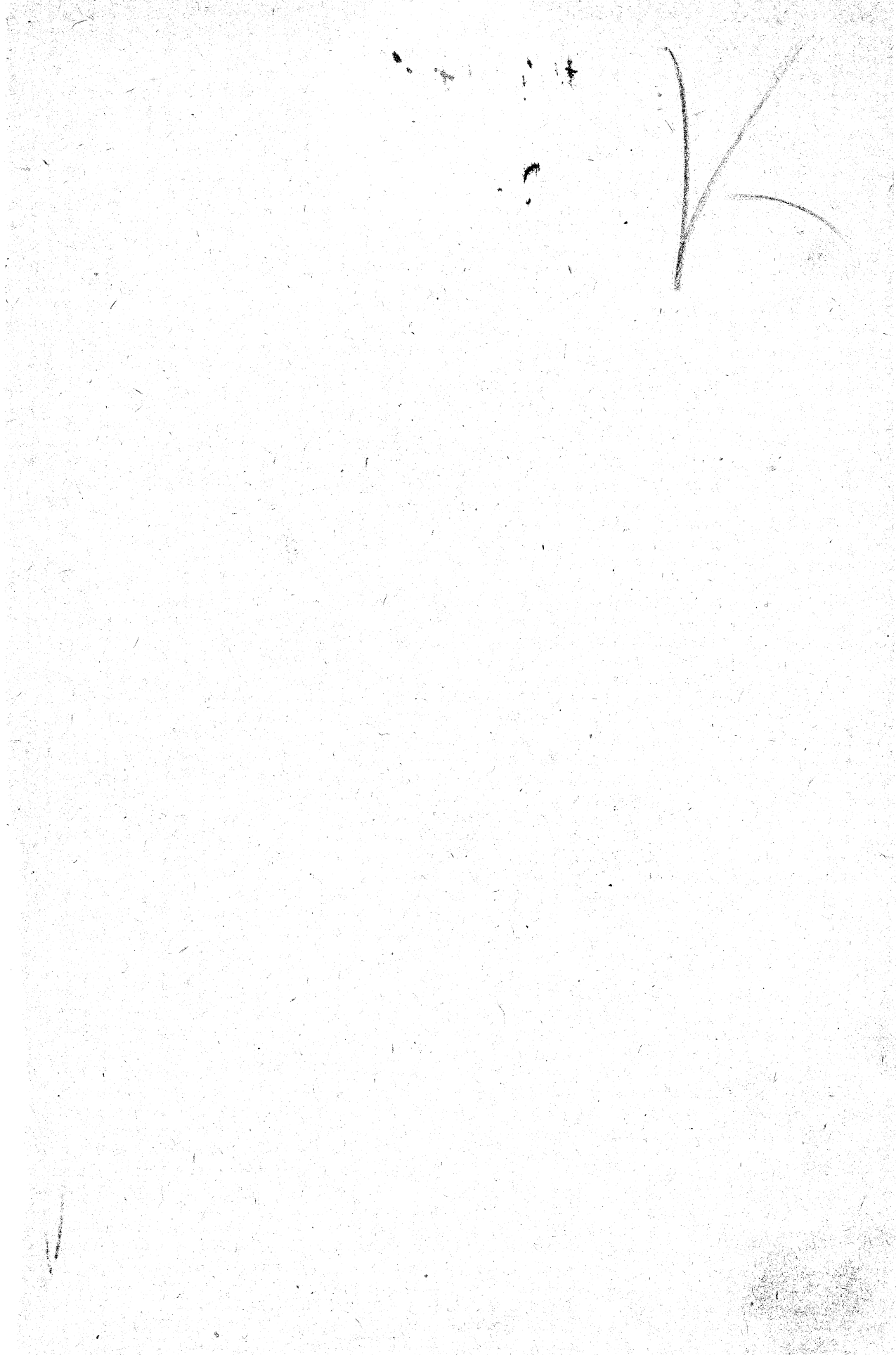


А.С. КАСАТКИН и М.А. ПЕРЕКАЛИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Сур. мам. Сур.
сн 24

А. С. КАСАТКИН и М. А. ПЕРЕКАЛИН

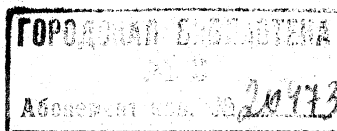
672.1

к-28

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ИЗДАНИЕ ДЕВЯТОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального
образования СССР
в качестве учебника
для высших технических учебных заведений СССР.*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5-3
УДК 621. 3
К 28

Книга представляет собой курс электротехники для студентов втузов неэлектротехнических специальностей. Она содержит основные сведения по расчету цепей постоянного тока, магнитным цепям и индуктивности, емкости и изоляции электротехнических устройств, теории переменных токов, электроизмерительным приборам, трансформаторам, электрическим машинам постоянного и переменного тока, электронным и ионным приборам и аппаратуре, полупроводниковым приборам и аппаратуре, электроприводу, электрическим аппаратам, электрическому освещению, электрическим станциям и подстанциям и сетям.

Касаткин Александр Сергеевич и Перекалин Михаил Александрович
Электротехника, изд. 9-е, стереотипное, М.-Л., Госэнергоиздат, 1963,
460 с. с черт.

Редактор В. А. Булгаков

Техн. редактор Н. И. Борунов

Подписано к печати с матриц 15/V 1963 г.
Т-00280. Бумага 70×108^{1/16} 39,38 печ. л. Тир. 25 000 экз. Уч.-изд. л. 45
Цена 1 р. 68 к. Зак. 1444

Отпечатано в типографии № 6 УЦБ и ПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Преждевременная смерть М. А. Перекалина положила конец совместной авторской работе, продолжавшейся 20 лет. Подготовку 8-го издания я должен был проделать уже один.

При переработке книги в ней были отражены новые успехи в строительстве советской электроэнергетики и особенности этого строительства. Сделан ряд дополнений, посвященных новой технике (например, параграфы «Автоматический электронный потенциометр», «Электронное реле», заново написанный «Магнитный усилитель» и др.), с другой стороны, опущены некоторые разделы, посвященные вопросам, утратившим техническую актуальность (например, параграф «Одноякорный преобразователь»). Таким образом, общий объем книги остался почти без изменения. Выполнено методическое корректирование работы в целом, в чем немало помогли ценные замечания о недостатках книги, полученные автором от ее читателей. Методическая переработка материала в большой мере имела своей целью облегчить самостоятельное изучение курса студентам, пришедшим с производства и работающим на производстве. Ту же цель преследует и помещение в книге описаний лабораторных работ по всем важнейшим разделам курса.

В 8-м издании перу покойного М. А. Перекалина принадлежат главы 1—11, кроме § 2-8, 3-4, 7-12, 7-23—7-28, 8-9, 9-5 и 10-12.. Введение и все остальное написано А. С. Касаткиным.

А. КАСАТКИН

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3		
Введение	9		
Глава первая. Цепь постоянного тока	12		
1-1. Электрическая цепь и ее параметры	12		
1-2. Проводящие материалы	15		
1-3. Гальванические элементы и аккумуляторы	16		
1-4. Работа и мощность электрического тока	20		
1-5. Последовательное соединение источников и приемников электрической энергии	22		
1-6. Потеря напряжения в проводах	23		
1-7. Расчет проводов на нагрев	24		
1-8. Плавкие предохранители	25		
Глава вторая. Методы расчета цепей постоянного тока	27		
2-1. Применение законов Кирхгофа для расчетов сложных электрических цепей	27		
2-2. Расчет смешанного соединения	29		
2-3. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и обратно	31		
2-4. Параллельное включение источников энергии	33		
2-5. Метод узлового напряжения	34		
2-6. Метод контурных токов	35		
2-7. Метод наложения	37		
2-8. Лабораторная работа. Сложная цепь постоянного тока	38		
Глава третья. Нелинейная цепь постоянного тока	39		
3-1. Нелинейные элементы электрической цепи	39		
3-2. Графический расчет неразветвленной цепи с одним нелинейным сопротивлением	39		
3-3. Графический расчет разветвленной цепи с одним источником энергии	40		
3-4. Аналитический расчет нелинейной цепи	41		
Глава четвертая. Электромагнитные расчеты	44		
4-1. Магнитное поле тока	44		
4-2. Магнитные свойства ферромагнитных материалов	47		
4-3. Расчет магнитной цепи	49		
4-4. Магнитное сопротивление	52		
4-5. Постоянные магниты	52		
Глава пятая. Электромеханические взаимодействия и индуктивность электромеханических устройств	54		
5-1. Проводник с током в магнитном поле	54		
5-2. Взаимодействие токоведущих проводников	56		
5-3. Электромагнитная индукция	56		
5-4. Индуктивность	59		
5-5. Взаимная индуктивность	61		
5-6. Расчет электромагнитных сил	63		
5-7. Включение и короткое замыкание цепей с индуктивностью	64		
Глава шестая. Емкость в электротехнических устройствах и вопросы изоляции	67		
6-1. Электрическое поле	67		
6-2. Электрические свойства изоляционных материалов	68		
6-3. Емкость и конденсаторы	70		
6-4. Плоский конденсатор	71		
6-5. Зарядный и разрядный токи	73		
6-6. Энергия электрического поля	74		
Глава седьмая. Цепь синусоидального переменного тока	75		
7-1. Получение переменного тока	75		
7-2. Синусоидальный ток	77		
7-3. Средние значения тока и напряжения	78		
7-4. Действующие значения тока и напряжения	78		
7-5. Векторная диаграмма переменного тока	79		
7-6. Переменный ток в цепи, не обладающей индуктивностью и емкостью	81		
7-7. Переменный ток в цепи с индуктивностью	82		
7-8. Поверхностный эффект и эффект близости	84		
7-9. Последовательное соединение активных и индуктивных сопротивлений	85		
7-10. Переменный ток в цепи с емкостью	87		
7-11. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений	88		
7-12. Явления резонанса в цепях переменного тока	90		
7-13. Резонанс напряжений	92		
7-14. Мгновенная и средняя мощности переменного тока	93		
7-15. Реактивная и полная мощности	97		
7-16. Активная, реактивная и полная проводимости	99		
7-17. Параллельное соединение приемников	100		

7-18. Резонанс токов	101	10-9. Многофазное выпрямление . . .	147
7-19. Компенсация сдвига фаз	103	10-10. Сглаживающие фильтры	148
7-20. Символический метод	104	10-11. <u>Лабораторная работа.</u> Характе-	
7-21. Закон Ома в символической фор-		ристики цепи феррорезонанса	
ме	105	напряжений и феррорезонансный	
7-22. Законы Кирхгофа в символиче-		стабилизатор напряжения	149
ской форме	106	Глава одиннадцатая. Переход-	
7-23. Четырехполосник	107	ные процессы в электротехниче-	
7-24. <u>Лабораторная работа.</u> Последова-		ских устройствах	151
тельное соединение активных со-		11-1. Закон коммутации	151
противлений и индуктивностей	109	11-2. Включение цепи с сопротивлени-	
7-25. <u>Лабораторная работа.</u> Закон Ома		ем и индуктивностью под синусо-	
для последовательного соедине-		идальное напряжение	151
ния емкости и активного сопротив-		11-3. Уравнения колебательного кон-	
ления	111	тура	153
7-26. <u>Лабораторная работа.</u> Резонанс		Глава двенадцатая. Электриче-	
напряжений	112	ские измерения	154
7-27. <u>Лабораторная работа.</u> Параллель-		12-1. Общие сведения	154
ное соединение приемников пере-		12-2. Погрешности и классы точности	155
менного тока	113	12-3. Маркировка прибора	156
7-28. <u>Лабораторная работа.</u> Компенса-		12-4. Общие детали механизмов при-	
ция сдвига фаз	114	боров прямого отсчета	157
Глава восьмая. Трехфазный ток	115	12-5. Шунты и добавочные сопротив-	
8-1. Многофазный ток и многофазная		ления	160
система	115	12-6. Системы электроизмерительных	
8-2. Трехфазная система	116	механизмов	162
8-3. Соединение звездой	118	12-7. Ваттметры	172
8-4. Соединение треугольником	120	12-8. Методы измерения мощности и	
8-5. Мощность симметричной трехфаз-		энергии трехфазного тока	175
ной цепи	122	12-9. Счетчики электрической энергии	178
8-6. Несимметричная нагрузка фаз при		12-10. Логометры	181
соединении приемника звездой	123	12-11. Испытание состояния изоляции	
8-7. Несимметричная нагрузка фаз при		и омметры	183
соединении приемника треуголь-		12-12. Частотомеры и фазометры . . .	185
ником	125	12-13. Осциллографы	186
8-8. Вращающееся магнитное поле . . .	126	12-14. Принципы электрических изме-	
8-9. <u>Лабораторная работа.</u> Соединение		рений неэлектрических величин	187
звездой и треугольником приемни-		12-15. <u>Лабораторная работа.</u> Проверка	
ков трехфазного тока	129	однофазного индукционного счет-	
Глава девятая. Несинусоидальные		чика	192
периодические токи	131	Глава тринадцатая. Трансформа-	
9-1. Возникновение несинусоидальных		торы	193
токов	131	13-1. Основные определения	193
9-2. Построение кривой тока по задан-		13-2. Принцип действия трансформа-	
ной кривой напряжения	131	тора	195
9-3. Действующие значения несинусои-		13-3. Холостой ход трансформатора	197
дальных токов и напряжений	133	13-4. Токи в обмотках нагруженного	
9-4. Активная мощность несинусои-		трансформатора	199
дального тока	135	13-5. Вторичное напряжение и вторич-	
9-5. Влияние индуктивности и емкости		ное магнитное рассеяние	199
на форму кривой тока	136	13-6. Векторная диаграмма нагружен-	
Глава десятая. Нелинейные цепи		ного трансформатора	200
переменного тока	137	13-7. Приведенный трансформатор . . .	201
10-1. Нелинейные элементы в цепи		13-8. Схема замещения трансформа-	
переменного тока	137	тора	202
10-2. Магнитный поток и э. д. с. кату-		13-9. Опыт короткого замыкания . . .	204
шки со стальным сердечником	137	13-10. Изменение вторичного напряже-	
10-3. Кривая намагничивающего тока	139	ния трансформатора при нагруз-	
10-4. Влияние гистерезиса и вихревых		ке	205
токов на ток катушки	139	13-11. Коэффициент полезного дейст-	
10-5. Векторная диаграмма и схема		вия	207
замещения катушки со сталь-		13-12. Трехфазные трансформаторы . . .	207
ным сердечником	142	13-13. Группы соединений обмоток . . .	209
10-6. Последовательное соединение		13-14. Автотрансформатор	210
катушки со стальным сердечни-		13-15. Трехобмоточные трансформато-	
ком и конденсатора	143	ры	211
10-7. Однополупериодное выпрямле-		13-16. Параллельная работа трансфор-	
ние	145	маторов	212
10-8. Двухполупериодное выпрямле-		13-17. Устройство сердечника и обмо-	
ние	146	ток	213

13-18. Условия нагревания и мощность трансформатора	214	15-9. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения	280
13-19. Охлаждение трансформаторов	215	15-10. Генератор независимого возбуждения	281
13-20. Измерительные трансформаторы	217	15-11. Генератор параллельного возбуждения	283
13-21. Магнитный усилитель	223	15-12. Генератор последовательного возбуждения	285
13-22. Лабораторная работа. Однофазный трансформатор	228	15-13. Генератор смешанного возбуждения	286
13-23. Лабораторная работа. Трехфазный трансформатор	230	15-14. Параллельная работа генераторов	287
Глава четырнадцатая. Асинхронные машины	232	15-15. Двигатели постоянного тока	288
14-1. Устройство асинхронной машины	232	15-16. Двигатель параллельного возбуждения	290
14-2. Вращающееся поле статора	234	15-17. Двигатель последовательного возбуждения	293
14-3. Устройство обмоток статора и ротора	235	15-18. Двигатели смешанного возбуждения	294
14-4. Обмоточный коэффициент	238	15-19. Двигатель-генератор для преобразования переменного тока в постоянный	295
14-5. Электродвижущие силы статора и ротора	238	15-20. Электромашинный усилитель	296
14-6. Магнитные потоки асинхронной машины	239	15-21. Коллекторные двигатели переменного тока	301
14-7. Ток ротора	241	15-22. Лабораторная работа. Генератор параллельного возбуждения и независимого возбуждения	304
14-8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя	242	15-23. Лабораторная работа. Исследование двигателя параллельного возбуждения	306
14-9. Трансформатор, эквивалентный работающему асинхронному двигателю	243	15-24. Лабораторная работа. Исследование двигателя последовательного возбуждения	308
14-10. Энергетический баланс	244	15-25. Лабораторная работа. Исследование электромашиного усилителя	309
14-11. Вращающий момент	245	Глава шестнадцатая. Синхронные машины	310
14-12. Схема замещения асинхронного двигателя	246	16-1. Основные определения	310
14-13. Механическая характеристика асинхронного двигателя	247	16-2. Холостой ход генератора	315
14-14. Двигатель с контактными кольцами (двигатель с фазным ротором)	251	16-3. Реакция якоря	317
14-15. Двигатели с вытеснением тока	252	16-4. Векторная диаграмма синхронного генератора	319
14-16. Способы уменьшения пускового тока короткозамкнутого двигателя	254	16-5. Потери и коэффициент полезного действия генератора	320
14-17. Регулирование скорости	255	16-6. Включение генератора на параллельную работу	321
14-18. Коэффициент мощности	257	16-7. Пуск синхронного двигателя	322
14-19. Потери и коэффициент полезного действия	258	16-8. Электромагнитный момент синхронной машины	323
14-20. Работа асинхронной машины в качестве электромагнитного тормоза, индукционного регулятора и фазорегулятора	259	16-9. Синхронизирующие мощность и момент	326
14-21. Асинхронный генератор	261	16-10. Влияние изменения возбуждения	327
14-22. Однофазные асинхронные двигатели	262	16-11. Характеристика синхронного двигателя	330
14-23. Лабораторная работа. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	264	16-12. Лабораторная работа. Исследование синхронной машины	331
14-24. Лабораторная работа. Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором	267	Глава семнадцатая. Электронные, ионные и полупроводниковые приборы	333
Глава пятнадцатая. Коллекторные машины	268	17-1. Развитие электроники	333
15-1. Значение коллектора	268	17-2. Классификация электронных и ионных приборов	335
15-2. Основные части машины постоянного тока	269	17-3. Термоэлектронный катод	336
15-3. Принцип действия коллектора	270	17-4. Двухэлектродная лампа (диод)	337
15-4. Барабанный якорь, петлевая и волновая обмотки	272	17-5. Параметры диода	341
15-5. Электродвижущая сила якоря	273	17-6. Трехэлектродная лампа (триод)	342
15-6. Тормозящий и вращающий моменты	273		
15-7. Реакция якоря	274		
15-8. Коммутация	276		

17-7. Параметры триода	346	20-3. Контроллеры	407
17-8. Многоэлектродные лампы	348	20-4. Контактторы	408
17-9. Электронно-лучевая трубка	350	20-5. Выключатели высокого напряжения	410
17-10. Газотрон	352	20-6. Реле и релейная защита	414
17-11. Тиратрон	353	Глава двадцать первая. Электрическое освещение 417	
17-12. Принцип действия ртутного выпрямителя	355	21-1. Развитие электрического освещения	417
17-13. Зажигание и возбуждение ртутного выпрямителя	356	21-2. Светотехнические величины и единицы	418
17-14. Многофазные выпрямители	357	21-3. Электрические источники света	421
17-15. Металлический ртутный выпрямитель	358	21-4. Осветительные приборы	426
17-16. Игнитрон	360	21-5. Основные требования, предъявляемые к искусственному освещению	428
17-17. Некоторые особенности полупроводников	362	21-6. Размещение светильников	431
17-18. Полупроводниковые диоды	364	21-7. Способы расчета осветительных установок	432
17-19. Полупроводниковый триод (транзистор)	369	Глава двадцать вторая. Производство, передача и распределение электрической энергии 434	
17-20. Параметры полупроводникового триода	372	22-1. Строительство электрических станций в СССР	434
17-21. Фотоэлементы	374	22-2. Напряжение в сетях электрических станций	439
Глава восемнадцатая. Электронная и ионная аппаратура 379		22-3. Нагрузка электрической станции	439
18-1. Общие положения	379	22-4. Классификация электрических станций	441
18-2. Электронные усилители	379	22-5. Энергетические системы	445
18-3. Ламповые генераторы	384	22-6. Атомная электростанция	446
18-4. Усилители на полупроводниковых триодах	386	22-7. Классификация электрических сетей	448
18-5. Фотореле	389	22-8. Подсчет электрических нагрузок проводов	450
18-6. Электронный осциллограф	390	22-9. Расчет проводов постоянного тока на потерю напряжения	450
18-7. Электронное реле	392	22-10. Расчет линий трехфазного тока	451
18-8. Автоматический электронный потенциометр	392	22-11. Выбор сечения проводников по нагреву и выбор плавких вставок предохранителей	452
Глава девятнадцатая. Электропривод 396		22-12. Материалы и конструктивные элементы сетей	454
19-1. Развитие электропривода	396	22-13. Трансформаторные подстанции	458
19-2. Классификация режимов работы электроприводов	399	Алфавитный указатель	459
19-3. Выбор мощности двигателя	400		
19-4. Выбор рода тока и типа двигателя	403		
Глава двадцатая. Электрическая аппаратура 403			
20-1. Гашение электрической дуги	405		
20-2. Автоматические выключатели	406		

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника является наукой о техническом использовании электрических явлений. Особенно важное народно-хозяйственное значение имеют преимущества электрической энергии перед другими видами энергии в области энергетики. Эти преимущества электроэнергетики: возможность получения больших мощностей в месте наличия природных запасов энергии, относительная простота передачи энергии на дальние расстояния к месту потребления, любое распределение мощности между потребителями и легкое преобразование электрической энергии в другие виды энергии (механическую, световую, тепловую, химическую и т. д.).

Развитие электроэнергетики страны является основой электрификации — широкого применения в народном хозяйстве и быту электрической энергии. «Электрификация, являющаяся стержнем строительства экономики коммунистического общества, играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении всего современного технического прогресса» (Программа КПСС). На базе электрификации осуществляется комплексная механизация производственных процессов и все более полная их автоматизация.

Исключительно важное значение электроэнергетики было оценено еще основоположниками марксизма у колыбели электротехники. В 1883 г. Ф. Энгельс писал по поводу первых опытов передачи электроэнергии высоким напряжением: «... это открытие окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, полагаемых местными условиями, делает возможным использование также и

самой отдаленной водяной энергии, и если в начале оно будет полезно только для городов, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней. Совершенно ясно, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии».

Значение электротехники было правильно оценено в XIX в. и русскими учеными, представителями передовой русской интеллигенции; имена многих из них будут упомянуты в данном курсе. Им электротехника обязана открытием или изобретением электрической дуги, гальванопластики, электрических источников света, трансформатора, трехфазного тока, радио и многого другого.

Однако в экономически отсталой царской России не было условий для практического приложения передовых технических идей, и электроэнергетика и электротехническая промышленность были очень мало развиты.

Суммарная выработка электроэнергии в 1913 г. составляла 1 950 млн. *квт·ч*¹, а общая установленная мощность электростанций — 1 100 тыс. *квт*. В большинстве своем это были мелкие фабрично-заводские электростанции², плохо использовавшиеся (в среднем 1 700 ч в год), работавшие с низким к. п. д. на дорогом дальнепривозном топливе.

Стоимость всей продукции русской электротехнической промышленности за 1913 г. составила лишь 66 млн. руб.

¹ В 1913 г. в Германии было выработано 5,1 млрд. *квт·ч*, а в Англии 4,5 млрд. *квт·ч*.

² Электроснабжение Петербурга обеспечивалось работой 204 электростанций.

Эта продукция покрывала только 45% весьма ограниченных потребностей страны; все остальное покрывалось импортом.

Великая Октябрьская социалистическая революция передала власть в руки рабочего класса и беднейшего крестьянства — настоящих заботливых

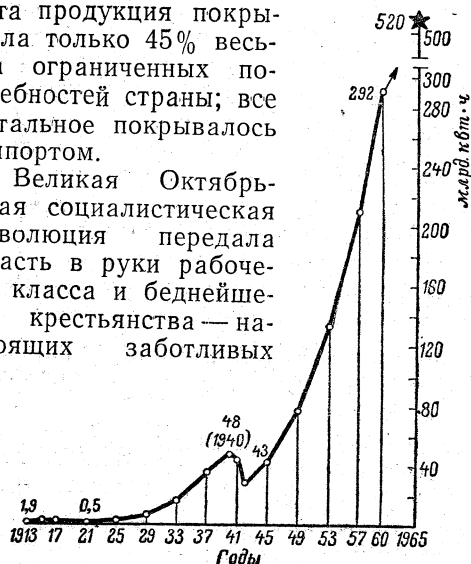


Рис. В-1. Производство электроэнергии в СССР

хозяев страны; тем самым совершился коренной перелом в развитии всего народного хозяйства нашей Родины и, в частности, ее электроэнергетики и электропромышленности. Гениальный организатор и вождь Коммунистической партии В. И. Ленин осознал значение электрификации для построения социализма задолго до Октябрьской революции и после установления Советской власти считал электрификацию одной из важнейших народнохозяйственных задач. Его выразительная формула: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» известна всему миру. По докладу Ленина VIII Всероссийский съезд Советов в 1920 г. утвердил план ГОЭЛРО, составленный комиссией специалистов, руководившейся указаниями Ленина.

План ГОЭЛРО был рассчитан на 15 лет; он был выполнен досрочно. Завершение плана ГОЭЛРО совмещается с началом серии пятилетних планов индустриализации, выполнение которых трудящимися СССР в короткий срок создало индустриальное могущество нашей родины и сделало советскую электроэнергетику второй в мире. Конечно, плановая электрификация нашей страны стала возможной только благодаря тому, что Советская власть обобществила средства произ-

водства, сделала их собственностью всего народа и создала социалистические формы хозяйства.

В результате выполнения плана первой пятилетки (1928—1932 гг.) выработка электроэнергии в 1932 г. составила 13,54 млрд. кВт·ч, а общая мощность электростанций достигла 4,7 млн. кВт.

Во второй пятилетке (1933—1937 гг.) на электростанциях было введено новых мощностей 2 652 тыс. кВт, а выработка электроэнергии в 1937 г. достигла 36,1 млрд. кВт·ч. Советская электроэнергетика заняла третье место в мире после наиболее могущественных капиталистических стран — США и Германии (рис. В-1).

Третий пятилетний план (1938—1942 гг.) был выполнен лишь частично вследствие нападения на СССР в 1941 г. фашистской Германии. Во время войны (1941—1945 гг.) многие электростанции и электрические сети подверглись разрушению. Но в это же время советские люди интенсивно строили электростанции на востоке страны, чтобы обеспечить военное хозяйство нашей Родины. Это дало возможность на второй год войны остановить наступление врага, а затем разгромить фашистскую Германию.

Четвертый пятилетний план (1946—1950 гг.) в области электроэнергетики должен был обеспечить восстановление разрушенных электростанций и вместе с тем увеличение их мощности благодаря модернизации всего оборудования. Успешное выполнение плана дало возможность довести выработку электроэнергии в 1950 г. до 91,2 млрд. кВт·ч; к этому времени мощность электростанций возросла до 19,6 млн. кВт.

Итогами пятого пятилетнего плана в области электроэнергетики явились увеличение установленной мощности электростанций до 37 млн. кВт, а годовой выработки электроэнергии до 170,2 млрд. кВт·ч.

В 40-ю годовщину Великой Октябрьской социалистической революции советские энергетики отметили, что мощность электростанций нашей Родины достигла 46 млн. кВт, а выработка электроэнергии в 1957 г. составила 209 млрд. кВт·ч, превзойдя

уровень 1913 г. более чем в 100 раз.

В 1962 г. установленная мощность электростанций была 82,6 млн. *квт.*, а годовая выработка электроэнергии достигла 369 млрд. *квт.ч.*

В СССР производится больше электроэнергии, чем в Англии и ФРГ вместе взятых¹. Наша страна по выработке электроэнергии опередила все капиталистические страны, кроме США, причем мы быстро догоняем последние. За период 1928—1955 гг., несмотря на тяжелые последствия войны, производство электроэнергии в СССР возросло в 34 раза, а в США лишь в 5,8 раза. Задача в исторически кратчайшие сроки догнать и перегнать США по производству электроэнергии, несомненно, будет решена; это наглядно доказывают выявившиеся преимущества советской науки и техники (запуск искусственных спутников Земли, постройка атомного ледокола и т. д.).

Мы не можем осветить здесь вопросы грандиозного роста и развития советской электропромышленности. Она развивалась пропорционально электроэнергетике и обеспечивала ее всем необходимым для дальнейшего строительства.

В осуществление плана построения материально-технической базы коммунизма в течение двух десятилетий производство электроэнергии в СССР в 1970 г. должно быть доведено до 900—1 000 млрд. *квт.ч.*, что потребует увеличения мощности электростанций до 190—220 млн. *квт.*; в 1980 г. должно быть произведено 2,7—3 триллиона *квт.ч.*, а мощность электростанций должна достигнуть 540—600 млн. *квт.*

Но электрификация является базой для развития всех остальных отраслей народного хозяйства. Приведем несколько цифр, иллюстрирующих значение в народном хозяйстве Советского Союза уже достигнутого уровня электрификации и перспективы, открываемые семилетним планом.

В промышленности характерной цифрой является э л е к т р о о р у -

ж е н н о с т ь рабочего. Так называется расход электроэнергии за год на одного рабочего. В промышленности СССР электровооруженность рабочего в 1928 г. была 750 *квт.ч.*, а в 1956 г. 4 150 *квт.ч.* Чтобы нагляднее показать значение этих цифр, отметим, что при напряженном восьмичасовом рабочем дне человек выполняет за год механическую работу порядка 150—200 *квт.ч.* Следовательно, уже в 1956 г. применение электроэнергии увеличило трудовые возможности рабочего в советской промышленности примерно в 25 раз.

План электрификации предусматривает увеличение в ближайшее десятилетие электровооруженности труда в промышленности почти в три раза (Программа КПСС).

Громадные просторы нашей страны требуют создания мощной сети железных дорог, а э л е к т р и ф и к а ц и я этих дорог является важнейшим средством повышения их пропускной способности, скорости перевозок, экономичности и т. д. Уже в 1956 г. Советский Союз по электрификации железных дорог вышел на одно из первых мест в мире — протяженность электрифицированных дорог в СССР составила 6 400 км.

Неуклонно осуществляется ленинская идея электрификации сельского хозяйства. К концу 1958 г. были электрифицированы почти все машинно-тракторные станции, 93% совхозов и 44% колхозов. В 1957 г. расход электроэнергии на одного жителя сельских районов составил 40 *квт.ч.* При полной электрификации сельскохозяйственных производственных процессов этот расход должен достичь 700—800 *квт.ч.*

Мы кратко остановились на истории и перспективах электроэнергетики нашей Родины для того, чтобы показать, какое исключительное значение имеют электротехнические вопросы во всей экономической жизни Советского Союза, как они важны для всякого советского инженера или техника независимо от области его работы.

¹ В 1955 г. выработано: в Англии 89 млрд. *квт.ч.*, в ФРГ 76 млрд. *квт.ч.*

ГЛАВА ПЕРВАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1-1. Электрическая цепь и ее параметры

Простейшая электрическая установка (рис. 1-1) состоит из источника электроэнергии (например, гальванического элемента, аккумулятора, генератора), приемника электроэнергии (например, электрической лампы, электронагревательного прибора, электродвигателя) и двух проводов, соединяющих зажимы источника и приемника энергии. Источник энергии (или, короче, источник), преобразует механическую, химическую, тепловую или другого вида энергию в электромагнитную энергию, которую для краткости часто называют просто электрической энергией; приемник энергии (или, короче, приемник), наоборот, превращает электрическую энергию в другие виды энергии: световую, тепловую, механическую и т. д. Источник энергии вместе с присоединенными к нему проводами и приемником образует замкнутый контур, вдоль которого происходит непрерывное движение электрических зарядов (электрический ток) и который называется электрической цепью. По отношению к источнику провода и приемник образуют так называемую внешнюю цепь.

Непосредственной причиной возникновения электрического тока в це-

пи является электродвижущая сила (э. д. с.) источника энергии. Направление тока в цепи принято считать совпадающим с направлением э. д. с. (на рис. 1-1 эти направления указаны стрелками). Тот зажим источника, через который ток «выходит» во внешнюю цепь, называется положительным (+), а тот зажим, через который ток из внешней цепи «входит» в источник, — отрицательным (-). Таким образом, ток направлен во внешней цепи от + к -, а внутри источника от - к +. Как внешняя цепь, так и сам источник обладают сопротивлениями, величины которых зависят от материалов, форм и размеров проводников, образующих соответствующие участки электрической цепи. От величин э. д. с. и сопротивления всей цепи зависит величина или сила тока (короче, ток) в ней. Отношение между этими тремя величинами выражается законом Ома, согласно которому ток I в цепи прямо пропорционален э. д. с. E и обратно пропорционален сопротивлению R всей цепи:

$$I = \frac{E}{R}. \quad (1-1)$$

Закон Ома может быть применен не только ко всей цепи в целом, но и в отдельности к любому ее участку, не содержащему источника энергии. В этом случае э. д. с. в формуле (1-1) должна быть заменена напряжением на участке U (т. е. разностью потенциалов между началом и концом участка), а под R вместо сопротивления всей цепи надо понимать сопротивление данного участка. Таким образом,

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1-2)$$

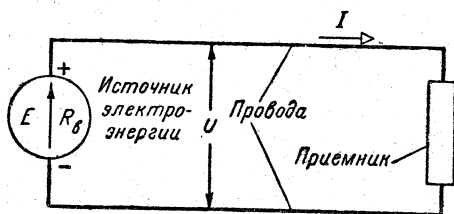


Рис. 1-1. Простейшая электрическая цепь.

т. е. ток в данном участке цепи равен отношению напряжения на участке к его сопротивлению. Так как напряжение U всегда приложено между двумя определенными точками, то на схемах мы будем показывать стрелками точки, между которыми действует рассматриваемое напряжение (рис. 1-1).

В формулах (1-1) и (1-2) все величины должны быть выражены в одной и той же системе единиц. В настоящем курсе будем пользоваться абсолютной практической системой единиц МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер), в которой единицей тока является ампер (a), единицей напряжения и э. д. с. — вольт (v) и единицей сопротивления — ом ($ом$).

Точное определение этих единиц дается в курсах физики. Чтобы создать у читателя конкретное представление об ампере и вольте, приведем следующие цифры. Человек начинает ощущать проходящий через его тело ток, когда он достигает $0,005 a$; если ток, проходящий через тело человека, достигает $0,05 a$, он становится уже опасным для его жизни; наиболее часто применяемые в быту лампы накаливания имеют ток порядка $0,25-1 a$, бытовые нагревательные приборы — от 2 до $8 a$; трамвайный вагон — до $100 a$. Гальванические элементы дают большей частью напряжение немного более $1 v$, свинцовый аккумулятор — около $2 v$; городские осветительные сети обыкновенно имеют напряжение 127 или $220 v$, трамвай — порядка $600 v$ (между контактным проводом и рельсами); распределение электрической энергии по территории города или сельского района производится чаще всего при напряжении порядка $6600 v$; линии, передающие электрическую энергию на большие расстояния, работают при напряжениях $35\ 000$, $110\ 000$ и $220\ 000 v$; линии Куйбышевская ГРЭС — Москва и Сталинградская ГРЭС — Москва рассчитаны на напряжения $400\ 000-500\ 000 v$; наконец, молния имеет напряжение, иногда превышающее $100\ 000\ 000 v$.

Для выражения малых токов вместо ампера практически удобнее поль-

зоваться меньшей единицей — миллиампером ($ма$), составляющим $10^{-3} a$, или даже микроампером ($мка$), равным $10^{-6} a$. Для выражения малых напряжений употребляется милливольт ($мв$), равный $10^{-3} v$, а для выражения больших напряжений — киловольт, ($кв$), составляющий $1000 v$.

Очень большие сопротивления выражаются обыкновенно в килоомах ($ком$) и мегомах ($Мом$); $1 ком = 10^3 ом$; $1 Мом = 10^6 ом$.

Если внутреннее сопротивление источника энергии более или менее значительно, то напряжение (или разность потенциалов) на зажимах источника энергии меньше его э. д. с. на величину внутренней потери напряжения, равной по закону Ома произведению тока I на внутреннее сопротивление R_B источника энергии, т. е.

$$U = E - IR_B. \quad (1-3)$$

Часто внутреннее сопротивление источника относительно мало и последним членом правой части (1-3) можно пренебречь и считать приближенно напряжение источника энергии равным его э. д. с.

При разомкнутой внешней цепи, т. е. при так называемом холостом ходе источника, $I=0$ и уравнение (1-3) независимо от величины R_B дает:

$$U = E. \quad (1-4)$$

Если сопротивление внешней цепи (внешнее сопротивление) стало небольшим по сравнению с внутренним сопротивлением источника, то можно считать, что $U=0$ и имеет место так называемое короткое замыкание источника энергии. При этом согласно (1-3) ток

$$I = \frac{E}{R_B} \quad (1-5)$$

может достигать очень больших значений, так как R_B обычно во много раз меньше сопротивления приемников. Короткое замыкание происходит, например, в том случае, когда вследствие порчи изоляции или по другой причине провода, идущие от источника энергии к приемнику, соединяются между собой.

Если твердый или жидкий проводник имеет по всей своей длине l одинаковое поперечное сечение S (например, проволока), то его сопротивление может быть определено по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1-6)$$

где ρ — сопротивление между противоположными поверхностями куба, эквивалентного единице объема, изготовленного из того же материала, что и рассматриваемый проводник.

Эта величина называется удельным электрическим сопротивлением и зависит от материала и температуры. В система МКСА, в которой основными единицами длины и площади являются метр и квадратный метр, единицу удельного сопротивления из формулы (1-6) можно получить равной $ом \cdot м$.

Однако в практической электротехнике неудобно в одних и тех же единицах измерять длину и сечение проводов, так как длина проводов относительно велика, иногда сотни километров, а сечение их относительно мало, порядка $мм^2$. По этим соображениям в качестве удельного сопротивления материала проводов обычно указывается сопротивление стержня длиной в 1 м и сечением в 1 $мм^2$, т. е. удельное сопротивление выражается в $ом \cdot мм^2/м$.

При измерении удельного сопротивления массивных проводников (жидкости, почвы и т. п.) длина и по-

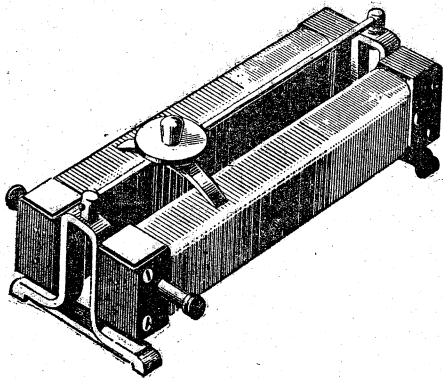


Рис. 1-2. Реостат с плавным изменением сопротивления.

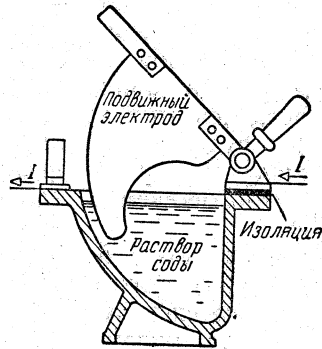


Рис. 1-3. Жидкостный реостат.

перечные размеры часто оказываются величинами одного порядка. Их выражают обычно в сантиметрах и за единицу удельного сопротивления принимают $ом \cdot см$.

В некоторых расчетах вместо сопротивления удобнее пользоваться обратной величиной $g = \frac{1}{R}$, носящей название проводимости. В этом случае закон Ома (1-2) принимает форму

$$I = Ug. \quad (1-7)$$

Единицей проводимости является $\frac{1}{ом} = ом^{-1}$; специального названия она не имеет.

Вместо удельного сопротивления также можно пользоваться обратной величиной

$$\gamma = \frac{1}{\rho},$$

которая называется удельной электрической проводимостью. Она выражается обычно в $\frac{1}{ом \cdot см}$ или в $м/ом \cdot мм^2$. Пользуясь соотношением (1-6), нетрудно убедиться, что

$$g = \frac{1}{R} = \frac{\gamma S}{l}. \quad (1-8)$$

Термин сопротивление употребляется не только как название величины, характеризующей данный участок цепи, проводник или аппарат, но также и как название аппарата, назначение которого заключается в ограничении величины тока. Регулируемые сопротивления называются реостатами; их сопротивление

Таблица 1-1
Условные обозначения сопротивлений

Вид сопротивления	Обозначение
Сопротивление нерегулируемое, общее обозначение	
Сопротивление активное	
Сопротивление омическое	
Сопротивление полное	
Сопротивление регулируемое, общее обозначение	
Сопротивление регулируемое, без разрыва цепи, со скользящим контактом	
Сопротивление с отводами	
Сопротивление индуктивное без сердечника	
Сопротивление индуктивное с сердечником (дрессель)	
Сопротивление емкостное, нерегулируемое	
Конденсатор нерегулируемый	
Сопротивление емкостное, регулируемое	
Конденсатор регулируемый	

может изменяться или ступенями, или почти непрерывно (рис. 1-2). Применяются также иногда более дешевые жидкостные реостаты (рис. 1-3), в которых раствор какого-нибудь электролита заполняет пространство между подвижной металлической пластиной и неподвижным металлическим резервуаром или между двумя совместно движущимися пластинами. На схемах электрических цепей сопротивления (реостаты) изображаются, как показано в табл. 1-1, причем здесь приведены также обозначения сопротивлений цепей переменного тока, с которыми мы познакомимся в последующих главах.

1-2. Проводящие материалы

По величине своего удельного сопротивления все вещества могут быть разбиты на три группы: проводники (главным образом металлы, $\rho =$ от 10^{-6} до 10^{-4} ом·см), электролиты и полупроводники ($\rho =$ от 10^{-2} до 10^{10} ом·см) и диэлектрики или изолирующие веществ-

ва ($\rho =$ от 10^{11} до 10^{15} ом·см). Первые две группы вместе составляют более широкую группу проводящих веществ.

Сравнительно малое удельное сопротивление металлов обусловлено наличием в них большого количества свободных (точнее, легко освобождающихся) электронов, которые под действием внешнего электрического поля перемещаются вдоль проводника и, таким образом, создают в нем электрический ток.

Удельное сопротивление металлов при повышении температуры увеличивается; поэтому и сопротивление металлических проводников растет с повышением температуры. В некоторых пределах увеличение их сопротивления приблизительно пропорционально повышению температуры, так что

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha (\vartheta - \vartheta_0),$$

где R — сопротивление при температуре ϑ ;

R_0 — сопротивление при температуре ϑ_0 ;

α — температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления представляет собой, следовательно, относительное увеличение сопротивления при повышении температуры на 1°C .

Таким образом,

$$R = R_0 [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)], \quad (1-9)$$

причем α зависит от исходной температуры ϑ_0 , за которую обычно принимается 20°C .

Если α известна, формула (1-9) может быть применена для косвенного определения повышения температуры обмотки машины или аппарата путем измерения ее сопротивления в холодном и нагретом состояниях. Однако необходимо иметь в виду, что (1-9) с достаточной для практики точностью может применяться при изменении температуры от -100 до 200 или 300°C . В более широких пределах приходится пользоваться более сложной формулой

$$R = R_0 [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0) + \beta (\vartheta - \vartheta_0)^2 + \dots], \quad (1-10)$$

Таблица 1-2

**Удельное сопротивление
и температурный коэффициент
некоторых металлов**

Металлы	Удельное сопротивление при 20° С, ом·мм ² /м	Средний температурный коэффициент (от 0 до 100° С)
Алюминий . . .	0,026	0,004
Вольфрам . . .	0,049	0,004
Константан . . .	0,44	0,000005
Манганин . . .	0,42	0,000005
Медь	0,0172	0,004
Нейзильбер . . .	0,35	0,00003
Нихром	1,0	0,00013
Сталь	0,13	0,006
Чугун	0,50	0,001

причем необходимое число членов ряда возрастает с увеличением пределов изменения температуры.

В табл. 1-2 приведены значения удельного сопротивления и температурного коэффициента α некоторых металлов. Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро и золото. Основными проводниковыми материалами служат медь, алюминий и в меньшей мере сталь. Хотя такие металлы, как вольфрам, никель и цинк, обладают меньшими, чем сталь, удельными сопротивлениями, они не применяются для указанной выше цели вследствие большей стоимости или меньшей механической прочности.

Для изготовления реостатов требуются металлы с большим удельным сопротивлением. Обычно для этой цели применяются сплавы: нейзильбер, константан и др., а также чугун. В бытовых нагревательных приборах и промышленных электропечах употребляется нихром; сопротивления, входящие в состав измерительных устройств, делаются из манганина, нити ламп накаливания — из вольфрама, который обладает высокой температурой плавления (около 3400° С).

Растворы электролитов, а также уголь и некоторые сплавы обладают отрицательным температурным коэффициентом, т. е. их сопротивление с повышением температуры уменьшается. Абсолютная величина температурного коэффициента большинства электролитов составляет около 0,02.

Удельная проводимость электроли-

тов весьма сильно зависит от концентрации раствора, т. е. от числа граммов вещества в 1 см³ раствора. При некоторой определенной концентрации, различной для разных электролитов, удельная проводимость имеет максимум.

1-3. Гальванические элементы и аккумуляторы

Старейшим источником электрического тока является гальванический элемент, состоящий из двух электродов, погруженных в тот или иной электролит. Электрическая энергия получается в нем за счет химической энергии.

Наибольшим распространением в настоящее время пользуются элементы так называемой марганцевой системы, в которых положительным электродом является марганцевая руда (MnO₂), отрицательным электродом — цинк (Zn), а электролитом — раствор нашатыря (NH₄Cl). Этот элемент встречается в различных конструктивных формах. В элементе мешкового типа (рис. 1-4) цинк имеет форму листа, свернутого в цилиндр 1, а марганцевая руда, смешанная для уменьшения сопротивления с углем, графитом и сажой и спрессованная в так называемый агломерат 2, заполняет цилиндрический мешок из хлопчатобумажной

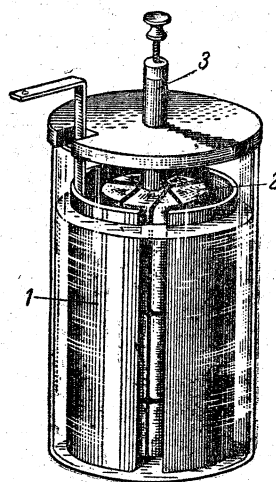
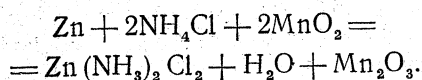


Рис 1-4. Элемент мешкового типа.
1—цинковый цилиндр; 2—мешок с агломератом;
3—угольный стержень.

ткани; расположенный внутри цинкового цилиндра и изолированный от него бусами, нанизанными на обвязывающую мешок бечевку. Для соединения положительного электрода с внешней цепью служит угольный стержень \mathcal{Z} , запрессованный в агломерат. Оба электрода помещаются в цилиндрическом стеклянном сосуде, заполненном 20%-ным раствором нашатыря. Такой элемент имеет в начале своей работы э. д. с. 1,5 в и внутреннее сопротивление 0,2—0,5 ом. Происходящий в нем электрохимический процесс выражается уравнением



Согласно известному закону электрохимии массы веществ, принимающих участие в электрохимическом процессе, пропорциональны току I и времени его прохождения t , т. е. произведению It . Поэтому размерами электродов определяется то наибольшее значение произведения It , которое может быть получено от данного элемента и которое называется его емкостью и обычно выражается в ампер-часах ($a \cdot ч$). Емкость элемента мешкового типа при нормальной работе составляет 8,5 $a \cdot ч$, если им пользоваться до тех пор, пока напряжение на его зажимах не упадет до 0,7 в. Если же можно вести его эксплуатацию до тех пор, пока его напряжение не упадет до 0,4 в, то его емкость окажется равной 12 $a \cdot ч$.

Разновидностью рассмотренного элемента являются так называемые сухие элементы, в которых жидкий электролит превращен в тестообразную массу добавлением к нему опилок, муки, крахмала или других подобных веществ.

Получение электрического тока при помощи гальванических элементов в сколько-нибудь широких масштабах нецелесообразно, так как при этом требуется периодическая замена израсходованных электродов новыми, а это связано с рядом неудобств и дополнительными расходами.

Существуют, однако, гальванические элементы, в которых может происходить обратимый электрохимиче-

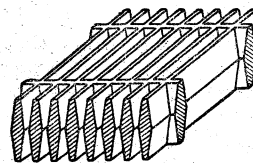


Рис. 1-5. Часть положительной пластины свинцового аккумулятора.

ский процесс с высоким к. п. д., т. е. не только преобразование химической энергии в электрическую, но и обратное преобразование электрической энергии в химическую с восстановлением израсходованных электродов при пропускании через элемент тока в обратном направлении.

Подобные элементы, позволяющие накапливать и расходовать электрическую энергию, называются аккумуляторами. Процесс накопления энергии в аккумуляторе называется его зарядкой, а процесс отдачи энергии в виде электрического тока — разрядкой.

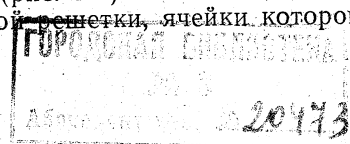
В настоящее время применяются два типа аккумуляторов: свинцовые (или кислотные) и щелочные (кадмиево-никелевые и железо-никелевые).

Электроды свинцового аккумулятора в заряженном состоянии являются: перекись свинца PbO_2 (анод) и чистый свинец Pb (катод). Электролитом служит раствор серной кислоты.

Анод и катод свинцового аккумулятора изготавливаются в виде решетчатых свинцовых пластин, покрытых активной массой (PbO_2 и Pb) и имеющих обыкновенно различные конструкции, обусловленные способом нанесения активной массы.

Положительные (анодные) пластины (рис. 1-5) состоят из ряда скрепленных между собой параллельных вертикальных свинцовых ребер. Такая форма имеет целью увеличение поверхности пластин. При помощи особой электролитической обработки (формирования) поверхностный слой положительной пластины превращается в перекись свинца и приобретает бурый цвет.

Отрицательные (катодные) пластины (рис. 1-6) имеют остов в виде свинцовой решетки, ячейки которой запол-



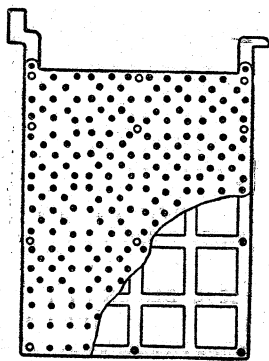
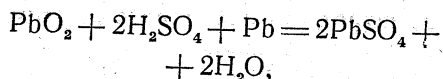


Рис. 1-6. Отрицательная пластина свинцового аккумулятора.

няются окисью свинца PbO (свинцовый глет), защищенной от выпадания свинцовыми листами с большим количеством мелких отверстий, покрывающими решетку с обеих сторон. При первой зарядке окись свинца восстанавливается ионами водорода в чистый свинец, имеющий пористую структуру и называемый поэтому губчатым свинцом. Отрицательные пластины имеют серый цвет.

Происходящий в аккумуляторе электрохимический процесс выражается уравнением



которое при разрядке читается слева направо, а при зарядке — справа налево.

Из этого уравнения видно, что концентрация серной кислоты при разрядке уменьшается, а при зарядке увеличивается. В разных типах аккумуляторов она берется различной в зависимости от условий, в которых им приходится работать. С повышением концентрации уменьшается срок службы аккумулятора, но зато уменьшается опасность его замерзания и снижаются его габаритные размеры и вес, так как при неизменном количестве серной кислоты общее количество раствора уменьшается. При концентрации около 30% раствор серной кислоты имеет наибольшую удельную проводимость; поэтому, если нужно иметь минимальное внутреннее сопротивление аккумулятора, следует выбирать среднюю концентрацию электролита близкой к 30%.

Это относится, например, к стартерным автомобильным аккумуляторам. О концентрации электролита удобнее всего судить по его удельному весу, который очень просто может быть измерен ареометром.

Вполне заряженный аккумулятор имеет э. д. с. около 2,2 в. Таково же приблизительно и напряжение на его зажимах в самом начале разрядки, так как внутреннее сопротивление аккумуляторов весьма мало. В дальнейшем (рис. 1-7) при нормальных условиях работы напряжение довольно быстро понижается до 1,95 в, держится некоторое время на этом уровне, а затем спадает сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее. Разрядка должна быть прекращена, когда напряжение упадет до 1,8 в, так как при дальнейшей работе в аккумуляторе начинается необратимый химический процесс, т. е. аккумулятор уже невозможно будет зарядить до номинальной емкости.

При зарядке напряжение аккумулятора быстро поднимается до 2,2 в, затем медленно возрастает до 2,3 в. К концу зарядки, когда весь свинец на катоде восстановлен и водород начинает выделяться в атмосферу (аккумулятор «кипит»), увеличивается внутреннее сопротивление аккумулятора, оказывается необходимым напряжение повысить до 2,6—2,7 в, чтобы поддержать зарядный ток.

Стационарные свинцовые аккумуляторы (рис. 1-8) изготавливаются у нас двух типов: для длительного разряда не менее 3 ч (обозначение С) и для кратковременного разряда до 1 ч (обозначение СК). Тип СК отличается от

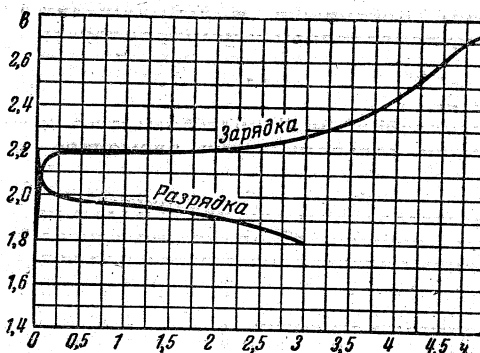


Рис. 1-7. Кривые зарядки и разрядки свинцового аккумулятора.

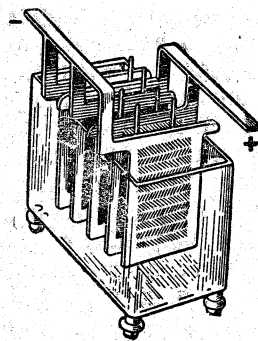
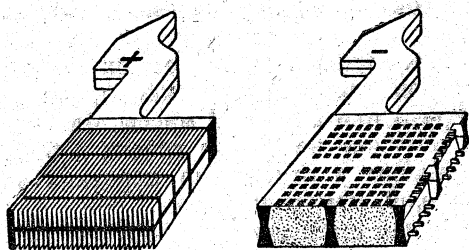


Рис. 1-8. Стационарный свинцовый аккумулятор в стеклянном сосуде.



типа С только большим поперечным сечением соединительных полос.

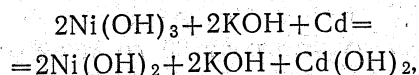
Номинальной емкостью аккумулятора называется его емкость при 10-часовом разряде. Наименьшей номинальной емкостью обладает аккумулятор с условным обозначением С-1 (или СК-1); его номинальная емкость составляет 36 а·ч. Числа, входящие в условное обозначение, показывают, во сколько раз номинальная емкость данного аккумулятора превышает 36 а·ч.

Емкость одного и того же аккумулятора зависит от величины разрядного тока, уменьшаясь при его увеличении. Так, например, аккумулятор С-14 имеет при 10-часовом разряде емкость 504 а·ч, а при 3-часовом — лишь 378 а·ч. Причиной этого является резкое уменьшение концентрации серной кислоты в порах электродов при большой плотности тока и, следовательно, более быстрое спадание э. д. с. аккумулятора.

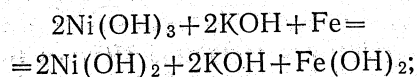
В щелочных аккумуляторах анод состоит из гидрата окиси никеля $Ni(OH)_2$, а катод в кадмиево-никелевых из губчатого кадмия (Cd), а в железо-никелевых — из губчатого железа (Fe). Электролитом является 20%-ный водный раствор едкого кали (KOH) с небольшой добавкой моно-

гидрата лития, который содержит не менее 50% едкого лития (LiOH). Оба электрода изготавливаются в виде стальных никелированных решеток, в ячейки которых впрессованы наполненные активной массой карманы из никелированной жести с большим количеством мелких отверстий. Сосуд, в котором помещаются электроды и электролит, также изготовлен из никелированной жести и имеет приваренную крышку с отверстиями для токопроводящих болтов и для наливания электролита.

В кадмиево-никелевом аккумуляторе электрохимический процесс выражается уравнением



а в железо-никелевом — уравнением



оба уравнения при разрядке читаются слева направо, а при зарядке — справа налево.

Как видно из этих уравнений, концентрация едкого кали при разрядке и зарядке аккумулятора не изменяется. Это позволяет обходиться сравнительно небольшим количеством электролита и сделать самый аккумулятор более компактным. Так, например, свинцовый аккумулятор С-3 емкостью 108 а·ч содержит около 6,8 л электролита, тогда как щелочной аккумулятор НКН-100 почти такой же емкости (100 а·ч) — только около 1,2 л электролита, т. е. в 5,6 раза меньше.

Кадмиево-никелевые аккумуляторы изготавливаются емкостью от 2,25 до 100 а·ч и предназначаются главным образом для работы в качестве анодных (обозначение АКН) и накальных (обозначение НКН) батарей радиоламп, а также для питания переносных фонарей (обозначение ФКН). При соединении их в батарею перед буквами условного обозначения ставится число последовательно соединяемых аккумуляторов. Цифры, стоящие после букв условного обозначения, дают емкость аккумулятора в ампер-часах.

Железо-никелевые аккумуляторы (обозначение ЖН, рис. 1-9) изготов-

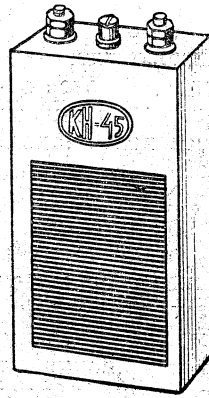


Рис. 1-9. Щелочной (железо-никелевый) аккумулятор.

ляются емкостью от 33 до 350 $a \cdot ч$ и не имеют специального назначения. Они могут применяться для тех же целей, что и кадмиево-никелевые, а также для любых лабораторных нужд. Аккумуляторы емкостью 350 $a \cdot ч$ (обозначение ЭЖН-350) предназначаются для питания рудничных электровозов. Они соединяются при этом в батареи по 80 или 96 шт. (для двух разных типов электровозов).

Кривые зарядки и разрядки щелочных аккумуляторов представлены на рис. 1-10.

Никакой аккумулятор не возвращает, конечно, при разрядке всей той энергии, которая затрачивается на его зарядку. Часть этой энергии превращается в тепло, часть расходуется на необратимые побочные химические процессы, вследствие чего и количество получаемого от аккумулятора электричества оказывается меньше пропускаемого через него при зарядке.

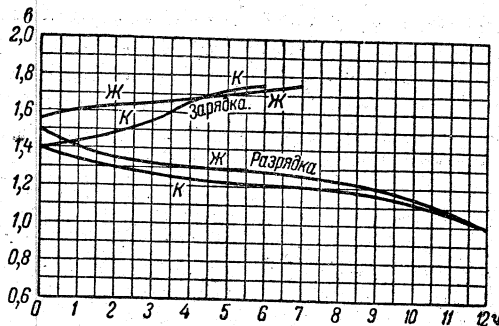


Рис. 1-10. Кривые зарядки и разрядки щелочных аккумуляторов.

Качество аккумулятора характеризуется двумя к. п. д.: по емкости (по количеству электричества — электрическая отдача) и по энергии. У свинцовых аккумуляторов к. п. д. по емкости при 3-часовой и более разрядке составляет не менее 84%, а к. п. д. по энергии 65%. У щелочных аккумуляторов, имеющих значительно большее внутреннее сопротивление, к. п. д. ниже, чем у свинцовых. Их к. п. д. по емкости составляет 66,6%, а к. п. д. по энергии у кадмиево-никелевых аккумуляторов 50%, а у железо-никелевых 47%.

Преимуществом щелочных аккумуляторов является высокая прочность закрепления активной массы, благодаря чему они не боятся тряски и более устойчивы в отношении коротких замыканий, чем свинцовые. Кроме того, они легче свинцовых и имеют меньший объем, что можно видеть, например, из сравнения объема и веса (на каждый ампер-час) близких по емкости аккумуляторов С-3 (108 $a \cdot ч$), ЖН-100 (100 $a \cdot ч$) и ЖН-100 (100 $a \cdot ч$).

Аккумулятор	Вес с электродом, г/ $a \cdot ч$	Объем, см ³ / $a \cdot ч$
С-3	245	98
ЖН-100	65	30
ЖН-100	68	30

Это сравнение показывает, что свинцовый аккумулятор имеет в 3,25 раза больший объем и в 3,6—3,8 раза больший вес, чем оба щелочные, которые имеют одинаковый объем и почти равный вес.

1-4. Работа и мощность электрического тока

Если для поддержания тока I в каком-либо участке электрической цепи требуется иметь на зажимах участка напряжение U , то работа электрического тока на этом участке за время t может быть выражена формулой

$$A = UIt, \quad (1-11)$$

а соответствующая мощность

$$P = UI. \quad (1-12)$$

Если напряжение в этих формулах выражено в вольтах, ток — в амперах, а время — в секундах, то мощность измеряется в ваттах ($вт$), а работа — в джоулях ($дж$) или ватт-секундах (1 ватт-секунда = 1 вольт-ампер-секунда = 1 джоуль).

Если же время в (1-11) выразить не в секундах, а в часах ($ч$), то работа получится в более крупных единицах — в ватт-часах ($вт \cdot ч$). Нетрудно видеть, что $1 вт \cdot ч = 3600 дж$.

В технике сильных токов большей частью приходится иметь дело с мощностями такого порядка, что ватт оказывается слишком мелкой единицей и его приходится заменять кратной единицей: изредка гектоватт (1 $гвт = 100 вт$) или чаще киловатт (1 $квт = 1000 вт$) и даже мегаватт (1 $Мвт = 1000000 вт$).

Если напряжение и ток не остаются постоянными, а изменяются с течением времени, то (1-11) может быть применена лишь к бесконечно малому промежутку времени dt и примет вид:

$$dA = uidt \quad (1-13)$$

(изменяющиеся напряжения и токи принято в отличие от постоянных обозначать строчными буквами u и i).

Работа тока за конечный промежуток времени t определяется путем интегрирования этого выражения по времени

$$A = \int_0^t uidt, \quad (1-14)$$

а изменяющаяся с течением времени (мгновенная) мощность

$$p = ui. \quad (1-15)$$

Таким образом, выражение мощности в форме произведения напряжения на ток применимо как при постоянном, так и при переменном токах. При этом оно одинаково применимо к любому участку цепи: проводу линии, электрической лампе, нагревательному прибору, электродвигателю.

Если в рассматриваемом участке цепи энергия электрического тока превращается только в тепло, то работа и мощность электрического тока в этих участках могут быть выражены через



Эмилий Христианович Ленц (1804—1865 гг.).

ток и сопротивление участка. В таких участках отсутствуют э. д. с. и, следовательно, по закону Ома $u = iR$ и соответственно $U = IR$. Подставляя эти выражения в (1-11) и (1-14), получим: для постоянного тока

$$A = I^2 Rt, \quad (1-16)$$

а для изменяющегося тока

$$A = \int_0^t i^2 R dt \quad (1-17)$$

или в тех случаях, когда можно принять R за постоянную величину (пренебрегая изменением его вследствие повышения температуры),

$$A = R \int_0^t i^2 dt.$$

Формулы (1-16) и (1-17) выражают закон, открытый независимо друг от друга русским академиком Э. Х. Ленцем и английским физиком Джоулем.

Этот закон гласит: количество тепла, выделяемого в единицу времени электрическим током, пропорционально квадрату тока и сопротивлению проводника (закон Ленца — Джоуля).

Сделав ту же подстановку в (1-12) и (1-15), получим формулы для подсчета мощности, расходуемой на нагревание проводников:

$$P = I^2 R \quad (1-18)$$

при постоянном токе и

$$p = i^2 R \quad (1-19)$$

при изменяющемся токе.

Эта мощность столь же просто может быть выражена не через ток, а через напряжение на зажимах участка. Так как

$$i = Ug \text{ и } R = \frac{1}{g},$$

то

$$P = U^2 g \quad (1-20)$$

при постоянном напряжении и аналогично

$$p = u^2 g \quad (1-21)$$

при изменяющемся напряжении.

1-5. Последовательное соединение источников и приемников электрической энергии

Часто при расчетах бывает целесообразно заменить одним сопротивлением целую группу различных образом соединенных между собой сопротивлений, но так, чтобы эта замена не изменила токов и напряжений на остальных участках цепи. Такое сопротивление называется эквивалентным заменяемой им группе сопротивлений.

В случае последовательного соединения приемников (рис. 1-11), применяя закон Ома к каждому отдельному сопротивлению, а также и к эквивалентному сопротивлению R_9 , получим:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2,$$

$$U_3 = IR_3, \dots, \quad U = IR_9$$

и так как

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = \sum_{k=1}^{k=n} U_k,$$

то

$$IR_9 = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots) = I \sum_{k=1}^{k=n} R_k$$

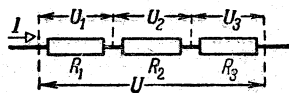


Рис. 1-11. Последовательное соединение приемников.

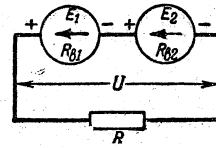


Рис. 1-12. Цепь с последовательным соединением источников энергии.

и, следовательно,

$$R_9 = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \sum_{k=1}^{k=n} R_k, \quad (1-22)$$

т. е. эквивалентное сопротивление равно сумме последовательно соединенных сопротивлений.

Из тех же основных соотношений для ряда последовательно соединенных приемников, не имеющих э. д. с., следует, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3} \text{ и т. д.},$$

т. е. что напряжение распределяется между последовательно соединенными приемниками прямо пропорционально их сопротивлениям.

Если цепь с внешним сопротивлением R (рис. 1-12) питается несколькими последовательно соединенными источниками энергии с э. д. с. E_1, E_2 и т. д. и внутренними сопротивлениями $R_{в1}, R_{в2}$ и т. д., то ряд последовательно соединенных источников можно заменить одним источником с внутренним сопротивлением.

$$R_9 = R_{в1} + R_{в2} + \dots = \sum R_{вk}$$

и э. д. с.

$$E_9 = E_1 + E_2 + \dots = \sum E_k,$$

причем э. д. с. того же направления, что и выбираемое для E_9 , следует считать положительными, а э. д. с. другого направления — отрицательными. Ток в этой цепи определяется уравнением

$$I = \frac{\sum E_k}{R_9 + R}. \quad (1-23)$$

Тот элемент цепи, в котором э. д. с. по направлению противоположна току (противо-э. д. с.), является приемником энергии и в нем происходит превращение электрической энергии в химическую (в заряжающемся аккумуля-

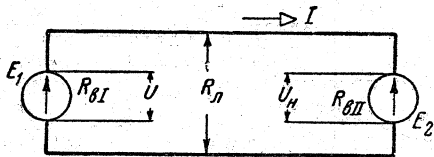


Рис. 1-13. Последовательное соединение с различным направлением э. д. с. источников энергии.

ляторе) или механическую (в электродвигателе).

Вследствие внутреннего падения напряжения напряжение на зажимах источника электрической энергии меньше его э. д. с., а на зажимах приемника больше его э. д. с.

Напряжение U на зажимах источника, питающего последовательное соединение (рис. 1-13), будет:

$$\begin{aligned} U &= E_1 - IR_{вI} = IR_{л} + U_{н} = \\ &= IR_{л} + IR_{вII} + E_2, \end{aligned} \quad (1-24)$$

где $U_{н}$ — напряжение на зажимах приемника;

E_1, E_2 — э. д. с. источника и приемника.

Умножив последнее уравнение на значение тока I , получим уравнение распределения мощности в цепи:

$$\begin{aligned} UI &= E_1 I - I^2 R_{вI} = I^2 R_{л} + U_{н} I = \\ &= I^2 R_{л} + I^2 R_{вII} + E_2 I. \end{aligned}$$

Здесь $E_1 I$ — электрическая мощность, развиваемая в источнике электрической энергии: часть ее $I^2 R_{вI}$ теряется (превращается в тепло) внутри самого источника, а остальная мощность UI отдается во внешнюю цепь. Мощность $I^2 R_{л}$ превращается в тепло при передаче (в проводах линии). Приемник получает мощность $U_{н} I$, из которой $I^2 R_{вII}$ соответствует тепловым потерям в приемнике, а часть $E_2 I$ представляет собой мощность, преобразуемую в химическую или механическую формы.

1-6. Потеря напряжения в проводах

Один из важных случаев последовательного соединения представляет двухпроводная линия, соединяющая источник энергии с каким-либо приемником: электродвигателем, группой ламп, электрической печью и т. п.

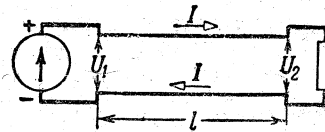


Рис. 1-14. Напряжение в начале и конце линии.

В этом случае (рис. 1-14) напряжение в начале линии

$$U_1 = U_2 + 2IR, \quad (1-25)$$

где U_2 — напряжение в конце линии, а R — сопротивление каждого провода. Разность напряжений U_1 и U_2 называется потерей напряжения в линии и обозначается ΔU . Таким образом,

$$\Delta U = 2IR, \quad (1-26)$$

а так как согласно (1-6)

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1-27)$$

то

$$\Delta U = I \frac{2\rho l}{S}. \quad (1-28)$$

Зная ток и наибольшую допустимую потерю напряжения, из (1-28) можно найти необходимое сечение проводов:

$$S = I \frac{2\rho l}{\Delta U}. \quad (1-29)$$

Подсчитанное по этой формуле сечение округляется до ближайшего стандартного.

С потерей напряжения тесно связан коэффициент полезного действия (к. п. д.) линии η , т. е. отношение отдаваемой линией приемнику мощности P_2 к получаемой ею от источника энергии мощности P_1 . Так как $P_2 = U_2 I$, а $P_1 = U_1 I$, то к. п. д.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_1 - \Delta U}{U_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}.$$

Вместо к. п. д. линии часто рассматривается величина относительной потери мощности в ней

$$p = \frac{\Delta P}{P_1},$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$. Так как $\Delta P = \Delta UI$, а $P_1 = U_1 I$, то

$$p = \frac{\Delta U}{U_1}, \quad (1-30)$$

т. е. относительная потеря мощности в двухпроводной линии постоянного тока равна относительной потере напряжения в ней.

Как показывает формула мощности $P = UI$, одна и та же мощность может быть получена при более высоком напряжении и сравнительно малом токе и при большем токе и сравнительно низком напряжении. Для того чтобы уменьшить потери напряжения и мощности в проводах при передаче электрической энергии на значительное расстояние и тем самым повысить к. п. д. линии, необходимо уменьшить ток в проводах, а следовательно, при неизменной величине передаваемой мощности во столько же раз увеличить напряжение. При этом относительная величина потери напряжения уменьшается обратно пропорционально квадрату напряжения.

Действительно, например, при напряжении $2U$ и при прежнем сопротивлении проводов ток будет равен $\frac{I}{2}$ и абсолютная величина потери напряжения $\frac{\Delta U}{2}$; относительная потеря напряжения (и, следовательно, мощности) будет теперь

$$\frac{\Delta U}{2} : 2U = \frac{1}{4} \frac{\Delta U}{U},$$

т. е. составит четверть своего прежнего значения.

Первые опыты передачи энергии на расстояние при помощи постоянного тока, имеющие практическое значение, производил в 1875 г. в Петербурге Ф. А. Пироцкий. В его опытах линия длиной в 1 км соединяла две машины по 6 л. с., одна из которых работала как генератор, а другая как двигатель. Первые теоретические расчеты по передаче энергии на расстояние были сделаны в 1880 г. Д. А. Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», помещенной в журнале «Электричество».

1-7. Расчет проводов на нагрев

Провода, соединяющие источник энергии с приемником, нагреваются проходящим по ним током, и выделяющееся в них тепло не только яв-

ляется бесполезной потерей энергии, но еще и ограничивает возможную нагрузку проводов, угрожая разрушением их изоляции. Вот почему расчет сечения проводов только на потерю напряжения в них может оказаться недостаточным, в особенности для коротких линий, и может потребоваться проверка найденного сечения на нагрев.

Повышение температуры провода может быть определено исходя из следующих соображений. По мере того как в проводе накапливается все большее и большее количество тепла, температура его повышается, а вместе с ней возрастает и отдача тепла в окружающую среду (воздух). Это продолжается до тех пор, пока отдача тепла не сравняется с его притоком. При сравнительно невысоких температурах (до 100°C), когда теплообмен между проводом и воздухом происходит главным образом путем конвекции, отдаваемое в секунду количество тепла P_0 пропорционально поверхности охлаждения S и превышению температуры ϑ , т. е. разности температур между отдающей тепло поверхностью и окружающей средой. Таким образом,

$$P_0 = kS\vartheta, \quad (1-31)$$

где коэффициент пропорциональности k , называемый коэффициентом теплоотдачи, составляет от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1,4 \cdot 10^{-3}$ вт/ $^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$.

Коэффициент теплоотдачи представляет собой, таким образом, количество отдаваемого проводником в секунду тепла, приходящееся на 1 см^2 поверхности и на 1°C превышения температуры.

Этот коэффициент выше, когда отдающая тепло поверхность со всех сторон окружена воздухом, и ниже, когда поблизости от нее имеются другие нагретые тела.

Количество выделяемого током в секунду тепла I^2R вначале процесса больше, чем отдаваемое в окружающую среду тепло P_0 . Разность между ними идет на повышение температуры проводника, т. е. на увеличение ϑ . Тепловой баланс за бесконечно малое время dt выражается уравнением

$$(I^2R - kS\vartheta) dt = Cd\vartheta,$$

где C — произведение удельной теплоемкости на массу провода. Решив это дифференциальное уравнение, можно получить закон нарастания температуры провода (см. § 19-3).

Превышение температуры ϑ достигает своего наибольшего значения $\vartheta_{\text{макс}}$, когда отдаваемое количество тепла, возрастая, сравнивается с выделяемым током количеством тепла, т. е. при тепловом равновесии, когда

$$I^2 R = k S \vartheta_{\text{макс}}.$$

На основании последнего равенства можно определить наибольшее превышение температуры, имеющее место при установившемся тепловом режиме:

$$\vartheta_{\text{макс}} = \frac{I^2 R}{k S}. \quad (1-32)$$

Если температура провода поднимется выше определенного предела, зависящего от материала изоляции, то последняя начинает разрушаться — обугливаться или даже гореть, теряя свои изолирующие свойства, и очень легко может стать причиной пожара. В установившемся режиме предельная допускаемая температура жил для проводов с изоляцией из нормальной резины составляет 55°C .

Если наивысшая температура окружающего воздуха составляет 25°C , а наивысшая температура почвы, в которой укладываются кабели, 15°C , то наибольшее допустимое превышение температуры $\vartheta_{\text{макс}}$ равно 30°C для изолированных проводов и 40° для кабелей.

Предельная допускаемая температура голых проводов определяется по потере ими механической прочности, т. е. способности выдерживать определенное натяжение, и составляет 70°C при температуре воздуха $+25^\circ \text{C}$.

При помощи этих величин и специально поставленных экспериментов определены предельные нагрузки (токи) для разного рода проводов. По этим таблицам на основании предельных нагрузок и определяется минимально допустимое сечение проводов¹.

¹ См. «Правила устройства электроустановок» (ПУЭ) Министерства электростанций СССР.

Из двух значений сечения, полученных по расчету на потерю напряжения и на нагрев, выбирается большее.

1-8. Плавкие предохранители

Чтобы ток в проводе или в обмотке машины не мог оказаться больше допустимого, применяются различные приспособления, автоматически отключающие данную цепь от источника энергии, если ток превысит определенное, заранее установленное значение. Простейшим из таких приспособлений является плавкий предохранитель. В принципе такой предохранитель представляет собой короткий участок защищаемой от перегрузки электрической цепи с искусственно пониженной термической устойчивостью. Это достигается изготовлением плавкой вставки предохранителя из материала со сравнительно высоким удельным сопротивлением (например, сплава олова и свинца) или из хорошо проводящего металла (например, серебра, меди), но с относительно малым сечением. При возрастании тока выше номинального, на который рассчитана плавкая вставка, последняя плавится (перегорает) и таким путем отключает защищаемые ею провода, машины, аппараты и т. п.

При перегорании предохранителя в нем не должна возникать дуга, следовательно, плавкая вставка должна иметь длину, соответствующую выключенному напряжению; по этой причине на предохранителях, кроме номинального тока, указывается также и напряжение.

В конструктивном отношении плавкие предохранители выполняются самым различным образом. Для промышленных установок низкого напряжения широко применяются пластинчатые предохранители (рис. 1-15); в них плавкая часть —

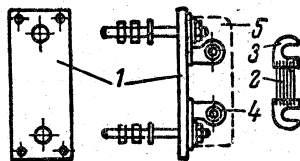


Рис. 1-15. Пластинчатый предохранитель.

вставка 2—состоит из нескольких проволок (или пластинок), снабженных контактными наконечниками 3, которые служат для закрепления вставки при помощи винтов 4 на изолирующем огнестойком основании 1. Для защиты людей от брызг расплавленного металла (при перегорании вставки) вставка закрывается кожухом 5 из лакированного картона.

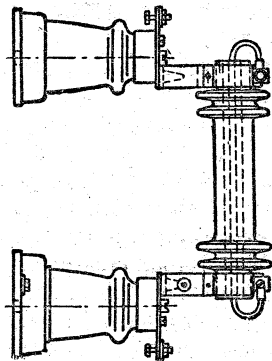


Рис. 1-16. Трубчатый предохранитель.

В установках высокого напряжения употребляются трубчатые предохранители (рис. 1-16), в которых плавящаяся проволока, помещена в фарфоровую трубку и имеет значительную длину. Возникающая при плавлении проволоки внутри трубки дуга быстро разрывается благодаря тяге воздуха в трубке; вместе с тем трубка не дает разбрызгиваться расплавленному металлу.

Для токов примерно до 60 а и низких напряжений применяются пробочные предохранители (рис. 1-17), у которых плавкая часть совершенно закрыта. Они состоят из основания 1, в которое ввертывается сменяемая при перегорании вставка 2—так называемая пробка; ток проходит здесь через винтовую резьбу пробки, плавкую проволоку 3 внутри нее и контактный винт 4 в дне основания.

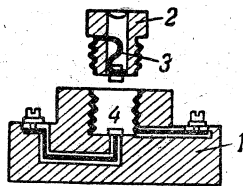


Рис. 1-17. Пробочный предохранитель.

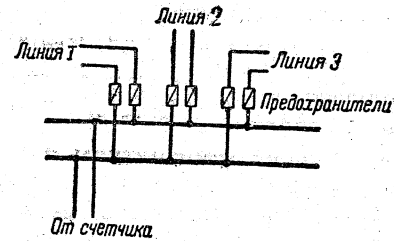


Рис. 1-18. Схема группового щитка на три группы.

В жилых домах предохранители сосредотачиваются на групповых щитках. Последние служат местом разветвления проводки: от них провода расходятся в отдельные постройки, части здания или комнаты квартиры. Каждую линию здесь защищает отдельная пара предохранителей (рис. 1-18). Такое устройство облегчает надзор за предохранителями и смену пробок при перегорании их.

Бывает, что вместо перегоревшей пробки в основание предохранителя вставляют несколько медных жилок, число которых в большинстве случаев берется случайно. В таких условиях при коротком замыкании в квартире может вспыхнуть пожар или от перегретою током, не защищенного уже предохранителем шнура проводки, или от разбрызгивания металла вокруг предохранителя.

Характерной величиной для плавкого предохранителя является его номинальный ток, т. е. тот предельный ток, который предохранитель должен выдерживать неопределенно долгое время, не разрушаясь. Это значение тока указывается на вставке предохранителя. Что же касается тока плав-

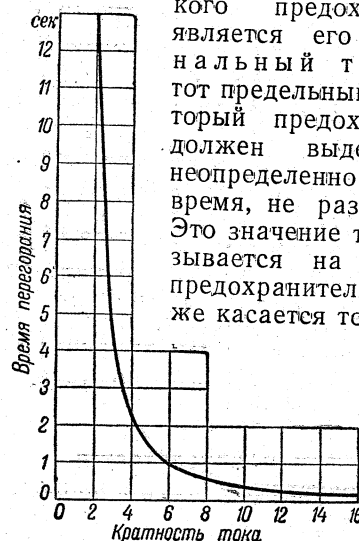


Рис. 1-19. Характеристика плавкового предохранителя.

ления предохранителя, то его значение зависит от ряда причин и в первую очередь от длительности нагрузки током и условий охлаждения предохранителя.

На рис. 1-19 представлена зависимость времени перегорания плавкой вставки от так называемой кратности тока, т. е. от отношения фактической величины тока к номинальному току.

Плавкий предохранитель должен надежно защищать провода установки от опасной перегрузки; однако он должен выдерживать кратковременные толчки тока при пусках двигателей и т. п. Поэтому при выборе предохранителя необходимо знать не только номинальный ток нагрузки линии, но и ее характер. Если линия питает двигатель, то за основу для выбора предохранителя нужно брать среднее значение пускового тока, которое ориентировочно в 5—7 раз больше номи-

нального значения тока двигателя. Длительность пускового процесса обычно составляет около 5—10 сек; в течение этого времени согласно рис. 1-19 предохранитель должен выдерживать ток, превышающий его номинальный приблизительно в 2,5 раза. Следовательно, номинальный ток плавкого предохранителя должен быть равен (или быть больше) 40% от среднего пускового тока двигателя, т. е.

$$I_{\text{ном}} \approx \frac{1}{2,5} I_{\text{пуск}} = 0,4 I_{\text{пуск}}$$

В случае линии, несущей спокойную нагрузку, без пусковых толчков, номинальный ток предохранителя должен быть равен рабочему току линии. Хотя плавкий предохранитель выдерживает и большую нагрузку, но длительно нагруженный свыше номинального тока он сильно нагревается и поэтому ненадежен в работе (см. подробнее гл. 22).

ГЛАВА ВТОРАЯ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2-1. Применение законов Кирхгофа для расчетов сложных электрических цепей

Существует ряд методов расчета токов в разветвленной цепи. Все эти методы основаны на применении двух законов Кирхгофа, которые подробно рассматриваются в курсе физики.

Первый из них выражает тот факт, что ни в одной точке цепи не происходит накопления электрических зарядов, поэтому алгебраическая сумма токов в проводниках, сходящихся к любому узлу электрической цепи, равна нулю. При этом следует считать положительными токи, направленные к узлу, и отрицательными — направленными от узла. Приведенное положение можно выразить простым уравнением

$$\Sigma I = 0. \quad (2-1)$$

Это и есть первый закон Кирхгофа.

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между э. д. с., токами и со-

противлениями в любом замкнутом контуре, который можно выделить в рассматриваемой цепи. Этот закон в математической форме выражает то вытекающее из закона сохранения энергии положение, что изменение потенциала при обходе замкнутого контура равно нулю, подобно тому как равно нулю изменение высоты при возвращении в исходную точку обхода.

Возьмем в качестве простого примера контур $gabcdfg$ (рис. 2-1) и обойдем его, например, по направлению движения часовой стрелки, начиная с точки g , потенциал которой φ_g будем считать известным (напомним, что потенциал каждой точки цепи может быть определен однозначно только в

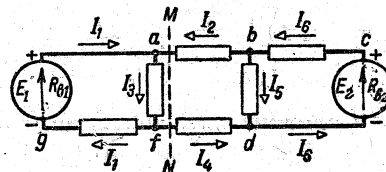


Рис. 2-1. Разветвленная электрическая цепь.



Густав Роберт Кирхгоф (1824—1887 гг.).

том случае, если потенциал одной из точек известен или выбран равным любой величине, например нулю). При переходе из точки g в точку a потенциал повысится на величину, равную разности между э. д. с. источника E_1 и внутренней потерей напряжения $I_1 R_{b1}$, т. е. потенциал точки a

$$\varphi_a = \varphi_g + E_1 - I_1 R_{b1}. \quad 1$$

Ток в участке, не содержащем источников, всегда направлен от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким. Поэтому потенциал φ_b точки b выше φ_a на величину напряжения между точками b и a :

$$U_{ba} = I_2 R_{ba},$$

где R_{ba} — сопротивление участка ba , т. е.

$$\varphi_b = \varphi_a + I_2 R_{ba}. \quad 2$$

По той же причине φ_d ниже φ_b , так что

$$\varphi_d = \varphi_b - I_5 R_{bd}. \quad 3$$

и φ_f выше φ_d , поэтому

$$\varphi_f = \varphi_d + I_4 R_{fd}. \quad 4$$

Наконец, φ_g ниже φ_f , так что

$$\varphi_g = \varphi_f - I_1 R_{fg}. \quad 5$$

Если сложить пять полученных уравнений, то по обе стороны знака равенства окажутся одинаковые суммы $\varphi_a + \varphi_b + \varphi_d + \varphi_f + \varphi_g$, которые могут

быть сокращены, и результат представится в виде:

$$0 = E_1 - I_1 R_{b1} + I_2 R_{ba} - I_5 R_{bd} + I_4 R_{fd} - I_1 R_{fg}$$

или

$$E_1 = I_1 (R_{b1} + R_{fg}) - I_2 R_{ba} + I_5 R_{bd} - I_4 R_{fd}.$$

Подобным же образом для контура $gabcdfg$ получим:

$$E_1 - E_2 = I_1 (R_{b1} + R_{fg}) - I_2 R_{ba} - I_6 (R_{cb} + R_{b2}) - I_4 R_{fd},$$

а для произвольного контура

$$\Sigma E = \Sigma (IR), \quad (2-2)$$

т. е. алгебраическая сумма э. д. с. в (любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме произведений токов на соответствующие сопротивления, причем как э. д. с., так и токи записываются с отрицательными знаками, если их направления не совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура. В этом и заключается второй закон Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа можно применить не только к какой-нибудь узловой точке, но и к любой части цепи в целом. Так как в этой части, как и в отдельных точках, не может происходить накопления электричества, то сумма токов, направленных извне в эту часть, должна равняться нулю. Поэтому, если, например, рассечь всю цепь на две части линией MN (рис. 2-1), то сумма токов, пересекающих эту линию справа налево, должна быть равна сумме токов, пересекающих ее слева направо. Если линия MN пересекает лишь две ветви цепи (как на рис. 2-1), то токи в этих ветвях должны быть равны по величине и противоположны по направлению ($I_2 = I_4$). Пользуясь этим следствием из первого закона Кирхгофа, при расчете токов в цепи можно уменьшить число неизвестных токов.

При помощи первого и второго законов Кирхгофа можно найти токи во всех ветвях любой разветвленной цепи с произвольным числом источников энергии, если заданы э. д. с. всех источников и сопротивления всех уча-

стков цепи. При этом нужно произвольно наметить на схеме стрелками направления искоемых токов и те из них, действительные направления которых отличны от намеченных, получат при решении соответствующих уравнений отрицательные числовые значения. Произвольно выбранные направления токов называют положительными направлениями.

Число уравнений, которое можно составить по первому и второму законам Кирхгофа, всегда больше числа неизвестных токов, равного числу ветвей цепи. Поэтому необходимо установить, сколько уравнений следует написать по первому и сколько по второму законам Кирхгофа, чтобы получить систему уравнений, имеющую определенные решения.

Так как каждая ветвь цепи всегда соединяет два узла, то ее ток является для одного из этих узлов положительным (направленным к узлу), а для другого — отрицательным (направленным от узла). Поэтому, если написать по первому закону Кирхгофа уравнения для всех узлов цепи, то каждый ток войдет в эти уравнения дважды: один раз как положительный, а другой раз как отрицательный, и сумма левых частей всех уравнений будет тождественно равна нулю.

Отсюда следует, что число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов цепи. Недостающие уравнения должны быть составлены по второму закону Кирхгофа. При этом следует начинать с наиболее простого контура и следить за тем, чтобы каждый следующий контур, для которого пишется уравнение, содержал хотя бы одну ветвь, не вошедшую в уже обходенные контуры.

Например, в цепи, представленной на рис. 2-2, содержится пять ветвей, т. е. пять неизвестных токов, и так как она имеет три узла, то по первому закону Кирхгофа для нее должно быть составлено два уравнения, а по второму — остальные три уравнения.

По первому закону Кирхгофа будем иметь:

для узла a

$$I_1 + I_2 - I_4 = 0;$$

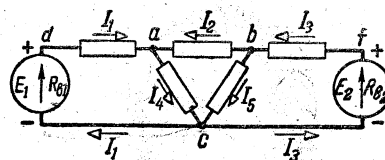


Рис. 2-2. Электрическая цепь с тремя узлами.

для узла b

$$I_3 - I_2 - I_5 = 0.$$

В качестве контуров для применения второго закона Кирхгофа выберем те три ячейки, на которые ветвями ac и bc разбивается весь внешний контур цепи. Обходя ячейки, по направлению движения часовой стрелки, получим:

для левой ячейки

$$E_1 = I_1(R_{b1} + R_{da}) + I_4R_{ac}$$

для средней ячейки, в которой нет источников энергии,

$$0 = -I_2R_{ba} + I_5R_{bc} - I_4R_{ac}.$$

для правой ячейки

$$-E_2 = -I_3(R_{b2} + R_{fb}) - I_5R_{bc}.$$

Решив полученную систему уравнений, можно найти все пять токов.

2-2. Расчет смешанного соединения

Наиболее простым случаем сложной цепи является цепь с одним источником энергии и притом такая, которая может быть составлена путем последовательного, параллельного или смешанного (последовательного и параллельного) соединения отдельных сопротивлений и их групп (рис. 2-3, где знак $=$ на обозначении источника энергии — символ постоянного тока). Здесь и в дальнейшем, когда задается не э. д. с. и внутреннее сопротивление источника, а напряжение на его зажимах, это значит, что либо напряжение на зажимах поддерживается неизменным независимо от тока источника, либо внутренним сопротивлением источника можно пренебречь по сравнению с сопротивлениями приемников, и тогда напряжение неизменно и равно э. д. с. источника.

Сначала схема рассчитываемой цепи должна быть упрощена, для чего

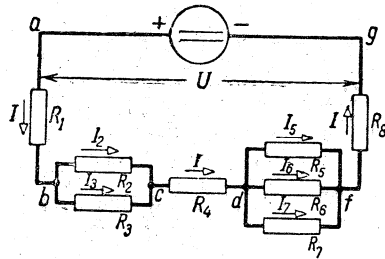


Рис. 2-3. Цепь с одним источником энергии.

нужно найти эквивалентные сопротивления для отдельных групп соединенных между собой параллельно сопротивлений.

Группа параллельно включенных ветвей с сопротивлениями R_5 , R_6 и R_7 между точками d и f находится под одним и тем же напряжением U_{df} , так что по закону Ома токи в этих сопротивлениях

$$I_5 = \frac{U_{df}}{R_5}; \quad I_6 = \frac{U_{df}}{R_6}; \quad I_7 = \frac{U_{df}}{R_7}.$$

Сумма этих токов согласно первому закону Кирхгофа равна току I в неразветвленной части цепи. Таким же должен быть и ток в сопротивлении R_{df} , эквивалентном данным трем сопротивлениям, т. е.

$$I = \frac{U_{df}}{R_{df}}.$$

Поэтому

$$\frac{U_{df}}{R_{df}} = \frac{U_{df}}{R_5} + \frac{U_{df}}{R_6} + \frac{U_{df}}{R_7}$$

$$\text{или} \quad \frac{1}{R_{df}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}, \quad (2-3)$$

т. е. при параллельном соединении, в противоположность последовательному, складываются обратные величины сопротивлений (проводимости), давая обратную величину эквивалентного сопротивления. Найдя по формуле (2-3) проводимость $\frac{1}{R_{df}}$, уже нетрудно вычислить и сопротивление R_{df} .

Если параллельно соединены только два сопротивления, как это имеет место между точками b и c на рис. 2-3, то для определения эквивалентного сопротивления имеем соотношение

$$\frac{1}{R_{bc}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 R_3},$$

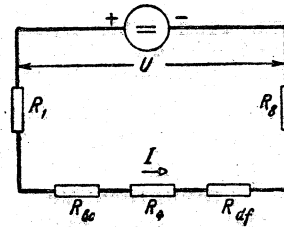


Рис. 2-4. Эквивалентная схема цепи рис. 2-3.

откуда

$$R_{bc} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}, \quad (2-4)$$

т. е. эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей равно произведению сопротивлений ветвей, деленному на сумму этих сопротивлений.

После замены двух групп сопротивлений эквивалентными сопротивлениями R_{df} и R_{bc} , рассматриваемая цепь преобразована в эквивалентное последовательное соединение (рис. 2-4), состоящее из пяти последовательно соединенных сопротивлений; следовательно, эквивалентное сопротивление всей цепи

$$R_9 = R_1 + R_{bc} + R_4 + R_{df} + R_8$$

и ток в неразветвленных участках цепи

$$I = \frac{U}{R_9}. \quad (2-5)$$

Теперь нетрудно найти токи и в остальных участках цепи. Так как

$$U_{bc} = IR_{bc} \quad \text{и} \quad U_{df} = IR_{df},$$

то

$$I_2 = \frac{U_{bc}}{R_2} = \frac{IR_{bc}}{R_2} = \frac{1}{R_2} \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3},$$

или

$$I_2 = \frac{IR_3}{R_2 + R_3} \quad (2-6)$$

и аналогично

$$I_3 = \frac{IR_2}{R_2 + R_3}.$$

Таким же образом

$$I_5 = \frac{U_{df}}{R_5} = \frac{IR_{df}}{R_5}$$

и аналогично

$$I_6 = \frac{U_{df}}{R_6} = \frac{IR_{df}}{R_6} \quad \text{и} \quad I_7 = \frac{IR_{df}}{R_7}.$$

Из последних соотношений видно, что ток распределяется между параллельными ветвями прямо пропорционально их проводимостям $\left(\frac{1}{R_5}, \frac{1}{R_6} \text{ и } \frac{1}{R_7}\right)$.

При параллельном соединении n одинаковых сопротивлений R_3 определяется аналогичным (2-3) соотношением

$$\frac{1}{R_3} = n \frac{1}{R},$$

откуда

$$R_3 = \frac{R}{n}. \quad (2-7)$$

При этом ток в каждом из n сопротивлений

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = \frac{I}{n}. \quad (2-8)$$

Если заданы не напряжение U на зажимах источника энергии, а его э. д. с. E и внутреннее сопротивление R_v , то последнее должно быть включено в состав R_3 так же, как сопротивления R_1, R_4 и R_8 , а в формуле (2-5) напряжение U должно быть заменено э. д. с. E .

2-3. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и обратно

Не всякая разветвленная цепь с одним источником энергии может быть составлена путем последовательного, параллельного или смешанного соединения отдельных сопротивлений. В электрических цепях как с одним, так и с несколькими источниками энергии часто встречаются соединения сопротивлений треугольником и звездой. Так, например, сопротивления R_1, R_2 и R_3 (рис. 2-5) образуют соединение звездой, а сопротивления R_2, R_3 и R_4 или R_4, R_5 и R_6 —соединения тре-

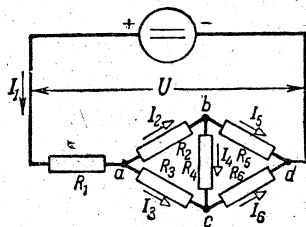


Рис. 2-5. Соединения звездой и треугольником.

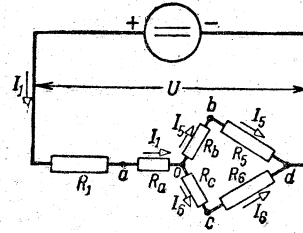


Рис. 2-6. Замена эквивалентной звездой треугольника сопротивлений.

угольником. Подобная цепь может быть преобразована в цепь со смешанным соединением сопротивлений, если заменить один или несколько треугольников сопротивлений эквивалентными им звездами или наоборот. Треугольник и звезда сопротивлений являются эквивалентными в том случае, если замена одного соединения другим не изменяет токов во всех остальных участках цепи, а следовательно, и потенциалов всех узлов цепи (кроме центрального узла звезды, который в эквивалентном треугольнике отсутствует). Если в цепи, представленной на рис. 2-5, заменить треугольник abc эквивалентной звездой (рис. 2-6), то получится смешанное соединение сопротивлений. Общее сопротивление такой цепи легко может быть представлено в виде:

$$R_3 = R_1 + R_a + \frac{(R_b + R_5)(R_c + R_6)}{R_b + R_5 + R_c + R_6},$$

после чего уже нетрудно найти токи I_1, I_5 и I_6 .

Чтобы найти токи I_2, I_3 и I_4 в сторонах треугольника, надо предварительно найти потенциалы узлов a, b и c , приняв за нуль, например, потенциал узла d . Это можно сделать при помощи преобразованной цепи (рис. 2-6), так как при замене треугольника звездой потенциалы узлов не должны измениться. Нетрудно видеть, что при $\varphi_d = 0$ имеем:

$$\varphi_b = I_5 R_5;$$

$$\varphi_c = I_6 R_6;$$

$$\begin{aligned} \varphi_a &= I_5 (R_5 + R_b) + I_1 R_a = \\ &= I_6 (R_6 + R_c) + I_1 R_a. \end{aligned}$$

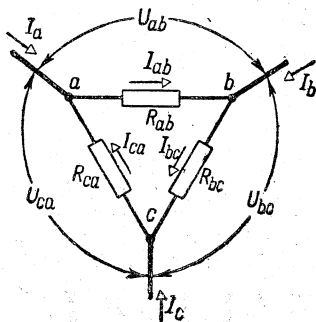


Рис. 2-7. Треугольник сопротивлений

Тогда

$$I_2 = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R_2} = \frac{I_5 R_b + I_1 R_a}{R_2};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{R_3} = \frac{I_6 R_c + I_1 R_a}{R_3};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R_4} = \frac{I_5 R_5 - I_6 R_6}{R_4}.$$

Найдем теперь формулы, при помощи которых по данным сопротивлениям R_{ab} , R_{bc} и R_{ca} треугольника (рис. 2-7) могут быть определены сопротивления R_a , R_b и R_c эквивалентной звезды (рис. 2-8).

По условию эквивалентности при одних и тех же токах I_a , I_b и I_c в схемах звезды и треугольника должны быть соответственно равны и напряжения между одноименными парами узлов: U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} . Выберем положительные направления токов, как показано стрелками на рис. 2-7 и 2-8, и выразим напряжение U_{ab} через токи I_a и I_b и через сопротивления треугольника (по рис. 2-7) и звезды (по рис. 2-8). По первому и второму законам Кирхгофа для схемы треугольника получим:

$$U_{ab} = -I_{ca} R_{ca} - I_{bc} R_{bc},$$

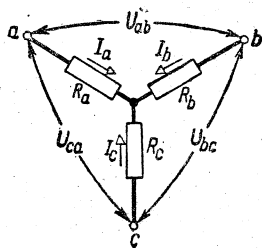


Рис. 2-8. Звезда сопротивлений.

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}, \text{ или } I_{bc} = I_{ab} + I_b = \\ = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} + I_b, \text{ так как } U_{ab} = I_{ab} R_{ab},$$

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}, \text{ или } I_{ca} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} - I_a,$$

следовательно,

$$U_{ab} = \left(I_a - \frac{U_{ab}}{R_{ab}} \right) R_{ca} - \left(\frac{U_{ab}}{R_{ab}} + I_b \right) R_{bc},$$

откуда

$$U_{ab} \left(1 + \frac{R_{bc}}{R_{ab}} + \frac{R_{ca}}{R_{ab}} \right) = I_a R_{ca} - I_b R_{bc},$$

или окончательно

$$U_{ab} = I_a \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} - \\ - I_b \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \quad (2-9)$$

Для эквивалентной звезды можно написать сразу:

$$U_{ab} = I_a R_a - I_b R_b. \quad (2-10)$$

Чтобы уравнения (2-9) и (2-10) давали одинаковые значения U_{ab} при любых значениях I_a и I_b , необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты при I_a и I_b в обоих уравнениях были соответственно одинаковы, т. е. чтобы было

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \\ R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \quad (2-11)$$

Полученные выражения показывают, что сопротивление любого луча эквивалентной звезды должно быть равно произведению двух сопротивлений треугольника, примыкающих к тому же узлу, деленному на сумму всех трех сопротивлений треугольника. Поэтому и для третьего луча звезды можно по аналогии написать:

$$R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \quad (2-12)$$

Те же три формулы можно получить, выражая напряжение U_{ca} через токи I_a и I_c или напряжение U_{bc} через токи I_b и I_c .

Если три сопротивления треугольника одинаковы по величине (R_{Δ}), то и три сопротивления эквивалентной звезды (R_Y) получаются равными, причем

$$R_Y = \frac{1}{3} R_{\Delta}. \quad (2-13)$$

Чтобы решить обратную задачу замены звезды сопротивлений эквивалентным треугольником, перемножим попарно выражения сопротивлений лучей звезды и сложим произведения:

$$\begin{aligned} R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a &= \\ &= \frac{R_{ab} R_{bc} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \end{aligned} \quad (2-14)$$

Разделив (2-14) на выражение (2-12), найдем:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}. \quad (2-15)$$

Выражение сопротивлений двух других сторон эквивалентного треугольника можно записать путем простой круговой перестановки индексов a , b , c в выражении (2-15):

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}; \quad (2-16)$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}. \quad (2-17)$$

Если три сопротивления звезды одинаковы (R_Y), то и сопротивления эквивалентного треугольника (R_{Δ}) получаются одинаковыми, причем

$$R_{\Delta} = 3R_Y. \quad (2-18)$$

2-4. Параллельное включение источников энергии

Сопротивления называются включенными параллельно, если все они присоединены своими концами к одним и тем же двум узлам цепи. В применении к источникам энергии это определение следует еще дополнить, отметив, что у параллельно включенных источников энергии э. д. с. должны быть направлены к одному и тому же узлу, иначе говоря, все положительные зажимы должны быть присоединены к одному узлу, а все отрицательные—

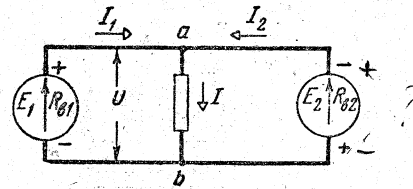


Рис. 2-9. Параллельное соединение двух источников энергии.

к другому. Так, например, два источника энергии на рис. 2-9 — включены параллельно; а на рис. 2-10 — не параллельно; последнее соединение равносильно совместному короткому замыканию двух источников, соединенных последовательно.

