеспечивают отдельные помехоподавляющие элементы, применяются помехоподавляющие фильтры. В настоящее время отечественная промышленность выпускает несколько серий помехоподавляющих фильтров, основные данные которых приведены в табл. 63.3, внешний вид фильтров некоторых серий — на рис. 63.6.

В качестве емкостных элементов фильтров используются выпускаемые серийно конденсаторы. В качестве индуктивных элементов применяются витковые и безвитковые дроссели на составных ферритовых или альсиферовых сердечниках, малочувствительных к подмагничивающим токам.

Наиболее высокие удельные характеристики получают в выпускаемых в настоящее время промышленностью керамических проходных фильтрах, построенных на основе

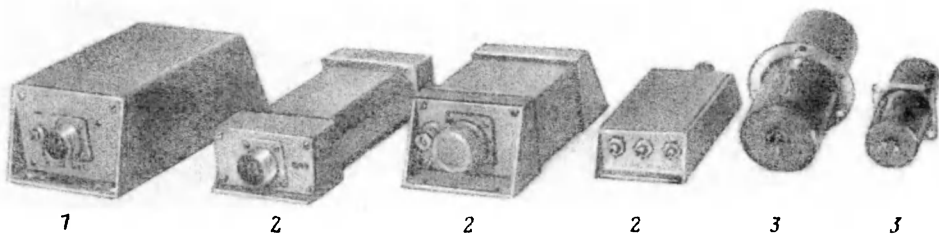


Рис. 63.6. Помехоподавляющие фильтры:

1 — фильтры типа ФПМД; 2 — фильтры типа Ф, 3 — фильтры типа Б15-3

Таблица 63.3. Помехоподавляющие фильтры

Тип фильтра	ГОСТ или ТУ	Частота рабочего тока, Гц	Рабочий ток, А	Номинальное напряжение, В			Полоса частот, МГц	Вносимое затухание, дБ	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
				постоянно-токовая	частотой 50 Гц	частотой 400 Гц				
ФП-1	760 295 046 ТУ	0-400	2,5	500	220	110	0,15-1000	60	350 × 100 × 60	2,5
ФП-2	То же	0-400	4	250	110	65	0,15-1000	60	350 × 100 × 60	2,5
ФП-3	»	0-400	4	500	220	110	0,15-1000	60	430 × 150 × 80	4,5
ФП-4	»	0-400	4	1000	500	220	0,15-1000	60	430 × 150 × 80	4,5
ФП-5	»	0-400	10	500	220	110	0,15-1000	60	430 × 150 × 80	4,5
ФП-6	»	0-400	20	500	220	110	0,15-1000	60	430 × 150 × 80	4,5
ФП-7	»	0-400	1	250	110	60	0,15-1000	80	430 × 150 × 80	4,5
ФП-8	»	0-400	2,5	1000	500	220	0,15-1000	80	470 × 170 × 80	6
ФП-9	»	0-400	4	1000	380	110	0,15-1000	80	470 × 170 × 80	6
ФП-10	»	0-400	10	500	220	110	0,15-1000	80	470 × 170 × 80	6
ФП-11	»	0-400	16	1000	380	110	0,15-1000	100	560 × 210 × 80	8,5
ФП-12	»	0-400	20	500	220	110	0,15-1000	100	560 × 210 × 80	9,5
ФП-13	»	0-400	20	1000	500	220	0,15-1000	100	560 × 210 × 80	9,5
ФП-14	»	0-400	40	1000	500	220	0,15-1000	100	560 × 210 × 80	10
ФП-15	»	0-400	70	500	220	110	0,15-1000	100	800 × 210 × 150	25
ФП-24	»	0-400	2,5	500	220	115	0,15-1000	80	280 × 85 × 60	1,8
ФБ-2М	760 329.002 ТУ	0-400	3	250	250	250	10-10000	80	325 × 70 × 72	1,5
ФБ-2Т	То же	0-400	0,1	250	60	60	10-10000	80	420 × 70 × 72	3
ФБ-3М	»	0-400	50	500	220	115	5-10000	80	∅ 160 × 450	10
ФБ-4М	»	0-400	100	500	220	115	5-10000	80	∅ 245 × 500	20
Ф1-2-0,1	Зд3.295.078 ТУ*	0-50	0,1	-	220	-	0,5-500	90	63 × 52 × 21	0,13
Ф2-2-0,4	То же	0-50	0,4	-	220	-	0,5-600	90	63 × 52 × 28	0,16
Ф3-3-0,4	»	0-50	0,4	-	220	-	50-200	70	120 × 52 × 22	0,26
Ф4-3-1,0	»	0-50	1,0	-	220	-	50-200	70	120 × 52 × 27	0,29
Ф5-3-2,0	»	0-50	2,0	-	220	-	80-1000	70	120 × 52 × 27	0,29
Ф6-2-5,0	»	0-50	5,0	-	220	-	0,1-500	90	194 × 134 × 73	1,55
Ф7-3-5,0	»	0-50	5,0	-	220	-	0,1-500	90	218 × 196 × 73	2,25
Ф8-4-5,0	»	0-50	5,0	-	220	-	0,1-500	90	194 × 258 × 73	2,94
Ф9-2-10	»	0-50	10,0	-	220	-	2-300	80	140 × 68 × 46	0,49
Ф10-4-10	»	0-50	10,0	-	220	-	2-300	80	167 × 123 × 47	0,85
Ф11-2-63	»	0-50	63	-	220	-	0,5 × 600	80	228 × 134 × 73	1,5
Ф12-4-63	»	0-50	63	-	220	-	0,5 × 600	80	228 × 258 × 73	2,84
Ф13-1-0,1	»	0-50	0,1	-	220	-	1-400	80	60 × 80 × 12	0,04
Ф14-1-0,4	»	0-50	0,4	-	220	-	1-400	80	50 × 23 × 62	0,07
Ф15-1-1,0	»	0-50	1,0	-	220	-	1-400	80	51 × 25 × 63	0,07
Ф16-1-2,0	»	0-50	2,0	-	220	-	1-400	80	53 × 27 × 65	0,08
ФПМ-Д1	Зд3.295.071 ТУ*	0	1	50	-	-	0,01-1000	70	190 × 82 × 56	1,3
ФПМ-Д2	То же	0	1	50	-	-	0,01-1000	70	200 × 82 × 56	1,3
ФПМ-Д3	Зд3.295.071 ТУ*	0	1	50	-	-	0,01-1000	45	170 × 82 × 56	1,2
ФПМ-Д4	То же	0	5	50	-	-	0,01-1000	70	214 × 134 × 80	2,6
ФПМ-Д5	»	0	5	50	-	-	0,01-1000	55	194 × 134 × 80	2,6
ФПМ-Д6	»	0	10	50	-	-	0,01-1000	60	235 × 151 × 87	3,8
ФПМ-Д7	»	0	20	50	-	-	0,01-1000	25	175 × 82 × 56	1,2
Б15-1	ОЖО 206 016 ТУ*	0	4	150	-	-	0,1-1000	30	∅ 14,8 × 52	0,035
Б15-2	То же	0	4	28	-	-	0,5-1000	45	∅ 14,8 × 42	0,025
Б15-3-1	ОЖО.206.023 ТУ*	0-50	0,2	50	36	-	0,01-1000	60	∅ 14 × 43	0,03
Б15-3-2	То же	0-50	20	50	36	-	10-10000	65	∅ 22 × 23	0,06
Б15-3-3	»	0-50	1	50	36	-	0,1-1000	65	∅ 28 × 87	0,145
Б15-3-4	»	0-50	1	50	36	-	0,1-1000	60	∅ 28 × 107	0,19
Б15-3-5	»	0-50	5	50	36	-	0,1-10000	65	∅ 42 × 112	0,39
Б15-3-6	»	0-50	10	50	36	-	0,1-10000	65	∅ 50 × 142	0,62
Б15-3-7	»	0-50	10	500	220	-	0,1-10000	60	∅ 22 × 67	0,095
Б15-3-8	»	0-50	5	500	220	-	0,1-10000	60	∅ 42 × 112	0,46
Б15-3-9	»	0-50	63	500	220	-	0,1-10000	60	∅ 42 × 77	0,37
Б15-3-10	»	0-50	63	500	220	-	0,1-10000	65	∅ 42 × 112	0,54
Б15-3-11	»	0-50	1	500	36	-	1-1000	60	∅ 22 × 77	0,11
Б15-3-12	»	0-50	5	50	220	-	0,5-1000	60	∅ 42 × 92	0,44
Б15-3-13	»	0-50	5	500	220	-	0,5-1000	65	∅ 42 × 92	0,43
Б15-3-14	»	0-50	1	500	220	-	0,5-1000	60	∅ 28 × 107	0,22
Б15-3-15	»	0-50	5	500	220	-	0,5-1000	60	∅ 42 × 122	0,52
Б7	ОЖО.206.005 ТУ	0-50	5	-	250	-	100-1500	30-60	∅ 6 × 12	0,0025
Б14	ОЖО 206.021 ТУ	0-50	5	-	500	-	100-1500	30-60	∅ 11 × 12	0,004
Б23А	То же	0-50	5	-	300	-	100-10000	30-60	∅ 6 × 12	0,0025

Продолжение табл. 63.3

Тип фильтра	ГОСТ или ТУ	Частота рабочего тока, Гц	Рабочий ток, А	Номинальное напряжение, В			Полоса частот, МГц	Вносимое затухание, дБ	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
				постоянного тока	частотой 50 Гц	частотой 400 Гц				
ФПС-1	760.329.001 ТУ	0–1000	10	—	—	250	0,05–10 000	40	14 × 94	0,2
ФПС-2	То же	0–1000	4	—	—	250	0,05–1000	50	68 × 60	1,1
ФПС-3	»	0–1000	40	—	—	500	1–10 000	40–50	68 × 33	1
ФПС-4	»	0–1000	100	—	—	500	1–10 000	50–60	50 × 185	0,8
ФПС-5	»	0–1000	40	—	—	500	1–10 000	30–40	94 × 250	6
Д19-1	АГО.475.011 ТУ		0,5	—	—	220			40 × 25 × 25	0,2
Д19-2	То же		1	—	—	220			70 × 26 × 50	0,5
Д19-3	»		1	40	—	—			70 × 26 × 50	0,5
Д19-4	»	0–400	2	—	—	220	0,15–300	20–60	70 × 26 × 50	0,5
Д19-5	»		2	40	—	—			70 × 26 × 50	0,5
Д19-6	»		3	12–110	—	—			65 × 16 × 49	0,45
Д19-7	»		5	—	—	220			90 × 50 × 60	1,4
Д19-8	»		5	40	—	—			80 × 35 × 60	0,7

\* Фильтры серийно не выпускаются. Имеется рабочая документация.

дисковых многослойных сегнетокерамических конденсаторов и безвитковых ферромагнитных дросселей. Основными разновидностями таких фильтров являются Г-образное (рис. 63.7) и П-образное (рис. 63.8) звенья. Емкость в таких звеньях может достигать до 10 мкФ и более, индуктивность 0,15 мкГн. Вносимое затухание в полосе частот 0,01–10 МГц не менее 10–50 дБ, в полосе частот 10–1000 МГц — не менее 60 дБ.

При необходимости ослабления помех в силовых цепях в диапазоне СВЧ могут быть использованы отражательно-поглощающие фильтры типа ФПС. Отражение паразитной энергии СВЧ в этих фильтрах достигается за счет внутренних неоднородностей фильтров, создаваемых соответствующим изменением конфигурации конструкции и чередованием вставок из низкоомных и высоко-

омных материалов. Поглощение энергии СВЧ происходит за счет повышенных активных потерь в ферромагнитном наполнителе.

В случае, когда серийно выпускаемые фильтры не удовлетворяют разработчика по каким-либо параметрам, производится расчет и изготовление фильтра по индивидуальному проекту (см., например, [63.5]). Расчет производится с учетом следующих условий, отражающих специфику помехоподавляющих фильтров:

а) помехоподавляющие фильтры в большинстве случаев должны работать как фильтры нижних частот с большой промежуточной областью между полосой пропускания и полосой непропускания; поэтому обычно они строятся по простейшим схемам индуктивно-емкостных фильтров типа К;

б) из-за наличия указанной промежуточ-

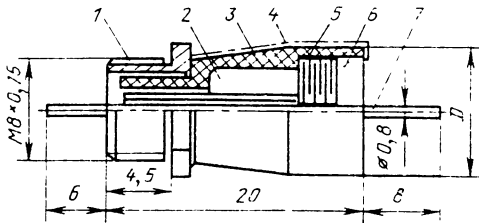


Рис. 63.7. Конструкция проходного керамического фильтра:

1 — втулка; 2 — феррит; 3 — корпус; 4 — металлизированный слой; 5 — конденсатор; 6 — компаунд; 7 — вывод

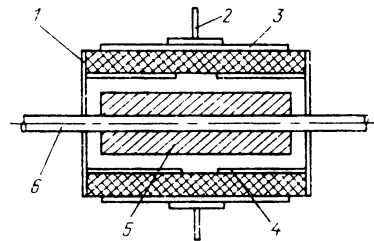


Рис. 63.8. Конструкция фильтра Б14:

1 — сегнетокерамика; 2 — крепежный фланец; 3 — внешняя обкладка; 4 — внутренняя обкладка; 5 — сердечник; 6 — внутренний проводник

ной области расчет для полосы пропускания и полосы непропускания должен производиться раздельно, что значительно упрощает его.

Вносимое затухание рассчитывается для симметричного П-образного фильтра нижних частот по формуле

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n} (1 + Z_i/Z_n + Z_L/Z_n + 2Z_i/Z_C + Z_L/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C) + Z_i^2 Z_L/Z_C^2) \right|;$$

для Т-образного звена по формуле

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n} (1 + Z_i/Z_n + 2Z_L/Z_n + Z_i/Z_C + Z_L/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C) + Z_i^2 Z_L/Z_n Z_C) \right|;$$

для Г-образного звена по формуле

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n} (1 + Z_i/Z_n + Z_L/Z_n + Z_i/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C)) \right|,$$

где  $Z_i$ ,  $Z_n$ ,  $Z_L$ ,  $Z_C$  — соответственно полные сопротивления источника помех, эквивалента сети, дросселя и конденсатора фильтра.

Соотношение между значениями сопротивлений  $Z_L$  и  $Z_C$  выбирается исходя из рабочего напряжения и входного сопротивления сети, в которую будет включен фильтр. При низких сетевых напряжениях и больших рабочих токах целесообразно увеличить емкости конденсаторов и уменьшить индуктивности дросселей. Ограничением здесь служат показатели надежности фильтра и ухудшение энергетических характеристик подключаемого электрооборудования. Кроме того, собственная резонансная частота конденсатора может оказаться ниже нижней частоты защищаемого радиодиапазона и может ухудшить параметры фильтра в полосе задерживания. При малых значениях рабочего тока и высоком рабочем напряжении, особенно в сетях постоянного тока, более рационально применение виткового дросселя относительно большой индуктивности и конденсаторов с малой емкостью. Ограничением здесь является появление перенапряжений при коммутации источников с такими фильтрами. Кроме того, номинальное значение индуктивности виткового дросселя должно быть выбрано так, чтобы частота собственного резонанса дросселя находилась внутри полосы непропускания фильтра. Одновременно расчет индуктивности дросселя должен производиться, исходя из допустимых

потерь напряжения сети на нем  $\Delta U_d$ :

$$L \leq \Delta U_d / 2\pi f_n I_p,$$

где  $f_n$  — промышленная частота сети;  $I_p$  — номинальный рабочий ток на частоте  $f_n$ .