Распределение тока нагрузки между параллельно соединенными источниками зависит от их э. д. с. и внутренних сопротивлений. Найдем, например, распределение тока нагрузки I между двумя параллельно работающими источниками (рис. 2-9).

Напряжение U на зажимах ab связано с э. д. с. E_1 и E_2 , внутренними сопротивлениями R_{b1} и R_{b2} и токами I_1 и I_2 соотношениями

$$U = E_1 - I_1 R_{b1}; \quad U = E_2 - I_2 R_{b2},$$

или

$$E_1 - E_2 = I_1 R_{b1} - I_2 R_{b2}, \quad (2-19)$$

причем по первому закону Кирхгофа

$$I_2 = I - I_1. \quad (2-20)$$

Подставляя выражение I_2 в уравнение (2-19), получим:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_{b1} - (I - I_1) R_{b2},$$

откуда

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2 + I R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}},$$

или

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2}{R_{b1} + R_{b2}} + I \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}. \quad (2-21)$$

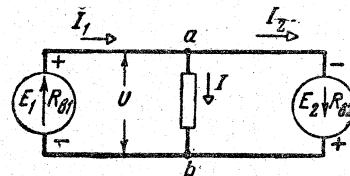


Рис. 2-10. Непараллельное соединение двух источников энергии.

Аналогично

$$I_2 = \frac{E_2 - E_1}{R_{B1} + R_{B2}} + I \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}. \quad (2-22)$$

Первый член правой части этих формул представляет собой ток соответствующего источника при отсутствии нагрузки ($I=0$). Если $E_2=E_1$, токи источников равны нулю. Второй член правой части, по существу, совпадает с выражением (2-6), дающим распределение тока I между двумя параллельно включенными сопротивлениями. Таким образом, если э. д. с. двух параллельно работающих источников равны (т. е. $E_1-E_2=0$), ток нагрузки распределяется между ними обратно пропорционально их внутренним сопротивлениям, а если не равны, то в цепи источников появляется еще уравнительный ток, выражаемый первым членом правой части формул (2-21) и (2-22).

2-5. Метод узлового напряжения

Непосредственное применение законов Кирхгофа для определения токов в сложных разветвленных цепях требует совместного решения значительного числа уравнений, что связано с большой затратой времени на вычисления. Существует, однако, ряд методов, в основе которых лежат те же законы Кирхгофа, но которые позволяют избежать решения системы уравнений или уменьшить число уравнений, подлежащих решению и, таким образом, значительно сократить вычислительную работу.

Одним из таких методов является метод узлового напряжения, который может быть применен в тех случаях, когда разветвленная цепь имеет всего лишь два узла (рис. 2-11, где внутренние сопротивления источников предполагаются включенными в сопротивления ветвей); или может быть приведена к такому виду при помощи преобразования треугольников сопротивлений в звезды или наоборот.

Число ветвей n , соединяющих эти два узла, может быть произвольным.

Напряжение $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ между узлами (узловое напряжение) можно рассматривать как разность между э. д. с. E_k любой (k -той) ветви

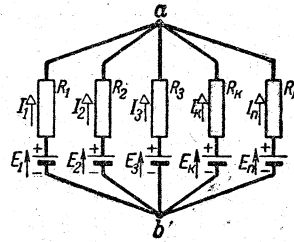


Рис. 2-11. Цепь с двумя узлами.

и потерей напряжения $I_k R_k$ в сопротивлении R_k этой ветви (куда включено и внутреннее сопротивление источника), т. е.

$$U_{ab} = E_k - I_k R_k,$$

если все токи условно считать направленными от узла b к узлу a . Отсюда ток в k -той ветви

$$I_k = \frac{E_k - U_{ab}}{R_k} = (E_k - U_{ab}) g_k, \quad (2-23)$$

где $g_k = \frac{1}{R_k}$ — проводимость соответствующей ветви.

Но по первому закону Кирхгофа сумма всех токов, сходящихся в узле a , должна быть равна нулю, т. е.

$$\sum_{k=1}^n \frac{E_k - U_{ab}}{R_k} = \sum_{k=1}^n (E_k - U_{ab}) g_k = 0,$$

или

$$\sum_{k=1}^n E_k g_k = U_{ab} \sum_{k=1}^n g_k,$$

откуда

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + \dots + E_n g_n}{g_1 + g_2 + \dots + g_n}. \quad (2-24)$$

По этой формуле определяется узловое напряжение, а затем по формуле (2-23) уже нетрудно найти искомый ток. Если э. д. с. в какой-либо ветви имеет направление, обратное указанному на рис. 2-11, или вовсе отсутствует, то в формулы (2-23) и (2-24) она должна соответственно войти со знаком минус или вовсе не войти. Если

в какой-либо ветви $E_k < U_{ab}$, то по формуле (2-23) ток получится отрицательным, т. е. направленным от узла a к узлу b .

2-6. Метод контурных токов

Если разветвленная цепь с несколькими источниками энергии имеет больше двух узлов, токи в ней могут быть определены по методу контурных токов, который является одним из наиболее универсальных методов расчета разветвленных цепей.

В ряде случаев разветвленная цепь может рассматриваться как совокупность соприкасающихся ячеек (четыре ячейки на рис. 2-12), каждая из которых представляет собой многоугольник, образованный некоторой частью ветвей цепи и не имеющей диагоналей. При этом одни ветви цепи являются общими для двух соседних ячеек, а другие составляют внешний контур цепи и каждая из них входит в состав только одной ячейки.

Искомые токи в ветвях цепи должны удовлетворять системе уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Если каждой ячейке приписать некоторый ток произвольно выбранного направления, называемый ее контурным током, а действительный ток в любом общем звене двух соседних ячеек рассматривать как алгебраическую сумму соответствующих контурных токов, то первый закон Кирхгофа будет удовлетворяться автоматически, так как каждый из контурных токов в одной ветви направлен к узлу, а в другой ветви направлен от узла. При определении контурных токов нужно будет только позаботиться о том, чтобы действительные токи удовлетворяли второму закону Кирхгофа.

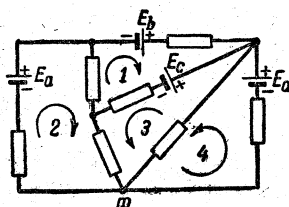


Рис. 2-12. Ячейки цепи и их контурные токи.

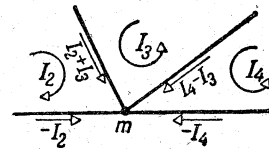


Рис. 2-13. Первый закон Кирхгофа в применении к контурным токам.

Цепь, представленная на рис. 2-12, состоит, например, из четырех ячеек и имеет, следовательно, четыре контурных тока: I_1, I_2, I_3, I_4 . Действительные токи в ветвях, сходящихся, например, в точке m , будут при этом (рис. 2-13): $I_2 + I_3, I_4 - I_3, -I_4$ и $-I_2$ и дадут в сумме нуль. Ток в любой внешней ветви будет по величине равен соответствующему контурному току, как единственному току в этой ветви, а по знаку одинаков или противоположен ему в зависимости от того, совпадают или различны их направления.

Если для всех n ячеек написать уравнения по второму закону Кирхгофа, то получится система n уравнений с n неизвестными контурными токами, решение которой и определит все контурные (а затем и все действительные) токи. Если обозначить E_k алгебраическую сумму всех э. д. с. k -той ячейки, то, например, для первой ячейки, обходя по направлению ее контурного тока, получим по второму закону Кирхгофа уравнение

$$I_1 R_{10} + (I_1 + I_3) R_{13} + (I_1 - I_2) R_{12} = E_1,$$

где R с двумя индексами, не равными нулю, — сопротивление ветви, разделяющей две соседние ячейки; R_{10} — сопротивление внешней ветви первой ячейки $E_1 = E_b - E_c$, так как E_b совпадает с направлением обхода ячейки, а E_c имеет противоположное направление.

Собирая вместе все члены, содержащие контурный ток данной ячейки (I_1), приведем это уравнение к виду:

$$I_1 (R_{10} + R_{12} + R_{13}) - I_2 R_{12} + I_3 R_{13} = E_1.$$

Таким образом, алгебраическая сумма э. д. с. каждой ячейки равна алгебраической сумме произведений: 1) контурного тока данной ячейки на сумму сопротивлений всех ветвей этой ячейки и 2) контурных токов всех

смежных с данной ячейкой на соответствующие сопротивления общих ветвей. Правило знаков для э. д. с. и контурных токов остается при этом таким же, как и при обычном применении второго закона Кирхгофа.

Для k -той ячейки уравнение по второму закону Кирхгофа может быть записано в следующем виде:

$$I_k R_{kk} + \sum I_m R_{km} = E_k, \quad (2-25)$$

где R_{kk} — сумма сопротивлений всех ветвей k -той ячейки;

R_{km} — сопротивление общей ветви данной k -той и смежной m -ной ячейки;

I_m — контурный ток смежной ячейки (с учетом его знака).

Таких уравнений может быть написано столько, сколько ячеек образует данная разветвленная цепь, а так как число ячеек всегда меньше числа ветвей цепи, то метод контурных токов дает систему с меньшим числом уравнений, чем непосредственное применение законов Кирхгофа. После того как найдены контурные токи, легко могут быть определены и действительные токи во всех ветвях.

Однако для определения контурных токов вовсе не обязательно составлять систему уравнений типа (2-25).

Для контурного тока можно получить готовую формулу, решив систему уравнений в общем виде, и в конкретных задачах пользоваться этой готовой общей формулой.

Для вывода этой общей формулы, вместо того чтобы приписать разные знаки контурному току в зависимости от его направления в данной ветви, условимся приписывать эти знаки сопротивлениям общих ветвей R_{km} , а все контурные токи считать положительными. Кроме того, для большей общности выводов будем считать, что в каждое из уравнений (2-25) входят все контурные токи данной цепи, но стоящие при них в качестве коэффициентов сопротивления равны нулю, если ячейки k и m не являются смежными. Так, например, для той же первой ячейки (рис. 2-12) получим уравнение

$$R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + R_{13}I_3 + 0 \cdot I_4 = E_1,$$

где $R_{12} < 0$, $R_{13} > 0$, $R_{11} > 0$ и равно

сумме абсолютных величин трех сопротивлений, входящих в первую ячейку, а E_1 имеет прежнее значение.

Для цепи, состоящей из n ячеек, получаем следующую систему линейных уравнений:

$$R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \dots + R_{1n}I_n = E_1;$$

$$R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + \dots + R_{2n}I_n = E_2;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$R_{n1}I_1 + R_{n2}I_2 + \dots + R_{nn}I_n = E_n,$$

решение которой для произвольного тока I_k имеет вид:

$$I_k = \frac{\Delta_k}{\Delta}, \quad (2-26)$$

где определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}, \quad (2-27)$$

а определитель Δ_k получается из Δ путем замены сопротивлений его k -того столбца на э. д. с. E_1, E_2, \dots, E_n .

Формула (2-26) служит для определения любого контурного тока. При этом выражение определителя системы при помощи формулы (2-27) может быть составлено непосредственно по схеме без предварительного составления системы уравнений.

Так, например, для схемы, изображенной на рис. 2-12, поскольку она состоит из четырех ячеек,

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & 0 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ 0 & 0 & R_{43} & R_{44} \end{vmatrix},$$

причем $R_{21} = R_{12}$, $R_{32} = R_{23}$ и т. д. Контурный ток I_3 вычисляется по формуле

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta},$$

где

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & E_1 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & E_2 & 0 \\ R_{31} & R_{32} & E_3 & R_{34} \\ 0 & 0 & E_4 & R_{44} \end{vmatrix},$$

причем $E_1 = E_b - E_c$, $E_2 = E_a$, $E_3 = -E_c$, $E_4 = E_d$.

Определители Δ и Δ_3 вычисляются по правилам, которые можно найти в математических справочниках.

2-7. Метод наложения

Определитель Δ_k в формуле (2-26) можно представить в виде:

$$\Delta_k = E_1 \Delta_{k1} + E_2 \Delta_{k2} + \dots + E_m \Delta_{km} + \dots + E_n \Delta_{kn},$$

разложив его по элементам k -того столбца. При этом алгебраические дополнения Δ_{km} получаются из определителя системы, если в нем зачеркнуть k -тый столбец и m -ную строку и полученные, таким образом, определители умножить на $(-1)^{k+m}$.

Подставляя это выражение Δ_k в формулу (2-26), получим:

$$I_k = E_1 \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} + E_2 \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} + E_3 \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} + \dots + E_n \frac{\Delta_{kn}}{\Delta}. \quad (2-28)$$

Каждое слагаемое правой части этого выражения представляет собой ток в k -той ячейке при наличии э. д. с. в какой-нибудь одной из ячеек и отсутствии э. д. с. в остальных ячейках. Таким образом, это уравнение показывает, что ток в любой ячейке, а значит, и в любой ветви можно рассматривать как получившийся от наложения частичных токов, возникающих в этой ветви под независимым действием каждой э. д. с. в контуре, а следовательно, каждой э. д. с. в ветви в отдельности.

Это положение, известное под названием принципа наложения, представляет собой частный случай широко применяемого в физике принципа независимого действия сил.

Принцип наложения может служить основанием соответствующего метода расчета электрических цепей—метода наложения. В цепи с несколькими источниками энергии поочередно определяются частичные токи, создаваемые действием каждой из э. д. с. (остальные э. д. с. всякий раз

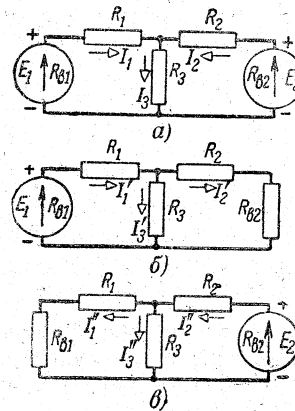


Рис. 2-14. Применение метода наложения.

полагаются равными нулю). Затем алгебраически складываются (накладываются) частичные токи, создаваемые в одних и тех же ветвях отдельными э. д. с. Таким путем определяются результирующие токи, создаваемые совместным действием всех э. д. с.

Например, в цепи рис. 2-14, а, содержащей два источника энергии, сначала исключается э. д. с. E_2 (но сохраняется внутреннее сопротивление R_{B2} источника энергии). Это дает возможность рассматривать цепь как схему со смешанным соединением приемников и просто определить все частичные токи I'_1, I'_2, I'_3 , создаваемые действием одной только э. д. с. E_1 (рис. 2-14, б). Затем таким же образом рассчитываются частичные токи I''_1, I''_2, I''_3 , создаваемые одной э. д. с. E_2 (рис. 2-14, в).

Наконец, токи, созданные независимым действием э. д. с., накладываются, и определяются результирующие токи в цепи, содержащей два источника энергии:

$$I_1 = I'_1 - I''_1; \quad I_2 = I''_2 - I'_2; \\ I_3 = I'_3 + I''_3.$$

Метод наложения обладает, однако, крупным недостатком, который состоит в том, что частичные токи, имеющие в какой-либо ветви различные направления, часто оказываются в несколько раз больше результирующего тока, благодаря чему небольшая (в процентном выражении) ошибка

в определении частичных токов приводит к недопустимо большой ошибке в величине результирующего тока. По этой причине метод наложения применяется сравнительно редко.

2-8. Лабораторная работа. Сложная цепь постоянного тока

Схема соединений для данного опыта дана на рис. 2-15. Здесь два переключателя K_1 и K_2 дают возможность отключить любой из источников тока и замкнуть накоротко его место в цепи. Прежде чем выполнять соединения, нужно при помощи измерительного моста определить сопротивления трех реостатов R_1 , R_2 и R_0 , а также измерить вольтметр э. д. с. двух аккумуляторов E_1 и E_2 (незначительным внутренним падением напряжения, создаваемым током вольтметра в аккумуляторе, можно пренебречь). Выполнив соединения согласно рис. 2-15, оставить сначала K_1 и K_2 разомкнутыми. Затем посредством переключателя K_1 включить источник тока E_1 , а место источника тока E_2 замкнуть накоротко при помощи переключателя K_2 . В таких условиях цепь будет представлять собой смешанное соединение, для которого общий ток

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_0}{R_2 + R_0}} = \frac{E_1}{R_1 + R_{p1}};$$

здесь $R_{p1} = \frac{R_2 R_0}{R_2 + R_0}$ — сопротивление разветвления.

Ток во второй ветви

$$I'_2 = \frac{I'_1 R_{p1}}{R_2} = \frac{E_1 R_{p1}}{(R_1 + R_{p1}) R_2}.$$

Ток в нулевой ветви

$$I'_0 = \frac{E_1 R_{p1}}{(R_1 + R_{p1}) R_0}.$$

Внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь.

Все величины (э. д. с. и сопротивления), входящие в правые части выражений токов, известны из предварительных измерений. Нужно вычислить токи I'_1 , I'_2 и I'_0 на основании этих измерений и сравнить со значениями

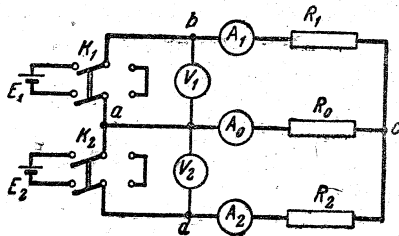


Рис. 2-15. Схема лабораторной работы—сложная цепь постоянного тока.

Таблица опыта: сложная цепь постоянного тока

Способ соединения	Наблюдено					Вычислено		
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_0	I_1	I_2	I_0
1. Включен E_1	—	—	—	—	—	—	—	—
2. Включен E_2	—	—	—	—	—	—	—	—
3. Включены E_1 и E_2	—	—	—	—	—	—	—	—

этих токов, полученными по показаниям амперметров, что даст возможность определить относительную погрешность измерения.

Затем нужно отключить посредством K_1 источник тока E_1 и посредством K_2 включить источник тока E_2 . В этом случае токи в ветвях будут:

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_{p2}};$$

$$I''_1 = \frac{E_2 R_{p2}}{(R_2 + R_{p2}) R_1};$$

$$I''_0 = \frac{E_2 R_{p2}}{(R_2 + R_{p2}) R_0};$$

здесь $R_{p2} = \frac{R_1 R_0}{R_1 + R_0}$ — сопротивление разветвления.

Так же как и в первом случае, нужно сравнить вычисленные значения токов с непосредственно измеренными и определить относительную погрешность.

Наконец, нужно включить оба источника тока и измерить токи I_1 , I_2 и I_0 . Схема (рис. 2-15) с двумя источниками тока соответствует иногда применяемой трехпроводной системе постоянного тока, в соответствии с чем средняя ветвь названа нулевой (ток в средней ветви равен нулю, если $I_1 = I_2$).

Для последнего соединения нужно произвести контрольные подсчеты на основании двух законов Кирхгофа. Согласно первому закону должно иметь место равенство

$$I_0 = I_1 - I_2,$$

а согласно второму закону

$$E_1 + E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

и

$$E_1 = I_1 R_1 \pm I_0 R_0.$$

Знак перед $I_0 R_0$ зависит от направления тока I_0 .

Согласно принципу наложения

$$I_1 = I'_1 - I''_1;$$

$$I_2 = I''_2 - I'_2;$$

$$I_0 = I'_0 + I''_0,$$

что также нужно сопоставить.

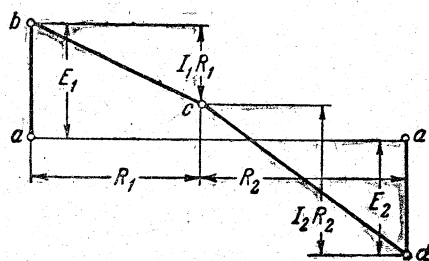


Рис. 2-16. Потенциальная диаграмма к цепи рис. 2-15.

На основании результатов измерения нужно построить в масштабе потенциальную диаграмму контура $abcd$ (рис. 2-16).

План работы

1. Определить при помощи измерительного моста сопротивления трех реостатов R_1 , R_2 и R_0 .

2. Измерить вольтметром э. д. с. двух аккумуляторов E_1 и E_2 .

3. Выполнить соединения рис. 2-15, оставив переключатели K_1 и K_2 разомкнутыми.

4. Включить источник тока E_1 , замкнув коротко место в схеме источника тока E_2 . Измерить токи I_1' , I_2' и I_0' в ветвях схемы и произвести контрольные расчеты.

5. Включить источник тока E_2 , замкнув коротко место в схеме источника тока E_1 . Измерить токи I_2'' , I_1'' и I_0'' в ветвях схемы и произвести контрольные расчеты.

6. Включить оба источника тока и измерить токи I_1 , I_2 и I_0 . Произвести контрольные подсчеты на основании двух законов Кирхгофа.

7. Применяя принцип наложения, сопоставить результаты опытов пп. 4, 5 и 6.

8. Построить в масштабе потенциальную диаграмму цепи для контура $abcd$.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3-1. Нелинейные элементы электрической цепи

В состав электрической цепи часто входят такие элементы, для которых несправедлив закон Ома, в которых ток, иначе говоря, не пропорционален приложенному напряжению. Такие элементы цепи называются нелинейными.

Примером нелинейного элемента цепи может служить обыкновенная лампа накаливания, так как ее сопротивление не является постоянным, а сильно зависит от температуры накаливаемой нити, а следовательно, от тока. В качестве второго примера можно привести так называемый бареттер—устройство, служащее для поддержания в цепи практически постоянного тока при небольших колебаниях напряжения. Бареттером служит

железная нить, помещенная в стеклянной колбе, наполненной водородом.

К нелинейным относятся и разного рода вентильные элементы (селеновые, купроксные и т. д.), сопротивление которых резко меняется в зависимости от направления проходящего через них тока. К нелинейным элементам принадлежат также электронные лампы, газосветные лампы и ряд других устройств.

В основу расчета режима цепи, содержащей нелинейный элемент, кладется вольт-амперная характеристика этого элемента, т. е. графически (рис. 3-1) или аналитически выраженная зависимость между током и напряжением на зажимах элемента.

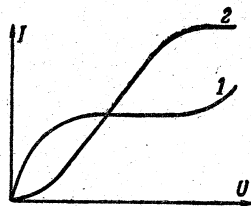


Рис. 3-1. Вольт-амперные характеристики. 1—бареттера; 2—электронной лампы (диода).

3-2. Графический расчет неразветвленной цепи с одним нелинейным сопротивлением

Если цепь (рис. 3-2) представляет собой последовательное соединение линейного (R_1)¹ и нелинейного¹ сопротивлений и включена под заданное напряжение U , то по закону Кирхгофа на

¹ Символом нелинейности сопротивления на схемах является черта, расположенная параллельно основному символу сопротивления.

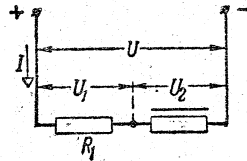


Рис. 3-2. Последовательное соединение линейного и нелинейного сопротивления.

пряжение на зажимах нелинейного сопротивления

$$U_2 = U - IR_1. \quad (3-1)$$

Построим прямую, выражаемую этим уравнением, совместно с вольт-амперной характеристикой $I(U_2)$ нелинейного сопротивления (рис. 3-3). Эту прямую проще всего построить по двум точкам: при $I=0$ (т. е. на оси абсцисс) $U_2=U$ и при $U_2=0$ (т. е. на оси ординат) $I = \frac{U}{R_1}$.

Режим цепи должен удовлетворять как вольт-амперной характеристике $I(U_2)$, так и уравнению прямой (3-1), т. е. определяться точкой пересечения M прямой с вольт-амперной характеристикой. Абсцисса этой точки дает напряжение на нелинейном сопротивлении U_2 , а ее ордината — ток в цепи I при заданных величинах U и R_1 .

Если в цепи имеется несколько линейных сопротивлений, соединенных между собой любым образом, а с нелинейным сопротивлением — последовательно, то всю группу линейных сопротивлений следует заменить одним эквивалентным сопротивлением, и тогда задача сведется к только что рассмотренной.

3-3. Графический расчет разветвленной цепи с одним источником энергии

Рассмотрим цепь, представляющую собой смешанное соединение трех сопротивлений, в общем случае нелинейных (рис. 3-4), и включенную под заданное напряжение U .

Вольт-амперные характеристики $I_2(U_{23})$ и $I_3(U_{23})$ двух параллельных ветвей (рис. 3-5) представляют собой зависимости токов I_2 и I_3 от общего напряжения U_{23} этих параллельных ветвей.

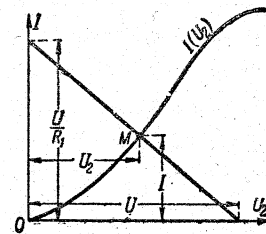


Рис. 3-3. Графический расчет режима в последовательной цепи.

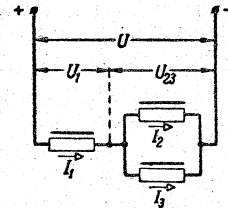


Рис. 3-4. Смешанное соединение нелинейных сопротивлений.

Вольт-амперная характеристика $I_1(U_1)$, нанесенная на рис. 3-5 пунктиром, выражает зависимость общего тока цепи от напряжения U_1 . Но напряжения U_1 и U_{23} связаны между собой соотношением

$$U_{23} = U - U_1, \quad (3-2)$$

где U — постоянная величина. Поэтому каждому значению U_{23} соответствует по характеристике $I_1(U_1)$ определенное значение I_1 . Чтобы получить кривую зависимости I_1 от U_{23} , имея вольт-амперную характеристику $I_1(U_1)$, нужно, задавая различные значения

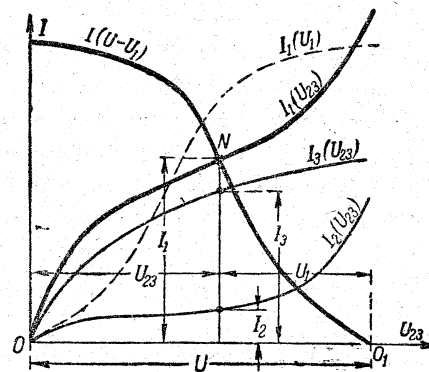


Рис. 3-5. Графическое определение токов и напряжений при смешанном соединении нелинейных сопротивлений [для кривой $I_1(U_1)$ по оси абсцисс отложено напряжение U_1 , для всех остальных кривых U_{23}].

тока I_1 , определять по характеристике U_1 , а затем по формуле (3-2) вычислить соответствующие значения U_{23} . Так, при $I_1=0$, $U_1=0$ и $U_{23}=U$ (точка O_1 на рис. 3-5).

Перестроенная таким образом характеристика изображена на рис. 3-5 сплошной линией и обозначена $I_1(U-U_1)$. Она может быть построена зеркальным отображением графика $I_1(U_1)$ относительно начала координат (точки O) и перенесением начала координат полученной кривой в точку O_1 . Абсциссой любой точки кривой $I_1(U-U_1)$ по отношению к O_1 является U_1 , а по отношению к O — соответствующее значение $U_{23}=U-U_1$.

Но между I_1 и U_{23} существует и другая зависимость. Так как $I_1 = I_2 + I_3$, то, складывая ординаты кривых $I_2(U_{23})$ и $I_3(U_{23})$, получим кривую $I_1(U_{23})$, выражающую эту вторую зависимость. Поскольку режим цепи должен удовлетворять обеим зависимостям I_1 от U_{23} , он должен соответствовать точке N , в которой пересекаются кривые $I_1(U-U_1)$ и $I_1(U_{23})$. Ордината этой точки изображает значение тока I_1 в цепи, абсцисса по отношению к O — значение напряжения U_{23} на параллельно соединенных элементах, а по отношению к O_1 — значение напряжения U_1 . Соответствующие значения токов I_2 и I_3 находятся, как показано на рис. 3-5.

Метод расчета не изменится; если одно или два из заданных сопротивлений будут линейными. Отличие будет состоять только в том, что вольт-амперные характеристики этих сопротивлений будут прямыми линиями.

3-4. Аналитический расчет нелинейной цепи

Методика расчета линейных электрических цепей разработана очень обстоятельно. Естественно стремление использовать ее, хотя бы частично, также и для расчета цепей с нелинейными элементами. В частности, для расчета цепей с электронными и полупроводниковыми приборами широко используются линеаризация характеристик и расчет цепи на основании ее динамических параметров.

Если в известных пределах отно-

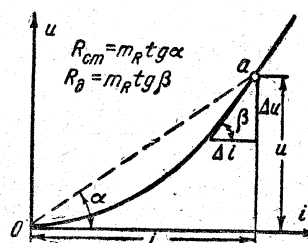


Рис. 3-6. Графическое определение статического и динамического сопротивления $R_{ст} = m_R \operatorname{tg} \alpha$, $R_{д} = m_R \operatorname{tg} \beta$.

шение изменений двух электрических величин x и y — величина постоянная, то отношение $\frac{\Delta x}{\Delta y} = r_{д}$ или в пределе $\frac{dx}{dy} = r_{д}$ именуется динамическим параметром цепи. Эти динамические параметры являются основными для расчетов цепей электроники.

В отличие от динамических параметров сами отношения тех же электрических величин именуются статическими параметрами цепи $\frac{x}{y} = r_{ст}$.

В частности, сопротивление, определяемое как отношение $\frac{u}{i} = R_{ст}$, является статическим сопротивлением, а $\frac{du}{di} = R_{д}$ — динамическим сопротивлением. Рис. 3-6 поясняет графически различие в этих двух понятиях. Если сопротивление цепи постоянно, то $R_{ст} = R_{д}$. Рассмотрим нелинейную цепь, вольт-амперная характеристика которой изображается кривой рис. 3-7. Такой вид характеристики может быть обусловлен наличием в цепи

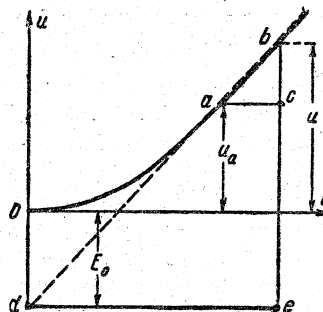


Рис. 3-7. Линеаризация вольт-амперной характеристики.

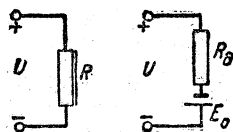


Рис. 3-8. Эквивалентная схема нелинейного сопротивления, соответствующая характеристике рис. 3-7.

сопротивления с положительным температурным коэффициентом (см. § 1-2). Для расчета режима цепи при напряжении, большем чем u_a (соответствующем перегибу характеристики), можно заменить характеристику прямой линией. Прямую эту продолжим вниз за точку a до пересечения с осью ординат. Она отсекает на этой оси отрезок в масштабе построения, изображающий некоторую фиктивную э. д. с. E_0 . Динамическое сопротивление цепи в условиях $u > u_a$ будет:

$$R_d = \frac{du}{di} = m_R \operatorname{tg} \alpha = m_R \frac{bc}{ac} = m_R \frac{be}{de} = \frac{u + E_0}{i}, \quad (3-3)$$

где m_R — коэффициент, зависящий от масштабов построения графика; на основании (3-3)

$$u = iR_d - E_0. \quad (3-4)$$

Это выражение показывает, что при $u > u_a$ ток в цепи можно рассчитывать, пользуясь эквивалентной схемой рис. 3-8, содержащей постоянное сопротивление R_d и источник э. д. с. E_0 , включенный по направлению тока. Последний можно рассчитывать, пользуясь формулой

$$i = \frac{u + E_0}{R_d}. \quad (3-5)$$

В качестве примера расчета более сложной цепи методом линеаризации характеристик рассмотрим расчет ко-

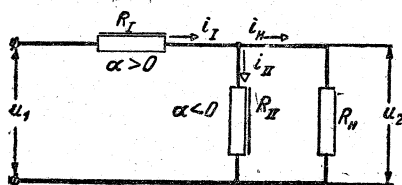


Рис. 3-9. Простейшая схема стабилизатора напряжения на нелинейных сопротивлениях (R_I и R_{II}).

эффициента стабилизации стабилизатора напряжения на нелинейных сопротивлениях. Стабилизатором напряжения называется устройство, снабженное двумя входными и двумя выходными зажимами, у которого значительное изменение Δu_1 напряжения, приложенного ко входным зажимам, вызывает относительно малое изменение Δu_2 напряжения между выходными зажимами. Коэффициент стабилизации равен отношению относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения:

$$k_{\text{стаб}} = \frac{\Delta u_1}{u_1} \cdot \frac{\Delta u_2}{u_2}$$

или

$$k_{\text{стаб}} = \frac{u_2}{u_1} \frac{du_1}{du_2}. \quad (3-6)$$

Стабилизация напряжения требуется при питании электроизмерительных устройств, установок автоматизации производства, телевизоров, электронных микроскопов и т. д. В зависимости от конкретных условий и требований применяются самые различные виды стабилизаторов — на нелинейных сопротивлениях, феррорезонансные, ионные, электронные, полупроводниковые и т. д. Одна из схем стабилизатора напряжений дана на рис. 3-9. Это смешанное соединение нагрузки R_N и двух стабилизирующих нелинейных сопротивлений R_I и R_{II} . Одно из них R_I , включенное последовательно с разветвлением, содержащим нагрузку R_N , обладает положительным температурным коэффициентом. При повышении входного напряжения u_1 возрастает ток, проходящий через R_I . Этот ток подогревает R_I и последнее увеличивается, а его увеличение вызывает возрастание потери напряжения $i_I R_I$, что обуславливает уменьшение выходного напряжения u_2 . Таким образом, изменения R_I противодействуют изменениям выходного напряжения u_2 . Нагрузка R_N шунтирована нелинейным сопротивлением R_{II} , обладающим отрицательным температурным коэффициентом ($\alpha_2 < 0$). При повышении входного напряжения u_1 сопротивление R_{II} подогревается током и значительно уменьшается, а вследствие этого возрастает ток i_{II} , что

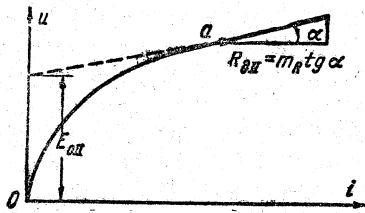


Рис. 3-10. Вольт-амперная характеристика шунтирующего сопротивления (R_{dI}) стабилизатора.

вызывает увеличение потери напряжения в R_I , а следовательно, и понижение выходного напряжения u_2 . Таким образом, изменения R_{dI} также противодействуют изменениям u_2 .

Для аналитического расчета методом линеаризации эквивалентная схема для R_I уже была дана выше (рис. 3-8), а эквивалентная схема для R_{dI} строится на основании линеаризации вольт-амперной характеристики этого сопротивления (рис. 3-10). Она, так же как и схема R_I , состоит из постоянного динамического сопротивления и постоянной э. д. с. E_{0dI} , направленной в этом случае против тока (рис. 3-11). На основании этих соображений получаем полную эквивалентную схему стабилизатора (рис. 3-12), для которой составляем уравнения двух законов Кирхгофа:

$$i_1 = i_{dI} + i_n; \quad (3-7)$$

$$u_1 = i_1 R_{dI} - E_{0I} + u_2; \quad (3-8)$$

$$u_2 = u_{ab} = i_{dI} R_{dII} + E_{0dII}. \quad (3-9)$$

Кроме того,

$$i_n = \frac{u_2}{R_n}.$$

На основании (3-8) и (3-9)

$$i_1 = \frac{u_1 + E_{0I} - u_2}{R_{dI}},$$

$$i_{dII} = \frac{u_2 - E_{0dII}}{R_{dII}}.$$

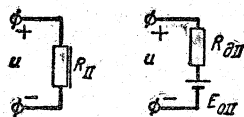


Рис. 3-11. Эквивалентная схема нелинейного сопротивления, соответствующая характеристике рис. 3-10.

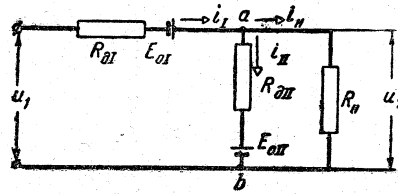


Рис. 3-12. Эквивалентная схема стабилизатора рис. 3-9.

Подставив значения токов в (3-7), получаем:

$$\frac{u_1 + E_{0I} - u_2}{R_{dI}} = \frac{u_2 - E_{0dII}}{R_{dII}} + \frac{u_2}{R_n},$$

на основании чего

$$u_1 = u_2 \frac{R_{dI} R_n + R_{dII} R_n + R_{dI} R_{dII}}{R_{dII} R_n} - \frac{E_{0I} R_{dII} + E_{0dII} R_{dI}}{R_{dII}},$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{du_2} &= \frac{R_n R_{dII} + R_n R_{dI} + R_{dI} R_{dII}}{R_n R_{dII}} = \\ &= 1 + \frac{R_{dI}}{R_{dII}} + \frac{R_{dI}}{R_n}, \end{aligned}$$

что позволяет на основании (3-6) выразить коэффициент стабилизации через параметры цепи и отношение напряжений

$$k_{\text{стаб}} = \frac{u_2}{u_1} \left(1 + \frac{R_{dI}}{R_{dII}} + \frac{R_{dI}}{R_n} \right), \quad (3-10)$$

$k_{\text{стаб}}$ тем больше, чем больше R_{dI} и чем меньше R_{dII} , но соответственно растут потери энергии в стабилизирующих сопротивлениях R_I и R_{dI} ; поэтому стабилизация посредством нелинейных сопротивлений применяется лишь при небольших мощностях нагрузки.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЕТЫ

4-1. Магнитное поле тока

Электромагниты являются важной частью большинства электрических машин, аппаратов и приборов; их назначение — возбуждение магнитного поля. Обмотка электромагнита (обычно катушка) выполняется из изолированной проволоки; пропущенный по этой обмотке электрический ток возбуждает магнитный поток. В большинстве случаев, чтобы усилить магнитное поле и придать ему нужную конфигурацию, электромагнит снабжают ферромагнитным сердечником. Магнитное поле во всех без исключения случаях возбуждается электрическим током. Основной задачей электромагнитных расчетов является установление определенной зависимости между полем и возбуждающим его током.

Две векторные магнитные величины являются основными при технических расчетах. Это магнитная индукция \mathbf{B} и напряженность магнитного поля \mathbf{H} . Они связаны простым соотношением $\mathbf{B}/\mathbf{H} = \mu_a$. Здесь μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды.

Интенсивность и направление магнитного поля в каждой его точке определяются вектором магнитной индукции \mathbf{B} . Поток этого вектора сквозь какую-нибудь поверхность S

$$\Phi = \int_S B_n dS \quad (4-1)$$

называется короче магнитным потоком. В этом выражении dS представляет собой величину элемента поверхности S , B_n — величину нормальной к dS составляющей вектора \mathbf{B} , а интегрирование производится по всей поверхности S . Основной единицей магнитного потока в системе МКСА является вебер ($вб$), именуемая также вольт-секунда ($в \cdot с$), а основной единицей магнитной индукции $вб/м^2$. Однако размеры электрических машин и аппаратов обычно выражаются в $см$. По этой причине для электротехнических расчетов чаще применяются магнитные единицы, кратные основным,

но определяемые через $см$. В частности, для магнитной индукции такой единицей является $вб/см^2 = 10^4 вб/м^2$. Единицы потока и индукции системы МКСА связаны с соответствующими единицами абсолютной электромагнитной системы (СГСМ) соотношениями:

$$1 \text{ максвелл (мкс)} = 10^{-8} \text{ вб};$$

$$1 \text{ гаусс (гс)} = 10^{-4} \text{ вб/м}^2 = \\ = 10^{-8} \text{ вб/см}^2.$$

Если во всех точках какой-либо поверхности S магнитное поле имеет одинаковую индукцию B и направлено нормально к этой поверхности, то соотношение (4-1) может быть заменено более простым

$$\Phi = BS. \quad (4-2)$$

Напряженность магнитного поля \mathbf{H} определяет условия возбуждения магнитного поля, — под действием напряженности возникает определенная магнитная индукция. Иногда \mathbf{H} именуется силой магнитного поля.

Для расчета напряженности поля \mathbf{H} основным является закон полного тока, который определяет зависимость напряженности поля от электрического тока, возбуждающего это поле. Согласно закону полного тока линейный интеграл вектора напряженности магнитного поля вдоль любого замкнутого контура равен алгебраической сумме токов (полному току), охватываемых этим контуром (часто говорят «токов, сцепленных с контуром»). В качестве примера представим себе в магнитном поле токов I_1, I_2, I_3 (рис. 4-1) произвольный замкнутый контур l и опирающуюся на него произвольную поверхность S , сквозь которую проходит хотя бы часть этих токов, причем одни из них пронизывают в одном направлении, а другие — в другом. Примем произвольное направление обхода контура за положительное (на рис. 4-1 оно отмечено стрелкой при элементе длины контура dl) и условимся считать поло-

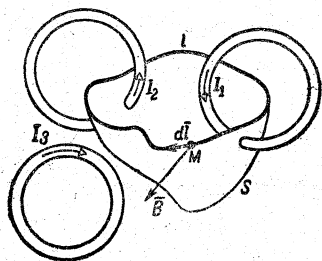


Рис. 4-1. Закон полного тока.

жительными токи, пронизывающие поверхность S в том же направлении, в каком ее пересекает конец рукоятки буравчика, движущегося вдоль контура в направлении, принятом для обхода контура. Таким образом, ток I_1 положителен, а ток I_2 отрицателен.

Вектор напряженности магнитного поля \mathbf{H} в какой-либо точке контура M зависит от токов, как пронизывающих, так и не пронизывающих поверхность S , от формы и размеров несущих эти токи проводников и от расположения точки M относительно этих проводников, но линейный интеграл вектора \mathbf{H} по всему контуру l зависит только от алгебраической суммы токов, пронизывающих поверхность S , и равен этой сумме, т. е.

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \Sigma I, \quad (4-3)$$

где кружок на знаке интеграла обозначает, что интеграл берется по замкнутому контуру. Это уравнение и выражает закон полного тока. Для примера, приведенного на рис. 4-1,

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_1 - I_2.$$

Как показывает выражение (4-3), в системе МКСА напряженность \mathbf{H} должна измеряться в амперах на метр: a/m или чаще в a/cm . С единицей напряженности системы СГСМ эрстедом вышеназванная единица связана соотношением $1 \text{ э} = 79,6 \text{ а/м} = 0,796 \text{ а/см}$.

Сам линейный интеграл напряженности вдоль замкнутого контура, равный полному току контура, именуется намагничивающей силой (н. с.) или магнитодвижущей силой (м. д. с.)

$$F = \oint \mathbf{H} dL = \Sigma I.$$

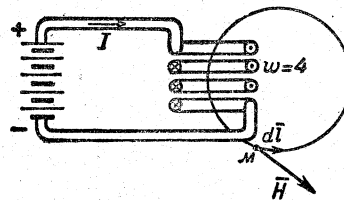


Рис. 4-2. Намагничивающая сила катушки

Если магнитное поле создается током I катушки, состоящей из w витков (рис. 4-2), то для любого контура, охватывающего все витки катушки,

$$\Sigma I = Iw,$$

и закон полного тока получает вид:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = Iw. \quad (4-4)$$

Абсолютную магнитную проницаемость μ_a принято выражать как произведение двух величин:

$$\mu_a = \mu_0 \mu. \quad (4-5)$$

Магнитная постоянная μ_0 является коэффициентом пропорциональности между напряженностью поля и индукцией во всех точках пространства, где не приходится учитывать влияние на магнитное поле внутримолекулярных и внутриатомных токов среды.

Относительная магнитная проницаемость μ есть безразмерная величина, посредством которой учитывается влияние на магнитное поле внутримолекулярных и внутриатомных токов среды. В пустоте это влияние отсутствует и, следовательно, в пустоте $\mu = 1$. Таким образом, в пустоте $\frac{B}{H} = \mu_0$.

На основании размерностей B и H определяется единица измерения магнитной проницаемости в системе МКСА: $\frac{вб \cdot см}{a \cdot см^2}$, но $вб = в \cdot сек$, следовательно,

эта единица будет $\frac{в \cdot сек}{ом \cdot см} = \frac{ом \cdot сек}{см} = \frac{2H}{см}$, так как $ом \cdot сек =$ генри — единице индуктивности (см. § 5-4). Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \frac{2H}{см} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \frac{2H}{м}. \quad (4-6)$$

Большинство тел природы являются слабомагнитными и их влияние на

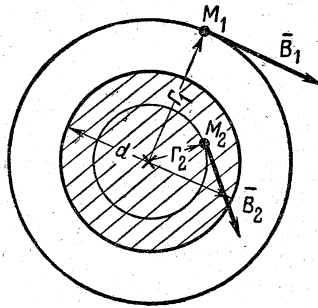


Рис. 4-3. Магнитное поле прямолинейного провода.

магнитное поле почти всегда можно не учитывать, т. е. считать их $\mu=1$. Исключение составляют ферромагнитные тела, у которых μ значительно больше единицы и непостоянно.

Закон полного тока позволяет очень просто определять напряженность магнитного поля, а по ней и магнитную индукцию в тех случаях, когда контур интегрирования совпадает с магнитной линией, т. е. векторы \mathbf{H} и $d\mathbf{l}$ имеют в любой точке контура одинаковое направление, и в силу той или иной симметрии во всех точках контура \mathbf{H} одинаков по величине. В этих случаях

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \oint H dl = H \oint dl = Hl,$$

где l — полная длина контура, и для катушки закон полного тока (4-4) принимает форму

$$Hl = I\omega,$$

откуда

$$H = \frac{I\omega}{l}. \quad (4-7)$$

Например, для прямолинейного весьма длинного провода (теоретически бесконечно длинного) с током I (ампер), помещенного в неферромагнитную среду, согласно формуле (4-7) напряженность магнитного поля в точке M_1 (рис. 4-3), находящейся вне провода на расстоянии r_1 (сантиметров) от его оси, будет:

$$H_1 = \frac{I}{2\pi r_1} [a/cm], \quad (4-8)$$

так как вследствие симметрии напряженность во всех точках окружности радиуса r_1 должна быть одинакова и число витков (один провод) $\omega=1$.

Магнитная индукция в этой точке будет

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} [вб/см^2], \quad (4-9)$$

или

$$B_1 = 0,4\pi \frac{I}{2\pi r_1} = 0,2 \frac{I}{r_1} [гс]. \quad (4-10)$$

Применим эти формулы для вычисления H и B в точке M_2 , находящейся внутри провода; под I здесь следует понимать не весь ток, а лишь ту его часть, которая протекает внутри окружности радиуса r_2 . Если же I по-прежнему будет обозначать полную величину тока в проводе, то в формулах (4-8) и (4-9) I следует заменить выражением

$$I_r = \frac{I}{\pi d^2} \pi r_2^2 = \frac{4I r_2^2}{d^2},$$

где d — диаметр провода, а $\frac{I}{\pi d^2}$ — плот-

ность тока. Это приведет формулы (4-8) и (4-9) к виду:

$$H_2 = \frac{2I r_2}{\pi d^2}, \quad B_2 = \frac{\mu_0 2I r_2}{\pi d^2}$$

или

$$B_2 = \frac{0,8 I r_2}{d^2} [гс]. \quad (4-11)$$

Направление вектора \mathbf{B} связано с направлением тока правилом буравчика (на рис. 4-3 ток направлен от читателя).

По формулам (4-10) и (4-11) нетрудно построить график зависимости B от r (рис. 4-4). Он представляет собой прямую для поля внутри провода и гиперболу для поля вне провода.

Столь же просто может быть определено поле кольцевой катушки (то-

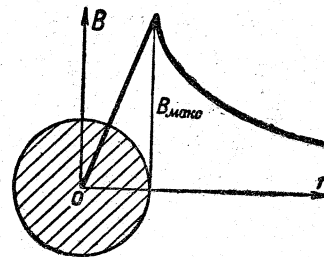


Рис. 4-4. График магнитной индукции прямолинейного провода.

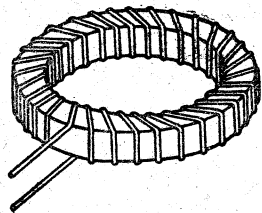


Рис. 4-5. Кольцевая катушка.

роида), т. е. катушки, равномерно намотанной на кольцо с одинаковым по всей длине поперечным сечением (рис. 4-5). В силу симметрии магнитные линии в кольце представляют собой окружности, а напряженность поля во всех точках одной и той же линии одинакова. Поэтому, как и в поле прямолинейного провода,

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H2\pi r, \quad (4-12)$$

где r — радиус магнитной линии (рис. 4-6).

Если обмотка кольца состоит из ω витков, то, как это видно из рис. 4-6, полный ток, охватываемый любой окружностью, расположенной в теле кольца, равен $I\omega$. Из соотношения

$$H2\pi r = I\omega \quad (4-13)$$

находим напряженность магнитного поля в точке M_2 :

$$H = \frac{I\omega}{2\pi r}. \quad (4-14)$$

Если ширина кольца невелика по сравнению с его внутренним радиусом, т. е. если внешний и внутренний радиусы мало отличаются друг от друга, H во всех точках сердечника также оказывается практически одинаковой, и расчет поля можно вести по

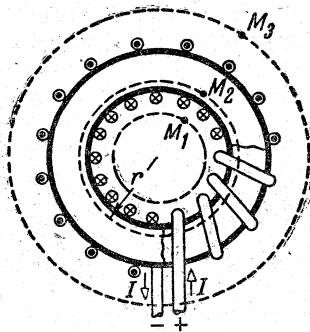


Рис. 4-6. Магнитное поле кольцевой катушки.

среднему радиусу (т. е. для средней магнитной линии).

Применяя закон полного тока к окружностям, расположенным вне кольца (точка M_3) и в его отверстии (точка M_1), нетрудно убедиться, что на этих окружностях $H=0$, т. е. что все поле кольцевой катушки сосредоточено в теле кольца. Зная напряженность поля, уже нетрудно, как и выше, найти магнитную индукцию в кольце (если оно сделано из неферромагнитного материала).

4-2. Магнитные свойства ферромагнитных материалов

Применение ферромагнитных сердечников дает возможность во много раз усилить магнитное поле в машинах и аппаратах. Это усиление достигается благодаря большой магнитной проницаемости ферромагнетиков. Но расчет магнитных полей при наличии ферромагнетиков существенно осложняется вследствие того, что магнитная проницаемость этих тел сама зависит от напряженности.

Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного материала от напряженности поля была впервые исследована в 1872 г. русским физиком А. Г. Столетовым в его докторской диссертации, носившей название «Исследование о функции намагничивания мягкого железа». Эта работа послужила основой для разработки в дальнейшем расчетов электрических машин.

В настоящее время для расчета магнитных полей в ферромагнитных сердечниках обыкновенно пользуются кривыми намагничивания соответствующих материалов; эти кривые изображают зависимость между B и H , причем принято откладывать H по оси абсцисс, а B — по оси ординат. Если такая кривая построена при непрерывном увеличении B и H от нуля, т. е. при отсутствии остаточной намагниченности, она называется кривой первоначального намагничивания (рис. 4-7). В слабых полях, т. е. в начальной части кривой, B возрастает быстрее, чем H , вследствие чего μ увеличивается от своего начального значения $\mu_{нач}$ до некоторого



Александр Григорьевич Столетов
(1838—1896 гг.)

максимального значения μ_{\max} . Начальное значение $\mu_{\text{нач}}$ может быть определено как предел отношения $\frac{B}{H}$

при $H \rightarrow 0$; оно, следовательно, пропорционально тангенсу угла между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в ее начальной точке. Далее на некотором участке кривая намагничивания идет почти прямолинейно, а затем рост B начинает замедляться, кривая образует так называемое «колени» и, наконец, в сильных полях снова идет почти прямолинейно, но уже с гораздо меньшим наклоном к оси абсцисс. Величина μ при этом непрерывно падает, сначала сравнительно быстро, а затем все более медленно.

При периодическом намагничивании то в одном, то в обратном направлении до одинаковых по абсолютной величине значений магнитной индукции B_{\max} процесс протекает не по пер-

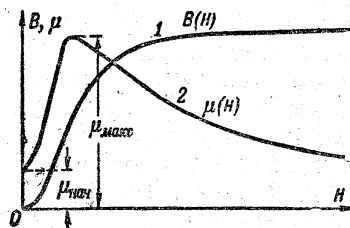


Рис. 4-7. Кривая первоначального намагничивания (1) и кривая магнитной проницаемости (2).

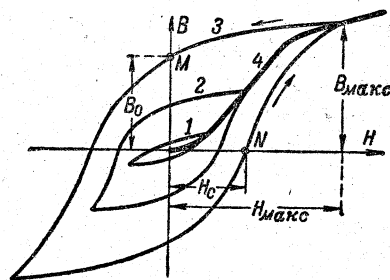


Рис. 4-8. Петля гистерезиса (1, 2, 3) и основная кривая намагничивания (4).

воначальной кривой намагничивания, а по петле гистерезиса (рис. 4-8), причем возрастание индукции происходит по нижней ветви этой петли, а убывание — по верхней. Вершины петель гистерезиса, соответствующих разным значениям H_{\max} и B_{\max} , лежат на кривой, которая называется основной кривой намагничивания и расположена несколько ниже кривой первоначального намагничивания.

При достаточно большом значении H_{\max} точки пересечения M и N петли гистерезиса с осями B и H уже не меняют своего положения при дальнейшем увеличении H_{\max} ; их координаты являются важными характеристиками ферромагнитного материала: ордината B_0 точки M называется остаточной индукцией, а абсцисса H_c точки N — коэрцитивной силой. Основная кривая намагничивания также является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов. На рис. 4-9 представлены основные кривые намагничивания для некоторых из этих материалов. Листовая электротехническая сталь изготавливается толщиной 0,5 и 0,35 мм и обозначается буквой Э, за которой следует цифра 1, 2, 3 или 4, соответствующая приблизительному процентному содержанию кремния, который добавляется к стали для увеличения ее удельного сопротивления (легированная сталь). Эта сталь употребляется для изготовления сердечников трансформаторов и электрических машин. Пермаллой представляют собой сплавы железа и никеля, содержащие от 35 до 85% никеля; особенно велика проницаемость сплава, содержащего 78,5% никеля. При таком со-

держании никеля сплав имеет наибольшие значения $\mu_{нач}$ и $\mu_{макс}$ (до 200 000), что соответствует наименьшему намагничивающему току при $B_{макс}$ от 0 до 10 000 гс.

В табл. 4-1 приведены значения остаточной индукции и коэрцитивной силы некоторых ферромагнитных материалов.

Таблица 4-1

Остаточная индукция
и коэрцитивная сила некоторых
ферромагнитных материалов

Название материала	Остаточная индукция, гс	Коэрцитивная сила, а/см
Пермаллой (78,5% Ni) . . .	10 000	0,20
Белый чугун	4 700	11
Серый чугун	5 000	13
Углеродистая сталь (0,45% С)	11 000	30
Вольфрамовая сталь	11 000	50
Хромистая сталь	9 500	50
Кобальтовая сталь	9 000	200
Магнико (сплав железа, кобальта, никеля и алюминия)	12 500	500

Из этой таблицы видно, что некоторые материалы: чугуны и особенно пермаллой, имеют сравнительно малую коэрцитивную силу, т. е. более узкую петлю гистерезиса, чем другие. Эти материалы называются магнитно-мягкими. К ним принадлежит и электротехническая сталь. Магнитно-мягкие материалы наиболее пригодны для работы в переменном магнитном поле, так как малая площадь петли гистерезиса свидетельствует о малой величине потерь энергии от гистерезиса. Материалы со сравнительно большой коэрцитивной силой образуют группу магнитно-твердых материалов, которые находят применение для изготовления постоянных магнитов (см. ниже).

Существует еще особая группа ферромагнитных материалов — так называемые магнитодиэлектрики, которые занимают промежуточное место между ферромагнитными и неферромагнитными материалами. Они состоят из мельчайших частичек ферромагнитного материала с большой магнитной проницаемостью и связываю-

щего их между собой органического или неорганического диэлектрика. Эти материалы обладают довольно постоянной магнитной проницаемостью и узкой петлей гистерезиса, т. е. потери на перемагничивание в них весьма малы. Потери на вихревые токи в них ничтожны. Магнитодиэлектрики применяются в устройствах, работающих при повышенной и высокой частоте (в радиотехнике и телефонии).

4-3. Расчет магнитной цепи

При проектировании, построении и изучении свойств электрических машин, аппаратов и приборов приходится рассчитывать их магнитные цепи, т. е. определять н. с. (или ток), необходимую для возбуждения рабочего магнитного потока устройства. Реже приходится решать обратную задачу — определять поток или магнитную индукцию, возбуждаемые определенной н. с.

Магнитной цепью именуется вся совокупность устройств, направляющих магнитный поток по назначенному пути. Большая часть магнитной цепи обычно изготавливается из ферромагнитных материалов. В простейших случаях при расчете магнитной цепи известны все ее геометрические размеры и материалы отдельных участков.

Для более наглядного графического изображения магнитного потока в магнитной цепи широко применяется построение магнитных линий. При этом все магнитное поле мыслится заполненным без промежутков упругими трубками магнитного потока. Стороны этих трубок совпадают с направлением векторов магнитной индукции. Оси трубок — это магнитные линии, только их показывают при графическом изображении магнитного потока. В такой картине густота магнитных линий определяет магнитную индукцию, т. е. магнитную индукцию изображает число линий, проходящих через 1 см^2 поверхности, нормальной к направлению вектора индукции. Магнитный поток через какую-либо поверхность изображает алгебраическая сумма линий, пронизывающих эту поверхность.

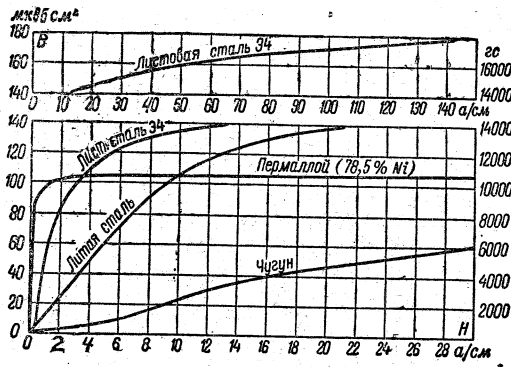


Рис. 4-9. Основные кривые намагничивания.

С точки зрения расчета простейшим примером магнитной цепи служит рассмотренная выше кольцевая катушка, магнитное поле которой, как было указано, целиком расположено в теле сердечника, тогда как ни в отверстия кольца, ни в окружающем пространстве магнитного поля нет.

Если при этом катушка имеет ферромагнитный сердечник, то ее магнитный поток в μ раз больше, чем без такого сердечника, и обуславливается главным образом намагничённостью сердечника; сама же обмотка непосредственно создает очень небольшую долю общего потока. Поэтому равномерность распределения витков обмотки по длине сердечника не играет решающей роли в вопросе о форме магнитных линий и величине магнитного потока.

Форма магнитных линий определяется в основном формой сердечника, который как бы «направляет» магнитный поток. Если сердечнику придать прямоугольную форму, то и магнитные линии превратятся в прямоугольники. При этом как поперечное сечение, так и сорт ферромагнитного материала на разных участках сердечника вовсе не должны быть обязательно

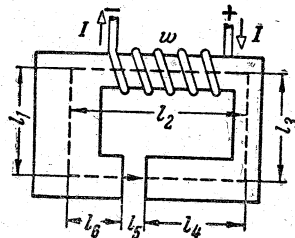


Рис. 4-10. Магнитная цепь.

одинаковыми, а небольшие по длине включения неферромагнитных материалов, в частности воздушные зазоры, не оказывают заметного влияния на форму магнитных линий, хотя и отражаются на величине магнитного потока. Получается, таким образом, более сложная форма магнитной цепи (рис. 4-10).

Рассмотрим метод ее расчета. Если поперечное сечение S_k отдельных участков сердечника различно, то и магнитная индукция в них будет различна: она будет определяться в каждом сечении соотношением

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k}, \quad (4-15)$$

где Φ — одинаковый во всех сечениях магнитный поток. По значениям магнитной индукции B_k величина напряженности поля H_k определяется для каждого участка ферромагнитного сердечника по соответствующей кривой намагничивания (рис. 4-9), а для неферромагнитных участков магнитной цепи — по формуле (4-3), если B_k выражено в вб/см^2 , или по формуле (4-4), если B_k выражено в гс .

По закону полного тока н. с. катушки

$$I\omega = \oint H \, dl,$$

причем интегрирование производится по контуру средней магнитной линии. Но так как H в пределах каждого участка остается постоянным и изменяется лишь при переходе от одного участка к другому, то интегрирование можно заменить суммированием

$$\oint H \, dl = \sum H_k l_k,$$

где l_k — длина отдельного участка с постоянным сечением и материалом.

Таким образом, закон полного тока в применении к этому контуру превращается в закон магнитной цепи

$$I\omega = \sum H_k l_k. \quad (4-16)$$

По этой формуле нетрудно подсчитать н. с. катушки, необходимую для создания заданного магнитного потока Φ .

Таблица 4-2
Расчет магнитной цепи

№ участка	Материал	l_k , см	S_k , см ²	B_k , гс	H_k , а/см	$H_k l_k$, а
1	Листовая сталь Э4	15,0	60	6 000	1,2	18
2	То же	20,0	30	12 000	5,5	110
3	То же	15,0	20	18 000	147,0	2 205
4	Литая сталь	12,0	40	9 000	8,0	96
5	Воздушный зазор	0,5	40	9 000	7200,0	3 600
6	Литая сталь	7,5	40	9 000	8,0	60

$$\Sigma H_k l_k = 6\,089$$

Все вычисление удобно вести в табличной форме, как это показано на следующем примере, в котором магнитная цепь (рис. 4-10) имеет данные, представленные в первых четырех столбцах табл. 4-2, а намагничивающая катушка состоит из 200 витков. Магнитный поток задан равным 360 000 мкс.

Зная число витков, можно найти и необходимый ток

$$I = \frac{\Sigma H_k l_k}{w} = \frac{6\,089}{200} = 30,4 \text{ а.}$$

При более точном расчете нужно еще учесть, что часть магнитного потока катушки замыкается не по ферромагнитным участкам (l_1 , l_3 , l_4 и l_5), а непосредственно через воздух, образуя так называемый поток рассеяния. Поэтому магнитный поток участка № 2 надо считать на 10—20% большим, чем заданный поток остальных участков. Это даст некоторое увеличение необходимого тока катушки.

В рассмотренном примере был задан магнитный поток и определялась н. с. катушки. Значительно сложнее обратная задача. Чтобы ее решить, надо задаться несколькими значениями

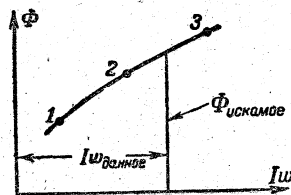


Рис. 4-11. Магнитная характеристика и определение по ней магнитного потока.

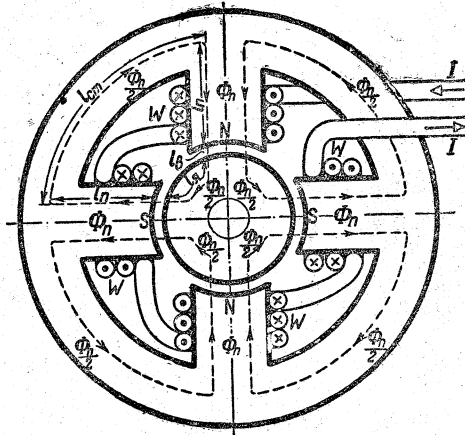


Рис. 4-12. Симметричная разветвленная магнитная цепь.

ми магнитного потока и, как только что было показано, найти для них соответствующие н. с. По полученным результатам следует построить магнитную характеристику цепи, т. е. график зависимости Φ от Iw (рис. 4-11), на котором уже нетрудно найти значение Φ , соответствующее заданному Iw . Чтобы облегчить себе выбор значений Φ для построения магнитной характеристики, следует иметь в виду, что если положить Iw равным не $\Sigma H_k l_k$, а NI воздушного зазора (при наличии воздушного зазора) или NI участка с наименьшим сечением (в случае отсутствия воздушного зазора), то полученная величина N и соответствующий ей поток будут заведомо больше действительных.

Подобно электрической цепи магнитная цепь может быть разветвленной. В качестве примера покажем только симметричную разветвленную магнитную цепь четырехполюсной машины постоянного тока (рис. 4-12), в которой магнитный поток одного из участков разделяется на два потока, равных друг другу благодаря одинаковой длине и одинаковым сечениям обеих ветвей. Магнитный поток, выйдя из одного северного полюса N и пройдя сквозь воздушный зазор, входит в сталь якоря и здесь разделяется на две разные части, одна из которых проходит по левой четверти якоря, сквозь второй воздушный зазор переходит в сердечник южного полюса S ,

соединяясь здесь с половиной потока другого северного полюса, а затем проходит в станину, где потоки снова разделяются, и, наконец, возвращается к тому северному полюсу, из которого она вышла. Таким образом, во всей магнитной цепи существуют четыре отдельных магнитных потока, каждый из которых занимает свою четверть магнитной цепи, выделяемую плоскостями ее симметрии.

Во всех сечениях каждой такой четверти магнитный поток имеет одно и то же значение, и к ней может быть применен закон магнитной цепи. Каждая магнитная линия дважды проходит через полюс и воздушный зазор и раз через станину и якорь. Так как она сцеплена с двумя катушками, то для нее

$$\sum H_k l_k = 2I\omega.$$

4-4. Магнитное сопротивление

В ряде случаев, главным образом для качественной характеристики магнитной цепи электрических машин и аппаратов, удобно воспользоваться понятием магнитного сопротивления R_m называется отношение н. с. к магнитному потоку

$$R_m = \frac{I\omega}{\Phi} \quad (4-17)$$

или, учитывая (4-16),

$$R_m = \frac{\sum H_k l_k}{\Phi}. \quad (4-18)$$

Но

$$H_k = \frac{B_k}{\mu_{ак}}, \text{ а } B_k = \frac{\Phi}{S_k}$$

и, следовательно,

$$\sum H_k l_k = \sum \frac{\Phi l_k}{S_k \mu_{ак}} = \Phi \sum \frac{l_k}{S_k \mu_{ак}},$$

так как поток Φ на всех участках один и тот же и может быть вынесен за знак суммы. Подставляя это выражение в формулу (4-18), получим:

$$R_m = \sum \frac{l_k}{S_k \mu_{ак}}. \quad (4-19)$$

Так как $\mu_{ак}$ в ферромагнитных телах не имеет постоянного значения, то и R_m оказывается постоянным только

для неферромагнитных участков магнитной цепи. Для ферромагнитных участков его нужно определять при помощи кривой намагничивания материала. Уравнению (4-17) можно придать вид:

$$\Phi = \frac{I\omega}{R_m}, \quad (4-20)$$

аналогичный закону Ома для электрической цепи:

$$I = \frac{E}{R}.$$

Необходимо, однако, иметь в виду, что здесь речь идет лишь о формальной аналогии выражений, а не о какой-либо общности явлений.

4-5. Постоянные магниты

Постоянными называются магниты, поле которых обусловлено не электрическим током в обмотке, а внутримолекулярными токами, т. е. остаточной намагниченностью. Основными величинами, характеризующими постоянный магнит, являются остаточная индукция B_0 и коэрцитивная сила H_c , определяющие собой две крайние точки той части петли гистерезиса, которая используется для расчета полей постоянных магнитов и известна под названием кривой размагничивания (рис. 4-13).

Рассмотрим подковообразный магнит, который при намагничивании был замкнут якорем (рис. 4-14,а) из мягкой стали с настолько высокой магнитной проницаемостью, что величиной $H_{як}$ якоря по сравнению с величиной $H_M l_M$ магнита можно пренебречь. Если по обмотке, служившей раньше для намагничивания, пропустить в обратном направлении такой ток I , чтобы напряженность поля

$$H_M = \frac{I\omega}{l_M} \quad (4-21)$$

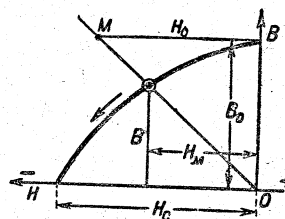


Рис. 4-13. Кривая размагничивания.

Пренебрегая магнитным рассеянием, т. е. считая, что во всех сечениях магнитной цепи магнитный поток

$$\Phi = B_k S_k$$

имеет одинаковую величину и равен $B_M S_M$ в теле магнита, получим:

$$B_k = B_M \frac{S_M}{S_k}.$$

Подставляя это выражение в формулу (4-24) и вынося за знак суммы одинаковые для всех ее членов величины B_M и S_M , представим ее в виде:

$$H_M = -B_M \frac{S_M}{l_M} \sum \frac{l_k}{\mu_{ak} S_k}. \quad (4-25)$$

Уравнением (4-25) определяется вспомогательная прямая, которой следует пользоваться совершенно так же, как и в рассмотренном выше более простом случае.

Свойства постоянного магнита и,

в частности, создаваемый им при тех или иных условиях магнитный поток весьма сильно зависят от материала, из которого он изготовлен, и прежде всего от значений B_0 и H_c и формы кривой размагничивания; чем более выпукла последняя при одних и тех же значениях B_0 и H_c , тем больше будет результирующая индукция B при прочих равных условиях. Степень выпуклости кривой размагничивания может быть охарактеризована наибольшей величиной площади прямоугольника, сторонами которого являются абсцисса H и ордината B произвольной точки кривой. Поэтому величина $(HB)_{\max}$ является одной из важнейших характеристик магнитных материалов. Вместо кривых $B(H)$ иногда удобнее пользоваться кривыми $\Phi(H)$. Если для участка магнитной цепи известна зависимость $B(H)$, то кривую $\Phi(H)$ можно получить, умножая B на сечение участка S , а H на длину участка l .

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИНДУКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

5-1. Проводник с током в магнитном поле

Из курса физики известно, что если в равномерном поле находится прямолинейный проводник с током, направлением которого образует угол α с направлением \mathbf{B} , то на этот проводник действует сила, величина которой равна произведению магнитной индукции поля на ток, на длину проводника (в пределах поля) и на синус угла α , т. е.

$$F = BIl \sin \alpha \text{ [дж/см]}. \quad (5-1)$$

Это соотношение называется законом Ампера. Если B выражено в вб/см^2 , I — в а и l — в см, то сила F получается в дж/см . Чтобы получить ту же силу в килограммах, надо учесть, что $1 \text{ дж/см} = 10,2 \text{ кг}$; тогда

$$F = 10,2 BIl \sin \alpha \text{ [кг]}. \quad (5-2)$$

Эта сила имеет наибольшее значение, когда $\alpha = 90^\circ$, т. е. проводник располо-

жен перпендикулярно к направлению вектора магнитной индукции (магнитных линий). В этом случае

$$F = BIl \text{ [дж/см]}. \quad (5-3)$$

Направление действующей на проводник силы проще всего определяется при помощи правила левой руки; если поставить ладонь левой руки навстречу магнитным линиям (рис. 5-1) и вытянуть четыре пальца по направлению тока, то отставленный большой палец укажет направление действующей на проводник силы. Эта сила, таким образом, всегда перпендикулярна как к направлению поля, так и к оси проводника. Закон Ампера играет в электротехнике очень важную роль, так как он является основой для расчета вращающего момента электрических машин — двигателей и генераторов, а также электроизмерительных приборов.

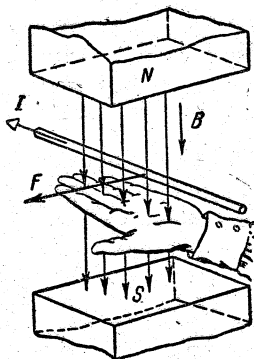


Рис. 5-1. Правило левой руки.

Если проводник с током не имеет прямолинейной формы или находится в неравномерном поле, то (5-1) может быть применена только к бесконечно малому элементу dl проводника и примет в этом случае вид:

$$dF = BI dl \sin \alpha, \quad (5-4)$$

где α —угол между направлением вектора магнитной индукции в точке расположения элемента dl и направлением тока в рассматриваемом элементе проводника.

При движении проводника с током в магнитном поле совершается работа, величина которой для случая прямолинейного проводника, расположенного в равномерном поле перпендикулярно к направлению магнитных линий, может быть определена следующим образом. Если проводник перемещается в произвольном направлении на бесконечно малое расстояние dx , образующее угол β с направлением силы F (рис. 5-2), то совершаемая работа

$$dA = F dx \cos \beta,$$

а так как сила F выражается в этом случае формулой (5-3), то

$$dA = BIl dx \cos \beta.$$

Произведение ldx представляет собой величину площадки dS , описанной проводом при его перемещении, а произведение $BdS \cos \beta = B dS_n = d\Phi$ —магнитный поток, пересеченный при этом проводом. Поэтому

$$dA = IBdS \cos \beta = Id\Phi, \quad (5-5)$$

т. е. работа при бесконечно малом пе-



Андре Мари Ампер (1775—1836 гг.)

ремещению проводника в магнитном поле равна произведению тока на величину пересеченного проводником магнитного потока. Работа при произвольном конечном перемещении проводника является суммой элементарных работ на бесконечно малых участках, из которых составляется данное конечное перемещение. Если ток остается при этом постоянным, то искомая работа

$$A = \int Id\Phi = I \int d\Phi$$

или

$$A = I\Phi, \quad (5-6)$$

где Φ —полная величина пересеченного проводником магнитного потока.

Эта формула легко может быть распространена и на случай неравномерного поля. В частности, по ней может быть вычислена работа, совершаемая при втягивании в поле витка с неизменным током из области, где поле отсутствует. В этом случае под Φ надо понимать поток, охватываемый витком в его окончательном положе-

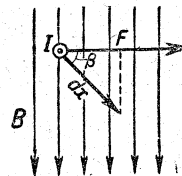


Рис. 5-2. Работа тока в магнитном поле.

нии, так как за время перемещения весь этот поток должен быть пересечен витком.

5-2. Взаимодействие токоведущих проводников

Полученное в § 4-1 выражение (4-9) магнитной индукции поля прямолинейного проводника с током позволяет решить вопрос о величине сил взаимодействия двух параллельных проводов с токами или так называемых электродинамических сил. Положим (рис. 5-3), что два провода идут параллельно друг другу на некоторой длине l , находятся на расстоянии a друг от друга и их токи I_1 и I_2 имеют противоположные направления.

Магнитное поле первого провода действует с силой F_{12} на второй провод, а магнитное поле второго провода действует с силой F_{21} на первый провод. Выясним величину возникающих сил.

Согласно формуле (4-9) на оси второго провода магнитная индукция поля первого провода

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 10^{-9} I_1}{a} \text{ [вб/см}^2\text{]}.$$

Действующая на второй провод сила F_{12} может быть определена по формуле (5-3):

$$F_{12} = B_1 I_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 10^{-9} I_1 I_2 l}{a}; \quad (5-7)$$

направление этой силы определяется по правилу левой руки.

На оси первого провода магнитная индукция поля второго провода

$$B_2 = \frac{2 \cdot 10^{-9} I_2}{a}$$

имеет при неравных токах I_1 и I_2 иную

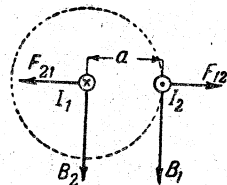


Рис. 5-3. Взаимодействие параллельных проводов.

величину, чем B_1 . Однако, действующая на первый провод сила

$$F_{21} = B_2 I_1 l = \frac{2 \cdot 10^{-9} I_2 I_1 l}{a}$$

имеет такую же величину, как и F_{12} , и по правилу левой руки направлена в противоположную сторону. Поэтому можно говорить о „силе взаимодействия“ проводов

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 10^{-9} I_1 I_2 l}{a}. \quad (5-8)$$

При одинаковом токе I в обоих проводах (прямой и обратный провода одной и той же цепи)

$$F = \frac{2 \cdot 10^{-9} I^2 l}{a}. \quad (5-9)$$

Понятно, что если токи в обоих проводах будут одинаково направлены, то действующие на провода силы изменят свои направления и вместо взаимного отталкивания будет иметь место взаимное притяжение проводов.

Особенно больших значений силы взаимодействия между проводами достигают при коротких замыканиях мощных источников энергии, когда токи могут достигать многих тысяч ампер.

5-3. Электромагнитная индукция

В основе работы электрических двигателей и генераторов лежат два явления. Одно из них — электромеханическое взаимодействие между токоведущим проводником и магнитным полем (§ 5-1); другое — электромагнитная индукция — было открыто Фарадеем в 1831 г. и заключается в том, что при изменении магнитного потока Φ , пронизывающего замкнутый проводящий контур, в этом контуре наводится (индуцируется) э. д. с.

Направление этой э. д. с. во всех случаях может быть определено при помощи закона, открытого в 1833 г. русским академиком Э. Х. Ленцем: при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в последнем возникает э. д. с. такого направления, что обусловленный ею ток и связанные с ним механические силы противодействуют

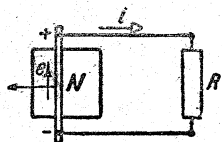


Рис. 5-4. Индуцированный ток при увеличении потока в контуре.

изменению магнитного потока. Если (рис. 5-4) магнитный поток в замкнутом контуре увеличивается благодаря движению контура, то по закону Ленца магнитный поток индуцированного тока должен быть направлен внутри контура за плоскость чертежа, т. е. навстречу внешнему магнитному потоку, противодействуя его увеличению. Соответствующее направление тока (по часовой стрелке) определяется по правилу буравчика. Благодаря возникновению в контуре тока на него начинает действовать тормозящая сила, направленная в сторону, противоположную движению проводника в магнитном поле (правило левой руки).

Количественная связь между величиной индуцированной э. д. с. e и скоростью изменения магнитного потока в замкнутом контуре была сформулирована Максвеллом в виде соотношения

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5-10)$$

известного под названием закона электромагнитной индукции. Этим уравнением определяется не только величина, но и направление индуцированной э. д. с. (в соответствии с законом Ленца). Если расположить стержень буравчика перпендикулярно к плоскости контура и вращать его рукоятку так, чтобы буравчик ввертывался в плоскость контура в том же направлении, которое принято за положительное для магнитного потока, то направление вращения рукоятки совпадает с тем направлением, которое должно быть принято за положительное для индуцированной э. д. с. и обусловленного ею тока.

Если, например, на рис. 5-4 принять положительное направление потока к читателю, то по правилу буравчика положительное направление э. д. с. в контуре будет противополож-



Михаил Фарадей (1791—1867 гг.)

но направлению движения стрелки часов. При увеличении потока, который направлен к читателю, приращение потока $d\Phi > 0$ и, так как $dt > 0$, то согласно (5-10) э. д. с. $e < 0$, т. е. имеет направление, обратное выбранному за положительное (направлена по движению стрелки часов, как и показано на рис. 5-4).

Если катушка состоит из ω витков, пронизываемых различными потоками (сцепленных с различными потоками): $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_\omega$, то э. д. с. катушки составляет как сумма э. д. с. в отдельных витках, т. е.

$$e = - \left(\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\Phi_\omega}{dt} \right) = - \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_\omega)}{dt}.$$

Алгебраическая сумма потоков, сцепленных со всеми витками катушки, называется ее потокосцеплением и обозначается буквой Ψ .

Если все ω витков сцеплены с одним и тем же потоком Φ (рис. 5-5), то

$$\Psi = \omega\Phi, \quad (5-11)$$

если же одна часть витков ω_1 сцеплена с одним потоком Φ_1 , другая ω_2 — с другим Φ_2 (рис. 5-6) и т. д., то

$$\Psi = \sum (\omega_k \Phi_k). \quad (5-12)$$

Введение этой новой величины позволяет записать полученную выше

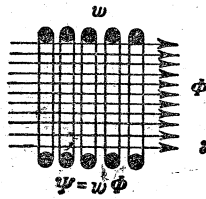


Рис. 5-5. Витки катушки сцеплены с одинаковым потоком.

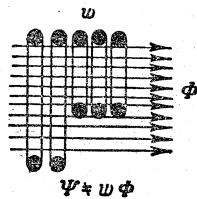


Рис. 5-6. Витки катушки сцеплены с различными потоками.

формулу для наведенной э. д. с. в весьма сжатой общей форме:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}, \quad (5-13)$$

т. е. наведенная в замкнутом контуре э. д. с. равна по величине скорости возрастания потокосцепления этого контура, но имеет обратный знак, смысл которого, конечно, тот же, что и в первоначальной формуле (5-10).

Это — наиболее общая форма закона электромагнитной индукции.

В электрических машинах постоянного тока (как и в некоторых машинах переменного тока) изменение магнитного потока сквозь контур происходит благодаря движению проводников в магнитном поле электромагнитов, причем проводники располагаются перпендикулярно к направлению магнитных линий, а направление их движения перпендикулярно как к направлению магнитных линий, так и к направлению оси проводника.

Для этого случая уравнение (5-10) удобнее преобразовать следующим образом. За бесконечно малое время dt проводник (рис. 5-7) переместится на расстояние $dx = vdt$, где v — постоян-

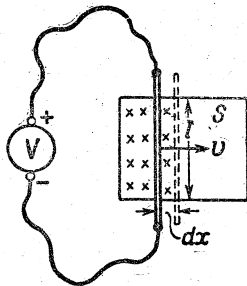


Рис. 5-7. Возникновение э. д. с. при движении проводника перпендикулярно направлению магнитного поля.

ная скорость движения проводника. Если по длине проводника магнитная индукция B во всех точках одинакова (в пределах ширины l полюса), то приращение магнитного потока в контуре за время dt будет:

$$d\Phi = BdS = Bl dx = Blv dt$$

и, следовательно, согласно уравнению (5-10).

$$E = -Blv,$$

где э. д. с. обозначена прописной буквой, так как она постоянна.

Если магнитные линии направлены от читателя (на рис. 5-7 это обозначено крестиками), то по закону Ленца э. д. с. будет направлена в контуре противоположно направлению движения стрелки часов, т. е. на верхнем конце провод получит более высокий, а на нижнем — более низкий потенциал.

Так как эта э. д. с. обусловлена движением той части контура, которая находится в магнитном поле, то можно полагать, что она возникает именно в этой части контура, т. е. говорить о появлении индуктированной э. д. с. в проводнике, пересекающем магнитные линии независимо от того, входит ли этот проводник в состав какого-либо замкнутого контура или нет. Но в таком случае знак минус в выражении э. д. с. теряет свой ясный смысл, а потому обычно его опускают и пишут просто

$$E = Blv. \quad (5-14)$$

Для определения же направления индуктированной э. д. с. служит правило правой руки (рис. 5-8): если

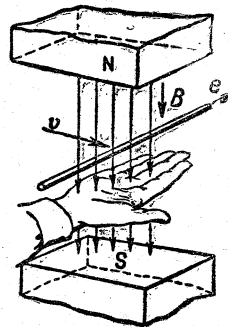


Рис. 5-8. Правило правой руки.



Борис Семенович Якоби (1801—1874 гг.).

расположить правую руку так, чтобы магнитные линии упирались в ладонь, а отставленный большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной э. д. с.

Если по длине проводника магнитная индукция неодинакова во всех точках, то выражение (5-14) может быть применено лишь к участку проводника бесконечно малой длины dl в виде:

$$dE = Bvdl \quad (5-15)$$

и полная величина индуцированной в проводнике э. д. с. будет определяться формулой

$$E = \int_0^l Bvdl. \quad (5-16)$$

Эта же формула дает возможность рассчитать э. д. с. и в том случае, когда скорость движения различных токов проводника неодинакова.

Электрический генератор постоянного тока в обычных условиях его работы дает ток, направление которого в каждом проводнике ротора генератора совпадает с направлением индуцированной э. д. с. Вследствие наличия этого тока на проводники ротора генератора действуют силы, стремящиеся (по закону Ленца) противодействовать вращению, т. е. направленные противоположно скорости движения проводников ротора. Если же к зажи-

мам генератора приложить извне напряжение, по величине большее, чем его э. д. с., и направленное навстречу этой э. д. с., тогда токи в проводниках генератора изменят свое направление, а в результате изменят свое направление и действующие на проводники силы: из тормозящих они станут вращающимися — генератор обратится в электродвигатель. Таким образом, одна и та же электрическая машина может работать и как генератор и как двигатель; в этом заключается принцип обратимости электрических машин, впервые сформулированный Э. Х. Ленцем и подробнее развитый русским академиком Б. С. Якоби.

Индуктированные токи могут возникать не только в проводниках и катушках электрических машин, аппаратов и приборов и в проводах линий, но и в любых проводящих телах, находящихся в изменяющемся магнитном поле. В этом случае индуцированные токи замыкаются по путям, которые в большинстве случаев лишь с трудом могут быть определены. Такие токи называются вихревыми токами. Большое практическое значение имеет расчет мощности вихревых токов, возникающих в стальных сердечниках трансформаторов, обмотки которых питаются переменным током (§ 10-4).

5-4. Индуктивность

По закону электромагнитной индукции всякое изменение магнитного потока, сцепленного с каким-либо контуром, вызывает в этом контуре э. д. с.

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}. \quad (5-17)$$

При этом совершенно безразлично, создается ли магнитный поток током в каком-нибудь другом проводнике или каким-нибудь магнитом, или, наконец, током в том же самом контуре электрической цепи. В последнем случае явление носит название самоиндукции.

Если создаваемое проводником магнитное поле расположено в неферромагнитной среде, то сцепленный с ним магнитный поток, а следовательно, и потокосцепление Ψ пропорциональны току i в контуре. Коэффициент

пропорциональности между Ψ и i или, иначе говоря, отношение

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (5-18)$$

называется индуктивностью контура или цепи и является в этом случае постоянной для данной цепи величиной. Поэтому производная $\frac{d\Psi}{dt}$ может быть представлена в виде $L \frac{di}{dt}$, и закон электромагнитной индукции примет частную форму

$$e = -L \frac{di}{dt}, \quad (5-19)$$

устанавливая простую зависимость между э. д. с. самоиндукции и скоростью изменения тока в цепи. Знак минус указывает при этом, что при возрастании тока, когда $\frac{di}{dt} > 0$, э. д. с.

самоиндукции направлена противоположно току, а при уменьшении тока, когда $\frac{di}{dt} < 0$, совпадает по направлению с током.

Согласно уравнению (5-19) индуктивность можно рассматривать как коэффициент пропорциональности между э. д. с. самоиндукции и скоростью изменения тока в проводнике. Оба определения индуктивности (5-18) и (5-19) приводят, конечно, к одной и той же размерности этой величины

$$[L] = [вб/а] = [ом \cdot сек].$$

Единица индуктивности, равная $ом \cdot сек$, называется генри (*гн*).

Часто для выражения индуктивности приходится пользоваться тысячной долей этой основной единицы, называемой миллигенри (*мгн*).

Согласно формуле (5-18) для катушки, у которой все витки пронизываются одинаковым магнитным потоком, индуктивность

$$L = \frac{w\Phi}{i}. \quad (5-20)$$

Но, пользуясь магнитным сопротивлением, можно связать магнитный поток с током соотношением (4-20):

$$\Phi = \frac{iw}{R_M},$$

откуда

$$\frac{\Phi}{i} = \frac{w}{R_M}$$

и, следовательно,

$$L = \frac{w^2}{R_M}. \quad (5-21)$$

Самоиндукция играет в электрических процессах роль, в известной мере подобную той, которая в механических явлениях принадлежит инерции. Как всякое изменение скорости v движения тела связано с появлением так называемой силы инерции

$$F = -m \frac{dv}{dt},$$

где m — масса тела, так всякое изменение тока в цепи связано с появлением э. д. с. самоиндукции

$$e = -L \frac{di}{dt},$$

причем индуктивность L аналогично массе тела является параметром самой системы, в то время как второй множитель в обоих сравниваемых выражениях характеризует быстроту изменения состояния этой системы.

При периодическом изменении тока э. д. с. самоиндукции также изменяется периодически; поэтому в цепях переменного тока, где ток все время периодически изменяется, э. д. с. самоиндукции оказывает непрерывное влияние на работу цепи. Наоборот, в цепях постоянного тока она проявляет себя лишь в моменты включения и отключения приемников энергии или изменения потребляемой ими мощности. В частности, при отключении приемников, обладающих большой индуктивностью (например, электромагнитов электрических машин), э. д. с. самоиндукции стремится поддержать исчезающий ток и вызывает появление дуги между расходящимися контактами выключателя. Эта дуга расплавляет контакты, поэтому выключатели должны быть сконструированы так, чтоб дуга была мала и кратковременна.

Для вычисления индуктивности катушки можно воспользоваться формулой (5-21). Вычислим, например, индуктивность кольцевой катушки с неферромагнитным сердечником, пре-

небрегая неравномерностью распределения магнитного потока по сечению сердечника, т. е. ведя расчет по средней магнитной линии. В этом случае по формуле (4-19) найдем магнитное сопротивление

$$R_m = \frac{l}{S\mu_0}$$

и, подставляя это выражение в формулу (5-21), получим:

$$L = \frac{\omega^2 S \mu_0}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \omega^2 S}{l} \text{ [гн]}, \quad (5-22)$$

где l выражено в см, а S — в см².

Так как $l = 2\pi r$, где r — радиус средней магнитной линии, то формуле (5-22) можно придать еще такой вид:

$$L = \frac{2 \cdot 10^{-9} \omega^2 S}{r}. \quad (5-23)$$

Если катушка имеет ферромагнитный сердечник, то ее индуктивность будет в μ раз больше, т. е. будет выражаться формулой

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \mu \omega^2 S}{l}. \quad (5-24)$$

Но так как μ — не постоянная величина, а зависит от напряженности поля, то и индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником зависит от напряженности поля, т. е. от намагничивающего тока.

Возникновение магнитного поля связано с затратой энергии, которая запасается в магнитном поле. Выражение этого запаса энергии легче всего получить, рассматривая возникновение поля в контуре или катушке с ничтожным сопротивлением R , которым можно пренебречь. Для поддержания тока в такой цепи к ней надо приложить напряжение

$$u = \frac{d\Phi}{dt},$$

компенсирующее э. д. с. самоиндукции. Энергия, поступающая в магнитное поле за бесконечно малое время dt , будет:

$$dW = u idt = \frac{d\Phi}{dt} idt = id\Phi, \quad (5-25)$$

где $d\Phi$ — увеличение потокосцепления за время dt ; при этом ток i с увеличением потокосцепления возрастает. Энергия, запасаемая в магнитном поле при

увеличении потокосцепления от нуля до произвольного значения Φ , выразится, следовательно, формулой

$$W = \int_0^{\Phi} id\Phi. \quad (5-26)$$

Если Φ пропорционально i , что имеет место в неферромагнитной среде, а приближенно и в ферромагнитной среде в пределах прямолинейной части кривой намагничивания, то

$$\Phi = Li \text{ и } d\Phi = L di$$

и, следовательно,

$$W = \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2} \quad (5-27)$$

— выражение, составленное аналогично выражению кинетической энергии движущегося тела:

$$W = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как $L = \frac{\Phi}{I}$, то этому выражению можно также придать вид:

$$W = \frac{I\Phi}{2}. \quad (5-28)$$

5-5. Взаимная индуктивность

Если две цепи, например катушки A и B (рис. 5-9), расположены друг относительно друга так, что магнитный поток одной из них (A) частично пронизывает и другую (B), то всякое изменение тока в первой цепи будет

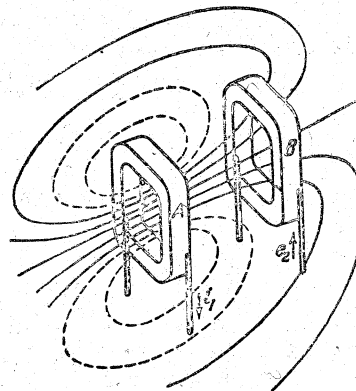


Рис. 5-9. Взаимная индукция между двумя катушками.

иметь следствием изменение потока, пронизывающего вторую цепь, и появление в ней индуцированной э. д. с. И наоборот, изменение тока во второй цепи приведет к изменению магнитного потока, связанного с первой цепью, и к возникновению в ней индуцированной э. д. с. Электромагнитная индукция в этом случае называется взаимной индукцией.

Положим, что ток i_1 катушки A создает в катушке B магнитный поток Φ_{12} (изображенный сплошными линиями), образующий с витками катушки B потокосцепление

$$\Psi_{12} = \omega_{12} \Phi_{12}, \quad (5-29)$$

пропорциональное току i_1 . Коэффициент пропорциональности M между этими двумя величинами или отношение потокосцепления Ψ_{12} к создающему его току i_1 называется взаимной индуктивностью цепей A и B и имеет такую же размерность, как и индуктивность, т. е. выражается в генри. Таким образом,

$$\Psi_{12} = M i_1. \quad (5-30)$$

Взаимная индуктивность M двух катушек зависит от числа витков той и другой катушки, их размеров и взаимного расположения и магнитной проницаемости разделяющей их среды. В неферромагнитной среде, т. е. при постоянной магнитной проницаемости и неизменном взаимном расположении катушек, их взаимная индуктивность M постоянна и не зависит от тока в той или другой катушке.

Покажем, что взаимная индуктивность будет одной и той же независимо от того, связывает ли она потокосцепление Ψ_{12} катушки B с создающим его током i_1 в катушке A или, наоборот, потокосцепление Ψ_{21} катушки A с создающим его током i_2 в катушке B . Чтобы в этом убедиться, заметим, что магнитный поток

$$\Phi_{12} = \frac{i_1 \omega_1}{R_M},$$

а магнитный поток

$$\Phi_{21} = \frac{i_2 \omega_2}{R_M},$$

где R_M — магнитное сопротивление всего устройства.

Соответствующие потокосцепления

$$\Psi_{12} = \omega_2 \Phi_{12} = \frac{i_1 \omega_1 \omega_2}{R_M}$$

и

$$\Psi_{21} = \omega_1 \Phi_{21} = \frac{i_2 \omega_2 \omega_1}{R_M}.$$

Деля их соответственно на i_1 и i_2 , получаем одно и то же выражение

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{\omega_1 \omega_2}{R_M}, \quad (5-31)$$

показывающее, что взаимная индуктивность двух цепей не зависит от того, какая из них создает магнитный поток.

Обратимся теперь к э. д. с., возникающим благодаря взаимной индукции. При изменении потокосцепления Ψ_{12} катушки B в ней наводится э. д. с.

$$e_2 = - \frac{d\Psi_{12}}{dt},$$

которая согласно (5-30) может быть выражена соотношением

$$e_2 = - M \frac{di_1}{dt}, \quad (5-32)$$

т. е. э. д. с. взаимной индукции, возникающая в одной из двух индуктивно связанных цепей, пропорциональна скорости изменения тока в другой. Таким образом, взаимную индуктивность можно рассматривать как коэффициент пропорциональности между возникающей э. д. с. взаимной индукции в одной цепи и скоростью изменения тока в другой.

Разумеется, возникающая в катушке A э. д. с. взаимной индукции при изменении тока в катушке B выражается аналогично

$$e_1 = - M \frac{di_2}{dt}. \quad (5-33)$$

Для вычисления взаимной индуктивности можно воспользоваться формулой (5-13). Вычислим, например, взаимную индуктивность двух катушек, имеющих общий кольцевой сердечник с относительной магнитной проницаемостью μ , магнитное сопротивление которого

$$R_M = \frac{l}{S \mu_0 \mu}.$$

Подставляя это выражение в формулу (5-31) и учитывая, что $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$, получим:

$$M = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \mu \omega_1 \omega_2 S}{l}. \quad (5-34)$$

В случае неферромагнитного сердечника в этой формуле следует положить $\mu = 1$, но она будет достаточно точна лишь при равномерном распределении обмоток по сердечнику. В случае же ферромагнитного сердечника распределение обмоток не играет решающей роли, но взаимная индуктивность вследствие непостоянства μ будет зависеть от напряженности магнитного поля.

Явлением взаимной индукции пользуются в трансформаторах, служащих для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого, более высокого или, наоборот, более низкого напряжения.

При известных обстоятельствах взаимная индукция может оказаться вредным явлением в электрических установках. Так, например, если телефонная линия идет на некотором протяжении параллельно линии переменного тока, то в телефонной линии могут возникать индуцированные токи, вызывающие мешающий шум в телефонах или даже напряжения, опасные для лиц, пользующихся телефоном.

5-6. Расчет электромагнитных сил

Находящиеся в магнитном поле ферромагнитные тела и проводники с током испытывают действие механических сил, называемых в этом случае электромагнитными силами. К таким электромагнитным силам принадлежит, например, сила притяжения якоря к электромагниту, т. е. подъемная сила последнего.

Покажем, что между электромагнитной силой и запасом энергии в магнитном поле существует соотношение, которое позволяет легко найти электромагнитную силу, если запас энергии магнитного поля выражен через какую-либо координату, определяющую положение в системе того элемента, на который действует электромагнитная сила.

Положим, что система состоит из n

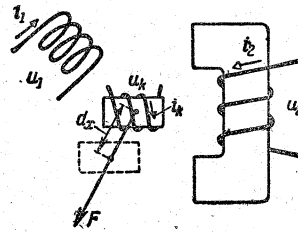


Рис. 5-10. Электромагнитная сила.

катушек (или контуров), присоединенных к источникам энергии, и ряда ферромагнитных тел (рис. 5-10). Пусть за бесконечно малое время dt то тело (или катушка), для которого определяется действующая сила F , получит по направлению этой силы бесконечно малое приращение dx своей координаты, тогда как положение всех прочих тел и катушек осталось неизменным. За это время система получит от источников энергии, равную $\sum_{k=1}^n U_k i_k dt$, часть

которой, равная $\sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt$ составляет

тепловые потери в катушках, а оставшаяся энергия будет затрачена на совершение механической работы Fdx и на приращение энергии магнитного поля dW . Таким образом,

$$\sum_{k=1}^n u_k i_k dt - \sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt = Fdx + dW,$$

или

$$\sum_{k=1}^n i_k (u_k - i_k R_k) dt = Fdx + dW. \quad (5-35)$$

Но так как напряжение на зажимах любой катушки состоит из потери напряжения в ее сопротивлении и слагающей, уравновешивающей индуцированную э. д. с., т. е.

$$u_k = i_k R_k + \frac{d\Phi_k}{dt},$$

то

$$(u_k - i_k R_k) dt = \frac{d\Phi_k}{dt} dt = dW_k$$

и, следовательно,

$$Fdx + dW = \sum_{k=1}^n i_k d\Phi_k.$$

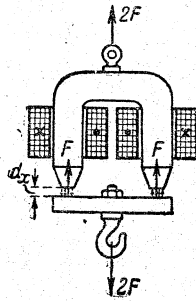


Рис. 5-11. Подъемная сила электромагнита.

Перенося dW в правую часть равенства и разделив обе части из dx , получим искомое соотношение

$$F = \sum_{k=1}^n i_k \frac{d\Phi_k}{dx} = \frac{dW}{dx}. \quad (5-36)$$

Общность рассуждений не нарушится, если предположить, что приложенные к катушкам напряжения регулируются таким образом, что при рассматриваемом перемещении все магнитные потоки остаются неизменными и, следовательно, все $\frac{d\Phi_k}{dx} = 0$; тогда для электромагнитной силы получится весьма простое выражение

$$F = - \frac{dW}{dx}. \quad (5-37)$$

Воспользуемся этим выражением, чтобы найти, например, силу притяжения якоря к находящемуся над ним полюсу электромагнита (рис. 5-11). Если при перемещении якоря (вверх) на dx магнитный поток не изменится, то запас энергии в магнитном поле уменьшится благодаря уменьшению объема воздушного зазора на величину $dV = Sdx$, где S — площадь полюса.

Запас энергии в воздушном зазоре должен зависеть от основной величины, характеризующей интенсивность магнитного поля — магнитной индукции. Для получения этой зависимости обратимся вновь к магнитному полю кольцевой катушки с неферромагнитным сердечником, где магнитная индукция связана с намагничивающим током наиболее простым соотношением

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I \omega}{l},$$

откуда

$$I = \frac{Bl}{\mu_0 \omega}. \quad (5-38)$$

Пользуясь соотношением (5-28) и имея в виду, что $\Psi = \omega \Phi = \omega BS$, получим следующее выражение запаса энергии в магнитном поле:

$$W = \frac{1}{2} \frac{Bl}{\mu_0 \omega} \omega BS = \frac{B^2 Sl}{2\mu_0} = \frac{B^2 V}{2\mu_0}, \quad (5-39)$$

где $V = Sl$ — объем, занимаемый магнитным полем. Так как $\frac{1}{\mu_0} = 0,8 \cdot 10^8$, то

$$W = 0,4 \cdot 10^8 B^2 V. \quad (5-40)$$

Применяя эту формулу к воздушному зазору электромагнита, объем которого $dV = Sdx$, найдем, что отрицательное приращение (уменьшение) энергии его магнитного поля при рассматриваемом перемещении dx выражается формулой

$$dW = -0,4 \cdot 10^8 B^2 S dx.$$

Подставляя это выражение в формулу (5-37), получим (для каждого из полюсов):

$$F = 0,4 \cdot 10^8 B^2 S \quad [\text{дж/см}], \quad (5-41)$$

где B выражается в вб/см^2 . Так как $1 \text{ дж/см} = 10,2 \text{ кГ}$, а $1 \text{ вб/см}^2 = 10^8 \text{ гс}$, то

$$F \approx 4 \left(\frac{B}{10000} \right)^2 S \quad [\text{кГ}], \quad (5-42)$$

где B выражено в гс , а S — в см^2 .

5-7. Включение и короткое замыкание цепей с индуктивностью

При включении цепи (рис. 5-12) с ничтожной индуктивностью ток в ней появляется практически мгновенно. Но по мере увеличения индуктивности последняя начинает оказывать все большее и большее влияние на процесс установления тока. Электродвижущая сила самоиндукции

$$e = -L \frac{di}{dt},$$

направленная против тока, задерживает его нарастание. В произвольный момент t ток i определяется алгебраической суммой приложенного к цепи напряже-

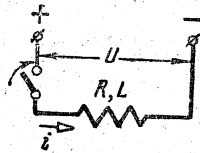


Рис. 5-12. Включение цепи с индуктивностью.

ния U и э. д. с. самоиндукции e , так что

$$i = \frac{U - L \frac{di}{dt}}{R},$$

где R — сопротивление цепи.

Отсюда скорость нарастания тока

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - iR}{L}. \quad (5-43)$$

Чем меньше R при постоянном L , тем больше $\frac{di}{dt}$ при одном и том же токе i , но даже при $R=0$ скорость нарастания тока остается конечной, принимая максимальное значение

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{макс}} = \frac{U}{L}. \quad (5-44)$$

Это значит, что при включении цепи ток в ней не устанавливается мгновенно, а постепенно нарастает от нуля, так как при наличии скачка тока скорость его изменения в момент включения была бы бесконечно велика, т. е. во всяком случае превышала бы только что найденное предельное значение. Наличие предельной скорости изменения тока имеет своим следствием даже более общее положение, заключающееся в том, что в участке цепи, для которого $L \neq 0$, ток не может делать скачков.

Согласно (5-43) при $R \neq 0$ скорость нарастания тока будет уменьшаться по мере того, как сам ток увеличивается, но в начальный момент, когда еще $i=0$, она имеет уже найденное максимальное значение

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{макс}} = \frac{U}{L}.$$

Для построения кривой нарастания тока необходимо решить дифференци-

альное уравнение (5-43). Разделяя переменные, находим:

$$\frac{di}{\frac{U}{R} - i} = \frac{R}{L} dt,$$

величина $\frac{U}{R} = I$ равна току установившегося режима цепи. Далее

$$di = -d\left(\frac{U}{R} - i\right) = -d(I - i),$$

следовательно,

$$\frac{d(I - i)}{I - i} = -\frac{R}{L} dt.$$

Интегрируя это выражение, получаем:

$$\ln(I - i) = -\frac{R}{L} t + \ln N,$$

или

$$\ln \frac{I - i}{N} = -\frac{R}{L} t;$$

здесь $\ln N$ — постоянная интегрирования. Потенцируя последнее выражение, находим:

$$I - i = Ne^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5-45)$$

Величина $\tau = \frac{L}{R}$, имеющая размерность времени, называется постоянной времени и представляет собой такой промежуток времени, в течение которого $e^{-\frac{t}{\tau}}$ уменьшается в e раз, т. е. примерно до 0,37 от начального значения.

Чтобы определить постоянную N , обращаемся к начальным условиям: при $t=0$ ток $i=0$, следовательно, из (5-45) $N = I = \frac{U}{R}$, таким образом, уравнение нарастания тока будет:

$$i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (5-46)$$

Выражаемая этим уравнением кривая нарастания тока представлена на рис. 5-13.

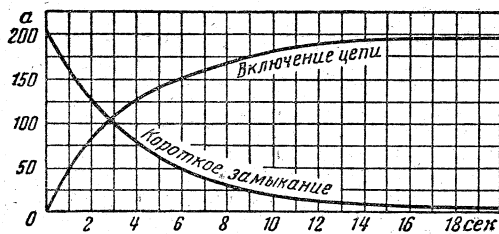


Рис. 5-13. Кривые тока при включении и коротком замыкании цепи с индуктивностью.

Процесс нарастания тока практически закончится при $t=3\tau$, так как в этот момент $i=0,95 I$, т. е. только на 5% меньше установившегося значения.

Это постепенное нарастание тока в цепи с индуктивностью имеет в ряде случаев большое практическое значение, так как многие электрические устройства для управления, сигнализации и т. д., например автоматическое управление электрифицированным станком для обработки металла, представляет собой цепи с значительной индуктивностью. Постепенное нарастание тока в них обуславливает некоторую электромагнитную инерцию исполнительного механизма: между замыканием цепи тока и срабатыванием механизма проходит известное время, которое необходимо учитывать.

Если обладающий сопротивлением и индуктивностью участок цепи (рис. 5-14) с током I замыкается накоротко, ток в этом участке исчезает; ток источника в конечном счете будет проходить по короткозамыкающему проводнику («закоротке»). Однако возникающая при исчезновении тока э. д. с. самоиндукции в течение некоторого времени поддерживает в короткозамкнутом участке ток прежнего направления. По закону Ома в этом случае

$$i = \frac{e}{R},$$

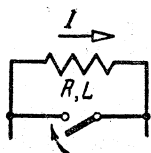


Рис. 5-14. Короткое замыкание цепи с индуктивностью.

а так как

$$e = -L \frac{di}{dt},$$

то

$$i = -\frac{L}{R} \frac{di}{dt}$$

или

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L} dt.$$

Это дифференциальное уравнение имеет решение:

$$\ln i = -\frac{R}{L} t + \ln N$$

или

$$\ln \frac{i}{N} = -\frac{R}{L} t,$$

или

$$i = Ne^{-\frac{t}{\tau}},$$

где постоянная времени $\tau = \frac{L}{R}$ не отличается от постоянной времени при процессе включения цепи. Так как в начальный момент ток в индуктивности не может сделать скачка, то при $t=0$ ток равен тому значению тока I , которое имело место непосредственно перед моментом короткого замыкания, откуда

$$N = I;$$

уравнение спада тока принимает вид:

$$i = Ie^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5-47)$$

или

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где U — напряжение между концами участка до короткого замыкания. На рис. 5-13 представлена кривая спада тока при его начальном значении 200 а и при постоянной времени 4 сек.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЕМКОСТЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
И ВОПРОСЫ ИЗОЛЯЦИИ

6-1. Электрическое поле

В электротехнике учение об электрическом поле имеет практическое значение главным образом как учение о силовом поле в изолирующей среде, разделяющей проводники, находящиеся под напряжением. Особо важное значение имеют вопросы электрического поля для устройств высокого напряжения, где необходимо, чтобы электрическая прочность изоляции соответствовала напряженности электрического поля в данном устройстве. Кроме того, в установках переменного тока большое значение имеют емкостные токи, т. е. токи, создаваемые изменениями зарядов емкостей отдельных элементов электрической установки; поэтому важно уметь рассчитывать емкости электротехнических устройств и знать роль этих емкостей в электрических процессах.

Две векторные величины — напряженность электрического поля E и электрическое смещение D — являются основными для технических расчетов условий в электрическом поле.

Основной величиной, характеризующей интенсивность электрического поля, т. е. силовые условия в рассматриваемой точке, является напряженность

$$E = \frac{dU}{dl}, \quad (6-1)$$

т. е. напряжение, приходящееся на единицу длины силовой линии электрического поля. Если выражать длины в сантиметрах, то за единицу напряженности поля следует принять вольт, деленный на сантиметр (v/cm). Напряженность поля обычно рассматривается как вектор E , направление которого совпадает с направлением силовой линии в данной точке поля.

Вторая величина, характеризующая электрическое состояние среды в рассматриваемой точке поля, это вектор электрического смещения D , кото-

рый связан с вектором E простым соотношением

$$D = \epsilon_a E, \quad (6-2)$$

где ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала (диэлектрика), имеющая в системе МКСА размерность $\kappa/v \cdot cm$ (κ — кулон). Отсюда следует, что единицей электрического смещения является:

$$\frac{\kappa}{v \cdot cm} \cdot \frac{v}{cm} = \frac{\kappa}{cm^2},$$

т. е. размерность смещения одинакова с размерностью поверхностной плотности заряда.

Абсолютную диэлектрическую проницаемость среды ϵ_a принято выражать как произведение двух величин:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r.$$

Электрическая постоянная ϵ_0 является коэффициентом пропорциональности между напряженностью поля и смещением во всех точках пространства, где не приходится учитывать влияние на электрическое поле внутримолекулярных и внутриатомных зарядов среды. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r есть безразмерная величина, посредством которой при расчетах учитывается влияние на электрическое поле внутримолекулярных и внутриатомных зарядов среды. Это влияние отсутствует в пустоте, следовательно, в пустоте $\epsilon_r = 1$, а абсолютная диэлектрическая проницаемость пустоты равна ϵ_0 .

Относительная диэлектрическая проницаемость всех веществ больше единицы.

В табл. 6-1 приведены значения ϵ_r для некоторых изолирующих материалов.

В основу расчета напряженности электрического поля в ряде случаев может быть положена известная из курса физики теорема Гаусса: поток

Таблица 6-1

Относительная диэлектрическая проницаемость некоторых материалов

Название материала	Относительная диэлектрическая проницаемость
Масло трансформаторное	2,2
Хлорвинил	3,0—5,0
Резина	2,6—3,0
Фарфор	5,5—6,0
Слюда	5,5—7,5
Мрамор	7,0—8,0
Асботекстолит	8,0

вектора смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, расположенных внутри этой поверхности. Математически эта теорема выражается уравнением

$$\oint_S \mathbf{D} dS = \oint_S D_n dS = Q, \quad (6-3)$$

где dS —элемент замкнутой поверхности, S , D_n —нормальная к нему составляющая вектора \mathbf{D} и Q —алгебраическая сумма зарядов, расположенных внутри поверхности S .

Если эта поверхность выбрана так, что во всех ее точках вектор \mathbf{D} направлен по нормали к ней, то $D_n = D$. Если, кроме того, в силу той или иной симметрии можно утверждать, что во всех точках поверхности S вектор \mathbf{D} имеет одну и ту же величину D , то величина D может быть вынесена за знак интеграла. В этом случае остающийся $\oint_S dS$, представляющий собой

сумму всех элементов поверхности, можно заменить величиной S , т. е.

$$\oint_S D_n dS = DS$$

и теорема Гаусса принимает вид:

$$DS = Q \quad (6-4)$$

или

$$D = \frac{Q}{S}. \quad (6-5)$$

Деля обе части этого уравнения на ϵ_a , получим:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_a S}. \quad (6-6)$$

6-2. Электрические свойства изоляционных материалов

Напряженность электрического поля в диэлектрике не может быть сколь угодно большой: при определенной напряженности поля происходит пробой, т. е. местное разрушение диэлектрика и потеря им своих изолирующих свойств. Эта предельная для данного диэлектрика напряженность электрического поля называется его пробивной напряженностью или его электрической прочностью.

Электрическая прочность данного диэлектрика не является постоянной величиной, а зависит от ряда обстоятельств: в неравномерном поле она иная, чем в равномерном; при переменном напряжении она меньше, чем при постоянном, и зависит от скорости изменения напряжения, а также от длительности его воздействия. Кроме того, на величину электрической прочности влияют температура и влажность диэлектрика и в некоторых случаях толщина его слоя, а электрическая прочность газов зависит еще от давления, под которым они находятся.

Причины пробоя могут быть различны. В одних случаях у твердых диэлектриков сказывается отрицательный температурный коэффициент сопротивления диэлектрика, вследствие чего с повышением напряжения ток, совершенно ничтожный при низком напряжении, растет не пропорционально напряжению, а быстрее, вызывая нагревание диэлектрика, и может привести к тепловому разрушению его (обугливание или растрескиванию). Это—так называемый тепловой пробой.

В других случаях причиной пробоя является ударная ионизация молекул диэлектрика, т. е. превращение их в ионы при столкновении с уже содержащимися в диэлектрике ионами, приобретающими большую скорость под действием сильного электрического поля. Это—электрический пробой.

Во многих твердых диэлектриках может иметь место как тот, так и другой вид пробоя в зависимости от величины напряженности поля и продолжительности его воздействия на диэлектрик. Электрический пробой тре-

бует значительно более высоких напряженностей поля, а следовательно, и более высоких напряжений, чем тепловой, зато продолжительность воздействия поля на диэлектрик может быть меньше. Под электрической прочностью твердых диэлектриков, если нет особых оговорок, принято понимать ту минимальную напряженность равномерного поля, которая вызывает пробой при достаточно длительном воздействии.

Электрическая прочность жидких диэлектриков сильно зависит от присутствия влаги или твердых примесей, в особенности, если диэлектрики гигроскопичны. Поэтому, например, минеральное масло, заполняющее баки трансформаторов и масляных выключателей, требует тщательной очистки и сушки. Пробой жидкостей имеет тепловой характер.

В неравномерном поле явление пробоя протекает несколько иначе, чем в равномерном. Здесь легко создается такое положение, когда в одной части диэлектрика напряженность поля превышает пробивную, в то время как в другой части диэлектрика она остается меньше пробивной напряженности. В этом случае разрушение диэлектрика происходит не по всей его толщине, а ограничивается областью более высокой напряженности поля.

Электрическая прочность газов (в том числе воздуха) зависит от температуры и давления, так как изменение этих факторов изменяет длину свободного пути иона между столкновениями.

При атмосферном давлении и температуре 20°С пробивное напряжение воздуха в постоянном электрическом поле при расстоянии между проводниками более 1 см составляет около 30 кВ/см.

Назначение всякого электроизолирующего материала заключается в том, чтобы отделить друг от друга проводящие части электрических устройств, имеющие во время работы различные потенциалы, а также оградить людей от прикосновения к ним. Соответствие данного материала своему назначению определяется не только его электрической прочностью, но также и его удельным сопротивлением. При этом, кроме объемного

удельного сопротивления, определяемого для диэлектриков так же, как и для проводников, необходимо учитывать и поверхностное удельное сопротивление. Сопротивление поверхностного слоя прямо пропорционально длине пути l тока вдоль поверхности и обратно пропорционально ширине b этой поверхности; следовательно, оно может быть выражено формулой

$$R_s = \rho_s \frac{l}{b},$$

где ρ_s — поверхностное удельное сопротивление данного материала.

Из этой формулы видно, что поверхностное удельное сопротивление выражается в омах. В табл. 6-2 приведены сведения об объемном и поверхностном сопротивлениях некоторых изолирующих материалов.

Таблица 6-2

Удельное сопротивление некоторых изолирующих материалов

Название материалов	Удельное сопротивление	
	объемное, ом·см	поверхностное ¹ , ом
Шифер	10 ⁷ —10 ⁹	10 ⁷ —10 ⁸
Мрамор	10 ⁹ —10 ¹¹	10 ¹² —10 ¹⁴
Фарфор	10 ¹¹ —10 ¹⁵	10 ¹³ —10 ¹⁴
Слюда	10 ¹² —10 ¹⁶	10 ¹² —10 ¹⁵

¹ При влажности 30%.

Помимо указанной в предыдущем параграфе основной задачи, изолирующие материалы или изделия из них должны выполнять еще весьма различные побочные функции, в силу чего к ним предъявляется ряд дополнительных требований; выбор изолирующего материала в каждом отдельном случае обуславливается всей совокупностью функций, которые он должен в этом случае выполнять. Так, например, изоляторы, на которых крепятся провода воздушных линий, должны передавать сначала на крюк, а затем на столб усилие от веса провода и давления на него ветра и, следовательно, должны обладать достаточной для этого механической прочностью; изоляция проводов, подводящих ток к переносной

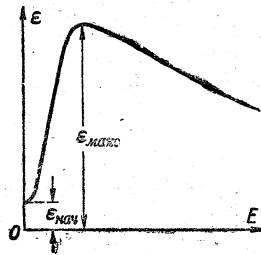


Рис. 6-1. Кривая диэлектрической проницаемости сегнетодиэлектриков.

лампе, должна быть достаточно гибкой, а изоляция, окружающая обмотку мощного трансформатора, выделяющего большое количество тепла, должна отводить это тепло достаточно интенсивно. При изготовлении конденсаторов желательна применение изоляции с большой диэлектрической проницаемостью, позволяющей легче обеспечить необходимую емкость; в кабелях часто, наоборот, большая емкость является нежелательной и изоляция должна иметь возможно меньшую диэлектрическую проницаемость.

Особую группу диэлектриков составляют так называемые сегнетоэлектрики, у которых диэлектрическая проницаемость зависит от напряженности электрического поля (рис. 6-1), подобно тому как у ферромагнитных материалов магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля. Это — вещества с полярными молекулами: сегнетова соль, титанат бария и ряд других.

Диэлектрическая проницаемость сегнетодиэлектриков намного больше, чем у всех других диэлектриков. Так, например, относительная проницаемость титаната бария больше 1000. Однако с повышением температуры проницаемость сегнетодиэлектриков падает и при определенной температуре (у титаната бария $+80^{\circ}\text{C}$) сегнетоэлектрик теряет свои характерные свойства.

6-3. Емкость и конденсаторы

Любые два проводника (электрода), разделенные каким-нибудь диэлектриком, обладают способностью накапливать свободные заряды одинаковой величины и разного знака, если

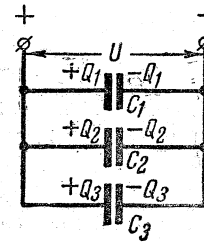


Рис. 6-2. Параллельное соединение конденсаторов.

их хотя бы на время присоединить к зажимам источника электрической энергии. При этом величина накопленных зарядов пропорциональна напряжению между проводниками, иначе говоря, отношение величины заряда Q к напряжению U является для данных двух проводников (или данного устройства) относительно постоянной величиной, которая и называется емкостью C . Таким образом,

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (6-7)$$

Основной единицей емкости в системе МКСа является 1 к/в , называемый фарадой (ϕ). Ввиду того, что это — единица очень крупная, обычно пользуются дробной единицей, равной миллионной доле фарады, — микрофарадой (мкф) и даже единицей, равной миллионной доле микрофарады, — микромикрофарадой или пикофарадой (мкмкф или пф).

К устройствам, обладающим емкостью, принадлежат: двухпроводная линия, двухжильный кабель, в том числе так называемый коаксиальный, у которого роль второй жилы играет металлическая оболочка, окружающая первую жилу, а также устройства, специально предназначенные для накопления свободных зарядов и называемые конденсаторами.

Если несколько конденсаторов соединены параллельно (рис. 6-2), их эквивалентная емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. Действительно, все конденсаторы находятся при этом под одним напряжением U , а их общий заряд равен сумме зарядов Q_1, Q_2, Q_3 (и т. д.) от-

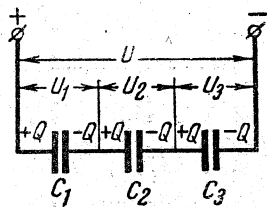


Рис. 6-3. Последовательное соединение конденсаторов.

дельных конденсаторов. Поэтому общая емкость

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots}{U} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (6-8)$$

Если же конденсаторы соединены последовательно (рис. 6-3), их общее напряжение U равно сумме напряжений U_1, U_2, U_3 (и т. д.) отдельных конденсаторов, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3,$$

что же касается заряда, его получают из сети только присоединенные к ней внешние электроды двух крайних конденсаторов, тогда как на соединенных между собой попарно остальных электродах происходит лишь перенос такого же по величине заряда Q с отрицательного электрода одного конденсатора на положительный электрод другого (или наоборот). Так как при этом общее напряжение U связано с общей емкостью группы соотношением

$$U = \frac{Q}{C},$$

а частичные напряжения U_1, U_2, U_3 (и т. д.) — с емкостями C_1, C_2, C_3 (и т. д.) отдельных конденсаторов аналогичными соотношениями

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{Q}{C_3} \quad (\text{и т. д.}),$$

то

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots$$

или

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

так что общая емкость

$$C = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}}. \quad (6-9)$$

Если емкости всех n конденсаторов одинаковы и равны, то

$$C = \frac{C_1}{n}, \quad (6-10)$$

т. е. общая емкость группы из n последовательно соединенных конденсаторов одинаковой емкости в n раз меньше емкости каждого отдельного конденсатора.

Емкость конденсатора зависит от его размеров и формы и пропорциональна диэлектрической проницаемости разделяющего электроды диэлектрика. У большинства диэлектриков диэлектрическая проницаемость является относительно постоянной величиной; поэтому емкость конденсаторов с такими диэлектриками можно считать практически постоянной, не зависящей от приложенного к ней напряжения.

Емкость конденсаторов с сегнето-диэлектриками уже не является постоянной, а зависит от приложенного напряжения, причем эта зависимость имеет такой же характер, как и представленная на рис. 6-1 зависимость ϵ от E . Такие нелинейные конденсаторы находят себе применение в различных устройствах автоматического управления.

6-4. Плоский конденсатор

Плоским называется конденсатор, электродами которого являются плоские параллельные пластины. Такие конденсаторы можно встретить в любом радиоприемнике или телефонном аппарате. У поверхностей электродов силовые линии располагаются нормально к этим поверхностям, так как в противном случае напряженность поля на поверхности проводников имела бы слагающую вдоль этих поверхностей, которая вызвала бы соответствующее перемещение зарядов (свободных электронов). Поэтому, если расстояние между пластинами плоско-

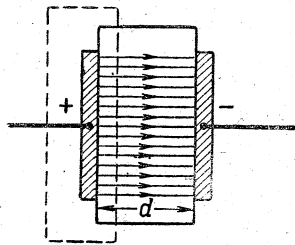


Рис. 6-4. Плоский конденсатор.

го конденсатора невелико по сравнению с их размерами, силовые линии электрического поля на всем их протяжении можно принять за прямые, перпендикулярные к пластинам (рис. 6-4). Это значит, что поле плоского конденсатора равномерно, т. е. напряженность поля E одинакова во всех точках пространства между пластинами. Пренебрегая очень слабым полем вне этого пространства, можно считать, что поток вектора D сквозь замкнутую поверхность, изображенную на рис. 6-4 пунктиром,

$$N = DS = \epsilon_a ES,$$

где S — площадь пластины.

Применяя к указанной поверхности теорему Гаусса, найдем, что

$$E = \frac{Q}{\epsilon_a S}$$

и так как, с другой стороны, в равномерном поле

$$E = \frac{U}{d},$$

где d — расстояние между электродами; U — напряжение между ними, то

$$\frac{Q}{\epsilon_a S} = \frac{U}{d},$$

откуда, меняя местами $\epsilon_a S$ и U , получаем для емкости плоского конденсатора выражение

$$C = \frac{\epsilon_a S}{d}. \quad (6-11)$$

Если изоляция плоского конденсатора состоит из двух слоев с разными диэлектрическими проницаемостями (рис. 6-5), а граница между этими слоями параллельна пластинам конденсатора, то по теореме Гаусса и

в этом случае в обоих слоях изоляции будет одинаковое смещение

$$D = \frac{Q}{S},$$

тогда как напряженность поля будет разная:

в первом слое

$$E_1 = \frac{Q}{\epsilon_{a1} S}, \quad (6-12)$$

а во втором

$$E_2 = \frac{Q}{\epsilon_{a2} S}. \quad (6-13)$$

Так как в каждом отдельном слое поле равномерно, то приложенное к конденсатору напряжение

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 = \frac{Q d_1}{\epsilon_{a1} S} + \frac{Q d_2}{\epsilon_{a2} S} = \frac{Q}{S} \left(\frac{d_1}{\epsilon_{a1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{a2}} \right),$$

откуда

$$Q = \frac{U \cdot S}{\frac{d_1}{\epsilon_{a1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{a2}}}. \quad (6-14)$$

Подставляя это выражение в формулу (6-7), получим:

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_{a1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{a2}}} = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}}. \quad (6-15)$$

Подставляя выражение (6-14) в формулу (6-12) и (6-13), получим:

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + d_2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}; \quad (6-16)$$

$$E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}. \quad (6-17)$$

Если одним из слоев изоляции является воздух, у которого $\epsilon = 1$, а другим — диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью, то, как видно из этих формул, напряженность поля в воздушном слое будет больше, чем в однослойной изоляции при том же расстоянии

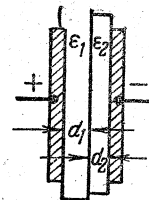


Рис. 6-5. Плоский конденсатор с двухслойным диэлектриком.

между электродами и неизменном напряжении.

При малой толщине воздушного зазора возрастание напряженности поля в воздухе может оказаться настолько значительным, что начнутся разряды, ионизирующие воздух и понижающие его изолирующие качества.

Подобное же явление происходит в изоляции электрических машин и аппаратов высокого напряжения, если в ней имеются пузырьки воздуха. Появляющаяся в них искра вызывает химические процессы, в результате которых выделяются окислы азота и озон, разрушительно действующие на изоляцию и могущие стать причиной крупной аварии. С целью одновременного удаления влаги и воздуха изоляция машин и аппаратов просушивается в вакуумных печах и пропитывается жидким диэлектриком, заполняющим имеющиеся пустоты.

6-5. Зарядный и разрядный токи

Если присоединять конденсатор к зажимам источника энергии или вообще к двум точкам цепи, между которыми поддерживается постоянное напряжение, он зарядится до этого напряжения и на его электродах появятся равные по величине количества электричества, положительного — на одном и отрицательного — на другом. Так как величина тока ограничена сопротивлением цепи, то для накопления заряда требуется известное время, в течение которого по соединительным проводам проходит зарядный ток. В произвольный момент времени, когда напряжение на конденсаторе имеет некоторое значение u_c (рис. 6-6) и потеря напряжения в соединительных проводах (или включенном в цепь добавочном сопротивлении) состав-

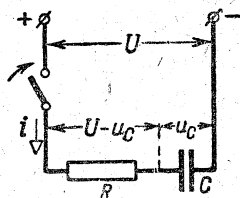


Рис. 6-6. Зарядка конденсатора.

ляет $U - u_c$, ток в цепи определяется по закону Ома:

$$i = \frac{U - u_c}{R}, \quad (6-18)$$

где R — сопротивление проводов (или добавочного сопротивления).

С другой стороны, ток в цепи равен скорости возрастания заряда q конденсатора, т. е.

$$i = \frac{dq}{dt},$$

а так как

$$q = Cu_c,$$

то

$$i = C \frac{du_c}{dt}. \quad (6-19)$$

Исключая i из (6-18) и (6-19), получим дифференциальное уравнение с одним неизвестным:

$$RC \frac{du_c}{dt} = U - u_c \quad (6-20)$$

или, так как

$$du_c = -d(U - u_c),$$

$$\frac{d(U - u_c)}{U - u_c} = -\frac{dt}{RC},$$

решение которого имеет вид:

$$\ln(U - u_c) = -\frac{t}{RC} + \ln K,$$

где $\ln K$ — постоянная интегрирования, или

$$\ln \frac{U - u_c}{R} = -\frac{t}{RC},$$

откуда

$$u_c = U + Ke^{-\frac{t}{RC}},$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Так как в первый момент после включения рубильника, т. е. при $t=0$, заряд конденсатора еще равен нулю, а следовательно, и $u_c=0$, то

$$0 = U + Ke^0, \text{ или } K = -U.$$

Следовательно,

$$u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (6-21)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени.

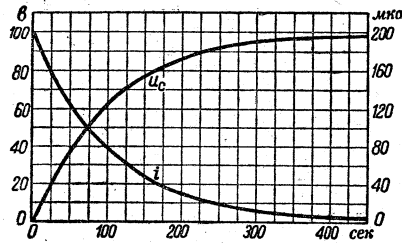


Рис. 6-7. Кривые напряжения и тока при зарядке конденсатора.

При $t = \tau$ напряжение $u_c = 0,63U$.

При $t = 3\tau$ напряжение $u_c = 0,95U$,
а при $t = 4,6\tau$ напряжение $u_c = 0,99U$.

Из уравнений (6-19) и (6-21) легко определяется закон изменения зарядного тока

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6-22)$$

В начальный момент $t=0$ получаем $u_c=0$ и конденсатор, следовательно, не оказывает никакого противодействия источнику энергии; ток определяется исключительно напряжением источника и сопротивлением цепи

$$i_0 = \frac{U}{R},$$

как и следует из (6-22); затем он спадает, уменьшаясь в e раз за время τ , и асимптотически стремится к нулю. На рис. 6-7 представлены кривые напряжения u_c и тока i , построенные по уравнениям (6-21) и (6-22) при $U = 100$ в, $R = 0,5$ Мом и $C = 200$ мкф.

Если электроды заряженного конденсатора соединить между собой непосредственно или через какое-нибудь сопротивление (рис. 6-8), конденсатор разрядится, так как противоположные по знаку заряды, соединившись, взаимно уничтожатся и напряжение конденсатора упадет до нуля.

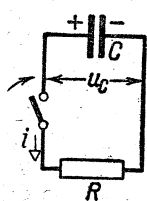


Рис. 6-8. Разрядка конденсатора.

Процесс разрядки, как и процесс зарядки, не происходит мгновенно, и в течение всего процесса по соединительным проводам проходит разрядный ток. В произвольный момент времени t , когда напряжение на конденсаторе с начального значе-

ния U упадет до некоторого значения u_c , ток в цепи определится по закону Ома:

$$i = \frac{u_c}{R}, \quad (6-23)$$

где R — сопротивление цепи.

С другой стороны, так как заряд q теперь уменьшается и, следовательно, $\frac{dq}{dt}$ отрицательно, а разрядный ток удобнее считать положительной величиной, то

$$i = -\frac{dq}{dt}$$

или аналогично предыдущему

$$i = -C \frac{du_c}{dt}. \quad (6-24)$$

Выражения (6-23) и (6-24) дают дифференциальное уравнение с одним неизвестным:

$$RC \frac{du_c}{dt} = -u_c,$$

или

$$\frac{du_c}{u_c} = -\frac{dt}{RC},$$

решением которого является:

$$u_c = Ke^{-\frac{t}{\tau}},$$

где снова $\tau = RC$. Так как при $t=0$ напряжение конденсатора равно начальному U , то

$$K = U$$

и, следовательно;

$$u_c = Ue^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6-25)$$

а согласно (6-23)

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6-26)$$

Таким образом, при разрядке как ток, так и напряжение на конденсаторе уменьшаются по тому же экспоненциальному закону, по которому спадал ток при зарядке конденсатора.

6-6. Энергия электрического поля

Разрядный ток конденсатора нагревает сопротивление R , причем количество получаемого тепла легко мо-

жет быть определено по закону Ленца—Джоуля. Это показывает, что конденсатор обладает запасом энергии, которая связана с его электрическим полем и превращается в тепло, когда конденсатор разряжается и его электрическое поле распадается.

Так как процесс разрядки длится теоретически бесконечно долго, хотя практически скоро перестает быть сколько-нибудь заметным, то запас энергии в электрическом поле заряженного конденсатора

$$W = \int_0^{\infty} i^2 R dt,$$

а так как при разрядке

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

то

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\infty} \frac{U^2}{R} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = \\ &= \frac{U^2 \tau}{R} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau}} d\left(-\frac{2t}{\tau}\right) = \\ &= \frac{U^2 \tau}{2R} (e^0 - e^{-\infty}) = \frac{U^2 \tau}{2R} (1 - 0), \end{aligned}$$

но

$$\frac{\tau}{R} = \frac{RC}{R} = C,$$

поэтому

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (6-27)$$

— выражение, аналогичное по форме выражению $\frac{LI^2}{2}$ для запаса энергии в магнитном поле.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

7-1. Получение переменного тока

Переменным называется ток (или напряжение), периодически изменяющий свои направление и величину. Полный период изменения тока называется обыкновенно просто периодом переменного тока и обозначается буквой T , а число периодов в 1 сек

$$f = \frac{1}{T} \quad (7-1)$$

называется частотой. Единица частоты $\frac{1}{сек}$ носит название герц ($гц$).

В более узком смысле под переменным током принято понимать такой периодически изменяющийся ток, среднее значение которого за период равно нулю.

До конца 70-х годов прошлого века переменный ток не находил себе применения. Но в 1876 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков изобрел свою знаменитую «свечу», радикально разрешив, таким образом, вопрос о регулировании расстояния между сгорающими углями в дуговых фонарях, применявшихся тогда для электрического освещения.

Для обеспечения равномерного сгорания углей своей свечи, быстро получившей широкое распространение в Европе и особенно во Франции, Яблочков решил питать ее переменным током и по его заказу мастер общества Альянс в Париже Грамм изготовил для этой цели генератор переменного тока.

В области производства, передачи и распределения электрической энергии переменный ток имеет по сравнению с постоянным два основных преимущества: 1) возможность (при помощи трансформаторов) просто и экономично повышать и понижать напряжение, что имеет решающее значение для передачи энергии на большие расстояния, и 2) большую простоту устройства, а следовательно, и меньшую стоимость электродвигателей.

В настоящее время в различных областях электротехники находят себе применение переменные токи различных частот. Самые большие частоты применяются в радиотехнике: от 10^5 $гц$, или 100 $кгц$ (длинные волны), до $20 \cdot 10^6$ $гц$, или 20 $Мгц$ (короткие волны), и даже до нескольких миллиардов герц (сантиметровые волны).



Павел Николаевич Яблочков (1847 — 1894 гг.).

Широкий диапазон частот (от 500 *гц* до 50 *Мгц*) применяется в разного рода электрических печах. Частоты порядка сотен и тысяч герц встречаются в телефонных цепях. Частоты от 150 до 2 000 *гц* находят применение для питания двигателей с высокими скоростями вращения. Наименьшие частоты употребляются для освещения и приведения в движение электродвигателей, скорость вращения которых не превышает 3 000 *об/мин*. В некоторых странах на электрических железных дорогах переменного тока встречаются частоты 15 и 16²/₃ *гц*. Однако такие низкие частоты непригодны для целей освещения, так как связанные с изменением тока изменения силы света ламп становятся заметными для глаза уже при частоте 40 *гц*. С другой стороны, как будет показано далее, поте-

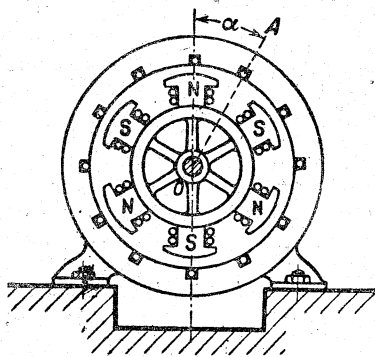


Рис. 7-1. Схематический разрез шестипольного генератора переменного тока.

ри напряжения при передаче энергии переменным током увеличиваются с увеличением частоты. Это определило выбор стандартной частоты 50 *гц* для электростанций в СССР. С такой же частотой работает большинство электростанций Европы. Электростанции Америки работают с частотами 60 и 25 *гц*.

Для получения токов высокой частоты в настоящее время пользуются обыкновенно ламповыми генераторами. Наоборот, для получения токов промышленной частоты (50 *гц*) служат машинные генераторы, которые в дальнейшем будем называть просто генераторами переменного тока. Токи повышенной частоты (от 500 до 8 000 *гц*) также получают от машинных генераторов, но особой конструкции.

В основе работы генератора переменного тока лежит закон электромагнитной индукции.

У генераторов переменного тока обмотка, в которой индуцируется переменная э. д. с., размещается в неподвижной части машины в пазах на внутренней поверхности статора (рис. 7-1), и отдельные провода ее соединяются между собой таким образом, чтобы возникающие в них э. д. с. складывались. Подвижная часть (ротор) генератора представляет собой маховик, на ободе которого расположены чередующиеся северный и южный полюса (N и S). Обмотка возбуждения этих полюсов присоединяется к двум помещенным на валу, но изолированным от него контактными кольцам, по которым скользят щетки, служащие для подведения постоянного тока к обмотке возбуждения. Постоянный ток получается от отдельного генератора, часто сидящего на общем валу с генератором переменного тока и называемого возбудителем, или от выпрямителей.

Одному обороту ротора двухполюсного генератора соответствует один период переменной э. д. с. в обмотке статора, и если ротор делает *n* оборотов в минуту, то частота индуцированной э. д. с.

$$f = \frac{n}{60}. \quad (7-2)$$

Так как при этом угловая скорость генератора

$$\omega = \frac{2\pi n}{60},$$

то между ней и частотой наведенной э. д. с. существует простое соотношение

$$\omega = 2\pi f. \quad (7-3)$$

Для генераторов с p парами полюсов

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (7-4)$$

7-2. Синусоидальный ток

Переменная э. д. с. генератора и переменный ток могут, вообще говоря, иметь самую различную кривую своего изменения во времени, в значительной мере зависящую от таких конструктивных факторов, как, например, форма полюсов ротора, которая определяет распределение индукции вдоль окружности ротора. Таким образом, имеется возможность выбирать форму кривой переменной э. д. с. генератора. В настоящее время все генераторы рассчитываются на получение синусоидальной кривой э. д. с.

Синусоида — единственная периодическая функция, имеющая подобную себе производную. Техническое значение этого обстоятельства заключается в том, что во всех звеньях линейной электрической цепи форма кривых напряжений (рис. 7-2) и токов получается одинаковой: синусоидальной или гармонической.

Таким образом, преимущества синусоидальных токов — относительная простота расчетов цепей переменного тока и отсутствие нежелательных по-

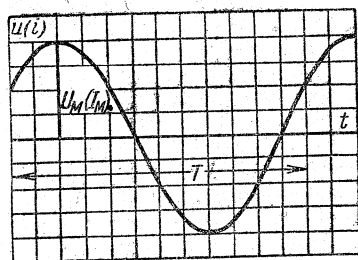


Рис. 7-2. Синусоидальная кривая напряжения или тока.

бочных явлений, имеющих место при несинусоидальных токах.

Аналитические выражения синусоидальных функций

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_1); \quad (7-5)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_2),$$

где малыми буквами i , u обозначены мгновенные значения тока и напряжения, т. е. их значения в произвольный момент t , большими буквами I_m , U_m — соответствующие амплитуды, т. е. максимальные значения.

Величина в скобках — аргумент синуса — именуется фазным углом синусоидальной величины. Она отсчитывается от ближайшей точки перехода через нуль синусоидальной функции, перехода от отрицательных значений к положительным. Величина $\omega = \frac{2\pi}{T}$ есть скорость изменения фазного угла, называемая угловой частотой; как видим (7-3), она равна угловой скорости двухполюсного генератора переменного тока.

Единицей угловой частоты является сек^{-1} . Стандартной частоте 50 гц соответствует угловая частота

$$\tilde{\omega} = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ сек}^{-1};$$

ψ_1 и ψ_2 — углы, зависят от момента, принятого за начало отсчета времени ($t=0$). Если, например, за начальный принят тот момент, когда ток проходит через свой максимум, то $\sin(\omega t + \psi_1)$ при $t=0$ должен быть равен единице

$$\sin(0 + \psi_1) = 1 \text{ и } \psi_1 = 90^\circ.$$

Различные стадии процессов, описываемых синусоидальными функциями (возрастание, убывание, переход через нуль или максимум и т. д.), называются его фазами. Фаза процесса в заданный момент t определяется углом $\omega t + \psi$, стоящим под знаком синуса. Угол ψ , определяющий фазу в условный начальный момент ($t=0$), называется начальной фазой, а разность начальных фаз ψ_1 и ψ_2 двух функций — их разностью фаз или сдвигом фаз.

7-3. Средние значения тока и напряжения

Среднее значение переменного напряжения или тока за период равно нулю. Поэтому, когда говорят о среднем значении переменного тока, напряжения или э. д. с., то под ним подразумевается среднее значение за половину периода между двумя нулевыми значениями величины. Так, например, среднее значение переменной э. д. с.

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt. \quad (7-6)$$

Если э. д. с. изменяется по синусоидальному закону

$$e = E_M \sin \omega t,$$

то нетрудно установить простую зависимость между средним значением $E_{\text{ср}}$ и амплитудой E_M . Действительно, в этом случае

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt &= E_M \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = \\ &= \frac{E_M}{\omega} \int_0^{\pi} \sin \omega t d(\omega t) = \\ &= \frac{E_M}{\omega} \left[-\cos \omega t \right]_0^{\pi} = \frac{2E_M}{\omega}, \end{aligned}$$

а так как $\omega T = \frac{2\pi}{T} T = 2\pi$, то

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \frac{2E_M}{\omega} = \frac{2}{\pi} E_M = 0,637 E_M. \quad (7-7)$$

Аналогично выражаются через свои амплитуды и средние значения напряжения $U_{\text{ср}}$ и тока $I_{\text{ср}}$.

7-4. Действующие значения тока и напряжения

В технике переменных токов часто приходится иметь дело с тепловыми и механическими действиями тока. Как интенсивность выделения тепла, так в

ряде случаев и величина механических сил пропорциональны квадрату тока. Поэтому при переменном токе средняя интенсивность выделения тепла и в ряде случаев средняя величина механических сил оказываются пропорциональными среднему за период значению квадрата тока. Квадратный корень из этой величины, т. е. среднее квадратичное значение тока,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (7-8)$$

называется действующим значением тока.

Иначе говоря, действующее значение переменного тока равняется такому постоянному току, который за время, равное периоду, выделяет в каком-либо сопротивлении такое же количество тепла, что и данный переменный ток. Действительно, это количество тепла

$$Q = \int_0^T i^2 R dt = R \int_0^T i^2 dt = I^2 RT. \quad (7-9)$$

Действующее значение тока является наиболее широко применяемой характеристикой величины переменного тока. Именно его имеют обыкновенно в виду, когда говорят, что в данной цепи переменный ток составляет столько-то ампер.

В случае синусоидального тока

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt &= \frac{1}{\omega T} \int_0^{2\pi} I_M^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) = \\ &= \frac{I_M^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d(\omega t) = \\ &= \frac{I_M^2}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2(\omega t)}{4} \right]_0^{2\pi} = \frac{I_M^2}{2} \end{aligned}$$

и согласно (7-8)

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}} = 0,707 I_M, \quad (7-10)$$

т. е. действующее значение синусоидального тока в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитуды.

Аналогичным образом определяется действующее значение переменного напряжения (э. д. с., магнитного потока и т. д.). При произвольной форме периодического напряжения его действующее значение равно:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad (7-11)$$

а при синусоидальном изменении напряжения

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = 0,707 U_m. \quad (7-12)$$

Вольтметры и амперметры, предназначенные для работы в цепи синусоидального тока, градуируются обычно так, чтобы они показывали непосредственно действующие значения напряжения или тока.

7-5. Векторная диаграмма переменного тока

При различных расчетах часто приходится определять переменный ток как сумму двух или нескольких переменных токов или какое-нибудь напряжение как сумму двух или нескольких переменных напряжений. Так, например, если в какой-нибудь точке M (рис. 7-3) соединяются два провода, то общий ток i согласно первому закону Кирхгофа будет равен сумме токов в обоих сходящихся проводах

$$i = i_1 + i_2.$$

Следует иметь в виду, что стрелки на схемах цепей переменного тока имеют лишь условный смысл, обозначая те направления, в которых токи (э. д. с. или напряжения) считаются положительными. Эти направления могут быть выбраны для каждого участка цепи совершенно произвольно и независимо от других участков.

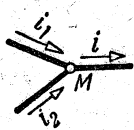


Рис. 7-3. Сложение двух токов.

Суммируемые токи (или напряжения) могут иметь различные амплитуды и, кроме того, неодновременно проходить через свои нулевые и максимальные значения, т. е. быть сдвинутыми по

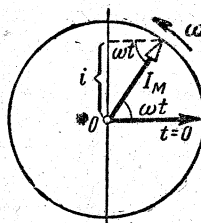


Рис. 7-4. Векторное изображение синусоидального тока.

фазе. Сложение их можно выполнить графически, складывая алгебраически ординаты кривых в различные моменты и соединяя полученные точки плавной кривой.

Тот же результат может быть гораздо быстрее и легче получен при помощи векторной диаграммы.

Если какая-нибудь точка движется с постоянной скоростью по окружности, то проекция ее на любой диаметр совершает гармонические (синусоидальные) колебания. Радиус-вектор этой точки вращается с постоянной угловой скоростью. Если этот радиус-вектор (рис. 7-4), в известном масштабе изображающий амплитуду тока (или напряжения), занимает в начальный момент ($t=0$) горизонтальное положение вправо от центра вращения и вращается против направления движения часовой стрелки с угловой скоростью ω , то в произвольный момент t , когда он образует с горизонталью угол ωt , проекция его на вертикаль в том же масштабе изображает соответствующее мгновенное значение

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Если же радиус-вектор, обыкновенно называемый для краткости просто вектором (иногда — временным вектором), в начальный момент расположен не горизонтально, а образует с гори-

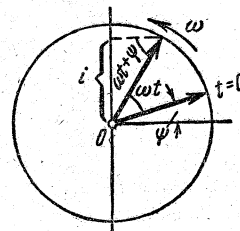


Рис. 7-5. Векторное изображение синусоидального тока при $\phi \neq 0$.

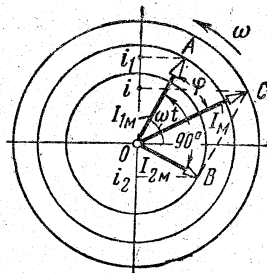


Рис. 7-6. Сложение токов посредством векторной диаграммы.

горизонталью угол ψ (рис. 7-5), то проекция на вертикаль будет иметь иное выражение:

$$i = I_M \sin(\omega t + \psi),$$

изображая ток, опережающий предыдущий на часть периода, равную $\frac{\psi}{360^\circ}$.

Угол ψ считается положительным, когда он получается поворотом вектора «вперед», т. е. по направлению вращения, и отрицательным — в обратном случае.

Алгебраической сумме мгновенных значений двух синусоидальных величин одинаковой частоты соответствует геометрическая сумма векторов этих величин.

Пусть, например, нужно сложить ток $i_1 = I_{1M} \sin \omega t$ и ток $i_2 = I_{2M} \sin(\omega t - 90^\circ)$, отстающий от i_1 по фазе на 90° , т. е. четверть периода. Ток i_2 изображен на векторной диаграмме (рис. 7-6) вектором I_{2M} , расположенным «позади» вектора I_{1M} на 90° . Оба вектора начерчены в том положении, которое они занимают в произвольный момент t , когда вектор I_{1M} образует с горизонталью некоторый угол ωt .

Чтобы получить вектор I_M , изображающий суммарный ток i , нужно только сложить векторы I_{1M} и I_{2M} по правилу параллелограмма, как это делается при отыскании равнодействующей двух сил в механике. Действительно, проекция равнодействующей равна алгебраической сумме проекций составляющих, и, следовательно, проекция указанным образом построенного вектора I_M , т. е. ток i , равна сумме проекций векторов I_{1M} и I_{2M} , т. е. алгебраической сумме $i_1 + i_2$.

Так как в рассматриваемом примере геометрически складываемые векторы перпендикулярны друг другу, то из прямоугольного треугольника OBC находим:

$$I_M = \sqrt{I_{1M}^2 + I_{2M}^2},$$

а

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{2M}}{I_{1M}},$$

откуда и определяется тот угол φ , на который вектор суммарного тока отстает от вектора I_{1M} . Одновременно можно сделать заключение, что так как проекция вращающегося вектора изменяется гармонически, то, следовательно, сумма двух синусоидальных токов (или напряжений) всегда представляет собой также синусоидальный ток (или напряжение).

Следует заметить, что стрелки, которые ставятся на конце каждого вектора, служат для того, чтобы отличать конец вектора от его начала. Это будет особенно важно в дальнейшем, когда начала отдельных векторов не будут совпадать с началом координат.

Так как целью построения векторной диаграммы большей частью является определение не мгновенного значения тока (или напряжения) в какой-либо определенный момент, а его амплитуды и сдвига по фазе по отношению к какому-нибудь из известных токов или напряжений, то изображение круговых путей концов векторов, вертикали, на которую векторы проектируются, и горизонтали, от которой отсчитываются углы $\omega t + \psi$, является обязательным. Векторная диаграмма может состоять исключительно из векторов напряжений и токов, один из которых целесообразно расположить вертикально или горизонтально, причем геометрическая сумма векторов может находиться либо как диагональ построенного на них параллелограмма, либо как замыкающая сторона треугольника, получаемого при параллельном переносе одного из суммируемых векторов из центра диаграммы в конец другого вектора (рис. 7-7). Последний способ более удобен, так как он легко может быть распространен на случай сложения нескольких

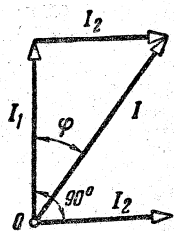


Рис. 7-7. Векторная диаграмма для действующих значений.

векторов, давая вместо треугольника многоугольник (рис. 7-8). Вместе с тем, так как конечной целью расчета являются обычно действующие значения токов или напряжений, которые пропорциональны соответствующим амплитудам, то на векторной диаграмме можно с самого начала амплитуды заменить действующими значениями, что и показано на рис. 7-7 и 7-8. Такие диаграммы позволяют быстро найти действующее значение суммарного напряжения или тока по действующим значениям его составляющих и сдвигу фаз между ними.

Для записи геометрического сложения векторов над обозначениями амплитуд или действующих значений суммируемых напряжений или токов и получаемого результата ставятся точки. Изображенное, например, на рис. 7-8 сложение напряжений может быть записано так:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3.$$

Такое обозначение векторов синусоидальных функций введено для отличия их от физических векторов, имеющих определенное направление в пространстве (скорость, сила и т. д.).

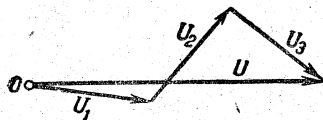


Рис. 7-8. Сложение трех напряжений.

Векторной диаграммой пользуются не только для сложения и вычитания синусоидальных величин, но также и для наглядного изображения сдвига фаз между двумя или несколькими синусоидально изменяющимися величинами одинаковой частоты.

7-6. Переменный ток в цепи, не обладающей индуктивностью и емкостью

Если синусоидальное напряжение $u = U_M \sin \omega t$ приложено к зажимам цепи (рис. 7-9), имеющей сопротивление R , но не обладающей сколько-нибудь заметными индуктивностью и емкостью (безреактивная цепь), то по закону Ома мгновенное значение тока

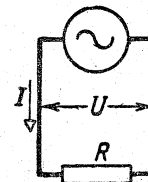


Рис. 7-9. Цепь содержащая, только R.

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_M}{R} \sin \omega t = I_M \sin \omega t,$$

где

$$I_M = \frac{U_M}{R}. \quad (7-13)$$

Таким образом, ток, как и напряжение, изменяется синусоидально, достигая своего положительного максимума (амплитуды) I_M при $\sin \omega t = 1$, т. е. одновременно с напряжением (рис. 7-10). Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе, и векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 7-11 (вектор тока для ясности немного сдвинут вправо, в действительности он должен быть наложен на вектор напряжения).

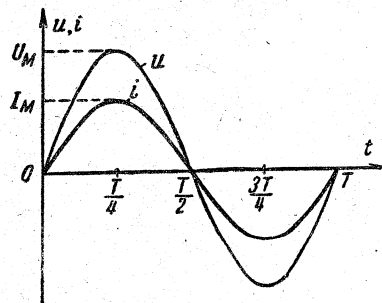


Рис. 7-10. Кривые напряжения и тока для цепи рис. 7-9.

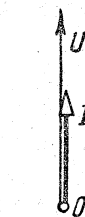


Рис. 7-11. Векторная диаграмма цепи рис. 7-9.

Так как действующие значения тока и напряжения равны соответствующим амплитудам, деленным на $\sqrt{2}$,

то, разделив на $\sqrt{2}$ обе части равенства (7-13), получим соотношение

$$I = \frac{U}{R}, \quad (7-14)$$

показывающее, что в цепи, не обладающей индуктивностью и емкостью, действующие значения тока и напряжения подчиняются закону Ома, имеющему совершенно такую же форму записи, как и для цепи постоянного тока.

Синусоидальные напряжения и токи, когда это не может вызвать недоразумений, часто называют более общим термином — переменные. Поэтому в дальнейшем под переменными будем понимать синусоидальные токи и напряжения.

7-7. Переменный ток в цепи с индуктивностью

Если цепь, к зажимам которой приложено синусоидальное напряжение, обладает не только сопротивлением R , но и индуктивностью L (рис. 7-12), то происходящий в ней процесс осложняется появлением э. д. с. самоиндукции (§ 5-4).

$$e = -L \frac{di}{dt},$$

пропорциональной скорости изменения тока, последний создается теперь совместным действием внешнего напряжения и э. д. с. самоиндукции e . По закону Ома мгновенное значение тока

$$i = \frac{u + e}{R}$$

или

$$u = iR - e = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (7-15)$$

Пользуясь этим соотношением, найдем закон изменения тока, а затем — его действующее значение.

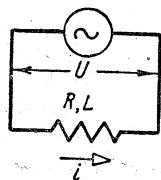


Рис. 7-12. Цепь, содержащая R и L .

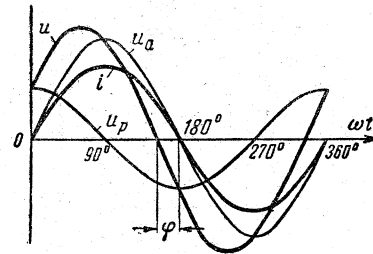


Рис. 7-13. Кривые напряжения и тока для цепи рис. 7-12.

Нетрудно видеть, что при постоянной индуктивности L ток должен изменяться синусоидально. Действительно, в этом случае изменение производной тока $\frac{di}{dt}$ тоже будет синусоидаль-

ным и, следовательно, в обеих частях уравнения (7-15) окажутся синусоидально изменяющиеся величины и останется только подобрать амплитуду тока и сдвиг фаз между током и напряжением так, чтобы синусоидальные величины в левой и правой частях уравнения (7-15) были равны друг другу.

Положив поэтому

$$i = I_m \sin \omega t,$$

т. е. приняв за начало счета времени тот момент, когда ток проходит через нуль, и подставляя это выражение тока и его производную в уравнение (7-15), получим:

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (7-16)$$

Первый член правой части этого уравнения представляет собой синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m R$, совпадающую по фазе с током, а второе слагаемое — синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m \omega L$, опережающую ток на $1/4$ периода (90°). Первая из этих величин называется активной составляющей напряжения или просто активным напряжением u_a (рис. 7-13), а вторая — индуктивной реактивной составляющей напряжения или просто индуктивным реактив-

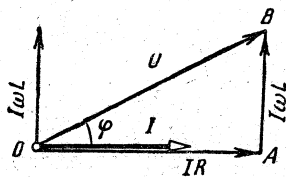


Рис. 7-14. Векторная диаграмма для цепи рис. 7-12.

ным напряжением. Действующие значения активного и реактивного напряжений найдем, разделив на $\sqrt{2}$ соответствующие амплитуды, т. е. заменив в их выражениях I_m на I ; таким образом, активное напряжение

$$U_a = IR,$$

а реактивное

$$U_p = I\omega L.$$

Так как мгновенное значение полного напряжения на зажимах цепи равно алгебраической сумме мгновенных значений активного и реактивного напряжений, то действующее значение полного напряжения равно геометрической сумме действующих значений слагающих, т. е.

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_p.$$

Это сложение сделано на векторной диаграмме (рис. 7-14), где вектор $U_a = IR$ совпадает по направлению с вектором I , а вектор $U_p = I\omega L$ опережает вектор I на 90° . Из прямоугольного треугольника OAB легко устанавливается соотношение между величинами U и I :

$$I^2 R^2 + I^2 (\omega L)^2 = U^2,$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (7-17)$$

а также определяется угол φ , на который напряжение опережает ток (или ток отстает от напряжения):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I\omega L}{IR} = \frac{\omega L}{R}. \quad (7-18)$$

Соотношение (7-17) называется законом Ома для переменного тока, а входящее в его состав выражение $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, имеющее размерность сопротивления, — полным сопротивлением. Соотношение (7-17) по-

казывает, что действующее значение переменного тока в цепи, обладающей индуктивностью, получается меньше, чем постоянный ток в той же цепи при таком же по величине постоянном напряжении.

Полное сопротивление обозначается буквой z . Входящее в его состав выражение ωL обозначается X_L и называется индуктивным сопротивлением. В отличие от него сопротивление R называется активным сопротивлением. Таким образом, имеем:

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (7-19)$$

и закон Ома для переменного тока принимает вид:

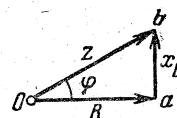
$$I = \frac{U}{z}. \quad (7-20)$$

Если все стороны треугольника напряжений OAB (рис. 7-14) разделить на I , то получится подобный треугольник Oab (рис. 7-15), катеты которого изображают активное и индуктивное, а гипотенуза — полное сопротивление. Гипотенуза z и катет R образуют между собой угол φ , равный углу сдвига фаз между напряжением U и током I . Пользуясь этим треугольником, можно находить полное сопротивление цепи или сдвиг фаз между U и I графическим путем. Кроме того, он позволяет установить в дополнение к (7-18) следующие два соотношения:

$$\cos \varphi = \frac{R}{z} \quad \text{и} \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{z}. \quad (7-21)$$

Следует заметить, что треугольник сопротивлений отличается от векторной диаграммы тем, что составляющие его векторы изображают постоянные, а не синусоидально изменяющиеся величины.

Если активное сопротивление цепи ничтожно мало по сравнению с индук-

Рис. 7-15. Треугольник сопротивлений цепи с R и L .

тивным, то им можно пренебречь, и тогда

$$z = X_L = \omega L \text{ и } I = \frac{U}{\omega L},$$

а так как при этом $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{0} = \infty$, то $\varphi = 90^\circ$, т. е. ток отстает от напряжения на четверть периода.

7-8. Поверхностный эффект и эффект близости

Магнитное поле электрического тока расположено не только в окружающем проводник пространстве, но и внутри самого проводника. Но в то время как любая магнитная линия внешнего поля охватывает весь проводник, магнитная линия внутреннего поля охватывает лишь ту часть проводника, которая находится внутри контура этой линии. Поэтому, если внутри проводника выделить два тонких слоя с радиусами r_1 и r_2 (рис. 7-16), то первый из них, лежащий ближе к оси проводника, будет охватываться большим магнитным потоком, чем второй, следовательно, потоко-сцепление первого слоя будет также больше. Если теперь выделить в пределах первого слоя нитевидный элемент m , а в пределах второго слоя — нитевидный элемент n такого же сечения, то элемент m , как сцепленный с большим потоком, будет обладать индуктивным сопротивлением, чем элемент n , так как $L = \frac{\Psi}{i}$.

Активное сопротивление обоих элемен-

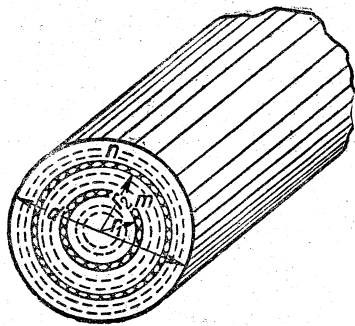


Рис. 7-16. Схема возникновения поверхностного эффекта.

тов одинаково, поэтому полное сопротивление элемента m будет больше полного сопротивления элемента n . Напряжение между двумя параллельными поперечными сечениями провода одинаково для всех его слоев или элементов. Поэтому ток в элементе m будет меньше, чем в элементе n , а так как их сечение одинаково, то, значит, плотность тока в более близком к оси провода элементе будет меньше, чем в более далеком.

Таким образом, переменный ток в отличие от постоянного не распределяется равномерно по всему сечению проводника: плотность его непрерывно возрастает по направлению от оси провода к его поверхности. Это явление называется поверхностным эффектом.

С увеличением частоты переменного тока, диаметра провода, его удельной проводимости и магнитной проницаемости отношение плотностей тока у поверхности и на оси провода возрастает. Поэтому в стальном проводе, магнитная проницаемость которого во много раз больше, чем медного, тогда как удельная проводимость лишь в 8 раз меньше, поверхностный эффект особенно сильно выражен. Однако при высоких частотах, применяемых, например, в радиотехнике, он имеет место и в медном или алюминиевом проводе. В этих случаях ток практически заполняет лишь сравнительно тонкий поверхностный слой провода. Толщина этого слоя, или так называемая глубина проникновения переменного тока, условно принимается такой, чтобы плотность тока на его внутренней поверхности была в $e = 2,72$ раза меньше, чем на наружной поверхности провода. Это дает для глубины проникновения b формулу

$$b = \frac{5030}{\sqrt{f \gamma \cdot \mu}} \text{ [см]},$$

где f — частота, $гц$;

γ — удельная проводимость, $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$;

μ — относительная магнитная проницаемость материала провода.

Неравномерное распределение тока по сечению провода имеет своим следствием неполное использование

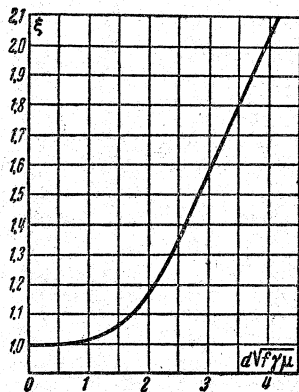


Рис. 7-17. Зависимость коэффициента ξ от d , γ , μ и f .

сечения и, следовательно, увеличение тепловых потерь в проводе. Поэтому при вычислении потерь по формуле

$$P = I^2 R$$

следует считать активное сопротивление R большим, чем при постоянном токе $R_{\text{пост}}$, вычисляя его по формуле

$$R = \xi R_{\text{пост}};$$

здесь ξ — коэффициент, зависящий от произведения $d\sqrt{f\gamma\mu}$, где d — диаметр провода, см; μ — магнитная проницаемость гн/см; γ — удельная проводимость, $\frac{1}{\text{ом}\cdot\text{см}}$, а f — частота, гц.

На рис. 7-17. приведен график этой зависимости.

Если два провода расположены на близком расстоянии друг от друга, то поле одного из них различным образом сцеплено с элементами другого (рис. 7-18). Элемент m второго провода, например, охвачен большим магнитным потоком, создаваемым током в первом проводе, чем элемент n .

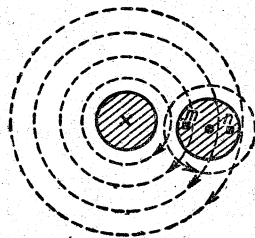


Рис. 7-18. Схема возникновения эффекта близости.

В результате этого в элементе m возникает большая э. д. с. взаимной индукции, чем в элементе n , что будет иметь своим следствием разную плотность тока в этих двух элементах. Это явление дополнительной неравномерности распределения тока по сечению провода, которое накладывается на поверхностный эффект, называется эффектом близости. При противоположных направлениях токов в проводах (рис. 7-18) плотность тока будет наибольшей в наиболее близких друг к другу точках поверхности проводов, так как в этом случае э. д. с. взаимной индукции направлена навстречу э. д. с. самоиндукции и уменьшает ее, а э. д. с. взаимной индукции в элементе m больше, чем в n . Наоборот, при одинаковых направлениях токов плотность тока будет наибольшей в наиболее удаленных друг от друга точках поверхности проводов.

7-9. Последовательное соединение активных и индуктивных сопротивлений

При одинаковом напряжении U активное сопротивление и индуктивность цепи обуславливают одинаковый по величине и фазе ток независимо от того, сосредоточены ли они в одном и том же участке цепи (рис. 7-12) или принадлежат к двум последовательно соединенным участкам (рис. 7-19), один из которых, обладая активным сопротивлением R , имеет ничтожную индуктивность, а другой, обладая индуктивностью L , имеет ничтожное активное сопротивление (примененное здесь обозначение участка цепи, обладающего только индуктивностью, будет применяться всюду и в дальнейшем).

В самом деле, с точки зрения расчета тока в неразветвленной цепи безразлично, в каком из ее участков со-

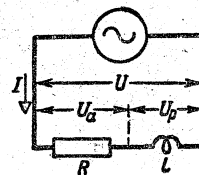


Рис. 7-19. Последовательное соединение R и L .

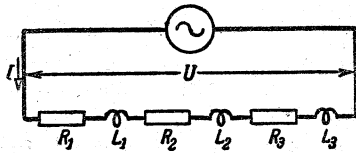


Рис. 7-20. Эквивалентная схема последовательного соединения трех катушек.

средоточена та или иная э. д. с., а рассматриваемые цепи различаются только тем, что в первой из них э. д. с. самоиндукции возникает в участке, обладающем сопротивлением R , а во второй — вне этого участка. Разница в работе этих цепей исчерпывается тем обстоятельством, что во второй цепи активное и реактивное напряжения, изображенные на векторной диаграмме (рис. 7-14), не только являются составляющими общего напряжения U , но имеют и самостоятельное значение как напряжения между концами двух участков цепи.

Возможность отделения индуктивности какого-либо участка цепи от его активного сопротивления позволяет решить вопрос о расчете тока при последовательном соединении нескольких приемников, каждый из которых обладает как активным сопротивлением, так и индуктивностью (например, трех катушек — рис. 7-20). В этом случае приложенное к цепи напряжение является геометрической суммой всех активных напряжений, каждое из которых совпадает по фазе с током, и всех реактивных напряжений, каждое из которых опережает ток на 90° . Поэтому суммарное активное напряжение будет равно арифметической сумме всех активных напряжений:

$$\begin{aligned} U_a &= IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots = \\ &= I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots) = I\Sigma R, \end{aligned}$$

а суммарное реактивное напряжение — арифметической сумме всех реактивных напряжений:

$$\begin{aligned} U_p &= IX_{L1} + IX_{L2} + IX_{L3} + \dots = \\ &= I(X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots) = I\Sigma X_L, \end{aligned}$$

которые тоже совпадают между собой по фазе.

Таким образом, активное сопротивление всей цепи

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

получается как сумма активных сопротивлений отдельных приемников, а индуктивное сопротивление всей цепи

$$X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots$$

— как сумма их индуктивных сопротивлений. Полное сопротивление всей цепи находится по уже известной формуле

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

и применяется как для вычисления тока при заданном напряжении, так и для вычисления напряжения при заданном токе.

Таким образом, в общей форме закон Ома для последовательного соединения нескольких активных сопротивлений и индуктивностей может быть записан в виде формулы

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X_L)^2}}. \quad (7-22)$$

Полезно заметить, что арифметическая сумма напряжений отдельных приемников может быть больше суммарного напряжения U . Это поясняет рис. 7-21, на котором представлена векторная диаграмма двух последовательно соединенных катушек. Напряжения U_1 и U_2 на зажимах каждой катушки получены путем геометрического сложения соответствующих активных (IR_1 и IR_2) и реактивных ($I\omega L_1$ и $I\omega L_2$) слагающих.

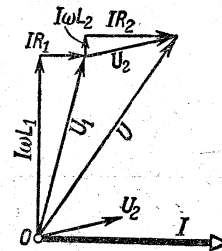


Рис. 7-21. Векторная диаграмма последовательного соединения двух катушек.

7-10. Переменный ток в цепи с емкостью

Если к зажимам генератора, создающего синусоидальное напряжение, присоединить конденсатор емкостью C (рис. 7-22), последний будет перио-

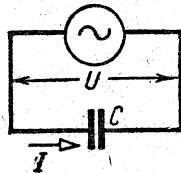


Рис. 7-22. Емкость в цепи переменного тока.

дически заряжаться и разряжаться и, следовательно, в соединительных проводах будет иметь место переменный ток, связанный с напряжением, полученным в § 6-5, соотношением (6-19):

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (7-23)$$

где u_C — напряжение на зажимах емкости, равное в данном случае напряжению генератора

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Подставляя это выражение в (7-23) и выполняя дифференцирование, получим:

$$i = C\omega U_m \cos \omega t$$

или

$$i = I_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где

$$I_m = U_m \omega C. \quad (7-24)$$

Таким образом, ток в цепи с емкостью на четверть периода опережает напряжение на зажимах этой емкости (рис. 7-23). Деля на $\sqrt{2}$ обе части ра-

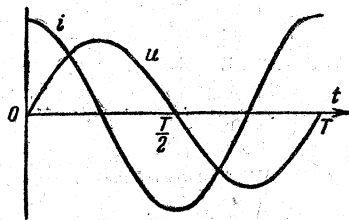


Рис. 7-23. Кривые мгновенных значений напряжения и тока в цепи с емкостью.

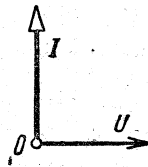


Рис. 7-24. Векторная диаграмма цепи с емкостью.

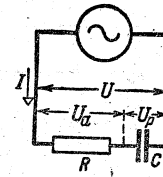


Рис. 7-25. Последовательное соединение R и C .

венства (7-24), получим действующее значение этого тока

$$I = U\omega C. \quad (7-25)$$

Соответствующая векторная диаграмма представлена на рис. 7-24. Произведение ωC , имеющее размерность проводимости, называется емкостной проводимостью. Обратная величина $\frac{1}{\omega C}$ называется

емкостным реактивным сопротивлением и обозначается X_C .

Если, кроме емкости C , в цепи имеется активное сопротивление R , соединенное с емкостью (конденсатором) последовательно (рис. 7-25), то приложенное ко всей цепи напряжение является суммой двух слагающих: активного напряжения $U_a = IR$ на зажимах активного сопротивления и реактивного емкостного напряжения $U_p = I \frac{1}{\omega C}$ на зажимах емкости, первое из которых совпадает по фазе с током I (рис. 7-26), а второе отстает от него на 90° , так что приложенное напряжение U оказывается отстающим от тока I на некоторый угол φ , который легко определяется из треугольника напряжений OAB . Общее напряжение цепи U как гипотенуза прямоугольного треугольника связано с током I соотношением

$$U^2 = I^2 R^2 + I^2 \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2,$$

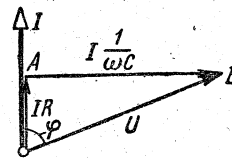
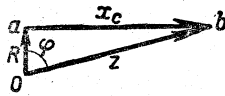


Рис. 7-26. Векторная диаграмма цепи с R и C .

Рис. 7-27. Треугольник сопротивлений цепи с R и C .

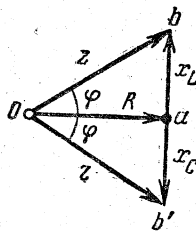
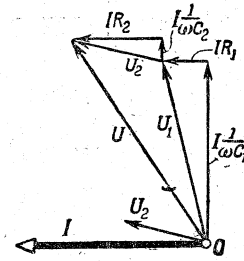
откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (7-26)$$

— выражение, аналогичное (7-17) для цепи с индуктивностью и также называется законом Ома. Аналогично $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ в цепи с индуктивностью $\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ в цепи с емкостью называется полным сопротивлением и обозначается той же буквой z . Таким образом, закон Ома для цепи с емкостью может быть записан в общей форме совершенно так же, как и для цепи с индуктивностью:

$$I = \frac{U}{z}. \quad (7-27)$$

Если все стороны треугольника напряжений OAB (рис. 7-26) разделить на I , то получится подобный OAB треугольник сопротивлений Oab (7-27), катеты которого изображают активное R и емкостное X_C , а гипотенуза — полное сопротивление z . Катет R и гипотенуза z образуют между собой угол φ . При одинаковых R и равных друг другу X_L и X_C треугольники сопротивлений для индуктивной и емкостной цепей симметричны, так как их катеты X_L и X_C равны по величине, но направлены в противоположные стороны (рис. 7-28).

Рис. 7-28. Сопоставление треугольников сопротивления цепей R, L и R, C Рис. 7-29. Векторная диаграмма последовательного соединения двух приемников, из которых каждый обладает R и C .

Из треугольника сопротивлений трудно найти следующие соотношения, определяющие угол φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{z} \quad \text{и} \quad \sin \varphi = \frac{X_C}{z}. \quad (7-28)$$

Так как в цепи с емкостью ток опережает напряжение, тогда как в цепи с индуктивностью он отстает от напряжения, то, следовательно, емкостное сопротивление в цепи переменного тока по своей рсли противоположно индуктивному.

Если цепь состоит из ряда последовательно соединенных активных и емкостных сопротивлений, то расчет тока производится совершенно так же, как при последовательном соединении ряда активных и индуктивных сопротивлений (§ 7-9). Векторная диаграмма (рис. 7-29) получается при этом симметричной диаграмме цепи с индуктивностями (рис. 7-21).

7-11. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений

Наиболее общий случай неразветвленной цепи переменного тока представляет собой цепь, состоящая из последовательно соединенных участков с активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C (рис. 7-30). Приложенное к такой цепи напряжение U составляется из трех слагающих: активного напряжения $U_a = IR$, совпадающего по фазе с током I , индуктивного напряжения $U_L = I\omega L$, опережающего тока на 90° , и емкостного напряжения $U_C = I \frac{1}{\omega C}$, отстающего от

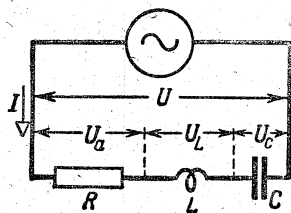


Рис. 7-30. Последовательное соединение R, L и C.

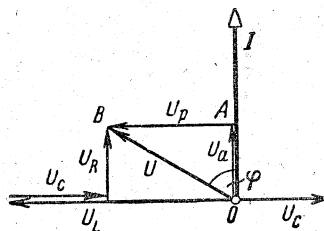


Рис. 7-32. Векторная диаграмма последовательного соединения R, L и C.

тока на 90° (рис. 7-31 и 7-32). Благодаря тому, что индуктивное и емкостное напряжения имеют противоположные фазы, их геометрическое сложение равносильно вычитанию соответствующих абсолютных величин. Если, например, индуктивное напряжение имеет большую абсолютную величину, чем емкостное, то результирующее реактивное напряжение

$$U_p = I\omega L - I \frac{1}{\omega C} = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

опережает ток на 90° .

Разность $\omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C$ называется результирующим реактивным сопротивлением и обозначается буквой X:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}. \quad (7-29)$$

Ранее упоминавшиеся емкостное и индуктивное сопротивления можно рассматривать как частные случаи реактивного сопротивления, получаемые из этого общего выражения при отсутствии в цепи индуктивного ($\omega L = 0$) или емкостного ($\frac{1}{\omega C} = 0$) сопротивлений. В последнем случае, т. е. при отсутствии в цепи конденсатора, следует

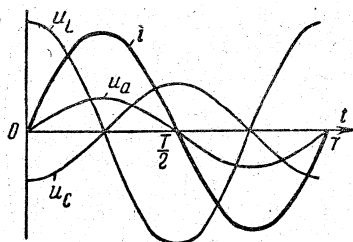


Рис. 7-31. Кривые мгновенных значений тока и частичных напряжений при последовательном соединении R, L и C.

считать, что $C = \infty$. Действительно, для того чтобы исключить конденсатор из цепи, нужно замкнуть накоротко его пластины, т. е. сблизить их до соприкосновения, а известно, что при уменьшении расстояния между пластинами емкость конденсатора возрастает.

При уменьшении емкости (например, при раздвигании пластин конденсатора) емкостное сопротивление возрастает и в пределе при $C = 0$ становится бесконечно большим, что и следовало ожидать, так как в разомкнутой цепи ток не протекает. Если индуктивное сопротивление меньше емкостного или вовсе отсутствует, реактивное сопротивление становится отрицательным. Таким образом, обобщенное выражение результирующего реактивного сопротивления позволяет определять по знаку, является ли оно в конечном счете индуктивным или емкостным, т. е. отстает по фазе ток в цепи от приложенного к ней напряжения или опережает напряжение.

Приложенное к цепи напряжение U представляется на векторной диаграмме (рис. 7-32) гипотенузой прямоугольного треугольника OAB и, следовательно,

$$U^2 = U_a^2 + U_p^2 = I^2 R^2 + I^2 X^2 = I^2 (R^2 + X^2),$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (7-30)$$

Если в цепи имеется несколько активных, индуктивных и емкостных сопротивлений, то они группируются

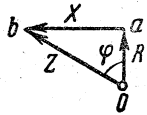


Рис. 7-33. Треугольник сопротивлений.

в соответствующие суммы и выражение закона Ома получает вид:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X_L - \Sigma X_C)^2}}. \quad (7-31)$$

Это — наиболее общее выражение закона Ома для неразветвленной цепи переменного тока. Выражение (7-30) получается более компактным, если снова ввести полное сопротивление цепи:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (7-32)$$

Тогда закон Ома принимает знакомую форму:

$$I = \frac{U}{z}.$$

Деля все стороны треугольника напряжений OAB на ток I , получим, как и раньше, треугольник сопротивлений Oab (рис. 7-33), из которого следуют известные уже для частных случаев соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{z}, \quad (7-33)$$

При отрицательном реактивном сопротивлении, т. е. при преобладании емкостного сопротивления над индуктивным, эти соотношения дают отрицательный угол φ . Так, например, для цепи, в которой можно пренебречь активным и индуктивным сопротивлениями по сравнению с емкостным,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{0 - X_C}{0} = -\infty$$

и

$$\varphi = -90^\circ.$$

[Формулы (7-28), относящиеся к частному случаю, дают лишь абсолютные величины $\operatorname{tg} \varphi$ и $\sin \varphi$].

Таким образом, положительный угол φ соответствует случаю, когда приложенное к цепи напряжение опережает ток (преобладает индуктивное сопротивление — индуктивный сдвиг фаз), а отрицательный — случаю, когда приложенное напряжение отстает от тока (преобладает емкостное сопротивление — емкостный сдвиг фаз).

Если мгновенное значение тока изменяется по закону

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то мгновенное значение напряжения

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где $U_m = I_m z$. Если же отсчитывать время t от момента, когда напряжение проходит через нуль, т. е. положить:

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то для мгновенного значения тока получим выражение

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

где $I_m = \frac{U_m}{z}$.

7-12. Явления резонанса в цепях переменного тока

Резонансом вообще называется совпадение частоты вынужденных колебаний, сообщаемых извне системе или телу, с частотой свободных колебаний — собственных колебаний этой системы или тела.

Цепь, содержащая индуктивность и емкость, представляет собой колебательный контур (если не слишком велики потери в этой цепи). Рассмотрим важнейший для истолкования явлений резонанса процесс — разряд конденсатора на индуктивность при отсутствии потерь в контуре.

Емкость C (рис. 7-34) заряжается от некоторого источника электроэнергии до напряжения U_n , при этом в ее электрическом поле запасается энергия $\frac{CU_n^2}{2}$. Затем посредством переключателя K емкость замыкается на индуктивность L . Емкость начинает разряжаться и в цепи возникает посте-

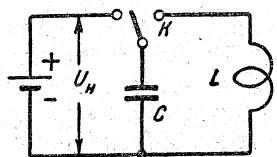


Рис. 7-34. Разряд конденсатора на индуктивность.

пенно увеличивающийся ток i . При этом возрастанию тока противодействует э. д. с. самоиндукции e , а по мере нарастания тока в магнитном поле индуктивности накапливается энергия $\frac{Li^2}{2}$. Когда емкость полностью разрядится — энергия ее электрического поля исчерпана, тогда ток в цепи не прекращается, так как э. д. с. самоиндукции противодействует уменьшению тока. Теперь за счет энергии магнитного поля ток поддерживается в том же направлении; он уже является током, заряжающим емкость в обратном направлении (рис. 7-35). Эта перезарядка продолжается до тех пор, пока емкость не зарядится до напряжения U_n (так как в системе нет потерь), но обкладка, имевшая в начале положительный заряд, теперь получит отрицательный заряд такой же величины. Вся энергия из магнитного поля индуктивности вернется в электрическое поле емкости (рис. 7-36), после чего начнется разряд емкости на индуктивность при обратном направлении тока и т. д. Так как в рассматриваемом идеальном контуре нет потерь, то колебательный процесс в нем затухать не будет. Определим теперь частоту этого процесса. В колебательном контуре согласно второму закону Кирхгофа

$$u_C + e = 0. \quad (7-34)$$

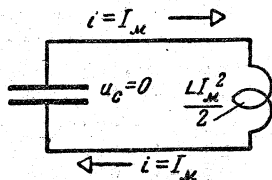


Рис. 7-35. Схема распределения энергии между электрическими и магнитными полями в первой части цикла колебания.

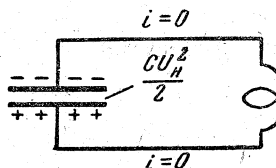


Рис. 7-36. Схема распределения энергии между электрическим и магнитными полями в конце второй части цикла колебания.

Разрядный ток емкости

$$i = -C \frac{du_C}{dt}.$$

Следовательно, э. д. с.

$$e = -L \frac{di}{dt} = LC \frac{d^2u_C}{dt^2};$$

подставив это выражение в (7-34), получаем дифференциальное уравнение колебательного контура без потерь

$$u_C + LC \frac{d^2u_C}{dt^2} = 0. \quad (7-35)$$

Ищем решение этого уравнения в известной общей форме

$$u_C = Ae^{\gamma t},$$

где e — основание натуральных логарифмов, а γ и A определяются путем подстановки. Составляем характеристическое уравнение

$$\frac{d^2u_C}{dt^2} = \gamma^2 Ae^{\gamma t},$$

$$Ae^{\gamma t} + LC\gamma^2 Ae^{\gamma t} = 0,$$

следовательно,

$$1 + LC\gamma^2 = 0,$$

на основании чего получаем два значения для γ :

$$\gamma_{1,2} = \pm j \frac{1}{\sqrt{LC}} = \pm j\omega_0;$$

здесь $j = \sqrt{-1}$, а $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Следовательно, интеграл уравнения представляет собой сумму

$$u_C = A_1 e^{j\omega_0 t} + A_2 e^{-j\omega_0 t}. \quad (7-36)$$

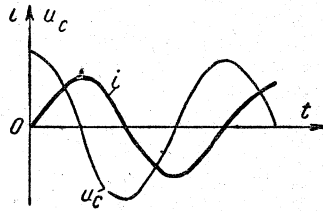


Рис. 7-37. Кривые мгновенных значений тока и напряжения конденсатора при колебательном незатухающем разряде.

Соответствующее выражение тока будет:

$$i = -C \frac{du_c}{dt} = -CA_1 j \omega_0 e^{j\omega_0 t} + CA_2 j \omega_0 e^{-j\omega_0 t} = Cj\omega_0 (A_2 e^{-j\omega_0 t} - A_1 e^{j\omega_0 t}). \quad (7-37)$$

Чтобы определить A_1 и A_2 , обращаемся к начальным условиям; при $t=0$, в момент начала разряда емкости $u_c = U_H$, а $i=0$, следовательно, согласно (7-36) и (7-37)

$$U_H = A_1 + A_2, \quad 0 = A_1 - A_2,$$

на основании чего

$$A_1 = A_2 = \frac{U_H}{2}.$$

Далее

$$e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t} = 2 \cos \omega_0 t;$$

$$e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t} = 2j \sin \omega_0 t,$$

что дает возможность выразить напряжение емкости и ток в контуре как синусоидальные функции времени

$$u_c = U_H \cos \omega_0 t = U_H \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right); \quad (7-38)$$

$$i = U_H \omega_0 C \sin \omega_0 t. \quad (7-39)$$

В контуре проходит синусоидальный переменный ток, и напряжение на емкости изменяется синусоидально, хотя источник переменного тока в контуре отсутствует (рис. 7-37). Угловая частота этих свободных гармонических колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ определяется индуктивностью и емкостью контура.

При соединении колебательного контура с источником переменного тока

явления резонанса возникают, когда ω — угловая частота источника — равна ω_0 — угловой частоте контура. Если источник соединен последовательно с элементами колебательного контура, то возможен резонанс напряжений, а если источник присоединяется параллельно этим элементам, то возможен резонанс токов.

7-13. Резонанс напряжений

Если угловая частота генератора ω равна $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то при одних и тех же значениях R , L и C и неизменном напряжении U ток I достигает своего наибольшего значения, ограничиваемого лишь активным сопротивлением цепи. Действительно, в этом случае $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ и реактивное сопротивление цепи (см. рис. 7-30)

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \quad (7-40)$$

а полное сопротивление

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = R,$$

т. е. имеет минимальное значение. Ток $I = \frac{U}{R}$, наоборот, достигает максимума, причем

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = 0,$$

т. е. ток совпадает по фазе с напряжением.

Этот случай носит название резонанса напряжений.

Вследствие равенства индуктивного и емкостного сопротивлений равны и соответствующие напряжения U_L и U_C , а так как фазы их противоположны, то они в любой момент времени компенсируют друг друга.

Равенство индуктивного и емкостного сопротивлений является характерным условием резонанса напряжений.

Если частота генератора равна собственной частоте цепи, то наступает явление резонанса, при котором амплитуда колебания, т. е. ток, становится максимальной. Наличие в цепи активного сопротивления не изменяет в этом случае незатухающего харак-

тера колебаний, так как потери энергии непрерывно пополняются генератором.

Соотношение (7-40) показывает, что добиться резонанса можно, как меняя частоту ω , так и меняя индуктивность L или емкость C цепи.

Резонанс напряжений может оказаться опасным для установки, в которой он имеет место, если индуктивное ωL и равное ему емкостное $1/\omega C$ сопротивления цепи значительно больше ее активного сопротивления R . В этом случае напряжения на емкости $U_C = \frac{U}{R} \frac{1}{\omega C}$ и на индуктивности $U_L = \frac{U}{R} \omega L$ получаются намного большими приложенного к концам цепи напряжения генератора, и изоляция конденсатора и катушки может быть пробита.

Такой случай может иметь место, например, если в отходящую от генератора кабельную линию включить последовательно катушку (какого-нибудь аппарата), индуктивность которой находится в резонансном соотношении с емкостью кабеля.

Однако во многих областях электротехники резонанс находит полезное применение. Так, вся радиотехника основана на явлении резонанса; например, настройка радиоприемника на какую-либо станцию заключается в том, чтобы добиться резонанса его колебательного контура с частотой электромагнитных волн, излучаемых этой станцией.

Если напряжение источника U и параметры цепи R , L и C остаются неизменными, а угловая частота ω изменяется, то изменяются и реактивные сопротивления, а следовательно, и величина тока в цепи I и напряжения U_L и U_C на зажимах катушки и конден-

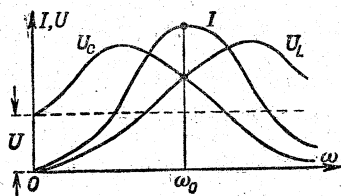


Рис. 7-38. Резонансные кривые при переменной частоте.

сатора. Кривые зависимости I , U_L и U_C от угловой частоты (или частоты) называются резонансными кривыми (рис. 7-38). Как уже было указано, кривая I имеет максимум при $\omega = \omega_0$, т. е. при резонансе. Кривая U_L имеет максимум при большей частоте, а кривая U_C — при меньшей. В этом можно убедиться, выразив U_L и U_C через постоянные параметры цепи R , L и C , а затем определив максимальные значения этих выражений.

7-14. Мгновенная и средняя мощности переменного тока

Мощность переменного тока, естественно, также является переменной величиной. Ее значение в произвольный момент времени, или так называемая мгновенная мощность

$$p = ui. \quad (7-41)$$

Если ток и напряжение синусоидальны, то их мгновенные значения могут быть представлены в виде:

$$i = I_m \sin \omega t$$

и

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

так что мгновенная мощность

$$p = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t. \quad (7-42)$$

Но

$$U_m = U\sqrt{2} \quad \text{и} \quad I_m = I\sqrt{2},$$

так что

$$U_m I_m = 2UI.$$

С другой стороны, по известной тригонометрической формуле

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) -$$

$$- \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

и, следовательно,

$$\sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = \frac{1}{2} \cos \varphi -$$

$$- \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi).$$

Подставляя выражения $U_m I_m$ и произведения синусов в формулу (7-42), получим:

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (7-43)$$

Таким образом, мгновенная мощность переменного тока может быть представлена в виде суммы постоянной величины $UI \cos \varphi$ и синусоидальной величины $-UI \cos(2\omega t + \varphi)$, изменяющейся с двойной (по сравнению с током и напряжением) частотой.

Средняя (за период) мощность P может быть определена по формуле

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt, \quad (7-44)$$

и так как среднее значение второго члена в (7-43) равно нулю, то

$$P = UI \cos \varphi. \quad (7-45)$$

Это — основная формула средней мощности переменного тока. Так как вывод ее не был связан с какими-либо особенностями рассматриваемой цепи, то она может быть применена к любой цепи синусоидального переменного тока или к любому участку такой цепи.

Средняя мощность называется также активной мощностью в отличие от реактивной и полной мощностей, о которых речь будет в следующем параграфе.

Найденное выражение средней мощности отличается от выражения мощности постоянного тока наличием множителя $\cos \varphi$, называемого коэффициентом мощности.

Чем меньше $\cos \varphi$, т. е. чем больше сдвиг фаз между напряжением и током, тем меньше средняя мощность при тех же значениях тока и напряжения или тем больше ток при заданных значениях напряжения и мощности.

Низкий $\cos \varphi$ имеет следствием неполное использование оборудования электрической установки и уменьшение ее к. п. д. Если, например, генератор теплоэлектрической станции, работающей при напряжении 6000 в, или 6 кВ, рассчитан на наибольший ток 200 а, то при $\cos \varphi = 0,9$ он может давать среднюю мощность

$$P = 6 \cdot 200 \cdot 0,9 = 1080 \text{ кВт},$$

на которую будут рассчитаны и вращающая этот генератор паровая турбина и соответствующие паровые котлы. Но если окажется, что приемник, получающий энергию от этого генератора, имеет в действительности $\cos \varphi = 0,45$, т. е. вдвое меньше, то вдвое уменьшится и средняя мощность, которую можно будет получить от генератора, а следовательно, генератор, турбина и котлы будут использованы лишь на половину своей мощности. Вместе с тем, так как тепловые потери в генераторе и соединительных проводах при неизменном токе также останутся неизменными, то в процентах от средней мощности они уже окажутся вдвое большими, т. е. к. п. д. генератора и соединительных проводов заметно снизится. Отсюда понятна важность поддержания $\cos \varphi$ установок на достаточно высоком уровне.

Чтобы стимулировать работу при высоком $\cos \varphi$, применяется дифференцированный тариф на электрическую энергию, при котором стоимость единицы энергии (1 кВт·ч) зависит от среднего $\cos \varphi$ (за месяц), уменьшаясь по мере его увеличения. Низкий $\cos \varphi$ чаще всего бывает обусловлен недогрузкой электродвигателей; поэтому правильный выбор мощности электродвигателей является основным средством для получения высокого $\cos \varphi$. На уже существующих установках недостаточный высокий $\cos \varphi$ может быть увеличен путем применения конденсаторов. Этот вопрос будет рассмотрен в § 7-19.

Довольно наглядную картину энергетических процессов в цепи переменного тока дает изучение кривых мгновенной мощности простейших цепей переменного тока.

Если цепь содержит только активное сопротивление (рис. 7-39), то при синусоидальном напряжении $u = U_m \sin \omega t$ на зажимах цепи, ток в ней совпадает по фазе с напряжением $i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$, а мгновенная мощность в цепи

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = \\ = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = UI - UI \cos 2\omega t;$$

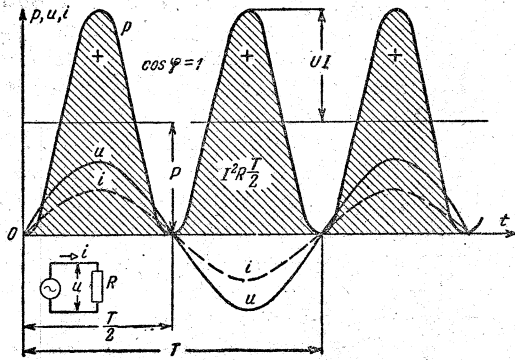


Рис. 7-39. Кривые мгновенных значений мощности, напряжения и тока для цепи, содержащей только R.

следовательно, мгновенная мощность представляет собой пульсирующую величину, колеблющуюся от 0 до $2UI$. Частота этих пульсаций в 2 раза больше частоты переменного тока. Независимо от направления тока в цепи мощность всегда положительна, энергия перемещается всегда в одном направлении от источника к приемнику, меняется только скорость ее перемещения. Площадь, ограниченная кривой $p=F(t)$ и осью абсцисс, в масштабе построения изображает интеграл от мощности по времени, следовательно, энергию, отдаваемую источником приемнику. За один период пульсации эта энергия будет:

$$W = \int_0^{\frac{T}{2}} uidt,$$

а так как в рассматриваемой цепи

$$u = iR,$$

то

$$W = \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 R dt = R \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt,$$

но согласно (7-9)

$$R \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt = I^2 R \frac{T}{2},$$

следовательно,

$$W = I^2 R \frac{T}{2},$$

т. е. вся энергия, передаваемая источником приемнику за время T , преобразуется в последнем в тепловую энергию.

Если же цепь переменного тока содержит только индуктивность (рис. 7-40), то при синусоидальном токе $i = I_M \sin \omega t$ напряжение на ее зажимах $u = U_M \cos \omega t$ (§ 7-7), а мгновенная мощность

$$\begin{aligned} p &= ui = U_M I_M \sin \omega t \cos \omega t = \\ &= \frac{U_M I_M}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t; \end{aligned}$$

следовательно, в такой цепи мгновенная мощность является переменной величиной, изменяющейся синусоидально с частотой, вдвое большей частоты переменного тока. Четверть периода мощность положительна, а следующую четверть периода она отрицательна. Мощность положительна, пока ток в цепи возрастает; в это время происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности; когда же ток убывает, мощность отрицательна — в это время магнитное поле распадается и энергия, в нем накопленная, возвращается источнику. В течение второй четверти периода энергия в цепи перемещается в обратном направлении от приемника к источнику, что и объясняет перемену знака мощности. В подтверждение этим общим соображениям определим путем интегрирования энергию, получаемую цепью в течение той четверти периода, когда мощность положительна:

$$W = \int_0^{\frac{T}{4}} ui dt,$$

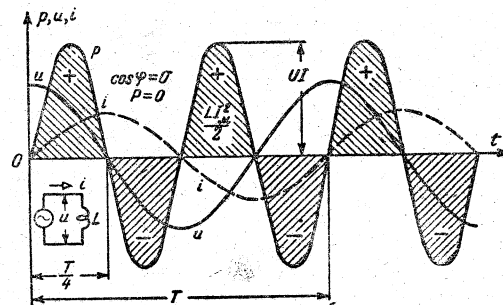


Рис. 7-40. Кривые мгновенных значений мощности, напряжения и тока для цепи, содержащей только L.

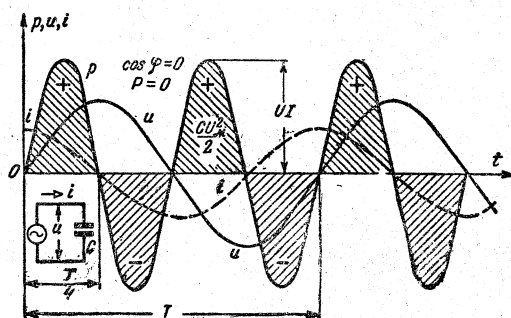


Рис. 7-41. Кривые мгновенных значений мощности, напряжения и тока для цепи, содержащей только C .

а так как в рассматриваемой цепи

$$u + e_L = 0 \quad \text{или} \quad u = -e = L \frac{di}{dt},$$

то

$$W = L \int_0^{I_M} i \, di = \frac{LI_M^2}{2};$$

здесь пределы интегрирования определяются тем, что при $t=0$ ток $i=0$, а при $t = \frac{T}{4}$ ток $i = I_M$.

Следовательно, вся энергия W , отдаваемая источником приемнику за время $\frac{T}{4}$, накапливается в магнитном поле последнего.

В течение следующей четверти периода эта энергия возвращается назад источнику; за период T средняя мощность

$$P = 0.$$

В цепи происходят колебания энергии между источником и приемником, загружающие провода реактивным током (§ 7-16).

Рассмотрим теперь условия в цепи, содержащей только емкость (рис. 7-41). Здесь при синусоидальном напряжении $u = U_M \sin \omega t$ ток, опережая напряжение на четверть периода, изменяется по косинусоиде (§ 7-10), т. е.

$$i = I_M \cos \omega t.$$

Выражение мгновенной мощности для этой цепи будет таким же, как для цепи, содержащей только индуктивность:

$$p = ui = UI \sin 2\omega t.$$

Эта мощность будет также синусоидальной величиной, колеблющейся с частотой, в 2 раза большей частоты переменного тока. Но в отличие от цепи с L здесь мощность положительна, пока возрастает напряжение на емкости. В это время емкость заряжается; происходит накопление энергии в ее электрическом поле. Когда же напряжение понижается, тогда емкость разряжается на источник, энергия из электрического поля перемещается в обратном направлении назад к источнику, соответственно в это время мгновенная мощность отрицательна. Проинтегрируем эту мощность за четверть периода, когда она положительна:

$$W = \int_0^{\frac{T}{4}} ui \, dt, \quad \text{но} \quad i = C \frac{du}{dt},$$

следовательно,

$$W = \int_0^{\frac{T}{4}} ui \, dt = C \int_0^{U_M} u \, du = \frac{CU_M^2}{2},$$

т. е. вся энергия, отдаваемая источником за эту четверть периода, накапливается в его электрическом поле.

Ознакомление с энергетическим процессом в простейших цепях дает возможность более наглядно представить себе энергетические явления в случае наиболее распространенного вида приемника, обладающего активным сопротивлением и индуктивностью (он эквивалентен двигателю переменного тока). В этом случае кривая

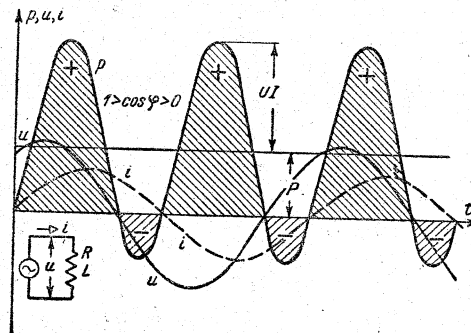


Рис. 7-42. Кривые мгновенных значений мощности, напряжения и тока для цепи, содержащей R и L .

мгновенной мощности большую часть периода положительна и меньшую — отрицательна (рис. 7-42). Можно считать, что в цепи одновременно протекают два энергетических процесса, описанные выше для простейших цепей: процесс безвозвратной передачи энергии, поглощаемой в активном сопротивлении, и процесс колебаний энергии между источником и магнитным полем индуктивности.

Чем меньше $\cos \varphi$, тем больше относительно роль бесполезных колебаний энергии в цепи, — часть энергии, полученная в течение одной четверти периода, в течение следующей четверти периода возвращается назад источнику энергии.

7-15. Реактивная и полная мощности

Предельная мощность, которую можно длительно получать от генератора, зависит от наибольшего напряжения, которое он может дать в силу своей конструкции, от наибольшего тока, на который рассчитано сечение проводов его обмотки, и, наконец, от $\cos \varphi$ приемника, который при изготовлении генератора на заводе лишь в редких случаях может быть известен. В силу этого в паспорте генератора приходится, кроме величины его мощности (средней), указывать тот расчетный $\cos \varphi$, при котором генератор может давать эту мощность. Этого можно избежать, если характеризовать генератор (или трансформатор) величиной его полной (кажущейся) мощности

$$S = UI, \quad (7-46)$$

представляющей собой наибольшее значение активной мощности при заданных действующих значениях напряжения и тока. Хотя единицей полной мощности является тот же ватт (или киловатт), который служит для измерения любой мощности, однако в применении к полной мощности ей дается измененное название вольт-ампер (или киловольт-ампер). Благодаря этому можно вместо полной мощности говорить просто мощность генератора,

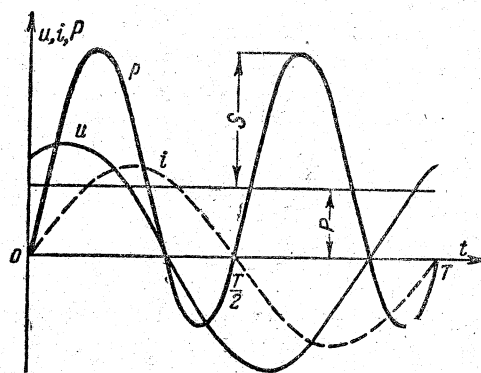


Рис. 7-43. Кривые мгновенной мощности и полная мощность S .

не рискуя быть неправильно понятым. Так в выражении «генератор мощностью 20 000 *кв*а» имеется в виду полная мощность этого генератора.

Полная мощность связана с активной мощностью очевидным соотношением

$$P = S \cos \varphi, \quad (7-47)$$

позволяющим найти активную мощность генератора в определенных условиях нагрузки или подобрать необходимую полную мощность генератора, способного принять заданную нагрузку.

Пользуясь величинами P и S , можно представить выражение (7-43) мгновенной мощности в более компактной форме:

$$p = P - S \cos(2\omega t + \varphi)$$

или

$$p = P + p',$$

где

$$p' = -S \cos(2\omega t + \varphi)$$

представляет собой переменную составляющую мгновенной мощности. Последнее выражение показывает, между прочим, что полная мощность является амплитудой этой переменной составляющей. На рис. 7-43 представлены кривые напряжения, тока и мгновенной мощности для случая, когда ток отстает по фазе от напряжения на 60° , т. е. когда $\cos \varphi = 0,5$. В те моменты, когда мгновенные значения тока и напряжения имеют разные знаки, мгновенная мощность

оказывается отрицательной, т. е. энергия передается не от генератора приемнику, а наоборот, от приемника генератору. В магнитном и электрическом полях приемника, обладающего индуктивностью L и емкостью C , содержится запас энергии

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_C^2}{2},$$

который возрастает за счет отдаваемой генератором энергии, когда i и u_C возрастают по абсолютной величине, и уменьшается, когда они убывают. Возвращаемая магнитным и электрическим полями энергия вместе с энергией, поступающей от генератора, превращается в тепло в сопротивлении приемника. Но когда скорость отдачи энергии электрическим и магнитным полями превышает величину i^2R , избыток энергии возвращается генератору, на короткое время ускоряя его ход. Вот в эти-то промежутки времени мощность генератора и оказывается отрицательной.

На рис. 7-43 проведена также горизонтальная прямая, изображающая постоянную составляющую P мгновенной мощности; по отношению к ней ординаты кривой p изображают переменную составляющую p' мгновенной мощности, амплитуда которой S также указана на рис. 7-43.

Если в цепи находится два или более последовательно соединенных приемника с разными $\cos \varphi$, т. е. с разными отношениями активной мощности к полной, то полная мощность всей цепи (или равная ей необходимая полная мощность генератора) не может быть получена простым сложением полных мощностей отдельных приемников. Действительно, полная мощность всей цепи

$$S = UI, \quad (7-48)$$

где I — ток в любом из приемников, а U — общее напряжение цепи, которое является, как уже известно, векторной, а не арифметической суммой напряжения отдельных приемников. Его абсолютная величина может быть определена через суммарные активное

и реактивное напряжения по формуле

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad (7-49)$$

где

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \sum_{k=1}^n U_k \cos \varphi_k; \\ U_p &= \sum_{k=1}^n U_k \sin \varphi_k. \end{aligned} \right\} \quad (7-50)$$

Подставляя выражение (7-49) в формулу (7-48) и внося I под знак радикала, получим:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{(U_a I)^2 + (U_p I)^2} = \\ &= \sqrt{(UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2}. \end{aligned} \quad (7-51)$$

Но выражение в первых скобках

$$UI \cos \varphi = P \quad (7-52)$$

представляет собой не что иное, как активную мощность всей цепи. При помощи первой из формул (7-50) ему можно придать вид:

$$P = \sum_{k=1}^n U_k I \cos \varphi_k = \sum_{k=1}^n P_k, \quad (7-53)$$

где каждый член суммы представляет собой активную мощность отдельного приемника. Соотношение (7-53) вытекает также из закона сохранения энергии.

Аналогично построенное выражение во вторых скобках формулы (7-51) обозначается буквой Q и называется реактивной мощностью всей цепи:

$$UI \sin \varphi = Q. \quad (7-54)$$

При помощи второй из формул (7-50) ему можно придать вид:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k I \sin \varphi_k = \sum_{k=1}^n Q_k, \quad (7-55)$$

где каждый член суммы составлен аналогично реактивной мощности всей цепи и представляет собой реактивную мощность отдельного приемника. Таким образом, реактивная мощность всей цепи равна сумме реактивных мощностей отдельных приемников. Так как $\sin \varphi_k$ положителен, если напряжение U_k опережает ток I , и отрицате-

лен в обратном случае, то и реактивная мощность каждого отдельного приемника положительна при $\varphi_k > 0$ и отрицательна при $\varphi_k < 0$. Общая реактивная мощность является, следовательно, алгебраической суммой реактивных мощностей отдельных приемников.

Единицей реактивной мощности является опять-таки ватт (или киловатт), но, как и в случае полной мощности, он имеет специальное наименование: вольт-ампер (или киловольт-ампер) реактивный и обозначение *вар* (или *квар*).

Подставляя выражения (7-52) и (7-54) в формулу (7-51), получим:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (7-56)$$

Таким образом, для вычисления полной мощности всей цепи нужно сначала найти по формулам (7-53) и (7-54) суммарные активную и реактивную мощности, а потом по формуле (7-56) определить общую полную мощность.