Помехоподавляющие фильтры строятся на низкочастотных элементах, что обеспечивает отсутствие отчетливых резонансных явлений в схеме, соответствующих провалов в характеристике вносимого затухания и наличие дополнительного затухания высокочастотной энергии за счет повышенных активных потерь в ферромагнитных сердечниках дросселей.

Если необходимо гальваническое разделение цепей, то в схему фильтра включается трансформатор. Первичные и вторичные обмотки такого трансформатора следует разделять электростатическим экраном.

### Искрогасители

Искрогасители являются наиболее эффективным средством снижения ИРП от электро-механических коммутационных элементов. Принцип действия искрогасителей заключается в устранении перенапряжений на контактах, вызывающих искровой и дуговой разряды в межконтактном промежутке. Перенапряжения возникают в момент размыкания контактов (намеренного или «отскока» при замыкании) при наличии в коммутируемой цепи последовательно соединенных индуктивности обмоток реле, соединительных проводов и т. д. Искровой пробой межконтактного промежутка происходит при напряжении на контактах  $U_{\text{пр}} = 280 \div 300$  В, при этом напряжение горения дуги  $U_{\text{дл}} = 12 \div 15$  В. Дуговой разряд возникает лишь в тех случаях, когда номинальный ток коммутируемой цепи  $I_0$  превышает минимальный ток поддержания дугового разряда  $I_{\text{дл. min}}$ . Перенапряжения устраняются созданием низкочастотных колебательных или апериодических линейных или нелинейных цепей, шунтирующих либо межконтактный промежуток, либо коммутируемую индуктивность, либо то и другое вместе. Способ шунтирования контактов является наиболее универсальным.

На рис. 63.9 приведены типовые схемы искрогасителей [63.5]. Здесь  $R$  — активное сопротивление коммутируемой цепи,  $R_0$ ,  $L$  — активное сопротивление и индуктивность катушки реле,  $R_n$  и  $C_n$  — активное сопротивление и емкость искрогасителя. В полосе частот до 0,1 МГц вносимое затухание для всех схем составляет 6–10 дБ; на частотах 0,1–30 МГц оно линейно возрастает до 20–40 дБ. Схема искрогасителя выбирается, исходя из конкрет-

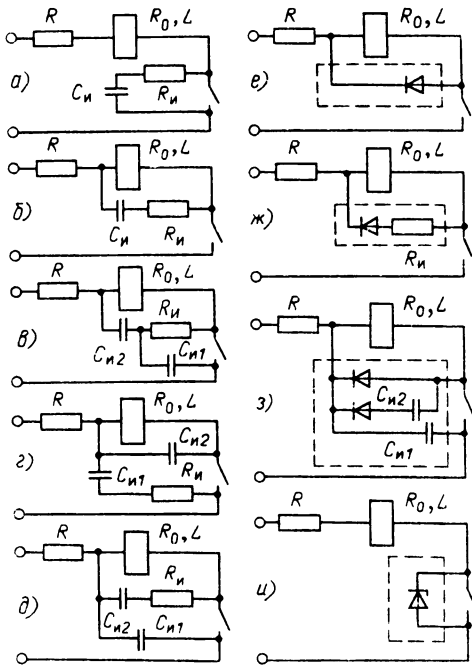


Рис. 63.9. Искрогасители

ных условий: значения рабочего тока  $I_0$ , коммутируемого напряжения  $U_0$ , характера нагрузки.

Так, схема рис. 63.9, а применяется для устранения искрового разряда в цепях, где номинальный ток цепи  $I_0$  меньше минимального тока поддержания дуги  $I_{д.мин}$ . В случае малых значений индуктивности цепи (не более десятков миллигенри) можно применять схему рис. 63.9, б с меньшим значением емкости  $C_{и}$ . Усложненная схема рис. 63.9, в позволяет получить более сглаженный переходный процесс и соответственно меньший остаточный уровень помех; для малых значений  $L$  тот же эффект достигается применением схемы рис. 63.9, г при меньших значениях емкостей. Для цепей, где  $L$  составляет единицы генри, применяется схема рис. 63.9, д. Нелинейные схемы рис. 63.9, е–и обеспечивают снятие перенапряжений при переходных процессах в цепях с большими  $L$ . Простейшая схема рис. 63.9, е применяется, если нет жестких требований к времени задержки срабатывания контактов. Схема рис. 63.9, ж дает меньшее время задержки, но может применяться только при  $I_0 < I_{д.мин}$ . Для цепей с большими коммутируемыми токами можно использовать схему рис. 63.9, з. Схема рис. 63.9, и применяется для устранения искрового разряда.

Таблица 63.4

$I_0$	$U_0$	Характер цепи	Схема искрогасителя по рис. 63.9
$< I_{д.мин}$	Любое	Индуктивный	а–д, ж–и
$> I_{д.мин}$	»	»	з–е, и
$> I_{д.мин}$	$15 < U_0 < 300$	Резистивный	а, и
$< I_{д.мин}$	$> 300$	»	а

Наиболее распространенные схемы искрогасителей для цепей переменного тока 50 Гц с напряжением 220 В – рис. 63.9, а, е, и. Рекомендации по выбору схемы приведены в табл. 63.4, выражения для расчета граничных значений элементов – в табл. 63.5.

Нелинейные элементы (диоды и стабилитроны) для искрогасителей по схемам рис. 63.9, е–и выбираются, исходя из следующих требований к обратному напряжению  $U_{обр}$  и максимально допустимой амплитуде тока в прямом направлении  $I_{доп}$ :

$$U_{обр} > U_0; I_{доп} > I_0.$$

#### Помехоподавляющие провода

Отечественная промышленность выпускает помехоподавляющие провода марки ППЭ (ТУ 16-705.197-81). Основные характеристики проводов приведены в табл. 63.6.

Провода марки ППЭ предназначены для фиксированного монтажа цепей, в которых необходимо подавление помех на частотах выше 1 МГц при рабочем напряжении до 250 В переменного тока с частотой 50 Гц. В качестве изоляции применяется поливинилхлоридный пластикат, наполненный ферритовым порошком (внутренний слой) и керамическим порошком (наружный слой). Поверх изоляции накладывается экран в виде оплетки из медной мягкой проволоки, поверх оплетки – оболочка из поливинилхлоридного пластиката. Такая конструкция обеспечивает не только значительное затухание высокочастотной энергии ИРП вдоль провода, но и малую его излучающую способность и высокую защищенность от внешних электромагнитных полей.

Применение помехоподавляющих проводов является перспективным методом борьбы с ИРП в протяженных слаботочных электрических сетях промышленных предприятий, морских судов и других объектов, позволяющим в ряде случаев отказаться от помехоподавляющих фильтров.

Для автомобильной промышленности выпускается специальный высоковольтный по-

Таблица 63.5

Схема искрогасителя по рис. 63.9	$I_0 < I_{дmin}$		$I_0 > I_{дmin}$	
	$R_{н1}$	$C_{н1}$	$R_{н2}$	$C_{н2}$
<i>a</i>	$\leq U_{пр}/I_0$	$\geq L/R_{н2}^2$	—	—
<i>б</i>	$\leq U_{пр}/I_0 - R$	$\geq L/(R_{н2}^2 + R_{н1}R_0)$	—	—
<i>в</i>	$\leq U_{пр}/I_0$	$C_{н1} \geq L/R_{н1}^2$	—	—
<i>г</i>	$\geq U_0 I_{дmin}$	$C_{н1} \geq 4L/R_0^2$	$\leq U_{дR}'(I_0R - U_{д})$	$C_{н1} \geq 4L/R_0^2$
<i>д</i>	$\leq U_{пр}/I_0$	$C_{н1} \geq 4L/(R_0 + R_{н1})^2$	$\leq U_{д}/I_0$	$C_{н1} \geq 4L/(R_0 + R_{н1})^2$

Примечание. Для схем *в*–*д*  $C_{н1} = C_{н2}$ .

Таблица 63.6

Марка	Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Сопротивление постоянному току на 1 км длины, Ом	Наружный диаметр провода, мм	Коэффициент затухания на 1 м длины, дБ, на частоте, МГц		
				1	10	100
ППЭ-1	1	30	6,7	0,2	1,5	10
ППЭ-1,5	1,5	22	7	0,2	1,5	10
ППЭ-2,5	2,5	13	7,5	0,2	1,5	10
ПВПА	0,05	$2 \cdot 10^6$	7,5	—	—	250

мехоподавляющий провод марки ПВПА (ТУ 16-505-482-73), применяемый для подавления помех во вторичной цепи высокого напряжения системы зажигания двигателей. Токопроводящая жила выполняется в виде спирали из проволоки сплава 40Н, наложенной на сердечник из поливинилхлоридного пластика с ферритовым порошком, поверх спиральной жилы накладывается изоляция.

### Помехоподавляющие экраны

Помехоподавляющие экраны применяются для устранения электромагнитных связей между цепями источников помех и рецепторов и ослабления излученного поля помех. Эффективность экрана, характеризуемая отношением напряженности поля в защищенном пространстве в отсутствие и при наличии экрана, определяется материалом экрана, его толщиной и степенью непрерывности. При выборе материала и толщины экрана используются расчетные выражения для эффективности экранирования бесконечного плоского экрана. В общем случае эффективность экранирования  $\mathcal{E}$ , дБ, определяется тремя составляющими: экранированием за счет поглощения электромагнитной энергии в толще экрана  $\mathcal{E}_п$ , экранированием за счет отражения электромагнитной энергии от границы раздела «пространство–экран»  $\mathcal{E}_{01}$  и экранированием за

счет вторичного отражения  $\mathcal{E}_{02}$  [63.6]

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_п + \mathcal{E}_{01} + \mathcal{E}_{02}.$$

Здесь

$$\mathcal{E}_п = 0,13t \sqrt{f \mu_r \sigma_{отн}},$$

где  $t$  – толщина экрана, мм;  $f$  – частота, Гц;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $\sigma_{отн}$  – удельная проводимость материала, отнесенная к проводимости меди.

В случае работы экрана в поле плоской волны

$$\mathcal{E}_{01} = 168 - 10 \lg(\mu_r f / \sigma_{отн}).$$

Для электрического поля

$$\mathcal{E}_{01}^E = 322 + 10 \lg \sigma_{отн} / (f^3 \mu_r l^2),$$

где  $l$  – расстояние от источника излучения до экрана, м.

Для магнитного поля и  $l < 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны, м)

$$\mathcal{E}_{01}^H = 14,6 + 10 \lg f l^2 \sigma_{отн} / \mu_r,$$

в противном случае  $\mathcal{E}_{01}$  рассчитывается по формуле для плоской волны. В последнем выражении  $\mathcal{E}_{01} \geq 0$ ; если в результате расчета  $\mathcal{E}_{01} < 0$ , надо принимать  $\mathcal{E}_{01} = 0$ . Составляющая  $\mathcal{E}_{02}$ , дБ, обычно отрицательная, играет роль лишь в случае экранирования магнитных полей на низких частотах

$$\mathcal{E}_{02} = 20 \lg(1 - e^{-2t\delta}),$$

где  $\delta$  – эквивалентная глубина проникновения



электромагнитной энергии в толщу экрана, мм.

Справочные данные по характеристикам сплошных экранов приведены в [63.6, 63.7 и др.].

Кроме однородного сплошного металла для электромагнитного экранирования могут использоваться материалы, перечисленные ниже.

а) Многослойные материалы из чередующихся слоев немагнитных и магнитных металлов; в таком экране максимально используются не только затухание в металле, но и отраженные энергии от границ слоев металлов с разными волновыми сопротивлениями. Чем больше разность волновых сопротивлений сопрягаемых металлов, тем выше эффективность экранирования. Наружный слой делается из немагнитных материалов. Хорошие результаты дает сочетание алюминий – сталь – алюминий. Наиболее выгодным сочетанием металлов для создания многослойных экранов является медь и сталь. Двухслойный пермаллоевый экран с медной серединой при общей толщине 2,5 мм дает эффективность экранирования 75–90 дБ на частотах 50–500 Гц. На рис. 63.10 приведены характеристики многослойных экранов для низких частот.

б) Металлические сетки. Эффективность плоского экрана из металлической сетки для плоской волны [63.6], дБ,

$$\mathcal{E} = 20 \lg \left| \frac{1,5 \cdot 10^8}{af \left| \ln \frac{2a}{d} - 1,2 + \frac{10^5 \rho}{\pi^2 f d^2} [\beta(u) + j\alpha(u)] \right|} \right|$$

Здесь  $\alpha(u) = R/R_0$ ;  $\beta(u) = x/R_0$ , где  $R$  – активное сопротивление 1 м проволоки сетки на частоте  $f$ , Ом;  $R_0$  – активное сопротивление 1 м проволоки постоянному току, Ом;  $x$  – индуктивное сопротивление 1 м проволоки, Ом;  $a$  –

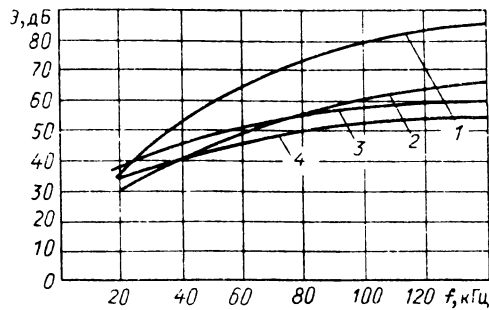


Рис. 63.10. Эффективность экранирования многослойных экранов (толщина каждого слоя 1 мм):

1 – медь – сталь ( $\mu_r = 200$ ) – медь; 2 – медь – свинец – медь; 3 – алюминий – сталь – алюминий; 4 – медь – алюминий – медь

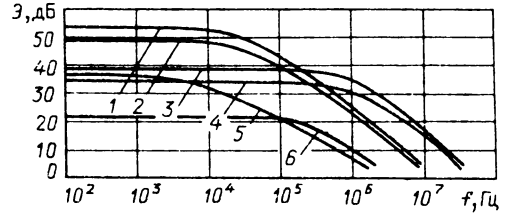


Рис. 63.11. Эффективность сетчатых экранов: 1 – медь,  $d = 0,5$  мм,  $a = 5$  мм; 2 – алюминий,  $d = 0,5$  мм,  $a = 5$  мм; 3 – медь,  $d = 0,1$  мм,  $a = 1$  мм; 4 – алюминий,  $d = 0,1$  мм,  $a = 1$  мм; 5 – сталь,  $d = 0,5$  мм,  $a = 5$  мм; 6 – сталь,  $d = 0,1$  мм,  $a = 1$  мм

линейный размер ячейки сетки, мм;  $d$  – диаметр проволоки сетки, мм;  $f$  – частота, Гц;  $\rho$  – удельное сопротивление проволоки сетки, Ом · мм<sup>2</sup>/м;  $u = d/\sqrt{2} \delta$ ;  $\delta$  – глубина проникновения, мм;  $\alpha(u) = \beta(u) = u/2 \sqrt{2}$  для  $u > 50$ ;  $\alpha(u) = (\sqrt{2}u + 1)/4$ ,  $\beta(u) = u/2 \sqrt{2}$  для  $50 > u > 6$ .

Для  $u < 10$   $\alpha(u)$  и  $\beta(u)$  определяются по графикам [63.6]. На рис. 63.11 приведены характеристики эффективности экранирования некоторых сетчатых экранов в поле плоской волны.

Для магнитного поля эффективность сферического сетчатого экрана

$$\mathcal{E}^H = 20 \lg |1,4 \cdot 10^{-8} r_3| + \mathcal{E}$$

где  $r_3$  – радиус эквивалентного сферического экрана, м;  $\mathcal{E}$  – эффективность экранирования для плоской волны.

Для электрического поля эффективность сферического сетчатого экрана

$$\mathcal{E}^E = 20 \lg \left| \frac{6,3 \cdot 10^7}{r_3 f} \right| + \mathcal{E}$$

Эффективность двухслойного экрана из сетки

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 + 20 \lg 4,2 \cdot 10^{-8} f t_{12}$$

где  $\mathcal{E}_1$  – эффективность экранирования однослойного сетчатого экрана, дБ;  $t_{12}$  – расстояние между сетками, м.

При проектировании сетчатых экранов необходимо иметь в виду следующее: при одинаковых  $d$  и  $a$  медные сетки на низких частотах лучше стальных во столько раз, во сколько удельная проводимость меди больше, чем стали; при  $a = \text{const}$  и одном и том же материале сетки из толстой проволоки эффективнее сеток из тонкой проволоки. Так как влияние контакта в узлах сетки не имеет значения, сетчатый экран можно покрывать красками и антикоррозионными покрытиями, по этой же причине сетки для обеспечения

герметичности можно формировать в неопрене, резине и других упругих материалах. В большинстве случаев сетки изготавливаются из меди, латуни, стали, алюминия. Если сетки являются частью экрана, то они должны быть надежно соединены с основным экраном с помощью сварки, пайки или прижимными рамками.

в) Металлическая фольга толщиной 0,01 – 0,05 мм, в основном из диамагнитного материала – алюминия, латуни, цинка. Эффективность этих материалов при экранировании электромагнитного и электрического поля достаточно высока (25–50 дБ); магнитную составляющую такие материалы ослабляют сравнительно мало. Стальную фольгу отечественная промышленность не выпускает.

Эффективность экранирования «электрически тонкого экрана» [63.6]

$$\mathcal{E} \approx 20 \lg (60\pi/R_n),$$

где  $R_n = 1/\sigma_{\text{отн}}$  – поверхностное сопротивление произвольного квадрата экрана, Ом.

На рис. 63.12 представлены частотные характеристики эффективности экранирования медной фольги.

г) Металлизирующие слои на поверхности неметаллических корпусов. Из существующих способов нанесения покрытий наиболее удобным является метод напыления, когда нанесение металла на подложку осуществляется пульверизацией расплавленного металла струей сжатого воздуха. В качестве подложки используется плотная бумага, картон, ткань, дерево, текстолит, сухая штукатурка и пр. Расчет эффективности экранирования металлизированных корпусов производится по формулам для электрически тонких экранов.

В табл. 63.7 приведены значения требуемого поверхностного сопротивления для обеспечения эффективности экранирования от 20 до 80 дБ.

д) Токопроводящие краски, обеспечивающие эффективность экранирования электромагнитного и электрического поля не менее 30 дБ в широкой полосе частот. В качестве токопроводящего пигмента используется обычно графит или ацетиленовая сажа, в качестве диэлектрического пленкообразующего мате-

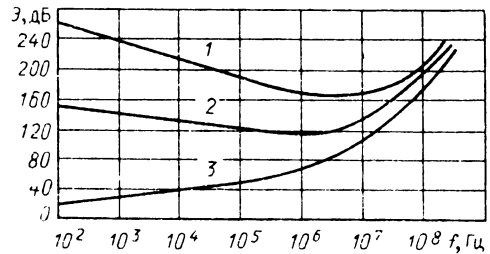


Рис. 63.12. Эффективность экранирования медной фольгой толщиной 125 мкм:

1 – для электрического поля; 2 – для плоской волны, 3 – для магнитного поля

риала – лаки (ТУ МХП Э219-52). Такая краска обладает поверхностным сопротивлением 5–6 Ом при толщине покрытия  $2 \cdot 10^{-4}$  м, имеет хорошую адгезию к металлу, дереву, текстолиту, фанере, оштукатуренным поверхностям. Эффективность экранирования токопроводящими красками рассчитывается по формулам для электрически тонких экранов.

е) Стекла с токопроводящим покрытием (например, из окиси олова), обеспечивающее эффективность экранирования на радиочастотах не менее 30 дБ.

ж) Специальные ткани с металлической нитью, применяемые в основном для биологической защиты персонала в диапазоне СВЧ.

Основной причиной существенного снижения эффективности экранирования реального экрана по сравнению с расчетным является наличие отверстий и щелей.

При проектировании экрана с функционально необходимыми отверстиями следует учитывать следующее:

а) при экранировании сферическим экраном в электрическом поле наиболее неблагоприятной является экваториальная круговая щель, при экранировании в магнитном поле – меридиональная щель;

б) замена одного большого отверстия несколькими малыми, общая площадь которых равна площади большого отверстия, приводит к повышению эффективности экрана в  $\sqrt{n}$  раз, где  $n$  – количество одинаковых отверстий; длинные щели по этой причине целесообразно разбивать перемычками на ряд коротких участков, в том числе щели перфораций;

в) проникновение поля через отверстие при применении патрубка снижается на величину [63.6]

$$\mathcal{E} = 20 \lg |e^{\beta l}|,$$

где  $l$  – длина патрубка, см.

Значения коэффициента  $\beta$  приведены в табл. 63.8.

Таблица 63.7

Эффективность экранирования, дБ	Поверхностное сопротивление, Ом
20	20
20–40	20–2
40–60	2–0,2
60–80	0,2–0,02

Таблица 63.8

Форма патрубка	$\beta$ , см	
	электрическое поле	магнитное поле
Круглый с радиусом $r$ , см	$\frac{2,4}{r}$	$\frac{1,84}{r}$
Прямоугольный с геометрическими размерами $a$ и $b$ , см	$\pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$	$\frac{\pi}{b}$

Для экранирования соединительных кабелей применяются сплошные металлические оболочки, металлические оплетки или ленточные экраны.

Наибольшей эффективностью экранирования обладают сплошные металлические оболочки: свыше 40 дБ. Увеличение диаметра кабеля, а также толщины экрана дает заметное улучшение экранирующих свойств. Сплошные экраны выполняются в основном из стали, алюминия и свинца. Экранирующие свойства кабелей улучшаются при использовании двухслойной конструкции экрана: алюминий — сталь и алюминий — свинец. Для наружных слоев используются немагнитные металлы с большой отражающей способностью (медь, алюминий), для внутренних слоев — магнитные материалы (сталь, пермаллой). До 10 кГц лучший экранирующий эффект дают равные слои меди (алюминия) и стали, выше 10 кГц — тонкие слои меди (алюминия) и толстые слои стали.

Металлические оплетки эффективно подавляют электрические составляющие полей и ослабляют наводки, обусловленные емкостными связями. Эффективность экранирования в полосе частот 20–200 кГц составляет при этом 40–60 дБ. На более низких частотах эффективность экранирования снижается. Магнитные составляющие полей и наводки от них экраны из оплеток ослабляют намного хуже из-за увеличения поверхностного сопротивления оплетки. Двойная медная оплетка симметричных кабелей увеличивает эффективность экранирования на частоте 10 кГц на 12 дБ, на частоте 100 кГц — на 40 дБ.

Кабельные экраны ленточного типа выполняются из меди, алюминия и стальных лент, а также комбинированными: медь — сталь — медь или алюминий — сталь.

На промышленных предприятиях, в научно-исследовательских организациях, медицинских учреждениях широко применяются экранированные кабины и помещения [63.8]. Экраны для помещений и кабин изготавли-

ваются обычно из листовой стали или из медной или стальной сетки. Толщина листовой стали для сплошного экрана с рабочей полосой частот выше 0,15 МГц выбирается только из соображений механической прочности и возможности сварки или пайки отдельных частей экрана и обычно равна 0,5–1 мм.

Вентиляционные отверстия и рабочие проемы выполняются в виде металлических труб, затянутых металлической сеткой, или в виде системы волноводных фильтров (волноводной решетки).

Подводка любых электрических цепей внутрь экранированного помещения осуществляется только через помехоподавляющие фильтры, которые размещаются в экранированном кожухе, имеющем хороший электрический контакт с экраном помещения. Проникновение посторонних линий электросети через экранированное помещение недопустимо.

Трубопроводы водяного охлаждения и отопления в местах входа и выхода из экранированного помещения должны иметь с экраном помещения надежный электрический контакт по всему периметру (с помощью приваренных фланцев). Волноводный фильтр также должен иметь хороший электрический контакт с экраном помещения по всему периметру проема. Если необходима относительно небольшая эффективность экранирования, целесообразно применять экранирование сеткой. В этом случае достаточно просто решаются вопросы вентиляции и освещения.

В зависимости от необходимой эффективности экранирования экранировать помещения необходимо с учетом следующих рекомендаций.

а) Эффективность экранирования 100–120 дБ на частотах выше 100 кГц. Материал экрана — листовая сталь любой марки толщиной 0,5–1 мм, соединение листов — сварка по всем швам внахлест. Окна закрыты двумя слоями густой медной или стальной сетки

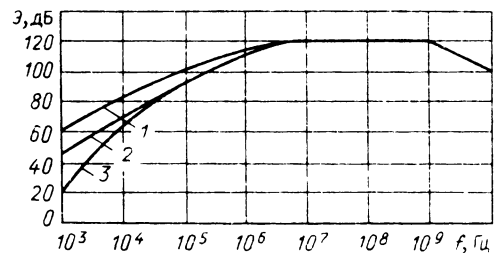


Рис. 63.13. Эффективность экранирования крупногабаритных камер серийного изготовления из низкоуглеродистой стали: 1 — толщина стали 6 мм, 2 — толщина стали 3 мм, 3 — толщина стали 1 мм

с расстоянием между слоями в 50 мм. Контакт сетки оконного проема со стенками – пайка по всему периметру. Дверь должна быть выполнена из листовой стали, электрический контакт с экраном стены осуществляется посредством пружинящей гребенки из фосфористой бронзы. Вентиляция – круглые отверстия с приваренными патрубками длиной, в 3–4 раза большей диаметра отверстия. Частотные характеристики типовых камер зарубежного производства приведены на рис. 63.13.

б) Эффективность экранирования 50–60 дБ. Материал – листовая сталь толщиной 0,5–1 мм или густая медная сетка с ячейкой 1×1 или 2×2 мм и диаметром проволоки соответственно 0,1 или 0,2 мм. Конструкция швов в случае листовой стали – нахлест 20 мм и точечная сварка через 100 мм (расстояние между точками соседних контактов должно быть не более  $0,15 \lambda_{min}$ ). В случае сетки – надежный контакт любой конструкции через 100 мм. Окна затянуты более редкой медной сеткой с обеспечением контакта с экраном стены через 200–400 мм. Дверь – электрический контакт со стенами через 200–400 мм. Вентиляция – отверстия, загнанные редкой медной сеткой.

### 63.5. ПОДАВЛЕНИЕ ИРП В ОТДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ

Одним из основных направлений работ по устранению ИРП является их подавление или локализация непосредственно в месте образования путем воздействия на механизм образования помехи в помехообразующих элементах, фильтрации помехонесущих цепей, выходящих из источника, и экранирования источника ИРП.

Для устройств, создающих электромагнитные колебания для выполнения своих функций (например, для электронных ключей), воздействие на механизм образования ИРП заключается в правильном выборе параметров используемых колебаний с целью максимально возможного ограничения занимаемой полосы частот.

Для устройств, в которых электромагнитные колебания являются чисто паразитными явлениями, возможно радикальное воздействие путем применения элементов, практически не создающих помех, искрогашения или введения плавных регулировок, исключающих броски тока и напряжения. В тех случаях, когда не удается избежать образования ИРП, применяются более дорогостоящие средства – фильтрация и экранирование. Кроме того, эффективным средством снижения излучений от

соединительных цепей является их симметрирование – уменьшение тока в контуре «система проводов – земля» и скручивание симметричных цепей. Скрутка приводит к взаимной компенсации электромагнитных излучений от отдельных участков помехонесущей цепи и снижению общего уровня излучения на 20–40 дБ.

В табл. 63.9 приведены сведения по основным способам снижения ИРП от отдельных источников, на рис. 63.14 – типовые схемы применяемых для этой цели помехоподавляющих фильтров. Более подробные рекомендации содержатся в литературе, указанной в таблице.

### 63.6. КОМПЛЕКСНОЕ И ГРУППОВОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ИРП

Групповым помехоподавлением называется снижение уровней ИРП от группы электроустройств с помощью общих для группы помехоподавляющих фильтров, экранов и т. п.

Комплексное помехоподавление представляет собой сочетание индивидуального и группового помехоподавления, других средств борьбы с ИРП, обеспечивающее выполнение требований Норм, предъявляемых к предприятию как комплексному источнику помех. Среди этих средств – фильтрация, экранирование, рациональная схема контура заземления, правильная прокладка взаимовлияющих цепей и т. д.

Конденсаторные фильтры обычно подключаются на сборных шинах трансформаторных подстанций и распределительных шинах отдельных цехов и зданий комплексного объекта. Силовые и осветительные сети блокируются на землю конденсаторами емкостью 0,5–1 мкФ. Помехоподавляющие фильтры в сетях переменного тока осуществляют дополнительно к своей основной функции частичную компенсацию реактивной мощности, что необходимо учитывать при расчете емкости конденсаторных батарей. При установке и монтаже помехоподавляющих конденсаторов особое внимание необходимо уделять качеству и механической прочности заземления. Монтаж конденсаторов следует выполнять широкими и возможно короткими шинами с надежными контактами. Проектом должна быть предусмотрена установка групповых емкостных фильтров в точках подключения распределительных линий с большим количеством источников помех к магистральным линиям. Групповой емкостный фильтр следует включать между фиксирующей шиной РУ и его заземленным каркасом.