Деля (7-54) на (7-52), получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (7-57)$$

а деля (7-54) и (7-52) на (7-48), найдем:

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad (7-58)$$

и

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (7-59)$$

Соотношения (7-56) — (7-59) показывают, что P , Q и S (всей цепи или каждого отдельного приемника) можно рассматривать как стороны прямоугольного треугольника (рис. 7-44) с углом φ между гипотенузой S и катетом P . Этот треугольник называется треугольником мощностей.

Для определения среднего за какой-нибудь промежуток времени (например, за месяц) $\cos \varphi$ в формулу (7-59) нужно подставить средние значения активной и полной мощностей. Используя также формулу (7-56), получим для среднего $\cos \varphi$ выражение

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{ср}}}{\sqrt{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}}. \quad (7-60)$$

Среднее значение активной мощности $P_{\text{ср}}$ определяется путем деления количества затраченной (или произведенной) энергии на соответствующий промежуток времени T , т. е.

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{W}{T},$$

где W может быть измерено при помощи счетчика электрической

энергии (см. ниже). Аналогично определяется среднее значение реактивной мощности

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T Q dt = \frac{W_p}{T}.$$

Входящая в это выражение величина

$$W_p = \int_0^T Q dt$$

условно (по аналогии с W) называется реактивной энергией и также может быть измерена при помощи особым образом включенного счетчика, называемого в этом случае реактивным счетчиком.

7-16. Активная, реактивная и полная проводимости

Когда ток и напряжение в каком-нибудь участке цепи не совпадали между собой по фазе, напряжение рассматривалось выше как состоящее из двух слагающих: активной и реактивной. При исследовании разветвленных цепей часто оказывается более удобным разложить вектор тока на две составляющие: активную I_a , совпадающую по фазе с напряжением, и реактивную I_p , опережающую напряжение или отстающую от напряжения на угол 90° . Из векторной диаграммы (рис. 7-45), изображенной для случая преобладания индуктивного сопротивления над емкостным, т. е. для случая $\varphi > 0$, непосредственно следует:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi; \quad (7-61)$$



Рис. 7-44.
Треугольник мощностей.

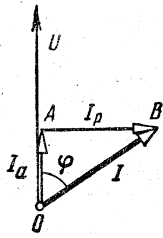


Рис. 7-45. Активная и реактивная составляющие тока.

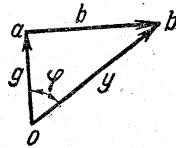


Рис. 7-46. Треугольник проводимостей.

а также

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}. \quad (7-62)$$

Величина $y = \frac{1}{z}$, обратная полному сопротивлению, называется полной проводимостью. Так как по закону Ома

$$I = \frac{U}{z} = Uy,$$

то формулы (7-61) можно представить в виде:

$$I_a = Uy \cos \varphi; \quad I_p = Uy \sin \varphi,$$

а если обозначить:

$$\left. \begin{aligned} g &= y \cos \varphi \text{ — активная проводимость;} \\ b &= y \sin \varphi \text{ — реактивная проводимость,} \end{aligned} \right\} \quad (7-63)$$

то они примут более простой вид:

$$I_a = Ug; \quad I_p = Ub. \quad (7-64)$$

Деля на U все стороны треугольника OAB (рис. 7-45), получим треугольник проводимостей Oab (рис. 7-46), катетами которого являются активная g и реактивная b , а гипотенузой — полная y проводимости.

Из треугольника (рис. 7-46) следует:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (7-65)$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}. \quad (7-66)$$

Последние два соотношения позволяют определить y и φ , если известны g и b , тогда как соотношения (7-63) служат для решения обратной задачи.

Нетрудно установить простые соотношения между активной и реактивной проводимостями участка цепи, с одной стороны, и его сопротивлениями — с другой. Подставляя

$$y = \frac{1}{z}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{z}$$

в выражения (7-63), получаем:

$$g = \frac{R}{z^2}; \quad b = \frac{X}{z^2}. \quad (7-67)$$

Соответственно активное и реактивное сопротивления могут быть выражены через проводимости участка цепи

$$R = \frac{g}{y^2}; \quad X = \frac{b}{y^2}.$$

В частном случае, когда $X = 0$, формулы (7-67) упрощаются. Так как при этом $z = R$, то

$$g = \frac{1}{R}; \quad b = 0.$$

В другом частном случае, когда $R = 0$ и, следовательно, $z = X$, получаем:

$$g = 0; \quad b = \frac{1}{X}.$$

7-17. Параллельное соединение приемников

Если два или большее количество приемников соединены параллельно (рис. 7-47), то они находятся под одним и тем же напряжением U . При разных значениях полных сопротивлений z_1, z_2 и т. д. токи I_1, I_2 и т. д. также будут, вообще говоря, различны как по величине, так и по фазе, и общий ток всей этой группы приемников I определяется по первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

как геометрическая сумма токов отдельных приемников.

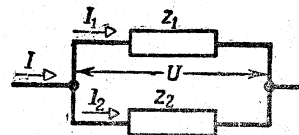


Рис. 7-47. Параллельное соединение приемников.

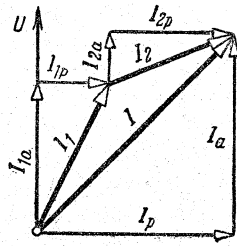


Рис. 7-48. Векторная диаграмма к рис. 7-47.

Для случая двух приемников сложение токов изображено на векторной диаграмме (рис. 7-48), где оба тока I_1 и I_2 представлены разложенными на свои активные и реактивные составляющие. Из этой диаграммы видно, что активная составляющая общего тока I равна арифметической сумме активных составляющих токов I_1 и I_2 , а реактивная составляющая общего тока I равна алгебраической сумме реактивных составляющих этих токов:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} + \dots;$$

$$I_p = I_{1p} + I_{2p} + \dots$$

В последнем равенстве реактивный ток считается положительным, когда реактивная проводимость ветви $b > 0$, т. е. согласно (7-63) $\varphi > 0$ и ток в ветви отстает по фазе от напряжения.

Заменяя в этих выражениях все токи произведениями напряжения U на соответствующие активные или реактивные проводимости, получим:

$$Ug = U(g_1 + g_2 + \dots)$$

и

$$Ub = U(b_1 + b_2 + \dots),$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} g &= g_1 + g_2 + \dots = \Sigma g_k \\ b &= b_1 + b_2 + \dots = \Sigma b_k, \end{aligned} \right\} (7-68)$$

т. е. эквивалентная активная проводимость группы параллельно включенных приемников равна сумме их активных проводимостей, а эквивалентная реактивная проводимость — сумме реактивных проводимостей (с учетом их знаков).

Согласно формуле (7-65)

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + b^2};$$

подставляя сюда g и b из (7-68), получим:

$$I = U \sqrt{(\Sigma g_k)^2 + (\Sigma b_k)^2}. \quad (7-69)$$

Если n параллельно включенных приемников обладают одинаковыми активными проводимостями g_n и одинаковыми реактивными проводимостями b_n , а следовательно, и одинаковыми сопротивлениями R_n и X_n , то эквивалентные активная и реактивная проводимости определяются соотношениями

$$g = ng_n \quad \text{и} \quad b = nb_n,$$

а соответствующие эквивалентные сопротивления

$$R = \frac{R_n}{n} \quad \text{и} \quad X = \frac{X_n}{n}. \quad (7-70)$$

7-18. Резонанс токов

При параллельном по отношению к источнику переменного тока соединении элементов колебательного контура (индуктивности и емкости) может иметь место резонанс токов, для которого характерна возможность возникновения токов в ветвях (индуктивной и емкостной), значительно превышающих ток, получаемый от источника.

В индуктивной катушке активным сопротивлением и индуктивностью обладает каждый виток; мы пользовались эквивалентной схемой катушки, в которой активное сопротивление и индуктивность были разделены и соединены между собой последовательно. Однако такая же катушка может быть замещена схемой, в которой индуктивность помещена в одной ветви, а активное сопротивление — в другой.

На рис. 7-49 параллельно соединены три ветви — в одной из них содержится только индуктивность, во второй только емкость, а в третьей имеется только активная проводимость —

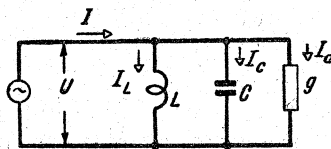


Рис. 7-49. Цепь, в которой возможен резонанс токов.

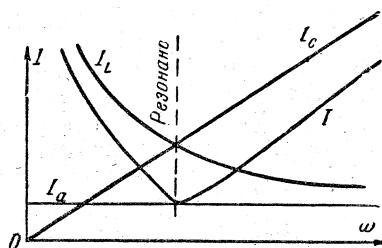


Рис. 7-50. Резонансные кривые для цепи рис. 7-49.

она может изображать потери в катушке и емкости ($U^2g = \Sigma P_{\text{потерь}}$). Закон Ома для такого параллельного соединения выражается формулой

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2}.$$

Общее условие резонанса токов — это равенство емкостной и индуктивной реактивных проводимостей

$$b_C = b_L. \quad (7-71)$$

Для схемы рис. 7-49 реактивные проводимости ветвей — величины, обратные соответствующим реактивным сопротивлениям; следовательно, на основании (7-71)

$$\omega C = \frac{1}{\omega L}$$

и угловая частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0,$$

т. е. условие (7-71) для схемы рис. 7-49 тождественно с условием совпадения частот вынужденной и свободной, — общим условием резонанса.

Добиться резонанса токов можно, меняя ω или ω_0 , последнее же путем изменения индуктивности L или емкости C . На рис. 7-50 показаны кривые зависимости токов схемы рис. 7-49 от частоты ω . При резонансе общий ток I достигает минимального значения $I = Ug$ и совпадает по фазе с напряжением.

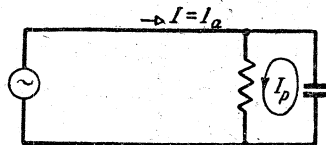


Рис. 7-51. Разгрузка линии и источника от реактивного тока посредством конденсатора.

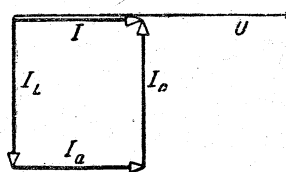


Рис. 7-52. Векторная диаграмма для резонанса токов.

В этих условиях источник переменного тока и провода, соединяющие его с колебательным контуром, совершенно разгружены от реактивного тока. Реактивные токи равны по величине, на основании (7-71)

$$Ub_C = I_C = Ub_L = I_L. \quad (7-72)$$

Они противоположны по фазе и по существу составляют один реактивный ток, замыкающийся в кольце, образуемом индуктивностью и емкостью (рис. 7-51).

Кривые мгновенной мощности индуктивной и емкостной ветвей также противоположны по фазе. Следовательно, когда энергия накапливается в магнитном поле индуктивности, она убывает в электрическом поле емкости. В системе энергия колеблется между индуктивностью и емкостью, а источник от этих колебаний разгружен и он только дает энергию, нужную для покрытия потерь в активной ветви.

На рис. 7-52 построена векторная диаграмма для условий резонанса токов.

Если в цепи, где осуществлено условие резонанса токов, одновременно увеличить в m раз обе реактивные проводимости, т. е. включить $b'_C = mb_C$ и $b'_L = mb_L$, то согласно (7-72) в m раз возрастут оба реактивных тока I_C и I_L , оставаясь разными по величине. Так как условие резонанса не нарушено и реактивная проводимость разветвления $b = b_C - b_L = 0$, то возрастание реактивных токов не изменит общий ток, который по-прежнему будет $I = Ug$.

Следовательно, в принципе, включая соответствующие приемники, можно неограниченно увеличивать токи в ветвях, не изменяя этим ток источника. В действительности, не существует приемников реактивного тока

без потерь (в особенности приемников индуктивного тока), поэтому с увеличением реактивных проводимостей неизбежно в какой-то мере увеличивается и активная проводимость, а пропорционально ей растет общий ток, поддерживаемый источником энергии.

Заметим, что при $b_C = b_L$ полная проводимость схемы рис. 7-49 равна активной проводимости $y = g$, а сопротивление z разветвления максимально и если потери в ветвях фактической схемы ничтожны $g \approx 0$, то при резонансе токов $z \approx \infty$, т. е. идеальный резонанс токов эквивалентен разрыву цепи. Это свойство схемы используется в так называемых фильтрах-пробках (§ 10-10).

Часто потери в индуктивности и емкости изображаются активными сопротивлениями, соединенными последовательно с индуктивностью и емкостью (рис. 7-53); соответствующая диаграмма построена на рис. 7-53, б. Условие резонанса токов (7-71) остается справедливым и для этого случая, но эти проводимости выражаются иначе через параметры контура. Для схемы рис. 7-53 проводимости первой ветви будут:

$$g_1 = \frac{R_1}{z_1^2} = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2};$$

$$b_1 = \frac{X_L}{z_1^2} = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2},$$

а проводимости второй ветви

$$g_2 = \frac{R_2}{z_2^2} = \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2};$$

$$b_2 = \frac{X_C}{z_2^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}.$$

На основании равенства реактивных проводимостей

$$\frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}. \quad (7-73)$$

Если активные сопротивления R_1 и R_2 равны между собой, то условие (7-73) оказывается выполненным, если $X_L = X_C$ или

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0,$$

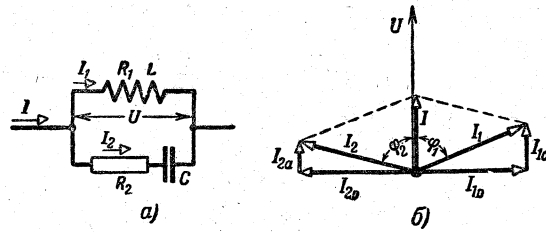


Рис. 7-53. Последовательное соединение активных и реактивных сопротивлений в цепи, где возможен резонанс токов. а — схема; б — векторная диаграмма.

т. е. в этом случае условие резонанса токов совпадает с общим условием резонанса напряжений.

7-19. Компенсация сдвига фаз

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) приемника с преобладающим индуктивным сопротивлением может быть повышен включением конденсатора параллельно с приемником (рис. 7-54). Это иллюстрирует векторная диаграмма (рис. 7-55), где I_1 обозначает ток приемника; I_2 — ток конденсатора, а I — результирующий ток установки. Результирующий сдвиг фаз φ , как видно из диаграммы, меньше сдвига фаз φ_1 приемника, а следовательно,

$$\cos \varphi > \cos \varphi_1.$$

Нетрудно определить емкость, необходимую для уменьшения сдвига фаз от заданного значения φ_1 до нового значения φ . Как видно из векторной диаграммы (рис. 7-55), емкостный ток $I_2 = U\omega C$ по величине равен уменьшению реактивной слагающей тока приемника I_1 , которое при неизменной активной мощности, т. е. при неизменном активном токе

$$I_a = \frac{P}{U},$$

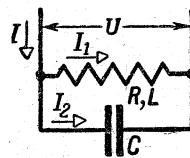


Рис. 7-54. Параллельное подключение конденсатора к индуктивному приемнику.

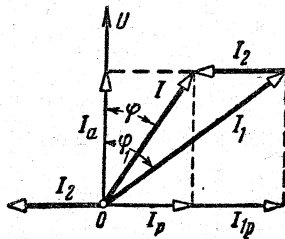


Рис. 7-55. Векторная диаграмма для цепи с частичной компенсацией сдвига фаз.

равно:

$$\begin{aligned} I_{1p} - I_p &= I_a \operatorname{tg} \varphi_1 - I_a \operatorname{tg} \varphi = \\ &= \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$I_2 = U \omega C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi),$$

откуда искомая емкость

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Реактивная мощность всей установки $Q = UI \sin \varphi$, потребляемая из сети, складывается из реактивных мощностей, потребляемых приемником и конденсатором, т. е.

$$Q = UI \sin \varphi = Q_L + Q_C, \quad (7-74)$$

где

$$Q_L = UI_1 \sin \varphi_1; \quad (7-75)$$

$$\begin{aligned} Q_C &= UI_2 \sin \varphi_2 = UI_2 \sin (-90^\circ) = \\ &= -UI_2 \end{aligned} \quad (7-76)$$

(в ветви, содержащей только емкостное сопротивление, как было показано выше, ток опережает по фазе напряжение на четверть периода, т. е. $\varphi_2 = -90^\circ$).

Из соотношений (7-74) — (7-76) получаем:

$$UI \sin \varphi = UI_1 \sin \varphi_1 - UI_2,$$

т. е. потребляемая из сети реактивная мощность представляет собой разность абсолютных величин реактивных мощностей приемника и конденсатора.

Условно принято считать емкостную реактивную мощность генерируемой (чему соответствует знак минус), а индуктивную — потребляемой; следовательно, конденсатор является ге-

нератором реактивной мощности, а реактивная катушка потребителем этой мощности.

7-20. Символический метод

Расчет токов в разветвленной цепи переменного тока с несколькими генераторами, как и в разветвленной цепи постоянного тока, основан на применении первого и второго законов Кирхгофа, которые в полной мере остаются в силе для мгновенных значений переменных токов и переменных э. д. с. В приложении к действующим значениям переменных токов и э. д. с. эти законы также справедливы, но суммирование токов, напряжений и э. д. с. должно уже производиться не алгебраически, а геометрически, т. е. при помощи соответствующих векторных диаграмм.

Векторные диаграммы можно, однако, построить только в том случае, если токи в отдельных частях цепи уже известны, а не тогда, когда их только еще требуется определить. В последнем случае необходимо иметь какой-либо способ найти неизвестные токи по величине и фазе аналитически путем решения системы уравнений, выражающих первый и второй законы Кирхгофа в применении к данной цепи, т. е. способ изображать геометрические операции в аналитической форме.

Такой способ дает теория комплексных чисел. Комплексное число или, короче, комплекс $a + jb$ может быть представлен графически в виде вектора, проекция которого на оси прямоугольной системы координат равна соответственно a и b . При этом положительное направление оси мнимых значений, проекция на которую равна b (рис. 7-56), на 90° опережает положительное направ-

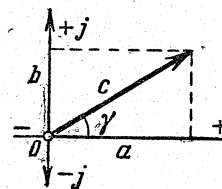


Рис. 7-56. Графическое изображение комплексной величины.

ление оси действительных значений, проекция на которую равна a . Модуль комплекса

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (7-77)$$

представляет собой длину выражаемого комплексом вектора, а аргумент

$$\gamma = \arctg \frac{b}{a} \quad (7-78)$$

является углом между вектором и осью действительных значений и определяет его направление. Так как

$$a = c \cos \gamma \text{ и } b = c \sin \gamma, \quad (7-79)$$

то

$$a + jb = c(\cos \gamma + j \sin \gamma)$$

или согласно формуле Эйлера

$$a + jb = ce^{j\gamma}, \quad (7-80)$$

т. е. комплекс может быть представлен в так называемой показательной форме, непосредственно дающей величину и направление вектора. Само собой разумеется, что направление вектора зависит не только от абсолютной величины, но и от знака его проекций a и b . При этом, так как одновременное изменение знака обеих проекций поворачивает вектор на 180° , но не изменяет знака $\arctg \frac{b}{a}$, необходимо при определении

γ по формуле (7-78), дающей два возможных направления вектора, определять его действительное направление по знакам проекций a и b .

Умножение комплекса на $e^{j\alpha}$, где α — произвольное положительное или отрицательное число, соответствует повороту вектора на угол α (в радианах) вперед (при $\alpha > 0$) или назад (при $\alpha < 0$). Действительно,

$$ce^{j\gamma} e^{j\alpha} = ce^{j(\gamma+\alpha)},$$

следовательно, от умножения вектора $ce^{j\gamma}$ на комплекс $e^{j\alpha}$ получается вектор той же величины, но образующий с положительным направлением действительной оси угол $\gamma + \alpha$, т. е. опережающий вектор $ce^{j\gamma}$ на угол α .

В частном случае, когда $\alpha = \pm \frac{\pi}{2} = \pm 90^\circ$,

$$e^{\pm j90^\circ} = \cos 90^\circ \pm j \sin 90^\circ = 0 \pm j1 = \pm j,$$

следовательно, умножение комплекса на $\pm j$ соответствует повороту вектора на $\pm 90^\circ$.

Комплексы, представляющие векторы тока, напряжения и э. д. с., обозначаются, соответствующими буквами с точками над ними.

Основанный на представлении векторов комплексами метод расчета цепей переменного тока называется комплексным или символическим.

Вместо довольно громоздкой записи $Ae^{j\varphi}$ часто пользуются сокращенной записью $A \angle \varphi$, так что выражение $\dot{U} = 120 \angle -30^\circ$ равносильно выражению $\dot{U} = 120 e^{-j30^\circ}$.

7-21. Закон Ома в символической форме

Закон Ома для цепи переменного тока был выше представлен в форме простого соотношения

$$U = Iz, \quad (7-81)$$

связывающего действующие значения тока и напряжения с полным сопротивлением цепи

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (7-82)$$

Вместе с тем было отмечено, что угол сдвига фаз φ между напряжением и током определяется при помощи любого из трех соотношений:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{X}{R}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{z}, \\ \cos \varphi &= \frac{R}{z}. \end{aligned} \quad (7-83)$$

Символический метод позволяет объединить соотношения (7-81) и (7-83).

Действительно, для того чтобы получить вектор \dot{U} , надо повернуть вектор Iz , совпадающий по направлению с вектором I , на угол φ вперед при $\varphi > 0$ (преобладает индуктивное сопротивление) или назад при $\varphi < 0$ (преобладает емкостное сопротивление), для чего достаточно умножить его на $e^{j\varphi}$, поэтому

$$\dot{U} = Ize^{j\varphi}. \quad (7-84)$$

Комплексное число

$$Z = ze^{j\varphi}, \quad (7-85)$$

модуль которого равен полному сопротивлению цепи, а аргумент — сдвигу фаз между напряжением и током, называется комплексным сопротивлением цепи. Из соотношений (7-84) и (7-85) получаем символическое выражение закона Ома:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (7-86)$$

Если преобразовать выражение (7-85) по формуле Эйлера

$$Z = z \cos \varphi + jz \sin \varphi,$$

то, пользуясь двумя последними из соотношений (7-83), нетрудно представить комплексное сопротивление в иной форме:

$$Z = R + jX; \quad (7-87)$$

таким образом, действительная часть комплексного сопротивления представляет собой активное сопротивление цепи, а мнимая часть — ее реактивное сопротивление.

Все вышесказанное может быть отнесено не только к любой неразветвленной цепи переменного тока, но и к ее любому участку.

Например, для последовательного контура, содержащего активное сопротивление, индуктивность и емкость, $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ и, следовательно, $Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$, для ветви с емкостью $Z = -j\frac{1}{\omega C}$ и т. д.

Величина Y , обратная комплексному сопротивлению Z , называется комплексной проводимостью. Таким образом,

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{ze^{j\varphi}} = \frac{1}{z} e^{-j\varphi} \quad (7-88)$$

или, так как

$$\frac{1}{z} = y,$$

то

$$Y = ye^{-j\varphi} = y \cos \varphi - jy \sin \varphi$$

или согласно (7-63)

$$Y = g - jb. \quad (7-89)$$

Пользуясь комплексным выражением проводимости, можно дать закону Ома новую форму

$$I = \dot{U}Y. \quad (7-90)$$

7-22. Законы Кирхгофа в символической форме

Как уже было указано, законы Кирхгофа в применении к действующим значениям переменного тока сохраняют свою силу, но при геометрическом суммировании векторов, изображающих токи, напряжения и э. д. с. Нетрудно видеть, что геометрическому сложению векторов соответствует алгебраическое сложение представляющих их комплексов. В самом деле, при геометрическом сложении векторов (например, сил в механике) складываются алгебраически их проекции на оси ординат. При сложении комплексов складываются порознь их действительная и мнимая части, давая действительную и мнимую части суммарного комплекса. Так как действительная и мнимая части комплекса выражают проекции соответствующего вектора на оси координат, то правила алгебраического сложения комплексов и геометрического сложения представляемых им векторов практически совпадают.

В силу этого первый закон Кирхгофа для любого узла может быть записан в форме

$$\Sigma \dot{I} = 0, \quad (7-91)$$

если условиться, что комплексные выражения токов входят в эту формулу со знаками плюс или минус в зависимости от выбранных положительных направлений этих токов по тому же правилу, что и при расчете цепи постоянного тока. Так, например, для узла A (рис. 7-57) первый закон Кирхгофа дает:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0$$

или

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_4 + \dot{I}_5.$$

Второй закон Кирхгофа для произвольного замкнутого контура, входящего в состав разветвленной цепи и содержащего источники энергии с э. д. с. E_1, E_2, \dots и комплексные сопро-

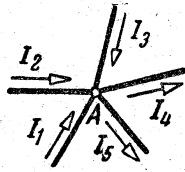


Рис. 7-57. Узел цепи переменного тока.

тивления ветвей Z_1, Z_2, \dots , принимает в символической форме вид:

$$\Sigma E = \Sigma IZ, \quad (7-92)$$

если условиться, что комплексные выражения э. д. с. и токов входят в эту формулу со знаками плюс или минус в зависимости от того, совпадают или противоположны их положительные направления с произвольно принятым направлением обхода контура. Так, например, для контура $ABCDFA$ (рис. 7-58) второй закон Кирхгофа выражается уравнением

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{E}_3 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_4 Z_4 + \dot{I}_2 Z_2 - \dot{I}_3 Z_3 - \dot{I}_5 Z_5,$$

где

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1; \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = j\omega L_3;$$

$$Z_4 = R_4 - j \frac{1}{\omega C_4};$$

$$Z_5 = R_5 + j \left(\omega L_5 - \frac{1}{\omega C_5} \right).$$

Применимость законов Кирхгофа к разветвленной цепи переменного тока позволяет перенести на эту цепь (в символической форме) все методы расчета цепей постоянного тока, так или иначе основанные на законах Кирхгофа и уже знакомые читателю.

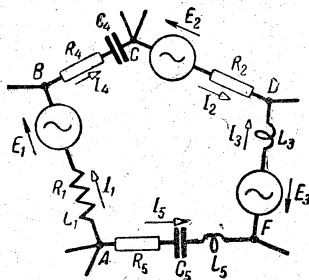


Рис. 7-58. Замкнутый контур в сложной цепи переменного тока.

При этом все сопротивления и проводимости, входящие в формулы, выведенные для цепи постоянного тока, заменяются комплексными сопротивлениями и проводимостями.

7-23. Четырехполюсник

Рабочие режимы самых различных электротехнических устройств (линии передачи, трансформатора, лампового и полупроводникового усилителей и т. д.) могут быть рассчитаны при помощи общей для всех них теории четырехполюсника. Последний является частью сложной электрической цепи, с которой он соединяется через четыре зажима — «полюса» (рис. 7-59). В большинстве случаев два зажима четырехполюсника соединяются с источником электроэнергии, это входные зажимы, два другие, соединяемые с приемником энергии, именуются выходными зажимами. Теория четырехполюсника рассматривает соотношения между выходными и входными напряжениями и токами четырехполюсника независимо от его внутренней схемы. Если четырехполюсник содержит источник электроэнергии, то он именуется активным; более обстоятельно разработана теория пассивного четырехполюсника, не содержащего источника энергии. В зависимости от характеристик элементов четырехполюсники делятся на линейные и нелинейные. Мы ограничимся изложением основных положений теории линейного четырехполюсника.

Рассмотрим четырехполюсник, между входными зажимами которого приложено синусоидальное напряжение \dot{U}_1 , а выходные зажимы замкнуты на постоянное сопротивление Z_H .

Воспользуемся системой линейных уравнений контурных токов, составив их в символической форме для входного и выходного контуров четырехполюсника:

$$Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_2 + Z_{13} \dot{I}_3 + \dots + Z_{1n} \dot{I}_n = \dot{U}_1; \quad (7-93)$$

$$Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 + Z_{23} \dot{I}_3 + \dots + Z_{2n} \dot{I}_n = 0. \quad (7-94)$$

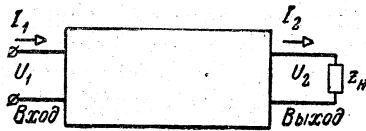


Рис 7-59. Четырехполюсник.

Здесь сопротивление $Z_{22} = Z_{22 \text{ вн}} + Z_{\text{н}}$, т. е. представляет собой сумму сопротивления нагрузки и $Z_{22 \text{ вн}}$ — той части сопротивления выходного контура, которая находится внутри четырехполюсника. Заменим $I_2 Z_{\text{н}}$ напряжением \dot{U}_2 между выходными зажимами, после чего перепишем (7-94) в следующем виде:

$$Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22 \text{ вн}} \dot{I}_2 + Z_{23} \dot{I}_3 + \dots + Z_{2n} \dot{I}_n = -\dot{U}_2. \quad (7-95)$$

К уравнениям (7-93) и (7-95) применим известное нам общее выражение (2-28) контурных токов для того, чтобы определить входной и выходной токи:

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} \dot{U}_1 - \frac{\Delta_{12}}{\Delta} \dot{U}_2; \quad (7-96)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\Delta_{21}}{\Delta} \dot{U}_1 - \frac{\Delta_{22}}{\Delta} \dot{U}_2. \quad (7-97)$$

Так как $\Delta_{21} = \Delta_{12}$, то на основании (7-97)

$$\dot{U}_1 = \frac{\Delta_{22}}{\Delta_{12}} \dot{U}_2 + \frac{\Delta}{\Delta_{12}} \dot{I}_2,$$

подставив это значение \dot{U}_1 в (7-96), найдем:

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta_{11} \Delta_{22} - \Delta_{12}^2}{\Delta \Delta_{12}} \dot{U}_2 + \frac{\Delta_{11}}{\Delta_{12}} \dot{I}_2.$$

Это два основных уравнения четырехполюсника, только постоянные коэффициенты в них принято обозначать:

$$\frac{\Delta_{22}}{\Delta_{12}} = A; \quad \frac{\Delta}{\Delta_{12}} = B; \quad \frac{\Delta_{11} \Delta_{22} - \Delta_{12}^2}{\Delta \Delta_{12}} = C$$

и

$$\frac{\Delta_{11}}{\Delta_{12}} = D. \quad (7-98)$$

Таким образом, уравнения четырехполюсника записываются обычно в следующей форме:

$$\dot{U}_1 = A \dot{U}_2 + B \dot{I}_2; \quad (7-99)$$

$$\dot{I}_1 = C \dot{U}_2 + D \dot{I}_2. \quad (7-100)$$

Они справедливы как для постоянного, так и для переменного тока, причем

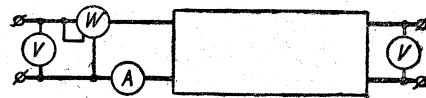


Рис 7-60. Опыт холостого хода четырехполюсника.

в последнем случае эти коэффициенты (называемые просто постоянными) — комплексные величины, они связаны между собой простым соотношением

$$AD - BC = 1, \quad (7-101)$$

в справедливости которого легко убедиться, подставив на основании (7-98) значения коэффициентов.

Если поменять местами входные и выходные зажимы, то это равносильно замене в уравнениях четырехполюсника \dot{U}_1 на $(-\dot{U}_2)$ и \dot{I}_1 на \dot{I}_2 . Соответственно уравнения четырехполюсника после преобразования примут следующий вид:

$$\dot{U}_1 = D \dot{U}_2 + B \dot{I}_2; \quad (7-102)$$

$$\dot{I}_1 = C \dot{U}_2 + A \dot{I}_2. \quad (7-103)$$

Из сопоставления их с (7-99) и (7-100) ясно, что у такого четырехполюсника, у которого $A = D$, обмен местами входных и выходных зажимов не изменяет электрических условий во всей остальной цепи. Такой четырехполюсник называется симметричным.

Постоянные четырехполюсника определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания. При опыте холостого хода (рис. 7-60) $Z_{\text{н}} = \infty$, а напряжение между выходными зажимами U_2 поддерживается равным напряжению при рабочей нагрузке четырехполюсника. В этом случае на основании (7-99) и (7-100)

$$\dot{U}_{10} = A \dot{U}_2; \quad \dot{I}_{10} = C \dot{U}_2. \quad (7-104)$$

При опыте короткого замыкания (рис. 7-61) $Z_{\text{н}} = 0$, а выходной ток устанавливается равным рабочему току нагруженного четырехполюсника;

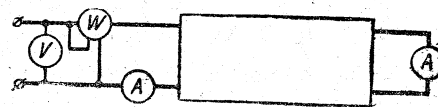


Рис 7-61. Опыт короткого замыкания четырехполюсника.

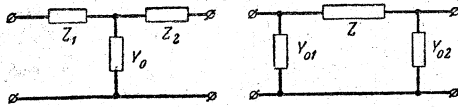


Рис. 7-62. Т-образная и П-образная схемы замещения четырехполюсника.

на основании (7-99) и (7-100) в этом случае

$$\dot{U}_{1к} = B\dot{I}_2; \dot{I}_{1к} = D\dot{I}_2. \quad (7-105)$$

Эти два опыта и (7-101) дают возможность определить значения постоянных испытуемого четырехполюсника. Ваттметр при опытах необходим для того, чтобы определить соответствующие величины в комплексной форме.

Сопоставляя уравнения опытов и основные уравнения четырехполюсника, можно видеть, что любой рабочий режим четырехполюсника можно рассматривать как наложение режимов холостого хода и короткого замыкания:

$$U_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2 = \dot{U}_{10} + \dot{U}_{1к};$$

$$I_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 = I_{10} + I_{1к}.$$

Это положение дает основание испытывать ряд электротехнических устройств по методу опытов холостого хода и короткого замыкания.

В ряде случаев при расчетах удобно заменить четырехполюсник эквивалентной схемой Т-образной или П-образной (рис. 7-62). Сопоставление уравнений такой Т-образной схемы при опытах холостого хода и короткого замыкания с соответствующими уравнениями четырехполюсника дает возможность определить связь между сопротивлениями и проводимостями схемы и постоянными четырехполюсника:

$$Z_1 = \frac{A-1}{C};$$

$$Z_2 = \frac{D-1}{C}; Y_0 = C.$$

Соотношения между сопротивлениями Т-образной и П-образной схем такие же, как соотношения сопротивлений эквивалентных звезды и треугольника.

7-24. Лабораторная работа. Последовательное соединение активных сопротивлений и индуктивностей

Соединения последовательной цепи выполняем согласно рис. 7-63; в качестве постоянной индуктивности берем катушку без сердечника, а в качестве чисто активного сопротивления — батарею ламп накаливания. Питание исследуемой цепи током должно быть устроено так, чтобы иметь возможность переключать цепь под переменное или под постоянное напряжение.

Сначала включаем исследуемую цепь под переменное напряжение и записываем показания приборов при трех — пяти различных значениях тока; последний регулируем ламповым реостатом.

На основании результатов опыта определяем сначала активное сопротивление всей цепи

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Так как ламповый реостат представляет собой одно активное сопротивление, то для него

$$R_2 = \frac{U_2}{I}.$$

Наконец, активное сопротивление катушки определяем как разность активных сопротивлений всей цепи и лампового реостата, т. е.

$$R_1 = R - R_2.$$

Полное сопротивление катушки

$$z_1 = \frac{U_1}{I}.$$

Теперь нетрудно определить и ее индуктивность из формулы

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}$$

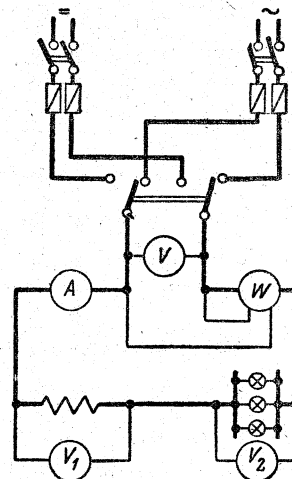


Рис. 7-63. Схема лабораторного опыта — последовательное соединение индуктивности и активного сопротивления.

Катушки со сталью

5. Заменить катушку другой, снабженной стальным сердечником. Включить ток и, регулируя его при помощи лампового реостата, записать показания приборов при трех различных значениях тока.

6. Вычислить на основании результатов измерения в каждом случае значения R_2 , R , R_1 и L .

Таблица опыта: катушки без стали и ламповый реостат при постоянном токе

Наблюдено					Вычислено
U	U_1	U_2	I	P	$R_1 = U_1 : I$

Таблица опыта: катушка со стальным сердечником и ламповый реостат

Наблюдено					Вычислено					
U	U_1	U_2	I	P	$\cos \varphi$	R_2	R	Z_1	R_1	L

**7-25. Лабораторная работа.
Закон Ома для последовательного соединения емкости и активного сопротивления**

Опыт 1. Последовательное соединение двух конденсаторов. Выполняем соединения согласно рис. 7-66 и включаем цепь под переменное напряжение. Так как напряжения на двух конденсаторах совпадают по фазе, то в пределах точности измерения должно иметь место равенство $U = U_1 + U_2$.

Определяем емкость отдельных конденсаторов

$$C_1 = \frac{I}{\omega U_1} \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{I}{\omega U_2},$$

на основании чего подсчитываем общую емкость системы

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{или} \quad C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

С другой стороны, общая емкость может быть определена на основании закона Ома

$$C_{\text{общ}} = \frac{I}{\omega U}.$$

В пределах точности измерения результаты этих двух подсчетов должны совпадать,

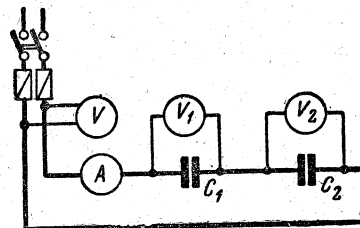


Рис. 7-66. Схема лабораторного опыта — последовательное соединение конденсаторов.

Опыт 2. Последовательное соединение активного сопротивления и емкости. Выполняем соединения согласно рис. 7-67, включаем цепь под переменное напряжение и записываем показания приборов при нескольких значениях тока; последний регулируем при помощи лампового реостата. Затем, переключив цепь под постоянное напряжение, убеждаемся, что конденсатор не пропускает постоянный ток и что в этом случае напряжение на нем равно напряжению сети.

На основании результатов измерения определяем активное сопротивление цепи $R_1 = \frac{U_1}{I}$, емкостное сопротивление $X_C = X_2 = \frac{U}{I}$

и полное сопротивление $z = \frac{U}{I}$, последнее, кроме того, должно удовлетворить условию

$$z = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

При всех значениях тока емкостное сопротивление должно быть одним и тем же, в пределах точности измерения.

Наконец, строим векторную диаграмму цепи (рис. 7-68) для какого-либо одного значения тока: по оси абсцисс откладываем вектор тока I , по его направлению откладываем вектор $U_1 = IR_1$ и из конца этого вектора, перпендикулярно к I строим вектор $U_2 = IX_C$.

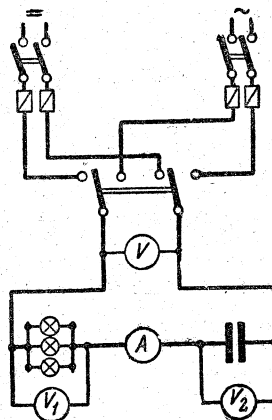


Рис. 7-67. Схема лабораторного опыта — последовательное соединение конденсатора и активного сопротивления.

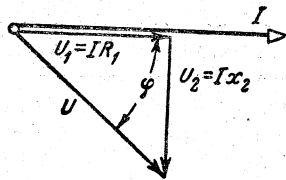


Рис. 7-68. Векторная диаграмма к схеме рис. 7-67.

В пределах точности измерения замыкающий вектор на диаграмме в масштабе чертежа должен быть равен фактически измеренному напряжению сети U .

План работы

1. Выполнить соединения согласно рис. 7-66. Включить цепь под переменное напряжение и записать показания приборов.
2. Определить C_1 и C_2 . Затем определить $C_{\text{общ}}$ двумя способами и сравнить результаты.
3. Выполнить соединения рис. 7-67, включить цепь под переменное напряжение и записать показания приборов при трех—пяти различных значениях тока.
4. Переключить цепь под постоянное напряжение.
5. Определить R , X_C и z цепи при различных значениях тока.
6. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи (рис. 7-68).

Таблица опыта: последовательное соединение емкости и активного сопротивления

Наблюдено				Вычислено		
U	U_1	U_2	I	$R = \frac{U_1}{I}$	$X_C = \frac{U_2}{I}$	$z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$

7-26. Лабораторная работа. Резонанс напряжений

Опыт 1. Резонанс напряжений при переменной индуктивности. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 7-69. Источником тока служит городская сеть. Для того чтобы не получить слишком больших частичных напряжений, опасных для электрической прочности конденсаторов и даже для самих экспериментирующих, напряжение на зажимах цепи должно быть понижено до 25—40 в при помощи регулируемого автотрансформатора AT . Во все время опыта это напряжение должно поддерживаться неизменным. Индуктивностью служит реактивная катушка L с выдвижным стальным сердечником. Емкость C представлена батареей конденсаторов, которые можно отключать посекционно.

Выполнив соединения и включив ток, необходимо, прежде чем приступать к отсчету показаний электроизмерительных приборов, так подобрать емкость батареи конденсаторов, чтобы частичные напряжения U_C и U_K и ток I при резонансе не оказались ни чрезмерно велики, ни слишком малы. Удобно отрегулировать емкость так, чтобы при резонансе напряжений почти полностью использовалась шкала электроизмерительных приборов, конечно, за исключением ваттметра. Осуществляется этот предварительный подбор емкости следующим образом: изменяя индуктивность в пределах ее регулирования, нужно проследить, какого наибольшего значения достигают U_C , U_K и I . Если их значения не удовлетворяют экспериментирующего, то нужно изменить емкость и, регулируя L , опять посмотреть, как сказались изменения C на наибольших значениях U_C , U_K и I . Закончив этот подбор C , нужно полностью ввести сердечник в катушку, а затем, постепенно его выдвигая, записывать показания приборов.

Постоянное во время опыта значение C можно определить по показаниям вольтметра и амперметра

$$C = \frac{I}{\omega U_C};$$

для большей точности этого измерения его следует производить при условиях резонанса.

Катушка, помимо индуктивности, обладает также активным сопротивлением, которое может быть определено по показаниям вольтметра и амперметра:

$$R = \frac{P}{I^2}.$$

Это сопротивление складывается из сопротивления меди обмотки катушки R_M и сопротивления R_c , обусловленного потерями на гистерезис и вихревые токи в сердечнике катушки. Это последнее R_c — величина непостоянная, вследствие чего непостоянно и все активное сопротивление катушки:

$$R = R_M + R_c.$$

Индуктивность катушки определяется на основании ее полного и активного сопротивлений

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{z_K^2 - R^2}.$$

Здесь полное сопротивление определяется на основании закона Ома:

$$z_K = \frac{U_K}{I}.$$

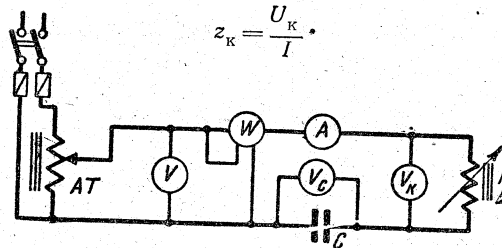


Рис. 7-69. Схема для лабораторной работы — резонанс напряжений.

Опыт 2. Резонанс при переменной емкости. Для этого опыта можно воспользоваться той же схемой рис. 7-69, заменив лишь катушку со стальным сердечником другой катушкой без стали, для того чтобы индуктивность в цепи была постоянна. Напряжение на зажимах цепи поддерживается пониженным и постоянным по величине во все время опыта. Емкость C следует постепенно увеличивать, начиная от нуля. Значение C в этом случае можно определять по показаниям вольтметра и амперметра

$$C = \frac{I}{\omega U_C}$$

Постоянную по величине индуктивность можно определять по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_K}{I}\right)^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}$$

Для большой точности этого измерения его следует производить в условиях резонанса.

План работы

Опыт 1. Резонанс напряжений при переменной индуктивности

1. Выполнить соединения согласно рис. 7-69. Включить цепь под напряжение и установить на зажимах цепи пониженное напряжение (25—40 в). Подобрать наиболее целесообразное для опыта значение C .

2. Изменять индуктивность L , начиная от наибольшего значения (при введенном сердечнике); напряжение U на зажимах цепи поддерживать постоянным во все время опыта.

3. На основании результатов опыта построить кривые зависимости I , U_C и U_K от L .

4. На основании тех же данных построить векторные диаграммы цепи для условий, близких к резонансу, и для условий резонанса.

Таблица опыта: резонанс напряжений при переменной индуктивности

Наблюдено					Вычислено			
U	I	U_K	U_C	P	R	z_K	L	C

Опыт 2. Резонанс напряжений при переменной емкости

5. Заменить катушку со сталью катушкой без стали, не меняя в остальной схему соединений.

6. Включив цепь под напряжение, постепенно изменять емкость C , начиная с $C=0$; при этом поддерживать постоянным напряжение на зажимах цепи.

7. На основании результатов опыта п. 6 построить кривые зависимости I , U_C и U_K от C .

Таблица опыта: резонанс напряжений при переменной емкости

Наблюдено					Вычислено			
U	I	U_C	U_K	P	C	z_K	R	L

7-27. Лабораторная работа. Параллельное соединение приемников переменного тока

Выполнить соединения согласно рис. 7-70. Для того чтобы иметь различные условия сдвига фаз в индуктивностях, взять одну катушку со стальным сердечником, а вторую — без сердечника; в качестве безреактивного приемника, потребляющего только активный ток, взять ламповый реостат.

Для упрощения схемы в ней предусмотрен только один ваттметр, поэтому, чтобы измерить отдельно активную мощность P_a каждого из приемников, нужно замыкать сначала поочередно только один из трех ключей K . Затем включить все три ключа и замерить общую активную мощность цепи; она должна быть равна сумме ранее измеренных активных мощностей отдельных приемников $P_a = P_1 + P_2 + P_3$.

Затем для построения векторной диаграммы цепи определить сначала вычислением активные токи отдельных ветвей

$$I_{1a} = \frac{P_1}{U}; \quad I_{2a} = \frac{P_2}{U},$$

наконец,

$$I_{3a} = I_3 = \frac{P_3}{U},$$

т. е. ток третьей ветви, содержащей лишь ламповый реостат, должен быть равен ее активному току. Далее нужно вычислить реактивные токи отдельных ветвей

$$I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2}; \quad I_{2p} = \sqrt{I_2^2 - I_{2a}^2}$$

и $I_{3p}=0$, так как третья ветвь чисто активная.

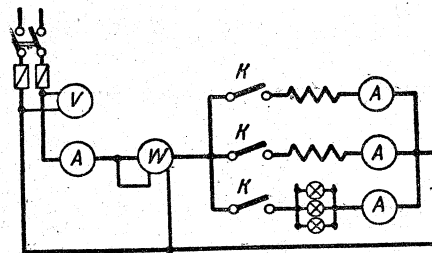


Рис. 7-70. Схема опыта — параллельное соединение реактивных катушек и лампового реостата.

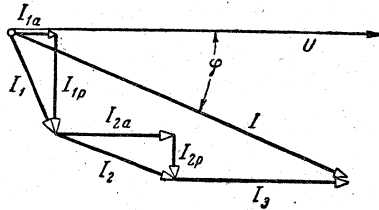


Рис. 7-71. Векторная диаграмма к схеме рис. 7-70.

За основу диаграммы параллельной цепи нужно взять вектор напряжения U и построить его в масштабе по направлению оси абсцисс (рис. 7-71). Затем из начала координат по направлению U отложить вектор I_{1a} и прибавить к нему отстающий от U на 90° вектор I_{1p} , соединив конец этого вектора с началом координат, что даст вектор I_1 . Таким же образом построить I_{2a} и I_{2p} и получить вектор I_2 и, наконец, $I_3 = I_{3a}$. Замыкающим вектором диаграммы будет вектор общего тока I .

Подсчитать также реактивные и полные мощности приемников и убедиться, что общая реактивная мощность цепи равна в пределах точности измерений сумме реактивных мощностей ветвей. Но общая полная мощность цепи не равна арифметической сумме полных мощностей ветвей, так как полные мощности складываются геометрически.

План работы

1. Выполнить соединение согласно рис. 7-70.
2. Включить поочередно три отдельных приемника и записать соответствующие показания приборов; затем повторить запись, включив все три ветви.
3. Подсчитать активные и реактивные токи и мощности всей цепи и отдельных приемников.
4. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи (рис. 7-71).

Таблица опыта: параллельное соединение приемников переменного тока

Наименование приемника	Наблюдено			Вычислено			
	U	I	P	I_a	I_p	Q	S
Катушка со сталью							
Катушка без стали							
Ламповый реостат							
Вся цепь							

7-28. Лабораторная работа. Компенсация сдвига фаз

Выполнить соединение согласно рис. 7-72. Включить ток, сначала измерить ток и коэффициент мощности цепи до включения емко-

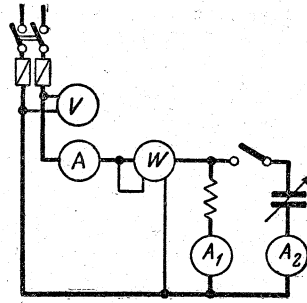


Рис. 7-72. Схема лабораторной работы — компенсация сдвига фаз.

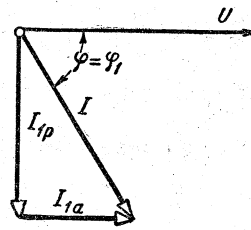


Рис. 7-73. Векторная диаграмма приемника с индуктивным сдвигом фаз.

сти. Затем постепенно включать емкость, повышая коэффициент мощности цепи, пока он не будет равен единице, что можно определить по показаниям приборов.

На основании результатов измерения построить векторную диаграмму цепи сначала для условий до компенсации сдвига фаз, когда включена одна лишь катушка (рис. 7-73). Определить вычислением активный ток цепи $I_{1a} = \frac{P}{U}$ и реактивный ток $I_{1p} = \sqrt{I^2 - I_{1a}^2}$.

построив эти токи на диаграмме, определить ток катушки I_1 как результирующий. Затем построить диаграмму цепи при включенной емкости (рис. 7-74); в этой диаграмме положение вектора I_1 остается тем же, что и в первом случае, а вектор I_2 нужно направить под углом 90° к вектору U в сторону опережения. Подобным же образом построить диаграмму (рис. 7-75) для цепи при полной компенсации сдвига фаз (резонанс токов).

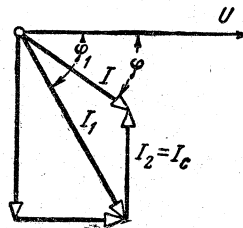


Рис. 7-74. Векторная диаграмма для параллельного соединения при неполной компенсации сдвига фаз.

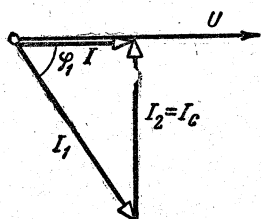


Рис. 7-75. Векторная диаграмма для полной компенсации сдвига фаз.

Наконец, подсчитать реактивную мощность в цепи до компенсации сдвига фаз и при полной компенсации сдвига фаз

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2},$$

причем в последнем случае

$$Q = Q_1 - Q_2 = Q_1 - UI_2 = 0.$$

Величина Q_1 известна на основании измерения до включения емкости, когда

$$Q_1 = \sqrt{(UI)^2 - P^2}.$$

План работы

1. Выполнить соединение согласно рис. 7-72.
2. Включить цепь без емкости, затем постепенно включать емкость, пока общий ток цепи, постепенно уменьшаясь, не достигнет своего минимального значения и затем не начнет увеличиваться.
3. Построить три векторные диаграммы цепи: а) без емкости, б) при малой включенной емкости, в) при большой включенной емкости.
4. Построить кривую изменения общего тока в зависимости от $\cos \varphi [I = F(\cos \varphi)]$.

Таблица опыта: компенсация сдвига фаз

Наблюдено					Вычислено				
U	I	P	I_1	I_2	$\cos \varphi$	I_{1a}	I_{1p}	S	Q

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

8-1. Многофазный ток и многофазная система

Многофазный ток есть система переменных токов в электрических цепях, питаемых общим источником электроэнергии, в котором возбуждается несколько э. д. с. одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на определенный фазный угол.

Совокупность электрических цепей многофазного тока именуется многофазной системой. Отдельные цепи, образующие многофазную систему, называются ее фазами (не смешивать с фазным углом синусоидальной функции, который также называют фазой).

По числу фаз многофазная цепь называется трехфазной, шестифазной и т. д. Наибольшим распространением пользуются трехфазные системы, так как из всех систем переменного тока они являются наиболее экономически выгодными для передачи энергии на расстояние.

Первая передача энергии на расстояние переменным током была осу-

ществлена русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. Это была передача с Лауффенского водоппада (близ Гейдельберга), где была установлена водяная турбина с трехфазным генератором и повышающим трансформатором, во Франкфурт-на-Майне, на электротехническую выставку, где был установлен понижающий трансформатор, питавший трехфазный электродвигатель; последний приводил в движение насос. В этой установке и трехфазные трансформаторы, и электродвигатель, и сама трехфазная система составляли изобретение Доливо-Добровольского. Здесь на расстоянии 175 км передавалась мощность 200 л. с. при линейном напряжении 15 000 в и частоте 30—40 гц. Коэффициент полезного действия передачи составлял 75%.

За 9 лет до этого Депре производил опыт передачи энергии постоянным током из Мисбаха в Мюнхен на расстояние 57 км при напряжении 2 000 в. Передавалась мощность 3 л. с., и к. п. д. составлял всего 22%.

Если э. д. с., напряжения или токи, образующие многофазную систему,

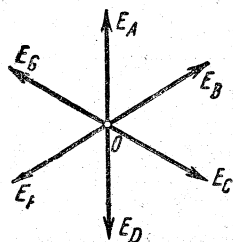


Рис. 8-1. Симметричная шестифазная система э. д. с.

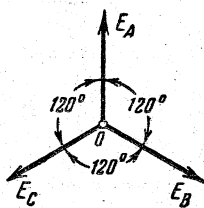


Рис. 8-2. Симметричная трехфазная система э. д. с.



Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862 — 1919 гг.).

имеют одинаковую величину во всех фазах цепи и сдвинуты по отношению друг к другу на равные углы (рис. 8-1 и 8-2), то система называется симметричной. Отдельные фазы многофазной системы обозначаются первыми буквами латинского алфавита: *ABC*. При этом принято так выбирать порядок следования (последовательность фаз), чтобы э. д. с. источника в каждой следующей фазе отставала от э. д. с. предшествующей фазы, т. е. э. д. с. фазы *B* отставала от э. д. с. фазы *A*, э. д. с. фазы *C* — от э. д. с. фазы *B* и т. д. Такая последовательность фаз называется прямой последовательностью. Однако бывают случаи, когда в одной и той же многофазной цепи действует несколько систем э. д. с. и не все они имеют одинаковую последовательность. Система, в которой э. д. с. источника в каждой следующей (по алфавиту) фазе опережает э. д. с. предшествующей фазы, называется системой обратной последовательности. Последовательность фаз определяет направление вращения двигателей трехфазного тока.

8-2. Трехфазная система

В трехфазной системе источником энергии служит трехфазный генератор, отличающийся от однофазного генератора (§ 7-1) тем, что на внутренней поверхности его статора (рис. 8-3) расположены три отдельные обмотки (фазы), оси которых *A*, *B* и *C* образуют между собой углы по 120° (если ротор генератора имеет одну пару полюсов).

Фазные э. д. с. симметричной трех-

фазной системы сдвинуты между собой на равные углы 120° (рис. 8-2).

В соответствии с этим мгновенные значения фазных э. д. с. выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t + 120^\circ), \end{aligned} \right\} (8-1)$$

если за $t=0$ принять момент, когда напряжение фазы *A* проходит через нуль и становится положительным. Последняя из формул (8-1) может быть записана также в виде:

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ). \quad (8-2)$$

При символической записи фазных напряжений действительную ось принято совмещать с напряжением (э. д. с.) фазы *A*. Тогда действующие

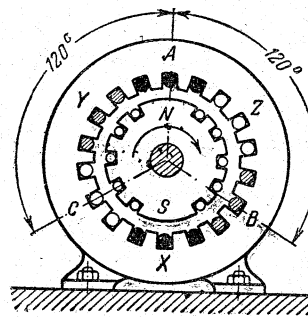


Рис. 8-3. Схематический разрез двухполюсного трехфазного генератора.

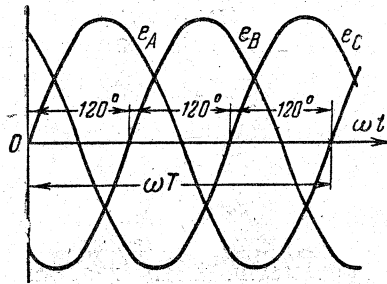


Рис. 8-4. Кривые э. д. с. трехфазного генератора.

значения симметричной системы представляются комплексами

$$\left. \begin{aligned} E_A &= E_\phi; \\ E_B &= E_\phi e^{-j120^\circ}; \\ E_C &= E_\phi e^{-j240^\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (8-3)$$

На рис. 8-4 представлены кривые мгновенных значений э. д. с. всех трех фаз, из которых нетрудно видеть, что в любой момент алгебраическая сумма трех э. д. с. равна нулю. Это можно, конечно, установить и аналитически при помощи соотношений (8-1), но проще воспользоваться для этой цели векторной диаграммой (рис. 8-5). Действительно, складывая векторы \dot{E}_B и \dot{E}_C , находим, что в силу симметрии вектор $\dot{E}_B + \dot{E}_C$ направлен вертикально вниз, т. е. противоположно вектору \dot{E}_A . Образуя углы в 60° с векторами \dot{E}_B и \dot{E}_C , (или OB и BD), он оказывается стороной равностороннего треугольника OBD и, следовательно, равен по величине вектору \dot{E}_A ; поэтому

$$E_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E_A + (-\dot{E}_A) = 0. \quad (8-4)$$

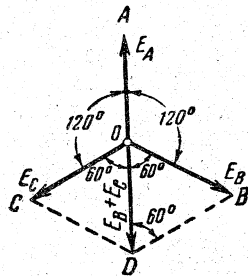


Рис. 8-5. Сумма э. д. с. трехфазного генератора.

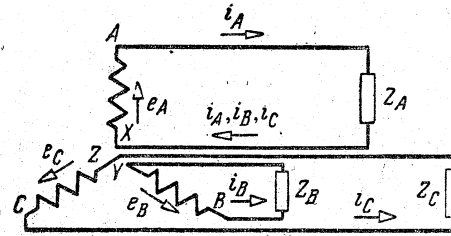


Рис. 8-6. Схематическое изображение трехфазного генератора, питающего три приемника.

а так как сумма мгновенных значений $e_A + e_B + e_C$ представляет собой умноженную на $\sqrt{2}$ сумму проекций векторов \dot{E}_A , \dot{E}_B и \dot{E}_C или проекцию их суммы на вертикаль (§ 7-5), то в любой момент

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (8-5)$$

Само собой разумеется, что положительные направления токов и э. д. с. должны быть приняты одинаковыми во всех фазах, например от читателя за плоскость чертежа на рис. 8-3. Условимся при этом считать началом каждой фазы ту точку ее, в которой положительно направленный ток поступает из обмотки генератора во внешнюю цепь, и концом фазы — ту точку, в которой положительно направленный ток поступает из внешней цепи в обмотку генератора. Таким образом, э. д. с. в фазах генератора положительны, когда они действуют от концов фаз (X, Y, Z) к их началам (A, B, C).

На схемах трехфазный генератор изображается обыкновенно в виде трех обмоток XA, YB, ZC (рис. 8-6).

Если присоединенные к началу и концу каждой фазы приемники обладают одинаковыми по величине и характеру сопротивлениями Z_A, Z_B и Z_C , то и токи I_A, I_B и I_C будут одинаковы по величине и сдвинуты на одинаковые углы ϕ относительно соответствующих э. д. с. (рис. 8-7). Они окажутся сдвинутыми между собой также на одинаковые углы 120° , т. е. взаимное расположение изображающих их кривых не будет отличаться от расположения кривых э. д. с. на рис. 8-4 и, следовательно, действующие значения

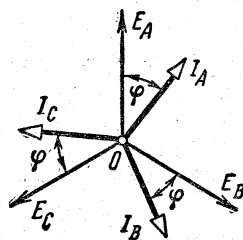


Рис. 8-7. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке.

токов будут связаны между собой соотношением

$$I_A + I_B + I_C = 0, \quad (8-6)$$

а мгновенные — соотношением

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (8-7)$$

Такая нагрузка трехфазной цепи называется симметричной или равномерной.

Трехфазная цепь, в которой каждая фаза генератора независимо от других соединена двумя проводами со своим приемником, называется несвязанной трехфазной цепью. Несвязанная трехфазная цепь требует, таким образом, применения шести проводов для передачи энергии от генератора к приемникам. Практически она не применяется.

8-3. Соединение звездой

Число проводов может быть уменьшено, если вместо трех отдельных обратных проводов применить один общий провод (рис. 8-8), присоединив к нему концы всех фаз генератора и приемников (условимся, что в фазах приемников положительный ток направлен от начала фазы к ее концу). В условиях работы приемников при

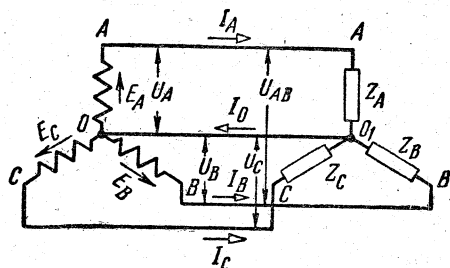


Рис. 8-8. Соединение звездой.

этом ничего не изменится, так как напряжение между началом и концом каждой фазы, как и в несвязанной цепи, равно напряжению соответствующей фазы генератора (пренебрегая сопротивлениями соединяющих проводов). Таким путем получается четырехпроводная связанная трехфазная цепь, соединенная звездой.

При схематическом изображении ее принято показывать фазы приемника и фазы генератора в виде трехлучевой звезды, располагая фазы приемника параллельно одноименным фазам генератора (рис. 8-8).

Общая точка, в которой объединяются концы фаз генератора (или приемника), называется его нулевой точкой или нейтралью, а соединяющий нулевые точки генератора и приемника общий обратный провод — нулевым или нейтральным проводом. Ток в этом проводе по первому закону Кирхгофа равен геометрической сумме токов фаз

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (8-8)$$

При равномерной нагрузке фаз, когда $I_A + I_B + I_C = 0$, тока в нулевом проводе не будет (отсюда название «нулевой» провод), и нулевой провод является излишним.

Сняв нулевой провод, получим трехпроводную цепь трехфазного тока, соединенную звездой. Такая цепь может нормально работать лишь в том случае, если обеспечено равномерное распределение нагрузки между фазами. В противном случае напряжения фаз приемника перестанут быть одинаковыми и равными фазному напряжению генератора.

Напряжения между началами фаз генератора или приемника и его нейтралью, обозначаемые U_A , U_B и U_C , называются фазными напряжениями. При расчетах трехфазных цепей часто считают заданными не фазные э. д. с., а фазные напряжения, которые равны фазным э. д. с., когда сопротивлением обмоток генератора можно пренебречь по сравнению с сопротивлениями приемников.

Напряжения между началами фаз A и B , B и C , C и A , обозначаемые

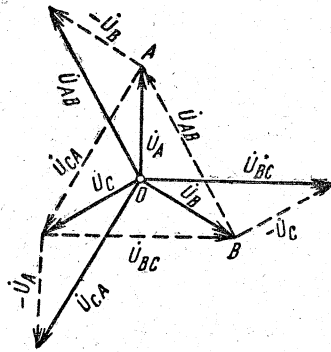


Рис. 8-9. Фазные и линейные напряжения.

U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} , называются линейными напряжениями. Если принять нулевую точку генератора за условную точку нулевого потенциала, то потенциалы точек A , B и C будут равны соответствующим фазным напряжениям U_A , U_B и U_C , а линейные напряжения, рассматриваемые как разности потенциалов, будут связаны с фазными напряжениями соотношениями

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B; \\ U_{BC} &= U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A. \end{aligned} \quad (8-9)$$

Это вычитание выполнено на векторной диаграмме рис. 8-9 путем геометрического сложения векторов U_A , U_B и U_C соответственно с векторами $-U_B$, $-U_C$ и $-U_A$, равными и противоположными векторам U_B , U_C и U_A . Из диаграммы видно, что величина и направление векторов линейных напряжений могут быть получены более простым путем, если соединить прямой линией концы векторов соответствующих фазных напряжений, причем вектор линейного напряжения направлен от конца вычитаемого вектора к концу уменьшаемого. Три вектора линейных напряжений одинаковы по величине и сдвинуты между собой, как и фазные напряжения, на углы в 120° . При этом звезда линейных напряжений повернута относительно звезды фазных напряжений на угол 30° вперед. Соотношение между абсолютной величиной U_L любого линейного напряжения и абсолютной величиной U_ϕ любого фазного напряжения

можно установить, рассмотрев равнобедренный треугольник OAB (или OBC или OCA) с углом при вершине 120° .

Опустив перпендикуляр из вершины тупого угла на противоположную сторону, например AB , получим:

$$\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ = U_A \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (8-10)$$

откуда

$$U_L = U_\phi \sqrt{3}. \quad (8-11)$$

Это важное соотношение в одинаковой мере относится как к цепи с нулевым проводом, так и к цепи без него.

При соединении звездой осветительной нагрузки нулевой провод необходим, так как полная равномерность распределения осветительной нагрузки между фазами не может быть гарантирована, поскольку лампы могут включаться и отключаться (а также перегорать) в индивидуальном порядке. Иначе обстоит дело с электродвигателями. За исключением двигателей весьма малой мощности (для малых вентиляторов, проигрывателей и т. п.), двигатели переменного тока выполняются обыкновенно трехфазными, благодаря чему каждый отдельный двигатель равномерно нагружает все три фазы. Поэтому трехфазные линии, служащие исключительно для питания электродвигателей, выполняются трехпроводными. На рис. 8-10 представлена схема осветительной сети трехэтажного дома

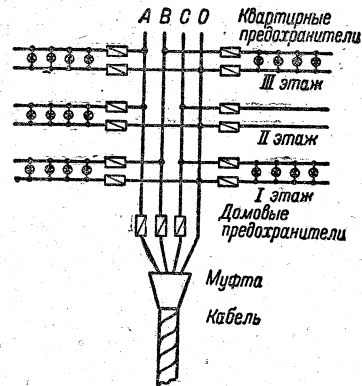


Рис. 8-10. Схема осветительной сети трехэтажного дома при соединении звездой. (4-Архив)

с двумя квартирами на каждом этаже и с равномерным распределением установленных ламп между фазами. Непосредственно у ввода кабеля в дом на всех фазах магистрали, проходящей обыкновенно по лестничной клетке, стоят домовые предохранители, защищающие городскую сеть от короткого замыкания в пределах магистрали. В начале ответвлений к каждой квартире, которые чаще всего выполняются однофазными, стоят квартирные предохранители, защищающие городскую сеть и другие квартиры того же дома от короткого замыкания в пределах данной квартиры. На нулевом проводе магистрали предохранитель (а также и выключатель) не ставится, так как перегорание такого предохранителя (или отключение выключателя) равносильно обрыву нулевого провода, в результате которого напряжения на отдельных группах ламп в случае разного количества или разной мощности ламп перестанут быть одинаковыми (§ 8-6), так что накал ламп в одних группах будет недостаточным, а в других чрезмерным, что поведет к быстрому перегоранию последних.

8-4. Соединение треугольником

Если включить три приемника Z_{AB} , Z_{BC} и Z_{CA} непосредственно между проводами трехпроводной линии, идущей от зажимов трехфазного генератора, не пользуясь нулевым проводом, получится соединение приемников треугольником (рис. 8-11). Здесь уже не приходится различать фазные и линейные напряжения, так как напряжение между началом и концом каждой фазы приемника оказывается

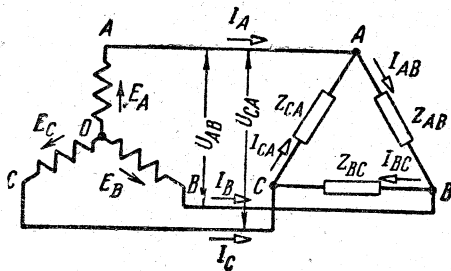


Рис. 8-11 Соединение приемников треугольником.

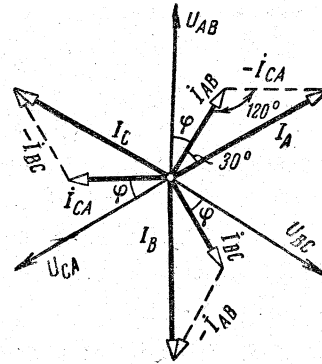


Рис. 8-12. Линейные токи при симметричной нагрузке фаз.

в то же время линейным напряжением. Зато появляется различие между фазными токами приемника I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} , положительные направления которых выбирают от A к B , от B к C и от C к A , и линейными токами I_A , I_B и I_C , которые по-прежнему считаются положительными в направлении от генератора к приемникам. По первому закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA}; & I_B &= I_{BC} - I_{AB}; \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC}, \end{aligned} \quad (8-12)$$

т. е. любой из линейных токов равен геометрической разности токов двух фаз, непосредственно соединенных с данным проводом линии, причем уменьшаемым является фазный ток, направленный от провода, а вычитаемым — фазный ток, направленный к проводу.

Из соотношений (8-12) следует, что при любых значениях фазных токов геометрическая сумма линейных токов

$$I_A + I_B + I_C = 0. \quad (8-13)$$

При симметричной нагрузке фаз, т. е. при одинаковых по величине и характеру фазных сопротивлений Z_{AB} , Z_{BC} и Z_{CA} , когда фазные токи I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} равны по величине и сдвинуты на одинаковые углы относительно соответствующих линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} (рис. 8-12), образуя симметричную трехлучевую звезду, линейные токи I_A , I_B и I_C также оказываются равными и симмет-

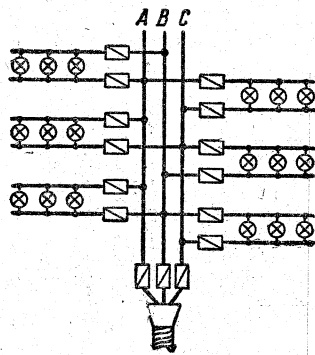


Рис. 8-13. Схема осветительной сети трехэтажного дома при соединении треугольником

рично расположенными, причем звезда линейных токов повернута относительно звезды фазных токов на 30° назад. Каждый из линейных токов представляется, таким образом, основанием равнобедренного треугольника с углом в 120° при вершине, а потому между значениями линейного и фазного токов при симметричной нагрузке имеет место такое же соотношение, как между линейным и фазным напряжениями при соединении звездой, а именно

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}} \sqrt{3}. \quad (8-14)$$

Это важное соотношение позволяет сравнительно легко вычислять линейные токи при симметричной нагрузке.

На рис. 8-13 представлена схема домовой осветительной проводки при соединении ламп треугольником.

Возможность двоякого включения одних и тех же приемников звездой или треугольником расширяет область применения этих приемников. Так, например, если обмотка трехфазного электродвигателя рассчитана на фазное напряжение 220 в, то при соединении треугольником такой электродвигатель может быть включен в сеть с линейным напряжением 220 в, а при соединении звездой — в сеть с линейным напряжением $220 \cdot \sqrt{3} = 380$ в; двигатель с фазным напряжением 127 в может работать в сетях с линейными напряжениями 127 и $127 \cdot \sqrt{3} = 220$ в.

Если при соединении приемников треугольником нужно учесть сопротив-

ления проводов, соединяющих приемники с источником энергии, или включенной в эти провода аппаратуры, то следует преобразовать треугольник сопротивлений в эквивалентную звезду (§ 2-3), которая при симметричном треугольнике также получается симметричной. После этого сопротивление каждого провода оказывается соединенным последовательно с сопротивлением каждой фазы звезды и их можно заменить одним суммарным сопротивлением.

Соединение треугольником может быть применено не только для приемников, но и для источников энергии: генераторов, трансформаторов и др. В этом случае каждая фаза источника должна быть включена непосредственно между двумя проводами трехпроводной линии.

Если при этом фаза A источника (E_A) будет включена между проводами A и B (рис. 8-14), фаза B (E_B) — между проводами B и C и фаза C (E_C) — между проводами C и A и притом так, чтобы э. д. с. имели положительные направления, указанные на рис. 8-14, то будут иметь силу соотношения (пренебрегая сопротивлениями обмоток)

$$\dot{U}_{AB} = E_A; \quad \dot{U}_{BC} = E_B; \quad \dot{U}_{CA} = E_C$$

и, следовательно, сохранится обычный порядок последовательности линейных напряжений, при котором \dot{U}_{BC} отстает на 120° от \dot{U}_{AB} и \dot{U}_{CA} отстает на 120° от \dot{U}_{BC} .

Таким образом, три фазы источника должны быть соединены между собой последовательно, т. е. конец фазы A — с началом фазы B , конец фазы

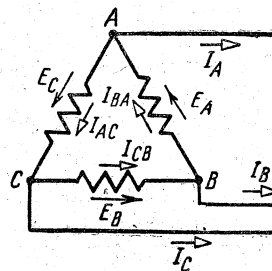


Рис. 8-14. Соединение генератора треугольником.

B — с началом фазы C и конец фазы C — с началом фазы A .

На первый взгляд может показаться, что последовательное соединение трех фаз источника в замкнутый треугольник равносильно их совместному короткому замыканию, как это и было бы, например, при подобном же соединении источников постоянного тока. Но так как в трехфазной системе в любой момент

$$e_A + e_B + e_C = 0,$$

то в данном случае не только нет короткого замыкания, но при отсутствии нагрузки ток в замкнутом треугольнике источника равен нулю. Однако это правильно лишь в том случае, если э. д. с. источника строго синусоидальны, так как только при этом условии сумма фазных э. д. с. равна нулю. Но фазные э. д. с. генератора часто не имеют строго синусоидальной формы и не вполне удовлетворяют указанному соотношению. Потому генераторы, соединенные треугольником, встречаются в редких случаях. В трансформаторах, напротив, соединение треугольником применяется столь же часто, как и соединение звездой.

При симметричной (равномерной) нагрузке, когда линейные токи I_A , I_B и I_C равны по величине и взаимно сдвинуты на равные углы 120° , любой из фазных токов источника

$$I_\phi = \frac{I_\lambda}{\sqrt{3}},$$

как это имело место при равномерной нагрузке и для фазных токов приемников. Отсюда следует, что если треугольником соединены фазы как источника, так и приемника, то при равномерной нагрузке токи в одноименных фазах источника и приемника будут одинаковы по величине и фазе.

8-5. Мощность симметричной трехфазной цепи

Так как активная мощность всякой цепи равна сумме активных мощностей всех ее участков, то активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз.

При симметричной нагрузке, когда активные мощности всех трех фаз одинаковы, активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi \quad (8-15)$$

в 3 раза превышает активную мощность одной фазы. Чтобы выразить эту мощность через линейные величины напряжения и тока, заметим, что при соединении приемника звездой

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}; \quad I_\phi = I_\lambda, \quad (8-16)$$

а при соединении треугольником

$$U_\phi = U_\lambda; \quad I_\phi = \frac{I_\lambda}{\sqrt{3}}; \quad (8-17)$$

так что в обоих случаях

$$3U_\phi I_\phi = 3 \frac{U_\lambda I_\lambda}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda$$

и формула активной мощности принимает вид:

$$P = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \cos \varphi, \quad (8-18)$$

где φ , как и раньше, — угол сдвига фаз между U_ϕ и I_ϕ . Обыкновенно эту формулу пишут без индексов:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi. \quad (8-19)$$

Так как реактивная мощность всякой цепи равна сумме реактивных мощностей всех ее участков, то реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз. Следовательно, при симметричной нагрузке фаз аналогично (8-15)

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi \quad (8-20)$$

и аналогично (8-19)

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi. \quad (8-21)$$

Так как полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

то

$$S = \sqrt{3} UI. \quad (8-22)$$

При помощи этой формулы выражениям (8-19) и (8-21) легко придать вид:

$$P = S \cos \varphi; \quad (8-23)$$

$$Q = S \sin \varphi. \quad (8-24)$$

Благодаря этому сохраняют силу соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S},$$

выведенные ранее для однофазного переменного тока.

8-6. Несимметричная нагрузка фаз при соединении приемника звездой

Переходя к изучению несимметричной нагрузки трехфазной цепи, рассмотрим прежде всего случай, когда источник энергии и приемник соединены звездой, а провода линии, в том числе и нулевой, обладают конечным (а не ничтожно малым) сопротивлением. Впрочем сопротивлений фазных проводов, соединенных последовательно с фазами приемника, можно включить в состав сопротивлений этих фаз, и тогда придется отдельно учитывать только сопротивление нулевого провода.

Примем за условный нуль нейтраль источника и поставим себе задачей рассчитать режим в цепи (рис. 8-15), считая заданными фазные напряжения источника \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C , комплексные сопротивления фаз Z_A , Z_B и Z_C и комплексное сопротивление нулевого провода Z_0 . Так как рассматриваемая цепь имеет два узла: нейтрали источника и приемника, то поставленная задача легко решается методом узлового напряжения (§ 2-5). Прежде всего определяется напряжение между нейтралью, которое называют смещением нейтрали, т. е. потенциал нейтрали O_2 приемника, по формуле

$$\dot{U}_0 = \frac{\frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_0}}, \quad (8-25)$$

аналогичной (2-24). Заменяя все $\frac{1}{Z}$ соответствующими комплексными проводимостями Y , запишем эту формулу в более компактном виде:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (8-26)$$

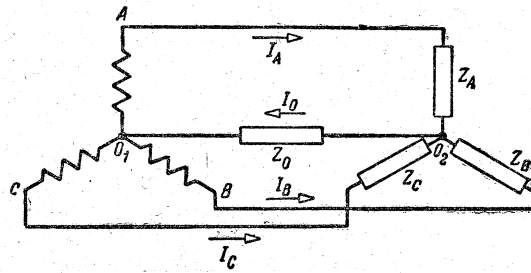


Рис. 8-15. Трехфазная цепь с конечным сопротивлением нулевого провода.

Если нулевой провод отсутствует, т. е. $Z_0 = \infty$, то $Y_0 = 0$, и последний член знаменателя выпадает.

Если источник энергии дает симметричную систему напряжений

$$\begin{aligned} U_A &= U_\phi; \\ \dot{U}_B &= U_\phi e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C &= U_\phi e^{j120^\circ}, \end{aligned}$$

то, подставляя эти выражения в формулу (8-26) и вынося за скобки U_ϕ , можно придать этой формуле более удобный для вычисления вид:

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{Y_A + Y_B e^{-j120^\circ} + Y_C e^{j120^\circ}}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (8-27)$$

Когда смещение нейтрали U_0 найдено, легко определяются фазные напряжения приемника

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_0; \quad \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_0; \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_0 \end{aligned} \quad (8-28)$$

и токи

$$\dot{I}_A = \dot{U}'_A Y_A; \quad \dot{I}_B = \dot{U}'_B Y_B; \quad \dot{I}_C = \dot{U}'_C Y_C. \quad (8-29)$$

Ток в нулевом проводе может быть найден или как сумма фазных токов

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C,$$

или по формуле

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_0 Y_0.$$

Если сопротивлением нулевого провода можно пренебречь и положить

$$Z_0 = 0,$$

то $Y_0 = \infty$ и согласно (8-26) и $U_0 = 0$, т. е. напряжение между нейтральными точками источника и приемника отсутствует. Это дает возможность вычислить токи сразу по формуле (8-29).

Диаграмма трехфазной системы, в которой векторы линейных напряжений образуют треугольник, часто именуется топографической диаграммой напряжений, так как в ней каждой точке диаграммы соответствует определенная точка цепи, а расстояние между двумя точками диаграммы в масштабе построения изображает по величине и фазе вектор напряжения между соответствующими точками цепи. Вершинам треугольника соответствуют точки цепи A, B и C (рис. 8-15), а нейтральной точке генератора O_1 — центр тяжести треугольника линейных напряжений. Условия при несимметрии нагрузки, соединенной звездой, наглядно иллюстрируются в топографической диаграмме смещением нейтральной точки приемника. При любой несимметрии нагрузки концы звезды векторов фазных напряжений приемника должны находиться в вершинах треугольника линейных напряжений. Несимметрия нагрузки вызывает смещение нейтральной точки приемника O_2 из центра тяжести треугольника. В этом центре находится нейтральная точка генератора O_1 . На диаграмме расстояние между точками O_1 и O_2 определяет узловое напряжение цепи — напряжение смещения нейтрали \dot{U}_0 (рис. 8-16). При отсут-

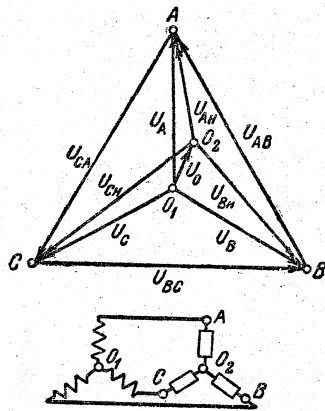


Рис. 8-16. Топографическая диаграмма напряжений нагрузки.

ствии нулевого провода согласно (8-26) и (8-27)

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{Y_A + Y_B e^{-j120^\circ} + Y_C e^{+j120^\circ}}{Y_A + Y_B + Y_C},$$

а так как

$$e^{-j120^\circ} = -\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$e^{+j120^\circ} = -\cos 60^\circ + j \sin 60^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

то, следовательно,

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{Y_A + Y_B \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) + Y_C \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (8-30)$$

Рассмотрим соотношения при нарушении симметрии в простейших условиях однородных проводимостей фаз, т. е. когда сдвиги фаз между напряжениями и токами во всех фазах нагрузки одинаковы. Далее пусть проводимости двух фаз постоянны и равны $Y_B = Y_C$, а проводимость третьей фазы изменяется и может быть выражена через проводимости остальных фаз соотношением $Y_A k = Y_B = Y_C$, где k — действительная переменная величина. На основании (8-30) в этом случае напряжение смещения нейтрали будет:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{Y_A (1 - 0,5k - j0,866 - 0,5k + j0,866)}{Y_A (1 + k + k)}$$

или

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{1 - k}{1 + 2k}.$$

Множитель при \dot{U}_A — действительная величина, следовательно, напряжение смещения нейтрали совпадает по фазе с \dot{U}_A при $k < 1$ (рис. 8-17) и противоположно по фазе \dot{U}_A при $k > 1$. Таким образом, при изменении Y_A нейтраль в топографической диаграмме смещается вдоль прямой линии, совпадающей по направлению с \dot{U}_A . При $Y_A = 0$ ($k = \infty$),

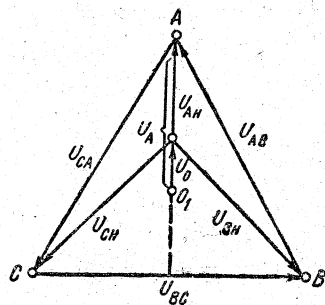


Рис. 8-17. Смещение нейтрали при относительном увеличении проводимости одной фазы нагрузки.

$U_0 = -\frac{\dot{U}_A}{2}$ и нейтраль лежит на середине \dot{U}_{AB} , а при $Y_A = \infty$ ($k = 0$), $\dot{U}_0 = \dot{U}_{AB}$, нейтраль совпадает с точкой A .

Если проводимости фаз звезды нагрузки равны по величине, но различны по своему характеру, то нейтральная точка нагрузки смещается в топографической диаграмме в зависимости от последовательности фаз трехфазной системы. Рассмотрим случай, когда $Y_B = Y_C = g$, а $Y_A = jb$, причем по величине $g = b$. В таких условиях на основании (8-30) напряжение смещения нейтрали будет $\dot{U}_0 = \dot{U}_A (-0,2 + j0,6)$, а напряжения двух одинаковых по проводимостям фаз нагрузки будут:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Bн} &= \dot{U}_B - \dot{U}_0 = \dot{U}_A (-0,5 - j0,866) - \\ &- \dot{U}_A (-0,2 + j0,6) = \dot{U}_A (-0,3 - j1,466) \end{aligned}$$

или

$$U_{Bн} = U_{\phi} \sqrt{0,3^2 + 1,466^2} = U_{\phi} \cdot 1,5;$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cн} &= \dot{U}_C - \dot{U}_0 = \dot{U}_A (-0,5 + j0,866) - \\ &- \dot{U}_A (-0,2 + j0,6) \end{aligned}$$

или

$$U_{Cн} = U_{\phi} \cdot 0,4.$$

Следовательно, напряжение на фазе B нагрузки будет выше напряжения на фазе C в 3,7 раза (рис. 8-18). Если в качестве фазных приемников B и C взять одинаковые электрические лампы, то лампа в фазе B будет гореть значительно ярче, чем лампа в фазе C . Это дает возможность использовать

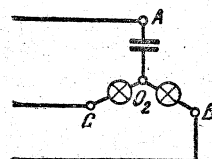
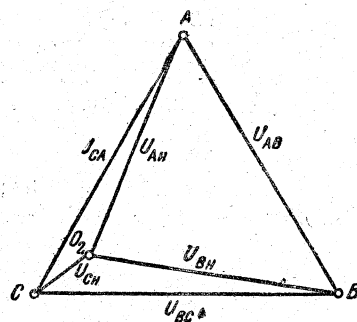


Рис. 8-18. Топографическая диаграмма и схема емкостного указателя последовательности фаз.

описанную схему для определения последовательности фаз трехфазной системы.

8-7. Несимметричная нагрузка фаз при соединении приемника треугольником

Рассмотрим задачу о несимметричном приемнике, соединенном треугольником, вершины которого присоединены к источнику энергии через сопротивления Z_A , Z_B и Z_C ; они могут быть как одинаковыми, так и различными (рис. 8-19). Эта задача просто решается путем преобразования треугольника в звезду по известным формулам

$$Z'_A = \frac{Z_{CA}Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}};$$

$$Z'_B = \frac{Z_{AB}Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}};$$

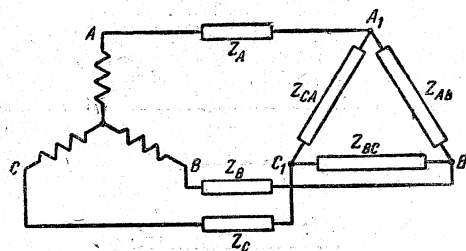


Рис. 8-19. Несимметричная нагрузка при соединении приемника треугольником.

$$Z'_C = \frac{Z_{BC}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

Зная комплексные проводимости каждой фазы

$$Y_A = \frac{1}{Z_A + Z'_A}; \quad Y_B = \frac{1}{Z_B + Z'_B};$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C + Z'_C},$$

нетрудно по формуле (8-26), полагая $Y_0 = 0$, найти смещение нейтрали U_0 , а затем вычислить линейные токи

$$I_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_0) Y_A;$$

$$I_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_0) Y_B;$$

$$I_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_0) Y_C,$$

являющиеся вместе с тем и фазными токами эквивалентной звезды приемника. Тогда фазные напряжения этой эквивалентной звезды будут:

$$\dot{U}'_A = I_A Z'_A; \quad \dot{U}'_B = I_B Z'_B$$

$$\dot{U}'_C = I_C Z'_C,$$

а ее линейные напряжения, являющиеся также линейными напряжениям треугольника:

$$\dot{U}'_{AB} = \dot{U}'_A - \dot{U}'_B; \quad \dot{U}'_{BC} = \dot{U}'_B - \dot{U}'_C;$$

$$\dot{U}'_{CA} = \dot{U}'_C - \dot{U}'_A.$$

Наконец, токи в фазах приемника

$$I_{AB} = \frac{\dot{U}'_{AB}}{Z_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{\dot{U}'_{BC}}{Z_{BC}};$$

$$I_{CA} = \frac{\dot{U}'_{CA}}{Z_{CA}}.$$

8-8. Вращающееся магнитное поле

Одной из основных причин широкого распространения трехфазной системы является возможность получения с ее помощью вращающегося магнитного поля, которое и было применено М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. для создания весьма простого по своему устройству электродвигателя — так называемого асинхронного двигателя.

Если на статоре (рис. 8-20) или роторе разместить три катушки $AХ$, $BУ$

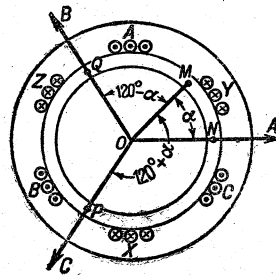


Рис. 8-20. Получение трехфазного вращающегося магнитного поля.

и CZ так, чтобы их оси A , B и C образовали между собой углы по 120° и питать эти три катушки трехфазным током, то в воздушном зазоре возникнет вращающееся магнитное поле.

Каждая катушка в отдельности создает переменное поле, наибольшая индукция которого в любой момент имеет место на оси катушки; распределение индукции вдоль окружности статора (или ротора) обычно имеет характер, близкий к синусоидальному¹, так что в произвольной точке M воздушного зазора, положение которой определяется углом α , магнитная индукция от катушки A ,

$$B_A = B_{A_0} \cos \alpha,$$

где B_{A_0} — индукция в точке N на оси A . В той же точке M , положение которой относительно осей B и C определяется углами $120^\circ - \alpha$ и $120^\circ + \alpha$, индукция от катушки B будет:

$$B_B = B_{B_0} \cos(120^\circ - \alpha),$$

где B_{B_0} — индукция от катушки B в точке Q на ее оси, а индукция от катушки C будет:

$$B_C = B_{C_0} \cos(120^\circ + \alpha),$$

где B_{C_0} — индукция от катушки C в точке P на ее оси. Так как в любой точке воздушного зазора магнитные линии имеют радиальные направления, то магнитная индукция B суммарного по-

¹ Как это достигается, будет рассмотрено в главе, посвященной асинхронным двигателям.

ля в точке M равна сумме индукций от трех катушек:

$$B = B_{A_0} \cos \alpha + B_{B_0} \cos (120^\circ - \alpha) + B_{C_0} \cos (120^\circ + \alpha). \quad (8-30)$$

Если катушки имеют одинаковое число витков и питаются одинаковыми по величине токами, сдвинутыми между собой по фазе на 120° , то индукция каждой катушки на ее оси будет иметь одинаковую амплитуду B_M и может быть выражена формулами

$$B_{A_0} = B_M \sin \omega t;$$

$$B_{B_0} = B_M \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$B_{C_0} = B_M \sin (\omega t + 120^\circ).$$

Подставляя эти выражения в формулу (8-30), приведем ее к виду:

$$B = B_M [\sin \omega t \cos \alpha + \sin (\omega t - 120^\circ) \cos (120^\circ - \alpha) + \sin (\omega t + 120^\circ) \cos (120^\circ + \alpha)]. \quad (8-31)$$

Пользуясь известной тригонометрической формулой

$$\sin A \cos B = \frac{\sin (A + B) + \sin (A - B)}{2},$$

получим:

$$\sin \omega t \cos \alpha = \frac{\sin (\omega t + \alpha) + \sin (\omega t - \alpha)}{2};$$

$$\begin{aligned} \sin (\omega t - 120^\circ) \cos (120^\circ - \alpha) &= \\ &= \frac{\sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t + \alpha - 240^\circ)}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin (\omega t + 120^\circ) \cos (120^\circ + \alpha) &= \\ &= \frac{\sin (\omega t + \alpha + 240^\circ) + \sin (\omega t - \alpha)}{2}. \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в формулу (8-31) и имея в виду, что

$$\begin{aligned} \sin (\omega t + \alpha) + \sin (\omega t + \alpha - 240^\circ) + \\ + \sin (\omega t + \alpha + 240^\circ) = 0, \end{aligned}$$

как сумма трех синусоидально изменяющихся величин одинаковой амплитуды, сдвинутых между собой по фазе на 120° (сдвиг по фазе на $\mp 240^\circ$ равносильен сдвигу на $\mp 120^\circ$), преобразуем формулу (8-31) следующим образом:

$$B = \frac{3}{2} B_M \sin (\omega t - \alpha). \quad (8-32)$$

Таким образом, в одной и той же точке ($\alpha = \text{const}$) индукция изменяется во времени синусоидально с амплитудой, равной $\frac{3}{2} B_M$, и в один и тот же момент времени ($t = \text{const}$) имеет синусоидальное распределение в воздушном зазоре.

Явление, следовательно, носит характер бегущей волны. Действительно, найдем, в какой точке, т. е. при каком значении α , величина B будет положительна и равна своему максимальному значению в заданный момент t . Это будет там, где

$$\sin (\omega t - \alpha) = +1,$$

откуда

$$\omega t - \alpha = \frac{\pi}{2}$$

и

$$\alpha = \omega t - \frac{\pi}{2}. \quad (8-33)$$

Это выражение показывает, что искомое значение α зависит от времени, т. е. искомая точка перемещается по окружности воздушного зазора с угловой скоростью ω и притом так, что угол α возрастает, т. е. перемещение происходит от точки N на оси фазы A к точке Q на оси B или вообще в сторону отстающей фазы. Таким образом, от сложения трех переменных полей, смещенных в пространстве на углы по 120° и взаимно сдвинутых по фазе на $\frac{1}{3}$ периода, получается постоянное по амплитуде равномерно вращающееся магнитное поле, подобное полю, возникающему в двухполюсном генераторе переменного тока благодаря вращению его ротора.

Если катушку C питать током фазы B , а катушку B — током фазы C , т. е. изменить последовательность фаз на обратную, направление вращения поля также изменится.

Поместим в такое поле короткозамкнутый виток на роторе, т. е. на стальном сердечнике, могущем вращаться вокруг оси O вращающегося поля (рис. 8-21); вращающееся поле трехфазной обмотки статора изобразим в виде пары полюсов N и S , вращающихся с угловой скоростью ω .

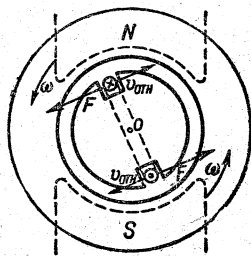


Рис. 8-21. Действие вращающегося поля на короткозамкнутый виток.

В этом витке возникнет индуктированный ток, направление которого определяется по правилу правой руки. При этом надо иметь в виду, что направление относительного движения витка (скорость $v_{отн}$) в магнитном поле обратно направлению вращения самого поля. Вследствие взаимодействия между этим током и полем к сторонам витка будет приложена пара сил FF , направление которых определяется по правилу левой руки. Под действием этой пары сил, т. е. вращающего момента, ротор начинает вращаться в том же направлении, что и поле. По мере того как возрастает скорость вращения, относительная скорость витка уменьшается и вместе с ней уменьшаются индуктированный ток и создаваемый им вращающий момент. Это продолжается до тех пор, пока вращающий момент не станет равен тормозящему моменту на валу ротора, вызванному трением или полезной работой. Установившаяся таким путем скорость вращения ротора будет всегда меньше скорости вращения поля, т. е. ротор будет вращаться асинхронно с полем, причем разность их скоростей будет возрастать с увеличением вращающего момента.

Такое действие вращающегося поля на короткозамкнутый виток и положено в основу устройства трехфазных асинхронных двигателей.

Если к тому же витку подвести извне постоянный ток, то на виток также будет действовать пара сил FF . Ротор в этом случае превращается в электромагнит, который может вращаться только синхронно с полем, т. е. его скорость вращения (число оборотов в минуту) будет одинакова со ско-

ростью вращения поля. Это явление лежит в основе трехфазных двигателей другого типа—синхронных двигателей.

Если токи в фазах трехфазного двигателя не равны по амплитуде или сдвинуты по фазе не на 120° , то в двигателе тоже возникает вращающееся поле, однако оно вращается в этом случае с переменной угловой скоростью и его амплитуда периодически изменяет свою величину.

Если на статоре (или роторе) вместо рассмотренных трех катушек (рис. 8-20) разместить $3p$ катушек (где p —любое целое число), сохранив порядок чередования групп проводов A, B, C, X, Y, Z (по часовой стрелке), т. е. в p раз уменьшить расстояние между соответствующими точками двух соседних групп, то распределение индукции поля каждой фазы вдоль окружности статора изобразится уже не одной синусоидальной волной, а p такими волнами, так что, например, распределение индукции фазы A выразится формулой

$$B_A = B_{A_0} \cos p\alpha.$$

В соответствии с этим и формула (8-32) результирующего поля трех фаз примет вид:

$$B = \frac{3}{2} B_m \sin(\omega t - p\alpha).$$

Поставив снова вопрос, при каком значении α величина B будет равна своему положительному максимальному значению в заданный момент t , получим:

$$\alpha = \frac{\omega}{p} t - \frac{\pi}{2p},$$

т. е. искомая точка перемещается вдоль окружности статора с угловой скоростью $\frac{\omega}{p}$. Таким образом, выбирая

различные значения p , можно ступенями изменять скорость вращения поля и получать при этом так называемое многополюсное вращающееся магнитное поле. Помещенный в такое поле ротор асинхронного или синхронного двигателя будет вращаться в p раз медленнее, чем в двухполюсном вращающемся магнитном поле.

Вращающееся магнитное поле может быть получено не только при по-

мощи трехфазного тока, но также и при помощи любого многофазного тока. В некоторых системах электроизмерительных приборов находят применение двухфазное вращающееся магнитное поле, создаваемое двумя катушками, оси которых не совпадают, и питаемыми токами, сдвинутыми между собой по фазе (§ 12-7).

8-9. Лабораторная работа. Соединение звездой и треугольником приемников трехфазного тока

Задачей первой части работы является изучение соединения звездой приемников трехфазного тока и наблюдение смещения нейтральной точки приемника при нарушении симметрии нагрузки. Для упрощения условий опыта целесообразно в качестве нагрузки применить чисто активные сопротивления — ламповые реостаты. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 8-22. Выполнив соединения, нужно, путем регулирования ламповых реостатов, выравнять нагрузку по фазам. О симметрии нагрузки будет свидетельствовать равенство показаний фазных амперметров и вольтметров. Если не удастся добиться симметрии посредством включения и выключения ламп, то для более тонкой регулировки можно включить в одну из фаз последовательно с ламповым реостатом проволочный движковый реостат (рис. 1-2) небольшого сопротивления, рассчитанный на полный ток лампового реостата при номинальном напряжении ламп. Записав показания приборов, следует убедиться, что в пределах точности вольтметров отношение линейного напряжения к фазному равно $\sqrt{3}$. Нагрузка не содержит реактивных элементов, поэтому фазная мощность равна произведению фазных напряжений и тока, а так как нагрузка фаз симметрична, то показываемая трехфазным ваттметром мощность нагрузки $P = 3U_{\phi} I_{\phi}$.

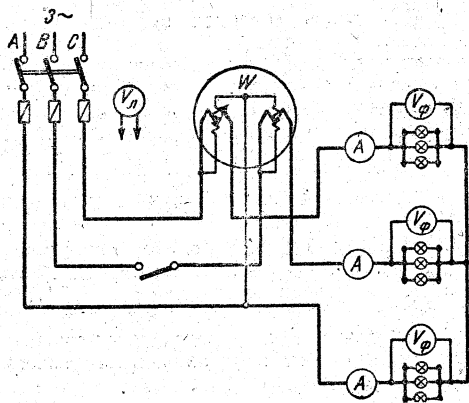


Рис. 8-22. Схема лабораторного опыта для изучения соединения звездой.

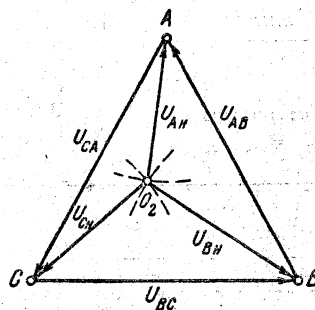


Рис. 8-23. Построение топографической диаграммы на основании показаний вольтметров.

Чтобы проследить влияние несимметрии нагрузки на распределение фазных напряжений, нужно изменить сопротивление одной фазы путем выключения или включения ламп. Это вызовет соответствующее смещение вверх или вниз нейтральной точки нагрузки в топографической диаграмме (рис. 8-17); последнюю легко построить на основании показаний фазных вольтметров. Для этого достаточно из вершин топографического треугольника линейных напряжений провести три дуги радиусами, равными в масштабе построения фазным напряжениям нагрузки (рис. 8-23). Точка пересечения этих дуг определяет положение нейтральной точки нагрузки в диаграмме.

Если время это позволяет, то на опыте интересно убедиться, что при различном характере нагрузки распределение фазных напряжений зависит от последовательности фаз трехфазной системы (напомним, что эта последовательность определяет направление вращения трехфазных двигателей). Для такого опыта нужно в схеме рис. 8-22 заменить ламповый реостат в одной из фаз нагрузки батареей конденсаторов, полное сопротивление которой примерно равно сопротивлению лампового реостата. В двух остальных фазах сопротивления ламповых реостатов должны быть приблизительно равны (их можно точно выравнять до включения конденсаторов). Включив звезду с конденсаторами в одной фазе под напряжение, можно убедиться, что в этом случае фазные напряжения на двух одинаковых ламповых реостатах будут различны: лампы в одной фазе будут гореть значительно ярче, чем в другой. Это определяет последовательность фаз сети: ярче горят лампы, присоединенные к опережающей фазе (A). Если заменить конденсаторы реактивной катушкой, то ярче будут гореть лампы, присоединенные к отстающей фазе (B).

Дальнейшей задачей работы является изучение соединения приемника по схеме треугольника. Выполнив соединения согласно рис. 8-24, нужно выравнять нагрузку по фазам, после чего определить отношение линейных токов к фазным. Кроме того, следует сопоставить показания фазных амперметров и вольтметров с показаниями трехфазного ваттметра: в пределах точности измерения должно иметь место равенство

$$3U_{\phi} I_{\phi} = P.$$

Таблица опыта: соединение звездой и треугольником приемников трехфазного тока

Условия нагрузки	Наблюдено											Вычислено				
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	$P_{из}$	$P=3U_{\phi}I_{\phi}$	$U_{\Delta}:U_{\phi}$	$I_{\Delta}:I_{\phi}$
Y	Равномерная нагрузка															
	Неравномерная нагрузка															
Δ	Равномерная нагрузка															
	Отключение одного линейного провода															
Переключение со звезды на треугольник	Y															
	Δ															

Отключив один линейный провод, можно убедиться, что это вызовет уменьшение примерно в 2 раза двух фазных токов и мощности,

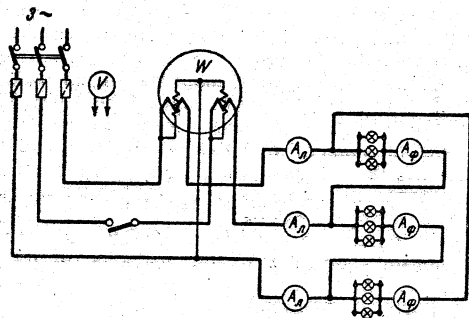


Рис 8-24. Схема лабораторного опыта — изучение соединения треугольником.