Таблица 63.9. Подавление ИРП от отдельных источников

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Электрические машины	Коммутация коллекторных пластин скользящей щеткой, нарушение контакта из-за плохой притирки щеток, их вибрации, недостаточного давления на кольца, вибрация вала из-за неточной центровки вала и ротора	<p>Симметрирование обмоток возбуждения стагора, увеличение числа секций и коллекторных пластин, применение дополнительных компенсационных обмоток, использование слоистых щеток, тщательное соблюдение технологии сборки; обеспечение надежного электрического контакта между частями корпуса машины, между валом и корпусом; мегаллизация внутренней поверхности пластмассового корпуса; фильтрация питающей электрической цепи; фильтрация конденсаторными блоками емкостью 0,5–1 мкФ стационарных машин большой мощности; симметричная блокировка конденсаторами К73-21 емкостью 0,22–1 мкФ для устройств с малогабаритными коллекторными двигателями хорошего качества с невысокой скоростью вращения и мощностью более 500 Вт; применение комбинированных емкостных фильтров для мало мощных высокооборотных машин с плохо притертыми щетками: К75-37 – 0,22 мкФ ÷ ÷ 2 × 0,0047 мкФ; К75-37 – 0,47 мкФ ÷ ÷ 2 × 0,0047 мкФ, К75-37 – 0,68 мкФ ÷ ÷ 2 × 0,0047 мкФ или сочетания конденсаторов К73-21 с фильтрами Б23, Б7, Б14 (рис. 63.14, а)</p> <p>Для дополнительного помехоподавления на высоких частотах на выводы надеваются ферритовые трубки (бусы) М600НН (УВ7.076.176 ТУ) – схема рис. 63.14, б.</p>

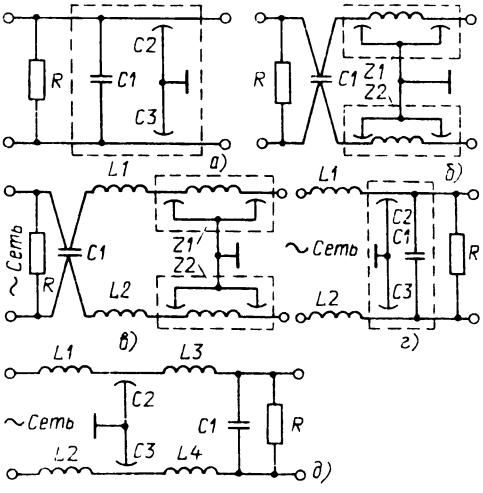


Рис. 63.14. Типовые схемы помехоподавляющих фильтров:

комбинированного емкостного (а), комбинированного с керамическими проходными фильтрами (б), индуктивно-емкостного для низкоомных источников помех (в), индуктивно-емкостного для высокоомных источников помех (г), индуктивно-емкостного для электромеханических устройств:

R – разрядное сопротивление; C1 – симметричный конденсатор большой емкости; C2, C3 – проходные конденсаторы. L1 – L4 – витковые дроссели. Z1, Z2 – фильтры с безвитковыми дросселями

Выключатели, рубильники, реле

Броски тока и напряжения при замыкании, электрическом пробое и дуге в межконтактном промежутке, вибрация и дребезг контактов

Электродвигатели ручного инструмента фильтруются блоками К75-41, особо интенсивные источники помех с электродвигателями – двухзвенными индуктивно-емкостными фильтрами (рис. 63.14, в – для низкоомных источников, 63.14, г – для высокоомных) [63.4]

Применение быстродействующих контактных терморегуляторов с оптимальными характеристиками упругости и сжатия контактов; реостатное (плавное) включение – выключение нагрузок; применение синхронных схем коммутации в моменты, соответствующие нулю тока (напряжения) в коммутируемой цепи, искрогашение; использование корпусов оборудования (шкафов) в качестве электрических экранов схем коммутации; групповая фильтрация

Продолжение табл. 63.9

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Электротранспорт (контактные сети, подвижной состав, тяговые подстанции, системы СЦБ)	Работа электрических машин, преобразователей и регуляторов напряжения, устройств управления, сигнализации и блокировки, отрыв токоприемника от контактного провода, коронирование проводов, перекрытие изоляторов	Фильтрация электрических машин [63.4], искрогашение на контактах реле, включение дросселей (радиореакторов) в токоприемные устройства [63.9, 63.10], применение графитно-угольных токоприемных пластин и вставок, применение рессорной подвески токосъема, установка блокировочных конденсаторов параллельно вентилям тяговых подстанций [63.9]; устранение загрязнения контактных сетей и устройств токосъема, обеспечение надежного контакта в вибрирующих частях конструкций
Воздушные линии и подстанции электропередач	Корона на проводах, высоковольтных частях распределительных и других устройств; пробой и перекрытие дефектных и загрязненных изоляторов; кистевой разряд с острых краев токонесущих частей	Увеличение эквивалентного диаметра проводов путем расщепления каждой фазы на 3–6 проводов, округление острых краев деталей линий и распределительных устройств подстанций; сохранение при монтаже неповрежденной поверхности линейных проводов, установка заградительных экранирующих колец вокруг крепежа гирлянд к проводам фазы, применение стойких изоляционных материалов и тарельчатых изоляторов с малыми диэлектрическими потерями без микротрещин и пузырьков, обеспечение надежных контактов в линейной арматуре и распорках [63.11–63.13], фильтрация оборудования подстанций путем установки конденсаторных блоков между токонесущими цепями и контуром заземления; удаление линий и подстанций от радиоприемных центров и других объектов
Электросварочное оборудование	Сварочная дуга, работа реле, контакторов, искровых высокочастотных генераторов, тиристорных прерыва телей при точечной сварке, электрических машин в автономных сварочных установках	При сварке постоянным током – фильтрация электрических машин и цепи электродов [63.4], [63.13], несимметричная блокировка вторичной питающей сети конденсаторами КБП, К75П-4 или КЗ (0,1–1 мкФ) в шкафу управления; при сварке переменным током с тиристорным регулированием производится установка одно-, двухзвенных фильтров в каждом проводе вторичной цепи, несимметричных конденсаторов 0,01 мкФ и симметричного конденсатора 1 мкФ в первичной цепи сварочного трансформатора; при необходимости сварочное помещение экранируется, на вводы питающих электрических цепей дополнительно устанавливаются экранированные двухзвенные индуктивно-емкостные фильтры
Промышленные, научные, медицинские и ультразвуковые и высокочастотные установки	Излучение от элементов электрической схемы, включая рабочие элементы, на основной частоте и высших гармониках	Ограничение полосы частот, разрешенных для использования, поблочное или полное экранирование [63.15] с применением вентиляционных и технологических проемов в виде волноводных фильтров, применение двухтактных схем генераторов, обеспечивающих подавление четных гармоник, фильтрация питающих и управляющих электрических цепей. Для емкостной блокировки малоомощных установок применяются конденсаторы 0,022–1 мкФ (в зависимости от рабочей частоты); для незаземленных ПНМ-установок с рабочими частотами выше 20 МГц используются проходные фильтры Б23, Б7, Б14 или проходные конденсаторы К10-44, КТП, К10П-1 емкостью не более 5000 пФ, для установок с более низкими рабочими частотами – более сложные схемы [63.5]; для фильтрации низкочастотных мощных заземляемых установок применяются П-образные схемы с конденсаторами К75П-4 и КЗ (0,47–1 мкФ), для высокочастотных установок – схемы с проходными конденсаторами КБП-Ф, фильтры серий ФП и ФБ, для рабочих частот не выше 20 МГц и рабочих токов до 40 А используются витковые дроссели

Продолжение табл. 63 9

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Другое оборудование предприятий и учреждений	Работа электрических машин, магнитных пускателей, реле, контакторов, тиристорных схем регулирования и пр	Несимметричная емкостная блокировка источников помех конденсаторами КБП, КЗ или К75П-4 (0,47–1 мкФ), дополнительная симметричная блокировка конденсаторами МБГЧ или К75-10 (0,47–1 мкФ) интенсивных источников помех, силовых пусковых стативов, щитов питания кранового и сварочного оборудования; более сложная фильтрация тиристорных схем регулирования [63 5]; установка искрогасителей на разрывные контакты, применение фазированных коммутаторов в цепях переменного тока, установка электростатических экранов между обмотками разделительных трансформаторов, применение экранированных кабелей и силовых кабелей со скрученными парами; применение одноточечной низкочастотной и многоточечной высокочастотной схем заземления всего оборудования на общий контур рабочего заземления [63 7], устройство отдельного контура заземления электроники; экранирование пультов управления, стативов, помещений с интенсивными источниками помех, прокладка групп кабелей в металлических трубах и коробах, разделяющая прокладка силовых и сигнальных цепей
Устройства вычислительной техники	Работа импульсных схем питания, управления, коммутации	Применение индуктивно-емкостных схем фильтрации по рис. 63.14, д с конденсаторами К73-21, К75-10, К75-37, МБГЧ и высокочастотными дросселями серии ДМ или типовыми дросселями выпрямителей Д222–Д270 [63.5], искрогасителей, скрученных проводов, экранирование блоков питания
Лифты различных систем Автомобили и другие устройства с двигателями внутреннего сгорания	Работа электрических машин и контактных систем управления и блокировки Скачки напряжения и тока в низковольтных и высоковольтных цепях системы зажигания основного или вспомогательных двигателей, устройства управления, сигнализации, работа электрогенератора	Применение вводных устройств серии ВУ, снабженных емкостными фильтрами Заглубление свечей в тело блока цилиндров, рациональная компоновка системы зажигания с целью минимизации длины высоковольтных проводов, применение высоковольтных помехоподавляющих проводов, обеспечение надежного контакта в электрических цепях и предотвращение пробоев по поверхности пластмассовых и резиновых изоляторов, включение помехоподавляющих сопротивлений в цепи распределителя зажигания и каждой свечи [63.16]; емкостная блокировка низковольтной цепи системы зажигания и других цепей (на автомобилях с радиостанциями применяется полная экранировка системы зажигания)
Приборы и оборудование бытового и коммунального назначения, подключаемые к электрическим сетям жилых зданий	Работа электрических машин, блоков питания радиоэлектронной аппаратуры, автоматов и выключателей, светильников с люминесцентными лампами	Фильтрация электроустройств с электродвигателями и блоков питания [63.5], экранирование электроустройств, металлизация пластмассовых корпусов, применение прокладок из токопроводящей резины, применение быстродействующих герморегуляторов, синхронных выключателей, искрогасителей, улучшение технологии изготовления и конструкции люминесцентных ламп

Прокладка силовых, осветительных, телефонных, телеграфных и радиотрансляционных проводов на территории завода должна осуществляться подземным кабелем; в производственных помещениях, насыщенных электротехникой и сигнальными коммуникациями, — в металлических трубах и коробах, обеспечивающих необходимую экранировку. В кабель-

ных колодцах и коридорах прокладка должна выполняться таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное удаление сигнальных цепей от цепей питания и силового управления оборудованием. Пересечения электрических кабелей должны выполняться по возможности под прямым углом. Предпочтительным для всех видов цепей является применение кабелей

со скрученными проводами, так как скрутка дает существенное снижение уровней излученных и наведенных ИРП.

При проектировании протяженных трасс следует рассматривать варианты их выполнения помехоподавляющим кабелем, обеспечивающим затухание на сравнительно небольших расстояниях всех видов помех: синфазных и противозаземных, созданных в данной сети и наведенных на нее извне.

Питание охранного освещения осуществляется подземным экранированным кабелем с установкой на концах кабеля емкостных фильтров.

Для питания от электросети предприятий, расположенных вне его территории, жилых и других объектов должны быть предусмотрены трансформаторные понижающие подстанции, размещенные вне территории предприятия. Питание указанных подстанций должно осуществляться подземным кабелем с экранирующей оболочкой. Трассы этих кабелей должны располагаться по возможности дальше от объектов — мощных источников помех, а также от электросетей, связанных с этими объектами.

Весьма эффективной мерой группового помехоподавления является установка емкостных помехоподавляющих фильтров в электрической сети зданий, в которых осуществляется радиоприем: несимметричных емкостных фильтров 0,5 мкФ на силовых вводах в здание, симметричных и несимметричных (между нулевым проводом и арматурой) емкостных фильтров 0,5 мкФ в электрических щитах на лестничных площадках. Для помех, проникающих в здание от внешних источников, первая мера дает увеличение затухания на 20–26 дБ в диапазоне длинных и средних волн, вторая — на 10–20 дБ. Для помех, создаваемых оборудованием самого здания, вторая мера дает эффективность 20–30 дБ.

Во избежание возникновения помех радиоприему в жилых зданиях следует избегать размещения в них коммунальных и других предприятий (мастерских, поликлиник и пр.), насыщенных электрооборудованием.

При разработке мероприятий для комплексного подавления радиопомех от промышленных предприятий можно воспользоваться схемами и графиками по [63.17].

### Список литературы

- 63.1 ГОСТ 14777-76. Радиопомехи промышленные. Термины и определения.
- 63.2 ГОСТ 16842-82. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний источников промышленных радиопомех.
- 63.3. **Нормы 1-72-9-72.** Общесоюзные нормы допустимых промышленных радиопомех. М. Связь, 1973.
- 63.4. **Горичева Г. А., Добромыслов Е. Р.** Конденсаторы. М. Радио и связь, 1984.
- 63.5. **Рекомендации по типовым схемам подавления промышленных радиопомех от электроустройств различного назначения.** М. Связь, 1979.
- 63.6. **Шаниро Д. Н.** Основы теории электромагнитного экранирования. М. Энергия, 1975.
- 63.7. **Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи.** Вып. 2. М. Сов. радио, 1978.
- 63.8. **Рекомендации по применению устройств и монтажу экранированных помещений и кабин.** М. Связь, 1966.
- 63.9. **Рекомендации по подавлению радиопомех, создаваемых городским электротранспортом.** М. Связь, 1968.
- 63.10. **Рекомендации по подавлению радиопомех, создаваемых железнодорожным электротранспортом в диапазоне частот 0,15–400 МГц.** М. Связь, 1965.
- 63.11. **Журавлев Э. Н.** Радиопомехи от коронирующих линий электропередачи. М. Энергия, 1971.
- 63.12. **Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ.** М. СЦНТИ ОРГРЭС, 1975.
- 63.13. ГОСТ 6490-84. Изоляторы стеклянные линейные подвесные тарельчатые на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия.
- 63.14. **Рекомендации по подавлению радиопомех, создаваемых электросварочным оборудованием.** М.: ЦБТИ Министерства электропромышленности СССР, 1952.
- 63.15. **Рекомендации по подавлению радиопомех, создаваемых высокочастотными установками промышленного назначения в диапазоне частот 0,15–400 МГц.** М. Связь, 1965.
- 63.16. **Рекомендации по подавлению радиопомех, создаваемых электрооборудованием автомобилей общего назначения с бензиновыми двигателями.** М. Связь, 1965.
- 63.17. **Жондечкая О. Л., Полонский Н. Б.** Комплексное подавление радиопомех от промышленных предприятий. М. Связьиздат, 1961.



# Раздел 64

## ПРОМЫШЛЕННЫЕ ШУМЫ

### СОДЕРЖАНИЕ

64.1	Виды промышленных шумов и вибраций и методы их измерения Общие сведения	600
	Шум (600). Вибрация (601) Методы измерения (602)	602
64.2.	Шум и вибрация электрических машин	603

Нормы на шум и вибрацию (603) Аэродинамический шум (605). Вибрация от неуравновешенности роторов (606). Магнитная вибрация и шум (606). Подшипниковая вибрация и шум (608). Вибрация и шум щеточно-коллекторного узла (609). Шум трансформаторов (610)	610
Список литературы	610

#### 64.1. ВИДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ШУМОВ И ВИБРАЦИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Перед машиностроением поставлена задача создания машин и механизмов с низким уровнем шума и вибраций. Виброакустические показатели машины могут служить критерием качества ее проектирования и изготовления. Следует подчеркнуть отрицательное воздействие шумов и вибраций машин на их надежность и долговечность. Кроме того, шумы и вибрации, проникая в окружающую среду, оказывают вредное влияние на сооружения, установки, аппараты и другие устройства, снижают производительность труда человека, ухудшают его здоровье. Последнее обстоятельство выдвигает борьбу с вибрацией и шумами в ряд социальных задач, решению которых придается важное значение, о чем свидетельствует специальное постановление Совета Министров СССР от 3 октября 1973 г. № 726 «О мерах по снижению шума на промышленных предприятиях, в городах и в других населенных пунктах», а в «Основы законодательства Союза ССР и союзных республик о здравоохранении» включена статья 24 «Предупреждение и устранение шума». В Законе СССР «Об охране атмосферного воздуха» указывается, что «местные Советы народных депутатов, министерства, государственные комитеты, ведомства, предприятия, учреждения и организации обязаны разрабатывать и осуществлять мероприятия по предупреждению, снижению и устранению вредного воздействия на атмосферу звуковых колебаний, включая шумы, излучения и т. п.».