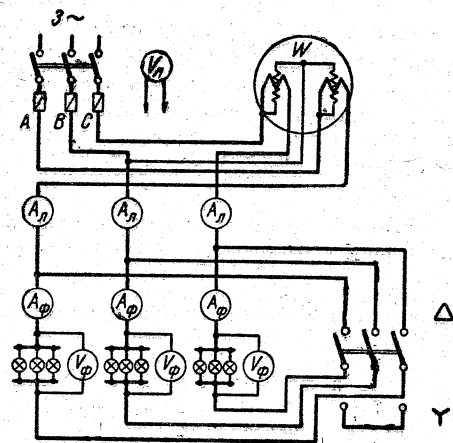


Рис. 8-25. Схема лабораторного опыта — изучение переключения со звезды на треугольник.

потребляемой нагрузкой в целом (несколько меньше из-за уменьшения сопротивления ламп при понижении напряжения).

Последний опыт посвящен переключению нагрузки со звезды на треугольник и обратно. Подобное переключение часто применяется для приемников трехфазного тока (§ 14-16). Нужно выполнить соединения по схеме рис. 8-25. Переход от соединения звездой к соединению треугольником осуществляется здесь посредством трехполюсного переключателя. Сначала нужно поставить переключатель в положение, соответствующее соединению звездой и, включив ток, выравнять нагрузку всех трех фаз. Записав показания измерительных приборов, переключить нагрузку на соединение треугольником и вновь записать показания приборов. При переключении мощность и линейные токи должны измениться примерно в 3 раза, а фазные токи в $\sqrt{3}$ раз.

План работы

1. Выполнить соединения ламповых реостатов по схеме звезды согласно рис. 8-22. Включив ток, выравнять нагрузку отдельных фаз и записать показания приборов. Определить отношение линейных напряжений к фазным. Сопоставить показания фазных приборов с показаниями ваттметра. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов соединения звездой при симметричной нагрузке.

2. При той же схеме соединений (рис. 8-22) изменять сопротивление одной фазы и проследить смещение нейтральной точки нагрузки, построив соответствующую топографическую диаграмму. Определить уменьшение напряжений на двух фазах при выключении третьей.

3. При одинаковом сопротивлении ламповых реостатов в двух фазах в третьей фазе заменить ламповый реостат батареей конден-

саторов. Включив ток, записать показания приборов, затем повторить измерение, изменив последовательность фаз сети по отношению к нагрузке. На основании результатов измерений построить в масштабе топографическую диаграмму цепи.

4. Выполнить соединения ламповых реостатов по схеме треугольника согласно рис. 8-24. Включив ток, выравнять нагрузку отдельных фаз и записать показания приборов. Определить отношение линейных токов к фазным. Сопоставить показания фазных приборов с показаниями трехфазного ваттметра. Построить в масштабе векторную диаграмму

напряжений и токов для соединения треугольником при симметричной нагрузке.

5. При той же схеме соединений отключить один линейный провод и отметить изменения токов и мощности, вызванные этим отключением.

6. Выполнить соединение трехфазной нагрузки с трехполюсным переключателем согласно рис. 8-25. Включить нагрузку под напряжение при соединении звездой и выравнять нагрузку отдельных фаз. Переключить нагрузку на соединение треугольником и сопоставить показания измерительных приборов до и после переключения.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТОКИ

9-1. Возникновение несинусоидальных токов

Синусоидальный закон изменения по времени электрических токов является только частным случаем периодически изменяющихся токов. В электроэнергетических устройствах принимается ряд мер для получения и поддержания переменных токов, возможно более близких к синусоидальным. Однако и в этих устройствах ряд причин вызывает существенные искажения кривых: в некоторых случаях, относительно редких, несколько искажены кривые э. д. с. генераторов переменного тока; основной же причиной искажения кривых токов и напряжений является наличие в сетях нелинейных приемников. Они создают не только несинусоидальные токи в соответствующих ветвях, но и вызывают искажения напряжения на зажимах линейных приемников, создавая несинусоидальные падения напряжения в системах передачи электроэнергии. Одним из важнейших нелинейных приемников являются приемники со стальным магнитопроводом («катушки со стальным сердечником» см. § 10-3 и 10-4). При наличии емкостей в цепях небольшие искажения кривых напряжения вызывают весьма значительные искажения кривой емкостного тока. Таким образом, в ряде случаев при расчетах и исследованиях цепей переменного тока приходится учитывать влияние несинусоидальности.

Далее при выпрямлении переменного тока возникает пульсирующий ток, неизменный по направлению, но перио-

дически изменяющийся по величине. Такой периодический несинусоидальный ток можно рассматривать как состоящий из постоянного (среднего) тока и переменных синусоидальных составляющих. Подобные же периодические токи проходят в анодных цепях ряда электронных приборов (например, в усилителях — см. § 18-2). Следовательно, расчет рабочих цепей выпрямленных токов и цепей электроники также должен вестись специальными приемами. Прежде чем приступить к изучению упомянутых здесь и других нелинейных приемников, мы должны кратко рассмотреть эти специальные методы исследования и расчета несинусоидальных периодических токов.

9-2. Построение кривой тока по заданной кривой напряжения

Простейшая задача, относящаяся к расчету несинусоидальных токов в линейной цепи, заключается в построении кривой тока (в функции времени) по заданной несинусоидальной периодической кривой приложенного напряжения или э. д. с. и параметрам цепи.

Разлагая периодическую функцию напряжения в ряд Эйлера — Фурье, можно представить ее в виде:

$$\begin{aligned} & U_0 + U_{1M} \sin(\omega t + \psi_1) + \\ & + U_{2M} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots = \\ & = U_0 + \sum_{k=1}^n U_{kM} \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (9-1) \end{aligned}$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения, равная среднему

значению напряжения за целый период;

U_{km} — амплитуда k -той гармоники;
 ψ_k — ее начальная фаза, зависящая от выбора начального момента отчета времени ($t=0$).

В качестве примера на рис. 9-1 показаны несинусоидальная кривая напряжения и ее разложение на гармонические составляющие.

Аналитические и графические методы определения всех этих величин по заданной кривой напряжения излагаются в курсах математики; поэтому будем считать их известными. Гармоника с угловой частотой ω или $k=1$ называется обыкновенно основной синусоидной (основной волной) напряжения, а все прочие гармоники, для которых $k>1$, — высшими гармониками напряжения, причем гармоника, для которой $k=2$, называется второй гармоникой, гармоника, для которой $k=3$, — третьей и т. д.

Кривая э. д. с. генераторов переменного тока в отрицательном полупериоде представляет собой зеркальное отображение кривой э. д. с. за положительный полупериод, т. е. не содержит постоянной составляющей. Для кривой э. д. с. имеет силу соотношение

$$f\left(t + \frac{T}{2}\right) = -f(t).$$

В таких случаях, как известно из математики, четные гармоники в составе кривой отсутствуют. Но они, как и постоянная составляющая, встречаются в кривых напряжения, получаемого, например, от выпрямителей.

Смысл уравнения (9-1) заключается в том, что источник энергии с несинусоидальным, но периодически изме-

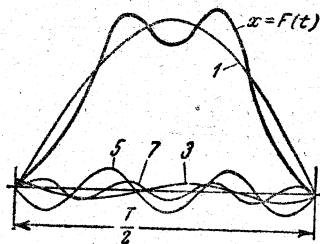


Рис. 9-1. Несинусоидальная кривая периодического процесса [$x=F(t)$] и ее разложение на гармонические составляющие (за полупериод).

няющимся напряжением можно заменить рядом последовательно включенных источников, один из которых дает постоянное напряжение U_0 , а остальные — синусоидальные напряжения различной частоты. В таком случае ток в любом участке цепи можно найти по методу наложения в виде ряда

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^n I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k), \quad (9-2)$$

где I_0 — постоянная составляющая тока, определяемая постоянной составляющей напряжения;

I_{km} — амплитуда k -той гармоники тока, определяемой k -той гармоникой напряжения;

φ_k — угол сдвига фаз между k -той гармоникой напряжения и k -той гармоникой тока.

В том участке цепи, где находится источник энергии, постоянная составляющая тока определяется по формуле

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0}, \quad (9-3)$$

где R_0 — эквивалентное сопротивление всей цепи постоянному току.

Амплитуда каждой гармоники тока находится по формуле

$$I_{km} = \frac{U_{km}}{z_k}, \quad (9-4)$$

где z_k — полное сопротивление цепи при угловой частоте $k\omega$, а угол сдвига фаз φ_k — по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{X_k}{R_k}, \quad (9-5)$$

где R_k и X_k — действительная и мнимая части комплексного сопротивления $Z_k = R_k + jX_k$ всей цепи при угловой частоте $k\omega$. Необходимо иметь в виду, что Z_k , а следовательно, и его составляющие R_k и X_k зависят от частоты, а потому различны для разных гармоник. Например, для схемы, представленной на рис. 9-2:

$$R_0 = R_1 + R_2$$

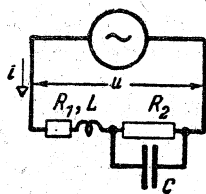


Рис. 9-2. Смешанное соединение индуктивности активных сопротивлений и емкости.

и

$$Z_k = R_1 + jk\omega L + \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{k\omega C}\right)}{R_2 - j \frac{1}{k\omega C}} = R_1 +$$

$$+ jk\omega L + \frac{R_2 \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2 - jR_2^2 \frac{1}{k\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2} =$$

$$= R_k + jX_k,$$

где

$$R_k = R_1 + \frac{R_2 \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2}{R_2^2 + \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2}$$

и

$$X_k = k\omega L - \frac{R_2^2 \frac{1}{k\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2}.$$

При $R_1 = 2,3 \text{ ом}$, $R_2 = 40 \text{ ом}$, $\omega L = 10 \text{ ом}$ и $\frac{1}{\omega C} = 60 \text{ ом}$ эти формулы дают для основной синусоиды ($k=1$); $R=30 \text{ ом}$ и $X=-8,5 \text{ ом}$ (т. е. реактивное сопротивление имеет емкостный характер), а для третьей гармоники ($k=3$); $R=10,3 \text{ ом}$ и $X=+14 \text{ ом}$ (т. е. реактивное сопротивление имеет индуктивный характер). Следовательно, для основной синусоиды

$$Z = \sqrt{30^2 + 8,5^2} = 31,2 \text{ ом};$$

$$\varphi = -\arctg \frac{8,5}{30} = -16^\circ,$$

а для третьей гармоники

$$Z = \sqrt{10,3^2 + 14^2} = 17,4 \text{ ом};$$

$$\varphi = +\arctg \frac{14}{10,3} = +54^\circ.$$

9-3. Действующие значения несинусоидальных токов и напряжений

Общее определение действующего значения тока как среднего квадратичного

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (9-6)$$

одинаково пригодно как для синусоидального, так и для несинусоидального тока. Если дана кривая несинусоидального тока и требуется определить его действующее значение, то стоящее в формуле (9-6) под радикалом выражение среднего квадрата тока за период можно, пользуясь формулой трапеций, приближенно представить в виде:

$$I^2 \approx \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n-1} i_m^2,$$

где n — число частей, на которые разделен период, а i_m — каждая из ординат кривой, проведенных в точках деления. Таким образом,

$$I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n-1} i_m^2}. \quad (9-7)$$

Чем больше n , тем более точный результат даст эта формула. Если

$$i\left(t + \frac{T}{2}\right) = -i(t),$$

т. е. если кривая тока за вторую половину периода представляет собой зеркальное отображение кривой за первую половину периода относительно оси абсцисс, то можно делить на n частей не целый период, а лишь половину периода, и вычислять действующее значение по той же формуле (9-7).

Отношение амплитуды тока к действующему значению

$$k_A = \frac{I_M}{I} \quad (9-8)$$

называется коэффициентом амплитуды. При синусоидальном токе $k_A = \sqrt{2}$. Очень часто коэффициент

амплитуды несинусоидальной кривой сравнивают с этой величиной, вычисляя величину

$$\xi = \frac{k_A}{\sqrt{2}} = \frac{I_M}{I\sqrt{2}}, \quad (9-9)$$

т. е. отношение амплитуды несинусоидального тока к амплитуде такого синусоидального тока, действующее значение которого одинаково с действующим значением данного несинусоидального тока.

Если несинусоидальный ток разложен на гармоники, то его действующее значение можно вычислить более простым путем, пользуясь действующими значениями гармоник

$$I_k = \frac{I_{kM}}{\sqrt{2}}.$$

Умножая на $\omega = 2\pi f$ величины T и t в формуле (9-6) и учитывая, что $f \cdot T = 1$, представим эту формулу в виде:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 dx}, \quad (9-10)$$

где $x = \omega t$. Так как в любой момент

$$i = I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \sum i_k,$$

где i_k обозначает постоянную составляющую тока или мгновенное значение какой-либо из его гармоник, то квадрат этой суммы будет состоять: 1) из суммы квадратов отдельных слагаемых и 2) из удвоенной суммы их попарных произведений, т. е.

$$i^2 = \left(\sum i_k \right)^2 = \sum i_k^2 + 2 \sum i_k i_n,$$

где $n > k$. В таком случае

$$\int_0^{2\pi} i^2 dx = \sum_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k^2 dx + 2 \sum_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k i_n dx.$$

Но так как

$$i_k = I_{kM} \sin(kx + \varphi_k)$$

и

$$i_n = I_{nM} \sin(nx + \varphi_n),$$

где I_{kM} и I_{nM} — амплитуды k -той и n -ной гармоник, то

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} i_k i_n dx &= \\ &= I_{kM} I_{nM} \int_0^{2\pi} \sin(kx + \varphi_k) \sin(nx + \varphi_n) dx. \end{aligned}$$

Как известно из тригонометрии,

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}{2},$$

следовательно,

$$\int_0^{2\pi} i_k i_n dx = 0,$$

так как он может быть представлен как разность интегралов от косинусов за целое число периодов ($n-k$ и $n+k$ — целые числа). Таким образом,

$$\int_0^{2\pi} i^2 dx = \sum_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k^2 dx$$

и

$$I = \sqrt{\sum \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k^2 dx}. \quad (9-11)$$

Но так как период функции $i_k = I_{kM} \sin(kx + \varphi_k)$ равен $\frac{2\pi}{k}$, то

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_k^2 dx &= \frac{1}{2\pi} k \int_0^{\frac{2\pi}{k}} i_k^2 dx = \\ &= \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{k}\right)} \int_0^{\frac{2\pi}{k}} i_k^2 dx \end{aligned}$$

представляет собой среднее значение i_k^2 за период, т. е. квадрат действующего значения k -той гармоник. Отсюда следует, что

$$I = \sqrt{\sum I_k^2},$$

или

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} \quad (9-12)$$

Таким образом, чтобы найти действующее значение несинусоидального тока, достаточно вычислить сумму квадратов действующих значений его гармоник, включая в их число и постоянную

составляющую, и извлечь квадратный корень из этой суммы.

Все сказанное в этом параграфе о действующем значении несинусоидального тока в равной мере относится и к несинусоидальным э. д. с., напряжениям и т. д.

9-4. Активная мощность несинусоидального тока

Активная мощность несинусоидального тока, как и синусоидального, выражается через мгновенные значения напряжения и тока формулой

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

или

$$p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u i dx, \quad (9-13)$$

где $x = \omega t$. Если напряжение и ток представить в виде суммы постоянной составляющей и ряда гармоник, то эта формула примет вид:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (U_0 + u_1 + u_2 + \dots) \times \\ \times (I_0 + i_1 + i_2 + \dots) dx. \quad (9-14)$$

После раскрытия скобок подынтегральная функция представится в форме суммы произведений двоякого вида: в одних из них напряжение и ток будут иметь одинаковые индексы (т. е. одинаковую частоту), а в других — разные. Весь интеграл также представится при этом в виде суммы интегралов с подынтегральными функциями этих двух видов. При рассмотрении действующего значения несинусоидального тока было показано, что

$$\int_0^{2\pi} i_k i_n dx = 0,$$

если $n \neq k$. Подобным же образом можно показать, что

$$\int_0^{2\pi} u_k i_m dx = 0,$$

если $m \neq k$. В таком случае формула (9-14) примет вид:

$$P = \sum_{k=0}^n \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_k i_k dx.$$

Но $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_k i_k dx$ при $k \neq 0$ представляет

собой P_k — среднюю мощность k -той гармоники, так как угол 2π соответствует одному периоду основной синусоиды или целому числу k периодов k -той гармоники. При $k=0$ такой интеграл выражает мощность P_0 постоянной составляющей. Отсюда следует, что

$$P = \sum_{k=0}^n P_k, \quad \text{или} \quad P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots, \quad (9-15)$$

где $P_0 = U_0 I_0$, а P_k при $k \neq 0$ выражается известной формулой

$$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (9-16)$$

Если эти выражения P_0 и P_k подставить в формулу (9-15), то она примет следующий окончательный вид:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (9-17)$$

Таким образом, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей всех гармоник плюс мощность постоянной составляющей.

Очень часто, когда большая точность не играет решающей роли, несинусоидальные напряжения и токи заменяют синусоидальными, имеющими такие же действующие значения, как и данные несинусоидальные напряжения и токи. Такие синусоидальные напряжения и токи называются эквивалентными данным несинусоидальным. Эта замена позволяет пользоваться при расчетах векторными диаграммами, что при несинусоидальных токах было бы невозможно. Между векторами эквивалентных синусоидальных напряжения и тока должен быть такой угол φ , чтобы по формуле $P = UI \cos \varphi$ можно было правильно

вычислить активную мощность. Угол φ , следовательно, должен определяться из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

9-5. Влияние индуктивности и емкости на форму кривой тока

К зажимам индуктивности L может быть приложено несинусоидальное переменное напряжение (рис. 9-3), действующее значение которого

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_k^2}. \quad (9-18)$$

Обычно кривые переменного напряжения симметричны по отношению к оси времени, и поэтому четных гармонических не содержат, что и отображено в (9-18).

Действующее значение каждой из гармонических составляющих тока в цепи определяется по закону Ома:

$$I_k = \frac{U_k}{k\omega L},$$

а действующее значение всего несинусоидального тока будет:

$$I = \sqrt{\left(\frac{U_1}{\omega L}\right)^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{U_3}{\omega L}\right)^2 + \frac{1}{25} \left(\frac{U_5}{\omega L}\right)^2 + \dots + \frac{1}{k^2} \left(\frac{U_k}{\omega L}\right)^2}$$

или

$$I = \frac{1}{\omega L} \sqrt{\frac{U_1^2}{1} + \frac{U_3^2}{9} + \frac{U_5^2}{25} + \dots + \frac{U_k^2}{k^2}}. \quad (9-19)$$

Сопоставление (9-19) и (9-18) показывает, что кривая тока искажена

$$I = \sqrt{(U_1 \omega C)^2 + 9(U_3 \omega C)^2 + 25(U_5 \omega C)^2 + \dots + k^2(U_k \omega C)^2}$$

или

$$I = \omega C \sqrt{U_1^2 + 9U_3^2 + 25U_5^2 + \dots + k^2 U_k^2}. \quad (9-20)$$

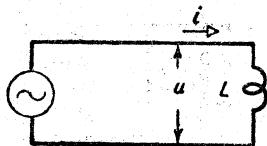


Рис. 9-3. Цепь переменного тока, содержащая только индуктивность.

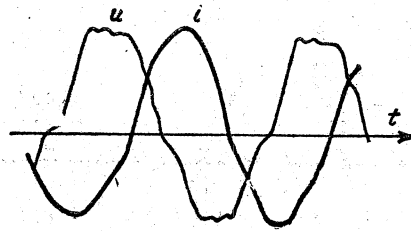


Рис. 9-4. Кривые напряжения и тока цепи, содержащей индуктивность и небольшое активное сопротивление.

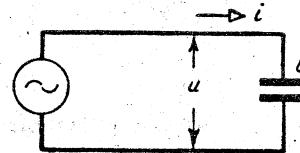


Рис. 9-5. Цепь переменного тока, содержащая только емкость.

меньше, чем кривая напряжения, так как с увеличением порядка гармонической составляющей относительное значение гармонических в кривой тока быстро убывает, — следствие того, что индуктивное сопротивление возрастает пропорционально порядку гармонической составляющей (рис. 9-4).

Если такое же несинусоидальное напряжение приложено к обкладкам емкости (рис. 9-5), то действующие значения гармонических составляющих тока будут определяться по закону Ома:

$$I_k = U_k k \omega C$$

и, следовательно, емкостный ток будет:

Сопоставление этого выражения с (9-18) показывает, что кривая тока искажена значительно больше, чем кривая напряжения (рис. 9-6) вследствие того, что емкостное сопротивление убывает пропорционально порядку гармонической составляющей.

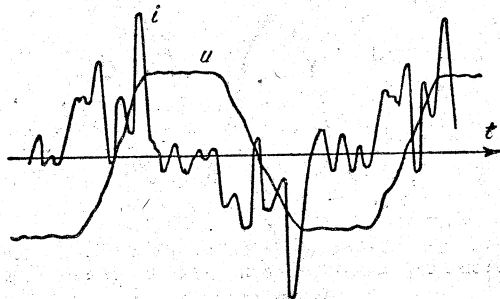


Рис. 9-6. Кривые напряжения и тока конденсатора.

По этой причине расчеты цепей с емкостями в электроэнергетических системах часто требуют уточнения учета фактической значительной несинусоидальности кривой емкостного тока.

Воздействие индуктивности и емкости на кривые тока и напряжения широко используются в различного рода фильтрах (§ 10-11).

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10-1. Нелинейные элементы в цепи переменного тока

В современной электротехнике важную роль играют цепи переменного тока, содержащие нелинейные элементы, т. е. элементы, параметры которых (R , L или C) не являются постоянными величинами, а зависят от тока или напряжения. К таким элементам относятся: реактивные катушки и трансформаторы со стальными сердечниками, если они работают за коленом кривой намагничивания, контакты отключающей аппаратуры, между которыми горит дуга, выпрямители всех видов, электронные и ионные приборы и т. д. Основной особенностью всех нелинейных элементов в цепи переменного тока является то, что при синусоидальном напряжении проходящий через них ток несинусоидален, а при синусоидальном токе несинусоидально напряжение на их зажимах.

В этой главе будут рассмотрены два наиболее часто встречающихся вида нелинейных цепей переменного тока: цепи, содержащие реактивную катушку со стальным сердечником, работающим за коленом кривой намагничивания, и цепи с выпрямляющими элементами или так называемыми вентилями.

10-2. Магнитный поток и э. д. с. катушки со стальным сердечником

Реактивные катушки и трансформаторы при промышленной частоте (50 гц) и при повышенных частотах

(до 20 кгц) обыкновенно снабжаются стальными сердечниками, увеличивающими индуктивность реактивных катушек и соответственно уменьшающими ток холостого хода трансформаторов. Сердечники изготавливаются из листовой электротехнической стали толщиной при промышленной частоте от 0,25 до 0,5 мм, а при повышенных (звуковых) частотах от 0,02 до 0,05 мм для уменьшения потерь от вихревых токов. При частотах порядка 20—40 кгц и выше приходится применять для изготовления сердечника уже магнитодиэлектрики (§ 4-2) или вовсе отказываться от ферромагнитного сердечника; при таких частотах достаточно большое индуктивное сопротивление может быть получено и при сравнительно небольшой индуктивности.

Если катушка, по которой проходит переменный ток, имеет стальной сердечник (рис. 10-1), происходящие в ней процессы значительно осложняются. Прежде всего индуктивность такой катушки не постоянна, а меняется с изменением величины тока, так как магнитный поток в стали непропорцио-

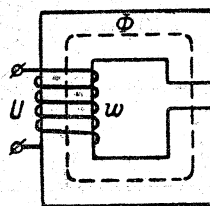


Рис 10-1. Катушка со стальным сердечником.

нален намагничивающему току (см. кривые намагничивания). Это обстоятельство затрудняет пользование выражением $e = -L \frac{di}{dt}$ для расчета тока в такой катушке и заставляет вернуться к основному соотношению

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}, \quad (10-1)$$

где ω — число витков катушки;
 Φ — создаваемый ею магнитный поток.

С другой стороны, вследствие потерь энергии от гистерезиса и вихревых токов угол сдвига фаз ϕ между напряжением и током даже при ничтожно малом активном сопротивлении обмотки катушки оказывается уже меньше 90° .

Наконец, при синусоидальном напряжении на зажимах катушки со стальным сердечником ток в ней имеет несинусоидальную форму, что еще более осложняет происходящий процесс.

Предположим сначала, что активное сопротивление и потери от гистерезиса и вихревых токов ничтожны.

Так как по закону Ома $i = \frac{u + e}{R}$,

или

$$u = iR - e,$$

то при $R=0$ приложенное к катушке напряжение u в любой момент равно по величине и противоположно по знаку наведенной э. д. с., которая, следовательно, будет синусоидальна, если синусоидально напряжение u . Приняв поэтому

$$e = E_m \sin \omega t, \quad (10-2)$$

найдем зависимость между действующим значением э. д. с. E и амплитудой магнитного потока Φ_m . Сопоставляя (10-1) и (10-2), находим:

$$-\omega \frac{d\Phi}{dt} = E_m \sin \omega t$$

или

$$d\Phi = -\frac{E \sqrt{2}}{\omega} \sin \omega t dt,$$

откуда

$$\Phi = -\frac{E \sqrt{2}}{\omega \omega} \int \sin \omega t d\omega t$$

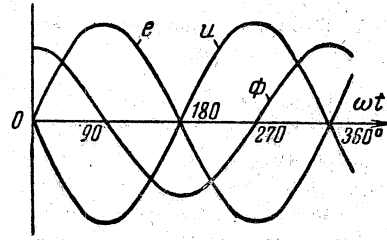


Рис. 10-2. Кривые u , e и Φ катушки со стальным сердечником без учета потерь и насыщения стали.

или

$$\Phi = \frac{E \sqrt{2}}{\omega 2\pi f} \cos \omega t + K, \quad (10-3)$$

где K — постоянная интегрирования.

Но при питании катушки от источника переменного напряжения магнитный поток не может (при установившемся режиме) иметь постоянной составляющей; поэтому $K=0$ и, следовательно,

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t, \quad (10-4)$$

где

$$\Phi_m = \frac{E}{\omega \sqrt{2\pi f}} \quad (10-5)$$

представляет собой амплитуду магнитного потока.

Следовательно, при синусоидальном напряжении, приложенном к зажимам катушки и $R \approx 0$, поток в сердечнике катушки изменяется синусоидально.

Так как $\sqrt{2}\pi = 4,44$, то, определяя E из (10-5), получим:

$$E = 4,44 f \omega \Phi_m. \quad (10-6)$$

Это важное соотношение называют иногда уравнением трансформаторной э. д. с. Оно позволяет найти одну из входящих в него четырех величин, если известны три остальные.

Сравнение выражений (10-4) и (10-2) показывает, что магнитный поток Φ опережает на 90° индуцированную э. д. с. и, следовательно, настолько же отстает от напряжения (рис. 10-2).

10-3. Кривая намагничивающего тока

Пренебрегая потерями от гистерезиса и вихревых токов, легко установить зависимость между магнитным потоком Φ и током i в катушке, пользуясь основной кривой намагничивания. Эта зависимость изображена на рис. 10-3 в виде графика рядом с кривой изменения потока по времени. При помощи этого вспомогательного графика по известному для каждого момента значению потока определяем соответствующее значение тока. Таким образом, на той же фигуре строится кривая изменения тока во времени. Эта кривая значительно отличается от синусоиды, из-за чего ее действующее значение уже не определяется соотношением

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}, \quad (10-7)$$

а должно быть вычислено по более общей формуле

$$I = \frac{I_M}{\xi \sqrt{2}}, \quad (10-8)$$

в которую введен поправочный коэффициент (§ 9-3)

$$\xi = \frac{k_A}{\sqrt{2}}.$$

Чем дальше за коленом кривой намагничивания лежит значение Φ_M , тем более отличается от синусоиды кривая тока и тем большее значение имеет коэффициент ξ . Если сердечник выполнен без воздушных зазоров, а его сечение S одинаково по всей длине, то при заданном материале коэффициент ξ зависит только от максимальной индукции.

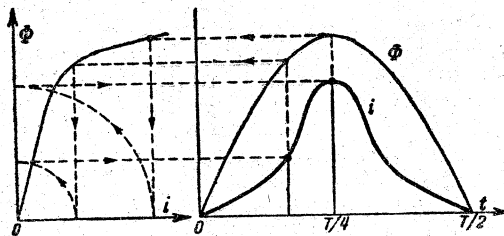


Рис. 10-3. Построение кривой намагничивающего тока с учетом насыщения стали, но без учета потерь.

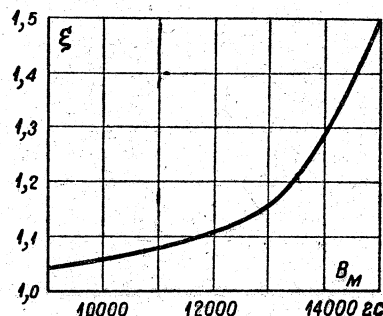


Рис. 10-4. Зависимость ξ от B_M для листовой электротехнической стали.

Примерный график такой зависимости для листовой электротехнической стали представлен на рис. 10-4. Из этого графика видно между прочим, что при $B < 10000$ гс поправочный коэффициент настолько близок к единице, что можно его и не вводить.

При расчетах несинусоидальный ток обыкновенно заменяется эквивалентным ему синусоидальным, т. е. таким синусоидальным током, действующее значение которого равно действующему значению данного несинусоидального тока. Это дает возможность, допуская некоторую неточность, продолжать пользоваться векторными диаграммами, которые имеют смысл только для синусоидально изменяющихся величин. При отсутствии потерь эквивалентный синусоидальный ток должен отставать по фазе на 90° от приложенного к катушке напряжения, совпадая по фазе с магнитным потоком.

10-4. Влияние гистерезиса и вихревых токов на ток катушки

Зависимость между током и магнитным потоком при наличии гистерезиса выражается уже не основной кривой намагничивания, а петлей гистерезиса (рис. 10-5), вследствие чего ход кривой тока i при увеличении и при уменьшении потока оказывается различным: при увеличении тока кривая тока идет выше, а при уменьшении — ниже кривой i , построенной без учета гистерезиса. Максимальное значение тока остается, однако, без изменения. По кривой i можно определить действующее значение тока I и рассматривать его как действующее значение

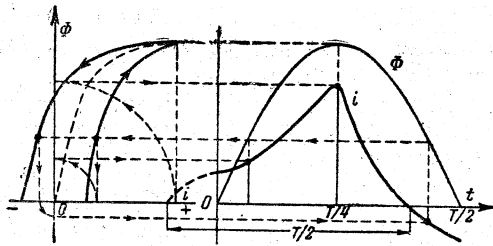


Рис. 10.5. Построение кривой намагничивающего тока на основании петли гистерезиса стали

эквивалентного синусоидального тока. Однако этот эквивалентный ток должен отставать от напряжения уже не на угол 90° , а на меньший угол ψ , так как наличие гистерезиса создает потери, величина которых в определенном масштабе выражается площадью петли гистерезиса. Площадь эта пропорциональна потерям в единице объема за один цикл перемагничивания.

Однако такой способ вычисления потерь от гистерезиса требует экспериментального получения петли гистерезиса. Проще активная мощность потерь от гистерезиса может быть вычислена по эмпирической формуле

$$P_r = \sigma_r G f B_m^\alpha, \quad (10-9)$$

где B_m — амплитуда магнитной индукции;

f — частота;

G — вес сердечника;

σ_r — опытный коэффициент,

а показатель α для $B_m > 10000$ гс может быть принят равным двум.

Зная величину P_r и имея в виду, что

$$P_r = UI \cos \psi = EI \cos \psi,$$

находим выражение для $\cos \psi$:

$$\cos \psi = \frac{P_r}{EI}. \quad (10-10)$$

Зная угол ψ , можно разложить вектор I на две составляющие: активную

$$I_r = I \cos \psi = I \frac{P_r}{EI} = \frac{P_r}{E} \quad (10-11)$$

и реактивную, или намагничивающую,

$$I_\mu = I \sin \psi = \sqrt{I^2 - I_r^2}. \quad (10-12)$$

Если при этом, как это чаще всего и бывает, активная составляющая I_r

намного меньше полного тока I , то намагничивающая составляющая I_μ весьма мало отличается от полного тока и ее можно определять, как и при отсутствии гистерезиса, по формуле, тождественной с (10-8):

$$I_\mu = \frac{I_M}{\varepsilon \sqrt{2}}. \quad (10-13)$$

Вычисляя активную составляющую тока, следует учитывать не только потери от гистерезиса, но также и потери от вихревых токов. При периодическом изменении магнитного потока в сердечнике индуктированная э. д. с. возникает не только в витках обмотки, охватывающей этот сердечник, но и в любом контуре, который можно представить себе в теле самого сердечника (рис. 10-6), если этот контур охватывает хотя бы часть переменного магнитного потока. Так как такие контуры всегда являются замкнутыми, то и в них возникают токи, носящие название вихревых токов. Эти токи, с одной стороны, нагревают сердечник и, если не принять специальных мер, могут привести к совершенно недопустимому повышению его температуры; с другой стороны, они вызывают увеличение тока в обмотке катушки, чем и покрывается затрата энергии на выделение тепла в сердечнике. Таким образом, вихревые токи увеличивают потери в катушке.

Для уменьшения потерь от вихревых токов сердечники трансформаторов и реактивных катушек выполня-

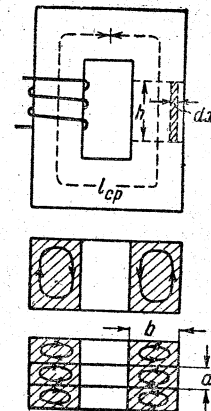


Рис. 10.6. Вихревые токи в сердечнике.

ются не массивными, а набираются из стальных листов, изолированных друг от друга специальной тонкой бумагой или лаком. Такая изоляция (рис. 10-6, внизу) преграждает путь вихревым токам и заставляет их замыкаться в пределах каждого отдельного листа. Это приводит к резкому уменьшению потерь.

Активная мощность потерь от вихревых токов может быть вычислена по формуле

$$P_{\text{в}} = \sigma_{\text{в}} G f^2 B_{\text{м}}^2, \quad (10-14)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — коэффициент, постоянный для листов определенного материала и толщины и пропорциональный квадрату толщины листа при ее изменении. Последнее обстоятельство показывает, в частности, что замена массивного сердечника составленным из листов, изолированных друг от друга лаком или тонкой бумагой (рис. 10-6), очень значительно уменьшает потери от вихревых токов.

Чтобы еще уменьшить потери, в состав стали вводят от 0,5 до 4,5% кремния, который сильно понижает ее удельную электрическую проводимость.

Складывая потери от гистерезиса и потери от вихревых токов, получим полные магнитные потери (потери в стали).

$$P_{\text{с}} = P_{\text{г}} + P_{\text{в}}. \quad (10-15)$$

Эти полные потери практически удобнее вычислять по эмпирической формуле (ГОСТ 802—54)

$$P_{\text{с}} = G p_{10} \left(\frac{B_{\text{м}}}{10^4} \right)^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3}, \quad (10-16)$$

где

$$n = 5,69 \lg \frac{p_{15}}{p_{10}}, \quad (10-17)$$

а p_{10} и p_{15} обозначают потери на 1 кг при частоте 50 гц и максимальной индукции соответственно 10 000 и 15 000 гс. Эта формула дает достаточно точные результаты при $B_{\text{м}}$ от 5 000 до 16 000 гс. Значения p_{10} и p_{15} для некоторых сортов стали приведены в табл. 10-1.

Таблица 10-1
Удельные потери некоторых сортов стали при $f=50$ гц

Марка стали	Толщина листов, мм	Удельные потери вт/кг	
		p_{10}	p_{15}
Э1	0,5	3,6	8,6
Э41	0,5	1,6	3,6
Э41	0,35	1,3	3,2
Э42	0,5	1,45	3,3
Э42	0,35	1,2	2,9

Зная полные потери, находим активную составляющую тока.

$$I_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с}}}{E}. \quad (10-18)$$

На рис. 10-7 представлена векторная диаграмма катушки со стальным сердечником без учета активного сопротивления обмотки. Такая диаграмма может быть построена в следующем порядке. Отложив в произвольном направлении вектор напряжения U , строим под прямым углом к нему в сторону отставания вектор $\Phi_{\text{м}}$, от которого, в свою очередь, отстает на 90° вектор E , равный U по величине. Намагничивающая составляющая тока I_{μ} совпадает по фазе с магнитным потоком $\Phi_{\text{м}}$, а активная составляющая тока $I_{\text{с}}$ совпадает по фазе с напряжением U . Складывая геометрически эти два тока, получаем эквивалентный синусоидальный ток

$$I = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{\text{с}}^2}, \quad (10-19)$$

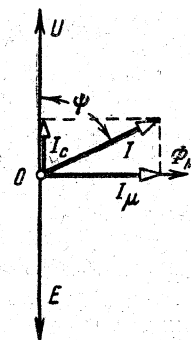


Рис 10-7. Упрощенная векторная диаграмма катушки со стальным сердечником.

отстающий по фазе от напряжения на угол ψ .

При повышенных частотах необходимо принимать во внимание еще одно явление, которое при низких частотах проявляется весьма слабо: это — магнитный поверхностный эффект. Заключается он в том, что вихревые токи по закону Ленца оказывают на стальные листы размагничивающее действие, так что магнитная индукция не распределяется равномерно по всему сечению листа, а уменьшается по направлению от поверхности в глубь листа, поскольку внутренние слои листа охватываются большими вихревыми токами, чем внешние. Эта неравномерность распределения магнитной индукции возрастает с увеличением частоты.

10-5. Векторная диаграмма и схема замещения катушки со стальным сердечником

Представленная на рис. 10-7 векторная диаграмма не учитывает двух обстоятельств: что обмотка катушки обладает активным сопротивлением R и что, кроме основного магнитного потока Φ , линии которого замыкаются по стальному сердечнику катушки, существует еще так называемый поток рассеяния Φ_p , замыкающийся не по стальному сердечнику, а в окружающем сердечник пространстве. Благодаря наличию потока рассеяния индуктированная э. д. с. катушки определяется вместо формулы (10-1) формулой

$$\begin{aligned} e &= -\omega \frac{d(\Phi + \Phi_p)}{dt} = \\ &= -\omega \frac{d\Phi}{dt} - \omega \frac{d\Phi_p}{dt}, \end{aligned} \quad (10-20)$$

а следовательно, в составе приложенного напряжения должна быть слагающая

$$u_p = \omega \frac{d\Phi_p}{dt} = \frac{d(\omega\Phi_p)}{dt}, \quad (10-21)$$

уравновешивающая дополнительную э. д. с., обусловленную потоком рассеяния. Так как поток рассеяния замыкается в неферромагнитной среде, он не вызывает дополнительных потерь энергии, пропорционален току в

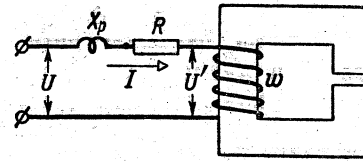


Рис. 10-8. Эквивалентная схема для учета потока рассеяния и потерь катушки.

катушке и совпадает с ним по фазе, так что

$$\omega\Phi_p = L_p i \quad (10-22)$$

и слагающая напряжения

$$u_p = \frac{d(\omega\Phi_p)}{dt} = L_p \frac{di}{dt}, \quad (10-23)$$

где L_p — так называемая индуктивность рассеяния катушки. Эта слагающая напряжения, называемая обычно индуктивным падением напряжения, по фазе опережает ток на 90° и имеет действующее значение

$$U_p = I \omega L_p = I X_p, \quad (10-24)$$

где X_p — индуктивное сопротивление рассеяния.

Таким образом, желая учесть активное сопротивление обмотки и поток рассеяния, нужно дополнительно ввести в схему реактивной катушки (рис. 10-1) реостат, обладающий сопротивлением R , и катушку с индуктивным сопротивлением X_p (рис. 10-8). Напряжение \dot{U} на зажимах реальной катушки будет равно напряжению на зажимах полученной цепи, т. е. сложится из напряжения \dot{U}' на зажимах катушки без активного сопротивления обмотки и без рассеяния, для которой сохраняется сила ранее построенная векторная диаграмма (рис. 10-7), активного падения напряжения IR , совпадающего по фазе с током \dot{I} , и индуктивного падения напряжения $\dot{I}X_p$, опережающего \dot{I} на 90° . Таким образом, получается полная векторная диаграмма (рис. 10-9) катушки со стальным сердечником.

Потребляемая катушкой активная мощность P складывается из магнитных потерь P_c и электрических потерь (или потерь в меди) $P_m = I^2 R$, так что

$$P = P_c + P_m. \quad (10-25)$$

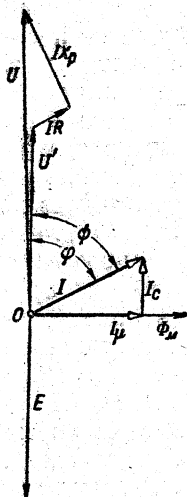


Рис. 10-9. Полная векторная диаграмма катушки со стальным сердечником.

При рассмотрении ряда вопросов катушка со стальным сердечником может быть заменена эквивалентной схемой, состоящей из активных сопротивлений и постоянных индуктивностей и представляющей собой дальнейшее развитие схемы, представленной на рис. 10-8. В такой схеме сохраняются сопротивление R и индуктивность рассеяния L_p , а катушка без активного сопротивления обмотки и рассеяния заменяется сопротивлением R_c и индуктивностью L_c (рис. 10-10), величины которых выбираются

таким образом, чтобы при заданном напряжении U' сохранились заданный ток I и угол сдвига фаз ψ . При этом магнитные потери P_c в реальной катушке будут заменены электрическими потерями $I^2 R_c$ в сопротивлении R_c . Для выполнения указанных условий необходимо соблюдение соотношений:

$$z = \sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2} = \frac{U'}{I}$$

и

$$\frac{\omega L_c}{R_c} = \operatorname{tg} \psi,$$

из которых нетрудно получить:

$$R_c = z \cos \psi = \frac{U'}{I} \cos \psi \quad (10-26)$$

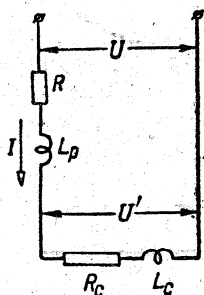


Рис. 10-10. Эквивалентная схема катушки со стальным сердечником.

или

$$R_c = \frac{U' I \cos \psi}{I^2} = \frac{P_c}{I^2}, \quad (10-27)$$

а также

$$\omega L_c = z \sin \psi = \frac{U'}{I} \sin \psi. \quad (10-28)$$

10-6. Последовательное соединение катушки со стальным сердечником и конденсатора

Как известно (§ 7-12), при последовательном соединении катушки и конденсатора может иметь место резонанс напряжений, условием которого является определенное соотношение между частотой приложенного напряжения, емкостью конденсатора и индуктивностью катушки.

Если катушка имеет стальной сердечник, работающий за коленом кривой намагничивания, то явление резонанса в связи с нелинейной зависимостью между магнитным потоком и током в цепи, т. е. из-за зависимости индуктивности катушки от тока, получает ту особенность, что резонанс может достигаться путем изменения тока в цепи без какой-либо регулировки катушки или конденсатора. Резонанс при наличии у катушки стального сердечника получил особое название феррорезонанса напряжений. Рассмотрим это явление в первом приближении, пренебрегая потерями в стали сердечника и считая ток синусоидальным.

Так как реактивная слагающая U_L напряжения на катушке (рис. 10-11) пропорциональна амплитуде магнитного потока

$$U_L = 4,44 f \omega \Phi_m,$$

то вольт-амперная характеристика катушки (без учета активного сопротив-

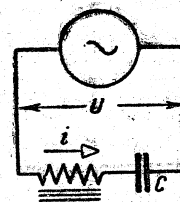


Рис. 10-11. Схема цепи, в которой возможен феррорезонанс напряжений.

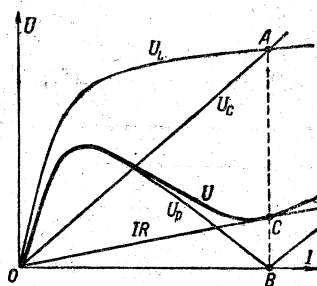


Рис. 10-12. Построение вольт-амперной характеристики цепи рис. 10-11.

ления обмотки) будет иметь вид, подобный кривой намагничивания (рис. 10-12). Вольт-амперная характеристика конденсатора построена на том же чертеже по уравнению

$$U_C = I \frac{1}{\omega C},$$

т. е. представляет собой прямую. Так как U_L и U_C по фазе противоположны, то абсолютная величина U_p реактивного напряжения равна их разности, т. е. $U_p = \pm(U_L - U_C)$, и равна нулю при токе, соответствующем точке пересечения A вольт-амперных характеристик катушки и конденсатора, в которой $U_L = U_C$. Это и есть точка резонанса. Активное напряжение IR изображается в зависимости от тока прямой OC . Величина суммарного напряжения U , соответствующая каждому значению тока I , определяется по формуле

$$U = \sqrt{U_p^2 + (IR)^2}. \quad (10-29)$$

Зависимость напряжения U от тока построена на том же чертеже. Из графика видно, что рассчитанное по формуле (10-29) при непрерывном увеличении тока напряжение U сначала возрастает, затем уменьшается, имеет минимум вблизи точки резонанса и далее снова возрастает.

Однако такого вида график может быть получен экспериментально лишь в том случае, если имеется возможность непрерывного увеличения тока. При непрерывном возрастании напряжения на зажимах цепи, когда U должно рассматриваться как незави-

симое переменное и откладываться по оси абсцисс, а I — как функция и откладываться по оси ординат (рис. 10-13), с увеличением напряжения от нуля изменение тока идет сначала по нижней части кривой до точки a , после которой непрерывному увеличению тока соответствует не увеличение, а уменьшение напряжения. Поэтому дальнейшее увеличение напряжения вызовет скачкообразный переход процесса в точку b , т. е. внезапное увеличение тока, после чего возрастание тока пойдет плавно по верхней части кривой. При уменьшении напряжения процесс будет идти непрерывно по верхней части кривой не до точки b , а до точки c , в которой непрерывному уменьшению тока соответствует не уменьшение, а увеличение напряжения, благодаря чему при дальнейшем уменьшении напряжения происходит скачок в точку d , а затем уже непрерывное уменьшение тока по нижней части кривой.

То обстоятельство, что за точкой резонанса (т. е. при больших токах) значительному изменению приложенного к цепи напряжения U соответствует сравнительно малое изменение напряжения на катушке (особенно при малых R , когда его можно считать равным U_L), позволяет использовать феррорезонансную схему для стабилизации напряжения, т. е. для получения практически постоянного напряжения на зажимах катушки при значительных колебаниях напряжения сети.

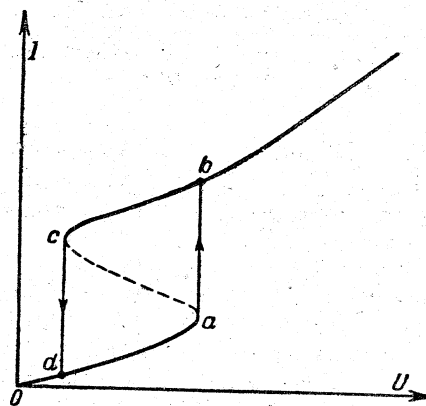


Рис. 10-13. Кривая изменения тока цепи рис. 10-11 при непрерывном независимом изменении напряжения.

10-7. Однополупериодное выпрямление

Мы будем изучать здесь цепи переменного тока, содержащие идеальные вентили, сопротивление которых в пропускающем направлении $R_{пр}=0$, а в «обратном» направлении $R_{обр}=\infty$. Конкретные устройства реальных вентилей различных систем будут рассмотрены в гл. 17.

Самая простая выпрямительная схема (рис. 10-14) состоит из источника энергии, например трансформатора (на рис. 10-14 не показан), какого-либо вентиля B и приемника R (кроме полупроводниковых вентилей могут быть применены электронные лампы, газотроны, тиратроны и др.). В схеме с одним вентилем используется только одна половина периода переменного напряжения; поэтому такая схема называется однополупериодной. Условимся считать положительным указанное на рис. 10-14 направление от анода к катоду, в котором вентиль пропускает ток. При синусоидальном напряжении источника ток в цепи в течение положительного полупериода напряжения также будет синусоидаль-

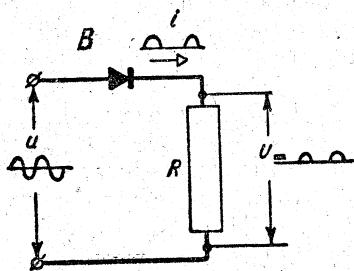


Рис. 10-14. Схема однополупериодного выпрямления.

ным, совпадая по фазе с напряжением, а в течение отрицательного полупериода напряжения ток будет равен нулю (рис. 10-15).

Постоянная составляющая I_0 этого тока, т. е. его среднее значение за целый период, определяется путем деления площади синусоиды за полупериод на продолжительность целого периода. Но площадь синусоиды за полупериод равна $I_{ср} \frac{T}{2}$, где $I_{ср} = \frac{2}{\pi} I_M$ — среднее

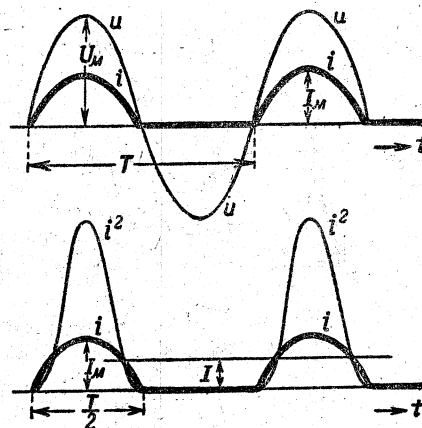


Рис. 10-15. Кривые переменного напряжения, выпрямленного тока и квадрата выпрямленного тока при однополупериодном выпрямлении.

значение за полупериод; следовательно,

$$I_0 = \frac{I_{ср} \frac{T}{2}}{T} = \frac{I_{ср}}{2} = \frac{1}{\pi} I_M = 0,32 I_M. \quad (10-30)$$

Действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt},$$

так как во втором полупериоде $i^2 = 0$ (рис. 10-15). Но, как известно, при синусоидальном токе

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt = I^2,$$

т. е. представляет собой квадрат действующего значения тока, а

$$I^2 = \frac{I_M^2}{2},$$

поэтому в нашем случае

$$\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt = \frac{I_M^2}{4}$$

и действующее значение выпрямленного тока

$$I = \sqrt{\frac{I_M^2}{4}} = \frac{I_M}{2}. \quad (10-31)$$

Напряжение на сопротивлении R называется выпрямленным напряжением. Его постоянная составляющая U_0 может быть определена путем умножения постоянной составляющей тока I_0 на сопротивление R :

$$U_0 = I_0 R = \frac{1}{\pi} I_M R = \frac{U_M}{\pi},$$

т. е. она в 2 раза меньше среднего значения $\frac{2}{\pi} U_M$ синусоидального напряжения.

Активная мощность цепи

$$P = I^2 R = \frac{I_M^2 R}{4} = \frac{U_M I_M}{4}.$$

Но $U_M = U\sqrt{2}$, где U — действующее значение приложенного синусоидального напряжения, а $I_M = 2I$, где I — действующее значение тока в цепи (одинакового до и после вентиля).

Следовательно,

$$P = \frac{U\sqrt{2} \cdot 2I}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} UI = 0,707S, \quad (10-32)$$

где $S = UI$ — полная мощность цепи (т. е. нагрузки и вентиля вместе). Таким образом, несмотря на отсутствие в цепи реактивных сопротивлений, активная мощность оказывается меньше полной и коэффициент мощности равен 0,707 (из-за несинусоидальной формы кривой тока).

10-8. Двухполупериодное выпрямление

Для использования обеих полуобмоток переменного напряжения широко применяется предложенная в 1901 г. В. Ф. Миткевичем (впоследствии академиком) двухполупериодная схема (рис. 10-16), которая содержит два вентиля, включенных навстречу друг другу, и в которой приемник включается между общей точкой двух вентилях и серединой вторичной обмотки трансформатора. Если в каждой половине этой обмотки считать положительным то направление тока, при котором соответствующий вентиль про-

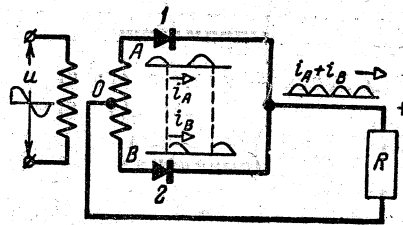


Рис. 10-16. Схема двухполупериодного выпрямления.

пускает ток (от анода к катоду), то ток в каждой половине обмотки и в каждом вентиле будет синусоидальным в течение положительного (для этой половины) полупериода и равным нулю в течение отрицательного полупериода. Но в нагрузке положительные направления обоих токов совпадают, и поэтому ток в ней будет существовать в течение обоих полупериодов, совпадая с током одного вентиля в течение одного полупериода и с током другого вентиля — в течение другого. Понятно, что его постоянная составляющая будет теперь вдвое больше, чем при однополупериодном выпрямлении, и выразится, следовательно, при идеальных вентилях формулой

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_M = 0,64I_M. \quad (10-33)$$

Так как за обе половины периода $\int i^2 dt$ будет теперь иметь одинаковые значения, то

$$\int_0^T i^2 dt = 2 \int_0^{T/2} i^2 dt,$$

следовательно, квадрат действующего значения выпрямленного тока будет теперь в 2 раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении, а само действующее значение — в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в формуле (10-31):

$$I = \frac{I_M}{2} \sqrt{2} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}, \quad (10-34)$$

т. е. будет равно действующему значению синусоидального тока, имеющего ту же амплитуду I_M .

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения согласно (10-33) будет определяться формулой

$$U_0 = I_0 R = \frac{2}{\pi} I_M R = \frac{2}{\pi} U_M, \quad (10-35)$$

т. е. будет равна среднему значению переменного напряжения на каждой половине обмотки трансформатора.

Активная мощность цепи

$$P = I^2 R = \frac{I_M^2 R}{2} = \frac{U_M I_M}{2},$$

где $U_M = U\sqrt{2}$, а $I_M = I\sqrt{2}$.

Следовательно,

$$P = \frac{2UI}{2} = UI = S, \quad (10-36)$$

т. е. при двухполупериодном выпрямлении активная мощность равна полной.

Кроме схемы Миткевича, двухполупериодное выпрямление может быть осуществлено еще по мостовой схеме (рис. 10-17). В одну диагональ выпрямительного моста включается приемник R , а во вторую диагональ —

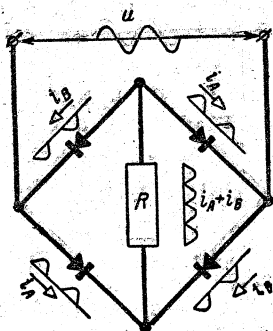


Рис. 10-17. Мостовая схема двухполупериодного выпрямления.

источник с синусоидальным напряжением. При одном направлении приложенного напряжения ток i_A проводят два вентиля, лежащие в двух противоположных плечах моста, при обратном направлении напряжения ток i_B проводят два других вентиля. Преимуществом схемы является то, что для нее не требуется трансформатор. Если же

10*

трансформатор необходим для получения определенного значения постоянного напряжения, то мостовая схема будет нагружать его обмотки током обе половины периода. Обратное напряжение, приходящееся при одном и том же выпрямленном напряжении на каждый вентиль, в мостовой схеме в 2 раза меньше. С другой стороны, для мостовой схемы необходимы четыре вентиля вместо двух, что связано с увеличением потерь энергии в вентилях. Так как кривая выпрямленного тока в мостовой схеме имеет такой же вид, как и в схеме Миткевича, то для мостовой схемы при идеальных вентилях сохраняют силу все соотношения, выведенные выше для схемы Миткевича.

10-9. Многофазное выпрямление

В рассмотренных схемах выпрямленное напряжение при пульсациях изменяется от амплитудного значения до нуля. Многофазное выпрямление дает возможность значительно

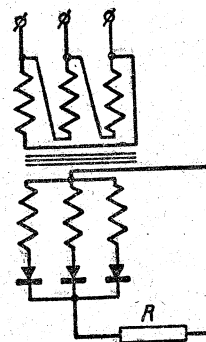


Рис. 10-18. Трехфазная схема выпрямления.

уменьшить эти пульсации. На рис. 10-18 показана схема трехфазного выпрямления. В этом случае (при идеальных вентилях) в каждый данный момент ток проводит только тот вентиль, анод которого соединен с зажимом обмотки, имеющим наибольший положительный потенциал по отношению к средней точке трансформатора. В таких условиях выпрямленное напряжение будет изменяться по кривой, состоящей из вершущек положительных

полуволн фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора (рис. 10-19).

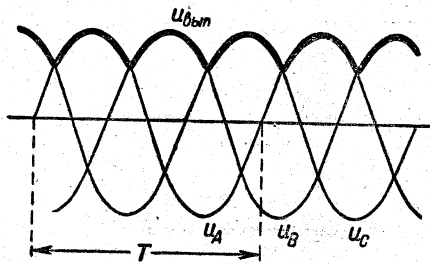


Рис. 10-19. Кривая выпрямленного напряжения при трехфазном выпрямлении.

А. Н. Ларионов (в настоящее время член-корреспондент Академии наук СССР) предложил трехфазную мостовую схему выпрямления (рис. 10-20), в которой совмещаются принципы многофазного выпрямления и мостовой схемы.

В мостовых схемах нулевая точка трансформатора для выпрямления не нужна, поэтому вторичная обмотка может быть соединена как звездой, так и многоугольником (при трехфазном токе треугольником). В этих схемах половина вентилей образует катодную группу, где все катоды вентилей

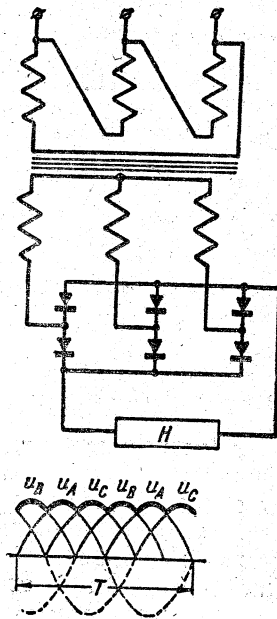


Рис. 10-20. Трехфазная мостовая схема выпрямления.

лей соединены между собой, а у второй половины вентилей между собой соединены все аноды — это анодная группа.

При работе мостовых схем выпрямляются обе полуволны переменных напряжений всех вторичных обмоток трансформатора, благодаря чему пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются, а частота их соответствует удвоенному числу фаз системы (при трехфазном питании — шести фазные пульсации, т. е. шесть пульсаций за период, рис. 10-20). В схеме рис. 10-20 в данный момент работает тот вентиль катодной группы, у которого анод в это время имеет наибольший положительный потенциал, а также тот вентиль анодной группы, у которого катод имеет наибольший по абсолютной величине отрицательный потенциал. Таким образом, всегда работают два вентиля, соединенных последовательно через приемник H .

10-10. Сглаживающие фильтры

При любом способе выпрямления переменного тока на выходе выпрямителя получается пульсирующее напряжение, т. е. выпрямленное напряжение, не изменяя знака, периодически изменяет свое значение. Оно, как известно, может быть разложено на постоянную составляющую U_0 и ряд гармоник. Практически в большинстве случаев приходится принимать в расчет лишь первую гармонику, частота которой равна частоте пульсаций $f_{\text{пуль}}$.

Коэффициентом пульсаций называется отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей

$$q = \frac{U_{1M}}{U_0}. \quad (10-37)$$

При двухполупериодном выпрямлении $q=0,667$, при трехфазном 0,250, при шести фазном 0,057.

Для уменьшения пульсаций между выпрямителем и приемником вводится промежуточное звено — сглаживающий фильтр. Такие фильтры состояются из катушек, конденсаторов, а в некоторых случаях и сопротивлений. Индуктивность, включенная по-

следовательно с нагрузкой, сглаживает пульсации тока в нагрузке, воспринимая на себя гармоники напряжения, а емкость, включенная параллельно нагрузке, сглаживает пульсации напряжения, отвлекая через себя гармоники тока. Наконец, соединение индуктивности и емкости дает возможность воспользоваться явлением резонанса для подавления определенной полосы частот.

Простейшими фильтрами являются сглаживающая катушка, включаемая последовательно с нагрузкой, и сглаживающий конденсатор, включаемый параллельно нагрузке. Сглаживание пульсаций усиливается при одновременном использовании индуктивности и емкости, что имеет место в Г-образных, Т-образных и П-образных фильтрах (рис. 10-21).

При параллельном соединении с нагрузкой последовательного контура, настроенного в резонанс на частоту пульсаций, т. е. удовлетворяющего условию $\omega_{\text{пул}}L = \frac{1}{\omega_{\text{пул}}C}$, сопротивление

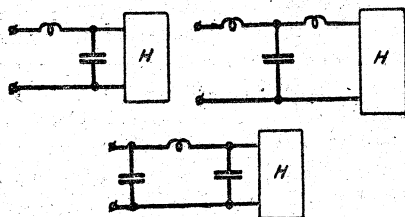


Рис. 10-21. Г-образный, Т-образный и П-образный фильтры.

этого контура для переменного тока частоты $f_{\text{пул}}$ будет равно нулю (если пренебречь его активным сопротивлением); следовательно, этот переменный ток будет проходить через резонансный фильтр, минуя нагрузку (рис. 10-22). Фильтр со схемой парал-

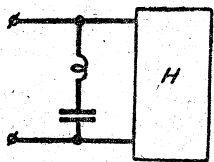


Рис. 10-22. Резонансный фильтр.

ельного контура, настроенный в резонанс на частоту пульсаций и включенный последовательно с нагрузкой

(рис. 10-23), будет представлять собой бесконечно большое сопротивление для переменного тока, имеющего частоту пульсаций (фильтр-пробка), конечно, если не учитывать

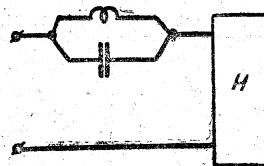


Рис. 10-23. Фильтр-пробка.

активную проводимость элементов фильтра. Наличие активных сопротивлений в элементах резонансных фильтров ослабляет их сглаживающее действие.

Работа фильтра оценивается коэффициентом сглаживания

$$s = \frac{q_1}{q_2},$$

где q_1 и q_2 — коэффициенты пульсаций до и после фильтра.

10-11. Лабораторная работа. Характеристики цепи феррорезонанса напряжений и феррорезонансный стабилизатор напряжения

Задачей данного лабораторного исследования является сначала экспериментальное получение характеристик цепи феррорезонанса напряжений и определение стабилизирующих свойств схемы, затем должна быть изучена на соответствующей простой модели усовершенствованная схема феррорезонансной стабилизации, близкая к практически применяемым.

Сначала нужно на опыте получить характеристики цепи феррорезонанса напряжений, для чего можно воспользоваться схемой рис. 10-24.

В схеме рис. 10-24 для плавного изменения напряжения U на входных зажимах

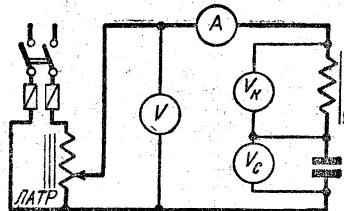


Рис. 10-24. Схема лабораторного опыта — снятие характеристик феррорезонансного контура.

феррорезонансного контура применен нижеописанный (§ 13-14) лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР). Выполнив соединения схемы, следует перед включением цепи под напряжение поставить подвижной контакт ЛАТР в положение, соответствующее нулю выходного напряжения; затем, включив установку под напряжение, постепенно повышать напряжение U посредством передвижения контакта ЛАТР и записывать соответствующие значения тока и частичных напряжений цепи. Обратить особое внимание на условия скачка, — когда ток и частичные напряжения резко возрастают во много раз. Повышать напряжение U пока напряжение на емкости U_c не достигнет предельного значения, допустимого по условиям изоляции конденсаторов или условиям безопасности экспериментирующим (250 в). Затем также плавно понижать напряжение U , записывая показания приборов. Обратить внимание на то, что скачкообразному уменьшению тока и частичных напряжений соответствует другое значение напряжения U , меньшее, чем U , соответствующее скачку при повышении напряжения.

Ознакомившись таким путем с общим ходом явлений феррорезонанса, нужно определить диапазон относительной стабилизации напряжения на катушке. Нижняя его граница определяется напряжением скачка, а верхняя — предельным допустимым напряжением на обкладках конденсаторов.

Данные опыты позволяют определить изменение напряжения на катушке ΔU_k , соответствующее изменению напряжения ΔU в пределах от напряжения скачка до наибольшего допустимого напряжения, а это позволяет подсчитать средний коэффициент стабилизации напряжения на катушке $K_{\text{стаб}} = \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{\Delta U_k}{U_k}$ (§ 3-4).

Коэффициент стабилизации напряжения, достижимый при использовании простой схемы феррорезонанса, относительно мал (порядка 10). Обычно для повышения его применяется более сложная схема использования цепи феррорезонанса напряжений — схема с линейной компенсацией изменения напряжения на катушке. На рис. 10-25 показана подобная схема. Здесь катушка со стальным сердечником, находящаяся в условиях насыщенного сердечника, снабжена вторичной обмоткой (т. е. по существу является трансформатором с насыщенным сердечником), а параллельно емкости включен ЛАТР 2 (лабораторный автотрансформатор регулируемый,

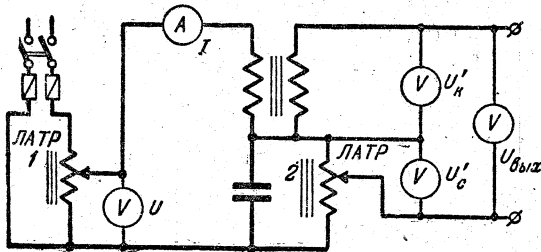


Рис. 10-25. Схема лабораторного опыта — феррорезонансный стабилизатор напряжения.

см. § 13-14). Последний должен быть подобран так, чтобы в рабочих условиях схемы его намагничивающий ток был незначителен по сравнению с током основной цепи, проходящим через емкость. Следовательно, ЛАТР практически должен не влиять на режим цепи феррорезонанса напряжений. Вторичная обмотка катушки должна быть так соединена с выходными зажимами ЛАТР, чтобы вторичное напряжение катушки U'_k было противоположно по фазе выходному напряжению ЛАТР U'_c . Если это условие выполнено, то выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будет равно разности напряжений, т. е.

$$U_{\text{вых}} = U'_k - U'_c.$$

Регулируя соответственно ЛАТР2, легко подобрать U'_c так, чтобы выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ почти не зависело от U (при изменении последнего в пределах определенного диапазона). Практически такое устройство может давать

коэффициент стабилизации $k_{\text{стаб}} = \frac{\Delta U}{U} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}$ порядка 100.

План работы

1. Выполнить соединения согласно рис. 10-24. Поставить подвижной контакт ЛАТР в положение, соответствующее нулю напряжения на выходных его зажимах.

2. Включив ток, постепенно повышать U до предельного значения, допустимого для цепи эксперимента по условиям изоляции конденсаторов (не свыше 250 в). Затем также постепенно

Таблица опыта: характеристики цепи феррорезонанса напряжений

Наблюдено				Вычислено
U	I	U_k	U_c	$K_{\text{стаб}} = \frac{\Delta U}{U} : \frac{\Delta U_k}{U_k}$

понижать напряжение U до нуля. Результаты измерения записывать в таблицу.

3. На основании результатов измерений построить кривые зависимости частичных напряжений цепи и тока от напряжения на зажимах.

4. Выполнить соединения согласно рис. 10-25. Установить движок ЛАТР 2, включенного параллельно емкости, на нуль.

5. Включить ток. Довести режим основной цепи феррорезонанса до условий насыщенного сердечника и определить примерный диапазон работы стабилизирующего устройства (высшее и низшее значения U).

6. Посредством U'_c скомпенсировать изменение выходного напряжения при высшем значении U (т. е. установить $U'_c = \Delta U'_k$) и определить достигнутый коэффициент стабилизации.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

11-1. Закон коммутации

Когда под постоянное или синусоидальное напряжение включается какая-нибудь цепь, ни один участок которой не обладает сколько-нибудь заметной емкостью или индуктивностью, в цепи практически мгновенно устанавливается тот режим постоянного или синусоидального тока, изучению которого были посвящены предыдущие главы. Но если хоть один из участков цепи обладает емкостью или индуктивностью, то токи и напряжения во всех участках цепи лишь постепенно принимают свои установившиеся значения. Причина этого заключается в том, что возникновение электрических полей в участках с емкостью и магнитных полей в участках с индуктивностью связано с накоплением в этих полях определенных количеств энергии, а такое накопление не может происходить мгновенно. Действительно, накопление в электрическом поле конденсатора запаса энергии $\frac{CU^2}{2}$ требует сообщения ему заряда $Q = CU$. Если конденсатор должен получить этот заряд мгновенно, то ток в цепи должен быть бесконечно велик, что при конечном напряжении источника и конечном сопротивлении цепи явно невозможно. При накоплении запаса энергии $\frac{LI^2}{2}$ в магнитном поле индуктивного участка цепи ток в этом участке должен измениться от 0 до I . Если бы изменение тока происходило мгновенно, скорость нарастания тока $\frac{di}{dt}$ была бы бесконечно велика, а это потребовало бы бесконечно большого напряжения на зажимах участка для преодоления бесконечно большой э. д. с. самоиндукции $-L \frac{di}{dt}$, что также невозможно при конечном напряжении источника.

Из этих же соображений следует, что не только возникновение, но и исчезновение электрического и магнитно-

го полей, а также всякое их изменение не может происходить мгновенно. Иначе говоря, при всяких изменениях режима цепи напряжение на участках, имеющих емкость, и ток в индуктивных участках должны изменяться непрерывно, т. е. без скачков.

Это положение часто называют законом коммутации.

Процесс перехода цепи от одного установившегося режима к другому называется переходным процессом, а сопутствующие ему напряжения и токи в отдельных участках цепи — переходными напряжениями и токами.

В § 5-7 были уже рассмотрены два простейших переходных процесса: включение и короткое замыкание цепей с индуктивностью, а в § 6-5 — процесс зарядки конденсатора через сопротивление и процесс разрядки конденсатора на сопротивление. В данной главе будет рассмотрен еще ряд различных переходных процессов. При расчете переходных токов и напряжений будем пользоваться законом коммутации.

11-2. Включение цепи с сопротивлением и индуктивностью под синусоидальное напряжение

При включении цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L под синусоидальное напряжение u (рис. 11-1) мгновенное значение тока i и напряжения u в произвольный момент будут связаны между собой тем же дифференциальным уравнением, что и при установившемся режиме:

$$u = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (11-1)$$

Однако результаты интегрирования его в этих двух случаях будут различными. Установившийся процесс выражается частным решением, в котором ток является синусоидальной

функцией времени. Этот ток будем в дальнейшем называть вынужденным и обозначать i' . Переходному процессу соответствует общее решение дифференциального уравнения (11-1), которое, как известно, представляет собой сумму частного решения i' и общего решения i'' дифференциального уравнения без правой части:

$$i''R + L \frac{di''}{dt} = 0$$

или

$$\frac{di''}{i''} = -\frac{R}{L} dt,$$

которое не отличается от уравнения спадающего тока при коротком замыкании:

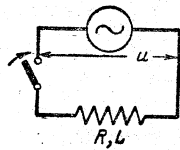


Рис. 11-1. Включение цепи с сопротивлением и индуктивностью под синусоидальное напряжение.

нии катушки, полученного в § 5-7, и имеет такое же решение:

$$i'' = K e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где постоянная времени

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

Ток i'' называется свободным током. Таким образом, переходный ток в любой момент может быть представлен в виде суммы вынужденного и свободного токов:

$$i = i' + i''. \quad (11-2)$$

Начальное значение K свободного тока определяется тем условием, что

при $t=0$ по закону коммутации переходный ток $i=0$; и согласно (11-2)

$$0 = i'_0 + K,$$

где i'_0 представляет собой значение вынужденного тока, вычисленное при $t=0$.

Следовательно,

$$K = -i'_0,$$

т. е. в начальный момент процесса свободный ток по абсолютной величине равен вынужденному, но имеет обратное направление. Поэтому, если включение произошло при таком значении напряжения, когда вынужденный ток проходит через нуль, свободный ток вообще будет отсутствовать и в цепи сразу возникает установившийся режим. Свободный ток достигнет своего наибольшего значения, если цепь будет включена в момент, когда вынужденный ток проходит через свой положительный или отрицательный максимум $\pm I_M$. В этом случае

$$K = \mp I_M \text{ и } i'' = \mp I_M e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Соответствующие этому случаю кривые вынужденного, свободного и переходного токов представлены на рис. 11-2.

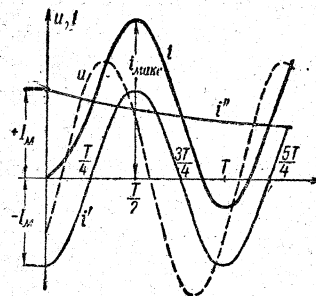


Рис. 11-2. Кривые изменения вынужденного, свободного и переходного тока при включении цепи R, L под синусоидальное напряжение.

Наибольшей величины $i_{\text{макс}}$ переходный ток достигает примерно через полпериода после включения, когда вынужденный ток приближается к амплитудному значению, но имеет уже одинаковое направление со свободным током.

При $t \rightarrow \infty$ переходный ток i равен вынужденному току i' , так как свободный ток i'' стремится к нулю. В соответствии с этим вынужденный ток часто называют установившимся током.

11-3. Уравнения колебательного контура

Рассматривая явления резонанса (§ 7-12), мы уже познакомились с незатухающими колебаниями при разряде конденсаторов на индуктивность без потерь. Это были идеализированные условия; в реальных условиях в контуре неизбежно наличие сопротивления (рис. 11-3), вследствие чего процесс становится затухающим.

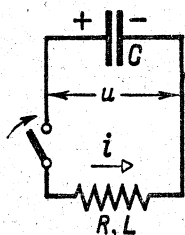


Рис. 11-3. Колебательный контур.

При наличии в цепи более или менее значительного сопротивления R часть энергии при каждом колебании необратимо переходит в тепло, вследствие чего амплитуды тока и напряжения с каждым полупериодом уменьшаются, и уже первая амплитуда тока оказывается меньше, чем амплитуда тока незатухающего процесса, когда

$$I_m = \frac{U}{\sqrt{L/C}}$$

С увеличением сопротивления период колебаний возрастает, т. е. про-

цесс разрядки и зарядки конденсатора замедляется подобно тому, как это происходит при разрядке или зарядке конденсатора в отсутствие индуктив-

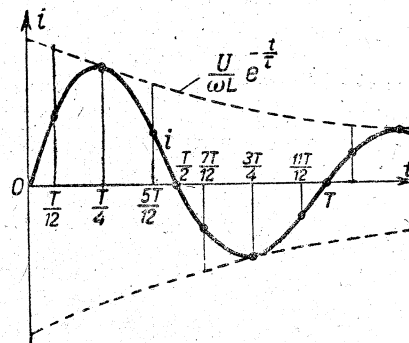


Рис. 11-4. График тока при колебательном разряде конденсатора на цепь R, L .

ности. Если сопротивление будет больше, чем $2\sqrt{L/C}$, процесс теряет свой колебательный характер и становится аperiодическим (т. е. неperiодическим).

Перейдем теперь к уравнениям, описывающим рассматриваемый процесс.

В произвольный момент времени t , отсчитываемый от начала разряда конденсатора, ток i , напряжение u ,

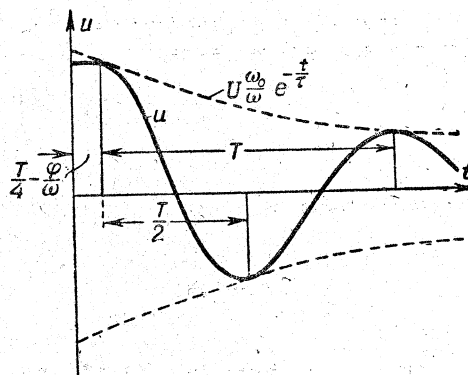


Рис. 11-5. График напряжения при колебательном разряде конденсатора на цепь R, L .

э. д. с. самоиндукции e и сопротивление R связаны между собой очевидным соотношением

$$i = \frac{u + e}{R}$$

или

$$Ri = u + e. \quad (11-3)$$

Так как при разряде конденсатора (§ 6-5)

$$i = -C \frac{du}{dt}, \quad (11-4)$$

то э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = LC \frac{d^2u}{dt^2}.$$

Подставив эти выражения i и u в уравнение (11-3), получим:

$$-RC \frac{du}{dt} = u + LC \frac{d^2u}{dt^2},$$

или

$$LC \frac{d^2u}{dt^2} + RC \frac{du}{dt} + u = 0, \quad (11-5)$$

т. е. линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами без правой части. Решение такого уравнения имеет вид:

$$u = Ae^{p_1 t} + Be^{p_2 t}, \quad (11-6)$$

где e — основание натуральных логарифмов,

а p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0$$

или

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0, \quad (11-7)$$

т. е.

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}},$$

или

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (11-8)$$

если ввести обозначения

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad \text{и} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (11-9)$$

δ именуется коэффициентом затухания, так как δ определяет скорость затухания процесса; ω_0 — угловая частота свободных колебаний в контуре, т. е. колебаний при отсутствии потерь (§ 7-12).

В соответствии с этим уравнение (11-5) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\delta \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0. \quad (11-10)$$

Случай $\delta \geq \omega_0$ соответствует аperiodическому характеру процесса, а случай $\delta < \omega_0$ — колебательному.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

12-1. Общие сведения

Измерение является познавательным процессом, при котором измеряемая физическая величина сравнивается с принятым за единицу измерения значением однородной величины. Из этого определения следует, что для выполнения измерения в общем случае нужны: во-первых, мера — вещественное воспроизведение единицы измерения (для взвешивания — гиря, для измерения сопротивления — образцовая катушка сопротивления); во-вторых, прибор сравнения — техническое средство для выполнения сравнения (весы с коромыслом, измерительный мост).

Часто измерение производится без видимого применения меры, прибором непосредственного отсчета (непосредственной оценки), показывающим числовое значение измеряемой величины (циферблатными весами, омметром, амперметром, счетчиком и т. п.). Но меры применяются при градуировании такого прибора. Измерение приборами непосредственного отсчета быстрее, проще и дешевле, однако на стороне приборов сравнения преимущества более высокой точности и чувствительности.

Электрические измерения по сравнению с другими видами измерительной техники обладают гораздо боль-

шей надежностью, точностью, дешевизной и простотой. По этой причине электрические методы измерений широко применяются для измерений не только электрических, но и для большинства физических величин (тепловых, световых, механических и т. д.), преобразуемых для этого в пропорциональные им электрические (сопротивление, э. д. с., ток, частоту и т. п.). Электрификация измерений дает возможность относительно простыми средствами решать ряд важных проблем новой техники: осуществлять передачу значений измеряемых величин на дальние расстояния (телеизмерение), автоматизировать выполнение математических операций над измеряемыми величинами и добиваться непосредственно го воздействия измерительного устройства на машины и аппараты (автоматическое регулирование), всесторонне контролировать качество продукции и материалов, размножать показания измерительных приборов и т. д.

В освоении космоса с помощью космических кораблей и искусственных спутников Земли электроизмерительная аппаратура играет огромную роль.

Отечественное производство электроизмерительных приборов в крупных промышленных масштабах организовано лишь после Великой Октябрьской социалистической революции. Особенно же быстро электроприборостроение расширилось после Отечественной войны. Производство электроизмерительной аппаратуры в 1955 г. превýсило производство 1940 г. в 20 раз, а семилетний план предусматривает увеличение производства электроизмерительных приборов к 1965 г. по сравнению с 1958 г. в 2,5—2,6 раза. В настоящее время в СССР в больших количествах производятся все виды промышленной и лабораторной электроизмерительной аппаратуры, а для поддержания на должной высоте самой измерительной техники осуществляется государственный надзор за всеми мерами и измерительными приборами.

12-2. Погрешности и классы точности

При любом измерении вследствие множества причин неизбежна некоторая погрешность. Необходимо, чтобы эта погрешность не превышала практически допустимую для данного измерения. В этом отношении требования исследовательских и промышленных лабораторий к измерительной технике быстро растут.

Разность между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями исследуемой величины есть абсолютная погрешность

$$\Delta A = A_{из} - A. \quad (12-1)$$

Поправка есть абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком; она прибавляется к отчитанному показанию прибора. Но для оценки точности измерения определяется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению — относительная погрешность

$$\gamma_{от} \% = \frac{\Delta A}{A} 100\%, \quad (12-2)$$

а так как разница между A и $A_{из}$ обычно относительно мала, то

$$\gamma_{от} \% \approx \frac{\Delta A}{A_{из}} 100\%.$$

У стрелочных приборов погрешности, выраженные в долях деления шкалы, для всех делений рабочей части шкалы имеют значения примерно одного и того же порядка, поэтому относительная погрешность быстро возрастает по мере приближения делений к началу шкалы. Целесообразно оценивать точность прибора на основании его приведенной погрешности — отношения абсолютной погрешности в показаниях к наибольшему значению $A_{ном}$, которое может быть измерено по шкале прибора (номинальное значение):

$$\gamma_{пр} \% = \frac{\Delta A}{A_{ном}}. \quad (12-3)$$

Причинами погрешностей в показаниях прибора являются недостатки самого прибора (измерительного механизма, измерительной цепи,

неточности градуировки шкалы и т. д.) и внешние влияния (температура, положение, магнитные и электрические поля и т. д.). В соответствии с этим погрешности прибора делятся на основные и дополнительные.

Основные погрешности — это приведенные погрешности прибора, определенные по (12-3) в нормальных условиях, т. е. при температуре окружающей среды 20°C (если на шкале прибора не обозначена другая температура), при рабочем положении прибора в соответствии с обозначением на его шкале, при отсутствии вблизи прибора ферромагнитных масс и внешних магнитных полей (кроме земного), при номинальных напряжении, частоте и $\cos \varphi$.

Дополнительные погрешности обуславливаются отклонениями внешних условий от нормальных (температуры, положения прибора и т. д.). В зависимости от наибольшей допускаемой основной погрешности согласно ГОСТ 1845-59 электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4, причем соответствующее значение допустимой погрешности служит обозначением класса. Для принадлежности прибора к определенному классу необходимо, чтобы его основная погрешность на всех делениях рабочей части шкалы не превышала значения, определяемого наименованием класса (например, у прибора класса 0,5 основная погрешность $\gamma_{\text{пр}}\% = 0,5\%$); но, кроме того, ГОСТ нормирует и дополнительные погрешности прибора данного класса, возникающие при определенных отклонениях внешних условий от нормальных.

12-3. Маркировка прибора

На лицевой стороне прибора (обычно на шкале) согласно ГОСТ должны быть сделаны условные обозначения, определяющие технические особенности электроизмерительного прибора: единицу измеряемой величины, класс точности, род тока и число фаз, систему прибора (см. § 12-6), защищенность от внешних магнитных или электрических полей, группу при-

бора по условиям эксплуатации, рабочее положение прибора и т. д. Важнейшие примеры условных обозначений даны в табл. 12-1. В зависимости

Таблица 12-1

Условные обозначения на шкале прибора

Условное обозначение	Что обозначается
—	Постоянный ток
~	Переменный (однофазный) ток
~ ~	Постоянный и переменный ток
~ ~ ~	Трехфазный ток (общее обозначение)
~ ~ ~ ~	Трехфазный ток, прибор, например с двухэлементным измерительным механизмом
0,5	Класс точности, например, 0,5
□	Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)
□	Защита от внешних электрических полей (I категория защищенности)
└	Горизонтальное положение шкалы
┆	Вертикальное положение шкалы
☆	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
*	Генераторный зажим (для ваттметров, вариометров и фазометров)
⊥	Зажим для заземления

от чувствительности к внешним магнитным (или электрическим) полям приборы делятся на две категории: I — менее чувствительная и II — более чувствительная; ГОСТ устанавливает, при каких условиях должны определяться соответствующие дополнительные погрешности.

Деление на группы по условиям эксплуатации определяет устойчивость прибора к механическим воздействиям и защищенность от проникновения внутрь прибора внешних агентов — влаги, пыли и т. п., например: тряскопрочный прибор имеет на шкале условное обозначение ТП, вибропрочный — ВП, водозащищенный — Вз, герметический — Гм, пылезащищенный — Пз.

12-4. Общие детали механизмов приборов прямого отсчета

Устройство приборов прямого отсчета весьма разнообразно, однако некоторые детали у них являются общими, мало отличающимися у приборов различного назначения и систем. Это детали: установки подвижной части, создания противодействующего момента, уравновешивания подвижной части, успокоителя, корректора и арретира.

Установка подвижной части осуществляется: на опорах, на растяжках и на подвесе.

Установка на опорах (на кернах и подпятниках) в недавнем прошлом была почти единственной, применявшейся в щитовых и переносных электроизмерительных приборах. Подвижная часть опирается на два стальных острия — керны (рис. 12-1), образующих ось вращения. Эти острия запрессовываются в алюминиевую трубку — ось прибора, к которой крепится подвижная часть. Когда сквозная ось отсутствует, керны запрессовываются в буксы, укрепляемые непосредственно на подвижной части и образующие две «полуоси» прибора (рис. 12-2). Керны изготавливаются из стали, серебрянки или из нержавеющей кобальт-вольфрамовой стали. Керны затачиваются на концах на конус и оканчиваются закруглением малого радиуса.

Подпятники, на которые опираются керны, изготавливаются из синтетического агата или корунда, в которых вытачивается конический кратер, оканчивающийся закруглением (рис. 12-1). Этот камень завальцовывается в опорный винт, что позволяет регулировать положение подпятника. Это положение должно быть таким, чтобы оставался

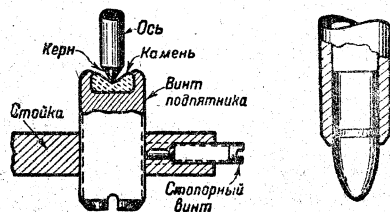


Рис. 12-1. Установка подвижной части на осях; устройство подпятника и керн, завальцованный в трубку оси.

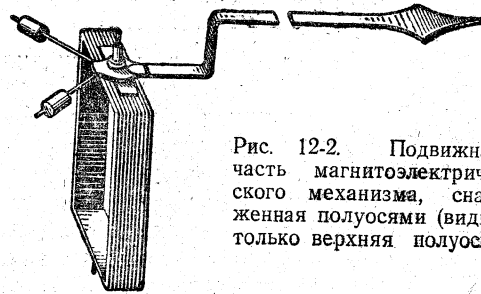


Рис. 12-2. Подвижная часть магнитоэлектрического механизма, снабженная полуосями (видна только верхняя полуось).

некоторый осевой зазор, дающий возможность оси свободно поворачиваться между подпятниками. Лабораторные приборы часто снабжаются пружинящими подпятниками. В силу самого принципа установки на осях при перемещении подвижной части неизбежно наличие некоторого трения — одной из причин вариации показаний, т. е. изменения показаний прибора при неизменности измеряемой величины и внешних условий.

При вертикальном положении оси (чему соответствует горизонтальное положение шкалы) вся нагрузка сосредоточена на одной нижней опоре, благодаря чему трение значительно меньше, чем при горизонтальном положении оси. По этой причине у большинства лабораторных приборов горизонтальное положение шкалы является рабочим.

Установка на растяжках (рис. 12-3) в последние годы приме-

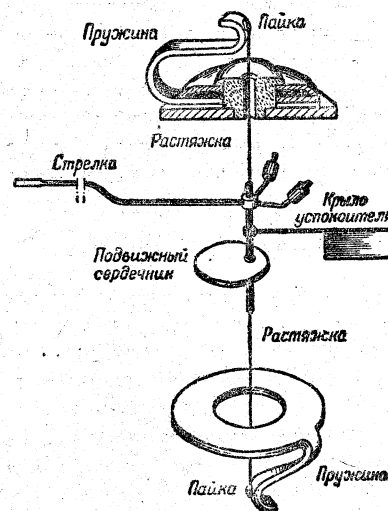


Рис. 12-3. Установка подвижной части электромагнитного механизма на растяжках.



Рис. 12-4. Подвес подвижной части на нити.

сильно облегчается подвижная часть и повышается чувствительность прибора, в несколько раз снижается его собственное потребление.

Подвес на нити (рис. 12-4) применяется для приборов самой высокой чувствительности (зеркальных гальванометров). Подвижная часть подвешивается на металлической нити, причем для вывода тока к подвижной части прикрепляется очень тонкая и мягкая металлическая (часто серебряная) лента — так называемая «безмоментная спираль». Приборы с подвесом необходимо устанавливать по уровню. В большинстве случаев эти приборы имеют световой указатель, т. е. стрелку заменяет луч света от специального источника, этот луч, отразившись от зеркальца, укрепленного на подвижной части, образует светлое пятно на отсчетной шкале. Так как шкала устанавливается на расстоянии l м от зеркальца, то световой указатель эквивалентен стрелке длиной в l м. Поэтому малому отклонению подвижной части соответствует значительное перемещение светового указателя на шкале.

В настоящее время световой указатель применяется для повышения чувствительности также в переносных приборах с установкой подвижной части на растяжках или на осях. Внутри

няется все чаще. Растяжки — это две металлические ленты или нити, на которых подвешивается подвижная часть прибора. Растяжки натягиваются двумя плоскими пружинами, расположенными во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Кручение растяжек создает противодействующий момент и они же могут быть использованы для подвода тока в подвижную часть. При установке на растяжках устраняется механическое трение в опорах, отпадает необходимость в периодическом ремонте приборов — шлифовке притупившихся концов кернов,

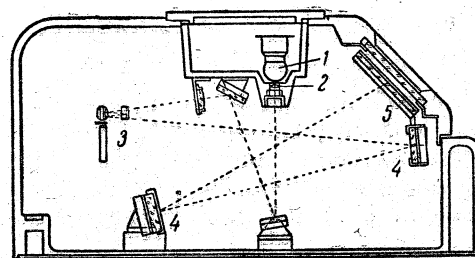


Рис. 12-5. Схема прибора со световым указателем.

1 — лампа; 2 — линза; 3 — зеркальце на подвижной части; 4 — неподвижные зеркала; 5 — матовая шкала.

прибора (рис. 12-5) помещается лампа 1, луч света которой после отражения от зеркальца 3 на подвижной части, прежде чем попасть на шкалу 5, последовательно отражается от нескольких неподвижных зеркал 4. Таким путем искусственно увеличивается длина луча, а следовательно, повышается чувствительность прибора. Это позволяет в ряде случаев заменить зеркальный гальванометр с подвижной частью на подвесе и отдельными осветителем и шкалой (прибор, требующий тщательно выполненной постоянной установки) переносным прибором со световым указателем.

Противодействующий момент, возрастающий с увеличением отклонения подвижной части, в показывающем приборе должен быть противопоставлен вращающему моменту для того, чтобы отклонение подвижной части являлось однозначной функцией измеряемой величины. В большинстве случаев желательно, чтобы противодействующий момент $M_{пр}$ был прямо пропорционален отклонению α подвижной части, т. е. чтобы $M_{пр} = k_{пр}\alpha$. Вращающий момент создается путем использования того или иного действия электрического тока (например, воздействия магнитного поля постоянного магнита на проводник с током). При установившемся отклонении подвижной части имеет место равновесие моментов: $M_{вр} = M_{пр}$. В простейшем случае, когда вращающий момент прямо пропорционален току $M_{вр} = k_{вр}I$, при установившемся отклонении

$$k_{вр}I = k_{пр}\alpha \text{ или } I = \frac{k_{пр}}{k_{вр}}\alpha,$$

т. е. отклонение подвижной части прямо пропорционально измеряемому току. Прибор, удовлетворяющий этим условиям, имеет равномерную шкалу. У большинства приборов вращающий момент нахо-



Рис. 12-6. Пружина и корректор прибора.

дится в более сложной зависимости от тока и потому шкала таких приборов неравномерна.

Противодействующий момент, удовлетворяющий условию $M_{вр} = k_{пр} \alpha$, создается закручиванием пружины или растяжек, или нити подвеса. Когда применяется пружина 1 (рис. 12-6), то один конец ее укрепляется на оси подвижной части 2; второй конец пружины в большинстве приборов прикрепляется к корректору. Вследствие толчков при перегрузках, температурных влияний, остаточной деформации пружины и т. п. стрелка невключенного прибора может оказаться не на нулевом делении: корректор служит для установки стрелки на нулевое деление. Поворачивая винт 4, укрепленный на кожухе прибора, можно посредством поводка 3 сместить точку закрепления второго конца пружин 1, а тем самым и стрелку прибора 5.

Пружина в большинстве приборов находится в магнитном поле, поэтому, чтобы поле не влияло на работу пружины, она изготавливается из немагнитного материала, в большинстве случаев из фосфористой бронзы.

Арретир есть приспособление, позволяющее закрепить неподвижно подвижную часть прибора при переноске или транспортировке, тем самым предохраняются от обрыва растяжки или нити подвеса.

Подвижная часть электроизмерительного прибора должна быть уравновешена. Это уравновешивание осуществляется при помощи противовесов-грузиков, устанавливаемых на тонких стержнях и укрепляемых таким путем на подвижной части (рис. 12-2). В уравновешенном приборе центр тяжести подвижной части совпадает с ее осью вращения; при этом условии устраняется влияние на отклонение подвижной части силы тяжести, благодаря чему установившееся отклонение определяется только равновесием вращающего и противодействующего моментов. В неуравновешенном приборе момент силы тяжести в зависимости от положения прибора может увеличивать или уменьшать отклонение подвижной части. Показание уравновешенного прибора не зависит от его положения, в частности, смещение стрелки с нуля у неработающего прибора при любых его положениях не должно превышать десятых долей деления шкалы.

При изменении измеряемой величины подвижная часть прибора вследствие инерции принимает новое положение равновесия не сразу, а спустя некоторое время, в большинстве случаев после колебания около нового положения равновесия. Для того чтобы заставить подвижную часть возможно скорее принять это положение, электроизмерительные приборы снабжаются успокоителями. Назначение последних состоит в поглощении кинетической энергии подвижной части. Трение, так же как и успокоение, поглощает кинетическую энергию подвижной части, но силы успокоения стремятся к нулю при уменьшении скорости подвижной части, а трение в этих условиях даже возрастает и препятствует подвижной части занять должное положение. Подвижная часть и пружина образуют систему, способную к колебаниям. В зависимости от величины успокоения отклонение подвижной части может быть колебательным или аperiodическим. При хорошем успокоении подвижная часть должна принимать новое положение равновесия после небольшого колебания (по ГОСТ для большинства стрелочных приборов не более 4 сек).

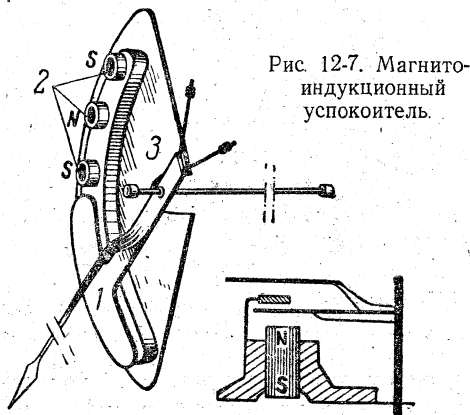


Рис. 12-7. Магнитоиндукционный успокоитель.

В настоящее время широко применяются лишь магнитоиндукционные и воздушные успокоители.

В магнитоиндукционных успокоителях (рис. 12-7) алюминиевый сектор 1, укрепленный на оси подвижной части, движется в поле постоянных магнитов 2. Последние укреплены на опорной пластине 3. При движении сектора в нем индуцируются токи. Их взаимодействие с теми же постоянными магнитами создает силу, которая согласно закону Ленца тормозит подвижную часть. Применение нескольких маленьких магнитов вместо одного большого (как это делалось раньше) увеличивает вдоль пути сектора $\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}$, что создает более благоприятные условия для торможения, а следовательно, дает возможность уменьшить габариты и вес прибора.

В воздушных успокоителях (рис. 12-8) легкое алюминиевое крыло, укрепленное на оси подвижной части,

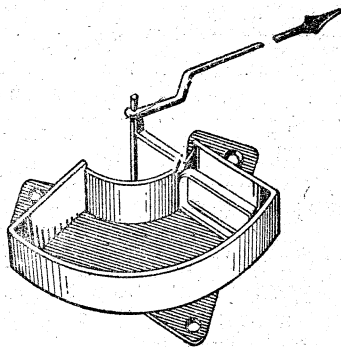


Рис. 12-8. Воздушный крыльчатый успокоитель.

движется в закрытой камере, при этом создается разность давлений по обе стороны крыла, что тормозит движение подвижной части. Воздушные успокоители значительно слабее магнитоиндукционных, но их приходится применять в тех случаях, когда наличие постоянного магнита внутри прибора может явиться причиной дополнительных погрешностей.

Собственное потребление электроизмерительных приборов, т. е. потребление электрической энергии самим прибором при его работе, необходимо учитывать при ряде измерений. Включение электроизмерительного прибора в исследуемую электрическую цепь в некоторой степени изменяет ее электрические условия. При исследовании маломощных объектов это может существенно исказить результаты исследования. Кроме того, собственное потребление обуславливает нагревание прибора, что может изменять его показания. Желательно, чтобы собственное потребление электроизмерительного прибора было возможно меньше. Поэтому сопротивление вольтметра и параллельных цепей ваттметра и счетчика должно быть возможно больше, а сопротивление амперметра и последовательных цепей ваттметра и счетчика — возможно меньше. Собственное потребление приборов зависит от системы прибора и от пределов измерения. Для вольтметров и амперметров собственное потребление лежит в пределах от 0,1 до 15 вт.

12-5. Шунты и добавочные сопротивления

Приборы, служащие для измерения тока (амперметр) и напряжения (вольтметр), устроены в большинстве случаев, по существу, совершенно одинаково и отличаются друг от друга главным образом способом включения в цепь, а также относительной величиной своего сопротивления.

Амперметр должен быть включен последовательно с тем приемником, ток которого он должен измерять (рис. 12-9), чтобы через амперметр прошел весь ток приемника, при этом сопротивление амперметра должно быть настолько малым, чтобы в нем

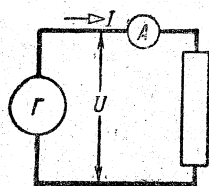


Рис. 12-9. Схема включения амперметра.

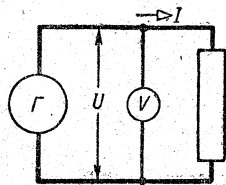


Рис. 12-10. Схема включения вольтметра.

не происходила сколько-нибудь существенная потеря напряжения.

Наоборот, вольтметр должен иметь большое сопротивление и включаться непосредственно между теми точками (рис. 12-10), напряжение между которыми он должен измерять. В качестве вольтметра можно было бы например, включить чувствительный амперметр последовательно с большим добавочным сопротивлением. При изменении напряжения на зажимах такой цепи будет пропорционально изменяться потребляемый ею ток и, следовательно, показание прибора будет пропорционально напряжению между теми точками цепи, между которыми он включен. При малом собственном сопротивлении вольтметр потреблял бы большой ток, без пользы нагружая источник энергии и соединительные провода.

При помощи различным образом включенных сопротивлений можно расширить пределы измерения вольтметра и амперметра. У вольтметра такое сопротивление включается последовательно с прибором (рис. 12-11) и называется добавочным сопротивлением. На самый прибор приходится при этом лишь часть U_B напряжения U , пропорциональная сопротивлению прибора.

Величина R_d для данного прибора определяется на основании номинальных значений измеряемого напряже-

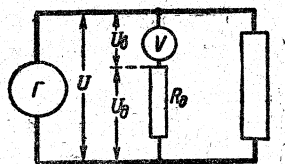


Рис. 12-11. Включение вольтметра с добавочным сопротивлением.

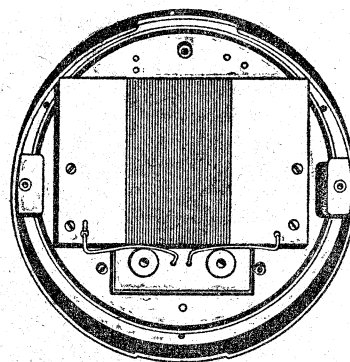


Рис. 12-12. Добавочное сопротивление, намотанное на изоляционной пластине и помещенное под щитком прибора.

ния U , тока I_B и сопротивления $R_{из}$ самого прибора следующим образом:

$$\frac{U}{I_B R_{из}} = \frac{R_d + R_{из}}{R_{из}},$$

следовательно,

$$R_d = \frac{U}{I_B} - R_{из}.$$

В силу самого принципа построения вольтметра ток через прибор должен быть пропорционален напряжению, а следовательно, сопротивление цепи прибора должно быть постоянно во времени и не меняться при изменениях температуры. По этой причине добавочные сопротивления наматываются из проволоки, изготовленной из специальных сплавов с ничтожным температурным коэффициентом сопротивления. Из числа подобных сплавов наибольшее распространение имеет манганин (Cu 85%, Mn 12%, Ni 3%). Добавочные сопротивления изготавливаются в виде катушек или пластин (рис. 12-12).

Добавочные сопротивления для приборов переменного тока должны быть практически безреактивны. В простейшем виде это достигается намоткой проволоки добавочного сопротивления в один слой на изоляционную пластину. При такой намотке индуктивность и емкость добавочного сопротивления весьма малы. Индуктивность — благодаря тому, что каждый виток обмотки образует бифилярную систему, а емкость — благодаря тому, что проводники, между которыми при-

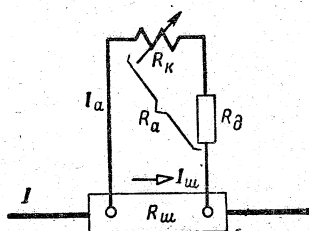


Рис. 12-13. Схема включения шунта.

ложено полное напряжение, находятся на противоположных краях пластины.

Один и тот же вольтметр с несколькими добавочными сопротивлениями может измерить напряжения различного порядка.

В тех случаях, когда затруднительно или нецелесообразно пропускать через амперметр весь измеряемый ток, параллельно измерителю выключается шунт (англ. Shunt — отвлечение), через который пропускается большая часть измеряемого тока (рис. 12-13). Шунт представляет собой небольшое сопротивление известной величины.

Токи распределяются между шунтом и измерителем обратно пропорционально сопротивлениям соответствующих ветвей:

$$I_{ш} : I_a = R_a : R_{ш},$$

а так как измеряемый ток

$$I = I_{ш} + I_a,$$

то, следовательно,

$$I = I_a \left(1 + \frac{R_a}{R_{ш}} \right) = I_a k_{ш},$$

здесь $k_{ш}$ — шунтовой коэффициент; в тех случаях, когда шунт делается сменным (в переносных приборах), $k_{ш}$ берется равным 10, 100, 1 000, чтобы упростить подсчет I на основании измерения I_a .

Для точности измерения необходимым условием является постоянство $k_{ш}$, что должно быть обеспечено правильным выполнением схемы соединения шунта с измерителем и независимостью $k_{ш}$ от внешних влияний.

Сопротивление шунта $R_{ш}$ — величина относительно малая, порядка

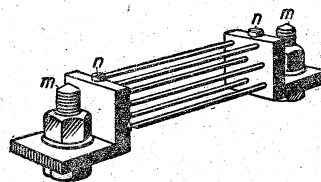


Рис. 12-14. Устройство шунта.

$10^{-2} \div 10^{-4}$ ом; по сравнению с ней существенное значение имеют переходные сопротивления контактов и сопротивления соединительных проводов и частей. По этой причине шунты, как и все образцовые малые сопротивления, снабжаются четырьмя зажимами (рис. 12-14), из которых два m (токовые) служат для включения шунта в цепь измеряемого тока, а два других n (потенциальные) — для присоединения измерителя.

Из числа внешних влияний наиболее важным является влияние на $k_{ш}$ температуры; в целях его устранения шунты изготавливаются из манганина.

Но, с другой стороны, катушка измерительного механизма наматывается из медной проволоки, обладающей значительным температурным коэффициентом. По этой причине, чтобы сделать сопротивление ветви измерительного механизма достаточно постоянным, последовательно с этой катушкой включается добавочное сопротивление R_d , намотанное из манганиновой проволоки. Таким образом, сопротивление ветви измерительного механизма $R_a = R_k + R_d$, причем сопротивление катушки R_k должно быть значительно меньше добавочного сопротивления, для того чтобы в целом R_a можно было считать практически не зависящим от температуры. В амперметрах высших классов точности применяются специальные схемы температурной компенсации.

12-6. Системы электроизмерительных механизмов

Электроизмерительный прибор прямого отсчета состоит из измерительного механизма и измерительной цепи.

Измерительный механизм, используя то или иное физическое явление, преобразует подводимую к нему

электрическую энергию в механическую энергию перемещения подвижной части и связанного с ней указателя.

Измерительная цепь преобразует измеряемую электрическую величину в пропорциональную ей величину, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. Так, например, в вольтметре измерительная цепь состоит из добавочного сопротивления и катушки измерительного механизма. Благодаря постоянству сопротивления этой измерительной цепи через измерительный механизм вольтметра проходит ток, пропорциональный измеряемому напряжению. Один и тот же измерительный механизм в соединении с различными измерительными цепями может служить для измерения напряжения (с добавочным сопротивлением), тока (с шунтом), сопротивления (по схеме омметра).

Электроизмерительные приборы классифицируются по системам в зависимости от физического явления, используемого в них для целей измерения (обычно для получения вращающего момента). Из числа этих систем, широкое применение имеют магнитоэлектрическая, электромагнитная, индукционная, электродинамическая и ферродинамическая. Магнитоэлектрические измерительные механизмы пригодны лишь для постоянного тока, поэтому для измерений переменного тока они соединяются с различными преобразователями (выпрямителями, термоэлементами, электронными лампами), преобразующими измеряемый переменный ток в пропорциональный ему постоянный. Наличие преобразователей существенно изменяет свойства прибора в целом, поэтому подобные приборы классифицируются как принадлежащие к особым системам: выпрямительной, термоэлектрической и электронной.

В приборах магнитоэлектрической системы вращающий момент создается взаимодействием тока, проходящего по катушке с полем постоянного магнита, т. е. используется энергия магнитного поля системы, состоящей из постоянного магнита и контура с током. Два основных типа приборов магнитоэлектрической си-

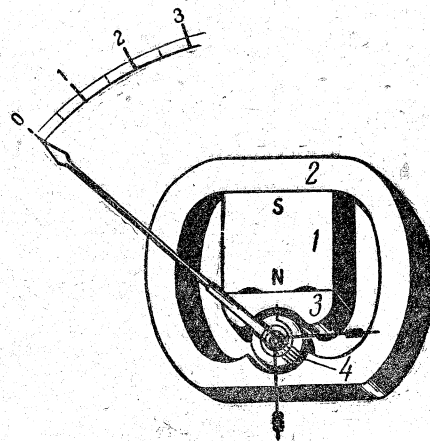


Рис. 12-15. Магнитоэлектрический измерительный механизм с подвижной катушкой.
1 — магнит; 2 и 3 — магнитопровод; 4 — подвижная катушка.

стемы: приборы с подвижной катушкой и приборы с подвижным магнитом.

В приборе с подвижной катушкой (рис. 12-15) последняя устанавливается на опорах (или растяжках) в воздушном зазоре магнитной цепи постоянного магнита NS. Ток в подвижную катушку подводится через две пружины или растяжки, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Постоянный магнит в современных приборах изготавливается из высокоэнергетических магнитных сплавов, содержащих алюминий, никель, кобальт, медь, кремний и железо (ални, алнико, алниси, магнико и др., см. § 4-5). Это дает возможность получать в воздушном зазоре прибора магнитную индукцию порядка $0,2 - 0,3 \text{ вб/м}^2$ ($2000 - 3000 \text{ гс}$). Но ввиду большой твердости подобные магниты не поддаются обработке режущим инструментом. Приходится отливать их относительно простой геометрической формы в виде параллелепипедов или цилиндров, а их магнитный поток направлять посредством магнитопровода из относительно легко обрабатываемого магнито-мягкого материала. Полюсные наконечники этого магнитопровода охватывают цилиндрический сердечник, изготовленный также из магнито-мягкого материала. В воздушном зазоре между полюсными на-

конечниками и сердечником, вдоль почти всего угла охвата последнего полюсными наконечниками, создается практически равномерное радиальное магнитное поле.

Угол, образуемый направлением магнитной индукции B в воздушном зазоре и активной частью проводников подвижной катушки, равен 90° ; таким образом, на каждый из проводников будет действовать электромагнитная сила (см. § 5-1)

$$F = BI l, \quad (12-4)$$

где l — активная длина проводника, приблизительно равная высоте катушки h . Катушка имеет ω витков и диаметр d , таким образом вращающий момент, действующий на подвижную часть магнитоэлектрического прибора,

$$M_{\text{вр}} = BI h 2\omega \frac{d}{2} \quad (12-5)$$

или, обозначив площадь катушки через $S = hd$, получим:

$$M_{\text{вр}} = BIS\omega, \quad (12-6)$$

т. е. вращающий момент прямо пропорционален индукции и току.

Индукция в узком воздушном промежутке прибора распределена почти равномерно. Следовательно, вращающий момент магнитоэлектрического прибора можно считать прямо пропорциональным току $M_{\text{вр}} = k_{\text{вр}} I$, а так как противодействующий момент, создаваемый спиральными пружинами, прямо пропорционален углу закручивания $M_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \alpha$, то, следовательно, угол поворота катушки прямо пропорционален измеряемому току:

$$\frac{k_{\text{пр}}}{k_{\text{вр}}} \alpha = C_{\text{пр}} \alpha = I; \quad (12-7)$$

здесь $C_{\text{пр}}$ — постоянная прибора («цена деления») — число, на которое нужно умножить отсчет, выраженный в угловых градусах шкалы или в делениях, чтобы получить значение измеряемой величины.

Направление вращающего момента прибора определяется правилом левой руки. При изменении направления тока меняет свое направление и вращающий момент. Поэтому при пе-

ременном токе технической частоты подвижная часть прибора, испытывая быстро чередующиеся импульсы противоположного направления, не будет отклоняться из нулевого положения.

Катушка прибора намотана на алюминиевую рамку. При вращении катушки в поле постоянного магнита эта рамка представляет собой короткозамкнутый виток; сцепленный с ним магнитный поток меняется при движении катушки. Взаимодействие тока, наводимого в этой рамке, с магнитным полем создает тормозящую силу. Таким путем в магнитоэлектрическом приборе осуществляется принцип магнитоиндукционного успокоителя колебаний подвижной части.

Так как магнитное поле прибора создается постоянным магнитом, то даже при малых токах можно получить достаточный вращающий момент. Магнитоэлектрические приборы чувствительны. По этой причине чувствительные гальванометры в большинстве случаев изготавливаются магнитоэлектрической системы.

Чувствительность прибора позволяет конструктору дать прибору достаточный запас прочности путем уменьшения рабочей плотности тока в токоведущих частях, поэтому правильно сконструированный магнитоэлектрический прибор вынослив к перегрузкам. Этому способствует также линейное возрастание момента прибора с увеличением тока вместо квадратичной зависимости, характерной для большинства остальных систем.

Внешние магнитные поля мало влияют на показания магнитоэлектрических приборов благодаря тому, что эти приборы имеют сильное собственное магнитное поле. Собственное потребление этих приборов относительно весьма мало.

Магнитоэлектрические вольтметры снабжаются добавочными сопротивлениями, а амперметры при токах свыше 0,1 а — шунтами. Замена шунтов и добавочных сопротивлений дает возможность использовать один и тот же механизм для измерения самых различных токов и напряжений.

Область применения этой системы — лабораторные и промышленные измерения при постоянном токе.

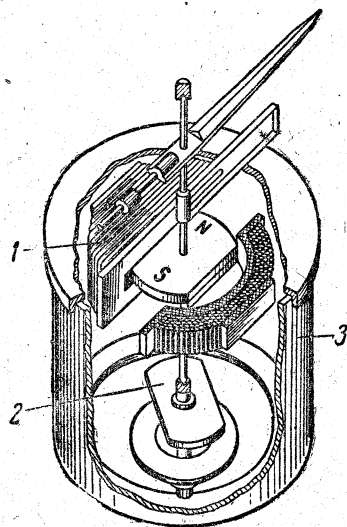


Рис. 12-16. Магнитоэлектрический измерительный механизм с подвижным магнитом.

N—S—подвижный магнит; 1—отклоняющая катушка; 2—неподвижный магнит; 3—ферромагнитный экран.

Приборы магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом (рис. 12-16) в современных конструкциях не имеют пружины. Ее заменяет направляющая сила неподвижного постоянного магнита. Приборы эти просты по устройству и дешевы, но точность их низка из-за влияния гистерезиса. Они применяются в качестве дешевых приборов для ориентировочных измерений, например на щитках автомобилей.

Применение преобразователей дает возможность использовать ряд достоинств магнитоэлектрического механизма для измерений переменного тока. К сожалению, метрологические недостатки самих преобразователей, главным образом непостоянство параметров, существенно снижает точность приборов всех систем, образованных соединением магнитоэлектрического механизма с преобразователем.

В приборах выпрямительной (детекторной) системы магнитоэлектрический измерительный механизм соединяется с одним или несколькими полупроводниковыми вентилями (см. § 10-8 и 10-9) меднозакисными или германиевыми; при этом применяются как однополупериодные, так и двухполупериодные схемы выпрямле-

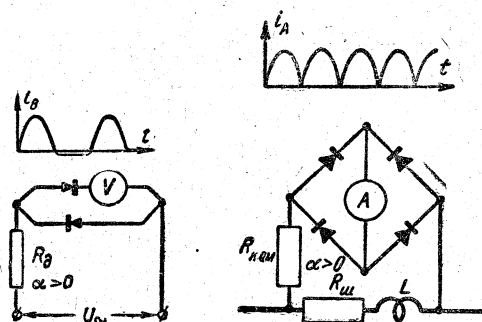


Рис. 12-17. Однополупериодная схема выпрямительного вольтметра и двухполупериодная схема выпрямительного амперметра.

ния (рис. 12-17). Через магнитоэлектрический измерительный механизм выпрямительного прибора проходит пульсирующий ток, а так как подвижная часть прибора обладает значительной инерцией, то ее отклонение определяется средней за период величиной вращающего момента. В частности, при двухполупериодном выпрямлении

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega S B i dt = \omega S B \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \omega S B I_{\text{ср}}$$

Таким образом, выпрямительный прибор измеряет фактически среднее значение тока $I_{\text{ср}}$ (11-3), а градуируется на действующие значения. Такая градуировка будет правильной только при синусоидальном токе, и отступление от этой формы вызывает погрешности показаний. Температурный коэффициент прямого и обратного сопротивлений полупроводникового выпрямителя отрицателен и относительно велик; для уменьшения температурных влияний в схему выпрямительного прибора вводятся компенсирующие сопротивления, обладающие положительным температурным коэффициентом (рис. 12-17). Форма шкалы выпрямительного прибора равномерная, кроме начальной сжатой части (менее 10% шкалы), имеющей квадратичный характер вследствие ухудшения выпрямления при низких напряжениях. Точность этих приборов невысока, не выше класса 1,5, из-за многочисленных источников значительных погрешностей. Основными достоинствами вы-

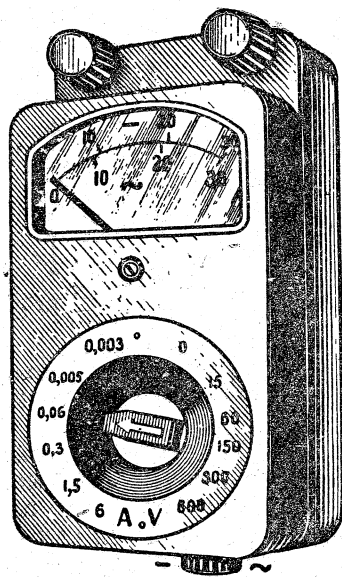


Рис. 12-18. Выпрямительный вольтамперметр многопредельный.

прямительных приборов являются высокая чувствительность, малое собственное потребление и в определенных пределах малая зависимость показаний от частоты переменного тока. Для частоты свыше 20 кГц выпрямительные приборы не применяются из-за больших погрешностей, обусловленных значительной шунтирующей емкостью полупроводниковых диодов (см. § 17-18).

У выпрямительного прибора легко изменять пределы измерения путем простого переключения шунтов и добавочных сопротивлений, что практически мало осуществимо для приборов переменного тока других измерительных систем. По этой причине приборы выпрямительной системы часто применяются в качестве многопредельных универсальных приборов; например, посредством переключения шунтов и добавочных сопротивлений один и тот же прибор может иметь 12 пределов измерений переменного тока и (при выключенных вентилях) 12 пределов измерений постоянного тока (рис. 12-18).

Габариты полупроводниковых вентилях весьма малы, благодаря чему эти вентиля легко размещаются внутри корпуса даже миниатюрного прибора.

Приборы термоэлектрической измерительной системы являются соединением магнитоэлектрического измерительного механизма и термопреобразователя (рис. 12-19).

Последний обычно состоит из одной или нескольких термопар и подогревателя, через который пропускается измеряемый переменный ток. Электродвижущую силу термопары можно считать пропорциональной разности температур между горячим и холодными концами термопары, т. е. перегреву θ термопары. Перегрев θ пропорционален (благодаря тепловой инерции) квадрату действующего значения переменного тока, поэтому вращающий момент, воздействующий на подвижную часть измерительного механизма, $M_{вр} \propto I^2$, а следовательно, шкала прибора квадратична. Из-за очень низкого к. п. д. термопреобразователя термоэлектрические приборы мало чувствительны, их собственное потребление велико, а при перегрузке свыше 50% они разрушаются. Область измерений, в которой они почти незаменимы, — это измерения токов высокой частоты (не свыше 5 Мгц).

В приборах электромагнитной системы вращающий момент создается воздействием магнитного поля измеряемого тока, проходящего по неподвижной катушке прибора, на подвижный ферромагнитный сердечник. Механические силы, возникающие в подобном устройстве, стремятся расположить сердечник так, чтобы магнитный поток был наибольшим (см. § 5-6), иными словами, чтобы энергия магнитного поля устройства была возможно больше. В настоящее время широко применяются два типа электромагнитных приборов: приборы с круглой катушкой и приборы с плоской катушкой.

В приборе с плоской катушкой (рис. 12-20) подвижный сердечник 1 втягивается в катушку 2, по которой проходит измеряемый ток. Для

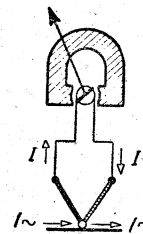


Рис. 12-19. Схема термоэлектрического прибора с контактным термопреобразователем.

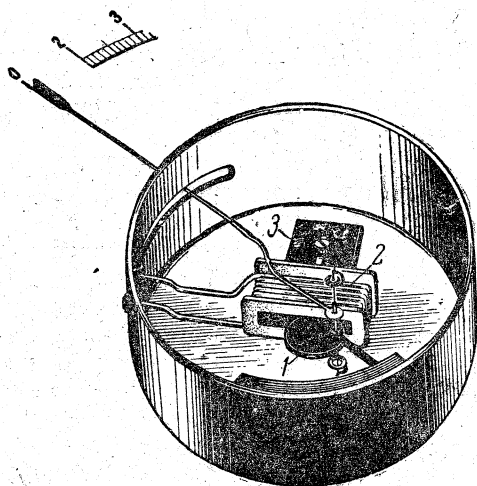


Рис. 12-20. Электромагнитный прибор с плоской катушкой и подвижной частью на растяжках.

усиления магнитного поля и регулирования вращающего момента служит второй неподвижный сердечник 3. Для защиты от внешних магнитных влияний измерительный механизм со всех сторон закрыт экраном (на рис. верхняя стенка экрана снята).

В приборе с круглой катушкой (рис. 12-21) внутри катушки установлены два сердечника: подвижный 1 и неподвижный 2. Когда по катушке 4 проходит ток, тогда оба сердечника намагничиваются и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент. В приборе, показанном на рисунке, ферромагнитный экран 3 надет непосредственно на катушку.

Вращающий момент приборов этой

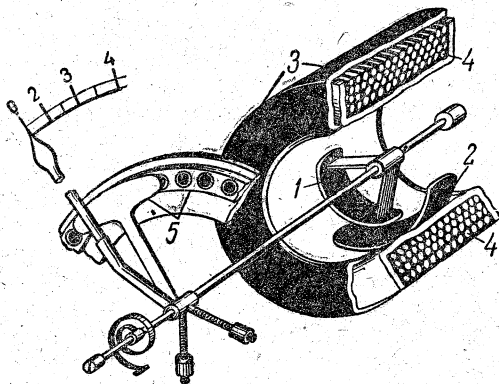


Рис. 12-21. Электромагнитный прибор с круглой катушкой.

системы определяется изменением магнитной энергии $W = \frac{LI^2}{2}$ при повороте подвижной части (§ 5-6), т. е.

$$M_{\text{вр}} = \frac{\partial W_{\text{mag}}}{\partial \alpha} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \alpha}. \quad (12-8)$$

Следовательно, момент пропорционален квадрату тока и изменению индуктивности системы при повороте подвижной части. Последняя зависимость не поддается точному расчету, ее характер можно менять путем соответствующего подбора формы стального сердечника, его положения в катушке и т. д. Это дает возможность опытным путем добиться относительной равномерности шкалы прибора в большей ее части, кроме начальных делений ($1/5$ — $1/10$ шкалы), которые остаются очень сильно сжатыми. При изменении направления тока направление момента в приборе не меняется, следовательно, прибор пригоден и для переменного тока; однако при переменном токе на показаниях прибора начинают сказываться потери от гистерезиса и вихревые токи, уменьшающие отклонение. В современных приборах со специальной сталью эта разница незначительна, что позволяет пользоваться одной и той же шкалой как для постоянного, так и для переменного токов.

Количество стали в магнитном поле прибора относительно мало, большая часть пути индукционных линий проходит в воздухе. Из-за этого измерительный механизм электромагнитной системы обладает малой чувствительностью, следовательно, затруднительно построить электромагнитный амперметр на малый ток (примерно меньше $0,5 \text{ а}$) или вольтметр на малое напряжение (примерно меньше 10 в). Собственное потребление электромагнитных приборов относительно велико, а для защиты от внешних магнитных полей их приходится снабжать экранами или астатическими механизмами. Класс точности электромагнитных приборов обычно не выше 1,5 главным образом из-за влияния гистерезиса и вихревых токов. Влияние остаточного намагничивания особенно сказывается при измерениях постоянного тока. Однако эти по-

грешности можно сделать незначительными, если изготовить сердечники из ферромагнетика с ничтожной коэрцитивной силой, в частности из пермаллоя (см. § 4-2). Такими сердечниками снабжаются переносные электромагнитные приборы, причем у этих приборов удается обеспечить класс точности 0,5 и даже 0,2 как при постоянном, так и при переменном токе при частоте до 1500 гц.

Стремление возможно шире использовать электромагнитную систему объясняется рядом ее ценных свойств. В подвижную часть электромагнитного прибора ток не подводится, и конструктор имеет возможность дать неподвижной катушке достаточный запас сечения меди на случай перегрузок. В хорошей конструкции приборы этой системы исключительно выносливы к перегрузкам. Наряду с этим необходимо отметить их дешевизну и простоту устройства.

Областью применения электромагнитных приборов являются преимущественно измерения переменных напряжений и токов (кроме высокой частоты). Большинство амперметров и вольтметров в промышленных установках принадлежит к электромагнитной системе.

Электродинамические приборы основаны на принципе взаимодействия проводников, по которым проходит ток: два проводника с оди-

наково направленными токами взаимно притягиваются, с противоположно направленными токами взаимно отталкиваются. Прибор этой системы состоит из неподвижной 1 и подвижной 2 катушек (рис. 12-22), ток в последнюю подводится через спиральные пружины 3, которые вместе с тем создают противодействующий момент. Подвижная катушка прибора стремится стать так, чтобы направление ее магнитного поля совпало с направлением поля неподвижной катушки. Вращающий момент прибора может быть определен через изменение энергии общего магнитного поля катушек (§ 5-6):

$$W_{\text{маг}} = M_{12} I_1 I_2,$$

где M_{12} — взаимная индуктивность катушек;

I_1 и I_2 — токи неподвижной и подвижной катушек.

Следовательно,

$$M_{\text{вр}} = \frac{\partial W_{\text{маг}}}{\partial \alpha} = I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial \alpha}. \quad (12-9)$$

Итак, вращающий момент прибора пропорционален произведению токов в катушках и изменению взаимной индуктивности катушек в зависимости от поворота одной катушки по отношению к другой. Эту зависимость затруднительно выразить математически, но практически мы можем воздействовать на ее характер путем изменения формы катушек, их начального положения и т. д.

Магнитное поле прибора создается в воздухе, вследствие чего оно относительно слабо, и для получения достаточного вращающего момента необходимо дать неподвижной и подвижной катушкам значительное число витков, а в силу этого собственное потребление энергии прибором относительно велико. Слабость поля обуславливает далее малую чувствительность прибора и зависимость показаний от внешних магнитных влияний («магнитобоязнь»). Вследствие отсутствия стали и наличия подвода тока в подвижную часть конструктор не имеет возможности дать прибору запас прочности на перегрузку, электродинамические приборы плохо выносят перегрузку (в осо-

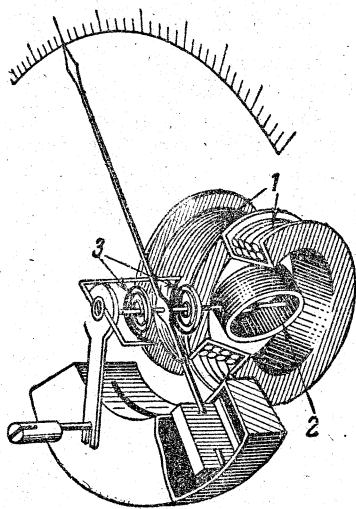


Рис. 12-22. Электродинамический прибор.

бенности амперметр). Наконец, изготовление прибора относительно сложно, в силу чего он дорог.

При одновременном изменении направления тока в обеих катушках прибора направление вращающего момента остается неизменным, следовательно, прибор пригоден как для постоянного, так и для переменного токов, причем шкала у прибора для обоих родов тока одна и та же. Благодаря отсутствию стали прибор может быть сделан весьма точным.

Область применения электродинамических приборов — лабораторные измерения переменного тока, главным образом измерения мощности. В подавляющем большинстве случаев переносные ваттметры изготавливаются электродинамической системы.

Основные недостатки электродинамических приборов — магнитобоязнь и слабость вращающего момента — могут быть устранены посредством введения стали в магнитное поле прибора. Электродинамические приборы со стальным магнитопроводом носят название ферродинамических (рис. 12-23). Однако применение стали уменьшает точность прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов; кроме того, конструкция прибора значительно усложняется. В силу этих причин ферродинамические приборы для точных измерений мало пригодны. Они применяются главным

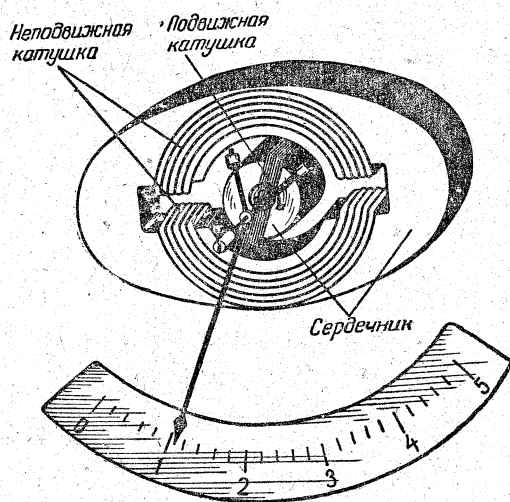


Рис. 12-23. Ферродинамический ваттметр.

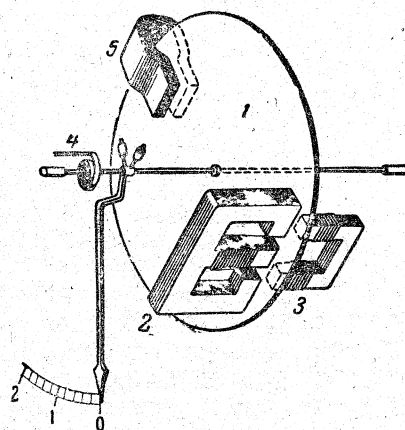


Рис. 12-24. Индукционный ваттметр с подвижным диском.

образом в качестве регистрирующих приборов и щитовых ваттметров; в качестве последних они не имеют недостатков электродинамических ваттметров и значительно точнее индукционных.

В индукционных приборах (рис. 12-24) вращающий момент создается взаимодействием токов, наводимых в подвижной части прибора 1, с магнитными потоками неподвижных электромагнитов 2 и 3.

Результирующее вращающееся магнитное поле прибора создается двумя или более переменными магнитными потоками, не совпадающими по фазе и по расположению в пространстве. Вращающееся магнитное поле наводит вихревые токи в металле диска 1. Вихревые токи, в свою очередь, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают вращающий момент, воздействующий на подвижную часть прибора. Противоводействующий момент создается спиральной пружиной 4.

В качестве успокоителя применяется постоянный магнит 5 (магнитоиндукционное успокоение), в поле которого движется диск прибора.

Вращающий момент в индукционных приборах с вращающимся полем создается взаимодействием одного переменного потока с током, наводимым другим переменным потоком прибора; здесь нет выталкивания экрана из переменного поля (репульсионный эффект), так как, когда экран сцеплен со всем магнитным потоком и распо-

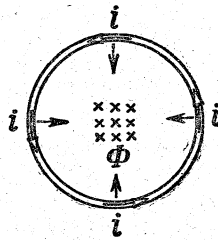


Рис. 12-25. Взаимодействие магнитного потока с током, наводимым им в пластине.

ложен симметрично по отношению к магнитному полю, результирующая сила равна нулю (рис. 12-25).

Рассмотрим индукционную систему, в которой два переменных магнитных потока Φ_1 и Φ_2 пронизывают металлическую пластину и наводят в ней токи (рис. 12-26). Эти два потока изменяются по времени синусоидально с относительным сдвигом фаз на угол ψ , следовательно,

$$\Phi_1 = \Phi_{1M} \sin \omega t;$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2M} \sin (\omega t - \psi).$$

Каждый из потоков наводит в диске э. д. с., отстающую от него по фазе на четверть периода; таким образом,

$$e_1 = - \frac{d\Phi_1}{dt} = - \Phi_{1M} \omega \cos \omega t;$$

$$e_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt} = - \Phi_{2M} \omega \cos (\omega t - \psi).$$

Под действием этих э. д. с. в диске возникнут токи; в пределах некоторых одинаковых колец, выделенных в дис-

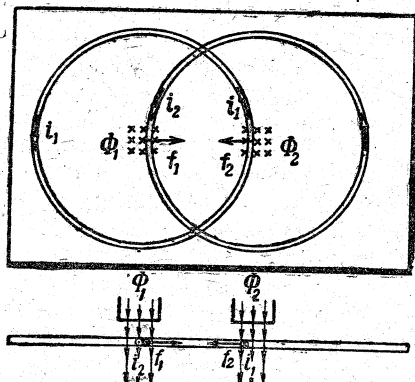


Рис. 12-26. Взаимодействие двух переменных магнитных потоков с токами, индуцируемыми ими в подвижной части прибора.

ке вдоль линий токов, эти токи можно считать обратно пропорциональными сопротивлению R_d этих колец; реактивным сопротивлением колец при стандартной частоте 50 гц можно пренебречь. Следовательно, токи

$$i_1 = - \frac{\Phi_{1M} \omega}{R_d} \cos \omega t;$$

$$i_2 = - \frac{\Phi_{2M} \omega}{R_d} \cos (\omega t - \psi).$$

Взаимодействие каждого из потоков, пронизывающих диск, с током, наводимым вторым потоком, создает силу, действующую на диск; таким образом в системе рис. 12-26 будут действовать две силы:

$$F_1 = c_1 \Phi_2 i_1 \quad \text{и} \quad F_2 = c_2 \Phi_1 i_2;$$

здесь c_1 и c_2 — коэффициенты, зависящие от геометрических размеров системы. Направление этих сил будет зависеть от фазы потока и тока, т. е. в конечном счете от сдвига фаз между потоками. При одинаковом направлении обоих потоков и обоих токов эти силы будут противоположны по направлению, в чем легко убедиться хотя бы при помощи правила левой руки. Следовательно, результирующая сила

$$F = F_1 - F_2,$$

в приборе с вращательным движением эта сила создает вращающий момент, равный произведению силы F на плечо r . Интегрируя, определяем среднее значение этого момента за период:

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{T} \int_0^T F r dt = \frac{1}{T} \frac{\omega r}{R_d} \Phi_{1M} \Phi_{2M} \times \\ \times \left[-c_1 \int_0^T \sin (\omega t - \psi) \cos \omega t dt + \right. \\ \left. + c_2 \int_0^T \sin \omega t \cos (\omega t - \psi) dt \right].$$

Преобразуя это выражение, используем то, что

$$\int_0^T \sin \omega t \cos \omega t dt = \int_0^T \frac{\sin 2\omega t}{2} dt = 0,$$

а

$$\int_0^T \cos^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{2}$$

и

$$\int_0^T \sin^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{2},$$

на основании чего выражение вращающего момента примет следующий вид:

$$M_{вр} = \frac{\omega r}{R_d} \Phi_{1м} \Phi_{2м} \sin \psi \frac{c_1 + c_2}{2}.$$

Сопротивление R_d пути наводимых токов обратно пропорционально толщине диска b и удельной проводимости γ , т. е.

$$R_d = \frac{c_d}{b\gamma};$$

обозначив теперь в выражении вращающего момента постоянные величины

$$r\pi \frac{c_1 + c_2}{c_d} = k_{вр},$$

получим:

$$M_{вр} = k_{вр} f \gamma b \Phi_{1м} \Phi_{2м} \sin \psi. \quad (12-10)$$

Вращающий момент индукционного прибора пропорционален произведению потоков и синусу угла сдвига фаз между этими потоками. Чтобы получить максимальное значение этого момента, необходимо, чтобы угол ψ был равен 90° .

Индукционный прибор может быть сконструирован в виде вольтметра, амперметра и ваттметра. В вольтметре и амперметре катушки прибора соединяются параллельно, а выполнение условия $\psi = 90^\circ$ в цепи одной из катушек достигается посредством применения специальной схемы из реактивных и активных сопротивлений.

В индукционном ваттметре одна катушка включается последовательно в цепь, а вторая параллельно, благодаря чему поток одной катушки пропорционален току I , а поток второй катушки напряжению U .

В уравнение вращающего момента индукционных приборов входят частота f переменного тока и удельная проводимость γ металла диска. Вращающий момент прямо пропорционален

частоте f , поэтому индукционный прибор пригоден только для переменного тока одной определенной частоты. Уменьшение удельной проводимости диска γ вследствие прогрева вихревыми токами ослабляет эти токи, а вместе с ними и вращающий момент (4% на каждые 10°). Эта зависимость показаний от температурных влияний — важный дефект индукционной системы, вследствие которого индукционные приборы оказываются недостаточно точными даже для технических измерений¹. С другой стороны, надо отметить ряд достоинств этой системы, обусловленных применением стальных сердечников; приборы имеют большой вращающий момент, не боятся внешних магнитных влияний, а благодаря отсутствию подвода тока в подвижную часть устойчивы к перегрузкам.

Шунтами индукционные приборы не снабжаются по тем же соображениям, что и электромагнитные.

В стрелочных приборах индукционная система применяется в настоящее время только для технических ваттметров, но, с другой стороны, современные счетчики переменного тока все принадлежат к индукционной системе.

Электростатическая система основана на использовании для измерения сил взаимодействия заряженных проводников. В электростатическом вольтметре (рис. 12-27) имеется система подвижных пластин 1, укрепленных на общей оси, и система неподвижных пластин 2. Источник тока, напряжение которого должно быть измерено, соединяется одним полюсом с подвижной частью, другим — с неподвижными пластинами. Пластины прибора образуют конденсатор, емкость C которого изменяется при отклонении подвижной части; силы электростатического притяжения стремятся увеличить энергию $W_{эл}$ электрического поля прибора и создают вращающий момент

$$M_{вр} = \frac{\partial W_{эл}}{\partial \alpha} = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C}{\partial \alpha}, \quad (12-11)$$

где U — измеренное напряжение;
 α — угол отклонения.

¹ В СССР индукционные ваттметры после Отечественной войны сняты с производства.

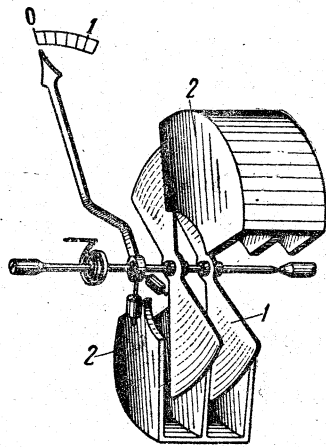


Рис. 12-27. Электростатический вольтметр.

Противодействующий момент создается пружиной.

Изменение знака напряжения не меняет знака вращающего момента, электростатический вольтметр пригоден для измерения постоянного и переменного напряжений. В ряде случаев весьма существенным преимуществом прибора является то, что он практически не потребляет энергии. Однако при низких напряжениях вращающий момент в приборе весьма мал, приходится увеличивать число пластин и вместо установки на кернах подвешивать подвижную часть на нити.

Электростатические вольтметры применяются преимущественно в лабораториях для непосредственного измерения высоких напряжений.

Тепловая система основана на использовании для отклонения подвижной части удлинения металлической нити, нагреваемой измеряемым током.

Достоинством этого принципа измерения является независимость показаний приборов от частоты и формы кривой переменного тока. Однако теми же достоинствами обладают термоэлектрические приборы. С другой стороны, тепловые приборы плохо выносят перегрузки, неточны вследствие чувствительности к температурным влияниям и потребляют относительно много энергии. По всем этим причинам в настоящее время тепловые приборы применяются лишь в немногих

случаях для измерений токов высокой частоты.

Прочие системы приборов применяются для измерения немногих величин (например, вибрационный принцип только для измерения частоты) и будут частично описаны ниже.

Выбор системы прибора зависит от предъявляемых метрологических эксплуатационных и производственных требований. Если требуются точные приборы, следует иметь в виду, что классы точности 0,1 и 0,2 при постоянном токе обеспечивают лишь магнитоэлектрические приборы, а при переменном токе класс 0,2 — электродинамические приборы. Электромагнитные приборы, снабженные сердечником из пермаллоя, могут обеспечить класс 0,5 (0,2 — при установке на растяжках); ферродинамические приборы имеют точность не выше класса 1,0, а выпрямительные — класса 1,5; индукционные стрелочные приборы дают точность лишь по классу 2,5. Для измерения мощности используются электродинамическая, ферродинамическая и индукционная системы. Если по условиям эксплуатации для измерения переменных токов и напряжений требуются устойчивые к перегрузкам и дешевые приборы, то применяется электромагнитная система.

При повышении частоты до 1 000 гц могут применяться электродинамические, электромагнитные с сердечниками из пермаллоя и ферродинамические приборы; при частотах до 10—20 кгц, — выпрямительные приборы; наконец, при более высоких частотах (до нескольких мегагерц) — термоэлектрические приборы.

12-7. Ваттметры

Для измерения мощности в цепи постоянного тока не требуется специального прибора, потому что мощность $P=UI$ легко может быть подсчитана по показаниям вольтметра и амперметра. В цепи переменного тока такой подсчет, вообще говоря, невозможен, так как мощность переменного тока

$$P = UI \cos \varphi$$

зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз между ними.

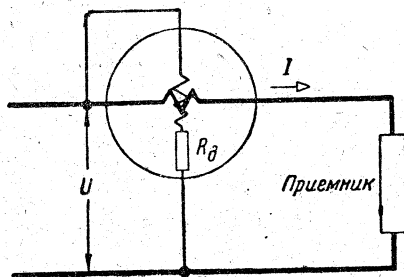


Рис. 12-28. Схема соединений цепей ваттметра.

Поэтому для измерения мощности переменного тока необходим ваттметр.

В качестве ваттметра может быть применен электродинамический, ферродинамический или индукционный прибор. В электродинамическом ваттметре неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой, а подвижная снабжается добавочным сопротивлением и включается параллельно нагрузке (рис. 12-28).

Таким образом, мгновенное значение тока в неподвижной катушке равно току приемника, а ток подвижной катушки пропорционален мгновенному значению напряжения на зажимах приемника; мы будем называть его током цепи напряжения i_n .

Нужно, чтобы этот ток совпадал по фазе с напряжением, следовательно, цепь напряжения ваттметра должна быть практически безреактивна. Добавочное сопротивление R_d , составляющее большую часть сопротивления этой цепи, изготавливается безреактивным, а индуктивное сопротивление подвижной катушки относительно мало. Это дает возможность считать сопротивление цепи напряжения ваттметра $Z_{вт.н}$ безреактивным, т. е. полагать, что $Z_{вт.н} \approx R_{вт.н}$. При выполнении этого условия ток цепи напряжения ваттметра совпадает по фазе с напряжением

$$i_n = \frac{u}{R_{вт.н}}.$$

Вращающий момент у электродинамического прибора пропорционален произведению токов в неподвижной и подвижной катушках и изменению взаимной индуктивности M катушек по углу поворота $\left(\frac{\partial M}{\partial \alpha}\right)$, но вследствие

значительной инерции подвижная часть прибора не может следовать за изменениями вращающего момента в течение периода переменного тока, а принимает положение, определяемое средним за период значением вращающего момента. Это среднее значение у ваттметра будет:

$$M_{вр.вт} = \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_n idt = \\ = \frac{\partial M}{\partial \alpha} \frac{1}{R_{вт.н}} \left(\frac{1}{T} \int_0^T u idt \right).$$

Множитель, поставленный в скобки, как известно, есть средняя мощность P переменного тока, на основании чего

$$M_{вр.вт} = \frac{P}{R_{вт.н}} \frac{\partial M}{\partial \alpha} = \frac{UI \cos \varphi}{R_{вт.н}} \cdot \frac{\partial M}{\partial \alpha}. \quad (12-12)$$

Для того чтобы ваттметр имел равномерную шкалу, нужно, чтобы $\frac{\partial M}{\partial \alpha} = \text{const}$, т. е. чтобы взаимная индуктивность катушек изменялась пропорционально α -углу поворота подвижной катушки. Это условие приближенно осуществлено в большинстве современных электродинамических ваттметров, благодаря чему они имеют практически равномерную шкалу, в то время как все вольтметры и амперметры переменного тока имеют неравномерную начальную часть шкалы.

Чтобы компенсировать влияние индуктивности подвижной катушки и добиться полного совпадения фаз i_n и u , в лабораторных ваттметрах применяются специальные фазокомпенсационные схемы (шунтирование подвижной катушки реактивной катушкой, включение конденсатора параллельно части добавочного сопротивления). Однако весьма затруднительно добиться полной безреактивности цепи напряжения ваттметра, так как в индуктивность цепи напряжения входит и взаимная индуктивность M , меняющаяся при изменении отклонения подвижной катушки, вследствие чего между напряжением u и током i_n в этих цепях имеет место небольшой сдвиг фаз на угол δ , называемый угловой погрешностью ваттметра. Из-за последней показания ваттметра про-

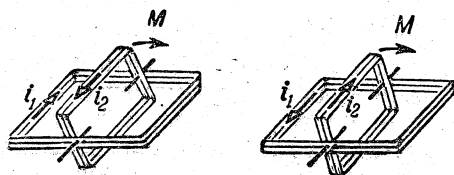


Рис. 12-29. Схема воздействия токов двух катушек ваттметра при одновременном изменении направления этих токов.

порциональны не $\cos \varphi$, а $\cos (\varphi \pm \delta)$. Практически угловая погрешность ваттметра заметно сказывается на точность измерения мощности лишь при больших сдвигах фаз (например, при опытах холостого хода и короткого замыкания мощных трансформаторов — см. § 13-3 и 13-9).

У ваттметра, включенного в цепь переменного тока, при изменении направления тока в обеих катушках направление вращающего момента не меняется (рис. 12-29), но если поменять местами зажимы одной из двух цепей ваттметра, то это изменяет относительную фазу тока в соответствующей катушке на 180° и меняет направление вращающего момента (рис. 12-30). Чтобы предупредить возможность такого неправильного соединения, необходимо, чтобы соответственно были размечены у зажимов относительные «начала» и «концы» цепей.

«Начала» принято называть генераторными зажимами, так как стрелка ваттметра отклоняется в надлежущую сторону, если оба эти зажима присоединены к одному и тому же полюсу источника тока (рис. 12-31). Начала отмечают у зажимов прибора знаком звездочки (*).

На рис. 12-31 показаны два способа правильного включения ваттметра. При первом способе соединения через неподвижную катушку прибора проходит тот же ток, что и через контролируемую нагрузку H , но на цепь напряжения прибора воздействует на-

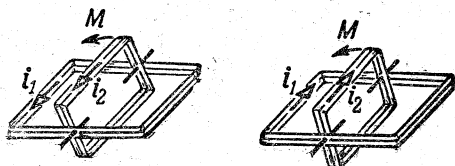


Рис. 12-30. Изменение относительной фазы токов двух катушек ваттметра.

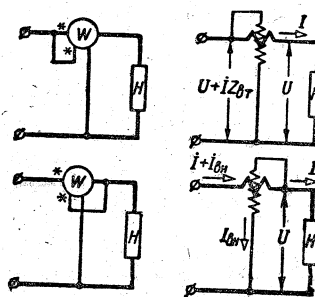


Рис. 12-31. Схемы двух способов правильного включения ваттметра.

пряжение большее, чем напряжение на зажимах нагрузки, на величину падения напряжения в цепи тока прибора. Вследствие этого ваттметр учитывает, кроме мощности нагрузки, также и мощность, затрачиваемую в его цепи тока ($I^2 R_{вт.т}$). При втором способе соединения на цепь напряжения ваттметра воздействует то же напряжение, что и на нагрузку, зато через цепь тока ваттметра проходит ток, складывающийся из тока нагрузки и тока цепи напряжения ваттметра. Вследствие этого ваттметр учитывает, кроме мощности нагрузки, также и мощность, затрачиваемую в его цепи напряжения ($\frac{U^2}{R_{вт.н}}$). Эти погрешности, вызываемые собственным потреблением ваттметра, малы, но их приходится учитывать при точных измерениях малых мощностей.

На распределительных щитах в последние годы в большинстве случаев устанавливаются ферродинамические ваттметры. К ним относится в основном все сказанное выше об электродинамических ваттметрах. Но следует отметить, что эти приборы значительно меньшей точности и что для измерения мощности постоянного тока они непригодны из-за влияния гистерезиса.

В индукционном ваттметре магнитный поток катушки, включенной последовательно (цепи тока):

$$\Phi_{1M} = k_1 I,$$

а поток катушки, включенной параллельно (цепи напряжения):

$$\Phi_{2M} = k_2 U.$$

Чтобы прибор показал мощность переменного тока, необходимо соглас-

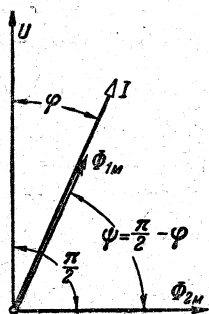


Рис. 12-32. Фазные соотношения в индукционном ваттметре.

но (12-10), чтобы $\sin \psi = \cos \varphi$ или чтобы $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$ (рис. 12-32). Можно считать, что I и Φ_1 совпадают по фазе; следовательно, сдвиг фаз между напряжением U и потоком Φ_2 , им создаваемым, должен быть равен $\frac{\pi}{2}$ («условие квадратуры»). Это легко осуществляется путем воздействия на магнитную цепь катушки напряжения (см. векторную диаграмму катушки со стальным сердечником — § 10-5).

Для индукционных ваттметров характерна очень длинная шкала (примерно 300°). Они служат лишь в качестве щитовых приборов, но в новых установках из-за их низкой точности они не применяются.

12-8. Методы измерения мощности и энергии трехфазного тока

Для измерения мощности трехфазной системы при равномерной нагрузке фаз достаточно измерить мощность одной фазы и полученное значение утроить; для названной цели достаточно, конечно, одного ваттметра. Однако непосредственное измерение фазной мощности возможно только в ограниченном числе случаев: при

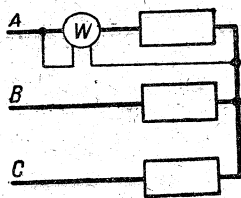


Рис. 12-33. Измерение мощности одним ваттметром при доступной нулевой точке.

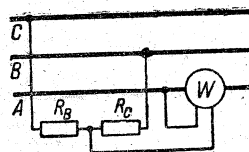


Рис. 12-34. Измерение мощности одним ваттметром с искусственной и нулевой точкой.

доступной нулевой точке (рис. 12-33) или при наличии нулевого провода. В остальных случаях для измерения трехфазной мощности одним ваттметром необходимо искусственно создать для этого прибора соответствующие условия, т. е. нужно, чтобы на цепь напряжения ваттметра действовало напряжение, равное или пропорциональное фазному, и чтобы через последовательную цепь прибора проходил фазный ток или ему пропорциональный; наконец, и это самое существенное, сдвиг фаз между напряжением и током, действующими на ваттметр, должен равняться сдвигу фаз нагрузки.

Относительно простым способом выполнения указанных условий является присоединение цепи напряжения ваттметра через искусственную нулевую точку; так называется нулевая точка звезды, образованной из сопротивления цепи напряжения ваттметра и двух других равных ему добавочных сопротивлений (рис. 12-34).

Векторные соотношения линейных напряжений и токов трехфазной системы (рис. 12-35) не зависят от того,

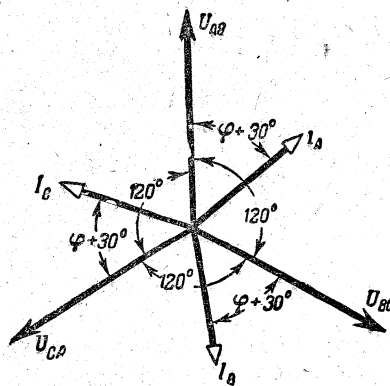


Рис. 12-35. Векторная диаграмма линейных напряжений и токов трехфазной симметричной системы.

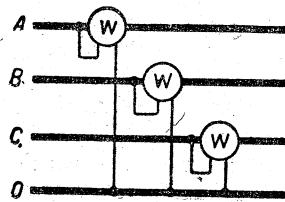


Рис. 12-36. Схема способа трех ваттметров.

как соединена нагрузка — звездой или треугольником; при равномерной нагрузке мощность трехфазной системы будет всегда

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi,$$

а ваттметр, присоединенный через искусственную нулевую точку, будет показывать:

$$\begin{aligned} P_{\text{из}} &= U_{\text{вт.н}} I_{л} \cos(\dot{U}_{\text{вт.н}}, I_{л}) = \\ &= U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{л} I_{л} \cos \varphi = \frac{1}{3} P. \end{aligned}$$

При неравномерной нагрузке фаз в системе с нулевым проводом можно использовать то обстоятельство, что общая активная мощность трехфазной системы равна сумме активных мощностей отдельных фаз. Она, следовательно, может быть измерена при помощи трех ваттметров, каждый из которых учитывает мощность одной фазы (рис. 12-36).

Основным методом измерения мощности в трехфазных трехпроводных системах при несимметричной нагрузке является способ двух ваттметров. Покажем, что эти ваттметры учитывают всю мощность трехфазной системы независимо от распределения нагрузки между фазами. Мгновенная мощность трехфазной системы равна сумме мгновенных фазных мощностей; в частности, при соединении нагрузки звездой эта мощность может быть выражена следующим образом:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (12-13)$$

здесь u_A , i_A , u_B , i_B , u_C и i_C — мгновенные значения соответствующих фазных напряжений и токов, а так как

$$i_C = -(i_A + i_B),$$

то мгновенная мощность системы

$$p = i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C).$$

Разность фазных напряжений равна соответствующему линейному напряжению, на основании чего мощность

$$p = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B \quad (12-14)$$

Условиям этого уравнения соответствует схема соединений рис. 12-37; следовательно, два ваттметра, включенных согласно этой схеме, учитывают всю мощность трехфазной системы.

Так как мощность, даваемая источником тока, при определенных значениях линейных напряжений и токов не зависит ни от внутреннего соединения источника тока, ни от способа соединения нагрузки, то, следовательно, способ двух ваттметров пригоден и при соединении нагрузки треугольником.

Отметим своеобразную особенность схемы: система линейных напряжений в нормальной последовательности u_{AB} , u_{BC} и u_{CA} , в то время как в уравнение схемы двух ваттметров входит напряжение u_{AC} , т. е. напряжение, противоположное по фазе u_{CA} . Чтобы получить напряжение u_{AC} , нужно «начало» цепи напряжения первого ваттметра присоединить к проводу A, а «конец» — к проводу C, ведь изменение на 180° фазы переменного напряжения по отношению к измерительному прибору осуществляется путем простого переключения зажимов цепи напряжения прибора.

Алгебраическая сумма показаний ваттметров, включенных согласно рис. 12-37, равна мощности всей трехфазной нагрузки, но распределение этой мощности между показаниями двух ваттметров не связано непосредственно со степенью равномерности нагрузки, а зависит в большей мере от величины и знака сдвига фаз на-

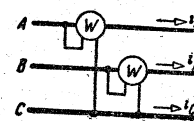


Рис. 12-37. Схема способа двух ваттметров.

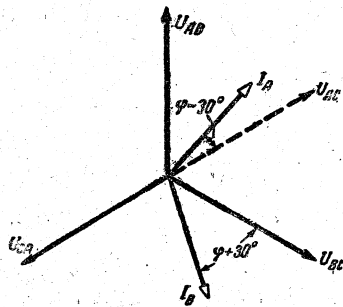


Рис. 12-38. Векторная диаграмма к способу двух ваттметров.

грузки. Проследим эту зависимость в простейшем случае при симметричной нагрузке. Уравнение (12-14) при переходе к средней мощности и действующим значениям напряжений и токов примет следующий вид:

$$P = P_I + P_{II} = U_{AC} I_A \cos(\dot{U}_{AC}, I_A) + U_{BC} I_B \cos(\dot{U}_{BC}, I_B).$$

При симметричной нагрузке

$$U_{AC} = U_{BC} = U_{л} \text{ и } I_A = I_B = I_{л}.$$

На рис. 12-38 дана векторная диаграмма системы, на основании которой углы сдвига фаз между векторами U_{AC} и I_A и векторами U_{BC} и I_B будут соответственно $\varphi - 30^\circ$ и $\varphi + 30^\circ$. Таким образом, показания двух ваттметров могут быть выражены в следующей форме:

$$P = P_I + P_{II} = U_{л} I_{л} \cos(\varphi - 30^\circ) + U_{л} I_{л} \cos(\varphi + 30^\circ). \quad (12-15)$$

Из этого явствует, что показания двух ваттметров при симметричной нагрузке будут одинаковы, когда $\varphi = 0$. При $\varphi > 60^\circ$ стрелка второго ваттметра отклоняется за нуль шкалы, и чтобы отсчитать в таких условиях показание второго ваттметра, нужно переключить зажимы одной из цепей прибора (часто в корпус ваттметра вделывается специальный переключатель для его цепи напряжения). Такое переключение заставит стрелку вернуться на шкалу, но показание ваттметра уже будет нужно считать отрицательным и вычитать из показания первого ватт-

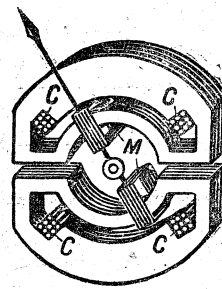


Рис. 12-39. Двухэлементный ферродинамический ваттметр трехфазного тока. М — две подвижные катушки; С — две неподвижные катушки.

метра, чтобы определить мощность трехфазной системы.

На распределительных щитах применяются ваттметры трехфазного тока, представляющие собой, по существу, удвоенный (или утроенный) однофазный прибор, т. е. содержащие в общем корпусе два (или три) движущих элемента, связанных общей осью и таким путем воздействующих на общую стрелку ваттметра трехфазного тока (рис. 12-39).

Измерение реактивной мощности выполняется почти исключительно в трехфазных системах. При равномерной нагрузке фаз это измерение может быть выполнено при помощи одного ваттметра, включенного согласно рис. 12-40 («включение под чужое напряжение»); как ясно из векторной диаграммы рис. 12-35, ваттметр будет показывать:

$$U_{BC} I_A \cos(90^\circ \pm \varphi) = U_{л} I_{л} \sin(\pm \varphi),$$

а так как реактивная мощность трехфазной системы при равномерной нагрузке

$$Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin(\pm \varphi),$$

то, следовательно, при данном способе соединения показания ваттметра, ум-

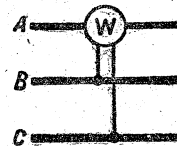


Рис. 12-40. Схема измерения реактивной мощности трехфазной симметричной системы.

ноженные на $\sqrt{3}$, дадут реактивную мощность трехфазного тока.

Этот способ включения применяется иногда для учета среднего $\cos \varphi$ при дифференцированном тарифе на электрическую энергию (т. е. при тарифе, согласно которому продажная стоимость $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ исчисляется в зависимости от среднего $\cos \varphi$ данного потребителя); в таких случаях электрическая станция учитывает по показаниям обычного трехфазного счетчика потребление активной энергии W и по показаниям счетчика, включенного согласно рис. 12-40, «потребление» реактивной энергии W_p ; средний коэффициент мощности определяется тогда следующим образом:

$$\cos \varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_p^2}}. \quad (12-16)$$

Так как схема рис. 12-40 пригодна только для симметричной нагрузки, то чаще для измерения W_p применяются специальные счетчики реактивной энергии.

12-9. Счетчики электрической энергии

Эти приборы служат для учета энергии, получаемой отдельными потребителями от электрической станции или отдаваемой электрической станцией в сеть. В рассмотренных нами приборах подвижная часть под действием тока поворачивалась на некоторый угол, в счетчиках она должна вращаться, причем скорость ее вращения должна быть пропорциональна мощности.

Вместо противодействующего момента в счетчиках необходимо иметь тормозящий момент, пропорциональный скорости вращения подвижной части. Этот момент создается посредством вращения алюминиевого диска, насаженного на ось подвижной части счетчика и помещенного между полюсами постоянного магнита (рис. 12-41).

Несколько упрощая условия, мы можем определить этот тормозящий момент следующим образом: в диске наводится э. д. с., прямо пропорциональная потоку постоянного магнита

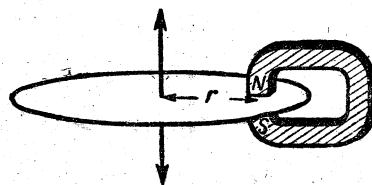


Рис. 12-41. Тормозной диск и магнит.

Φ и окружной скорости v вращения части диска, находящейся между полюсами:

$$e_d = k_1 \Phi v = k_1 \Phi \frac{2\pi nr}{60} = k_2 \Phi n,$$

эта э. д. с. создает ток, прямо пропорциональный удельной проводимости материала диска γ :

$$i_d = k_3 \gamma e_d = k_4 \gamma r \Phi n.$$

Ток в диске, взаимодействуя с потоком постоянного магнита, создает тормозящий момент, прямо пропорциональный току и потоку:

$$M_{\text{тор}} = k_5 i_d \Phi,$$

или

$$M_{\text{тор}} = k_6 \gamma r \Phi^2 n = k_{\text{тор}} n, \quad (12-17)$$

т. е. тормозящий момент прямо пропорционален скорости вращения диска, n [об/мин].

Вращающий момент прибора должен быть прямо пропорционален мощности

$$M_{\text{вр}} = k_{\text{вр}} P;$$

при установившейся скорости вращения он должен быть равен тормозящему моменту

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{тор}}, \text{ или } k_{\text{вр}} P = k_{\text{тор}} n,$$

или

$$P = \frac{k_{\text{тор}}}{k_{\text{вр}}} n.$$

Умножив теперь обе части равенства на t , обозначающее определенный промежуток времени, мы получим в левой части $Pt = W$ — электрическую энергию, израсходованную в контролируемой сети за время t , а в правой части $nt = N$ — суммарное число оборотов счетчика за это же время.

Следовательно,

$$W = \frac{k_{\text{тор}}}{k_{\text{вр}}} N = C_{\text{сч}} N,$$

т. е., умножив число оборотов счетчика N на коэффициент $C_{сч}$, мы получим энергию, израсходованную в сети за время t . Величина $C_{сч}$ носит название постоянной счетчика; она представляет собой количество электрической энергии, израсходованной в сети за время одного оборота счетчика.

Ось подвижной части счетчика через посредство червячной передачи приводит во вращение счетный механизм. Передаточное число здесь выбирается так, чтобы по счетному механизму можно было отсчитывать не обороты, а непосредственно киловатт-часы.

Электродинамический счетчик ватт-часов постоянного тока показан на рис. 12-42. Его главное магнитное поле создается неподвижными катушками 1 из толстой проволоки; они включаются последовательно в линию и через них проходит рабочий ток I . Таким образом, магнитный поток $\Phi = k_1 I$. Якорь 2 состоит не менее чем из трех катушек, присоединенных к пластинам коллектора 3, по которым скользят щетки 4; последовательно с якорем включено большое добавочное сопротивление 6. Таким образом, ток в якоре

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я} + R_{д}}$$

Электродвижущая сила $E_{я}$, индуцируемая в якоре при вращении, здесь весьма мала и ею можно пренебречь; тогда

$$I_{я} = k_2 U.$$

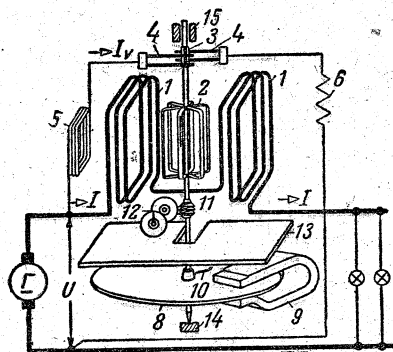


Рис. 12-42. Схема устройства электродинамического счетчика.

Вращающий момент, как во всяком электродинамическом приборе, пропорционален произведению токов; следовательно,

$$M_{вр} = k_1 k_2 k_3 U I = k_{вр} P.$$

Тормозящий момент прибора создается при помощи тормозного диска 8, вращающегося между полюсами постоянного магнита 9. Этот последний защищен от поля главных катушек стальным экраном 13. Тормозящий момент

$$M_{тор} = k_{тор} n.$$

На скорость вращения, в особенности при малых нагрузках, оказывает значительное влияние момент трения $M_{тр}$ в подпятниках 14 и 15, в счетном механизме 11 и 12 и о воздух. Чтобы устранить мешающее влияние трения, счетчик снабжается компенсатором трения 5, который представляет собой небольшую катушку, соединяемую последовательно с якорем. Поле этой катушки пропорциональное току в якоре, взаимодействуя с током в якоре, создает небольшой вспомогательный вращающий момент, не зависящий от нагрузки:

$$M_{всп} = k_4 \Phi I_{я} = k_5 I_{я}^2 = k_6 U^2.$$

При идеальной работе счетчика $M_{тр} = M_{всп}$ и, следовательно, в уравнении моментов

$$M_{вр} + M_{всп} = M_{тор} + M_{тр}$$

эти моменты взаимно уравниваются и остается основное равновесие моментов $M_{вр} = M_{тор}$, на основании которого, как мы вывели выше:

$$W = C_{сч} N.$$

Вспомогательный момент существует, даже когда нет нагрузки: чтобы устранить опасность самохода, т. е. безостановочного вращения якоря при отсутствии нагрузки, возможного при повышении напряжения U , счетчик снабжается тормозным крючком 10. Этот последний представляет собой кусок стальной проволоки, припаянной к оси счетчика и притягивающейся к постоянному магниту. Тормозной крючок удерживает счетчик от

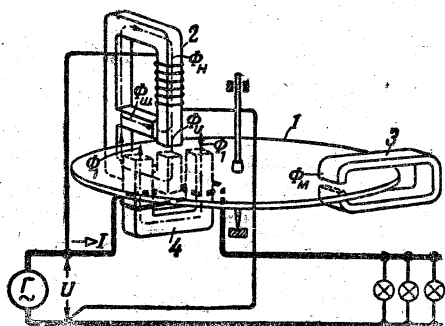


Рис. 12-43. Схема устройства индукционного счетчика.

вращения, которое могло бы возникнуть под действием одного вспомогательного момента, создаваемого компенсатором трения.

Для регулирования счетчика нужно переставлять постоянный магнит и тем самым изменять тормозной момент (путем изменения r , рис. 12-41). Вспомогательный момент регулируется путем приближения или удаления катушки компенсатора по отношению к якорию.

Схема устройства индукционного счетчика ватт-часов переменного тока показана на рис. 12-43. Вращающий момент в нем создается совершенно так же, как и в индукционном приборе с подвижным диском.

Два магнитных потока Φ_U и Φ_I ; один пропорциональный напряжению сети U , второй — рабочему току I создают вращающееся магнитное поле. Для получения 90° -ного сдвига потока Φ_U по отношению к напряжению U сердечник 2 катушки напряжения снабжен магнитным шунтом — часть магнитного потока $\Phi_{ш}$ катушки замыкается помимо диска 1. Поток $\Phi_{ш}$ эквивалентен потоку рассеяния трансформатора (§ 13-3); ему пропорциональна составляющая $I_1 X_1$ напряжения. Соответствующим подбором величины $\Phi_{ш}$ достигается 90° -ный сдвиг фаз между напряжением U и потоком Φ_U . Таким путем создается вращающий момент, пропорциональный мощности. Тормозящий момент создается путем воздействия постоянно магнита 3 на тот же диск. Вращающий и тормозящий моменты в одинаковой мере зависят от сопротивления диска, поэтому, в отличие от индук-

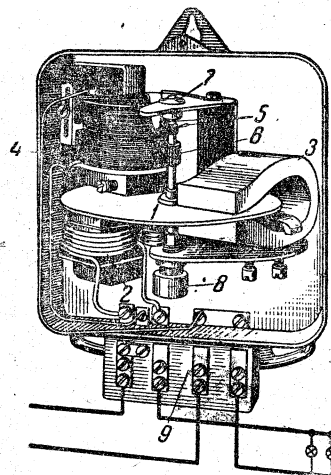


Рис. 12-44. Индукционный счетчик (на рисунке снят счетный механизм и опущены детали крепления).

1 — диск; 2 — электромагнит цепи тока; 3 — тормозной магнит; 4 — электромагнит цепи напряжения; 5 — тормозной крючок и флажок; 6 — зубчатка для передачи движения счетному механизму; 7 — верхний подпятник; 8 — нижний подпятник; 9 — коробка зажимов.

ционных стрелочных приборов показания индукционного счетчика мало зависят от температурных влияний. Компенсация трения осуществляется путем создания небольшой несимметрии в магнитной цепи напряжения, вследствие которой небольшая часть

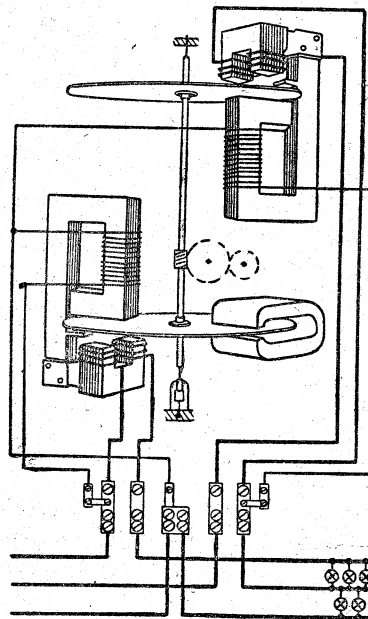


Рис. 12-45. Счетчик трехфазного тока с двумя движущимися элементами.

потока напряжения сдвигается по фазе по отношению ко всему потоку Φ_U ; при наличии двух потоков, сдвинутых по фазе друг по отношению к другу, как известно из теории индукционного прибора, создается вращающееся магнитное поле и возникает вспомогательный момент.

Эту асимметрию можно создать, ввернув стальной винт в манитопровод цепи напряжения, как это показано на рис. 12-44.

Для устранения самохода счетчик снабжается тормозным крючком. Регулирование счетчика осуществляется путем перестановки постоянного магнита 3.

Счетчик трехфазного тока представляет собой два или три движущих элемента индукционных счетчиков, воздействующих на общую ось и общий счетный механизм (рис. 12-45).

12-10. Логометры

В большинстве электроизмерительных приборов непосредственной оценки отклонение подвижной части является некоторой функцией тока, проходящего через прибор. Если ставится задача — использовать электроизмерительный прибор для измерения некоторой электрической или неэлектрической величины, не являющейся прямой функцией тока (сопротивления, сдвига фаз, частоты, давления, температуры и т. д.), то необходимо сделать ток, проходящий через прибор, функцией величины, подлежащей измерению. Однако согласно закону Ома ток пропорционален напряжению: $I = F(U)$. Вследствие этого показание прибора, приспособляемого для измерения величины x , становится функцией двух переменных — измеряемой величины и напряжения источника тока: $I = F(x, U)$. Зависимость показания прибора от напряжения U лишает возможность снабдить прибор шкалой, градуированной в единицах x (например, в омах), так как при отсутствии прямой зависимости между x и U изменение напряжения явится причиной соответствующей погрешности при измерении x .

Для устранения влияния изменений напряжения на показания прибо-

ра возможны два пути: выполнять измерение при определенном значении напряжения, для которого только и справедлива градуировка шкалы прибора, или же выполнять измерение прибором, положение равновесия подвижной части которого определяется отношением токов в двух обмотках прибора. Во втором случае положение равновесия, т. е. установившееся отклонение подвижной части, может быть сделано независимым от величины напряжения. Электроизмерительные приборы, построенные по этому принципу, носят название логометров — от греческого слова $\lambda\omicron\gamma\omicron\zeta$ (логос) — отношение.

Электроизмерительный прибор любой системы является логометром, если в нем не только вращающий, но и противодействующий момент создается электрическим путем. Следовательно, для логометров характерно отсутствие механического противодействующего момента (пружин).

Оба момента, создаваемых в логометре электрическим путем, должны в равной n -ной степени зависеть от напряжения U , создающего токи в двух вращающихся элементах прибора (в двух катушках), и оба должны быть функциями отклонения α подвижной части [$f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$], но обязательно неодинаковыми функциями. Наконец, один из моментов (или оба) должен зависеть от измеряемой величины x . В случае, когда только один момент M_1 зависит от x , он играет роль вращающего момента и может быть выражен в общей форме следующим образом:

$$M_{\text{вр}} = k_1 U^n f_1(\alpha) F(x),$$

второй момент тогда играет роль противодействующего

$$M_{\text{пр}} = k_2 U^n f_2(\alpha);$$

здесь k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от параметров (сопротивлений, индуктивностей и т. д.) цепей логометра.

Моменты эти противоположны по направлению, и под действием большего из них подвижная часть поворачивается. Но логометр должен быть

построен так, чтобы при перемещении подвижной части уменьшался момент, направление которого совпадает с направлением перемещения, второй момент при этом возрастает и при определенном отклонении α моменты уравновешиваются:

$$\begin{aligned} M_{вр} &= k_1 U^n f_1(\alpha) F(x) = M_{пр} = \\ &= k_2 U^n f_2(\alpha), \end{aligned} \quad (12-3)$$

или

$$F(x) = \frac{f_2(\alpha) k_2}{f_1(\alpha) k_1}, \quad (12-4)$$

т. е. отклонение α подвижной части не зависит от напряжений U , а является только функцией измеряемой величины x .

При напряжении $U=0$ оба момента равны нулю и, следовательно, подвижная часть находится в состоянии безразличного равновесия и не возвращается на нулевое деление шкалы. Это может ввести в заблуждение наблюдателя; чтобы избежать этого, логометры часто снабжаются приспособлением, удаляющим стрелку за пределы шкалы при отсутствии тока.

Ниже мы рассмотрим отдельные конкретные приборы различных систем, в которых применен принцип логометра.

Логометрам, помимо погрешностей, общих для всех электроизмерительных приборов, присущи специфические погрешности, вызываемые влиянием абсолютных значений измеряемых электрических величин. Эти погрешности могут возникать вследствие двух причин: 1) наличия какого-то механического момента, действующего на подвижную часть логометра; 2) неодинаковой зависимости моментов от напряжения U .

При наличии механического момента M_m (например, вследствие неполной уравновешенности подвижной части) уравнение равновесия (12-3) примет следующий вид:

$$k_1 U^n f_1(\alpha) F(x) = k_2 U^n f_2(\alpha) + M_m$$

и, следовательно,

$$F(x) = \frac{k_2 f_2(\alpha)}{k_1 f_1(\alpha)} + \frac{M_m}{k_1 f_1(\alpha) U^n}, \quad (12-5)$$

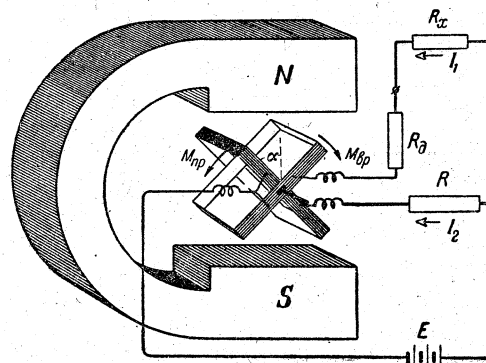


Рис. 12-46. Магнитоэлектрический логометр с равномерным полем.

т. е. отклонение α в этом случае в какой-то степени зависит от напряжения. Так как полностью устранить механический момент невозможно, то показания логометров в некоторой степени всегда зависят от напряжения.

Логометры могут быть изготовлены любой электроизмерительной системы. Но особенно распространены магнитоэлектрические логометры. В частности, они широко используются для электрических измерений неэлектрических величин.

Рассмотрим как наглядный пример использования принципа логометра соотношения, имеющего место в упрощенной модели магнитоэлектрического логометра — в приборе с равномерным магнитным полем, показанном на рис. 12-46. Подвижная часть такого прибора состоит из двух рамок, укрепленных на общей оси и жестко скрепленных между собой под прямым углом. Ток в подвижные катушки подводится через три мягкие серебряные спирали, не создающие механического момента. Если подвижная система хорошо уравновешена, то при отсутствии токов она будет находиться в состоянии безразличного равновесия.

Подвижные катушки присоединяются к общему источнику тока, а их цепи замыкаются через два сопротивления: одно R — смонтированное внутри прибора и второе R_x — измеряемое сопротивление — вне прибора. Токи, проходящие по катушкам прибора, создают два момента, действующих на подвижную часть: вращающий мо-

мент, создаваемый током первой катушки:

$$M_{\text{вр}} = \omega_1 S B I_1 \sin \alpha$$

и противодействующий момент, создаваемый током второй катушки:

$$M_{\text{пр}} = \omega_2 S B I_2 \cos \alpha;$$

здесь α — угол между плоскостью первой катушки и нормалью к направлению магнитного поля. Эти моменты противоположны по направлению, причем поворот подвижной части по направлению соответствующего момента вызывает уменьшение этого момента и увеличение второго момента, против направления которого поворачивается подвижная часть. Таким образом, автоматически устанавливается равновесие моментов: любому отношению токов в катушках прибора соответствует некоторое положение равновесия, определяемое из условия

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega_2 I_2}{\omega_1 I_1} = k \frac{I_2}{I_1},$$

где k — коэффициент, постоянный для данного прибора.

В цепи первой катушки, помимо R_x , имеется еще добавочное сопротивление (помещаемое внутри прибора) R_d ; суммарное сопротивление цепи второй катушки обозначим через R ; следовательно, токи в катушках будут:

$$I_1 = \frac{E}{R_x + R_d}; \quad I_2 = \frac{E}{R}.$$

Подставив эти выражения токов в уравнение моментов, из условия равенства моментов при установившемся отклонении получим:

$$(R_x + R_d) : R = \operatorname{const} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

на основании чего измеряемое сопротивление

$$R_x = \operatorname{const} \cdot \operatorname{tg} \alpha - R_d.$$

Следовательно, отклонение подвижной части является функцией лишь измеряемого сопротивления R_x

и не зависит от напряжения источника тока. Это дает возможность снабдить прибор шкалой, градуированной в единицах сопротивления (т. е. применить прибор в качестве омметра). Если R_x изготовлено из проводящего материала с большим температурным коэффициентом, то имеется возможность этот же прибор использовать в качестве электрического термометра: если же в качестве R_x взять столбик из угольных пластин, сопротивление которого сильно зависит от давления (см. рис. 12-55), то можно использовать прибор для измерения давлений и т. д.

12-11. Испытание состояния изоляции и омметры

Исправная работа любой электрической установки в большой мере зависит от состояния ее изоляции как между проводниками, так и между токоведущими частями и землей. Состояние изоляции определяется ее электрическим сопротивлением, электрической прочностью и диэлектрическими потерями. Электрическая прочность проверяется соответствующим испытанием изоляции на пробой повышенным напряжением; диэлектрические потери измеряются соответствующими специальными методами. Однако оба эти вида испытаний выполняются лишь в установках с рабочим напряжением свыше 1000 в и относятся к специальной отрасли электротехники — технике высоких напряжений. В установках с рабочим напряжением 1000 в и ниже испытание изоляции сводится к измерению ее сопротивления.

Состояние изоляции должно быть определено в каждой выполненной электрической установке до сдачи ее в эксплуатацию, а также после длительного бездействия или ремонта. Измерение сопротивления изоляции производится между проводниками и землей, а также между каждыми двумя проводниками разного потенциала.

Сопротивление изоляции в большой мере зависит от приложенного напряжения, поэтому измерение этого сопротивления следует производить, по возможности, при напряжении, рав-

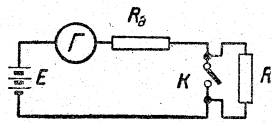


Рис. 12-47. Схема омметра с сухой батареей.

ном рабочему, и во всяком случае при напряжении не менее 100 в.

При испытании изоляции относительно земли при помощи постоянного тока следует отрицательный полюс источника тока соединять с испытуемым проводником, а положительный полюс — с землей. Это делается для того, чтобы предупредить возможность образования в месте повреждения изоляции на металле проводника плохо проводящего слоя окисла вследствие электрохимического действия постоянного тока. Такая пленка окисла обладает значительным сопротивлением, из-за чего при измерении можно получить преувеличенное значение для сопротивления испытуемой изоляции.

Сопротивление изоляции участка сети между двумя предохранителями, или за последним предохранителем, должно быть не менее 1 000 ом на каждый вольт рабочего напряжения (например, 220 000 ом при рабочем напряжении 220 в). Это требование не относится к машинам, трансформаторам и аккумуляторам; для них имеются специальные нормы.

Для измерения сопротивления изоляции в большинстве случаев применяются стрелочные приборы непосредственной оценки — мегомметры (омметры). Шкалы этих приборов градуируются непосредственно в мегомах или килоомах. Простейшая схема омметра приведена на рис. 12-47. При постоянном значении э. д. с. сухой батареи E ток в гальванометре G будет обратно пропорционален сопротивлению цепи, состоящему из добавочного сопротивления R_d , помещенного внутри прибора, и измеряемого сопротивления R_x . Следовательно, при постоянном значении э. д. с. E прибор может быть проградуирован для непосредственного отсчета по шкале значения R_x . Нулевое деление шкалы будет соответствовать току $I = E : R_d$, а нуле-

вому значению тока будет соответствовать деление шкалы $R_x = \infty$. Для контроля состояния батареи служит ключ K , замыкающий накоротко зажимы R_x . При замыкании этого ключа стрелка прибора должна становиться на нулевое деление шкалы сопротивлений. Подобные омметры с сухой батареей применяются для предварительных неотвественных испытаний изоляции.

Для измерения сопротивления изоляции при напряжении не меньшем, чем рабочее напряжение установки, в большинстве случаев применяются мегомметры с индукторами. Такой индуктор представляет собой маленький магнитоэлектрический генератор. Испытание сопротивления изоляции должно производиться или рабочим напряжением, или во всяком случае напряжением не меньше 100 в, поэтому индукторы изготовляются на напряжения от 120 до 2 000 в. Но э. д. с. индуктора зависит от скорости вращения рукоятки, в то время как согласно принципиальной схеме рис. 12-47 эта э. д. с. должна быть постоянной. В некоторых омметрах применена особая центробежная муфта, которая более или менее обеспечивает постоянство скорости вращения якоря независимо от скорости вращения рукоятки.

Более надежные результаты дает применение принципа логометра (рис. 12-48). Такой омметр состоит из магнитоэлектрического логометра и индуктора, смонтированных в общем

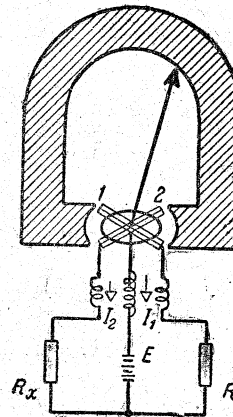


Рис. 12-48. Омметр с магнитоэлектрическим логометром.

ящике. Магнит прибора выполнен с неравномерными воздушными зазорами, расширяющимися к краям. Подвижная часть состоит из двух катушек, скрепленных между собой под некоторым углом. Последовательно с одной катушкой включено постоянное сопротивление R , последовательно со второй катушкой включается измеряемое сопротивление R_x . Вращающие моменты катушек направлены в противоположные стороны. Благодаря использованию принципа действия логометра при изменении э. д. с. индуктора моменты обеих катушек изменятся в одинаковой степени и их равновесие не нарушится, следовательно, показания прибора не зависят от скорости вращения индуктора, а лишь от отношения сопротивлений R и R_x . Так как R постоянно, то шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в значениях R_x .

12-12. Частотомеры и фазометры

В настоящее время в электроэнергетических системах поддерживается строго постоянная частота, так как от этого зависит исправная работа ряда ответственных устройств управления и автоматики. Соответственно высокие требования точности предъявляются к измерению частоты. Этим требованиям могут удовлетворить только стрелочные частотомеры, построенные по принципу логометра. Такие частотомеры изготавливаются различных систем, но у всех у них имеются две измерительные цепи, включаемые как вольтметр.

В качестве примера таких схем на рис. 12-49 дана схема ферродинамического стрелочного частотомера. Верхняя ветвь со-

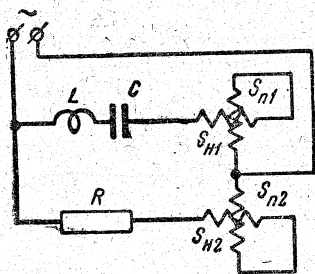


Рис. 12-49. Схема ферродинамического стрелочного частотомера.

держит индуктивность и емкость, соединенные последовательно, поэтому ее сопротивление, а следовательно, и ток в ней сильно зависят от частоты. Ток в нижней ветви от частоты практически не зависит, так как ее сопротивление можно считать чисто активным R . В каждой из ветвей имеются две катушки — одна неподвижная и вторая подвижная (S_{n1} и $S_{п1}$, S_{n2} и $S_{п2}$), соединенные между собой последовательно. Конструктивно прибор подобен вышеописанному (рис. 12-39) ферродинамическому трехфазному ваттметр.

Токи ветвей, проходя по катушкам, создают вращающие моменты M_1 и M_2 , стремящиеся повернуть подвижную часть в противоположные стороны. Момент M_1 , создаваемый током верхней ветви, сильно зависит от частоты, а момент M_2 от частоты практически не зависит. В соответствии с изложенным в § 12-10 эти моменты можно выразить следующим образом:

$$M_1 = k_1 U^2 F_1(\alpha) F(f);$$

$$M_2 = k_2 U^2 F_2(\alpha).$$

Под действием ² более сильного из моментов подвижная часть поворачивается и этот момент убывает (так как он зависит от положения подвижной части α), пока не установится равновесие моментов: $M_1 = M_2$, и при этом условии

$$F(f) = \frac{F_1(\alpha)}{F_2(\alpha)},$$

т. е. положение подвижной части не зависит от напряжения сети, а только от ее частоты.

Вибрационный (резонансный) частотомер весьма прост по устройству, но в точности существенно уступает частотомерам с логометрическими механизмами. Он состоит из электромагнита 1 (рис. 12-50), в поле которого расположены стальная пластина 2 и соединенный с ней брусок 3. Этот брусок укреплен на упругих пружинах 4, и на нем размещен ряд гибких стальных пластинок 5, подобранных таким образом, что каждая следующая пластинка имеет частоту собственных колебаний на 0,5 гц больше, чем предыдущая. Свободный конец каждой пластинки обращен к наблю-

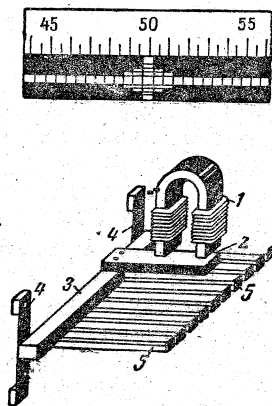


Рис. 12-50. Устройство вибрационного частотомера и его шкала (вверху).

дателью и отогнут. Если присоединить концы катушки к генератору переменного тока (как вольтметр), то пластинки под влиянием толчков электромагнита начинают раскачиваться. Однако сильно раскачивается лишь та пластинка, собственная частота которой равна частоте переменного тока. Белый квадратик на ее конце для наблюдателя превращается в серую полоску, против которой по шкале следует отсчитывать измеряемую частоту. Значительно слабее будут колебаться две соседние пластинки, колебания же всех остальных пластинок будут совершенно незаметны для глаза.

Фазометры представляют собой приборы для непосредственного отсчета значения $\cos \varphi$ или φ и применяются в тех случаях, когда желательно избежать вычисления этих величин на основании показаний ваттметра, амперметра и вольтметра. Это приборы с логометрическим измерительным механизмом ферродинамической или электродинамической системы. На подвижную часть в них воздействуют два момента, направленные в противоположные стороны. Один из этих моментов пропорционален активной мощности

$$M_1 = k_1 F_1 (UI \cos \varphi) F'(\alpha),$$

а второй — реактивной мощности

$$M_2 = k_2 F_2 (UI \sin \varphi) F''(\alpha).$$

Следовательно, при установившемся отклонении

$$F(\varphi) = \frac{F'(\alpha)}{F''(\alpha)},$$

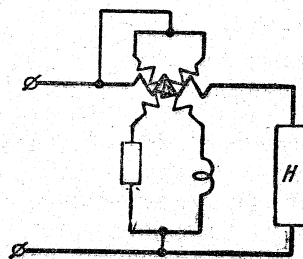


Рис. 12-51. Схема включения однофазного фазометра.

т. е. положение подвижной части зависит только от сдвига фаз в контролируемой цепи, что дает возможность проградуировать шкалу прибора в значениях $\cos \varphi$. На рис. 12-51 дана схема однофазного фазометра электродинамической системы. В трехфазных фазометрах индуктивность не нужна, так как сдвиг фаз токов в подвижных катушках создается путем использования сдвига фаз напряжений трехфазной системы.

12-13. Осциллографы

Магнитоэлектрический осциллограф служит для исследования кривых мгновенных значений напряжения и тока средней частоты примерно до 1000 гц, а также для исследования переходных процессов в электрических цепях. Для исследования колебаний более высокой частоты применяется безынерционный электронный осциллограф (§ 18-6).

Принцип устройств вибратора магнитоэлектрического осциллографа показан на рис. 12-52. Между полюсами сильного магнита помещена подвижная часть. Она представляет собой петельку из бронзовой проволоки, надетую на ролик и натянутую при помощи пружины; эта пружина создает направляющую силу системы. В середине к петельке прикреплено маленькое зеркало. Благодаря большой направляющей силе и очень малой массе подвижной части частота ее собственных колебаний достаточно велика (2—12 кгц). Пока частота исследуемых ко-

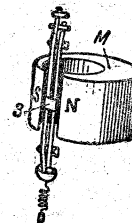


Рис. 12-52. Вибратор магнитоэлектрического осциллографа.

лебаний значительно меньше собственной частоты петельки, отклонения последней пропорциональны измеряемому току.

Петелька осциллографа включается в цепь исследуемого тока, и взаимодействие этого тока с постоянным магнитным полем создает отклоняющую силу, пропорциональную мгновенному значению тока в петельке. Под действием этой силы при переменном токе петелька быстро колеблется, отклоняясь пропорционально изменениям переменного тока.

Эти колебания можно сделать видимыми при помощи оптической системы осциллографа (рис. 12-53). Луч света от очень яркого источника 1 (лампы или электрической дуги) через линзу 2, щель 3 и призму 4 падает на зеркало вибратора 5 в виде очень тонкой полоски; отражаясь от зеркала подвижной части, этот луч проходит через собирательную линзу 6 и дает на фотографической бумаге 7 изображение щели в виде маленькой светлой точки. При колебаниях петельки эта точка превращается в светлую полоску; для того чтобы развернуть последнюю в кривую, бумага движется с равномерной скоростью в направлении, перпендикулярном к колебаниям зеркала. Таким путем колебания зеркала отмечают на фотографической бумаге кривую изменений тока по времени.

Периодические процессы можно наблюдать на экране, для чего осциллограф снабжается следующим приспособлением: часть светового пучка через линзу 8 направляется на зеркальный многогранник 9 и от последнего отражается на матовый экран 10. Зеркальный многогранник приводится во вращение маленьким синхронным двигателем, а этот последний питается переменным током той же частоты, что и осциллографируемый ток, обычно от того же источника тока. Благодаря синхронному вращению зеркального многогранника определенной фазе переменного тока в течение каждого периода будут соответствовать одни и

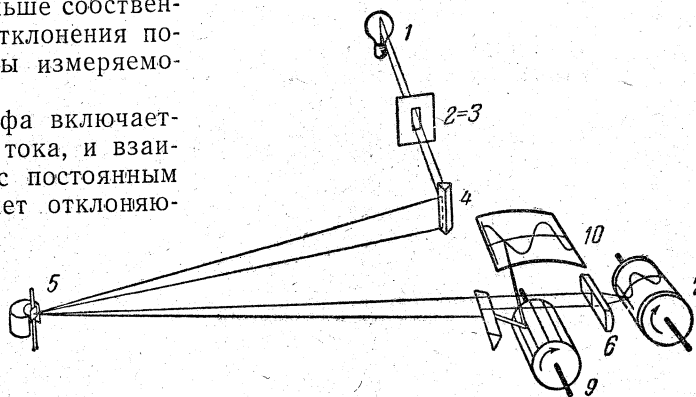


Рис. 12-53. Схема оптической системы осциллографа.

те же углы падения и отражения светового луча, идущего от колеблющегося зеркала. В результате зайчик в течение каждого последующего периода будет повторно описывать на экране одну и ту же кривую тока в прямоугольной системе координат $\alpha = F(t, t)$; такое повторное наложение светового изображения делает его ясно видимым на экране.

Для снятия кривых напряжения петелька осциллографа снабжается добавочным сопротивлением; для снятия кривых тока — шунтом. Осциллограф обычно имеет несколько вибраторов, что позволяет одновременно снимать кривые нескольких напряжений и токов; например, изготовляемый в СССР осциллограф МПО2 имеет восемь вибраторов.

12-14. Принципы электрических измерений неэлектрических величин

Выше мы упоминали о больших преимуществах электрификации измерительной техники. Можно перечислить здесь следующие важные преимущества электрических методов измерения неэлектрических величин: 1) автоматизация измерения и постоянная готовность аппаратуры для измерения; 2) простота передачи показаний на дальние расстояния; 3) возможность безынерционного воспроизведения меняющегося значения измеряемой величины (в особенности при помощи электронных приборов); 4) возможность автоматической математической обра-

ботки результатов измерения (сложение, вычитание, умножение, деление, интегрирование и дифференцирование); 5) широкий диапазон измерений. Эти и другие преимущества повели к тому, что по мере развития механизации советского хозяйства все шире распространялись электрические приборы для измерения неэлектрических величин. В настоящее время их можно найти на борту самолета, в котельной, на автомашине, у станка по обработке металлов, у ткацкого станка, на кондитерской фабрике и т. д.

В качестве основных частей электрического устройства для измерения неэлектрических величин можно ориентировочно назвать: датчик, промежуточные специальные узлы и собственно измерительное устройство.

Датчик (или преобразователь) преобразует неэлектрическую величину в электрическую (например, изменение температуры, подлежащее измерению, воздействует на сопротивление датчика). Для датчика характерными свойствами являются разрешающая способность и чувствительность. Разрешающей способностью датчика называется рабочий диапазон измеряемой им неэлектрической величины, т. е. пределы измерения, в которых вносимая датчиком погрешность остается в пределах допустимого. Чувствительностью датчика S именуется отношение изменения электрической величины y (на выходе датчика) к соответствующему изменению неэлектрической величины x , воздействующей на датчик (например, отношение изменения сопротивления к изменению температуры), точнее это — частная производная:

$$S = \frac{\partial y}{\partial x}.$$

Принципы действия датчиков весьма различны, так как датчики применяются для измерений самых различных физических величин. Во многих устройствах для электрических измерений неэлектрических величин используются датчики, в которых изменение неэлектрической величины вызывает изменение сопротивления. Они именуются датчиками сопротивления или

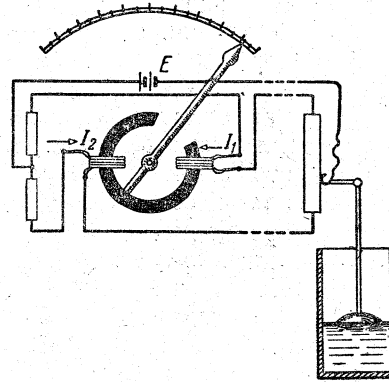


Рис. 12-54. Схема уровнемера с реостатным датчиком и электромагнитным логометром.

реостатными датчиками. Приведем несколько примеров таких датчиков. На рис. 12-54 показана схема устройства реостатного (так называемого «потенциометрического») датчика сопротивления в установке для электрического измерения уровня жидкости. Поплавок, помещенный в контролируемый резервуар, управляет посредством механической передачи подвижным контактом реостата и в зависимости от уровня жидкости изменяет отношение сопротивлений, включенных в цепи двух катушек электромагнитного логометра с серповидным сердечником, являющегося частью уровнемера. Токи I_1 и I_2 , зависящие от положения поплавка устройства, проходят по двум неподвижным катушкам, создавая два противоположно направленных момента. Каждый из этих моментов стремится установить серповидный сердечник, изготовленный из ферромагнитного материала, так, чтобы середина серпа совпала с серединой соответствующей катушки. Но по мере приближения к такому положению момент, перемещающий сердечник, убывает, а второй момент, противодействующий перемещению, возрастает, и при определенном положении сердечника устанавливается равновесие моментов. Как следует из выражения (12-8), каждый из двух моментов электромагнитного прибора пропорционален квадрату тока, а следовательно, и квадрату напряжения источника тока. Но изменение этого напряжения одинаково сказывается

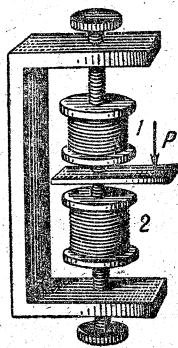


Рис. 12-55. Датчик с двумя угольными столбиками.

на обоих моментах и, следовательно, не меняет положение подвижной части. Шкала логометра градуируется непосредственно для измерения уровня жидкости в резервуаре.

Реостатный датчик с двумя угольными столбиками 1 и 2, показанный на рис. 12-55, применяется для измерения давлений P . Эти столбики набраны из угольных дисков и обладают свойством сильно изменять сопротивление в зависимости от давления. Измеряемая сила P , воздействуя на подвижной рычаг, вызывает уменьшение давления на верхний столбик 1, благодаря чему его сопротивление увеличивается, при этом давление на нижний столбик 2 возрастает, а его сопротивление уменьшается. Столбики могут быть включены, как два плеча измерительного моста. Изменение их сопротивления вызывает изменение тока в диагонали моста, куда включается электроизмерительный прибор. Последний может быть проградуирован непосредственно в единицах давления. Такие датчики просты по конструкции, позволяют пропускать через угольный столбик значительные токи, обладают большой чувствительностью и дают возможность измерять быстро изменяющиеся давления. Помимо измерений, они применяются в устройствах для автоматического регулирования (гл. 20).

Реостатный датчик сопротивления (тензомер), схематически показанный на рис. 12-56, служит для измерения деформации в различных конструкциях. Он изготавливается из тонкой проволоки

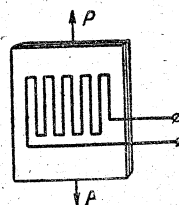


Рис. 12-56. Проволочный тензомер.

диаметром 20—30 мк, обладающей большим удельным сопротивлением (часто применяется константан — $\text{Cu } 59\%$, $\text{Ni } 40\%$, $\text{Mn } 1\%$). Эта проволока наклеивается на бумагу специальным клеем. В таком виде датчик приклеивается на ту деталь, деформацию которой нужно измерять. Сопротивление этого датчика при деформации меняется не только вследствие изменения размеров (длины и площади поперечного сечения), а также и вследствие изменения структуры материала.

Реостатный датчик с кольцевой трубкой (рис. 12-57) часто применяется для передачи показаний неэлектрических измерительных приборов. Основной его частью является стеклянная запаянная трубка, в которую помещено проволочное платино-иридиевое сопротивление. Трубка примерно наполовину налита ртутью. В зависимости от положения трубки ртуть замыкает накоротко большую или меньшую часть проволочного сопротивления. Изменения сопротивления проволоки измеряются электрическими методами. Этот датчик особенно удобен для передачи больших угловых перемещений.

Индуктивный датчик (L-датчик) применим при условии питания измерительного устройства пере-

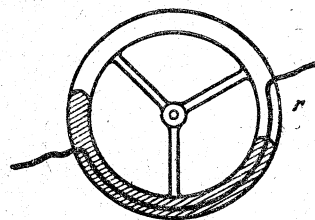


Рис. 12-57. Реостатный датчик с кольцевой трубкой.

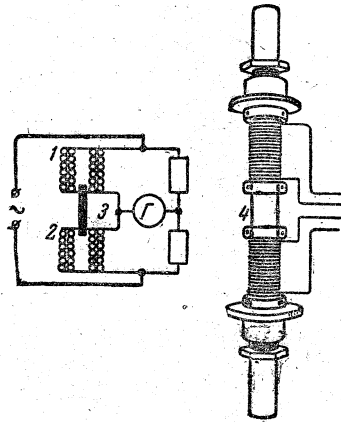


Рис. 12-58. Индуктивный датчик уровнемера.

менным током. В общем измерительная аппаратура в этом случае более сложна, чем для датчика сопротивления, однако индуктивный датчик имеет ряд ценных преимуществ. В качестве примера такого датчика на рис. 12-58 показана схема соединений и внешний вид (без кожуха) индуктивного указателя уровня. Две катушки датчика 1 и 2 охватывают толстостенную трубку 4. Внутри последней поплавок перемещает ферромагнитный сердечник 3, что увеличивает индуктивность одной катушки и уменьшает индуктивность второй катушки. Вследствие этого нарушается равновесие моста переменного тока, двумя плечами которого являются катушки 1 и 2. В результате в диагонали моста в измерительном приборе Г возникает ток, величина которого зависит от перемещения сердечника 3. Следовательно, прибор Г можно проградуировать для непосредственного отсчета уровня жидкости. Это устройство особенно удобно для котлов высокого давления, так как связь в датчике чисто индуктивная и не требует нарушения герметичности котла.

Емкостные датчики (С-датчики) применяются для измерения

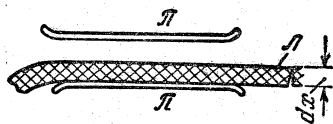


Рис. 12-59. Емкостный датчик для измерения толщины и свойств материала ленты Л.

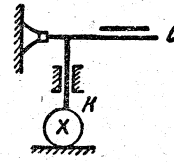


Рис. 12-60. Схема емкостного микрометра.

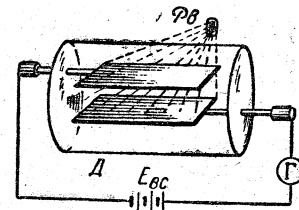


Рис. 12-61. Принципиальная схема ионизационного датчика.

малых перемещений и размеров. На рис. 12-59 показана схема емкостного датчика для измерения толщины ленты Л. Эта лента перемещается между обкладками плоского конденсатора, заполняя часть воздушного промежутка между пластинами П. Такая система является конденсатором со слоистым диэлектриком (§ 6-4). Изменение толщины ленты изменяет общую емкость системы. Это изменение емкости измеряется и записывается электрическим путем или же воздействует на сигнальное устройство, отмечающее отклонения толщины ленты, выходящие за пределы допусков, или же автоматически останавливает подающий ленту механизм, как только толщина ленты выходит за пределы допусков. На рис. 12-60 показан принцип устройства другого емкостного датчика для измерения малых размеров (микрометра). Контактный штифт К, в нижней части устройства, перемещаясь, изменяет емкость воздушного конденсатора С, помещенного в теле датчика.

В современных атомных котлах относительно просто получение искусственных радиоактивных веществ. Эти последние широко применяются в промышленности и медицине. В частности, созданы многочисленные варианты ионизационных датчиков. В подобном датчике используются свойства газового промежутка ионизируемого излучением радиоактивного вещества. Принципиальная схема такого датчика показана на рис. 12-61. Ток в измерительной цепи создается действием вспомогательной батареи $E_{вс}$. Сам датчик Д представляет собой газовый промежуток между двумя электродами, находящийся под воздействием источника радиоактивного из-

лучения PB . Без ионизации газовый промежуток представляет собой изолятор, практически не пропускающий ток. Благодаря ионизации через промежуток может проходить электрический ток, величина которого зависит от интенсивности ионизации, от расстояния между электродами датчика и от свойств газовой среды между ними. Это дает возможность использовать датчик для измерения концентрации и давления газа, а также для измерения расстояний и перемещений.

На рис. 12-62 показана принципиальная схема применения ионизационного датчика для измерения толщины изделий. Здесь PB — ампула с радиоактивным веществом, а $ИК$ — ионизационная камера, K — стенка изделия, толщина которой измеряется. Чем толще эта стенка, тем меньше ионизирующее воздействие ампулы PB на камеру $ИК$ и тем меньше ток через эту камеру. На рис. 12-63 показана схема ионизационного уровнемера. Здесь ампула помещена на поплавке внутри бака, а ионизационная камера — над баком. Такие уровнемеры особенно целесообразны для измерений при высоких давлениях (до 5 000—7 000 ат) и температурах (до 2 500° С) среды внутри бака.

Только в простейших устройствах электрическая величина измеряется непосредственно на выходе датчика. Часто необходим ряд промежуточных узлов между датчиками и измерительным прибором.

Изменения электрической величины могут быть слишком малы для непосредственного измерения. Это относится, например, к емкостному датчику или к тензомеру. В подобных слу-

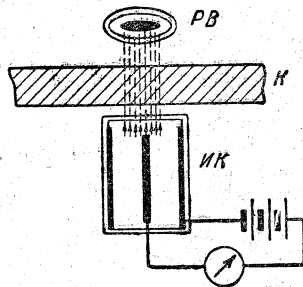


Рис. 12-62. Ионизационный толщиномер.

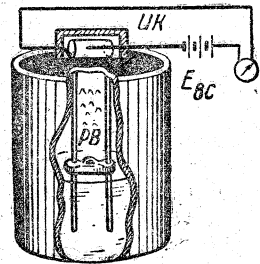


Рис. 12-63. Ионизационный уровнемер.

чаях необходим промежуточный узел — усилитель с электронными лампами (§ 18-2).

Если измеряемая величина должна быть передана на относительно дальнее расстояние, то часто целесообразно ввести промежуточный узел — преобразователь электрической величины на выходе датчика в другую электрическую величину, передача которой на дальние расстояния осуществляется проще и с меньшими искажениями; например, изменение индуктивности может быть преобразовано в изменение частоты переменного тока.

При самом измерении во многих случаях необходимо устранить влияние изменений напряжения источника тока. Например, это необходимо для индуктивного датчика рис. 12-58. Применение принципа логометра позволяет устранить это влияние. Если же применение принципа логометра почему-либо нецелесообразно, хотя бы из-за недостаточной точности стрелочного прибора, то необходим соответствующий промежуточный узел — стабилизатор напряжения. Это — электрическое устройство, поддерживающее неизменным напряжение у приемника тока независимо от колебаний напряжения источника тока. В настоящее время применяются феррорезонансные, ионные и электронные стабилизаторы напряжения.

Собственно измерительным устройством установки для электрических измерений неэлектрических величин в простейших случаях служит прибор непосредственного отсчета, но в ряде случаев приходится прибегать к сложной измерительной аппаратуре — автоматическим компенсаторам (§ 18-8) и т. п.

Конечно, описанные здесь приборы представляют собой только немногочисленные примеры; в каждой отрасли техники в настоящее время имеется своя специализированная аппаратура для электрических измерений соответствующих неэлектрических величин.

12-15. Лабораторная работа. Поверка однофазного индукционного счетчика

Способ фиктивной нагрузки. Поверка счетчиков электроэнергии в испытательных лабораториях производится исключительно по способу фиктивной нагрузки (иначе — способ отдельных цепей), при котором цепь напряжения прибора питается от одного источника, а цепь тока от другого источника, рассчитанного на значительный ток при низком напряжении. При переменном токе такими источниками могут служить два трансформатора, питающиеся от общей силовой сети. Для регулирования величины напряжения и тока в обе цепи вводятся ЛАТР (лабораторные регулировочные автотрансформаторы — § 13-14).