Шум и вибрация по большей части взаимосвязаны, так как колебания любой детали, с одной стороны, передаваясь через узлы крепления на фундамент, создают структурный шум, а с другой стороны, распростра-

няясь в воздухе, вызывают воздушный шум, который мы в дальнейшем будем называть просто шумом.

Вибрации и шумы машин и механизмов, в частности электрических, характеризуются интенсивностью и частотой. Встречающиеся в практике частоты вибраций и шумов можно разделить на диапазоны: низких (ниже 200—300 Гц), средних (от 200—300 до 2000 Гц) и высоких частот (выше 2000 Гц). Колебания с частотами ниже 16 Гц называют инфразвуком, выше 20 кГц — ультразвуком.

Наиболее вероятными причинами низкочастотных колебаний являются неуравновешенность вращающихся масс, несоосность приводов, нарушение геометрии деталей и узлов машин и механизмов, периодические силы, возникающие при рабочем процессе от переменного магнитного поля. Колебания среднечастотного диапазона связаны с высшими гармониками магнитных сил и сил, обусловленных неуравновешенностью ротора, нарушением геометрии кинематических пар, динамическим взаимодействием элементов ротора и статора. Высокочастотный диапазон колебаний обусловлен гармониками магнитных сил зубцового порядка и упругими волнами, распространяющимися по элементам конструкции.

#### Шум

При рассмотрении физических характеристик звукового поля удобнее пользоваться термином «звук», оставив за понятием «шум» более широкий смысл.

Интенсивность звуков, с которыми приходится иметь дело на практике, изменяется в очень широких пределах.

Для удобства пользования введена логарифмическая величина — уровень интенсивнос-

ти звука, дБ,

$$L_I = 10 \lg (I/I_0),$$

где  $I$  – оцениваемая интенсивность, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – пороговая интенсивность.

Для оценки воздействия звука на человека вводится величина – уровень звукового давления

$$L = 10 \lg (p^2/p_0^2) = 20 \lg (p/p_0),$$

где  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – пороговое звуковое давление.

Связь между уровнем интенсивности звука и уровнем звукового давления устанавливается соотношением

$$L_I = L + 10 \lg (\rho_0 c_0 / \rho c),$$

где  $\rho_0$  и  $c_0$  – плотность воздуха и скорость звука при нормальных атмосферных условиях. При нормальных атмосферных условиях  $L_I = L$ .

Звук характеризуется интенсивностью и частотой. Шум – это совокупность звуков разных частот.

Воздействие шума на человека происходит через слуховой аппарат. Ухо человека способно воспринимать только определенный диапазон частот звуков – примерно от 16 до 20 000 Гц. Оно обладает наибольшей чувствительностью в области частот примерно от 800 до 6000–7000 Гц.

Частотный диапазон, воспринимаемый человеческим ухом, превышает 10 октав (октава – полоса частот, граничные значения которой относятся как 2 : 1, например 80 : 40; 160 : 80 и т. д.). В практике виброакустических измерений получила распространение и более узкая полоса частот –  $1/3$  октавы, имеющая отношение граничных частот, равное  $\sqrt[3]{2}$ .

Чувствительность человеческого слуха падает с понижением частоты звука. Для того чтобы сблизить результаты объективных измерений звука и субъективного его восприятия, вводится величина, называемая уровнем звука.

$$L_A = L - \Delta L_A.$$

Она измеряется в децибелах (по шкале  $A$ ) и представляет собой скорректированный уровень звукового давления. Стандартные величины, которыми пользуются при коррекции по частоте, приведены ниже:

На рабочих местах уровни звука регламентируются ГОСТ 12.1.003-83 [64.14]. Наименьшее значение (50 дБА) установлено для помещений конструкторских бюро, помещений для программирования, лабораторий. На постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий допускается уровень звука 85 дБА.

Уровень интенсивности и уровень звукового давления, измеренные в одной точке, не могут полностью характеризовать источник шума, в особенности если измерения производятся в разных условиях. Для адекватной оценки различных источников шума вводится понятие звуковой мощности, уровень которой не зависит от условий измерения.

Звуковой мощностью  $P$ , Вт, источника принято называть звуковую энергию, излучаемую источником в единицу времени. Уровень звуковой мощности, дБ, источника определяется соотношением

$$L_P = 10 \lg (P/P_0),$$

где  $P_0 = I_0 S_0 = 10^{-12}$  Вт – пороговая мощность, равная мощности, переносимой звуковой волной интенсивности  $I_0$  через единичную площадку  $S_0 = 1$  м<sup>2</sup>.

Параметры источников шума приведены в ГОСТ 23941-79 [64.15].

### Вибрация

Периодической вибрацией называют колебательный процесс, в котором значения величины повторяются через одинаковые промежутки времени. Периодическая вибрация может характеризоваться несколькими колебательными величинами одновременно. Гармонические составляющие определяют частотный спектр вибрации, который представляется графически набором дискретных линий (полигармоническая вибрация). К параметрам линейной вибрации относят: перемещение, скорость, ускорение, а к параметрам угловой – угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение.

Амплитудные значения перемещения  $s$ , скорости  $v$  и ускорения  $a$  гармонической вибрации связаны между собой соотношением

$$a = \omega v = \omega^2 s,$$

где  $\omega$  – круговая частота вибрации.

При исследовании полигармонических вибраций целесообразно использовать средне-

Частота, Гц . . . . .	16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_A$ , дБ . . . . .	80	42	26,5	16,1	8,6	3,2	0	-1,2	-1,0	1,1

арифметическое, среднеквадратичное и пиковое значения колебательной величины. Указанные величины измеряют в диапазоне от нижней граничной частоты  $f_n$  до верхней граничной частоты  $f_v$  (от нескольких герц до 10 кГц). Иногда необходимо разделить рассматриваемый диапазон на участки, которые называют поддиапазонами или полосами частот. Ширину полосы выражают в интервалах, причем, как и при исследовании шума, интервал, для которого  $f_v = 2f_n$ , называют октавой, а если  $f_v = \sqrt[3]{2} f_n$  – третьоктавой.

### Методы измерения

Для измерения шумовых характеристик необходимы строго определенные акустические условия измерения: или свободное, или диффузное звуковое поле. Свободное звуковое поле определяется наличием обратной пропорциональности между звуковым давлением и расстоянием от центра источника звука до исследуемой точки. Диффузное поле характеризуется постоянством плотности звуковой энергии в различных точках поля и постоянством углового распределения потока звуковой энергии в каждой точке.

Согласно ГОСТ 23941-79 устанавливаются следующие методы определения шумовых характеристик: точные, технические и ориентировочные. Точные измерения могут быть выполнены в реверберационной камере или в заглушенной камере (со звукоотражающим или звукопоглощающим полом), технические измерения – в реверберационном помещении, в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью, ориентировочные измерения – в закрытом помещении или на открытой площадке.

Заглушенная камера представляет собой хорошо изолированное от внешних шумов и вибраций помещение, в котором звуки почти полностью (до 99 %) поглощаются при падении на ограждающие поверхности. Звук поглощают специальные конструкции, обеспечивающие плавный переход от малого акустического сопротивления воздуха в камере к большому акустическому сопротивлению стен. Для облицовки применяют либо слоистые конструкции, либо клиновидные. Последние получили наибольшее распространение при строительстве камер.

Клинья собираются в блоки и закрепляются на определенном расстоянии от внутренней поверхности ограждений камеры.

Слоистые покрытия, более простые в изготовлении, состоят из перемежающихся слоев воздуха и поглощающего материала. Толщина слоев материала (или его плотность) возрастает по мере приближения к внутренней

поверхности ограждения.

Коробка камеры изготавливается из кирпича или железобетонных плит и устанавливается на амортизаторы или фундамент, изолированный от общего фундамента здания. Дверь камеры плотно закрывается и по акустическим свойствам аналогична стенам камеры. В камере со звукопоглощающим полом примерно на среднем уровне натягивают капроновую или стальную сетку для передвижения обслуживающего персонала.

Реверберационной или диффузной камерой называют шумо- и виброизолированное помещение, в котором звук практически полностью отражается от ограждающих поверхностей. Для создания диффузного звукового поля камера в плане или в вертикальной плоскости имеет форму неправильного многоугольника.

Существующие для целей измерения приборы можно разделить на две основные группы: универсальные и специальные.

Работа универсальных приборов для измерения шума и вибрации основана на схожих принципах. Основу прибора составляют измерительный преобразователь сигнала и регистрирующее устройство с рядом корректирующих и регулирующих цепей. При этом многие приборы позволяют производить измерения обоих параметров при подключении соответствующей первичного измерительного преобразователя (датчика).

В настоящее время при динамических процессах наиболее широко применяют пьезоэлектрические измерительные преобразователи.

Основными преимуществами таких преобразователей являются: широкий диапазон рабочих частот, большая вибрационная и ударная прочность, простота конструкции, малая чувствительность к магнитным полям, возможность создания высокотемпературных преобразователей с малыми размерами и массой.

Емкостные преобразователи также находят применение для измерения параметров вибрации, но особенно широко они используются для акустических измерений (конденсаторные микрофоны).

Специальные приборы функционально предназначены только для измерения определенного параметра, например виброперемещения, виброскорости, виброускорения, звукового давления. Конструкция приборов в значительной степени определяется типом и конструкцией измерительного преобразователя.

Универсальные приборы позволяют путем смены измерительного преобразователя производить измерения как параметров вибрации, так и шума. Эти приборы выполняются, как

Таблица 64.1. Технические данные приборов для измерения шумов и вибраций

Тип	Измеряемый параметр	Частотный диапазон	Диапазон измерения	Масса, кг
<i>СССР</i>				
ВШВ-003	Звуковое давление	10 Гц – 20 кГц	130 дБ	4
	Виброскорость	10 Гц – 20 кГц	0,05 – 10 мм/с	
	Виброускорение	10 Гц – 20 кГц	$3,16 \times 10^{-3} \pm 10^3$ м/с <sup>2</sup>	
ШВК-И	Звуковое давление	1,4 Гц – 12,5 кГц	30 – 130 дБ	7
	Виброскорость	1,4 Гц – 12,5 кГц	85 – 170 дБ	
	Виброускорение	1,4 Гц – 12,5 кГц	34 – 130 дБ	
ШУМ-1м	Звуковое давление	31,5 Гц – 8 кГц	30 – 130 дБ	1,5
<i>Данич (Brüel and Kjaer)</i>				
Прецизионный шумомер, модель 2230	Звуковое давление	20 Гц – 20 кГц	24 – 130 дБ	0,5
	Виброускорение	2 Гц – 20 кГц	0,01 – 100 м/с <sup>2</sup>	
	Виброскорость	2 Гц – 20 кГц	0,1 – 100 мм/с	
Портативный вибронализатор, модель 3513	Вибросмещение	2 Гц – 20 кГц	0,001 – 10 мм	5
<i>ГДР</i>				
Точный импульсный шумомер типа 00023	Звуковое давление	2 Гц – 20 кГц	20 – 140 дБ	5
	Виброскорость	2 Гц – 20 кГц	–	
	Виброускорение	2 Гц – 20 кГц	–	

правило, в виде измерительных усилителей, которые могут комбинироваться с различного рода корректирующими фильтрами и схемами усреднения.

Для исследования спектрального состава шума и вибрации используются электронные анализаторы. Анализатор с полосовыми фильтрами получил название спектрометра. Для нормирования шума и вибрации в основном применяют спектрометры с октавными и третьоктавными полосами пропускания. Узкополосные анализаторы применяют для диагностирования и исследовательских целей, определения резонансных частот. В последнее время получили распространение анализаторы в реальном масштабе времени, удобные для визуального наблюдения и анализа частотных спектров.

Принципы действия, конструкции и характеристики приборов для виброакустических исследований подробно описаны в [64.11]. Технические данные некоторых наиболее распространенных приборов приведены в табл. 64.1.

## 64.2. ШУМ И ВИБРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

### Нормы на шум и вибрацию

Электромашиностроение является одной из тех отраслей, где вопросам снижения шума

и вибрации постоянно уделяется большое внимание.

В качестве нормируемых величин уровня шума принимают [64.16] средний уровень звука на расстоянии 1 м от контура машины при наличии звукоотражающего пола, обозначаемый  $L_{d1A}$ , или скорректированный уровень звуковой мощности  $L_{pA}$ , и соответствующие ему октавные уровни звуковой мощности  $L_p$ , определяемые по ГОСТ 11929-81.

Средний уровень звука, дБА, вычисляется по формуле

$$L_{d1A} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^k 10^{0,1L_{d1Ai}} \right) - 10 \lg k,$$

где  $L_{d1Ai}$  – уровень звука в  $i$ -й точке измерения на расстоянии 1 м от контура машины, дБА;  $k$  – количество точек измерения. Выбор точек измерения осуществляется согласно ГОСТ 11929-81.

Если усредняемые уровни отличаются друг от друга не более чем на 5 дБА, то за средний уровень принимается их среднеарифметическое значение.

В зависимости от требований к уровню шума электрические машины (ЭМ) согласно ГОСТ 16372-84 разделяются на четыре класса. При отнесении различных типов электрических машин к классам по их уровню шума можно руководствоваться следующим примерным перечнем:

класс 1 – машины, к которым не предъ-

Таблица 64.2. Предельные значения средних уровней звука  $L_{d1A}$  ЭМ класса 1, дБА

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин											
	600—900		900—1320		1320—1900		1900—2360		2360—3150		3150—3750	
	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22
Свыше 0,25 до 1,1	67	64	70	67	71	69	74	72	75	75	79	78
Свыше 1,1 до 2,2	69	65	70	68	73	71	78	75	80	78	82	81
Свыше 2,2 до 5,5	72	68	74	71	77	75	82	78	83	81	85	84
Свыше 5,5 до 11	75	72	78	75	81	78	86	81	87	84	90	87
Свыше 11 до 22	78	75	82	78	85	81	87	83	91	87	93	90
Свыше 22 до 37	80	78	84	81	86	83	89	85	92	88	95	92
Свыше 37 до 55	81	79	86	83	88	86	92	88	94	90	97	93
Свыше 55 до 110	84	82	89	85	92	88	93	90	96	92	98	95
Свыше 110 до 220	87	85	91	87	94	90	96	93	98	95	100	96
Свыше 220 до 400	88	86	92	90	96	92	98	94	99	95	102	98
Свыше 400 до 630	89	88	93	92	97	94	99	95	100	96	103	98
Свыше 630 до 1000	91	90	95	93	98	95	100	96	101	97	104	99

Примечание Степень защиты по ГОСТ 17494-72: IP44 — исполнение закрытое, обдуваемое, IP22 — исполнение защищенное, с внутренней вентиляцией (продуваемое).