Для регулирования сдвига фаз между током и напряжением в цепь напряжения вводится фазорегулятор (см. § 14-20). Это — асинхронная машина с заторможенным ротором и тщательно распределенной трехфазной обмоткой. Статор фазорегулятора включается в трехфазную сеть, а к зажимам обмотки ротора присоединяется измерительная цепь. Посредством червячной передачи ротор можно поворачивать. При этом величина напряжения на зажимах ротора не изменяется, а меняется только начальная фаза этого напряжения, а следовательно, и сдвиг фаз между напряжением и током. Поворачивая ротор, можно менять в пределах 360° сдвиг фаз между током, проходящим через последовательную цепь счетчика, и напряжением на зажимах его параллельной цепи.

Таким образом, применение способа фиктивной нагрузки, кроме существенной экономии электроэнергии, дает возможность совершенно независимо регулировать напряжение, ток и сдвиг фаз между ними.

Поверка показаний счетчика производится на основании сличения числа оборотов N диска счетчика с показаниями образцового ваттметра и секундомера, причем определяется постоянная счетчика — количество энергии, соответствующее одному обороту диска:

$$C_{сч} = \frac{Pt}{N}.$$

Эта величина сопоставляется с номинальной постоянной $C_{сч.з}$, указанной на щитке счетчика, и определяется погрешность

$$f\% = \frac{C_{сч.з} - C_{сч}}{C_{сч}} \cdot 100\%.$$

Опыт поверки. Схема поверки (рис. 12-64) предусматривает питание измерительных

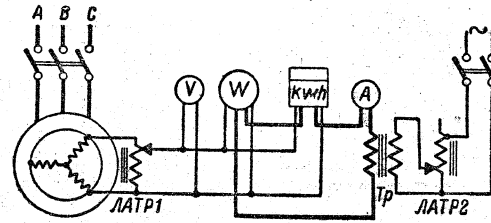


Рис. 12-64. Схема поверки индукционного счетчика.

цепей через регулировочные автотрансформаторы (ЛАТР), причем цепь напряжения включена через фазорегулятор, а в цепи тока имеется трансформатор Tr , понижающий напряжение. Образцовыми приборами при поверке являются ваттметр и секундомер, а вольтметр и амперметр служат лишь для определения величины напряжения и тока с ограниченной точностью.

Поверка начинается с прогрева счетчика номинальными напряжением и током. По вольтметру устанавливается номинальное напряжение счетчика, а по амперметру номинальный ток счетчика. Фазорегулятор регулируется так, чтобы при номинальных напряжении и токе показание ваттметра было максимальным, причем, если оно окажется меньше или больше номинальной мощности счетчика, то необходимо соответственно отрегулировать ток. Перед началом прогрева нужно записать показание счетчика W_1 . Прогрев следует продолжать примерно 15 мин (точно отсчитав длительность прогрева $t_{пр}$ по секундомеру). По окончании прогрева записывается второе показание счетчика W_2 и поверяется ориентировочно точность работы счетчика по показаниям счетного механизма и контрольных приборов ваттметра и секундомера (или часов). Должно иметь место равенство $W_2 - W_1 \approx Pt_{пр}$.

Перед точной поверкой счетчика по диску на основании указанных на щитке счетчика соотношений нужно подсчитать, сколько оборотов N_1 должен сделать диск счетчика в течение 2 мин при номинальном напряжении и токе, равном 100, 80, 50, 20 и 10% от номинального. Для поверки достаточно трех точек (100, 50 и 10%) — большее число берется, чтобы иметь возможность построить кривую погрешностей. Установив соответствующую нагрузку по ваттметру путем регулирования только тока (при $\cos \varphi = 1$), нужно отсчитать N_1 оборотов диска и отметить по секундомеру соответствующий промежуток времени t_1 (он будет больше или меньше 2 мин из-за погрешности счетчика). Отсчеты одного и того же числа оборотов должны производиться не менее 3 раз. Действительное время определяется как среднее. Действительная постоянная

$$C_{сч} = \frac{Pt_1}{N_1},$$

и погрешность

$$f\% = \frac{C_{сч.з} - C_{сч}}{C_{сч}} \cdot 100\%.$$

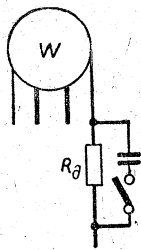


Рис. 12-65. Определение характера сдвига фаз.

Эта погрешность положительна, если учтенная энергия больше действительной, т. е. если счетчик вращается слишком быстро. При нагрузке 80% отсчитывается число оборотов, равное $0,8N_1$; при нагрузке 50% $=0,5N_1$ и т. д., причем нагрузка устанавливается по ваттметру путем регулирования только тока. По окончании проверки при $\cos \varphi=1$, не давая счетчику остыть, нужно перейти к проверке при $\cos \varphi=0,5$. Соответствующий сдвиг фаз устанавливается путем регулирования только фазорегулятора на основании показаний ваттметра: сначала установить по ваттметру $\cos \varphi=1$, а затем, вращая фазорегулятор, уменьшить показание до половины, после чего изменять нагрузки только путем изменения тока (т. е. сохраняя $\cos \varphi=0,5$). При этом сдвиге фаз нужно проверить счетчик при 100%, 80%, 50%, 20% нагрузки.

Поверка должна производиться при положительном сдвиге фаз, т. е. при индуктивной нагрузке. Однако при пользовании фазорегулятором характер сдвига фаз неизвестен — он может быть как индуктивным, так и емкостным. Чтобы определить в этом случае характер сдвига фаз, нужно, установив $\cos \varphi \approx 0,5$, включить последовательно с цепью напряжения ваттметра добавочное сопротивление R_d (рис. 12-65) порядка нескольких килоом и замерить соответствующее показание ваттметра. Затем шунтировать это добавочное сопротивление емкостью порядка 1 мкф. Если такое шунтирование вызывает уменьшение показания ваттметра, то имеет место индуктивный сдвиг фаз. В противном случае сдвиг фаз является емкостным, при котором проверка не должна производиться и необходимо изменить положение ротора фазорегулятора.

По окончании проверки при нагрузке нужно проверить чувствительность счетчика, для чего нужно установить по ваттметру при $\cos \varphi=1$ и номинальном напряжении нагрузку, равную 1%, и убедиться, что счетчик безостановочно

вращается. Наконец, счетчик поверяется на отсутствие самохода при напряжении 110% и токе $I=0$.

План работы

1. Осуществить прогрев счетчика в течение 10 мин при номинальных напряжении и токе и $\cos \varphi=1$ (установить с помощью фазорегулятора по максимуму показания ваттметра).
2. При прогреве записать начальное и конечное показания счетного механизма и сопоставить их разность с показаниями ваттметра, умноженными на длительность $t_{пр}$ прогрева: $W_2 - W_1 \approx Pt_{пр}$.
3. Проверить отсутствие самохода при напряжении, равном 110% от номинального. Наблюдение производить в течение 15 мин.
4. Проверить чувствительность счетчика: диск должен безостановочно вращаться при номинальном напряжении, токе, равном 1% от номинального и $\cos \varphi=1$.
5. Проверить работу счетчика при $\cos \varphi=1$ и нагрузке, равной 100, 80, 50, 20 и 10% от номинальной (изменяя ток при номинальном напряжении). В каждом случае задаваться определенным числом оборотов диска N и по секундомеру определять соответствующее время. Погрешность вычисляется по формуле

$$f\% = \frac{C_{сч.з} N - Pt}{Pt} 100\%$$

здесь $C_{сч.з}$ — номинальная заводская постоянная счетчика (энергия, соответствующая одному обороту диска счетчика).

6. Повторить проверку при $\cos \varphi=0,5$ и нагрузках 120, 100, 80, 50 и 20%.
7. Построить кривые погрешностей счетчика в зависимости от I при $\cos \varphi=1$ и 0,5.

$U_{номинал}$	P нагрузка, % от номинальной	N	t (по секундомеру), сек	$\cos \varphi$	$f, \%$

**ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ
ТРАНСФОРМАТОРЫ**

13-1. Основные определения

Трансформатор¹ представляет собой статический электромагнитный аппарат, действие которого основано на явлении взаимоиндукции (§ 5-5).

¹ От латинского transformare — преобразовывать.

В нем переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток той же частоты, но другого напряжения. Трансформатор имеет несколько обмоток (не менее двух), изолированных электрически друг от друга. Обмотка, соединенная с источником энергии, именуется первичной,

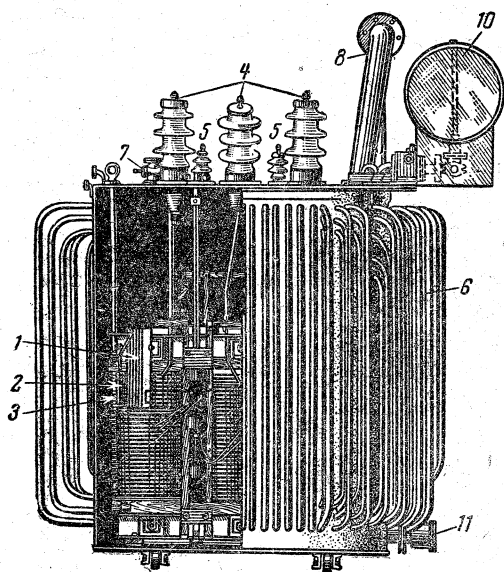


Рис. 13-1. Трансформатор трехфазный, масляный с трубчатым баком в частичном разрезе.
1—магнитопровод из листовой стали; 2—обмотка низшего напряжения (НН) в разрезе; 3—обмотка высшего напряжения (ВН), охватывающая обмотку низшего напряжения, в разрезе, ниже и на среднем стержне магнитопровода видны неразрезные катушки обмотки высшего напряжения; 4—вводы (изоляторы) обмотки ВН; 5—вводы (изоляторы) обмотки НН; 6—трубчатый бак для масляного охлаждения; 7—кран для заполнения маслом; 8—выхлопная труба для газов; 9 и 10—расширитель для масла и газовое реле; 11—кран для спуска масла.

остальные обмотки, отдающие энергию во внешние цепи, называются вторичными.

Для того чтобы усилить магнитную связь между обмотками, последние снабжаются общим замкнутым сердечником, собранным из листовой электротехнической стали. При частоте тока примерно свыше 20 кГц применение стального сердечника нецелесообразно из-за больших потерь в стали и вытеснения магнитного потока к поверхности сердечника (§ 10-2); поэтому для высоких частот изготавливаются воздушные трансформаторы (без сердечников). Изучение последних выходит за рамки нашего курса.

Для улучшения условий охлаждения и изоляции трансформатор помещается в бак, заполненный минеральным маслом. Это так называемый масляный трансформатор (рис. 13-1).

Трансформаторы делятся на однофазные и трехфазные.

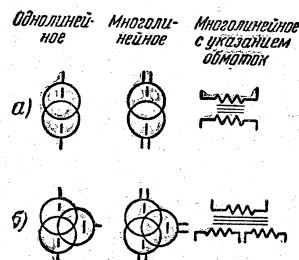


Рис. 13-2. Графические обозначения трансформатора.

а—трансформатор однофазный, с сердечником; б—трансформатор однофазный, трехобмоточный.

Если напряжение на зажимах первичной обмотки — первичное напряжение U_1 меньше вторичного напряжения U_2 , то трансформатор называется повышающим, в противном случае — понижающим ($U_1 > U_2$). В соответствии с относительной величиной номинального напряжения принято различать обмотку высшего напряжения (ВН) и обмотку низшего напряжения (НН).

На щитке трансформатора согласно ГОСТ указываются его следующие номинальные величины: полная мощность, линейные напряжения, линейные токи при номинальной мощности, частота, число фаз, схема и группа соединений (§ 13-13), напряжение короткого замыкания (§ 13-9), режим работы (длительный или кратковременный) и способ охлаждения.

На рис. 13-2 приведены основные условные графические обозначения трансформаторов.

Трансформатор был впервые практически применен П. Н. Яблочковым (1876 г.), разработавшим конструкцию трансформатора для питания своих электрических свечей.

Одной из основных задач электротехники является передача энергии из пунктов, где имеются дешевые естественные ее запасы (падающая вода, торф, уголь), в те многочисленные пункты, где расположены потребители энергии, при этом, чем выше напряжение линии электропередач, тем меньший нужен ток для передачи той же мощности, а следовательно, и меньшее сечение проводов. Таким образом, экономичная передача электрической энергии на дальние расстоя-

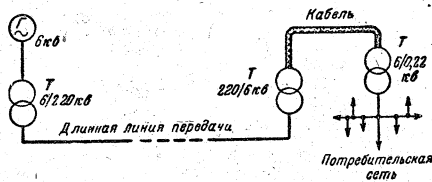


Рис. 13-3. Схема современного энергоснабжения.

ния может быть осуществлена лишь при высоком напряжении. Однако было бы весьма затруднительно вырабатывать электрическую энергию на станции непосредственно при том высоком напряжении, какое требуется для передачи ее за сотни километров; еще более затруднительно было бы потребление электроэнергии при таких высоких напряжениях, поэтому является необходимость преобразовывать электрический ток низкого напряжения и большой силы в электрический ток высокого напряжения, во много раз меньший, или же обратно. В настоящее время эта задача разрешается просто и экономично только при переменном токе посредством трансформаторов.

На пути от центральной электрической станции к потребителю электрическая энергия в большинстве случаев трансформируется не менее чем 3 раза (рис. 13-3). На станции генератор переменного тока дает ток при высоком напряжении (6—30 кВ). Но это напряжение недостаточно для передачи электроэнергии на дальние расстояния, поэтому станция соединяется с линией передачи через трансформатор, повышающий напряжение до 100—500 кВ, — тем выше должно быть это напряжение, чем длиннее линия передачи. При этом весьма высоком напряжении электроэнергия передается к месту потребления в промышленный центр. На окраине города, на трансформаторной подстанции, напряжение понижается до значения (6—10 кВ), при котором нет особых трудностей в применении подземных кабельных линий. Таким кабелем электроэнергия передается к пункту потребления, где в третий раз трансформируется, благодаря чему потребитель получает возможность пользо-

ваться ею при низком напряжении (127—220 в).

На рис. 13-3 дана однолинейная схема передачи энергии, т. е. схема, на которой одной линией изображены все три фазы трехфазной системы. Эта упрощенная схема наглядно показывает, что общая мощность трансформаторов должна быть в 3 раза больше суммарной мощности всех генераторов, установленных на электрических станциях, из чего ясно исключительное значение трансформатора во всей современной системе электро-снабжения.

13-2. Принцип действия трансформатора

Основным объектом нашего изучения будет однофазный двухобмоточный трансформатор со стальным сердечником. Его рабочий процесс и электрические соотношения можно считать характерными в основном для всех видов трансформаторов.

Напряжение u_1 (рис. 13-4), приложенное к зажимам первичной обмотки, создает в этой обмотке переменный ток i_1 . Как и в катушке со стальным сердечником (§ 10-2), ток возбуждает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток Φ . Вследствие периодического изменения этого потока в обеих обмотках трансформатора индуцируются э. д. с.

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{и} \quad e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt};$$

здесь ω_1 , ω_2 — числа витков той и другой обмоток. Следовательно, отношение э. д. с., индуцируемых в обмотках,

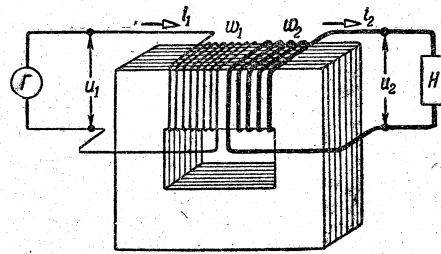


Рис. 13-4. Схема устройства двухобмоточного трансформатора со стальным сердечником.

равно отношению чисел витков этих обмоток:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Действующие значения э. д. с. связаны с амплитудным значением потока трансформатора теми же уравнениями, как и в катушке, следовательно,

$$E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m; \quad (13-1)$$

$$E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m. \quad (13-2)$$

Таким образом, отношение действующих э. д. с. трансформатора также равно отношению чисел витков его обмоток:

$$E_1 : E_2 = \omega_1 : \omega_2 = k_{12}. \quad (13-3)$$

Это отношение именуется коэффициентом трансформации.

Коэффициент полезного действия трансформатора относительно очень высок — в среднем порядка 98%, что позволяет при номинальной нагрузке считать приблизительно одинаковыми первичную мощность, получаемую трансформатором, и вторичную мощность, им отдаваемую, т. е. $p_1 \approx p_2$ или $u_1 i_1 \approx u_2 i_2$ и, следовательно,

$$i_1 : i_2 \approx u_2 : u_1 \approx \omega_2 : \omega_1.$$

Это отношение мгновенных значений токов и напряжений справедливо и для амплитуд, а следовательно, и для действующих значений:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} \approx \frac{U_2}{U_1}, \quad (13-4)$$

т. е. отношение токов в обмотках трансформатора при нагрузке, близкой к номинальной, можно считать обратным отношению напряжений и чисел витков соответствующих обмоток.

При работе трансформатора совершенно различна роль э. д. с. в его первичной и вторичной обмотках; э. д. с. e_1 , индуцируемая в первичной обмотке, возникает как противодействие цепи изменению в ней тока i_1 . По фазе эта э. д. с. почти противоположна напряжению u_1 . Как и в цепи, содержащей индуктивность (§ 7-7), ток в первичной обмотке трансформатора

$$i_1 = \frac{u_1 + e_1}{R_1},$$

где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки. Отсюда получаем уравнение для мгновенного значения первичного напряжения

$$u_1 = -e_1 + i_1 R_1 = \omega_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1, \quad (13-5)$$

которое можно прочесть как условие электрического равновесия: приложенное к зажимам первичной обмотки напряжение u_1 всегда уравновешивается э. д. с. e_1 и падением напряжения в активном сопротивлении обмотки (второй член относительно весьма мал).

Иные условия имеют место во вторичной цепи. Здесь ток i_2 создается э. д. с. e_2 , играющей роль э. д. с. источника тока, и в случае чисто активной нагрузки R_H во вторичной цепи этот ток

$$i_2 = \frac{e_2}{R_2 + R_H},$$

где R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки¹.

В первом приближении воздействие вторичного тока i_2 на первичную цепь трансформатора можно описать следующим образом.

Ток i_2 , проходя по вторичной обмотке, стремится создать в сердечнике трансформатора магнитный поток, определяемый намагничивающей силой (н. с.) $i_2 \omega_2$. Согласно закону Ленца этот поток должен иметь направление, обратное направлению главного потока: иначе можно сказать, что вторичный ток стремится ослабить индуктирующий его магнитный поток. Однако такое уменьшение главного магнитного потока Φ нарушило бы электрическое равновесие: $u_1 = i_1 R_1 + \omega_1 \frac{d\Phi}{dt}$ в сто-

рону преобладания первичного напряжения u_1 , поэтому одновременно с появлением вторичного тока увеличивается первичный ток, притом настолько, чтобы компенсировать размагничивающее действие вторичного тока и, таким образом, сохранить электрическое равновесие. Следовательно, всякое изменение вторичного

¹ Мы не учитываем пока индуктивного сопротивления первичной и вторичной обмоток, связанного с наличием магнитного рассеяния, о котором речь будет ниже.

тока должно вызывать соответствующее изменение первичного тока; при этом практически ток вторичной обмотки благодаря относительно малому значению составляющей $i_1 R_1$ почти не влияет на амплитуду и характер изменений по времени главного магнитного потока трансформатора, следовательно, амплитуду этого потока Φ_M можно считать практически постоянной. Такое постоянство Φ_M характерно для режима трансформатора, у которого поддерживается неизменным напряжение U_1 , приложенное к зажимам первичной обмотки.

13-3. Холостой ход трансформатора

Когда к первичной обмотке трансформатора подведено номинальное напряжение U_1 , а вторичная цепь трансформатора разомкнута, тогда имеет место холостой ход трансформатора. В таких условиях работа трансформатора, по существу, ничем не отличается от работы катушки со стальным сердечником. Представленная на рис. 13-5 векторная диаграмма почти повторяет соответствующую диаграмму катушки со стальным сердечником с изменением лишь некоторых обозначений и добавлением вектора E_2 .

Ток холостого хода I_0 трансформатора, проходя по первичной обмотке, своей н. с. $I_0 \omega_1$ возбуждает магнитный

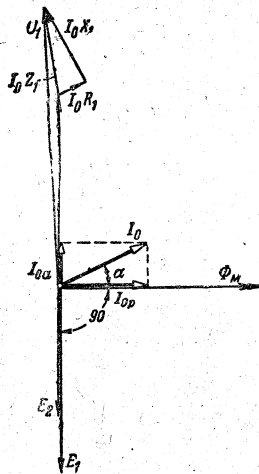


Рис. 13-5. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

поток Φ в сердечнике и первичный поток рассеяния Φ_{p1} , замыкающийся полностью или частично в воздухе помимо вторичной обмотки. По тем же соображениям, как и для катушки, поток в сердечнике можно считать синусоидальным при синусоидальном напряжении u_1 на зажимах обмотки, следовательно, $\Phi = \Phi_M \sin \omega t$. Этот поток индуцирует в обмотках трансформатора э. д. с.

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega \omega_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

и

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega \omega_2 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. обе э. д. с. одинаково отстают по фазе на четверть периода от индуцирующего их потока. Первичный поток рассеяния Φ_{p1} индуцирует в первичной обмотке э. д. с. e_{p1} . Можно считать, что мгновенное значение тока i_0 в первичной обмотке определяется совместным действием напряжения и двух э. д. с. в ней, индуцированных магнитными потоками, следовательно,

$$i_0 = \frac{u_1 + e_1 + e_{p1}}{R_1},$$

где R_1 — сопротивление первичной обмотки, или

$$u_1 = (-e_1) + i_0 R_1 + (-e_{p1}).$$

Алгебраическому уравнению для мгновенных значений синусоидальных величин соответствует векторное уравнение для действующих значений

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 R_1 + (-\dot{E}_{p1}).$$

Как и для катушки (§ 10-5), напряжение $(-\dot{E}_{p1})$ можно выразить через произведение тока \dot{I}_0 на постоянное индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки jX_1 , т. е. $-\dot{E}_{p1} = \dot{I}_0 jX_1$, в соответствии с чем уравнение первичного напряжения будет:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) = \\ &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_0 Z_1; \end{aligned} \quad (13-6)$$

здесь $Z_1 = R_1 + jX_1$ именуется полным внутренним сопротивлением первичной обмотки.

Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора Φ_m — магнитного потока в сердечнике. Ток I_0 фактически несинусоидален, но, как и для катушки со стальным сердечником, для упрощения отношений мы заменяем его эквивалентным синусоидальным (§ 10-3) и строим его вектор опережающим вектор потока на угол магнитного запаздывания α . Два вектора э. д. с. E_1 и E_2 одинаково отстают от Φ_m на 90° . Наконец, для определения U_1 руководствуемся уравнением напряжения (13-6); строим вектор $(-E_1)$, прямо противоположный E_1 , и к нему прибавляем вектор $I_0 R_1$, направленный параллельно I_0 , и вектор $I_0 X_1$, опережающий I_0 на 90° . Вектор полного внутреннего падения напряжения $I_1 Z_1$ замыкает прямоугольный треугольник внутреннего падения напряжения с катетами активного и реактивного падения напряжения.

Однако построенная нами векторная диаграмма холостого хода правильно показывает лишь качественные соотношения. При практическом построении такой диаграммы для реального трансформатора с соблюдением количественных соотношений треугольник внутреннего падения напряжения превратится почти в точку. Трансформатор рассчитывается так, чтобы при полной нагрузке внутреннее падение напряжения $I_1 Z_1$ выражалось в немногих процентах от U_1 . В свою очередь, ток холостого хода I_0 составляет лишь от 10 до 3% от номинального первичного тока (тем меньше, чем больше трансформатор); поэтому величина $I_0 Z_1$ относительно ничтожна. Указанное обстоятельство используется практически для определения на основании опыта холостого хода коэффициента трансформации. Первичное напряжение U_1 в условиях холостого хода практически равно по величине (и противоположно по фазе) э. д. с. E_1 , вследствие отсутствия тока во вторичной обмотке вторичное напряжение U_{20} равно э. д. с. E_2 , индуцируемой

в этой обмотке потоком в сердечнике. Таким образом, при холостом ходе напряжения можно считать практически равными соответствующим э. д. с. и на основании их отношения определять коэффициент трансформации

$$k_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}}. \quad (13-7)$$

На щитках трансформаторов этот коэффициент указывается в форме отношения номинальных напряжений трансформатора при холостом ходе: например, «6 000/230 в». Так как один и тот же трансформатор может работать и как понизительный и как повысительный, то на щитке обычно указывается коэффициент трансформатора в виде отношения высшего напряжения к низшему.

При заданных значениях напряжения U_{20} и сечения S сердечника нетрудно ориентировочно определить число витков обмоток трансформатора, руководствуясь тем, что $U_{20} = E_2 = 4,44 f \omega_2 S B_m$ и, следовательно,

$$\omega_2 = \frac{U_{20}}{4,44 f S B_m}.$$

Значение магнитной индукции B_m выбирается так, чтобы наиболее целесообразно использовать материал сердечника: при малой индукции сталь не полностью используется, при большой — велики потери в ней и значителен намагничивающий ток, что ухудшает cos ϕ установки. Для трансформаторов индукции B_m берется в пределах примерно от 1 до 1,4 вб/м² (т. е. от 10 000 до 14 000 гс), тем больше, чем мощнее трансформатор и интенсивнее его охлаждение.

Ток холостого хода I_0 трансформатора рассчитывается так же, как и для катушки со сталью (§ 10-4); реактивная составляющая I_{0p} определяется путем расчета магнитной цепи трансформатора, а активная I_{0a} — на основании потерь в стали сердечника. В большинстве случаев активная составляющая меньше 0,1 от I_0 , поэтому мало влияет на действующее значение этого тока

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}.$$

следовательно, с очень небольшой погрешностью (порядка 0,5%) можно определять действующее значение тока холостого хода на основании расчета только его реактивной составляющей.

Мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, затрачивается на потери в сердечнике и потери в меди одной лишь первичной обмотки $I_0^2 R_1$. Потери в меди обмотки полностью нагруженного трансформатора составляют от 2 до 0,25% (тем меньше, чем мощнее трансформатор), а при холостом ходе вследствие относительной малости I_0 они ничтожны по сравнению с потерями в стали. Следовательно, вся мощность холостого хода трансформатора практически затрачивается лишь на потери в стали. На этом основании опыты холостого хода служат также для определения потерь в стали трансформатора.

13-4. Токи в обмотках нагруженного трансформатора

В рабочих условиях трансформатора первичное напряжение практически не зависит от нагрузки.

При замыкании вторичной обмотки на некоторую нагрузку Z_H в ней возникает ток I_2 , н. с. которого $I_2 \omega_2$ стремится ослабить поток в сердечнике, а следовательно, уменьшить E_1 . Но тем самым нарушается электрическое равновесие, поэтому н. с. $I_1 \omega_1$ возрастает настолько, чтобы сохранилось электрическое равновесие, а следовательно, чтобы поток в сердечнике (его амплитуда Φ_M) остался практически неизменным. Этому значению потока соответствует постоянное значение н. с., одинаковое как при нагрузке, так и при холостом ходе.

Таким образом, в нагруженном трансформаторе поток создается совместным действием первичной н. с. $I_1 \omega_1$ и вторичной н. с. $I_2 \omega_2$, причем векторную сумму этих н. с. можно считать практически равной постоянной величине — н. с. тока холостого хода:

$$I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = I_0 \omega_1, \quad (13-8)$$

или же

$$I_1 \omega_1 = (-I_2 \omega_2) + I_0 \omega_1, \quad (13-9)$$

т. е. н. с. первичного тока уравновешивает размагничивающее действие вторичного тока и поддерживает поток в сердечнике.

Соотношение н. с. (13-9) легко превратить в соотношение токов, разделив все члены его на ω_1 :

$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}\right),$$

вектор

$$-I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I'_2 \quad (13-10)$$

есть составляющая первичного тока, уравновешивающая размагничивающее действие вторичного тока. Эта величина именуется приведенным вторичным током. Таким образом, первичный ток

$$I_1 = I_0 + I'_2, \quad (13-11)$$

т. е. первичный ток равен геометрической сумме тока холостого хода и приведенного вторичного тока.

С увеличением вторичного тока от нуля первичный ток будет возрастать, начиная с тока холостого хода. При полной нагрузке первичный ток достигает такого значения, что ток холостого хода составляет лишь несколько процентов первичного тока; поэтому при полной нагрузке в приближенных подсчетах можно пренебречь током холостого хода, приняв

$$I_1 \approx I'_2,$$

следовательно, в этих условиях

$$I_1 \approx I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

в § 13-2 мы уже получили это приближенное выражение на основании энергетических соотношений трансформатора.

13-5. Вторичное напряжение и вторичное магнитное рассеяние

Намагничивающая сила $I_2 \omega_2$ вторичного тока стремится создать два потока: поток в сердечнике и поток вторичного рассеяния. Первый из них,

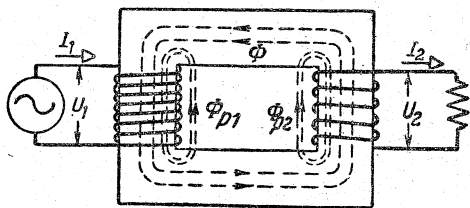


Рис. 13-6. Магнитные потоки в нагруженном трансформаторе.

направленный против главного потока, уничтожается н. с. $I_1\omega_1$ первичного тока; остается лишь относительно малый поток вторичного рассеяния Φ_{p2} . Этот поток замыкается полностью или частично в воздухе и других неферромагнитных материалах, помимо первичной обмотки, вокруг витков вторичной обмотки (рис. 13-6). В этой обмотке поток Φ_{p2} индуцирует небольшую э. д. с. $e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_{p2}}{dt}$. Если считать поток рассеяния синусоидальным, то действующее значение э. д. с. вторичного рассеяния будет

$$E_{p2} = 4,44f\omega_2\Phi_{p2m}$$

Таким образом, во вторичной обмотке нагруженного трансформатора индуцируются две э. д. с.: одна E_2 — главным потоком, а вторая E_{p2} — потоком вторичного рассеяния. Следовательно, ток I_2 во вторичной обмотке, замкнутой на сопротивление Z_H , создается действием двух э. д. с.:

$$I_2 = \frac{E_2 + E_{p2}}{R_2 + Z_H},$$

где R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки (сопротивление меди).

Так как $I_2 Z_H = U_2$ — напряжению на зажимах вторичной обмотки, то

$$E_2 = U_2 + I_2 R_2 + (-E_{p2}).$$

Как и поток первичного рассеяния, поток вторичного рассеяния можно считать прямо пропорциональным току, его возбуждающему. Это позволяет заменить $-E_{p2} = I_2 jX_2$; здесь X_2 — индуктивное сопротивление вторичного рассеяния. Таким образом,

$$U_2 = E_2 - I_2 (R_2 + jX_2) = E_2 - I_2 Z_2. \quad (13-12)$$

В этом выражении Z_2 — полное внутреннее сопротивление вторичной обмотки, а $I_2 Z_2$ — внутреннее падение напряжения вторичной обмотки; Z_2 , как и Z_1 — величина относительно постоянная.

13-6. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

Соотношение напряжений и токов в нагруженном трансформаторе наглядно показывает его векторная диаграмма (рис. 13-7). Построение ее удобно начинать с вектора главного магнитного потока Φ_m . Вектор тока I_0 опережает Φ_m на угол магнитного запаздывания α , э. д. с. E_2 отстает от потока Φ_m , ее индуктирующего, на 90° . Вектор вторичного тока I_2 сдвинут по фазе по отношению к E_2 на некоторый угол ψ_2 . В случае нагрузки, обладающей индуктивностью, т. е. когда $Z_H = R_H + jX_H$, этот угол будет

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2 + X_H}{R_2 + R_H}.$$

Под этим углом к E_2 строим I_2 . Чтобы построить вектор вторичного напряжения U_2 , мы должны вычесть из E_2 реактивное $I_2 jX_2$ и активное $I_2 R_2$ падение напряжения во вторичной обмотке. Вектор $I_2 jX_2$ опережает I_2 на 90° ; чтобы построить его, опускаем из конца

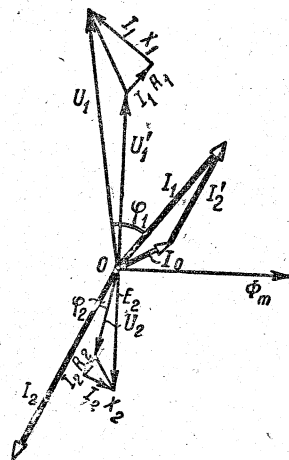


Рис. 13-7. Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке, обладающей активным сопротивлением и индуктивностью.

\dot{E}_2 перпендикуляр на направление I_2 и от конца \dot{E}_2 откладываем $I_2 X_2$; через полученную точку проводим прямую, параллельную I_2 , и на ней откладываем $I_2 R_2$. Гипотенузой треугольника внутренних падений напряжений вторичной обмотки служит вектор $I_2 Z_2$. Таким путем определяется $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2 Z_2$, опережающий I_2 на угол

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_H}{R_H}.$$

Вектор первичного тока мы можем построить как векторную сумму тока \dot{I}_0 и приведенного вторичного тока $\dot{I}'_2 = -I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$. Последний противоположен по направлению I_2 . Наконец, вектор первичного напряжения U_1 строим так же, как на диаграмме холостого хода.

К вектору $(-E_1)$, опережающему Φ_M на 90° , прибавляем векторы внутренних падений напряжений первичной обмотки: вектор активного падения напряжения $I_1 R_1$, параллельный I_1 , вектор реактивного падения напряжения $I_1 j X_1$, опережающий I_1 на 90° . Полученный таким построением вектор U_1 опережает I_1 на угол φ_1 ; этот угол больше φ_2 вследствие влияния намагничивающего тока и внутренних индуктивных сопротивлений трансформатора.

Своеобразно видоизменяется диаграмма трансформатора при наличии значительной емкостной нагрузки во вторичной цепи, т. е. когда $Z_H = R_H - jX_H$ (рис. 13-8). Конечно, порядок построения диаграммы остается все тем же, но общий вид ее заметно изменяется. При емкостной нагрузке I_2 опережает E_2 на $\varphi_2 = \arctg \frac{X_H - X_2}{R_H + R_2}$.

Емкостное сопротивление нагрузки и индуктивное сопротивление вторичного рассеяния X_2 в некоторой части взаимно компенсируются, вследствие чего напряжение U_2 может быть больше E_2 . Емкостная составляющая тока I'_2 частично компенсируется индуктивной составляющей I_0 , вследствие чего

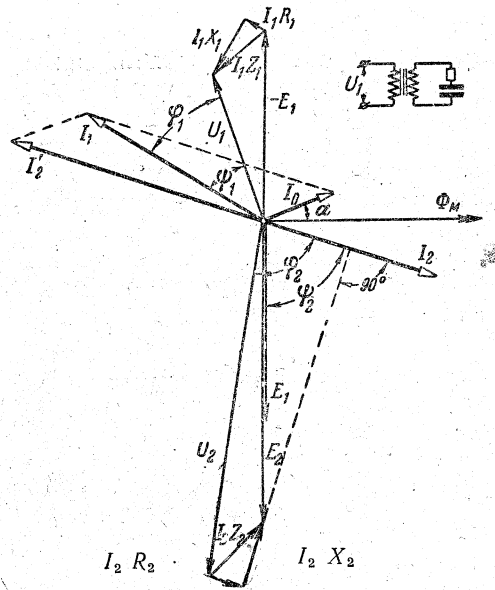


Рис. 13-8. Векторная диаграмма трансформатора при емкостной нагрузке.

$I_1 < I'_2$. Наконец, первичное напряжение U_1 может быть меньше, чем $(-E_1)$, вследствие частичной компенсации реакции емкости в первичной цепи первичной индуктивностью рассеяния. Сдвиг фаз между \dot{U}_1 и \dot{I}_1 меньше, чем между \dot{U}_2 и \dot{I}_2 вследствие того, что реакция емкости во вторичной цепи при передаче в первичную цепь несколько компенсируется внутренними индуктивностями трансформатора.

13-7. Приведенный трансформатор

В большинстве случаев коэффициент трансформации трансформатора относительно велик. По этой причине на векторной диаграмме трансформатора затруднительно изобразить в одном и том же масштабе высшее и низшее напряжения, например 6000 и 230 в. Далее желательно иметь возможность непосредственно сопоставлять параметры первичной и вторичной обмоток — их активные и реактивные сопротивления, а также первичные и вторичные напряжения и токи. Соотношения величин, относящихся к двум цепям трансформатора, становятся простыми и наглядными, если «привести» вторичную обмотку к числу витков первичной, т. е. заменить фактиче-

ский трансформатор, у которого $\omega_1 \neq \omega_2$, фиктивным приведенным трансформатором, у которого коэффициент трансформации равен единице.

При таком приведении должны остаться без изменения условия в первичной обмотке, а в цепи вторичной обмотки должны сохраниться неизменными энергетические условия, т. е. активная и реактивная мощности (так как они не зависят от коэффициента трансформации) и, их распределение между отдельными элементами вторичной цепи.

В частности, из этого следует, что при приведении не должны изменяться сдвиги фаз между напряжениями и токами у указанных элементов. Все остальные вторичные величины, пересчитанные надлежащим образом, мы будем называть приведенными и отмечать знаком ($'$).

Из условия неизменности энергетических отношений следует, что коэффициент приведения для всех одноименных величин должен быть одинаков; поэтому достаточно определить его для одного из напряжений или э. д. с.

При $\omega_1 = \omega_2$ э. д. с. $E_2' = E_1$, а так как $E_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} E_2 = k_{12} E_2$, то, следовательно, приведенная вторичная э. д. с.

$$E_2' = k_{12} E_2 = E_1. \quad (13-13)$$

Тот же коэффициент приведения будет относиться и ко всем вторичным напряжениям:

$$U_2' = k_{12} U_2; \quad I_2' R_2' = k_{12} I_2 R_2;$$

$$I_2' X_2' = k_{12} I_2 X_2.$$

Полная мощность вторичной обмотки при приведении должна сохранить неизменной свою величину:

$$S_2 = E_2 I_2 = E_2' I_2' = k_{12} E_2 I_2';$$

следовательно,

$$I_2' = \frac{1}{k_{12}} I_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} I_2; \quad (13-14)$$

приведенный вторичный ток во вторичной обмотке равен по величине составляющей первичного тока, уравновешивающей размагничиваю-

щее действие вторичного тока. По фазе эти токи противоположны.

Из условия неизменности активной мощности следует, что

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 R_2'$$

и приведенное активное сопротивление вторичной обмотки будет:

$$R_2' = k_{12}^2 R_2. \quad (13-15)$$

Реактивная мощность Q при приведении также должна остаться без изменения, следовательно,

$$I_2^2 X_2 = I_2'^2 X_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 X_2',$$

что позволяет определить приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки

$$X_2' = k_{12}^2 X_2. \quad (13-16)$$

Векторная диаграмма приведенного трансформатора будет отличаться от описанной выше диаграммы рис. 13-6 только тем, что в ней $E_1 = E_2'$ и можно непосредственно сравнивать первичные и вторичные напряжения и токи. Это дает возможность, например, непосредственно в вольтах определить приведенную к первичной обмотке потерю напряжения в трансформаторе: $\Delta U = U_1 - U_2'$.

13-8. Схема замещения трансформатора

Для расчетов различных режимов работы трансформатора, а иногда и для исследований сложных цепей, в которые он входит как один из элементов, можно заменить реальный трансформатор такой комбинацией электрически соединенных сопротивлений — схемой замещения, которая при ее включении на место трансформатора в его первичную цепь будет потреблять ту же мощность при том же токе и сдвиге фаз, как и замещаемый трансформатор. Конечно, схема замещения заменяет трансформатор только как нагрузка в первичной цепи, в схеме замещения отсутствует трансформация.

Составим уравнения, определяющие параметры схемы замещения через параметры трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_1 Z_1 + (-\dot{E}_1) = I_1 Z_1 - \\ &\quad - k_{12} \dot{E}_2; \\ \dot{E}_2 &= I_2 Z_2 + \dot{U}_2 = I_2 Z_2 + I_2 Z_H, \end{aligned} \right\} (13-17)$$

заменим в последнем выражении $I_2 = -I_2' k_{12}$ и, подставив выражение \dot{E}_2 в уравнение U_1 , получим:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I_2' k_{12}^2 Z_2 + I_2' k_{12}^2 Z_H;$$

здесь $k_{12}^2 Z_2 = Z_2'$ — приведенное полное внутреннее сопротивление вторичной обмотки, а $k_{12}^2 Z_H = Z_H'$ — приведенное полное сопротивление нагрузки, включенной во вторичную цепь трансформатора. Таким путем получаем первое уравнение схемы замещения:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I_2' Z_2' + I_2' Z_H'. \quad (13-18)$$

Напряжение $(-E_1)$ пропорционально потоку в сердечнике Φ_m . Зависимость последнего от тока I_0 нелинейна вследствие непостоянства μ стали (§ 10-2). Однако в рабочих условиях трансформатора поток изменяется незначительно, что позволяет пренебречь нелинейностью и считать Φ_m пропорциональным I_0 . С этой оговоркой можно считать $(-E_1)$ пропорциональным I_0 . Так как угол сдвига фаз между соответствующими векторами меньше 90° (рис. 13-9), то коэффициент пропорциональности можно рассматривать как некоторое полное сопротивление Z_{12} , именуемое условно

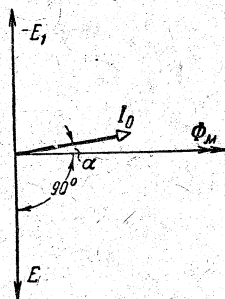


Рис. 13-9. Векторная диаграмма намагничивающего тока потока и индуцированной э. д. с.

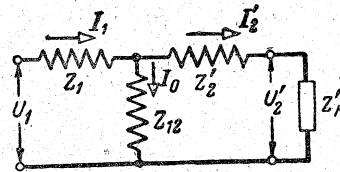


Рис. 13-10. Т-образная схема замещения трансформатора.

полным сопротивлением цепи намагничивания. Следовательно, $-E_1 = I_0 Z_{12}$; подставив это выражение в уравнение первичного напряжения (13-17), получим второе уравнение схемы замещения:

$$U_1 = I_1 Z_1 + I_0 Z_{12}. \quad (13-19)$$

Третьим уравнением схемы замещения служит уравнение первичного тока:

$$I_1 = I_0 + I_2'. \quad (13-20)$$

Три уравнения можно рассматривать как уравнение двух законов Кирхгофа для схемы 13-10. Здесь для самого трансформатора получена Т-образная схема замещения, в которой Z_1 изображает первичную обмотку, Z_2' — вторичную обмотку и Z_{12} — магнитную цепь. Сопротивление Z_H' замещает нагрузку, включенную ко вторичной обмотке, и лежит вне схемы замещения самого трансформатора. Изменениям нагрузки соответствуют изменения Z_H' , причем на основании изменений токов и частичных напряжений в схеме замещения можно определить условия в реальном трансформаторе.

Векторная диаграмма схемы замещения отличается от диаграммы трансформатора тем, что в ней векторы вторичных напряжений и токов приведены к первичной обмотке и повернуты на 180° . Построение этой диаграммы (рис. 13-11) удобно начинать с вектора $E_1 = E_2'$. По отношению к нему вектор приведенного вторичного тока I_2' отстает на известный угол

$$\phi_2 = \arctg \frac{X_2' + X_H'}{R_2' + R_H'},$$

а вектор намагничивающего тока I_0 на угол $90^\circ - \alpha$. Дальнейшее построение

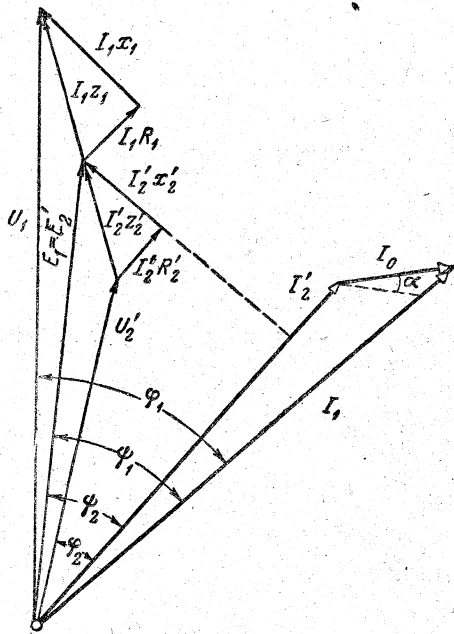


Рис. 13-11. Векторная диаграмма схемы замещения рис. 13-10.

векторов вторичных напряжений выполняется так же, как и в диаграмме трансформатора (рис. 13-7): из конца вектора E_2' опускаем перпендикуляр на напряжение I_2' и на этом перпендикуляре откладываем $I_2'X_2'$ и т. д. Затем, складывая I_2' и I_0 , определяем I_1 , после чего строим так же, как в диаграмме трансформатора, векторы первичных напряжений I_1R_1 , I_1X_1 , I_1Z_1 и U_1 . Векторная диаграмма схемы замещения часто именуется диаграммой замещенного трансформатора.

У готового трансформатора практически невозможно определить порознь X_1 и X_2 , что затрудняет составление соответствующей схемы замещения; чтобы сделать это построение весьма простым, достаточно пренебречь током I_0 ; следовательно считать, что $I_1 = I_2'$. Как уже отмечалось, I_0 составляет от 3 до 10% от номинального значения I_1 . Однако ошибка, вызываемая исключением I_0 , уменьшается благодаря тому, что I_2' и I_0 складываются геометрически. Кроме того, при расчете падения напряжения в трансформаторе

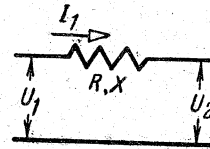


Рис. 13-12. Упрощенная схема замещения трансформатора.

эта ошибка является величиной второго порядка, так как она сказывается лишь на значении падения напряжения I_1Z_1 , а последнее само по себе составляет лишь 3—5% от U_1 .

Если опустить ветвь тока I_0 , то в упрощенной схеме замещения рис. 13-12 участки Z_1 и Z_2' оказываются соединенными просто последовательно и их активные и реактивные сопротивления можно сложить: $R_1 + R_2' = R$, $X_1 + X_2' = X$, и найти

$$Z = R + jX,$$

которое будет полным сопротивлением упрощенной схемы замещения (рис. 13-12). При помощи упрощенной схемы замещения решается ряд практических вопросов, относящихся к эксплуатации трансформатора, в частности, определяется изменение вторичного напряжения трансформатора, вызываемое нагрузкой.

13-9. Опыт короткого замыкания

Для практического определения параметров R и X упрощенной схемы замещения готового трансформатора служит опыт короткого замыкания; для этого опыта зажимы вторичной обмотки трансформатора замыкаются накоротко, а напряжение на зажимах первичной обмотки сильно понижается до небольшого значения $U_{1к}$ (примерно 5—10% от $U_{1н}$), при котором ток I_1 в первичной обмотке будет равен номинальному, несмотря на короткое замыкание вторичной обмотки. Посредством вольтметра, амперметра и ваттметра измеряются: напряжение $U_{1к}$, ток I_1 и мощность $P_{1к}$, потребляемая трансформатором (рис. 13-13).

Поток в сердечнике Φ_M пропорционален э. д. с. E_2 (см. 13-2); а послед-

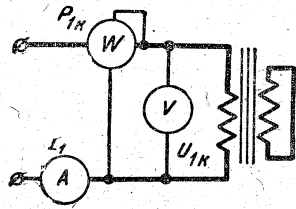


Рис. 13-13. Схема опыта короткого замыкания.

няя при опыте короткого замыкания равна падению напряжения вторичной обмотки

$$E_{2к} = I_2 Z_2,$$

в то время как в рабочих условиях

$$E_2 = \dot{U}_2 + I_2 Z_2.$$

Поэтому при опыте короткого замыкания $E_{2к}$ составляет лишь несколько процентов от E_2 (2—5%), а следовательно, соответственно уменьшается и поток в сердечнике.

При опыте короткого замыкания потери в обмотках остаются такими же, как и при нагрузке, а потери в сердечнике становятся незначительными, так как они пропорциональны (приближенно) Φ_m^2 .

Можно считать, что вся мощность $P_{1к}$ затрачивается на электрические потери в обмотках:

$$P_{1к} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2,$$

а так как намагничивающим током можно пренебречь, то $I_1 = I_2$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} P_{1к} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = \\ &= I_1^2 (R_1 + R_2) = I_1^2 R, \end{aligned}$$

на основании чего определяется активное сопротивление упрощенной схемы замещения

$$R = \frac{P_{1к}}{I_1^2}, \quad (13-21)$$

называемое также активным сопротивлением короткого замыкания трансформатора.

Однако это значение только ориентировочно определяет R нагруженного трансформатора. При полном использовании электротехнических материа-

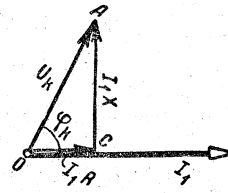


Рис. 13-14. Треугольник короткого замыкания.

лов в аппарате они должны значительно нагреваться при нагрузке. Такое нагревание существенно изменяет активное сопротивление меди обмоток трансформатора, а следовательно, и потери в них. По этим причинам для определения потерь в обмотках и изменения напряжения значение R , найденное из опыта короткого замыкания, должно быть соответственно пересчитано — приведено к температуре 75° :

$$R_{75} = R \frac{234,5 + 75}{234,5 + \theta},$$

где θ — ориентировочное значение температуры обмоток при опыте короткого замыкания.

Значение X , именуемого индуктивным сопротивлением короткого замыкания, можно считать независимым от температуры. Оно определяется поэтому непосредственно из результатов опыта:

$$X = \sqrt{\left(\frac{U_{1к}}{I_1}\right)^2 - R^2}. \quad (13-22)$$

Наконец, полное сопротивление короткого замыкания, приведенное к рабочей температуре 75° , будет:

$$z = \sqrt{R_{75}^2 + X^2}. \quad (13-23)$$

На основании расчета параметров R и X строится треугольник короткого замыкания трансформатора (рис. 13-14), представляющий собой векторную диаграмму падения напряжений упрощенной схемы замещения трансформатора.

13-10. Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке

Упрощенной схеме замещения соответствует векторная диаграмма, на основании которой легко определить по-

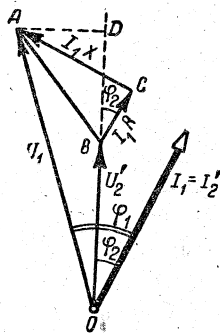


Рис. 13-15. Векторная диаграмма упрощенной схемы замещения.

теру напряжения в трансформаторе. Возьмем за исходный вектор диаграммы вектор приведенного вторичного напряжения \dot{U}'_2 и направим его вертикально (рис. 13-15). По отношению к \dot{U}'_2 в наиболее вероятном случае индуктивной нагрузки ток \dot{I}'_2 отстает на угол φ_2 . Прибавив к \dot{U}'_2 вектор $\dot{I}'_2 R$, параллельный \dot{I}'_2 , и вектор $\dot{I}'_2 X$, опережающий \dot{I}'_2 на 90° , получим вектор первичного напряжения \dot{U}_1 . Треугольник ABC будет треугольником падений напряжения в трансформаторе.

При холостом ходе трансформатора стороны треугольника падений напряжения ABC (рис. 13-15) становятся настолько малыми, что векторы \dot{U}_1 и \dot{U}'_2 практически сливаются друг с другом, т. е. приведенное вторичное напряжение оказывается равным первичному. Чем больше нагрузка трансформатора, тем больше стороны треугольника ABC и тем меньше приведенное вторичное напряжение по сравнению с первичным.

Если включить первичную обмотку трансформатора под номинальное напряжение $U_{1н}$, а ток вторичной обмотки изменять от нуля до номинального значения, то вторичное напряжение U_2 трансформатора будет тем меньше, чем больше нагрузочный ток. Алгебраическая разность $U_{20} - U_2$ между вторичным напряжением холостого хода U_{20} и вторичным напряжением при полной нагрузке U_2 будет представлять собой изменение вторичного напряжения при переходе от холостого хода к нагрузке, при

этом первичное напряжение сохраняет неизменяющееся номинальное значение.

При определении этой величины напряжения вторичной обмотки обычно приводятся к числу витков первичной; таким образом, изменением напряжения называется алгебраическая разность значений приведенного вторичного напряжения при холостом ходе и при нагрузке; но первое из них равно $U_{1н}$, следовательно, изменение напряжения будет равно разности $U_{1н} - U'_2$. Оно выражается обыкновенно в процентах от первичного напряжения и называется процентным изменением напряжения трансформатора:

$$\Delta U \% = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} 100. \quad (13-24)$$

Так как все стороны треугольника ABC много меньше, чем векторы OA или OB , то можно принять, что

$$U_1 - U'_2 = BD = BC \cos \varphi_2 + CA \sin \varphi_2.$$

или

$$U_1 - U'_2 = I_1 (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2).$$

Относительная величина изменения напряжения выразится тогда согласно (13-24) следующим образом:

$$\Delta U \% = \frac{100 I_1}{U_{1н}} (R \cos \varphi_2 + X \sin \varphi_2). \quad (13-25)$$

Если обозначить через

$$\Delta U_a = \frac{100 I_1 R}{U_{1н}}$$

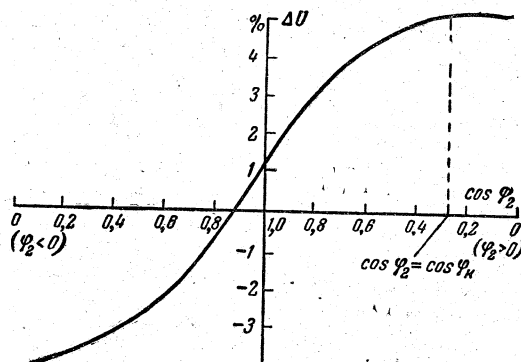


Рис. 13-16. Зависимость изменения напряжения трансформатора от коэффициента мощности.

относительную величину активного падения напряжения в трансформаторе и через

$$\Delta U_p = \frac{100 I_1 X}{U_{1н}}$$

относительную величину индуктивного падения напряжения в нем, то соотношение (13-25) получает более простой вид:

$$\Delta U \% = \Delta U_a \cos \varphi_2 + \Delta U_p \sin \varphi_2. \quad (13-26)$$

Этим соотношением определяется зависимость изменения напряжения трансформатора от $\cos \varphi_2$ нагрузки (рис. 13-16) при постоянном значении нагрузочного тока (ΔU_a и ΔU_p в этом случае постоянны).

13-11. Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) η трансформатора определяется как отношение отдаваемой трансформатором мощности P_2 к получаемой им мощности P_1 , т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Разность этих двух мощностей

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

представляет собой потери в трансформаторе. Следовательно, к. п. д. трансформатора связан с величиной его полезной нагрузки (P_2) и потерями простым соотношением

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (13-27)$$

В трансформаторе существуют два вида потерь: потери в стали сердечника вследствие гистерезиса и вихревых токов и потери в меди обмоток вследствие нагревания токами.

Мощность холостого хода трансформатора практически вся затрачивается на потери в стали; на этом основании потери в стали P_c определяются из опыта холостого хода, проводимого при номинальном первичном напряжении.

Потери в меди вычисляются на основании определенного из опыта короткого замыкания приведенного

активного сопротивления R_{75} . Так как при номинальной нагрузке влиянием намагничивающего тока I_0 на потери в меди можно пренебречь, то $I_1 = I'_2$ и потери в меди будут:

$$P_m \approx I_1^2 R_{75} = I_2'^2 R_{75}. \quad (13-28)$$

Таким образом, к. п. д. трансформатора

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_c + I_2'^2 R_{75}}. \quad (13-29)$$

Трансформатор имеет наибольший к. п. д. при такой нагрузке, когда его потери в меди становятся равными потерям в стали. При дальнейшем возрастании нагрузки к. п. д. трансформатора уменьшается; у трансформаторов, изготавливаемых советскими заводами, $P_c : P_m = 0,5 - 0,25$, следовательно, они имеют максимальный к. п. д. при нагрузке 70—50% от номинальной. Это — примерно средняя нагрузка работающего трансформатора.

13-12. Трехфазные трансформаторы

Переменный ток в настоящее время применяется почти исключительно в виде трехфазного тока. Для трансформирования трехфазных токов можно воспользоваться тремя однофазными трансформаторами. В трехфазной системе эти трансформаторы должны работать как один цельный агрегат. Логично поставить вопрос, нельзя ли объединить три однофазных трансформатора в один трехфазный аппарат и при этом достигнуть экономии материала. Это было сделано изобретателем трехфазного трансформатора М. О. Доливо-Добровольским.

Представим себе три трансформатора (рис. 13-17). Объединяя их в один трехфазный трансформатор, мы оставим без изменения ту часть сердечников, на которых расположены обмотки, а вторую сторону всех трех сердечников соединим в один общий магнитопровод (рис. 13-18а).

Такую магнитную систему можно сопоставить с соединением трех электрических цепей в звезду. Но для трехфазной системы при равномерной нагрузке нулевой провод не нужен; отказываясь от него, мы получали эконо-

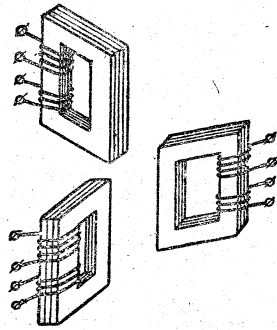


Рис. 13-17. Трехфазная группа из трех однофазных трансформаторов.

мию меди. Нулевому проводу в нашей магнитной системе соответствует средний общий стержень, при наличии симметричной трехфазной системы потоков он не нужен и может быть удален (рис. 13-18, б). Поток в стали трансформатора можно считать прямо пропорциональным напряжению и отстающим от него по фазе почти на 90° (§ 13-3). Три первичных напряжения трехфазной системы, следовательно, должны обуславливать три потока одинаковой амплитуды, сдвинутых по фазе друг по отношению к другу на одну треть периода (120°). Сумма трех этих потоков в общем стержне магнитопровода равна нулю, что позволяет отказаться от этого стержня.

Показанный на рис. 13-18, б симметричный сердечник неудобен для изготовления и в настоящее время заменен несимметричным магнитопроводом (рис. 13-19), который можно мыслить как выпрямленный вариант магнитопровода (рис. 13-18). Симметричная трехфазная система первичных напряжений трансформатора обуславливает и в таком несимметричном магнитопроводе симметричную систему

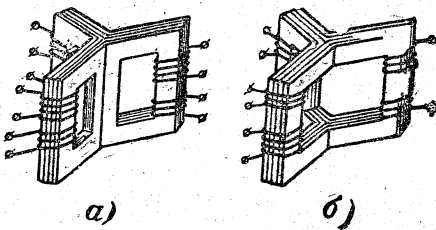


Рис. 13-18. Трехфазный трансформатор. а — с симметричным четырехстержневым магнитопроводом; б — с симметричным трехстержневым магнитопроводом.

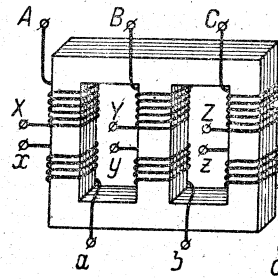


Рис. 13-19. Трехфазный трансформатор с несимметричным магнитопроводом.

магнитных потоков. Но вследствие неравенства магнитных сопротивлений намагничивающие токи отдельных фаз между собой не равны. Однако эта несимметрия намагничивающих токов существенного значения не имеет. Физически в каждый данный момент поток одного стержня замыкается через два других стержня замыкает магнитопровод (рис. 13-20).

Для ориентировки в условиях трехфазной трансформации обратим внимание на то, что трансформацию мы имеем в каждой из фаз. Для фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке справедливы все те отношения, какие нам известны для однофазного трансформатора. Эти условия нарушаются лишь при несимметричной нагрузке некоторых схем соединения трехфазных трансформаторов.

Для зажимов трансформатора принята следующая разметка в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения зажимы A, B, C — начала обмоток; X, Y, Z — их концы; на стороне низшего напряжения соответственно a, b, c и x, y, z (рис. 13-19).

Широко применяются два способа соединения обмоток трехфазного трансформатора с каждой из его сто-

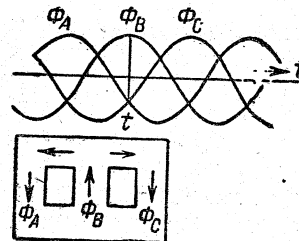


Рис. 13-20. Направление магнитных потоков в сердечнике трехфазного трансформатора в момент.

рон звездой и треугольником. Эти два способа соединения условно обозначаются символами Y и Δ . Наиболее простым и дешевым из них является соединение обеих обмоток трансформатора звездой. В этом случае каждая из обмоток и ее изоляция при глухом заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и на линейный ток; так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то, следовательно, соединение звездой требует в каждой из обмоток меньшего количества витков большего сечения с изоляцией, рассчитанной на фазное напряжение. Соединение обеих обмоток звездой широко применяется для трансформаторов небольшой и средней мощности (примерно до 1800 *кВа*). Соединение звездой является наиболее желательным для высокого напряжения, так как при нем изоляция обмоток рассчитывается лишь на фазное напряжение; чем выше напряжение и меньше ток, тем относительно дороже соединение треугольником. Соединение треугольником конструктивно удобнее при больших токах. По этой причине соединение Y/Δ можно считать наиболее распространенным для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не требуется нулевого провода.

Необходимо учитывать, что при трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений $U_{\phi 1} : U_{\phi 2}$ всегда приближенно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток; что же касается линейных напряжений, то их отношение зависит и от способа соединения обмоток трансформатора.

13-13. Группы соединений обмоток

Ток во вторичной обмотке трансформатора имеет направление, обратное направлению первичного тока, но при соответствующем выборе зажимов вторичной обмотки (рис. 13-21) ток и напряжение в приемнике могут совпадать по фазе с первичным напряжением и током или быть им противоположны по фазе. Эта относительная фаза вторичного напряжения весьма

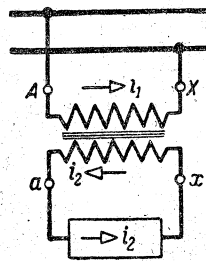


Рис. 13-21: Относительное направление токов в первичной и вторичной обмотках.

важна при параллельном соединении трансформаторов и в измерительных трансформаторах.

Чтобы условно обозначить сдвиг фаз вторичного напряжения по отношению к первичному, принято деление трансформаторов по группам соединений.

При определении группы соединений трансформатора первичным напряжением считается его высшее напряжение, а вторичным — низшее напряжение.

В основу деления по группам положена величина угла сдвига фаз между линейным высшим и низшим напряжениями. У двух трансформаторов с одинаковой группой соединений этот сдвиг фаз одинаков.

Способ обозначения групп соединений основан на сопоставлении относительного положения векторов высшего и низшего линейных напряжений с положением минутной и часовой стрелок. Для сопоставления минутная стрелка мыслится установленной на цифре 12 и с ней совмещается вектор линейного высшего напряжения, а часовая стрелка совмещается с вектором линейного низшего напряжения. Отсчет угла производится от минутной к часовой стрелке по направлению их вращения. Положение часовой стрелки определяет наименование группы соединений.

У однофазного трансформатора вектор низшего напряжения может составлять с вектором высшего напряжения приближенно или 0° , или 180° . В первом случае это соответствует положению обеих стрелок на цифре 12, поэтому такое соединение именуется группой 12. Во втором случае часовая стрелка должна быть поставлена на 6, т. е. это будет группа 6.

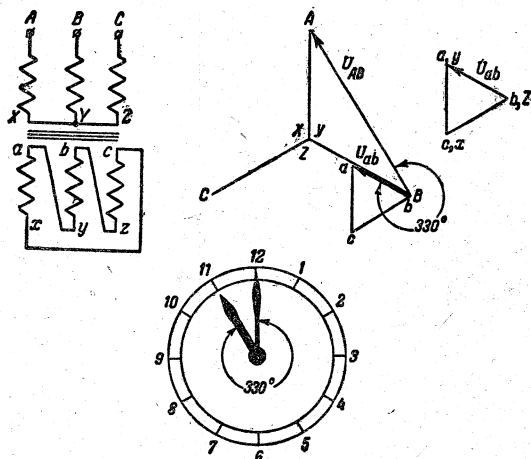


Рис. 13-22. Векторная диаграмма группы соединения 11.

ГОСТ для однофазных трансформаторов установлена стандартная группа соединений 12.

У трехфазных трансформаторов возможно 12 различных групп соединений, но желательно иметь минимальное число различных групп, поэтому для трехфазных трансформаторов установлены только две стандартные группы соединений: 11 и 12. Широко применяется группа Y/Y_0-12 . Здесь знак нуль показывает, что при данном соединении обмоток нулевая точка имеет вывод. Названная группа применяется для трансформаторов с высшим напряжением до 35 кВ включительно, при низшем напряжении 230 В и мощности до 560 кВА или при том же пределе высшего напряжения, низшем напряжении 400 В и мощности до 1800 кВА. Группа 11 (Y/Δ и Y_0/Δ) применяется для более мощных трансформаторов и более высоких напряжений.

На рис. 13-22 показано, что в случае соединения Y/Δ вектор низшего (вторичного) линейного напряжения U_{ab} образует с вектором высшего (первичного) линейного напряжения U_{AB} угол в 330° , который равен углу между стрелками в 11 час., следовательно, этот способ соединения должен быть отнесен к группе 11.

13-14. Автотрансформатор

Первичное напряжение $U_1 \approx 4,44 I \omega_1 \Phi_m$; при его постоянстве под-

держивается почти неизменным поток Φ_m в сердечнике трансформатора. Последний индуцирует в каждой витке обмотки э. д. с., тоже практически не зависящую от тока, проходящего по обмотке. Вследствие этого можно считать постоянным распределение напряжения между отдельными частями обмотки и почти не зависящим от ее тока. Указанное обстоятельство используется в автотрансформаторе — аппарате, основанном на том же принципе, как и трансформатор, но имеющем лишь одну обмотку высшего напряжения ω_1 (рис. 13-23), часть которой служит обмоткой низшего напряжения ω_2 . Эта обмотка высшего напряжения может служить первичной или вторичной обмоткой аппарата. Можно рассматривать обмотку автотрансформатора как образованную наложением независимых первичной и вторичной обмоток. Напряжения и токи автотрансформатора связаны теми же приближенными соотношениями, как и в трансформаторе:

$$U_1 : U_2 \approx \omega_1 : \omega_2 \approx I_2 : I_1$$

Но в части обмотки aX проходят одновременно два тока: I_1 и I_2 . Результирующий ток этой части обмотки равен их геометрической сумме, а так как эти токи почти противоположны по фазе, то пренебрегая влиянием намагничивающего тока, можно считать, что в части обмотки aX проходит ток $I_2 - I_1$.

Если коэффициент трансформации $k_{12} = \omega_1 : \omega_2$ лишь немного отличается от единицы, то токи I_1 и I_2 мало отличаются друг от друга, а их разность $I_2 - I_1$ является по сравнению с каждым из них малой величиной. Это позволяет выполнить часть aX обмотки,

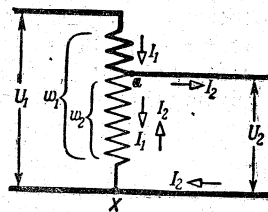


Рис. 13-23. Схема автотрансформатора.

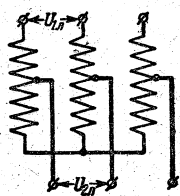


Рис. 13-24. Схема трехфазного автотрансформатора.

которая заменяет две обмотки обыкновенного трансформатора, с тем же числом витков, но из гораздо более тонкой проволоки, благодаря чему обмотка автотрансформатора оказывается более дешевой. Вместе с тем она требует для своего размещения меньше места, вследствие чего сердечник автотрансформатора также получает меньшие размеры.

С увеличением коэффициента трансформации эти преимущества становятся меньше. Одновременно начинает играть роль другое обстоятельство, а именно: электрическое соединение цепей высшего и низшего напряжений. Пока эти два напряжения были одного порядка, электрическое соединение цепей не встречало препятствий. Но автотрансформатор нельзя применить, например, для питания распределительной сети 220 в от

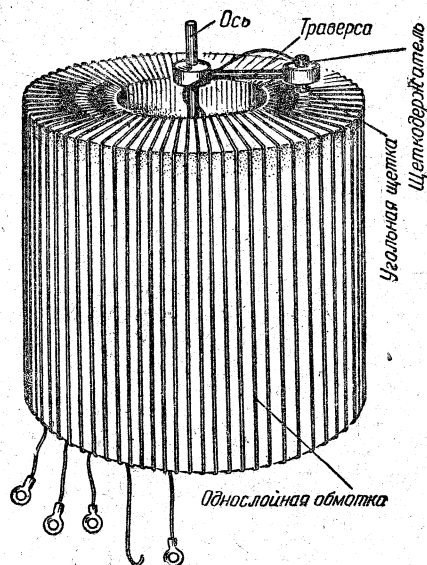


Рис. 13-25. Лабораторный автотрансформатор регулировочный (ЛАТР), устройство.

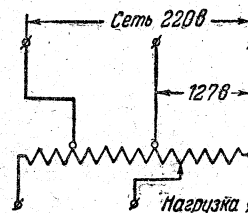


Рис. 13-26. Схема лабораторного автотрансформатора.

сети высокого напряжения 6000 в, так как это не только привело бы к необходимости рассчитать изоляцию распределительной сети на 6000 в и, следовательно, чрезвычайно удорожить ее, но было бы опасно для жизни всех лиц, пользующихся распределительной сетью.

Вследствие этого автотрансформаторы применяются лишь в тех случаях, где требуется сравнительно небольшое изменение напряжения: при высоких напряжениях не более чем в 1,5—2, при низких не более чем в 3 раза.

Трехфазные автотрансформаторы обычно соединяются по схеме звезды с выведенной нулевой точкой (рис. 13-24) или без нее.

Изменение положения точки *a* (рис. 13-23) по отношению к обмотке соответственно изменяет вторичное напряжение автотрансформатора, что можно использовать для плавного регулирования этого напряжения. В соответствующих лабораторных автотрансформаторах (ЛАТР) одним из зажимов вторичной цепи служит подвижной рычажный контакт (рис. 13-25 и 13-26).

13-15. Трехобмоточные трансформаторы

Трехобмоточным трансформатором называется трансформатор, содержащий три электрически не связанные между собой обмотки: высшего напряжения (ВН), среднего напряжения (СН) и низшего напряжения (НН). Например, ВН — 110 кв; СН — 38,5 кв; НН — 11 кв. Из трех обмоток этого трансформатора одна является первичной, две другие — вторичными. Размещены все эти обмотки на одном общем сердечнике.

Принцип работы такого трансформатора, по существу, тот же, что и двухобмоточного. Первичная обмотка трехобмоточного трансформатора служит намагничивающей, ее ток создает главный магнитный поток. Этот последний пронизывает две вторичные обмотки и наводит в них э. д. с., пропорциональные числам витков этих обмоток. При замыкании вторичных обмоток на сопротивления в них возникают соответствующие токи I_2 и I_3 . Размагничивающее действие этих токов будет определяться геометрической суммой н. с. второй и третьей обмоток. Следовательно, н. с. первичной обмотки должна уравнивать эту суммарную вторичную н. с. и, кроме этого, иметь намагничивающую слабующую

$$I_1 \omega_1 = (-I_2 \omega_2) + (-I_3 \omega_3) + I_0 \omega_1, \quad (13-30)$$

в соответствии с чем первичный ток трансформатора можно рассматривать как геометрическую сумму приведенных токов второй и третьей обмоток и намагничивающего тока

$$I_1 = I'_2 + I'_3 + I_0.$$

Здесь

$$I'_2 = -I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \text{ и } I'_3 = -I_3 \frac{\omega_3}{\omega_1}.$$

Таким образом, в трехобмоточном трансформаторе происходит передача электрической энергии одновременно в две вторичные цепи — второй и третьей обмоток.

Мало вероятно, что обе вторичные обмотки одновременно будут загружены на их номинальную мощность и, кроме того, что токи I'_2 и I'_3 в это время совпадут по фазе. Поэтому первичная обмотка обычно рассчитывается на номинальную мощность, меньшую, чем сумма номинальных мощностей вторичных обмоток.

По тому же принципу, как трехобмоточный трансформатор, работают многообмоточные трансформаторы малой мощности и низкого напряжения, применяемые в технике связи, автоматике и т. д.

13-16. Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов имеет место, когда передача энергии из одной трехфазной сети в другую производится одновременно через два или несколько трансформаторов (рис. 13-27). В этом случае первичные обмотки трансформаторов получают энергию от общего источника, а вторичные их обмотки питают общую нагрузку.

Включаемые параллельно трансформаторы должны удовлетворять трем условиям:

1) трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений;

2) трансформаторы должны иметь одинаковые номинальные первичные и вторичные напряжения;

3) трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания (допускается отклонение $\pm 10\%$).

Выполнение первых двух условий предупреждает возникновение больших уравнильных токов в обмотках трансформаторов при холостом ходе вследствие несовпадения фаз или неравенства их вторичных э. д. с.

Третье условие должно быть выполнено для того, чтобы при включении нагрузки последняя распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальной (полной) мощности. В упрощенной эквивалентной схеме трансформатор замещается полным сопротивлением короткого замыкания z (§ 13-8). Согласно принципам замещения два параллельно работающих трансформатора могут быть изображены в эквивалентной схеме двумя соединенными параллельно сопротивлениями короткого замыкания z_1 и z_2 (рис. 13-28). При таком соеди-

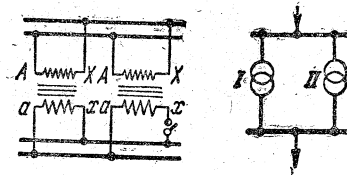


Рис. 13-27. Параллельное соединение двух однофазных трансформаторов.

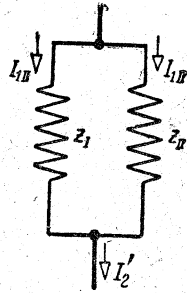


Рис. 13-28. Эквивалентная схема параллельного соединения трансформаторов.

нении токи ($I_{1I} = I'_{2I}$ и $I_{1II} = I'_{2II}$) распределяются между параллельными ветвями обратно пропорционально их полным сопротивлениям:

$$\frac{I_{1I}}{I_{1II}} = \frac{z_{II}}{z_I}. \quad (13-31)$$

Напряжение короткого замыкания трансформатора равно произведению номинального тока I_{1H} трансформатора на его сопротивление короткого замыкания, и если эти напряжения у двух трансформаторов равны, то

$$I_{1H} z_I = I_{1II} z_{II},$$

а так как первичные номинальные напряжения (U_{1H}) у трансформаторов должны быть одинаковы, то

$$\frac{z_{II}}{z_I} = \frac{I_{1H}}{I_{1II}} = \frac{U_{1H} I_{1H}}{U_{1H} I_{1II}} = \frac{S_{1H}}{S_{1II}}.$$

Сопоставляя это отношение с (13-31), получаем:

$$\frac{I_{1I}}{I_{1II}} = \frac{z_{II}}{z_I} = \frac{S_{1H}}{S_{1II}}, \quad (13-32)$$

т. е. токи нагрузки трансформаторов пропорциональны их номинальным полным мощностям.

13-17. Устройство сердечника и обмоток

Сердечником именуется все устройство, образующее магнитную цепь трансформатора. Сердечник собирается из листов электротехнической стали, содержащей до 4—5% кремния. Листы берутся толщиной 0,35 или 0,5 мм. Чтобы создать изоляцию между листами, их перед сборкой сердеч-

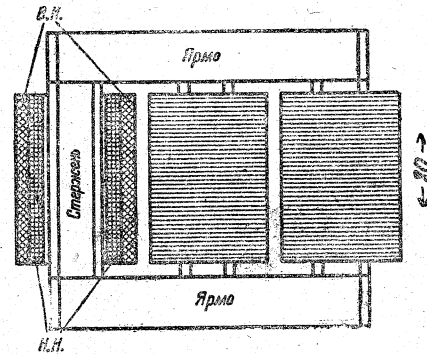
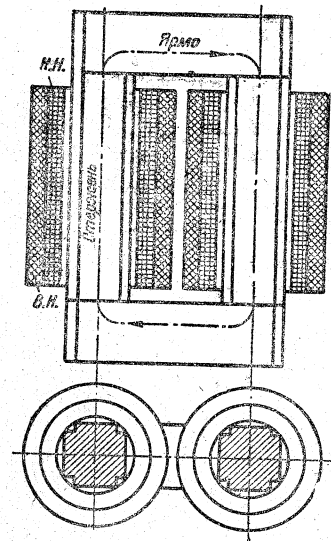


Рис. 13-29. Стержневые однофазный и трехфазный трансформаторы.

ника покрывают изоляционным лаком (в настоящее время мало применяется изоляция непроклеенной бумаги толщиной 0,04 мм).

В зависимости от положения сердечника по отношению к обмоткам принято различать стержневые трансформаторы (рис. 13-29), у которых обмотки охватывают стержни сердечника, и броневые (рис. 13-30), у которых сердечник частично охватывает обмотки.

Стержневой сердечник проще по конструкции и позволяет легче осуществить изоляцию обмоток; поэтому он применяется для большинства трансформаторов. Сердечник состоит из стержней, на которых размещаются обмотки, и ярем, замыкающих магнитную цепь и свободных от обмоток (рис. 13-29).

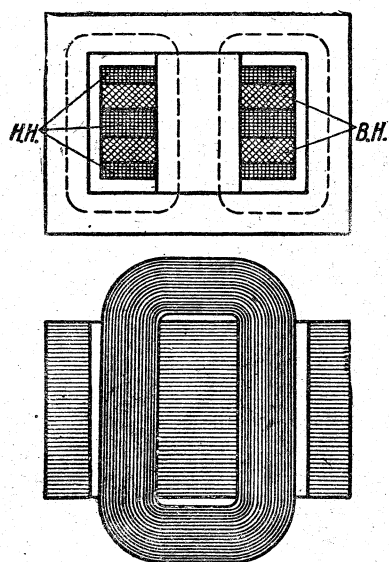


Рис. 13-30. Броневой однофазный трансформатор.

Поперечное сечение стержня сердечника только у малых трансформаторов имеет форму квадрата; в большинстве же случаев для лучшего использования площади внутри обмотки поперечное сечение стержня имеет форму ступенчатого многоугольника с тем большим числом ступеней, чем мощнее трансформатор (рис. 13-31). В трансформаторе большой мощности для улучшения теплоотдачи между отдельными пакетами стали сердечника устраиваются вентиляционные каналы.

Броневой сердечник применяется в СССР в основном лишь для малых трансформаторов и трансформаторов специального назначения, когда некоторым преимуществом является защита сердечником обмоток от механических повреждений.

В последнее время броневой тип нашел новое применение в трансформаторах с намотанным сердечником из холоднокатаной стали (рис. 13-32).

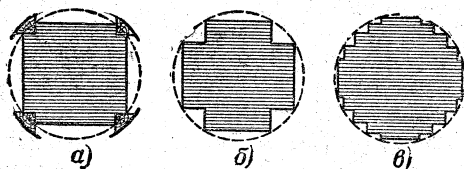


Рис. 13-31. Сечение сердечника трансформатора.

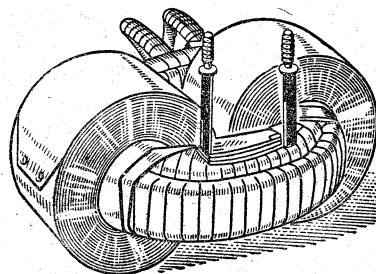


Рис. 13-32. Однофазный броневой трансформатор с намотанным сердечником.

Для этой стали характерны малые потери и высокая магнитная проницаемость в направлении прокатки. Такие трансформаторы дают экономию материалов порядка 15—20%. Они изготавливаются однофазными мощностью до 500 кВа и выше.

В большинстве трансформаторов применяются концентрические обмотки, простейшим видом которых является цилиндрическая обмотка (рис. 13-29), при которой обмотки имеют форму двух коаксиальных цилиндров. Ближе к стержню располагается обмотка низшего напряжения, а ее охватывает обмотка высшего напряжения. Обмотки отделяются друг от друга изолирующим цилиндром из специального картона или бакелизированной бумаги. При значительном числе витков обмотка наматывается в несколько слоев, между которыми прокладывается изолирующая бумага или картон.

Относительно редко, преимущественно в броневых трансформаторах, применяются чередующиеся обмотки, в которых чередуются положенные друг на друга дискообразные катушки *НН* и *ВН* (рис. 13-30).

13-18. Условия нагревания и мощность трансформатора

Тепло, выделяющееся в трансформаторе, частично затрачивается на повышение температуры трансформатора, а частично отдается им в окружающую среду. Чем больше превышение температуры трансформатора над температурой окружающей среды, тем энергичнее идет теплоотдача, поэтому при некотором определенном нагреве

трансформатора устанавливается тепловое равновесие¹: в трансформаторе выделяется столько же тепла, сколько он отдает в окружающую среду. Изоляционные материалы трансформатора чувствительны к повышению температуры, в особенности чувствительна хлопчатобумажная оплетка проводов обмоток. Тепловое равновесие трансформатора должно устанавливаться при такой температуре, которая не вызывает быстрого или медленного разрушения изоляции, однако постепенный износ изоляции — ее «старение» — неизбежно. Чем выше допускаемая предельная температура отдельных частей, тем при прочих равных условиях меньше срок службы трансформатора вследствие старения его изоляции и менее надежен он в эксплуатации. Но, с другой стороны, чем выше эта температура, тем легче и дешевле трансформаторы. Установленные ГОСТ предельные значения температуры² выбраны на основании опытов, их соблюдение позволяет обеспечить достаточно длительную (примерно 15—20 лет) и надежную работу трансформатора при значительном использовании его активных материалов.

Тепловым расчетом трансформатора определяется его номинальная полная мощность, указываемая на щитке трансформатора, т. е. такая мощность, которую трансформатор может отдавать неограниченно долго, не перегреваясь ни в одной своей части свыше значений, допускаемых нормами для изолирующих материалов. Нагрев стали трансформатора определяется напряжением на зажимах трансформатора, нагрев меди — токами в его обмотках.

Номинальная мощность трансфор-

¹ Это равновесие устанавливается отнюдь не сразу, температура трансформатора постепенно повышается, следуя в основном закону

$$\theta = \theta_M (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

причем скорость процесса нагревания определяется значением постоянной времени τ нагрева, равной отношению теплоемкости трансформатора к его теплоотдаче (см. § 19-3).

² Для обмоток 105° С, для сердечников (на поверхности) 110° С. При этом температура окружающего воздуха принимается равной 35° С.

матора, определяемая условиями нагревания, должна быть поэтому выражена произведением напряжения и тока, т. е. в виде полной мощности (в киловольт-амперах) без учета коэффициента мощности ($\cos \varphi$).

На короткий срок трансформатор может быть перегружен, так как для повышения его температуры нужно некоторое время, но перегрузка должна быть снята прежде, чем температура трансформатора достигнет предельно допустимых значений.

Количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, прямо пропорционально его объему (весу), если считать неизменными магнитную индукцию в сердечнике и плотность тока в обмотках. При увеличении линейных размеров трансформатора в x раз его объем возрастает в x^3 раз, а поверхность охлаждения только в x^2 раз. Следовательно, относительная поверхность теплоотдачи уменьшается. Это вынуждает с увеличением мощности трансформатора принимать ряд специальных мер для усиления его охлаждения.

13-19. Охлаждение трансформаторов

Тепло, выделяющееся в сердечнике и обмотках работающего трансформатора, может быть отведено в окружающую среду непосредственно через воздух, омывающий сердечник и обмотки; это имеет место в сухих трансформаторах.

Условия охлаждения изоляции значительно благоприятнее в масляных трансформаторах. У последних сердечник с обмотками помещен в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным маслом. Последнее, омывая обмотки и сердечник, путем конвекции тепла интенсивно их охлаждает. Это позволяет значительно повысить тепловую нагрузку активных частей трансформатора. Электрическая прочность масла в несколько раз выше, чем у воздуха, что делает возможным значительное уменьшение расстояний от меди обмоток до сердечника.

Тепло, выделяемое активными частями трансформатора, должно быть отведено в воздух через охлаждающую поверхность бака. Последней

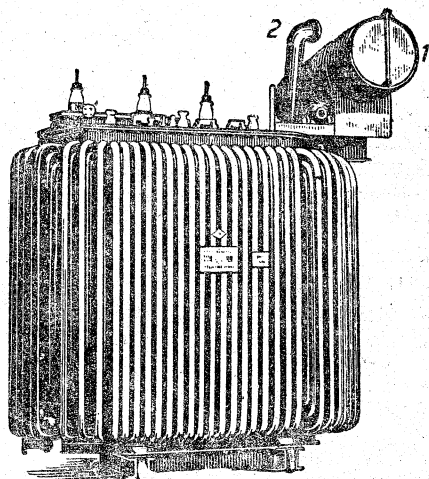


Рис. 13-33. Трансформатор с трубчатым баком.
1—расширитель; 2—выхлопная труба.

служат главным образом боковые поверхности бака, так как днище плохо отводит тепло, а на верхней крышке обычно установлены различные вспомогательные устройства. В трансформаторах до 20—30 ква достаточную поверхность охлаждения дает гладкий бак. Но с увеличением мощности необходимо увеличить поверхность охлаждения бака, что достигается применением трубчатых баков в трансформаторах мощностью до 15—20 000 ква (рис. 13-33). Дальнейшее усиление охлаждения достигается применением радиаторных баков, которые иногда снабжаются дутьевым охлаждением радиаторов.

Масло в баке трансформатора во время работы значительно нагревается и расширяется. При уменьшении же нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Следовательно, в баке трансформатора должно быть предусмотрено пространство для расширения масла.

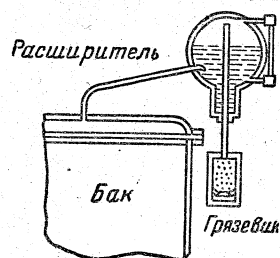


Рис. 13-34. Устройство расширителя.

Однако когда масло сжимается, внутрь бака проникает влажный воздух и отдает свою влагу весьма гигроскопичному маслу. При каждом новом остывании масла в бак проникают с воздухом все новые порции влаги. В результате на дне бака собирается слой воды, а пробивная прочность масла резко уменьшается. Наконец, кислород воздуха вызывает процессы окисления в масле, также снижающие его электрическую прочность.

Чтобы защитить масло от соприкосновения с воздухом, бак наполняется доверху, а в качестве резервуара для избытка масла служит расширитель (рис. 13-33 и 13-34) установленный на крышке трансформатора и соединенный с баком трубопроводом, который заканчивается в расширителе несколько выше его дна. Влага воздуха и осадки в большей своей части оседают на дно расширителя в грязевик, откуда периодически удаляются при помощи спускового крана. Расширитель снабжается маслоуказателем для наблюдения за уровнем масла и трубкой с отверстиями для всасывания и вытеснения воздуха. Поверхность соприкосновения масла с воздухом в расширителе значительно меньше, чем это было в баке, и, кроме того, масло здесь имеет более низкую температуру, поэтому окисляется значительно меньше.

Трансформаторы мощностью более 50 ква или с ВН более 6 кв обязательно снабжаются расширителем.

Для наблюдения за температурой верхних слоев масла (она не должна превышать 95° С) в верхнюю крышку бака вделывается термометр или трансформатор снабжается термометрическим сигнализатором.

Надзор за состоянием масла необходим ввиду того, что оно пожаро- и взрывоопасно. Если в результате ухудшения изолирующих свойств масла в баке произойдет пробой и образуется электрическая дуга, то масло загорается. Обильные газы, образующиеся при этом, могут сорвать крышку трансформатора, и горящее масло будет выброшено из бака. По этим причинам масляные трансформаторы устанавливаются в **особых** помещени-

ях с соблюдением специальных требований.

Для защиты от повреждений трансформаторы средней и большой мощности снабжаются газовым реле. Оно устанавливается в трубопроводе, соединяющем бак трансформатора с расширителем. При значительном выделении газов в баке реле автоматически выключает трансформатор, предупреждая развитие аварии.

Для предупреждения деформации бака у трансформаторов мощностью 1000 кВа и выше устраивается выхлопная труба (рис. 13-33), закрытая стеклянной пластинкой — мембраной. При образовании большого количества газов они выдавливают мембрану и выходят в атмосферу.

Для особо ответственных установок применяются трансформаторы с заполнением негорючей синтетической жидкостью — соволом или с заполнением кварцевым песком.

13-20. Измерительные трансформаторы

Непосредственное включение измерительных приборов в цепь высокого напряжения сделало бы эти приборы опасными для прикосновения, поэтому измерительные приборы и аппаратура автоматической защиты (реле) включаются во вторичную цепь измерительных трансформаторов, связанную с цепью высокого напряжения только через магнитный поток в сердечнике.

Кроме того, эти трансформаторы служат для расширения пределов измерения приборов переменного тока подобно добавочным сопротивлениям и шунтам. Применение измерительных трансформаторов с различными пределами измерения дает возможность пользоваться одними и теми же приборами со стандартными пределами измерения (100 в и 5 а) при измерении самых различных напряжений и токов путем включения этих приборов через измерительные трансформаторы с различными коэффициентами трансформации.

Для включения вольтметров, частотомеров и цепей напряжения измерительных приборов (ваттметров, счетчиков, фазометров) и реле применяются трансформаторы напряже-

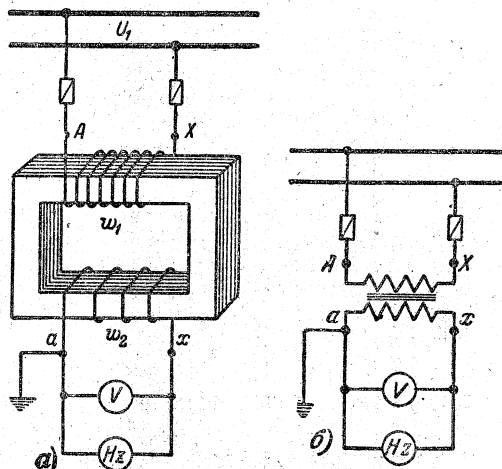


Рис. 13-35. Принципиальная схема устройства трансформатора напряжения и условное обозначение трансформатора напряжения.

ния. Для включения амперметров и цепей тока измерительных приборов и реле служат трансформаторы тока.

Принципиальная схема устройства трансформатора напряжения и его условное обозначение показаны на рис. 13-35. Такой трансформатор по устройству сходен с силовым трансформатором небольшой мощности. Его первичная обмотка, являющаяся вместе с тем обмоткой высшего напряжения с большим числом витков, включается под измеряемое напряжение U_1 , а вторичная обмотка — обмотка низшего напряжения — замыкается на вольтметр и цепи напряжения других приборов. Обмотки эти концентрические — обмотка ВН окружает обмотку НН, как в силовых трансформаторах. Все измерительные приборы соединяются между собой параллельно, для того чтобы на них воздействовало одно и то же вторичное напряжение трансформатора. Сопротивление вольтметра и цепей напряжения измерительных приборов относительно велико (порядка тысяч ом), вследствие чего трансформатор напряжения работает в условиях, близких к условиям холостого хода силового трансформатора. Благодаря этому внутренние падения напряжения $I_1 Z_1$ и $I_2 Z_2$ в его обмотках относительно весьма малы, что позволяет считать:

$$U_1 = -E_1 \text{ и } U_2 = E_2,$$

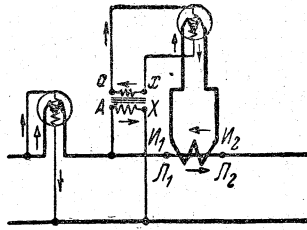


Рис. 13-36. Относительное направление токов в обмотках трансформатора и в приборе.

а так как $E_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} E_2$,

то, следовательно, напряжение

$$\dot{U}_1 = -\frac{\omega_1}{\omega_2} \dot{U}_2 = -k_{12} \dot{U}_2, \quad (13-33)$$

т. е. вторичное напряжение связано с первичным постоянным соотношением, равным коэффициенту трансформации, причем по фазе вторичное напряжение противоположно первичному. По отношению к измерительному прибору вторичное напряжение должно совпадать по фазе с первичным (рис. 13-36). Это достигается соответствующим соединением зажимов вторичной обмотки и прибора. Следовательно, соединение обмоток трансформатора напряжения делается согласно группе 12 (§ 13-13). Таким образом, трансформатор напряжения передает во вторичную цепь пропорционально измененное значение первичного высокого напряжения и его фазу. Это дает возможность на основании измерения низкого напряжения U_2 определять первичное высокое напряжение U_1 . Правильная передача фазы важна, конечно, не для вольтметра или частотомера, а для ваттметра и счетчика. Если вольтметр должен постоянно работать с определенным трансформатором напряжения, то на шкале такого вольтметра наносятся непосредственно значения первичного напряжения. Соответственно ваттметры и счетчики, предназначенные для постоянной работы при определенных коэффициентах трансформации измерительных трансформаторов, градуируются с учетом этих коэффициентов. Вторичное номинальное напряжение у всех трансформаторов напряжения имеет одно и то же стандартное значение 100 в.

В целях безопасности обслуживающего персонала один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора напряжения должны быть заземлены. Тем самым предупреждается возникновение высокого напряжения между измерительными приборами, присоединенными к трансформатору, и землей при повреждении изоляции между обмотками.

Отношение первичного напряжения ко вторичному было бы строго постоянным, если бы внутренние падения напряжения в трансформаторе были равны нулю. В действительности наличие этих внутренних падений напряжения вызывает некоторые неточности в передаче значения напряжения — погрешность напряжения и в передаче фазы — угловую погрешность.

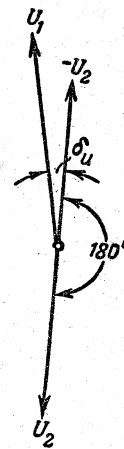


Рис. 13-37. Угловая погрешность (отрицательная) трансформатора напряжения.

Погрешность напряжения, выражаемая в процентах, есть погрешность в измерении первичного напряжения, отнесенная к действительному значению этого напряжения, иначе эту погрешность можно выразить как разность номинального $k_{12н}$ и действительного k_{12} коэффициентов трансформации, отнесенную к действительному коэффициенту трансформации:

$$f_U^0 / 0 = \frac{U_2 k_{12н} - U_1}{U_1} 100 = \frac{k_{12н} - k_{12}}{k_{12}} 100. \quad (13-34)$$

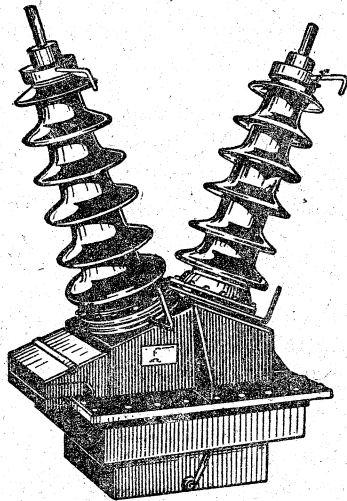


Рис. 13-38. Однофазный трансформатор напряжения.

Угловая погрешность определяется как угол δ_U между вектором первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения (рис. 13-37). Она считается положительной, если этот повернутый на 180° вектор вторичной величины опережает вектор первичной величины. Угловая погрешность измеряется в минутах.

Для напряжений до 6 кВ трансформаторы напряжения изготавливаются сухими, т. е. с естественным воздушным охлаждением, для напряжений от 6 кВ и выше применяются масляные трансформаторы напряжения (рис. 13-38). Трансформаторы напряжения изготавливаются также трехфазными.

Трансформатор тока со стороны первичной обмотки включается в линию последовательно (рис. 13-39), а его вторичная обмотка

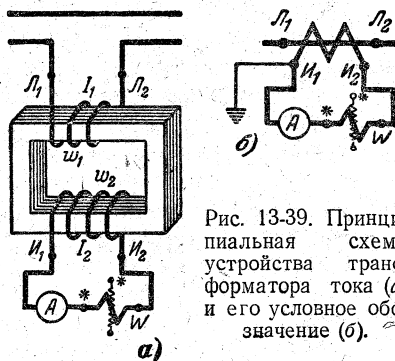


Рис. 13-39. Принципиальная схема устройства трансформатора тока (а) и его условное обозначение (б).

замыкается непосредственно на амперметр и цепи тока других измерительных приборов. Все эти приборы соединяются между собой последовательно, так как через них должен проходить один и тот же ток. Суммарное сопротивление амперметра и цепей тока измерительных приборов относительно мало (обычно меньше 1 ом), поэтому трансформатор тока работает в условиях, близких к условиям опыта короткого замыкания силового трансформатора. Напряжение вторичной обмотки трансформатора тока уравнивается падением напряжения в относительно малом сопротивлении измерительных приборов и соединительных проводов. Это величина порядка 1—6 в. Такому малому значению напряжения соответствуют малое значение э. д. с. E_2 , а следовательно, и малое значение потока в сердечнике трансформатора, так как

$$\Phi_m = \frac{E_2}{4,44f\omega_2}.$$

Для возбуждения такого потока нужна незначительная н. с. $I_0\omega_1$, поэтому в уравнении н. с. трансформатора тока

$$I_1\omega_1 = I_0\omega_1 + (-I_2\omega_2)$$

этой величиной можно пренебречь и считать:

$$I_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} I_2 = k_i I_2, \quad (13-35)$$

т. е. первичный ток может быть определен посредством умножения вторичного тока на постоянный коэффициент трансформации k_i . При правильном выборе зажимов ток в измерительных приборах совпадает по фазе с током в первичной цепи (рис. 13-36). Если амперметр предназначен для постоянной работы с определенным трансформатором тока, то на его шкале наносятся непосредственно значения первичного тока. Вторичный номинальный ток у всех трансформаторов тока имеет одно и то же стандартное значение 5 а (в некоторых специальных случаях 1 а).

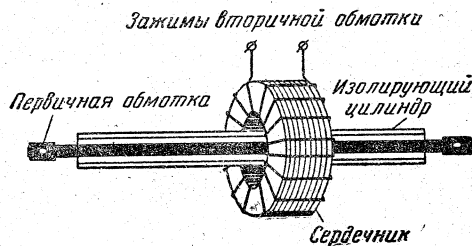


Рис. 13-40. Схема устройства одновиткового проходного трансформатора.

В целях безопасности один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора тока заземляются.

Отношение токов трансформатора постоянно постольку, поскольку можно пренебречь намагничивающей силой $I_0\omega_1$; в действительности вследствие ее влияния неизбежна некоторая неточность в передаче значения тока — погрешность тока, и неточность в передаче фазы — угловая погрешность δ_i . Обе эти величины определяются так же, как у трансформатора напряжения.

Особенности в работе трансформатора тока определяются тем, что у него независимой величиной является не первичное напряжение, как у трансформатора напряжения, а первичный ток I_1 . Этот ток в большинстве случаев во много раз больше вторичного тока I_2 , поэтому число витков первичной обмотки ω_1 невелико, во много раз меньше числа витков вторичной обмотки ω_2 . Для больших токов первичная обмотка выполняется в виде провода, продетого в окно стального сердечника (рис. 13-40). Напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора тока во много раз меньше его вторичного напряжения (так как $\omega_1 < \omega_2$), а так как последняя величина — порядка нескольких вольт, то первичное напряжение трансформатора тока часто имеет значение порядка сотых долей вольта.

Увеличивая сопротивление вторичной цепи трансформатора тока, мы почти не можем повлиять на I_1 , а вызываем лишь увеличение н. с. $I_0\omega_1$ и уменьшение $I_2\omega_2$, так как чем больше сопротивление вторичной цепи, тем больше должны быть э. д. с. E_2 и магнитный поток, ее наводящий. Но чем

больше $I_0\omega_1$, тем дальше мы отходим от основного условия точной работы трансформатора тока $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$. Поэтому у трансформаторов тока указывается то наибольшее сопротивление, на которое можно замыкать его вторичную обмотку, не выходя за пределы допустимых погрешностей. Это сопротивление тем меньше, чем выше точность трансформатора тока.

Чем меньше магнитное сопротивление, тем меньшая н. с. $I_0\omega_1$ требуется для возбуждения того же магнитного потока. По этой причине для точных трансформаторов тока применяются сердечники без стыков и сердечники из пермаллоя (в универсальных трансформаторах тока УТТ-5) (рис. 13-41).

Если во время работы трансформатора тока разомкнуть его вторичную обмотку, то вторичный ток I_2 станет равным нулю, а первичный ток I_1 не изменится, следовательно, весь первичный ток станет намагничивающим $I_1\omega_1 = I_0\omega_1$, а так как нормально $I_0\omega_1$ составляет примерно $1/2\%$ от $I_1\omega_1$, то такое многократное увеличение н. с. вызывает очень большое увеличение магнитного потока (ограниченное насыщением сердечника). Потери в стали приблизительно пропорциональны квадрату магнитного потока поэтому возрастание потока вызывает сильное нагревание стали сердечника, опасное для целостности изоляции, что в конечном итоге может повести к пробое изоляции и короткому замыканию на землю со стороны высокого напряжения.

Кроме того, э. д. с. E_2 пропорциональна потоку, и увеличение последнего при размыкании вторичной цепи вызывает появление во вторичной обмотке э. д. с. порядка сотен вольт — до 1,5 кВ у трансформаторов тока на большие токи. По этим причинам нельзя размыкать вторичную цепь работающего трансформатора тока.

Кроме требований точности, к трансформаторам тока часто предъявляются еще и требования устойчивости в отношении коротких замыканий, так как трансформатор тока находится на пути токов короткого замыкания и через него включаются аппараты защиты (реле), от-

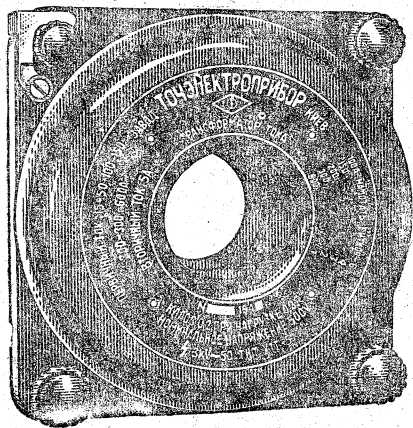
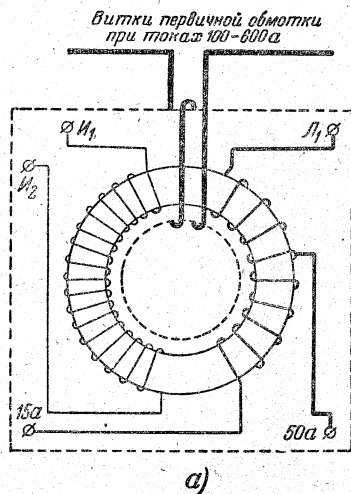


Рис. 13-41. Универсальный трансформатор тока УТТ-5.