Таблица 64.3. Предельные значения скорректированных уровней звуковой мощности электрических машин класса 1, дБА

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин											
	600—900		900—1320		1320—1900		1900—2360		2360—3150		3150—3750	
	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22
Свыше 0,25 до 1,1	76	73	79	76	80	78	83	81	84	84	88	87
Свыше 1,1 до 2,2	79	75	80	78	83	81	87	84	89	87	91	90
Свыше 2,2 до 5,5	82	78	84	81	87	85	92	88	93	91	95	94
Свыше 5,5 до 11	85	82	88	85	91	88	96	91	97	94	100	97
Свыше 11 до 22	89	86	93	89	96	92	98	94	101	97	103	100
Свыше 22 до 37	91	89	95	92	97	94	100	96	103	99	105	102
Свыше 37 до 55	92	90	97	94	99	97	103	99	105	101	107	104
Свыше 55 до 110	96	94	101	97	104	100	105	102	107	104	109	106
Свыше 110 до 220	100	98	104	100	106	103	108	105	110	107	112	108
Свыше 220 до 400	102	100	106	104	109	106	111	107	112	108	114	110
Свыше 400 до 630	104	103	108	106	111	108	113	109	114	110	116	111
Свыше 630 до 1000	106	105	110	108	113	110	115	111	116	112	118	113

являются специальные требования по уровню шума;

класс 2 — машины с малозумными подшипниками качения, со специальными малозумными конструкциями вентиляторов и т. д. Их уровень шума должен быть на 5 дБА ниже, чем допустимые значения шума ЭМ класса 1;

класс 3 — машины с пониженным использованием активных материалов, закрытые (с водяным или естественным охлаждением), с глушителем вентиляционного шума, с подшипниками скольжения. Уровень шума этих ЭМ должен быть на 10 дБА ниже, чем допустимый уровень шума ЭМ класса 1;

класс 4 — машины со звукоизолирующим кожухом или другими существенными изменениями конструкции, выполненными с целью снижения шума. Предельные значения шума

должны быть не менее чем на 15 дБА ниже, чем для класса 1.

Машины класса 1 при степени защиты IP44 и IP22 (по ГОСТ 17494-72) должны иметь в режиме холостого хода средний уровень звука  $L_{d1A}$  не выше значений, указанных в табл. 64.2, либо скорректированный уровень звуковой мощности  $L_{pA}$  не выше значений, указанных в табл. 64.3.

Машины всех классов должны иметь октавные уровни звуковой мощности  $L_{pi}$  не выше значений, определяемых по формуле

$$L_{pi} = L_{pA} + \Delta L_i,$$

где  $L_{pA}$  — скорректированный уровень звуковой мощности, дБА;  $\Delta L_i$  — поправка для расчета октавных уровней звуковой мощности, значения которой приведены ниже:

$f_i$ , Гц	. . .	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_i$ , дБ	. . .	.15	.16	.14	.7	3	4	6	10

За оцениваемый параметр вибрации, создаваемой электрической машиной, по ГОСТ 16921-83 [64.18] принимается максимальное из среднеквадратичных значений виброскорости  $v_e$ , мм/с, измеренных по ГОСТ 12379-75 [64.17] в диапазоне от рабочей частоты вращения до 2000 Гц. Для электрических машин с рабочей частотой вращения до 3600 об/мин допускается измерение  $v_e$  до 1000 Гц.

Если в стандартах или технических условиях на машины конкретных типов предусмотрен спектральный анализ вибрации, то в качестве нормируемых параметров вибрации наряду с  $v_e$  принимают спектральные составляющие виброскорости до 2000 Гц или виброускорений  $a_e$ , м/с<sup>2</sup>, в диапазоне, включающем более высокие частоты.

Допускается выражение результатов измерения вибрационного ускорения и скорости, дБ:

$$L_a = 20 \lg(a_e/a_0);$$

$$L_v = 20 \lg(v_e/v_0),$$

где базовая величина ускорения  $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>; базовая величина скорости  $v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  мм/с.

Для оценки вибрации электрических машин установлены следующие классы вибрации:

Класс	Максимально допустимое значение $l_e$ , мм с
0,28	0,28
0,45	0,45
0,71	0,71
1,12	1,12
1,8	1,80
2,8	2,80
4,5	4,50
7,1	7,10

В зависимости от требований к значению вибрации электрические машины делят на три категории: нормальные – *N*; с пониженной вибрацией – *R*; с особо жесткими требованиями к вибрации – *S*. Для однотипных машин допустимые вибрации при переходе от одной категории к другой ужесточаются не менее чем на один класс.

### Аэродинамический шум

Аэродинамический шум создается вентиляторами, а также при движении воздушного потока в элементах вентиляционных установок. Этот шум проникает в помещения или окружающую атмосферу и может создавать там уровни шума, превышающие допустимые по нормам.

В настоящее время в основу расчетов вентиляционных шумов электрических машин положены эмпирические формулы, позволяющие приблизительно определить уровень аэродинамического шума (без явно выраженных тональных составляющих).

Появление тональных звуков в электрических машинах наблюдается, если перед встроеным вентилятором или сзади него имеются неподвижные препятствия в виде входных решеток, ребер станины или щита, крепящих болтов и других выступающих частей. Частота этих звуков равна

$$f = n z_n k,$$

где  $n$  – частота вращения вентилятора, об/с;  $z_n$  – число лопаток вентилятора;  $k = 1, 2, 3, \dots$  – порядок гармоники.

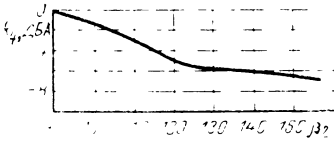
Интенсивность тонального шума, возникающего в электрических машинах, не поддается расчету и зависит от многих факторов: скорости потока в шестой степени; расстояния между кромками лопаток вентилятора и препятствиями; размеров и формы препятствий, искажающих поток, и т. д.

Для наиболее распространенных асинхронных электродвигателей со степенью защиты IP44 и центробежным вентилятором предлагается для расчета уровня звука  $L_A$ , дБА, в контрольной точке на расстоянии 1 м от контура машины формула, в которой использованы результаты экспериментальных и теоретических исследований [64.6]:

$$L_A = 60 \lg u_2/u_0 + 10 \lg D_2 b_2/l_0^2 + \sum_{i=1}^6 k_i + 4,$$

где  $u_2$  – окружная скорость наружных кромок лопаток вентилятора, м/с;  $D_2$  – наружный диаметр лопаток вентилятора, м;  $b_2$  – ширина наружной кромки лопаток вентилятора, м;  $u_0$  и  $l_0$  – опорные значения, 1 м/с и 1 м соответственно;  $k_1$  – поправка, дБА, зависящая от относительной подачи вентилятора  $Q_{отн} = Q/Q_{max}$ ;  $Q$  – подача вентилятора;  $Q_{max}$  – максимальная подача вентилятора. Если  $Q_{отн}$  неизвестно, то приближенно можно принять  $k_1 \approx 2,7$  дБА;  $k_2 = (10 - 24,7 D_2)$  – поправка, зависящая от диаметра вентилятора, дБА;  $k_3$  – поправка, зависящая от угла атаки входной кромки лопатки вентилятора. Для радиальных лопаток  $k_3 = 1$  дБА;  $k_4$  – поправка, зависящая от угла наклона лопатки на выходе воздуха (рис. 64.1).  $k_5$  – поправка, характеризующая звукоизоляцию кожуха вентилятора, дБА. Для обдуваемых ЭМ  $k_5 = -(4 \pm 2)$  дБА.

Формула применима при окружных скоростях наружных кромок вентилятора  $u_2 = 15 \div 100$  м/с, наружном диаметре вентиля-

Рис. 64.1. Зависимость  $k_4$  от  $\beta_2$ 

тора  $D_2 \leq 0,5$  м, относительной ширине лопаток  $b_2/D_2 = 0,1 \div 0,35$ , причем расстояние от кромок лопаток вентилятора до любого неподвижного препятствия в направлении основного движения потока воздуха должно быть не менее  $0,1D_2$ .

Более подробно о расчете вентиляционного шума электрических машин — см. [64.6].

Для снижения вентиляционного шума при проектировании электрических машин необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Уменьшать расход охлаждающего воздуха и статический напор вентилятора, что может быть достигнуто уменьшением неоправданно больших запасов по температуре обмоток, применением более нагревостойкой изоляции и более рациональных потокораспределений воздуха и т. д.

2. Число лопаток вентилятора следует выбирать таким, чтобы расстояние между ними по средней линии окружности было примерно равно длине пути воздуха в межлопаточном канале.

3. Переднюю стенку центробежного вентилятора без ущерба для производительности можно выполнять неподвижной либо заменять кожухом.

4. Кожух вентилятора обдуваемых машин следует профилировать таким образом, чтобы поток на выходе прижимался к корпусу. С этой целью кромку кожуха достаточно отогнуть вовнутрь на  $5-6^\circ$ .

5. У машин постоянного тока при наличии аксиальных каналов в якоре рекомендуется применять двухструйный вентилятор.

6. Для снижения тональных составляющих вентиляционного шума необходимо, чтобы любые неподвижные препятствия по направлению потока воздуха на выходе из вентилятора находились от наружных кромок вентилятора на расстоянии, превышающем  $(0,1 \div 0,15)D_2$ .

7. Вентиляторы следует изготавливать из материалов с высоким внутренним демпфированием, так как использование для этих целей алюминия или его сплавов может привести к возрастанию уровня вентиляционного шума на 5 дБА.

## Вибрация от неуравновешенности роторов

Одной из основных причин механических вибраций и шумов является неуравновешенность масс роторов.

Балансировка роторов — обязательный и главный способ уменьшения создаваемых ими вибраций и шумов. По ГОСТ 12327-79 [64.19] показателем качества балансировки ротора является величина  $e\omega$ , мм·рад/с, где  $e$  — удельный остаточный дисбаланс ротора, мкм;  $\omega$  — угловая скорость ротора, рад.

Для роторов электрических машин установлены четыре класса точности балансировки роторов, приведенные ниже:

Класс	Наибольшие допустимые значения $e\omega$ , мм·рад/с
6,3	6,3
2,5	2,5
1,0	1,0
0,4	0,4

Роторы электрических машин в зависимости от их массы в килограммах делятся на три группы: от 0,01 до 0,1 — микророторы; свыше 0,1 до 3 — малые роторы; свыше 3 до 1000 — средние роторы.

Для средних роторов следует использовать классы точности балансировки 6,3; 2,5; 1,0, а для малых и микророторов — классы точности 2,5; 1,0; 0,4.

Наибольшие допустимые значения удельного остаточного дисбаланса ротора  $e$  в зависимости от рабочей частоты и для принятых классов балансировки приведены на рис. 64.2. Приведенные данные применимы к роторам, которые при балансировке устанавливаются на станках на цапфах вала или в собственных подшипниках, а также в полностью собранной машине, у которой имеется доступ к плоскостям коррекции дисбаланса ротора.

## Магнитная вибрация и шум

Причинами магнитной вибрации и шума ЭМ являются пространственно-временные изменения сил магнитного взаимодействия между статором и ротором, которые обусловлены основным магнитным полем в воздушном зазоре, дискретным распределением обмоток по пазам, зубчатостью статора и ротора, эксцентриситетом ротора и насыщением магнитной цепи. По направлению действия эги силы можно разделить на радиальные, тангенциальные и аксиальные (осевые) (рис. 64.3). Переменные силы, воздействуя на статор, вызывают упругую деформацию последнего, которая передается в окружающую воздушную среду в виде шума.

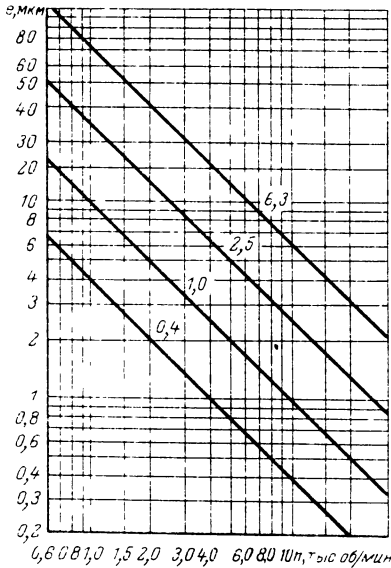


Рис. 64.2. Допустимые удельные остаточные дисбалансы роторов электрических машин

Аксиальные силы вызывают периодическое распушение и сжатие пакетов шихтованной стали ЭМ, сопровождаемые в некоторых случаях шумом высокой тональности. Качественное закрепление пакетов стали, надежная опрессовка и сжатие его торцевыми кольцами могут обеспечить монолитность сердечника и тем самым практически исключить влияние аксиальных магнитных сил.

Тангенциальные магнитные силы в трехфазных симметричных машинах вызывают колебания зубцов. Эти колебания можно рассматривать как колебания призматических стержней, у которых один конец жестко закреплен. Колебания зубцов обычно сильно демпфируются обмотками и клиньями в пазах. По этой причине тангенциальными вибрациями зубцов обычно пренебрегают. Однако в однофазных ЭМ, а также в ЭМ, питаемых несимметричным или несинусоидальным напряжением, тангенциальные электромагнитные силы необходимо учитывать, так как они могут вызывать радиальную вибрацию статора. Следует учитывать эти силы и вызываемые ими вибрации и в ЭМ постоянного тока.

Причиной магнитного шума может быть также и магнитострикция в крупных ЭМ переменного тока. Однако в ЭМ мощностью до 100 кВт влиянием магнитострикции обычно пренебрегают.

Таким образом, наибольшее влияние на

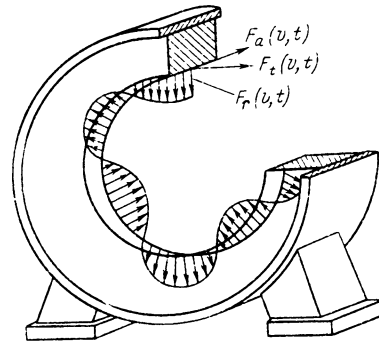


Рис. 64.3. Действие возмущающих магнитных сил (радиальных  $F_r$ , тангенциальных  $F_t$  и аксиальных  $F_a$ ) на статор электрической машины

магнитный шум и вибрацию оказывают радиальные магнитные силы, определяемые по выражению

$$F_r(\alpha, t) = B_\delta(\alpha, t) / 2\mu_0,$$

где  $B_\delta$  – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Магнитное поле в воздушном зазоре ЭМ имеет сложный гармонический состав. В общем виде его можно описать выражением

$$B_\delta(\alpha, t) = B_1(\alpha, t) + \sum_v B_v(\alpha, t) + \sum_\mu B_\mu(\alpha, t),$$

где  $B_1$  – основная гармоника магнитного поля;  $B_v, B_\mu$  – высшие гармоники магнитного поля, обусловленные статором и ротором соответственно;  $v = 6i + 1, i = \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $\mu = j(z_2/p) + 1, j = \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $z_2$  – число пазов ротора;  $p$  – число пар полюсов.

Высшие гармоники магнитного поля определяются распределением обмоток по пазам, зубчатостью статора и ротора, эксцентриситетом ротора, насыщением и несимметрией магнитной цепи, несимметрией и несинусоидальностью питающего напряжения. В результате взаимодействия вышеуказанных гармоник поля образуется целый спектр гармоник радиальных магнитных вибровозмущающих сил, отличающихся амплитудами, частотами и пространственным распределением – порядком, под которым принято понимать число волн, укладываемых на окружности кольца статора.

Амплитуда деформации статора в значительной степени зависит от формы его колебаний, которая может иметь самые разнообразные порядки. Наибольшую вибрацию и шум вызывают колебания низких порядков (от 1 до



Таблица 64.4 Рекомендуемые числа пазов статора и ротора  $z_1/z_2$ 

Высота оси вращения, мм	Число полюсов			
	2	4	6	8
56 – 63	24/22	24/22	36/33	
71 – 100	24/22	36/34, 36/32	36/33	36/33
112 – 132	36/28	48/44	54/51	48/44
160	36/34 (36/28)	48/44 (48/39)	54/51 (54/65)	48/44
180	36/34 (36/28)	48/44 (48/39)	72/66 (72/55) (72/56)	72/56 (72/55)
200	36/34 (36/28)	48/44 (48/38)	72/66 (72/58) (72/56)	72/56 (72/58)
225	36/34 (36/28)	48/44 (48/38)	72/66 (72/58) (72/56)	72/56 (72/58)
250	48/46 (48/40)	60/56 (60/50)	72/66 (72/58) (72/56)	72/56 (72/58)

Примечание. Значения в скобках требуют дополнительной экспериментальной проверки.

4). Большое влияние на уровни вибрации и шума оказывают резонансные свойства статора, так как при совпадении частоты возбуждения с собственной частотой наступает резонанс колебаний, сопровождающийся резким увеличением вибрации и шума.

Расчет магнитной вибрации ЭМ при учете всех основных факторов становится весьма громоздким и может быть выполнен только на больших ЭВМ. Расчетным путем можно не только оценить влияние различных конструктивных факторов на вибрацию и шум, но и оптимизировать конструкцию ЭМ по минимуму магнитной вибрации и шума. Однако для расчета абсолютных значений параметров шума и вибрации точность существующих методик оказывается недостаточной. Главной причиной этого является сложность учета технологических факторов.

Способы уменьшения магнитной вибрации и шума весьма разнообразны и в различных вариантах применяются в ЭМ всех типов. Для асинхронных двигателей важное значение имеет правильный выбор чисел пазов статора и ротора. Общепринятыми являются следующие правила выбора чисел пазов [64,6]:

для двухполюсных электродвигателей необходимо, чтобы

$$|k_1 z_1 + k_2 z_2 + \tau| \geq 4,$$

где  $k_1, k_2 = \pm 1, \pm 2$ ;  $\tau = 0$  или 2;

для многополюсных двигателей

$$z_2 = z_1 + k_2 p,$$

где  $k = \pm 1, \pm 2$  – для 4-полюсных - и  $k = 0, \pm 1, \pm 2$  – для 6–8-полюсных двигателей.

Наиболее благоприятные соотношения чисел пазов статора и ротора приведены в табл. 64.4.

Для уменьшения магнитной вибрации и шума обычно применяют скос пазов на одно зубцовое деление или, если это возможно по техническим условиям, на большее число зубцовых делений. Чаще всего скос пазов выполняют на роторе.

Помимо выбора оптимальных соотношений чисел пазов для уменьшения магнитного шума и вибрации находят применение также следующие меры: увеличение воздушного зазора и снижение индукции; уменьшение раскрытия пазов и использование магнитных клиньев; увеличение числа пазов на полюс и фазу и исключение дробных чисел; использование двухслойных обмоток с укорочением шага; уменьшение насыщения магнитной цепи; уменьшение эксцентриситета ротора.

В ЭМ постоянного тока, кроме скоса пазов, следует применять неравномерный воздушный зазор, который под краем полюса целесообразно брать в 3,0–3,5 раза больше, чем под серединой; увеличивать число пазов и число полюсов, причем отношение числа пазов к числу полюсов должно быть целым числом.

#### Подшипниковая вибрация и шум

Динамические процессы, происходящие в подшипниковых узлах, зависят от конструктивных особенностей подшипниковых узлов и от внешних воздействий на элементы подшипников.

Основные причины подшипниковой вибрации и шума можно разделить на три группы: погрешности изготовления, погрешности сборки и недостатки эксплуатации. К первой группе можно отнести такие погрешности, как волнистость беговых дорожек колец, их шероховатость, отклонения форм тел качения, их

разноразмерность, погрешности сепаратора. Ко второй группе следует отнести перекосы колец подшипников, подшипниковых шитов, погрешности болтовых соединений, несоосность, некруглость. К третьей группе относятся загрязнение и недостаточное (или, наоборот, избыточное) количество смазки, эксцентричная нагрузка на корпус подшипника.

Отклонения размеров и форм деталей в подшипниковых узлах ведут к возникновению низкочастотных составляющих вибрации.

Так, например, разностенность колец вызывает вибрацию с частотой

$$f_{1n} = n/60,$$

где  $n$  — частота вращения вала, об/мин.

Овальность внутренних колец является источником вибрации с двойной частотой вращения.

Смещение сепаратора, следовательно, его неуравновешенность вызывает вибрации с частотой вращения сепаратора:

$$f_{2n} = \frac{D_0 - d_{ш}}{2D_0} \frac{n}{60},$$

где  $D_0$  — диаметр окружности расположения центров тел качения;  $d_{ш}$  — диаметр тел качения.

Отклонения в размерах тел качения и периодическое изменение жесткости подшипника при перекачивании тел качения вызывает вибрации с частотой

$$f_{3n} = \frac{D_0 - d_{ш}}{2D_0} \frac{n}{60} z,$$

где  $z$  — число тел качения.

Частота вибрации, обусловленная наличием граней у тел качения,

$$f_{4n} = \frac{D_0^2 - d_{ш}^2}{2D_0 d_{ш}} \frac{n}{60} zk,$$

где  $k$  — число граней на поверхности шарика или ролика.

Дефекты рабочих поверхностей внутренних и внешних колец приводят к появлению вибрации с соответствующими частотами, определяемыми, как и в предыдущем случае, но где под  $k$  понимается число дефектов на рабочей поверхности соответственно внутреннего или внешнего кольца.

При выборе подшипников качения следует иметь в виду: с ростом размеров и серии подшипника (увеличение на одну ступень по диаметру) на 1–2 дБА возрастает уровень его вибрации; при одинаковых размерах роликовые подшипники вызывают большую вибрацию, чем шариковые; целесообразно применять осевое нажатие на наружное кольцо подшипника, значение которо-

го устанавливается экспериментально; целесообразно подшипниковые камеры заполнять смазкой примерно на 50 % их объема; следует применять на вал посадки  $js5$ ,  $k_5$  и в гнездо подшипника  $g_5$  или  $h_5$  со смещенным полем допуска; сборку и разборку подшипниковых узлов необходимо производить без ударов.

При изготовлении ЭМ с еще более низкими уровнями вибрации и шума целесообразно применять подшипники скольжения.

### Вибрация и шум щеточно-коллекторного узла

Источником радиальных колебаний щетки могут быть отклонения формы поверхности коллектора, выступание одной или группы коллекторных пластин и ударные взаимодействия щетки с пластинами коллектора, разделенными межламельной изоляцией.

В щеточно-коллекторных узлах, содержащих коробчатый щеткодержатель, колебания щетки и шум возникают также вследствие трения и ударов о щеткодержатель.

Исследование вибрации щеточно-коллекторного узла проводится с использованием двух расчетных схем: дискретной и с распределенными параметрами. Дискретная схема соответствует случаю, когда масса щетки значительно больше массы прижимной пружины. Схема с распределенными параметрами вводится, если масса щетки сопоставима с массой пружины.

Кроме названных выше причин колебания щетки, возможны тангенциальные колебания щеток, по своей природе не отличающиеся от весьма распространенных фрикционных автоколебаний. Причиной возникновения этих автоколебаний является наличие разности статического и кинематического коэффициентов трения по поверхности коллектора или кольца.

Для уменьшения вибрации и шума щеточно-коллекторного узла рекомендуются следующие меры:

1. Уменьшение диаметра коллектора (уменьшение виброскорости щетки).
2. Увеличение числа коллекторных пластин. При этом изменяется коллекторная частота, что позволяет в случае необходимости осуществить отстройку этой частоты от частоты собственных колебаний узла.
3. Уменьшение массы щетки (пропорциональное уменьшение возмущающей силы).
4. Уменьшение зазора между краем коробки щеткодержателя и поверхностью коллектора или кольца.
5. Повышение жесткости закрепления коллекторных пластин. Отклонение от правильной геометрической формы не должно пре-

вышать 2–3 мкм, а выступы пластин должны отсутствовать.

6. Расположение щеток под углом 2–4° по направлению вращения (исключение тангенциальных автоколебаний щеток, вызывающих шум в виде свиста).

### Шум трансформаторов

Главная составляющая магнитного шума силовых трансформаторов средней и большой мощности возникает от магнитострикции. Основная частота ее равна удвоенной частоте напряжения сети. Опыт показывает, что с увеличением индукции растет уровень шума. Возрастание происходит достаточно равномерно, примерно на 1–3 дБ на 0,1 Тл. Уровень шума трансформатора при нагрузке превышает уровень шума при холостом ходе на 5–15 дБ. При соединении обмоток трансформатора по схеме  $\Upsilon/\Delta$  уровень шума на 5–6 дБ ниже, чем при соединении  $\Upsilon/\Upsilon$ . Шум трансформатора возрастает с увеличением высоты магнитопровода.

Наряду с магнитострикционным шумом возникает шум от поперечных вибраций листов стали магнитопровода, возникающих под действием переменного магнитного поля. Основная частота его также равна удвоенной частоте напряжения сети. Уровень шума в этом случае может значительно возрасти при недоброкачественной сборке сердечника, плохой прессовке части или всех пластин магнитопровода, ошибке в раскладке листов стали по стержням и ярам, попадании в сердечник листов с отогнутыми краями и другими дефектами, создающими зазоры между пластинами, неравномерности сжатия пластин магнитопровода.

### Список литературы

64 1 Асинхронные двигатели общего назначения. Под ред. В. М. Петрова, А. Э. Кравичка. М. Энергия, 1980, 488 с

64 2 Вибрация и шум электрических машин / Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В. Т. Медведев, В. Ф. Полухин. МЭИ, 1984

64 3 Вибрации и шум машин постоянного тока и асинхронных машин. Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В. Т. Медведев, В. Ф. Полухин. МЭИ, 1984

64 4 Проектирование электрических машин с пониженными уровнями вибрации. Машины постоянного тока. Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В. И. Медведев, В. Ф. Полухин

64 5 Расчет магнитных вибраций асинхронных двигателей. Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В. Т. Медведев, В. Ф. Полухин. МЭИ, 1985, 96 с

64 6 Борьба с шумом на производстве. Справочник / Под ред. Е. Я. Юдина. М. Машиностроение, 1985, 399 с

64 7 Вибрации и шум электрических машин малой мощности / Л. К. Волков, Р. Н. Ковалев, Г. Н. Никифоров и др. — Л. Энергия, 1979, 206 с

64 8 Вибрации энергетических машин. Под ред. Н. В. Григорьева. Л. Машиностроение, 1974, 461 с

64 9 Детинко Ф. М., Загородная Г. А., Фастовский В. М. Прочность и колебания электрических машин. Л. Энергия, 1969, 440 с

64 10 Исакович М. М., Клейман Л. И., Перчанок Б. Х. Устранение вибрации электрических машин. Л. Энергия, 1979, 200 с

64 11 Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара. Справочник. В 2-х томах / Под ред. В. В. Клюева. М. Машиностроение, 1978, 447 с

64 12 Справочник по судовой акустике. Под ред. И. И. Клюкина и И. И. Боголепова. Л. Судостроение, 1978, 503 с

64 13 Шубов И. Г. Шум и вибрации электрических машин. Л. Энергия, 1974, 200 с

64 14 ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности труда.

64 15 ГОСТ 23941-79. Шум. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования

64 16 ГОСТ 16372-84. Машины электрические вращающиеся. Предельные значения уровней шума

64 17 ГОСТ 12379-75. Машины электрические вращающиеся. Методы оценки вибраций

64 18 ГОСТ 16921-83. Машины электрические вращающиеся. Допустимые вибрации

64 19. ГОСТ 12327-79. Остаточные дисбалансы роторов. Нормы и методы измерений

64 20 ГОСТ 12.2.024-76. Трансформаторы. Допустимые уровни шума

64 21 ГОСТ 12.1.012-78 Вибрация. Общие требования безопасности

64 22 ГОСТ 11929-81. Машины электрические вращающиеся. Определение уровня шума

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аварийное динамическое торможение двигателя 73  
— эвакуационное и охранное освещение 311, 329—331  
Автоматизированный электропривод 7  
Автоматические выключатели 388  
Автомобилей электрооборудование 460—468  
Автомобильная система электроснабжения 464  
Автономный электропривод 7  
Адаптивные регуляторы тока 59  
— системы управления электроприводами 43, 97—99  
Аккумуляторные багарен 460—464  
Аккумуляторный подвижной состав 411  
— электропривод 7  
Алмазно-электрохимическое шлифование 228  
Алмазно-эрозионное шлифование 228  
Аналоговая система управления позиционного электропривода 87, 88  
— — — следящего электропривода 91—93  
Аппараты электрические взрывозащитные 357  
— — сварочные 266  
— — тяговые 384—393  
Асинхронный электропривод 81, 83—86  
Астатическое регулирование в электроприводе 55  
Аэродинамический шум 605  
Аэрозольная технология 243
- Барабанные печи 155  
Безредукторный электропривод 7  
Быстродействующие электроприводы постоянного тока 75  
Бытовые электроприборы 535—561
- Вибрация в электрических машинах 601—610  
Вакуумные печи высокотемпературные 159  
— — дуговые 173  
— — плазменные 197  
— — сoproгивления 160  
Ванны электрические 154  
Вентильный электропривод 7  
Вентиляторы 538, 540  
Взаимосвязанный электропривод 5  
Взрыв 341  
Взрывающаяся проволока 231  
Взрывозащитное электрооборудование 352  
Взрывозащитные светильники 308, 359—361  
Взрывоопасные зоны 340, 347—349  
— смеси 341  
Виды взрывозащиты 352  
Внешние характеристики однотактных преобразователей напряжения 509  
Внешняя характеристика источника питания 265  
— — регулятора напряжения 498  
Водонагреватели электрические 556  
Воздухоочиститель 542  
Воспламенения концентрационные пределы 344  
— температурный предел 345  
Вращагельный электропривод 6  
Время переходного процесса 10  
Вспышка 341  
Выключатель зажигания 481  
Выпрямители сварочные 272  
Выпрямительные блоки автомобильных генераторов 467  
Вырезные станки 217
- Газоразрядные лампы 289  
Галогенные лампы накаливания 292  
Гарнисаж 168  
Генераторы автомобильные 465—469  
— импульсов 212, 215—222  
— тракторные 477  
— тяговые 412  
Генерирование силовых импульсов 206
- Гибкие автоматизированные производства 107  
— производственные комплексы 105  
Горение 341  
Графики мощности двигателя 26  
Групповой электропривод 5  
Групповые аппараты 387  
Группы взрывоопасных смесей 345, 346
- Динамические нагрузки электроприводов общепромышленных механизмов 121—125  
Двигатели постоянного тока независимого возбуждения 13—18  
— — — последовательного возбуждения 18, 375  
— — — смешанного возбуждения 19—23, 375  
— тяговые 373—384  
— трехфазные асинхронные 19  
Двигатели электрические 29  
Дизель-электрический электропривод 7  
Динамическое торможение асинхронных двигателей 20, 128  
Дисбаланс ротора электрических машин 607  
Дискретный электропривод 6  
Дифференциальное управление скорости систем управления электроприводом 50  
— — тока в системах управления электроприводов 50  
Диэлектрический нагрев 185  
Дополнительная изоляция 535, 565  
Допустимая нагрузка 13  
Дроссели помехоподавляющие 584  
Дуговая сварка 245  
Дуговые сталеплавильные печи:  
— основные данные 169  
— с боковой загрузкой 165, 166  
— с верхней загрузкой 165, 168  
Дуговые печи косвенного действия 171, 172  
— струйные плазмотроны 190
- Естественные механические характеристики двигателей постоянного тока 13
- Желаемые механические характеристики механизмов передвижения 126  
— — — подъемных установок 126, 131  
Жесткость характеристики электродвигателя 9
- Зависимый принцип управления скоростью в электроприводе 61  
Задатчик интенсивности 56  
Заземление электроустановок взрывоопасных зон 361—364  
Закалка поверхностная 183  
Закрытая дуга 267  
Заряд накопителей от источников напряжения 207  
— — — — неизменной мощности 209  
— — — — тока 208  
Зарядка частиц материалов 244  
Зарядные устройства для аккумуляторных батарей 463  
Защита электрооборудования подвижного состава 411  
— электроприводов 63, 69, 71, 75, 86, 87  
— — нулевая 72, 84  
Защитная дуга 267  
Защитный угол светильников 299  
Зональные телесные углы 287
- Измерение радиопомех 580  
— шума и вибрации 602  
Импульсная электрохимическая технология 223, 224  
Импульсное зажигание 298  
Импульсные источники питания 206  
— регуляторы постоянного напряжения 495  
— электродинамические силы 238  
Индивидуальный электропривод 5

- Индукционные нагревательные установки 182  
 — тигельные печи 177—182  
 Искрогасители 589  
 Искусственные механические характеристики 14  
 Исполнительный орган электропривода 6  
 Источники питания плазменных электротермических установок 193  
 — — ручных и переносных электрических машин 573  
 — — сварочного тока 23  
 — — электрофильтров 250  
 Источники радиопомех 574, 576, 599  
 — света 289  
 Источников света выбор 317—324
- Кабели для прокладки во взрывоопасных зонах 362  
 Камерные печи 152  
 Канал разряда 233  
 Канальные индукционные печи 177  
 Канатная тяга 121  
 Карусельные печи 159  
 Категории взрывоопасной смеси 345, 346  
 Катушка зажигания 479, 482  
 Классификация электроприводов 5  
 Классы вибрации электрических машин 605  
 Клещи сварочные 282  
 Колпаковые печи 152  
 Комбинированное освещение 311  
 Комплектные осветительные устройства 309, 361  
 — электроприводы 33, 34, 62  
 — — тиристорные 34, 36, 71  
 Конвертерные печи 155  
 Конденсаторная сварка 280  
 Конденсаторы помехоподавляющие 582—585  
 Кондиционеры 538, 539  
 Контактная сварка 278  
 Контактторы кулачковые 389  
 — электромагнитные 386  
 — электропневматические 387  
 Контроллеры 385, 386, 391  
 — программируемые 46, 47  
 Концентрационные пределы воспламенения 342  
 Копировально-прошивочные станки 215  
 Коррекция переходных процессов в электроприводах 18  
 Коэффициент динамичности механизмов передвижения 123  
 подъемных устройств 123, 124  
 Коэффициент использования осветительной установки 320, 323, 324  
 — мощности асинхронных двигателей 24  
 — — двигателей 31  
 — переноса помех 577  
 — полезного действия двигателя 31  
 — пульсации освещенности 313  
 — отражения 324  
 — яркости 288  
 Кривые рассеяния 288  
 — силы света 187, 308, 309  
 Криптоновые лампы накаливания 290  
 Критическое скольжение 20  
 Кухонные машины универсальные 546
- Лазерная обработка 203  
 Лазеры 225, 226  
 Лампы ксеноновые трубчатые 296  
 — накаливания 289—293  
 — — газонаполненные 290  
 — — галогенные 292  
 — накачки 225  
 — натриевые высокого давления 296  
 Легковоспламеняющиеся жидкости 341  
 Линейный электропривод 7  
 Лифтовой подъемник 120  
 Люминесцентные трубчатые лампы низкого давления 293, 294
- Магнето 483, 485  
 Магнитная кисть 259  
 Магнитно-импульсная обработка 240—242  
 Магнитные шум и вибрация 606  
 Максимально-токовая защита электропривода 63  
 Максимальный критический момент 20  
 Маникюрные машины 550  
 Маркировка взрывозащищенного электрооборудования 354  
 Матричная логика серии М 46  
 Маховиковый электропривод 7  
 Машины сварочные 278—285  
 Металлогалогенные лампы 296  
 Метод эквивалентного момента 26  
 Механика электропривода 7  
 Механические реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения 14  
 — характеристики асинхронных двигателей 21  
 — — — при регулировании напряжения 19  
 — — двигателей 18  
 — — при шунтировании якоря двигателя постоянного тока принудительного возбуждения 19  
 МикроДАТ 100  
 Микропроцессорное управление электропривода 101, 103, 114  
 Миксеры 546, 547  
 Многодвигательный электропривод 6  
 Многокрасочное копирование 260  
 Многомассовые системы 11  
 Молотки и перфораторы электромагнитные 571  
 Момент сопротивления вентилятора, насоса 146  
 — — механизмов передвижения 121  
 — — подъемных устройств 119, 120  
 Мотор-колесо 412  
 Мощность двигателя вентилятора, насоса 143  
 — — конвейера 135
- Нагрев двигателей 39**  
 — диэлектриков и полупроводников высокочастотный 185  
 — и охлаждение двигателей 25  
 Нагревательные установки индукционные 182  
 — электроприводы 550—561  
 Нагрузочная диаграмма электропривода 39  
 Нагрузочные характеристики двигателей постоянного напряжения 521  
 Нанесение порошковых покрытий 253  
 Напорные характеристики машин для подачи жидкостей и газов 143  
 Наружное освещение 331—339  
 Натриевые лампы 296  
 Независимое регулирование координат в электроприводах 12  
 Нелинейные характеристики двигателей 11  
 Непериодические импульсы 205  
 Неревверсивный электропривод 7  
 Нерегулируемый электропривод 7  
 Неустановившийся (переходный) режим механического движения 10  
 Номинальное напряжение в электрической тяге 367  
 Нормы на допустимые радиопомехи 581  
 — шумовых характеристик 601  
 Нулевая защита асинхронных двигателей 84
- Области статистических нагрузок механизмов передвижения 121  
 — — — подъемных установок 119  
 Общепромышленные механизмы 118, 119  
 Огнеупорные материалы 188, 189  
 Одномассовая система 9  
 Оптические свойства материалов 288, 289  
 Осветительные приборы 299  
 Освещение электрическое 311, 312  
 Освещенность 314—317, 334  
 Ослабление возбуждения двигателей 393



- Статизм стабилизации скорости электропривода 49  
 Статические нагрузки электропривода общепромышленных механизмов 120, 121  
 Степени защиты бытовых электроприборов и инструментов 535, 562  
 Стиральные машины автоматические 544, 545  
 — — полуавтоматические 544, 546  
 Стыковая сварка 283—285  
 Суммирующий усилитель 110  
 Схема динамического торможения двигателей постоянного тока 13  
 Температура вспышки 341  
 — воспламенения 341  
 — самовоспламенения 341  
 — тления 341  
 Теплоventильаторы 541  
 Теплоизоляционные материалы 190  
 Теплоэлектрический подвижной состав 372, 373  
 Технический (модульный) оптимум 53  
 Тиристорное управление тяговым двигателем 405—408  
 Тиристорные контакты 285  
 — преобразователи 48  
 Тиристорный электропривод 7  
 Тление 341  
 Толкательные печи 155  
 Тонер 259  
 Торможение подвижного состава 396—400  
 — — — реостатное 397, 402  
 — противовключением 20  
 — рекуперативное 20  
 Точечная сварка 280, 281  
 Тракторы сварочные 275  
 Трамвай 370—372  
 Транзисторный электропривод 7  
 Троллейбусы 370—372  
 Трубчатый электронагреватель 553  
 Тяговая сила конвейера 135, 136  
 Тяговые двигатели постоянного тока 417  
 — машины 413  
 — подстанции 442—451  
 Увлажнители воздуха 538  
 Ультразвуковая электрохимическая обработка 229  
 Ультразвуковые генераторы 226, 227  
 Униполярные импульсы 206  
 Управляемые преобразователи для электроприводов 48  
 Управляющие устройства электроприводов 6  
 Уровни взрывозащиты 352  
 — звуковой мощности электрических машин 604  
 Усиленная изоляция 535, 565  
 Установившийся режим механического движения 9  
 Установки поверхностной закалки 183  
 Устройство для электромашинного перемешивания жидкого металла 165  
 Фены 558  
 Фильтры помехоподавляющие 586—589, 596  
 Формирование переходных процессов в электроприводах 18  
 Холодильники 535—538  
 Цикловые системы программного управления электроприводом 94  
 Цифровые системы управления следящего электропривода 93  
 — — — электроприводом 79  
 Частотное управление асинхронных двигателей 103  
 Шахтные печи 152  
 Шахтный подъемник 120  
 Шлифовальные машины электрические 569, 570  
 Шовная сварка 282, 284  
 Шум и вибрация электрических машин 603, 606  
 Шум трансформаторов 610  
 Шумомер 603  
 Шурупверты электрические 571  
 Экраны помехоподавляющие 591—595  
 Экскаватор 119  
 Электрическая зональная печь 164  
 Электрические печи сопротивления методические 155, 156  
 — — — садочные 151, 153  
 — сети и сети заземления электроустановок взрывоопасных зон 361—364  
 Электробезопасности классы 563  
 Электробритвы 549, 550  
 Электровафельницы 555  
 Электровозы 366—370  
 Электрогазоочистка 243  
 Электрогидравлические прессы 237  
 — установки для очистки литья 237  
 Электродвигатели взрывозащитные 355  
 — стартерные 487  
 — тяговые 373—384  
 Электродвигательное устройство электропривода 6, 29  
 Электрожаровни 555  
 Электронинструмент 562  
 Электрокаminy 556  
 Электрокапельные устройства 261  
 Электрокастрюли 553  
 Электронипятильники 557  
 Электроконфорки 552  
 Электрокофемолки 547  
 Электролит для аккумуляторных батарей 462  
 Электромагнитная постоянная времени якорной цепи 17  
 — совместимость 574  
 Электромеханическая постоянная времени 31  
 — характеристика двигателя электропривода 110  
 — — систем стабилизации скорости электропривода 48  
 Электромеханические переходные процессы 16  
 — характеристики регулирования торможения тяговых двигателей 397  
 — — тяговых двигателей 375—384  
 Электромиксеры 547  
 Электромобили 412  
 Электромясорубки 547  
 Электроножи 547  
 Электронные печи 199—201  
 Электроокраска 243, 251  
 Электропаяльники 559  
 Электропечать 243, 256  
 Электроплита напольная 551, 552  
 Электроплитки 553  
 Электропоезда 370, 371  
 Электроприборы для нагрева воды 551  
 — — отопления 551  
 — отопительные (печи) 556  
 — санитарно-гигиенические 531  
 Электрорадиаторы 555  
 Электросепараторы 257  
 Электросепарация 243  
 Электросковорода 553, 559  
 Электросоковыжималка 548  
 Электростатические генераторы 263  
 Электротехнология 202  
 Электротостеры 553  
 Электроутюги 559, 560  
 Электрофильтры 247  
 Электрочайники 557  
 Электрошашлычницы 555  
 Электрошлаковая сварка 245  
 Электрошлаковый переплав 174—176  
 Электроэрозсионные станки 213  
 Яркость 287

Список опечаток, допущенных в т. III, кн. I

Страница	Колонка	Строка	Напечатано	Должно быть
3	Левая	6 снизу	35 10)	35 12)
3	Правая	11 снизу	§ 39.5	§ 39.2
3	Правая	12, 13 снизу	§ 39.2 – 39 4	§ 39 3 – 39 7
3	Правая	15 снизу	§ 39.5	§ 39.2
4	Правая	20 сверху	49,5)	49,5), доктор техн. наук Н Н Кожевников, ст пр. Н. С Чинакаева (§ 49.7)
87	Левая	26 сверху	[35 5]	[35.13]
92	Правая	28 сверху	[35 6...]	[35 5 ]
94	Правая	26 сверху	[35 6, 35 12]	[35.12, 35.13]
100	Левая	9 снизу	– ( $M_{12} - M_{22}$ –	– ( $M_{12} - M_{22}$ –
101	Левая	23 снизу	самовозбуждение зон	самовозбуждение в зонах
105	Левая	1, 2 сверху	Электростанции (ЭС), под- станции (ПС), энергосистемы	Электростанции, подстанции (ПС), энергосистемы (ЭС)
168	Табл 36 12 2 столбец	21 сверху	$I_{пр,тер} I_{пр,тер} =$	$I_{пр,тер} I_{пр,тер} =$
340	Левая	8 снизу	$= k_M^2$ – коэффициент	$= k_M^2$ , где $k_M$ – коэффициент
341	Правая	7 снизу	$\frac{r_i^T}{\alpha} 10^{-3} + \dots$	$\frac{r_i^T}{\alpha} C_{y,э} 10^{-3} +$
342	Правая	20 сверху	шунгирующих устройств	шунгирующих реакторов
347	Правая	11 снизу	$Q_{*1} =$	$Q_{*1} =$
347	Правая	4 снизу	$Q_{*2} =$	$Q_{*2} =$
361	Левая	9 сверху	А. А. Троицкого	А. А. Троицкого
370	Табл. 41 3	–	–	В 4 столбце везде вместо $q_{нб}$ должно быть $q_{тнб}$ , в 5 столбце – вместо $v_{нб} - l_{нб}$
382	Табл 41 8 последний столбец	6 сверху 7 » 8 »	41.29 41.30 41.31	41.30 41.31 41.29
469	Правая	6 снизу	$k_0 = 0$	$k_n = 0$
480	Левая	13 сверху	Наладка SX2	Накладка SX2
502	Левая	4 снизу	число 2	число $2^n$
595	Подрисуноч- ная подпись к рис. 44 30	2 снизу	$\delta$ – входные цепи	$\delta$ – выходные цепи
754	Табл. 46.20 (головка)	4 столбец	ААл	ААБл
762	Боковик табл 47.7	–	ААБл	ААБ2л Молокозавод (пропущена строка между словами Мясо- комбинат и Кондитерская фаб- рика)
768	Правая	22 – 23 сверху	сельскохозяйственной техники	вычислительной техники
782	Левая	21 и 22 (вывод)	$K_c$ $K_n$	$K_c$ $K_n$
863	Левая	10 сверху	$a_n = \det A$	$a_n = (-1)^n \det A$
872	Табл. 49 39	15 сверху	$(1 + E_{н,п})^{тпр-1}$	$(1 + E_{н,п})^{тпр-l}$



Справочное издание

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. 3. Кн. 2**

**Использование электрической энергии**

Редакторы *И. В. Боцманова, Н. Б. Фомичева*  
Художественные редакторы *В. А. Гозак-Хозак,*  
*Г. И. Панфилова*  
Технический редактор *В. В. Хапаева*  
Корректор *И. А. Володяева*

ИБ № 1077

Сдано в набор 02.02.88 Подписано в печать 11.10.88 Т-18876. Формат  
70 × 100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсет. кн.-журн. имп. Гарнитура Таймс. Печать  
офсетная. Усл. печ. л. 50,05. Усл. кр.-отт. 100,1. Уч.-изд. л. 66,04. Тираж  
90 000 экз. Заказ № 1381. Цена 3 р. 90 к.

Энергоатомиздат. 113114, Москва, М-114. Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени  
Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный  
Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государствен-  
ном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной  
торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