а — схема; б — внешний вид.

ключающие установку в случае короткого замыкания.

Трансформаторы тока изготавливаются сухими с изоляцией из бакелизированной бумаги с керамической изоляцией (рис. 13-42) и главным образом для весьма высоких напряжений трансформаторы делаются масляными (рис. 13-42 и 13-43).

Для токов примерно до 50 а первичная обмотка трансформатора тока должна иметь несколько витков (катушечные трансформаторы), а для токов 500 а и больше применяются одновитковые проходные трансформаторы. Разновидностью проходных трансфор-

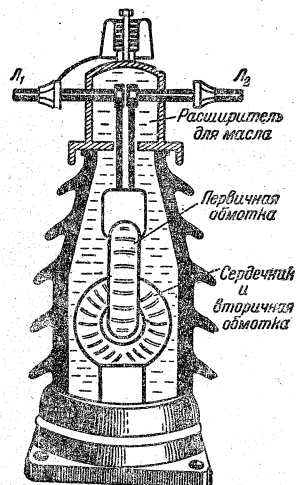


Рис. 13-42. Трансформатор тока масляный типа ТФН на 35 кВ (частичный разрез).

маторов тока являются измерительные клещи (рис. 13-44), применяемые для ориентировочных измерений токов от 20 до 1 000 а при низком напряжении. Магнитопровод клещей состоит из двух U-образных половинок, стягиваемых сильной пружиной. Магнитопровод изготовлен из листовой электротехнической стали, а два его стыка тщательно шлифованы.

Нажим на рукоятки позволяет раскрыть клещи и ввести в них провод, ток в котором нужно измерить. Этот

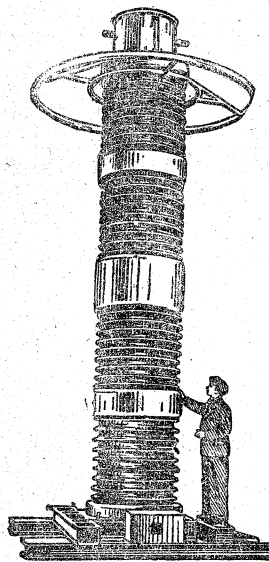


Рис. 13-43. Трансформатор тока на 400 кВ для Куйбышевской ГЭС.

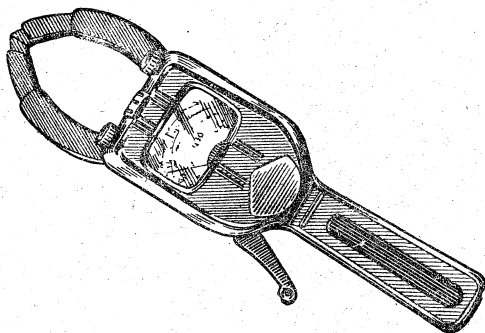


Рис. 13-44. Измерительные клещи.

провод служит первичной обмоткой. Вторичная обмотка трансформатора расположена на сердечнике и замкнута на амперметр, установленный на самих клещах.

По точности измерительные трансформаторы делятся на классы, определяемые в основном наибольшей допустимой погрешностью коэффициента трансформации. Например, для трансформатора напряжения класса точности 0,5 допустимая погрешность напряжения $\pm 0,5\%$ и допустимая угловая погрешность ± 20 мин при первичном напряжении 80—120% номинального; для трансформатора тока класса точности 1 допустимая погрешность тока $\pm 1,0\%$ и допустимая угловая погрешность ± 80 мин при вторичной нагрузке 25—100% номинальной и при первичном токе 20—100% номинального.

Правильное выполнение соединений измерительных трансформаторов с измерительными приборами требует соответствующей разметки зажимов трансформаторов. Зажимы трансформаторов напряжения обозначаются так же, как зажимы силовых транс-

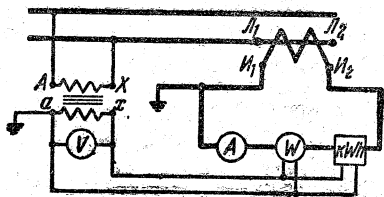


Рис. 13-45. Схема включения комплекта измерительных приборов через измерительные трансформаторы в однофазную цепь высокого напряжения.

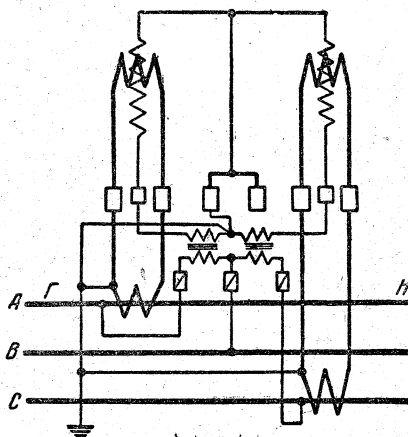


Рис. 13-46. Схема включения трехфазного трехпроводного счетчика через измерительные трансформаторы.

форматоров ($A - X$, $a - x$ и т. д.); у трансформаторов тока начало и конец первичной обмотки обозначаются соответственно L_1 и L_2 (линия), а начало и конец вторичной обмотки I_1 и I_2 (измерительный прибор).

Схема включений комплекта измерительных приборов через трансформаторы напряжения и тока для однофазной цепи дана на рис. 13-45. Для приборов трехфазного тока в установках без нулевого провода необходимы два трансформатора тока и два трансформатора напряжения (или один трехфазный трансформатор напряжения). На рис. 13-46 показана схема включения трехфазного счетчика в трехпроводную сеть.

Показания ваттметра (или счетчика), включенного через трансформаторы напряжения и тока, необходимо умножить на коэффициенты трансформации этих трансформаторов k_{12} и k_i , т. е. $P_1 = P_2 k_{12} k_i$. Погрешности измерительных трансформаторов соответственно сказываются на показаниях ваттметра, причем угловые погрешности оказывают существенное влияние на результаты главным образом при больших сдвигах фаз. Вследствие их влияния показания ваттметра пропорциональны не $\cos \varphi$, а $\cos (\varphi + \delta_U - \delta_i)$; при этом угловые погрешности складываются, так как обычно $\delta_U < 0$, а $\delta_i > 0$. Это может вызвать значительную положительную погрешность в показаниях ваттметра.

13-21. Магнитный усилитель

Усилителем (рис. 13-47) именуется устройство, посредством которого небольшая входная величина управляет значительно большей выходной величиной, получаемой за счет местного источника энергии. Магнитный усилитель (сокращенно МУ) является усилителем мощности (или тока), посредством которого небольшая мощность постоянного тока (или выпрямленного переменного) управляет значительно большей мощностью переменного тока. Коэффициент усиления МУ есть отношение изменения выходной мощности переменного тока к изменению входной мощности постоянного тока:

$$k_{МУ} = \frac{\Delta P_{\text{пос}}}{\Delta P_{\text{пер}}}$$

Простейшим МУ может служить дроссель насыщения — катушка со стальным сердечником, снабженная двумя обмотками. Одна, рабочая, обмотка включается последовательно с контролируемой нагрузкой R_H (рис. 13-48), а по второй, управляющей, обмотке пропускается постоянный ток, подмагничивающий сердечник катушки и таким путем изменяющий ее индуктивное сопротивление. Индуктивность катушки со стальным сердечником — величина непостоянная, но она пропорциональна магнитной проницаемости μ сердечника (см. § 5-4), а эта величина зависит от напряженности поля (см. § 4-2) и при значительной напряженности убывает с увеличением последней.

В рассматриваемой катушке н. с. постоянного тока, добавляясь к н. с. переменного тока, уменьшает индуктивное сопротивление катушки, а следовательно, увеличивает напряжение на зажимах нагрузки и мощность, потребляемую этой нагрузкой. Процесс

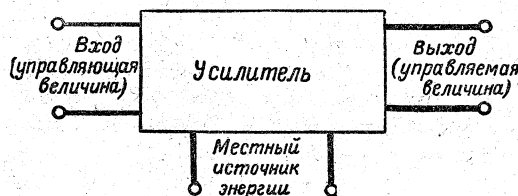
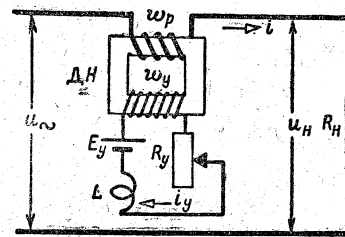


Рис. 13-47. Общая схема усилителя.

Рис. 13-48. Схема регулирования мощности тока нагрузки P_H посредством подмагничивания дросселя насыщения ДН.

этот довольно сложен, так как индуктивность изменяется в течение периода переменного тока, и управляемый переменный ток становится несинусоидальным. Однако наиболее существенным в этом процессе управления является вызываемый постоянным подмагничиванием периодический переход сердечника катушки в состояние магнитного насыщения.

Насыщение сердечника в процессе управления МУ является условием для получения значительного коэффициента усиления. По этой причине для сердечников МУ желательнее применение быстронасыщающихся магнитных сплавов с высокой начальной магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис. В частности, МУ снабжаются сердечниками из железоникелевых сплавов типа пермаллоев, у которых петля гистерезиса прямоугольна (рис. 13-49), а кривую намагничивания можно рассматривать как состоящую из двух прямолинейных участков: в пределах первого динамическая магнитная проницае-

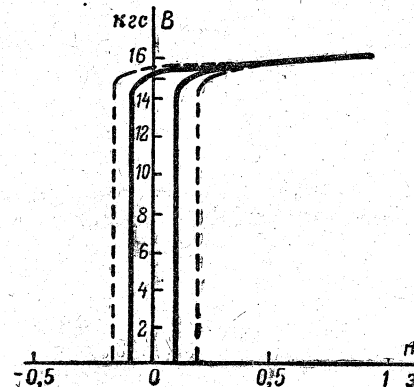


Рис. 13-49. Прямоугольная петля гистерезиса сплава типа пермаллоя.

Сплошная кривая снята при постоянном токе, пунктирная — при переменном токе промышленной частоты.

мость $\mu = \frac{\partial B}{\partial H}$ весьма велика, а в пределах второго практически равна нулю; соответственно в первом случае динамическая индуктивность $L_d = \frac{\partial \Phi}{\partial i}$ будет велика, а во втором равна нулю.

Пользуясь такой идеализацией кривой намагничивания сердечника, можно в первом приближении описать явления в цепи рис. 13-48 следующим образом. Цепь включена под синусоидальное переменное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, постоянный ток не включен, а так как в этих условиях намагничивающий ток катушки очень мал, то падение напряжения в активной нагрузке iR_n тоже очень мало и все напряжение источника можно считать приложенным к зажимам катушки. Пренебрегая малым намагничивающим током, можно считать, что катушка в этих условиях запирает цепь переменного тока в течение всего периода. Поскольку мы пренебрегаем потерями в катушке, постольку можем считать, что $u = -e = \omega_p \frac{d\Phi}{dt}$ и $\Phi = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ (см. рис. 10-2, § 10-2).

Теперь включим подмагничивающий постоянный ток и дадим его намагничивающей силе $I_y \omega_y$ такое значение, при котором пока она действует одна, поток в сердечнике еще не достигает значения, соответствующего насыщению. Но в условиях одновременного воздействия на сердечник постоянной и переменной намагничивающих сил при согласном их воздействии поток в сердечнике Φ , достигнув значения $\Phi_{нас}$, дальше уже увеличиваться не может и остается постоянным, пока согласное действие переменной и постоянной намагничивающих сил поддерживает сердечник в насыщенном состоянии (период насыщения).

В течение этой части периода, пока $\Phi = \Phi_{нас} = \text{const}$, э. д. с. в рабочей обмотке катушки не индуцируется, так как $e_p = -\omega_p \frac{d\Phi}{dt} = 0$, а следовательно, напряжение на зажимах катушки равно нулю.

Таким образом, при переходе сердечника в насыщенное состояние цепь переменного тока опирается и все напряжение u источника переменного тока оказывается приложенным к зажимам нагрузки. Этот переход происходит скачкообразно вследствие того, что кривая намагничивания материала сердечника близка к прямоугольной.

Если для упрощения считать, что нагрузка является чисто активным сопротивлением R_n , то во время насыщенного состояния сердечника мгновенное значение тока будет $i = \frac{u}{R_n}$ и, следовательно, кривая тока в течение этой части периода будет иметь такую же форму, как и кривая напряжения.

Рабочая цепь остается отпертой, пока суммарная намагничивающая сила переменного и постоянного токов достаточна для поддержания сердечника насыщенным. Но в дальнейшем, когда напряжение, понижаясь, стремится к нулю, переменный ток уже не может поддерживать сердечник насыщенным — поток убывает и его изменение индуцирует в рабочей обмотке значительную э. д. с. — рабочая цепь запирается и остается запертой (период возбуждения), пока поток в сердечнике не достигнет вновь значения насыщения.

Во время периода возбуждения в цепи проходит только относительно малый намагничивающий ток, но зато длительность периода возбуждения значительно больше длительности периода насыщения. Среднее значение рабочего тока за период должно быть равно нулю, так как напряжение источника электроэнергии переменного тока не содержит постоянной составляющей. Это легко пояснить. Ток в рабочей цепи создается совместным действием напряжения u и индуцированной э. д. с. $e = -\omega_p \frac{d\Phi}{dt}$, $i_p = \frac{u + e}{R_n} = \frac{u}{R_n} - \frac{\omega_p}{R_n} \frac{d\Phi}{dt}$.

Первая составляющая тока не содержит постоянной составляющей, так как u синусоидальная величина, а $\frac{d\Phi}{dt}$ не может содержать постоянной составляющей, так как Φ — периодиче-

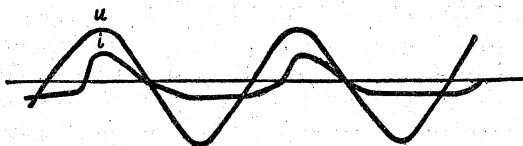


Рис. 13-50. Оциллограммы напряжения и рабочего тока установки типа рис. 13-49.

ская функция. На рис. 13-50 дана оциллограмма напряжения и рабочего тока в цепи типа рис. 13-48. Чем больше подмагничивающий постоянный ток, тем раньше наступает насыщение и тем длительнее его период. Кривая рабочего тока отнюдь несинусоидальна и несимметрична по отношению к оси ординат, а следовательно, содержит четные гармонические составляющие (см. § 9-2), которые создадут в управляемой рабочей цепи ряд нежелательных побочных явлений.

Простая схема рис. 13-48 обладает еще одним весьма существенным недостатком. Переменный ток катушки будет индуцировать в обмотке постоянного тока значительную переменную э. д. с., как это имеет место во вторичной обмотке трансформатора. Для защиты цепи постоянного тока от возникновения в ней значительного переменного тока в схеме рис. 13-48 предусмотрена большая постоянная индуктивность L . Но в подобной индуктивности неизбежны существенные потери энергии, а ее э. д. с. самоиндукции будет задерживать изменения управляющего постоянного тока, следовательно, сделает управление весьма инерционным.

Чтобы компенсировать эту нежелательную переменную э. д. с. в цепи управления, МУ снабжаются двумя одинаковыми сердечниками, на каждом из которых намотано по одной рабочей обмотке w_p переменного тока и управляющей обмотке w_y постоянного тока. Таким образом МУ составляется из двух дросселей насыщения — ДН. Рабочие обмотки этих ДН могут быть соединены между собой последовательно (рис. 13-51) или параллельно. Но управляющие обмотки должны быть соединены между собой так, чтобы э. д. с., индуцируемые в них основной волной переменного

тока, были противоположны по фазе и взаимно компенсировались. Пока сердечники не подмагничиваются постоянным током, напряжение u источника энергии делится между ними поровну и в их сердечниках возникают синусоидально изменяющиеся магнитные потоки Φ_a и Φ_b , причем параметры МУ выбираются так, чтобы амплитуда потока $\Phi_m = \frac{U_m}{2.4 \cdot 44 f w_p}$ была меньше

значения потока насыщения $\Phi_{нас}$. Так как намагничивающий ток катушек весьма мал, то в этих условиях цепь переменного тока заперта, а переменные э. д. с., индуцируемые в двух управляющих обмотках, взаимно компенсируются. Это период возбуждения.

При наличии постоянного подмагничивания в течение одной половины периода переменного тока намагничивающая сила переменного тока $i_p w_p$ в сердечнике a складывается с намагничивающей силой постоянного тока $I_y w_y$, а в сердечнике b эти намагничивающие силы имеют противоположное направление. В течение второй половины периода имеют место обратные соотношения; намагничивающие силы складываются в сердечнике b и ослабляют одно другую в сердечнике a . Пока результирующий поток Φ_a в сердечнике a не достигнет значения насыщения, в обмотке переменного тока будет индуцироваться значительная э. д. с. и цепь будет заперта, но когда в некоторый момент $\alpha = \omega t_1$ (рис. 13-52) поток Φ_a достигнет значения насыщения, тогда дальнейшее изменение потока в сердечнике a прекратится и напряжение на его зажимах упадет до нуля.

Но в это самое время сердечник дросселя b не насыщен и, казалось бы, этот второй дроссель должен был бы представлять собой большое индук-

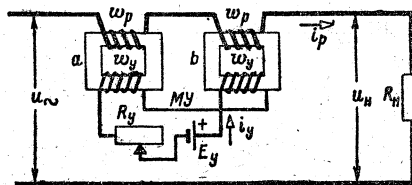


Рис. 13-51. Схема магнитного усилителя с последовательным соединением рабочих обмоток

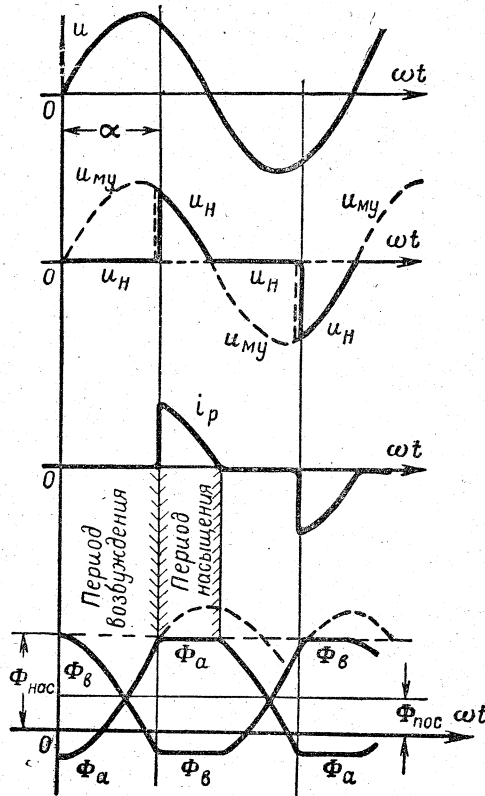


Рис. 13-52. Кривые мгновенных значений: напряжения источника u , частичных напряжений u_{μ} — магнитного усилителя и u_n — нагрузки рабочего тока i_p и потоков в сердечниках усилителя, соединенного по схеме рис. 13-51.

тивное сопротивление в цепи рабочего тока. В действительности же индуктивное сопротивление дросселя b весьма мало вследствие того, что его обмотка управления замкнута непосредственно на обмотку управления дросселя a и сопротивление источника постоянного тока, а так как это сопротивление относительно мало, а переменная э. д. с. в первой обмотке управления не индуцируется, то вторая обмотка управления оказывается практически почти замкнутой накоротко. Следовательно, дроссель b оказывается в условиях, соответствующих режиму короткого замыкания трансформатора (см. § 13-8 и 13-9). В таких условиях трансформатор может быть замещен весьма малым эквивалентным сопротивлением. По существу режим дросселя b аналогичен

рабочему режиму трансформатора тока (см. § 13-20), а напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора тока весьма мало. Следовательно, с того момента, когда поток в сердечнике одного дросселя достигает значения насыщения, рабочая цепь отпирается вследствие того, что в рабочей обмотке первого дросселя э. д. с. не индуцируется и в то же время замыкается почти накоротко цепь управления второго дросселя, так как исчезает э. д. с., индуцируемая в обмотке управления первого дросселя. Период насыщения продолжается до тех пор, пока к концу полупериода понижение синусоидального напряжения u источника уменьшит рабочий ток настолько, что насыщение сердечника первого дросселя прекратится — поток в его сердечнике начнет изменяться и в обеих его обмотках индуцируются э. д. с., а это прекратит и режим короткого замыкания второго дросселя. Таким путем дроссели МУ перейдут к периоду возбуждения. Их индуктивное сопротивление станет большим и рабочая цепь переменного тока запретится, так как в ней будет проходить только малый намагничивающий ток МУ. В течение второй половины периода процесс отпираания цепи повторится с той только разницей, что дроссели, составляющие МУ, поменяются ролями. Таким образом, кривая рабочего тока будет симметрична по отношению к оси абсцисс и, следовательно, не будет содержать четных гармонических составляющих. Изменения управляющего постоянного тока изменяют момент перехода от режима возбуждения к режиму насыщения и таким путем изменяют действующее значение I рабочего переменного тока. Зависимость этого значения от значения тока управления именуется характеристикой управления (иначе нагрузочной характеристикой) МУ. Она может быть сделана почти прямолинейной (рис. 13-53). Эта характеристика пересекает ось ординат, так как при разомкнутой цепи управления $I_y=0$ в рабочей цепи проходит малый ток возбуждения дросселей. Верхний предел регулирования достигается, когда постоян-

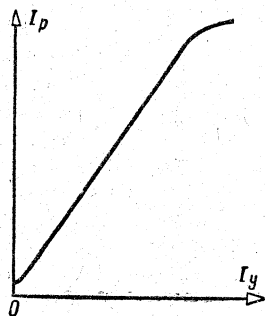


Рис. 13-53. Характеристика управления (нагрузочная характеристика) магнитного усилителя.

ное подмагничивание поддерживает сердечники насыщенными в течение всего периода переменного тока. Этим предельным условиям соответствует наибольшее действующее значение рабочего тока $I_{p. \text{наиб}} = \frac{U}{R_H}$ (для случая безреактивной нагрузки).

Практически это предельное значение будет меньше из-за того, что сопротивление насыщенного МУ не равно нулю.

Как показывает описание рабочего процесса МУ, регулирование посредством подмагничивания постоянным током изменяет относительную длительность отпираания управляемой цепи в течение периода переменного тока. В этом отношении управление посредством МУ сходно с управлением посредством ионного прибора тиратрона (см. § 17-11).

Рассмотрим теперь некоторые особенности работы цепи управления МУ. Во время периода насыщения в обмотке управления насыщенного дросселя э. д. с. не индуцируется, так как поток этого дросселя не меняется во времени, но сердечник второго дросселя не насыщен. Поток в нем мал по величине, но меняется во времени при изменении рабочего тока и, следовательно, в обмотке управления второго дросселя индуцируется некоторая переменная э. д. с. Ток, создаваемый ею в цепи управления, проще всего определить, исходя из того, что режим второго дросселя аналогичен режиму трансформатора тока. Уравнение намагничивающих сил трансформатора (13-8) может быть применено и для

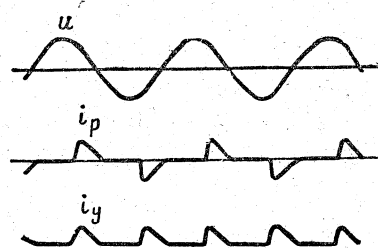


Рис. 13-54. Напряжения, рабочего тока и тока управления магнитного усилителя при режиме со свободными вторыми гармоническими.

мгновенных значений переменных составляющих токов в обмотках второго дросселя

$$i_p \omega_p + i_y \omega_y = i_{10} \omega_p,$$

а так как дроссель работает в режиме трансформатора тока (см. § 13-20), то можно принять, что результирующая намагничивающая сила $i_{10} \omega_p \approx 0$, на основании чего — $i_y \omega_y = i_p \omega_p$. Следовательно, в цепи управления индуцируется переменный ток с той же формой кривой мгновенных значений, как и кривой переменного рабочего тока. Но этот ток индуцируется половину периода потоком одного дросселя, а половину периода — потоком второго дросселя. Обмотки управления дросселей включены друг другу навстречу, вследствие чего импульсы тока, индуцируемые ими в обмотках управления, имеют одинаковое направление (рис. 13-54). Таким образом, в обмотке управления возникает переменный ток, частота которого в 2 раза больше частоты рабочей цепи МУ. Это ток второй гармонической, в соответствии с чем рассмотренный рабочий режим МУ именуется режимом со свободными вторыми гармоническими.

Рабочие обмотки МУ могут быть соединены параллельно (рис. 13-55). В этом случае, рабочий процесс будет сходен с вышеописанным. Когда сердечник одного дросселя будет насыщаться, тогда второй дроссель будет оказываться в режиме трансформатора тока; поэтому во время периода насыщения рабочий ток будет проходить через обмотки обоих дросселей. Как схематически показано на рис. 13-55, обмотка постоянного тока МУ обычно делается общей для обоих сердечни-

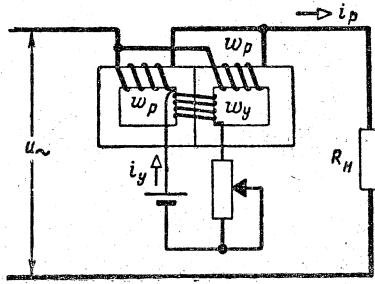


Рис. 13-55. Схема магнитного усилителя с параллельным соединением рабочих обмоток.

ков. Замена двух сердечников одним трехстержневым (подобным сердечнику трехфазного трансформатора рис. 13-19) допускается только в тех случаях, когда для процесса управления несущественны явления гистерезиса в среднем стержне, через который переменные потоки не замыкаются.

Для улучшения характеристик МУ его сердечники часто изготавливаются в виде тороидов из специальных материалов и снабжаются несколькими вспомогательными обмотками (обратной связи и др.).

Область применения МУ исключительно обширна и быстро расширяется. МУ применяются в проволочной телеграфии и телефонии, в радиосвязи, для управления электродвигателями, для регулирования освещения, для управления электрическими печами и т. д. Часто МУ устанавливаются на выходе электронных или полупроводниковых усилителей, когда выходная мощность последних недостаточна для приведения в действие исполнительных механизмов (гл. 18), или же на входе электромашинных усилителей (§ 15-20).

Преимуществами МУ являются практически неограниченный срок службы, отсутствие движущихся частей, прочность, дешевизна и немедленная готовность к работе. Однако искажения при усилении в них еще весьма значительны и хотя выглядят МУ очень просто, но теория их внутренних процессов весьма сложна. В данном параграфе изложены только общие простейшие положения этой теории.

13-22. Лабораторная работа.

Однофазный трансформатор

Опыт холостого хода. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 13-56. При включении трансформатора под напряжение может иметь место сильный толчок тока, обусловленный тем, что синусоидальный магнитный поток в сердечнике устанавливается не сразу, а после переходного процесса, длящегося несколько секунд. Поэтому, чтобы последовательная обмотка ваттметра W и амперметр A не пострадали от толчка тока при включении, их следует замыкать накоротко при помощи ключей K перед включением трансформатора под напряжение. Затем для измерения эти ключи нужно разомкнуть.

Вольтметр во вторичной цепи снабжен ключом K_v . При измерении мощности холостого хода этот ключ должен быть разомкнут для того, чтобы мощность, потребляемая вольтметром, не учитывалась ваттметром.

Кроме определения потерь в стали $P_{ст}$, опыт холостого хода используется для определения коэффициента трансформации. При холостом ходе внутренние потери напряжения в обмотках трансформатора незначительны, поэтому практически можно считать, что $U_{10} = E_1$ и $U_{20} = E_2$ (§ 13-3), следовательно,

$$\frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{w_1}{w_2} = k_{12}$$

коэффициенту трансформации. Чтобы измерить U_{20} , нужно, конечно, замкнуть ключ K_v .

Опыт короткого замыкания. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 13-57. Здесь Z_p — регулируемая реактивная катушка с подвижным сердечником, служит для понижения напряжения на первичных зажимах трансформатора до небольшой величины, требуемой условиями опыта короткого замыкания. Перед включением цепи под напряжение следует ввести полностью стальной сердечник в катушку Z_p , что будет соответствовать максимальному полному сопротивлению этой катушки. Затем, включив ток, нужно постепенно выводить сердечник, пока в первичной обмотке трансформатора не установится ток I_1 , равный номинальному.

При этих условиях следует записать показание ваттметра W . Этот ваттметр включен через трансформатор тока, поэтому мощность $P_{ик}$, потребляемая трансформатором, определяется путем умножения мощности, измерен-

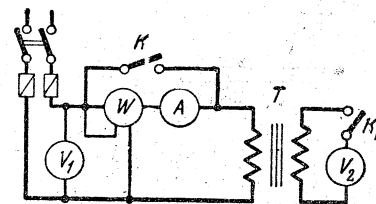


Рис. 13-56. Схема лабораторного опыта холостого хода трансформатора.

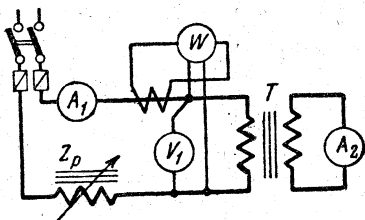


Рис. 13-57. Схема лабораторного опыта короткого замыкания трансформатора.

ной ваттметром, на коэффициент трансформации k_i трансформатора тока:

$$P_{1к} = P_{измер} k_i.$$

На основании опытов холостого хода и короткого замыкания нужно подсчитать к. п. д. трансформатора.

Опыт измерения омического сопротивления обмоток. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 13-58.

Включив постоянный ток, следует измерить сначала R_1 , затем R_2 на основании показаний вольтметра и амперметра. Так как обмотки нагреваются током, то эти сопротивления несколько возрастают с увеличением тока.

Следует произвести измерение R_1 и R_2 при нескольких значениях тока, а затем подсчитать по формуле (13-60) к. п. д. трансформатора при этих значениях.

Опыт нагрузки. Этот опыт служит для того, чтобы наглядно проследить взаимную зависимость вторичной и первичной цепей трансформатора.

Согласно схеме рис. 13-59 нагрузкой трансформаторов служит чисто активное сопротивление R_H , поэтому вторичная мощность в условиях данного опыта будет $P_2 = U_2 I_2$.

Однако в первичной цепи из-за намагничивающего тока $\cos \varphi < 1$; его следует определять по показаниям приборов:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

Начав с холостого хода, следует постепенно увеличивать нагрузку трансформатора до номинального значения токов. При этом, чем больше будет нагрузка, тем (вследствие U_1 ; U_2 больше напряжений) больше будет отношение

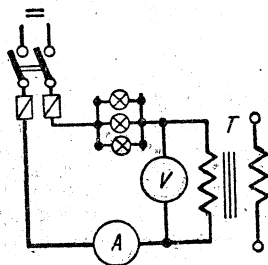


Рис. 13-58. Схема опыта измерения омического сопротивления обмоток трансформатора.

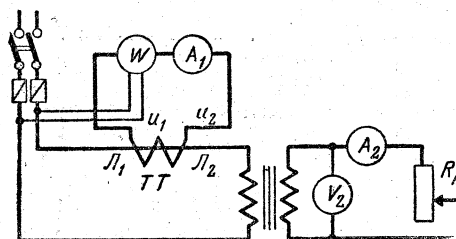


Рис. 13-59. Схема опыта нагрузки трансформатора.

оно будет больше, чем k_{12} (коэффициент трансформации).

Обратно отношение токов $I_2 : I_1$ с увеличением нагрузки будет приближаться к значению k_{12} .

Следует сопоставить определенное из этого опыта отношение $\frac{P_2}{P_1} = \eta$ с к. п. д., подсчитанным на основании опытов холостого хода и короткого замыкания.

План работы

А. Опыт холостого хода

1. Выполнить соединения рис. 13-57 и, не включая вольтметр V_2 , определить потери холостого хода и $\cos \varphi_0$.
2. По показаниям вольтметров V_1 и V_2 определить коэффициент трансформации k_{12} .

Таблица опыта холостого хода

Наблюдено			Вычислено	
U_1	I_{10}	P_{10}	$\cos \varphi_{10}$	k_{12}

Б. Опыт короткого замыкания

3. Выполнить соединения рис. 13-57, ввести полностью сердечник в реактивную катушку Z_p . Включить трансформатор под напряжение и, регулируя Z_p , установить I_1 , равный номинальному. Записать показания приборов согласно таблице.

Таблица опыта короткого замыкания трансформатора

Наблюдено				Вычислено	
$U_{1к}$	I_1	$P_{1к}$	I_2	$\cos \varphi_{1к}$	$I_2 : I_1$

4. Определить коэффициент полезного действия трансформатора.

В. Опыт измерения омического сопротивления обмоток

5. Выполнить соединения рис. 13-59. Включить цепь под постоянное напряжение и измерить сначала R_1 , затем R_2 при нескольких значениях тока.

Таблица опыта: измерение омического сопротивления обмоток трансформатора

Наблюдено		Вычислено		Наблюдено		Вычислено	
U	I	R_1		U	I	R_2	

6. На основании результатов измерений п. 5 подсчитать к. п. д. η трансформатора, соответствующий различным значениям тока, и построить кривую зависимости η от нагрузки.

Г. Опыт нагрузки

7. Выполнить соединения согласно рис. 13-59. На время включения замкнуть амперметр и цепь тока ваттметра посредством соответствующих ключей для защиты приборов от толчка тока. Включить ненагруженный трансформатор под напряжение.

8. Постепенно нагружать трансформатор, пока ток I_1 не достигнет своего номинального значения. Записывать показания приборов согласно таблице.

Таблица опыта нагрузки трансформатора

Наблюдено					Вычислено			
U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	$\cos \varphi_1$	$U_1 : U_2$	$I_2 : I_1$	η

9. Построить кривые зависимости от P_2 вторичного напряжения U_2 , $\cos \varphi_1$ и η .

13-23. Лабораторная работа

Трехфазный трансформатор

Требуется разметить 12 зажимов обмоток трехфазного трансформатора. Сначала нужно произвольно обозначить два зажима одной из первичных обмоток как «начало» A и «конец» X . Чтобы определить «начало» (a) и «конец» (x) соответствующей вторичной обмотки, следует применить «способ баллистического толчка».

Трансформатор не преобразует постоянный ток, но при изменении этого тока в первичной обмотке во вторичной индуцируется соответствующая э. д. с., направление которой согласно принципу Ленца будет противоположно направлению тока в первичной обмотке при его увеличении, а при уменьшении первичного тока направление э. д. с. во вторичной обмотке будет совпадать с направлением этого тока. Указанное явление используется для разметки

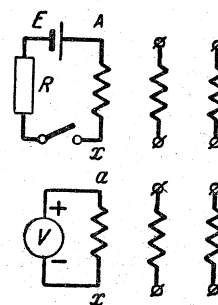


Рис. 13-60. Разметка зажимов трансформатора по способу баллистического толчка.

зажимов вторичной обмотки трансформатора следующим образом (рис. 13-60).

К зажимам первичной обмотки трансформатора через реостат R и ключ K присоединяется гальванический элемент или аккумулятор E , причем плюс этого источника тока соединяется с началом (A) первичной обмотки. Вторичная обмотка трансформатора замыкается на вольтметр постоянного тока магнитоэлектрической системы. Полярность зажимов $(+)$ и $(-)$ вольтметра присоединяется к зажимам вторичной обмотки трансформатора соответственно соединениям полюсов источника тока E , т. е. если плюс этого источника тока соединен с «началом» A первичной обмотки, то и плюс вольтметра должен быть соединен с предполагаемым «началом» a вторичной обмотки. Если зажимы вторичной обмотки выбраны правильно, то при замыкании ключа K под действием короткого толчка индуктированного тока стрелка вольтметра должна отклоняться в правильную сторону — по шкале, а при размыкании ключа K в обратную сторону — за нуль шкалы.

Выполнив разметку одной первичной и соответствующей вторичной обмотки, следует приступить к разметке остальных обмоток трансформатора. Нужно соединить последовательно первичную обмотку, у которой размечены зажимы, с другой первичной обмоткой, а к зажимам третьей первичной обмотки присоединить вольтметр (рис. 13-61). Если вольтметр покажет значительное напряжение, то, следовательно, конец (X) первой обмотки соединен с началом (B) второй обмотки, как это показано на рис. 13-61. Магнитные потоки двух обмоток в этом случае складываются в третьем сердечнике (рис. 13-62) и индуцируют в его обмотке соответствующую э. д. с. Если же показание вольтметра близко к нулю то это значит, что зажим X первой обмотки соединен с зажимом Y второй обмотки; при таком соединении магнитный поток в третьем сердечнике почти отсутствует. Таким путем определяются зажимы B и Y второй обмотки, после чего на ее место включается третья обмотка, а вольтметр присоединяется к зажимам второй обмотки и определяются зажимы C и Z . Подобным же образом размечаются зажимы вторичных обмоток b, y и c, z . Для определения числа витков обмоток нужно снабдить один из сердечников вспомогательной обмоткой с известным числом витков $\omega_{всп}$.

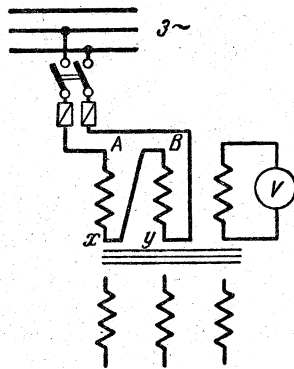


Рис. 13-61. Разметка зажимов трехфазного трансформатора.

При включении под напряжение U_1 соответствующей первичной обмотки во вспомогательной обмотке будет индуцироваться э. д. с.

$$E_{всп} = 4,44f\omega_{всп}\Phi_M$$

а во вторичной обмотке э. д. с.

$$E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_M$$

Обе эти э. д. с. можно измерить вольтметром (пренебрегая незначительной потерей напряжения в обмотке от тока вольтметра), что даст возможность определить:

$$\omega_2 = \frac{E_2}{E_{всп}} \omega_{всп}$$

Также, пренебрегая небольшой внутренней потерей напряжения первичной обмотки, измерив U_1 , можно считать, что

$$\omega_1 = \frac{U_1}{E_{всп}} \omega_{всп}$$

Закончив разметку зажимов всех обмоток трансформатора, следует поочередно осуществить четыре способа соединений обмоток (рис. 13-63) и в каждом случае, включив трансформатор под напряжение, измерить (на основании показаний вольтметров) отношение первичного и вторичного линейных напряжений.

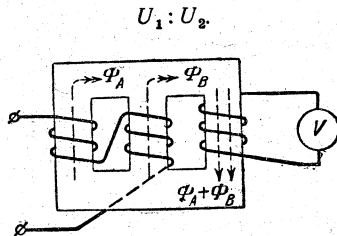


Рис. 13-62. Направление магнитных потоков в сердечнике трансформатора при соединении согласно схеме рис. 13-61.

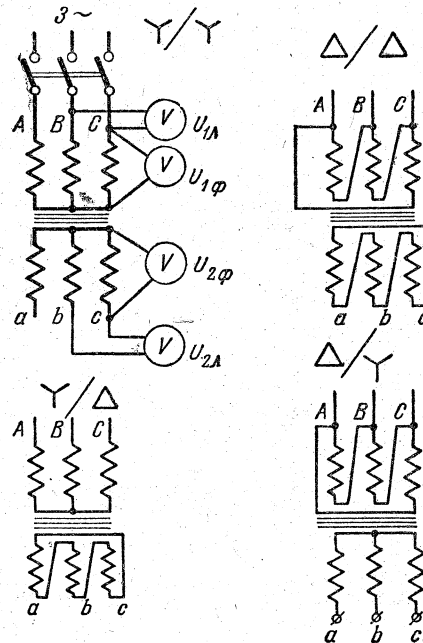


Рис. 13-63. Четыре способа соединения обмоток трехфазного трансформатора.

Эту величину затем следует сопоставить с отношением числа витков обмоток трансформатора.

П л а н р а б о т ы

1. Разметить по способу баллистического толчка зажимы A, X и a, x .
2. Разметить все зажимы первичных и вторичных обмоток.
3. При помощи вспомогательной обмотки определить ω_1 и ω_2 .
4. Осуществить последовательно четыре способа соединений обмоток трехфазного трансформатора (звезда/звезда, звезда/треугольник, треугольник/треугольник и треугольник/звезда). В каждом случае измерить линейные и фазовые напряжения на первичной и вторичной стороне трансформатора и найти их отношения согласно таблице опыта.

Таблица опыта: различные соединения обмоток трехфазного трансформатора

№ п/п.	Способ соединения	Наблюдено				Вычислено		
		$U_{1л}$	$U_{1ф}$	$U_{2л}$	$U_{2ф}$	$U_{1л}:U_{2л}$	$U_{1ф}:U_{2ф}$	
1	Y/Y							
2	Y/\Delta							
3	\Delta/\Delta							
4	\Delta/Y							

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

14-1. Устройство асинхронной машины

Электрические машины служат для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы) или же для обратного преобразования электрической энергии в механическую (двигатели). Простейшей по устройству и самой распространенной является асинхронная машина, изобретенная М. О. Доливо-Добровольским в 1888 г. Она основана на принципе воздействия вращающегося магнитного поля на короткозамкнутую обмотку (§ 8-8).

Магнитная система асинхронной машины состоит из двух сердечников: наружного неподвижного, имеющего форму полого цилиндра (рис. 14-1),

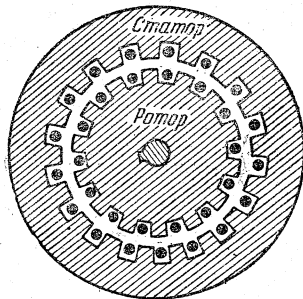


Рис. 14-1. Магнитная система асинхронной машины.

и внутреннего цилиндрического вращающегося сердечника. Оба они собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Эти листы для уменьшения потерь на вихревые токи изолированы друг от друга слоем лака.

Неподвижная часть машины называется статором, а вращающаяся — ротором¹.

В пазах с внутренней стороны статора уложена трехфазная обмотка, токи которой возбуждают вращающееся магнитное поле машины. В пазах ротора размещена вторая обмотка,

¹ От латинского stare — стоять и rotare — вращаться.

токи в которой индуцируются вращающимся магнитным полем. Сердечник статора заключен в массивный корпус, являющийся внешней частью машины, а сердечник ротора укреплен на валу (рис. 14-2 и 14-3).

Асинхронная машина, как и все электрические машины, обратима, т. е. она может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Тот или иной режим работы машины определяется скоростью ее вращающегося поля по отношению к ротору. Скорость вращения поля в пространстве (n_1 [об/мин]) прямо пропорциональна ω — угловой частоте переменного тока; по отношению же к ротору эта скорость меняется в зависимости от направления и скорости вращения (n_2 [об/мин]) самого ротора. Эта относительная скорость поля равна разности $n_1 - n_2$. Характерной величиной, определяющей рабочие условия асинхронной машины, является скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (14-1)$$

Оно положительно при работе машины в качестве двигателя и отрицательно при генераторном режиме.

Когда асинхронная машина работает двигателем, тогда ее обмотка ста-

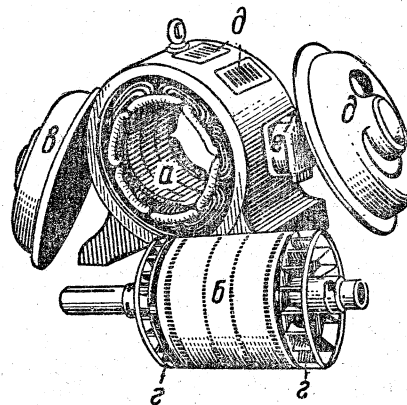


Рис. 14-2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде.

а — статор; б — ротор; в — подшипниковые щиты; г — вентиляторы; д — вентиляционные люки; е — коробка, прикрывающая зажимы.

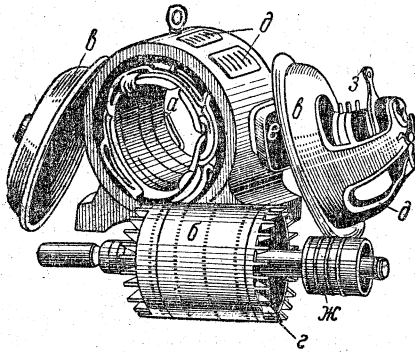


Рис. 14-3. Асинхронный двигатель с контактными кольцами в разобранном виде.

а — статор; б — ротор; в — подшипниковые щиты; г — вентилятор; д — вентиляционные люки; е — коробка, прикрывающая зажимы; ж — кольца; з — щеткодержатели и щетки.

тора является первичной, получающей энергию от сети трехфазного тока. Вращающееся магнитное поле, создаваемое в машине токами обмотки статора, индуцирует токи в замкнутой обмотке ротора. Взаимодействие последних с магнитным полем создает вращающий момент, что заставляет ротор следовать за полем и производить механическую работу. Но чем ближе скорость ротора n_2 к скорости вращающегося поля n_1 , тем меньше э. д. с., индуцируемые полем в роторе, а следовательно, и токи в роторе. Убывание токов уменьшает вращающий момент, действующий на ротор, поэтому ротор двигателя должен вращаться медленнее поля — асинхронно.

При увеличении механической нагрузки асинхронного двигателя тормозящий момент на валу становится больше вращающего и скольжение возрастает. Увеличение скольжения вызывает возрастание э. д. с. и токов в роторе, благодаря чему увеличивается вращающий момент и восстанавливается динамическое равновесие вращающего и тормозящего моментов. Таким путем увеличение нагрузки асинхронного двигателя вызывает увеличение его скольжения.

У современных нормальных асинхронных двигателей скольжение даже при полной нагрузке весьма невелико — около 4% у малых и около 1,5—2% у крупных двигателей.

Роторы асинхронных машин изготавливаются двух видов: короткозамкнутый

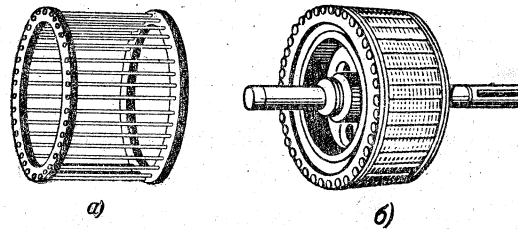


Рис. 14-4. Беличье колесо ротора (а) и короткозамкнутый ротор (б).

тые (рис. 14-2) и с контактными кольцами (рис. 14-3). Первые из них проще по устройству и чаще применяются. Обмотка такого ротора представляет собой цилиндрическую клетку — так называемое «беличье колесо» — из медных шин или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко на торцах двумя кольцами. Стержни этой обмотки вставляются без изоляции в пазы ротора (рис. 14-4). Применяется также способ заливки пазов ротора расплавленным алюминием с одновременной отливкой и замыкающих колец.

Ротор с контактными кольцами, называемый также фазным ротором, имеет обмотку, выполненную изолированным проводом (рис. 14-5), в большинстве случаев трехфазную, соединенную звездой. Свободные концы этой обмотки подведены к контактными кольцам на валу ротора. По кольцам скользят щетки, через которые обмотка ротора соединяется с трехфазным реостатом (рис. 14-6). Такое устройство дает возможность изменять активное сопротивление цепи ротора, что особенно важно при пуске двигателя.

Асинхронная машина подобна трансформатору в том отношении, что

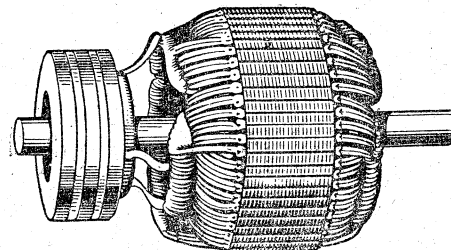
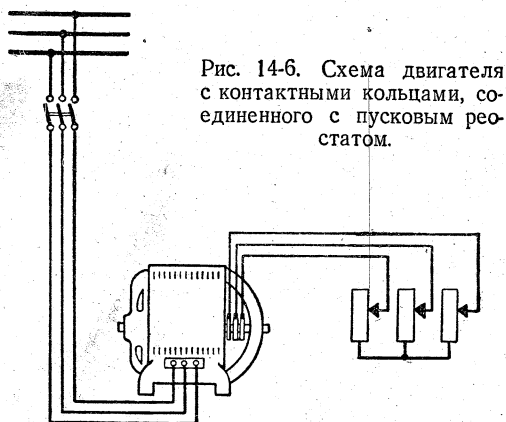


Рис. 14-5. Ротор с контактными кольцами (фазный ротор).



передача энергии от ее статорной (первичной) к роторной (вторичной) обмотке осуществляется лишь путем взаимоиндукции. По этой причине асинхронная машина иногда именуется также индукционной.

14-2. Вращающееся поле статора

В § 8-8 мы познакомились с вращающимся полем трехфазного тока. Подобное поле, создаваемое тремя катушками, имеет два полюса, почему оно и называется двухполюсным вращающимся полем.

За один период переменного тока двухполюсное магнитное поле делает один оборот, а следовательно, при стандартной частоте силовых установок (50 гц) это поле делает $50 \cdot 60 = 3000$ об/мин. Скорость вращения ротора немногим меньше этой синхронной скорости.

В тех случаях, когда требуется двигатель с меньшей скоростью, применяется многополюсная обмотка статора.

На рис. 14-7 показана схематически многополюсная обмотка, состоящая из девяти катушек.

Здесь расстояние между сторонами катушки уменьшено до $1/6$ окружности статора и таким путем получена шестиполусная обмотка, в которой на каждую фазу приходится по три катушки. Для ясности схемы на рис. 14-7 показаны соединения только первой фазы обмотки, причем соединения на задней стороне сердечника показаны пунктиром, а в каждой катушке показан только один виток.

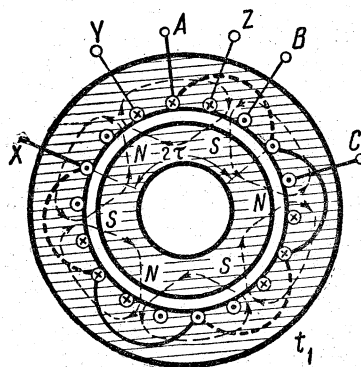


Рис. 14-7. Многополюсная обмотка статора.

Такая многополюсная обмотка создает в машине вращающееся поле, не проходящее через центр вращения, имеющее форму бегущей магнитной волны (§ 8-8).

В некоторый момент t_1 , когда ток первой фазы имеет амплитудное значение, токи в проводниках рассматриваемой обмотки будут иметь направления, показанные на рис. 14-7, в соответствии с чем распределится и магнитное поле машины. Силовые линии в трех местах входят в ротор и в трех местах выходят из него, образуя, таким образом, три пары полюсов ($p=3$). Каждой паре полюсов вращающегося магнитного поля соответствуют три катушки на окружности статора.

На рис. 14-8 показаны три момента t_2 , t_3 и t_4 положения поля в зависимости от изменения мгновенных значений токов трехфазной системы.

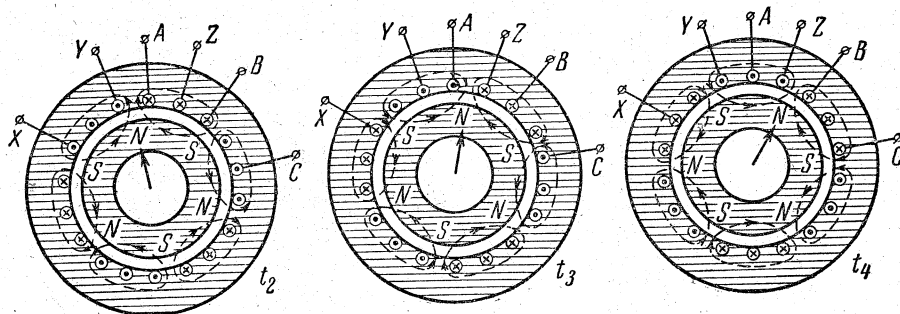
Часть внутренней окружности статора, соответствующая двум полюсам вращающегося поля и занятая тремя катушками трех фаз обмотки, называется двойным полюсным делением. Таким образом, полюсное деление машины

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}. \quad (14-2)$$

В общем случае, если поле имеет p пар полюсов, то его скорость вращения будет

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (14-3)$$

Повороту поля на одну пару полюсов соответствует изменение фазы э. д. с., им индуктируемой в проводни-



ках статора на 360° . Следовательно, окружности статора машины, имеющей $2p$ полюсов, соответствует $p \cdot 360$ электрических градусов, т. е. по отношению к окружности статора геометрическому углу β соответствует электрический угол α в p раз больший: $\alpha = p \cdot \beta$.

Направление вращения магнитного поля асинхронного двигателя определяется последовательностью фаз (A, B, C) трехфазной системы, питающей обмотку статора: изменение последовательности фаз меняет направление вращения магнитного поля машины, а следовательно, и направление вращения ротора.

Таким образом, для изменения направления вращения — реверсирования асинхронного двигателя — нужно лишь изменить соединения статора с сетью так, чтобы зажим статора, соединенный первоначально, например, с проводом A сети, был присоединен к проводу B и соответственно было бы изменено соединение второго зажима статора с сетью (соединить с A вместо B).

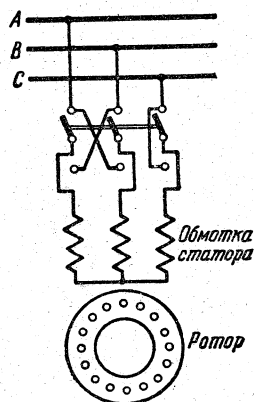


Рис. 14-9. Схема реверсирования асинхронного двигателя.

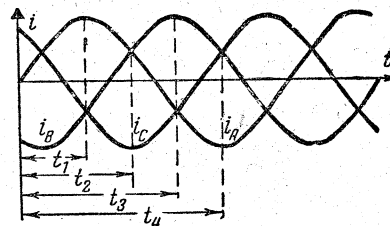


Рис. 14-8. Три момента положения вращающегося поля и соответствующие изменения токов трехфазной системы.

Такое изменение соединения для реверсирования двигателя может быть легко осуществлено посредством двухполюсного переключателя; удобнее, однако, пользоваться для этого трехполюсным переключателем (рис. 14-9), так как последний дает также возможность полностью отключать статор от сети.

14-3. Устройство обмоток статора и ротора

Обмотка статора должна быть устроена таким образом, чтобы возможно полное использовать окружность статора, получить наибольший поток при наименьшей «затрате» намагничивающей силы и достичь, по возможности, синусоидального распределения магнитного поля вдоль окружности статора.

Чтобы выполнить первое требование, целесообразно каждую из сторон катушек обмотки распределить в нескольких пазах. На рис. 14-10 изображена трехфазная двухполюсная обмотка, причем стороны катушек каждой фазы распределены в трех пазах. Таким путем каждая катушка (катушечная группа) делится на секции; на рис. 14-10 катушки обмотки состоят из трех секций. В свою очередь, каждая секция содержит несколько витков.

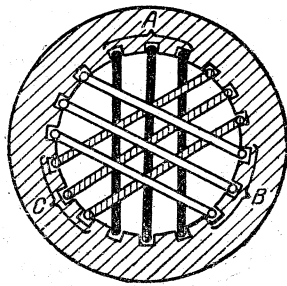


Рис. 14-10. Трехфазная двухполюсная обмотка статора $Q=9$, $q=3$.

На рис. 14-11 показана развернутая на плоскости катушечная группа, состоящая из трех секций, причем каждая секция состоит из трех витков.

На схемах обычно показывается не каждый проводник, а только стороны секций, которые на рис. 14-10 условно обозначены кружками.

Общее число пазов (или зубцов) на окружности статора обозначается через Z . Таким образом, в машине, имеющей $2p$ полюсов, на одно полюсное деление τ приходится $Q = \frac{Z}{2p}$ пазов. Каждое полюсное деление должно содержать пазы всех трех фаз обмотки; следовательно, число пазов на полюс и фазу трехфазной обмотки будет:

$$q = \frac{Q}{3} = \frac{Z}{6p}.$$

На рис. 14-10 число пазов на одно полюсное деление

$$Q = \frac{18}{2} = 9,$$

а число пазов на полюс и фазу $q=3$.

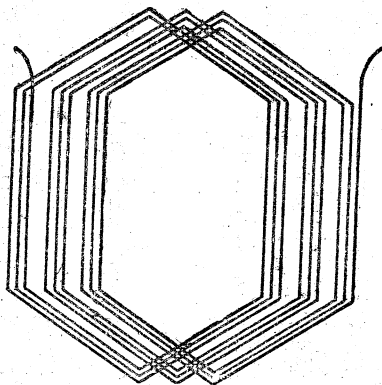


Рис. 14-11. Катушка, состоящая из трех секций; каждая секция состоит из трех витков.

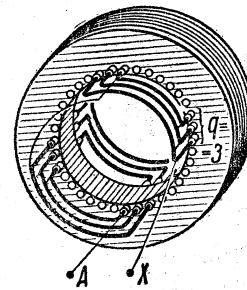


Рис. 14-12. Одна фаза обмотки четырехполюсной асинхронной машины.

В асинхронных машинах обычно берется от двух до пяти пазов на полюс и фазу.

На рис. 14-12 показано размещение в пазах статора обмотки одной фазы четырехполюсной машины, у которой $q=3$ — каждая катушечная группа здесь состоит из трех секций. Схема всех трех фаз этой же обмотки, развернутая на плоскости, показана на рис. 14-13. Проводники, соединяющие отдельные секции, здесь изображены более тонкими линиями.

При выполнении обмотки головки катушек на торцовых сторонах статора должны быть отогнуты в сторону, иначе нельзя было бы вставить или вынуть ротор (см., например, рис. 14-10). Эти отогнутые головки катушек образуют собой лобовые соединения обмотки (рис. 14-14). Так как лобовые соединения отдельных фаз перекрываются, то приходится располагать их в различных плоскостях, в силу чего лобовые соединения у одних катушек могут быть несколько длиннее, чем у других; на схе-

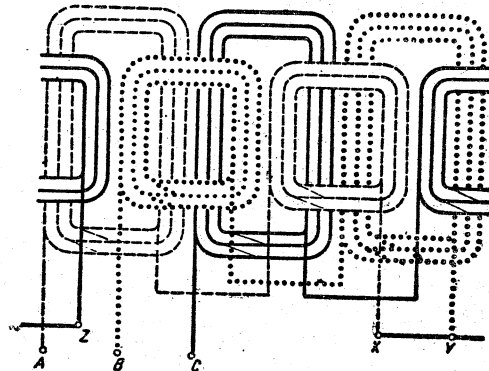


Рис. 14-13. Развернутая на плоскость схема обмотки всех трех фаз статора рис. 14-12.

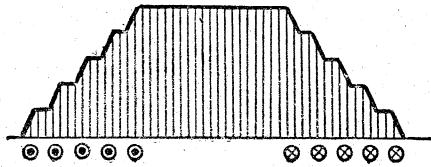


Рис. 14-17. Трапецевидная кривая магнитного поля распределенной обмотки статора.

Обмотка укрепляется в пазах при помощи деревянных клиньев, заложенных в верхнюю часть паза (рис. 14-16).

Обмотка ротора выполняется короткозамкнутой или фазной с контактными кольцами.

Магнитное поле статора возбуждается его обмоткой, размещенной в пазах, следовательно, распределенной вдоль внутренней окружности статора. Магнитное сопротивление вдоль этой окружности постоянно; влиянием магнитного насыщения можно пренебречь, так как большую часть магнитного сопротивления на пути магнитного потока представляет собой воздушный зазор между статором и ротором. При таких условиях можно считать индукцию и поток каждой фазы пропорциональными н. с. Но в пределах каждой фазы н. с. изменяется вдоль окружности статора.

В середине распределенной катушки индукция создается всеми витками катушки, а у края катушки индукция создается лишь одним внешним витком катушки. Если проследить изменение н. с. от края к середине катушки, то выявится ступенчатое распределение н. с., а следовательно, и ступенчатое изменение индукции вдоль окружности статора (рис. 14-17). При достаточном числе витков получается трапецевидная кривая. Если верхнее основание этой трапеции равно одной трети нижнего основания, то такая кривая близка к синусоиде. По этой причине в большинстве случаев можно считать магнитный поток статора распределенным практически синусоидально.

14-4. Обмоточный коэффициент

Каждая катушечная сторона обмотки обычно размещена в нескольких пазах, вследствие чего вращающееся

магнитное поле пересекает проводники катушки не одновременно и между э. д. с., индуцируемыми в этих проводниках, имеет место некоторый сдвиг фаз. Величина этого сдвига фаз зависит от числа пар полюсов p и числа пазов Z . Сдвиг фаз между э. д. с. в проводниках двух соседних пазов будет:

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}.$$

Вследствие сдвига фаз между э. д. с. отдельных витков катушки общая э. д. с. катушки E оказывается меньше произведения э. д. с. одного витка E' на число витков ω , т. е. $E < E'\omega$, так как э. д. с. витков складываются геометрически. Кроме того, если ширина витка меньше, чем полюсное деление τ , то э. д. с. двух проводников, составляющих виток, также не совпадают по фазе, и это в свою очередь вызывает уменьшение э. д. с. обмотки. При расчете э. д. с. обмотки оба эти обстоятельства учитываются посредством обмоточного коэффициента k . Этот коэффициент представляет собой отношение общей э. д. с. катушки к арифметической сумме э. д. с. всех составляющих ее проводников. Для обмоток асинхронных машин $k = 0,92 - 0,96$.

Подобные же условия имеют место для фазной обмотки ротора, где также э. д. с. отдельных витков катушек сдвинуты по фазе друг по отношению к другу.

14-5. Электродвижущие силы статора и ротора

Вращающееся магнитное поле индуцирует э. д. с. в каждой из трех обмоток статора; э. д. с., наводимая в одном витке обмотки, будет:

$$e' = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (14-4)$$

По отношению к этому витку поток вращающегося магнитного поля изменяется в пределах от $+\Phi$ до $-\Phi$. Здесь Φ — постоянный по величине результирующий поток вращающегося магнитного поля. Среднее значение э. д. с., наводимой в витке за полови-

ну периода, пока э. д. с. положительна, будет:

$$E'_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e' dt = - \frac{2}{T} \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = - \frac{4}{T} \Phi = 4f\Phi. \quad (14-5)$$

Оно не зависит от формы кривой распределения магнитного поля вдоль окружности машины. Отношение действующего значения к среднему именуется коэффициентом формы кривой k_Φ (для синусоиды $k_\Phi = 1,11$). Следовательно, действующее значение э. д. с. одного витка E' зависит от формы кривой поля, так как оно равняется произведению среднего значения э. д. с. E'_{cp} на k_Φ , т. е. $E' = E'_{cp} k_\Phi$, и действующая э. д. с., индуцируемая в одном витке обмотки статора, будет:

$$E' = 4k_\Phi f\Phi. \quad (14-16)$$

При синусоидальной форме кривой $k_\Phi = 1,11$; таким образом, в этом случае

$$E' = 4,44f\Phi. \quad (14-7)$$

Определяя э. д. с. обмотки, имеющей w_1 витков, мы должны ввести соответствующий обмоточный коэффициент $k_1 < 1$, для того чтобы учесть уменьшение э. д. с. вследствие геометрического сложения э. д. с. витков и уменьшения ширины витка; тогда э. д. с. одной фазы обмотки статора будет:

$$E_1 = E' k_1 w_1 = 4,44f w_1 k_1 \Phi. \quad (14-8)$$

Пока ротор неподвижен, его обмотка по отношению к вращающемуся полю находится в условиях, аналогичных статорной обмотке. Вращающееся поле делает n_1 [об/мин]; при этом p пар полюсов поля индуцирует в роторе э. д. с., частота которой

$$f = \frac{pn_1}{60}.$$

Таким образом, э. д. с. обмотки неподвижного ротора будет выра-

жаться уравнением, аналогичным уравнению э. д. с. статора, а именно

$$E_{2н} = 4,44f w_2 k_2 \Phi; \quad (14-9)$$

здесь w_2 и k_2 — число витков и обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Но когда сам ротор также вращается вслед за полем, тогда скорость вращающегося поля по отношению к ротору определяется только разностью скоростей вращения поля n_1 и ротора n_2 , следовательно, поле делает по отношению к ротору $n_1 - n_2$ [об/мин] и частота э. д. с. ротора уменьшается до значения

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}. \quad (14-10)$$

Эту частоту э. д. с. ротора легко выразить через частоту сети, так как

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)n_1}{60n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

или

$$f_2 = fs; \quad (14-11)$$

следовательно, частота э. д. с. ротора равна произведению частоты сети (статора) на скольжение.

Таким образом э. д. с. вращающегося ротора будет:

$$E_2 = 4,44f_2 w_2 k_2 \Phi$$

или

$$E_2 = 4,44fs w_2 k_2 \Phi = E_{2н} s, \quad (14-12)$$

т. е. произведению э. д. с. неподвижного ротора на скольжение. Конечно, это выражение справедливо и для неподвижного ротора, только в этом частном случае $s=1$.

14-6. Магнитные потоки асинхронной машины

Главный магнитный поток машины, который мы подразумевали во всех вышеприведенных уравнениях, представляет собой ту часть магнитного потока, которая сцепляется одновременно с витками статора и ротора. Однако, так же как и в трансформаторе, в асинхронной машине имеют место явления магнитного рассеяния. Часть силовых линий обмотки статора замыкается помимо ротора, образуя магнитный поток рассеяния статора

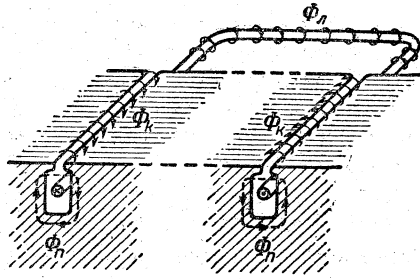


Рис. 14-18. Поток рассеяния обмотки машины складывается из потока рассеяния $\Phi_{п}$, линии которого замыкаются поперек паза, потока рассеяния $\Phi_{л}$, линии которого замыкаются вокруг лобовых частей обмотки, и потока рассеяния $\Phi_{к}$, линии которого замыкаются между коронками зубцов статора и ротора.

$\Phi_{р}$, а часть силовых линий обмотки ротора замыкается помимо статора, образуя поток рассеяния ротора $\Phi_{р2}$ (рис. 14-18).

Чем глубже проводники заложены в пазах и чем длиннее лобовые соединения, тем больше потоки рассеяния.

Оба потока рассеяния значительную часть своего пути проходят в воздухе, что позволяет считать их прямо пропорциональными по величине и совпадающими по фазе с соответствующими токами.

Каждый из потоков рассеяния наводит в соответствующей обмотке э. д. с. рассеяния ($E_{р1}$ и $E_{р2}$). Эти э. д. с. по фазе отстают от потоков, их индуктирующих, на четверть периода; мы можем выразить э. д. с. рассеяния через соответствующие токи и коэффициенты пропорциональности, имеющие размерность индуктивного сопротивления:

$$-E_{р1} = I_1 j X_1 = I_1 j \omega L_1$$

и

$$-E_{р2} = I_2 j X_2 = I_2 j \omega L_2 = I_2 j s \omega L_2;$$

здесь L_1 и L_2 — индуктивности рассеяния статора и ротора.

Ток любой фазы обмотки статора может быть выражен через э. д. с. и сопротивление, так же как и первичный ток трансформатора:

$$I_1 = \frac{U_1 + E_1 + E_{р1}}{R_1},$$

где U_1 — напряжение обмотки статора,

а R_1 — активное сопротивление этой обмотки.

Подставляя $-E_{р1} = I_1 j X_1$ и имея в виду, что $I_1 (R_1 + j X_1) = I_1 Z_1$, мы получим так называемое уравнение электрического равновесия

$$U_1 = I_1 Z_1 + (-E_1). \quad (14-13)$$

В первом приближении можно пренебречь падением напряжения $I_1 Z_1$ и принять, что $U_1 \approx E_1$, а так как $E_1 = \text{const } \Phi$ согласно уравнению (14-8), то

$$U_1 \approx \text{const } \Phi. \quad (14-14)$$

Напряжение U_1 — величина постоянная, следовательно, магнитный поток вращающегося поля можно приближенно считать также постоянным и не зависящим от нагрузки двигателя. Конечно, это справедливо при условии относительно небольшого падения напряжения в статоре $I_1 Z_1$, что наблюдается в машинах средней и большой мощности.

Магнитный поток машины Φ создается совместным действием н. с. статора и ротора; в обоих случаях необходимо учесть то обстоятельство, что обмотки размещены в нескольких пазах, вследствие чего н. с. отдельных секций обмоток не совпадают в пространстве. Чтобы учесть это, нужно ввести коэффициент, меньший единицы, приблизительно равный обмоточному коэффициенту k . Таким образом, н. с. трех обмоток статора будет пропорциональна $m_1 \omega_1 k_1 I_1$, а н. с. ротора пропорциональна $m_2 \omega_2 k_2 I_2$. Здесь m_1 (равное 3) — число фаз обмотки статора, а m_2 — число фаз обмотки ротора.

При неподвижном роторе н. с. статора и ротора складываются геометрически, образуя намагничивающую силу машины совершенно так же, как это происходит в трансформаторе, т. е.

$$m_1 \omega_1 k_1 I_1 + m_2 \omega_2 k_2 I_2 = m_1 \omega_1 k_1 I_0.$$

В данном случае частота токов статора и ротора одинакова и волны н. с., создаваемые ими, вращаются в пространстве с одинаковой скоростью, т. е. они неподвижны друг относительно друга и поэтому складываются геометрически.

При работе асинхронной машины проводники ротора, несущие ток I_2 , вращаются по отношению к неподвижным в пространстве проводникам статора. Рассмотрим теперь, как сказывается это вращение на соотношениях н. с. статора и ротора.

При вращении ротора частота тока статора не меняется, вследствие этого скорость вращения н. с. статора относительно проводников статора остается такой же, как и у неподвижного двигателя, равной n_1 .

С другой стороны, многофазная система токов ротора, проходя по проводникам последнего, создает собственное поле, вращающееся по отношению к самому ротору. Ток в роторе имеет частоту f_2 , следовательно, скорость вращения н. с. ротора по отношению к самому ротору будет:

$$n_{\text{отн}} = \frac{f_2 \cdot 60}{p}, \quad (14-15)$$

но сам ротор вращается в пространстве со скоростью n_2 , следовательно, н. с. ротора вращается в пространстве со скоростью

$$n_{\text{отн}} + n_2.$$

Заменяя в уравнении (14-15) частоту ротора

$$f_2 = fs = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60},$$

получим:

$$n_{\text{отн}} + n_2 = n_1 - n_2 + n_2 = n_1,$$

т. е. поле ротора вращается синхронно с полем статора, опережая при этом ротор, вращающийся асинхронно (медленнее поля статора).

По существу в асинхронной машине магнитное поле при передаче энергии служит таким же связующим звеном между обмотками статора и ротора, как и поле в трансформаторе при передаче энергии от первичной ко вторичной обмотке. Но поле асинхронной машины вращается в пространстве и вместе с ним бегут вдоль окружности с синхронной скоростью волны н. с. статора и ротора. По отношению друг к другу эти волны н. с. остаются неподвижными.

Это обстоятельство дает нам право складывать геометрически на диаграм-

ме н. с. ротора и н. с. статора так же, как мы это делали для неподвижного ротора. Следовательно, для вращающегося ротора будет также справедливо вышеприведенное уравнение магнитного равновесия

$$m_1 \omega_1 k_1 I_1 + m_2 \omega_2 k_2 I_2 = m_1 \omega_1 k_1 I_0 \quad (14-16)$$

Последнее мы можем преобразовать в уравнение тока статора

$$I_1 = I_2' + I_0. \quad (14-17)$$

Здесь

$$I_2' = -I_2 \frac{m_2 \omega_2 k_2}{m_1 \omega_1 k_1} \quad (14-18)$$

обозначает приведенный ток ротора, т. е. ту долю тока статора, которая уравнивает размагничивающее действие тока ротора.

Отметим, что ток I_0 не равен току холостого хода двигателя, так как при холостом ходе не равен нулю ток ротора. Чтобы сделать ток статора равным намагничивающему току, нужно осуществить режим идеального холостого хода: раскрутить ротор посредством внешнего двигателя до синхронной скорости.

14-7. Ток ротора

Спротивление ротора складывается из активного сопротивления R_2 и индуктивного $2\pi f_2 L_2$; следовательно, полное сопротивление ротора

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + (2\pi f_2 L_2)^2}.$$

Подставив

$$2\pi f_2 = s2\pi f = s\omega,$$

где ω — угловая частота сети, получим:

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}. \quad (14-19)$$

Мы можем считать R_2 и L_2 не зависящими от скольжения. Следовательно, полное сопротивление ротора z_2 должно значительно увеличиваться с ростом скольжения s за счет возрастания индуктивного сопротивления $s\omega L_2$.

По этой причине ток в обмотках ротора с увеличением скольжения уве-

личивается далеко не в такой мере, как э. д. с. ротора:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (14-20)$$

14-8. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Для построения диаграммы двигателя при неподвижном роторе мы можем, так же как для трансформатора, исходить из вектора главного магнитного потока Φ одного полюса вращающегося поля (рис. 4-19); по отношению к каждой из обмоток двигателя этот поток, как мы выяснили уже, эквивалентен синусоидальному переменному потоку.

Магнитный поток наводит в обмотках статора и неподвижного ротора э. д. с. E_1 и E_{2H} , отстающие от Φ по фазе на $1/4$ периода; э. д. с. E_{2H} , возникающая в обмотке неподвижного ротора, создает ток

$$I_2 = \frac{E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (14-21)$$

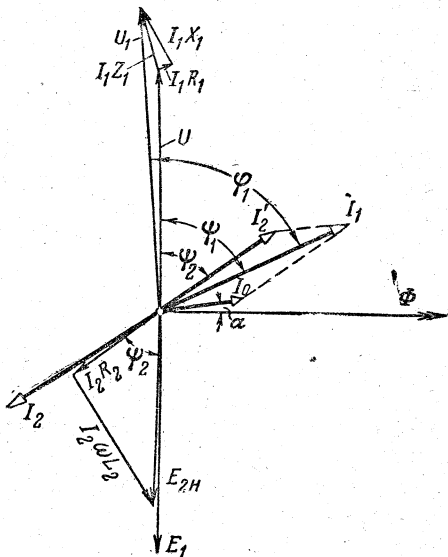


Рис. 14-19. Векторная диаграмма асинхронной машины при неподвижном роторе.

отстающий по фазе от E_{2H} на угол

$$\psi_2 = \arccos \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \quad (14-22)$$

э. д. с. ротора при этом будет складываться из активной составляющей $I_2 R_2$, совпадающей по фазе с I_2 , и реактивной составляющей $I_2 \omega L_2$, опережающей I_2 на $\frac{\pi}{2}$.

Вектор намагничивающего тока I_0 опережает вектор Φ на угол α вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов в стали.

Чтобы определить вектор тока статора I_1 обращаемся к уравнению (14-17), согласно которому

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2.$$

Напряжение статора

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{U} + \dot{I}_1 Z_1 \quad (14-23)$$

Мы откладываем вверх перпендикулярно к Φ вектор $\dot{U} = -\dot{E}_1$; он изображает слагающую напряжения, уравновешивающую ту э. д. с., которая наводится в обмотке статора вращающимся полем; к \dot{U} прибавляем вектор $\dot{I}_1 R_1$, параллельный \dot{I}_1 , и вектор $\dot{I}_1 X_1$, опережающий \dot{I}_1 на 90° .

Построенная нами векторная диаграмма неподвижного двигателя, по существу, тождественна диаграмме трансформатора при коротком замыкании вторичной обмотки.

Построение векторной диаграммы вращающегося двигателя затрудняется тем, что э. д. с. ротора E_2 имеет частоту f_2 , отличную от частоты статора.

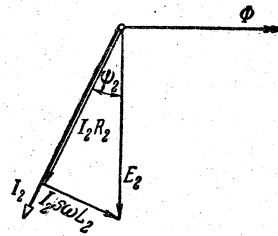


Рис. 14-20. Векторная диаграмма асинхронной машины при вращающемся роторе.

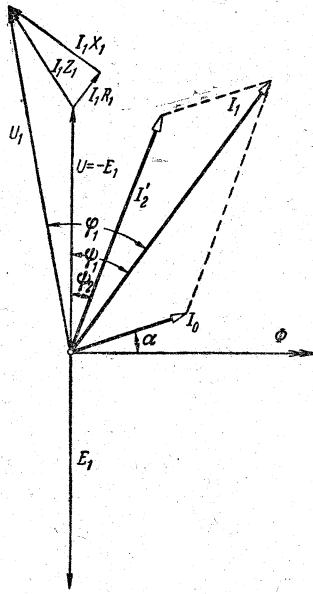


Рис. 14-21. Векторная диаграмма статора нагруженного асинхронного двигателя.

Векторная диаграмма должна строиться для синусоидальных величин одинаковой частоты, поэтому нужно строить отдельно векторные диаграммы для ротора (рис. 14-20) и для статора (рис. 14-21) машины. Для обеих диаграмм удобно принять в качестве исходного вектор магнитного потока Φ вращающегося поля. Поток Φ неизменен во времени, но вращается в пространстве и синусоидально распределен вдоль окружности статора и ротора. По отношению к обмотке вращающегося ротора он эквивалентен потоку, неподвижному по отношению к ротору, но изменяющемуся во времени синусоидально с частотой f_2 , а по отношению к обмотке статора — неподвижному потоку, изменяющемуся с частотой f .

В диаграмме ротора э. д. с. E_2 отстает по фазе от Φ на 90° . Ток ротора I_2 отстает от E_2 на угол $\psi_2 = \arctg \frac{s\omega L_2}{R_2}$.

Так как в рабочих условиях обычно $s = 0,02 \div 0,04$, то этот угол относительно мал. Вектор активной составляющей $E_{2a} = I_2 R_2$ совпадает по направлению с I_2 . Вектор $I_2 s \omega L_2$ опережает I_2 на 90° .

В диаграмме статора I_1' образует

с Φ угол $90^\circ - \psi_2$. В остальном диаграмма строится так же, как и для первичной обмотки трансформатора.

14-9. Трансформатор, эквивалентный работающему асинхронному двигателю

Можно построить общую векторную диаграмму для статора и ротора работающего асинхронного двигателя. Для этого условия двигателя привести к условиям эквивалентного трансформатора. Ток ротора будет:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\omega L_2)^2}}$$

Здесь простая операция деления числителя и знаменателя на s имеет глубокое значение для изучения работы двигателя; путем этого деления мы заменили небольшую э. д. с. E_2 , фактически наводящуюся в роторе, весьма значительной э. д. с. $E_{2н}$. Зато в знаменателе мы получили под корнем переменное активное сопротивление

$$\frac{R_2}{s} > R_2.$$

Уравнение (14-20) показывает, что ток во вращающемся роторе может быть определен исходя из э. д. с. неподвижного ротора при частоте f , однако в таком случае вместо действительного активного сопротивления обмотки ротора R_2 мы должны считать активным сопротивлением $\frac{R_2}{s}$.

Эту последнюю величину мы можем рассматривать как сумму активного сопротивления обмотки ротора R_2 и некоторого добавочного активного сопротивления R , положив:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R. \quad (14-24)$$

В таком случае соотношения в цепи ротора будут тождественны соотношениям во вторичной обмотке трансформатора, в которой наводится э. д. с. $E_{2н}$ и которая замкнута на активное сопротивление R (рис. 14-22).

Мы подменяем условия вращающегося ротора, в котором, помимо простой трансформации энергии, происходит преобразование электрической

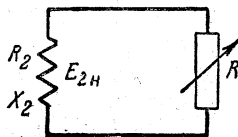


Рис. 14-22. Схема замещения вращающегося ротора.

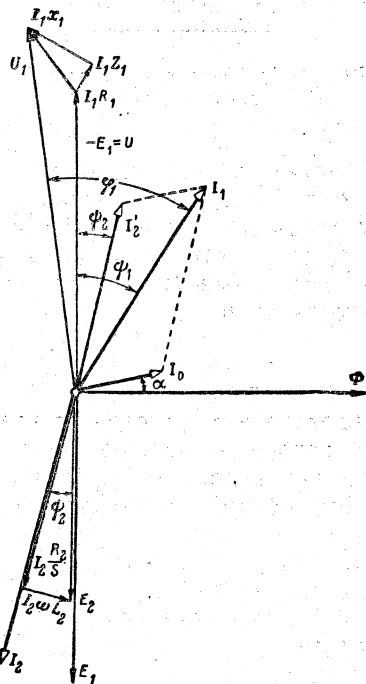


Рис. 14-23. Векторная диаграмма трансформатора, эквивалентного вращающемуся асинхронному двигателю.

энергии в механическую, условиями простой трансформации при неподвижном роторе.

Следовательно, полную векторную диаграмму для обеих цепей асинхронной машины мы можем построить лишь для фиктивных условий неподвижного ротора, замкнутого на сопротивление R . Такая диаграмма (рис. 14-23) строится так же, как и диаграмма неподвижного двигателя (рис. 14-19), и лишь составляющие E_{2H} теперь будут:

$$I_2 \omega L_2 \text{ и } I_2 \frac{R_2}{s}.$$

14-10. Энергетический баланс

Активная составляющая первичного напряжения машины согласно диа-

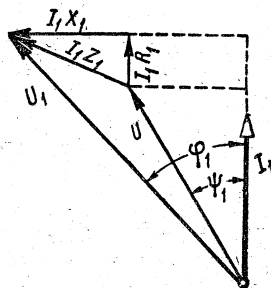


Рис. 14-24. Векторная диаграмма напряжений статора.

грамме (рис. 14-24) может быть выражена следующим образом:

$$U_1 \cos \varphi_1 = I_1 R_1 + U \cos \psi_1.$$

Умножив это уравнение на I_1 , мы получим выражение мощности, потребляемой одной фазой двигателя, через потери в меди обмотки и через мощность, передаваемую одной фазой вращающемуся полю:

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = I_1^2 R_1 + U I_1 \cos \psi_1; \quad (14-25)$$

заменяем далее $I_1 \cos \psi_1$ через соответствующие составляющие намагничивающего тока и приведенного тока ротора согласно диаграмме рис. 14-25:

$$I_1 \cos \psi_1 = I_0 \sin \alpha + I_2' \cos \psi_2,$$

следовательно,

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = I_1^2 R_1 + U I_0 \sin \alpha + U I_2' \cos \psi_2.$$

В последнем уравнении мощность, потребляемая двигателем на одну фазу, складывается из мощности, потребляемой в меди статора, мощности потерь в стали сердечника статора и мощности, передаваемой в одной фазе вращающимся полем ротору.

Потребление мощности всеми тремя ($m_1 = 3$) фазами двигателя будет:

$$3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3I_1^2 R_1 + 3U I_0 \sin \alpha + 3U I_2' \cos \psi_2; \quad (14-26)$$

согласно (14-18) приведенный ток ротора

$$I_2' = -I_2 \frac{m_2 \omega_2 k_2}{3\omega_1 k_1},$$

а так как

$$U = -E_1 = -E_{2н} \frac{\omega_1 k_1}{\omega_2 k_2},$$

то

$$3UI'_2 \cos \psi_2 = m_2 E_{2н} I_2 \cos \psi_2 = P_{вр}. \quad (14-27)$$

Это — электрическая мощность, передаваемая ротору вращающимся магнитным полем. Можно выразить э. д. с. неподвижного ротора $E_{2н}$ через э. д. с. вращающегося ротора

$$E_{2н} = \frac{E_2}{s},$$

а затем учесть, что $E_2 \cos \psi_2 = I_2 R_2$ (рис. 14-20); тогда получим уравнение мощности двигателя

$$3U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3I_1^2 R_1 + 3UI_0 \sin \alpha + \frac{m_2}{s} I_2^2 R_2. \quad (14-28)$$

Мощность вращающегося поля машины $P_{вр}$ значительно больше, чем мощность, теряемая в роторе на нагревание:

$$P_{м2} = m_2 I_2^2 R_2 = P_{вр} s; \quad (14-29)$$

разность этих мощностей представляет собой механическую мощность ротора

$$P_{мех} = P_{вр} - P_{м2} = (1-s) P_{вр} \quad (14-30)$$

или

$$\frac{P_{мех}}{P_{м2}} = \frac{1-s}{s},$$

т. е. чем больше скольжение, тем меньше механическая мощность и больше тепловые потери.

Обратимся теперь к вышерассмотренным соотношениям трансформатора, эквивалентного асинхронному двигателю (см. § 14-9). Воспользовавшись соотношением

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R,$$

на основании уравнений (14-29) и (14-30) получим, что

$$P_{мех} = (1-s) \frac{m_2}{s} I_2^2 R_2 = m_2 I_2^2 R, \quad (14-31)$$

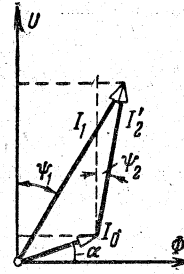


Рис. 14-25. Векторная диаграмма токов статора.

т. е. механическая мощность ротора может быть выражена через электрическую мощность, затрачиваемую в некотором сопротивлении R , включенном в цепь неподвижного ротора, причём это сопротивление

$$R = R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (14-32)$$

Следовательно, условия во вращающемся роторе в отношении баланса энергии эквивалентны условиям неподвижного ротора, замкнутого на сопротивление R ; тем самым со стороны энергетической подтверждается справедливость диаграммы рис. 14-23, построенной для эквивалентного трансформатора.

14-11. Вращающий момент

Угловая скорость вращения поля ω_p в p раз меньше угловой частоты переменного тока, т. е.

$$\omega_p = \frac{\omega}{p},$$

угловая скорость вращения ротора

$$\omega_r = \omega_p (1-s) = \frac{\omega(1-s)}{p}. \quad (14-33)$$

Механическая мощность равна произведению вращающего момента M на угловую скорость ротора; следовательно,

$$P_{мех} = \frac{\omega}{p} (1-s) M$$

и согласно (14-31)

$$\frac{\omega}{p} (1-s) M = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s),$$

откуда вращающий момент

$$M = \frac{m_2 p}{\omega s} I_2^2 R_2. \quad (14-34)$$

Мощность на валу P определится, если из механической мощности двигателя вычесть мощность, затрачиваемую на трение $P_{тр}$ и на добавочные потери от вихревых токов в зубцах ротора $P_{д.з}$. Потери в стали ротора из-за незначительной частоты его перемагничивания относительно малы, а поэтому ими можно пренебречь.

Следовательно,

$$P = P_{мех} - P_{тр} - P_{д.з}.$$

Заменим в уравнении (14-34) $I_2 R_2$ через $E_2 \cos \psi_2$ и учтем, что $E_2 = E_{2н} s$; тогда уравнение момента примет следующий вид:

$$M = \frac{m_2 p}{\omega} E_{2н} I_2 \cos \psi_2 = \text{const} \frac{E_{2н} I_2 \cos \psi_2}{f}. \quad (14-35)$$

Если в это уравнение подставить:

$$E_{2н} = 4,44 f \omega_2 k_2 \Phi,$$

то получим момент

$$M = \text{const} \Phi I_2 \cos \psi_2. \quad (14-36)$$

Эта форма уравнения момента напоминает нам закон Ампера. В дальнейшем мы увидим, что произведение потока и тока входит в уравнение вращающего момента всех электрических машин.

14-12. Схема замещения асинхронного двигателя

В целях упрощения расчетов различных режимов асинхронной машины для нее, как и для трансформатора, может быть составлена схема замещения, т. е. машина при расчетах заменяется несколькими электрически соединенными активными и реактивными сопротивлениями. Асинхронная машина является трехфазным устройством, но она симметрична, поэтому достаточно составить схему замещения лишь для одной ее фазы.

В качестве обоснования схемы замещения обратимся к известным нам уравнениям асинхронной машины и

преобразуем их таким же образом, как мы это делали для трансформатора.

Ток ротора I_2 связан с приведенным током I'_2 соотношением

$$I_2 = -I'_2 \frac{\omega_1 k_1 m_1}{\omega_2 k_2 m_2} = -I'_2 k_i,$$

где k_i — коэффициент трансформации токов асинхронной машины.

Напряжение \dot{U} связано с э. д. с. неподвижного ротора соотношением

$$\dot{U} = -E_{2н} \frac{\omega_1 k_1}{\omega_2 k_2} = -E_{2н} k_e,$$

где k_e — коэффициент трансформации напряжений асинхронной машины.

Это напряжение можно выразить через параметры цепи ротора

$$\dot{U} = -(I_2 Z_2 + I_2 R) k_e,$$

где $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ — полное сопротивление неподвижного ротора.

Подставив в это выражение вместо I_2 приведенный ток, получим:

$$\dot{U} = (I'_2 Z_2 + I'_2 R) k_e k_i.$$

Величина $k_e k_i$ называется коэффициентом трансформации асинхронной машины.

Так же как для трансформатора, применим для асинхронной машины понятие приведенных сопротивлений вторичной цепи — приведенных к числу фаз, числу витков и обмоточному коэффициенту обмотки статора:

$$Z_2 k_e k_i = Z'_2 \text{ и } R k_e k_i = R'.$$

Это упрощает выражение напряжения

$$\dot{U} = I'_2 Z'_2 + I'_2 R'.$$

Подставив это значение в уравнение первичного напряжения, мы получим:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I'_2 Z'_2 + I'_2 R'.$$

С другой стороны, напряжение U пропорционально намагничивающему току I_0 и по тем же соображениям, что и для трансформатора, оно может быть выражено следующим образом:

$$\dot{U} = I_0 Z_{12}.$$

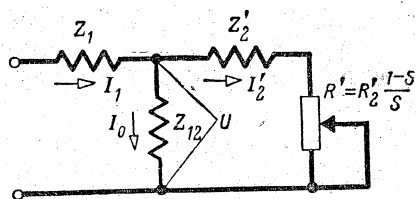


Рис. 14-26. Схема замещения асинхронного двигателя.

Здесь Z_{12} является коэффициентом пропорциональности, имеющим размерность сопротивления. В схеме замещения это сопротивление изображает магнитную цепь машины (часто его заменяют разветвлением, через одну ветвь которого проходит активная, а через вторую — реактивная составляющая намагничивающего тока).

Теперь мы можем сопоставить следующие три уравнения, определяющих схему замещения асинхронной машины:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I_2' Z_2' + I_2' R';$$

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I_0 Z_{12}; \quad I_1 = I_0 + I_2'.$$

Условиям этих трех уравнений удовлетворяет схема замещения рис. 14-26 (или же рис. 14-27). Отметим, что ток I_0 в нашей схеме соответствует условиям идеального холостого хода машины, когда механическая мощность, отдаваемая ротором, будет равна нулю и вместе с тем будет равен нулю ток ротора I_2 и соответствующий ему в схеме замещения ток I_2' . Такой идеальный холостой ход будет иметь место, если довести ротор до синхронного числа оборотов; в этих условиях $s=0$, а сопротивление R' , изображающее механическую нагрузку, будет:

$$R' = \frac{1-s}{s} R_2 k = \infty.$$

Изменениям механической нагрузки на валу работающего двигателя

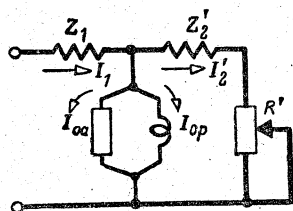


Рис. 14-27. Схема замещения асинхронного двигателя с разделением намагничивающего тока на составляющие.

в схеме замещения соответствуют изменению R' . Если затормозить двигатель, то $R'=0$ — это будут условия короткого замыкания участка R' схемы замещения.

14-13. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Скольжение двигателя зависит от нагрузки, и в определенных пределах увеличение скольжения вызывает возрастание вращающего момента. Согласно уравнению (14-36) вращающий момент $M \sim \Phi I_2 \cos \psi_2$; в этом выражении две величины быстро изменяются с изменением скольжения. Ток ротора I_2 согласно (14-20) с ростом скольжения увеличивается сначала быстро, пока $R_2 \gg s\omega L_2$, затем более медленно. Коэффициент мощности цепи ротора

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega L_2)^2}}$$

с ростом скольжения убывает сначала медленно, затем все быстрее.

Поясним на простейшем примере физический смысл зависимости вращающего момента от $\cos \psi_2$. Если бы $\cos \psi_2 = 1$, т. е. если бы цепь ротора обладала только активным сопротивлением, то токи в роторе были бы в фазе с э. д. с., следовательно, при вращении поля они имели бы наибольшее значение всегда в той части окружности ротора, которую в данный момент пронизывает наиболее густая часть магнитного поля (рис. 14-28). Поэтому и силы взаимодействия магнитного поля и токов в роторе, приводящие ротор во вращение, будут в этом случае наибольшими.

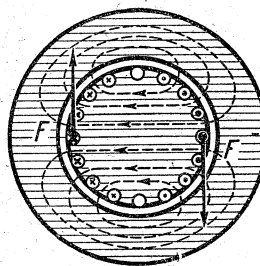


Рис. 14-28. Силы воздействия токов ротора с вращающимся магнитным полем при $\cos \psi_2 = 1$.

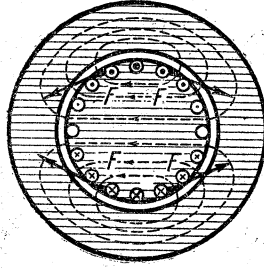


Рис. 14-29. Силы воздействия токов ротора с вращающимся магнитным полем при $\cos \psi_2 = 0$.

Если же обратиться к противоположным предельным условиям и предположить, что $\cos \psi_2 = 0$, т. е. принять что ротор обладает только индуктивным сопротивлением, то токи в роторе будут иметь наибольшее значение в тех проводниках ротора, в месте расположения которых индукция была максимальной четверть периода тому назад (рис. 14-29). Ток будет максимален там, где поля уже нет, а силы, действующие на остальные провода, будут взаимно уравниваться.

В реальных условиях асинхронной машины цепь ротора обладает как активным, так и индуктивным сопротивлением, причем последнее изменяется пропорционально скольжению, что соответственно сказывается на вращающемся моменте машины. Наконец, влияние скольжения сказывается и на главном потоке машины Φ , хотя и в меньшей мере. С увеличением скольжения возрастает ток статора, а следовательно, уменьшаются напряжения

$$\dot{U} = \dot{U}_1 - I_1 Z_1$$

и пропорциональный ему магнитный поток Φ .

Таким образом, три величины в выражении момента зависят от скольжения, причем одна из них увеличивается с ростом скольжения, а две убывают. Следовательно, определенному значению скольжения соответствует максимальное значение вращающего момента.

Однако для того чтобы иметь возможность аналитически определить условия максимума момента, необходимо выразить его через параметры двух цепей машины и независимое напряжение статора.

Возьмем в качестве исходного выражения (14-34)

$$M = \frac{m_2 p}{\omega} \frac{I_2'^2 R_2}{s}$$

и, используя соотношения схемы замещения, заменим:

$$I_2'^2 = I_2'^2 k_i^2 \text{ и } R_2 = \frac{R_2'}{k_e k_i},$$

на основании которых

$$m_2 I_2'^2 R_2 = m_2 I_2'^2 k_i^2 \frac{R_2'}{k_e k_i} = m_1 I_2'^2 R_2',$$

что является прямым следствием равенства мощности, теряемой в роторе, мощности, затрачиваемой в соответствующем сопротивлении схемы замещения. Таким образом,

$$M = \frac{m_1 p}{\omega} \frac{I_2'^2 R_2'}{s}$$

Согласно схеме замещения (рис. 14-26)

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(R_2' + R')^2 + (X_2')^2}} = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_2'^2}}$$

Следовательно,

$$M = \frac{m_1 p}{\omega} \frac{U^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_2'^2}$$

Пользуясь той же схемой замещения, можно выразить напряжение U через постоянную величину — напряжение статора U_1 и сопротивления схемы замещения:

$$\dot{U}_1 = \dot{U} + I_1 Z_1 = \dot{U} + (I_0 + I_2') Z_1,$$

а так как

$$I_0 = \frac{\dot{U}}{Z_{12}} \text{ и } I_2' = \frac{\dot{U}}{Z_2' + R'},$$

то

$$\dot{U}_1 = \dot{U} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_{12}} + \frac{Z_1}{Z_2' + R'} \right).$$

Так как $Z_{12} \gg Z_1$ (у нормальных асинхронных двигателей $Z_1 : Z_{12} = 0,02 \div 0,05$), то для упрощения исследования

характера соотношений можно пренебречь $\frac{Z_1}{Z_{12}}$ по сравнению с единицей: тогда

$$\dot{U} = U_1 \frac{Z_2' + R'}{Z_1 + Z_2' + R'}$$

или, переходя от комплексов к модулям, так как $Z_1 = R_1 + jX_1$; $Z_2' = R_2' + jX_2'$, получим:

$$U = U_1 \sqrt{\frac{(R_2' + R')^2 + X_2'^2}{(R_1 + R_2' + R')^2 + (X_1 + X_2')^2}} =$$

$$= U_1 \sqrt{\frac{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_2'^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Подставив это значение U в выражение момента, получим:

$$M = \frac{m_1 p}{\omega} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (14-37)$$

Чтобы определить условия максимума момента, берем его первую производную по скольжению и приравняем ее нулю:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{m_1 p}{\omega} U_1 R_2' \times$$

$$\times \frac{R_2'^2 - s^2 [R_1^2 + (X_1 + X_2')^2]}{[(R_1 s + R_2')^2 + s^2 (X_1 + X_2')^2]^2} = 0,$$

а так как нулю может быть равен только числитель выражения, то, следовательно, критическое скольжение, соответствующее максимуму момента, будет:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}; \quad (14-38)$$

здесь знак минус относится к работе машины в режиме генератора (§ 14-21). Так как у нормальных машин значение R_1^2 составляет не более 5% от подкоренного выражения, то можно

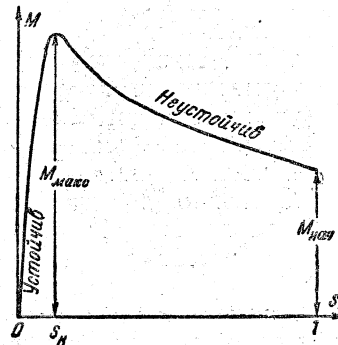


Рис. 14-30. Кривая зависимости вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения.

с практически достаточной точностью этой величиной пренебречь и считать:

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (14-39)$$

Наконец заменив $R_2' = R_2 k$ и $X_2' = X_2 k$, получим выражение s_k через роторные сопротивления и реактивное сопротивление статора, приведенное к числу фаз, витков и обмоточному коэффициенту ротора:

$$s_k = \pm \frac{R_2}{X_1' + X_2} \quad (14-40)$$

Индуктивность рассеяния обмоток ротора относительно велика, так как проводники лежат в стали; поэтому максимальный момент двигателя обычно соответствует весьма небольшим скольжениям порядка от 4% для крупных двигателей и до 14% для мелких двигателей.

Характерная кривая зависимости вращающего момента двигателя от скольжения показана на рис. 14-30. Максимум вращающего момента разделяет кривую вращающего момента на устойчивую часть от $s=0$ до s_k и неустойчивую¹ часть от s_k до $s=1$, в пределах которой вращающий момент уменьшается с ростом скольжения.

¹ Так как для устойчивой работы двигателя в обычных условиях при постоянном тормозящем моменте механической нагрузки на валу необходимо, чтобы с уменьшением скорости вращения (например, вследствие увеличения нагрузки) развиваемый двигателем момент увеличивался.

Пока тормозящий момент на валу меньше максимального момента двигателя, динамическое равновесие моментов автоматически восстанавливается при увеличении скольжения; если нагрузка становится больше, то возрастает скольжение и благодаря его росту соответственно повышается вращающий момент. Но когда тормозящий момент достиг значения максимального момента двигателя, тогда при дальнейшем увеличении нагрузки возрастание скольжения будет лишь уменьшать вращающий момент и, таким образом, динамическое равновесие, нарушенное увеличением нагрузки, не восстанавливается, и вследствие преобладания тормозящего момента двигатель останавливается. Подставив выражение критического скольжения (14-38) в уравнение момента (14-37), получим:

$$M_m = \frac{m_1 p}{2\omega} \times \frac{U_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

В последнем выражении можно пренебречь R_1^2 по сравнению с $(X_1 + X_2')^2$, что позволяет получить выражение максимального момента асинхронного двигателя в следующей простой форме:

$$M_m = \frac{m_1 p}{2\omega} \frac{U_1^2}{R_1 + X_1 + X_2'} \quad (14-41)$$

Максимальный момент определяет перегрузочную способность асинхронного двигателя. Выражение (14-41) показывает, что M_m не зависит от активного сопротивления цепи ротора, в то же время согласно (14-39) и (14-40) критическое скольжение пропорционально этому сопротивлению. Следовательно, можно, увеличивая активное сопротивление цепи ротора, увеличивать критическое скольжение, не изменяя максимальный момент. Это используется для улучшения пусковых условий в двигателях с контактными кольцами (§ 14-14) и в двигателях с вытеснением тока (§ 14-15).

То обстоятельство, что M_m пропорционально U_1^2 , делает асинхронный двигатель весьма чувствительным к по-

нижению напряжения питающей его сети. При значительном понижении U_1 двигатель при пуске в ход может не взять с места.

У нормальных асинхронных двигателей максимальный момент больше номинального в 2—2,5 раза.

Ввиду того, что максимальный вращающий момент является границей между устойчивым и неустойчивым режимами работы двигателя, он именуется иногда опрокидывающим моментом.

Если в уравнении вращающего момента (14-37) положить $s=1$, то мы получим выражение начального пускового момента, т. е. момента, развиваемого двигателем при трогании с места:

$$M_n = \frac{m_1 p}{\omega} \frac{U_1^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (14-42)$$

Если нужно, чтобы $M_n = M_m$, т. е. чтобы при пуске двигатель развивал максимальный момент, то согласно (14-39) активное сопротивление цепи ротора должно быть

$$R_2' = X_1 + X_2' \quad \text{или} \quad R_2 = X_1'' + X_2. \quad (14-43)$$

Как уже указывалось, двигатель устойчиво работает только при изменении скольжения в пределах от нуля до скольжения, соответствующего максимальному (опрокидывающему) моменту; в этих условиях изменения нагрузки вызывают лишь небольшое изменение скорости вращения. Для целей электропривода большое значение имеет зависимость скорости двигателя от нагрузки на валу $n_2 = F(M)$; эта зависимость носит название механической характеристики.

Как показывает кривая рис. 14-31, скорость асинхронного двигателя лишь незначительно снижается при увеличении вращающего момента в пределах от нуля до максимального значения. Такую зависимость именуют жесткой.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в пределах от $s=0$ до $s=s_k$ является жесткой, в остальной своей части — нужно считать мягкой.

При перегрузке свыше максимального момента M_m (что составляет при-

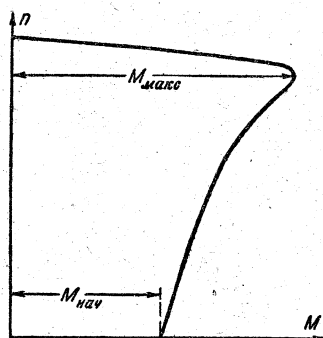


Рис. 14-31. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

мерно двух-, трехкратную перегрузку) двигатель входит в область неустойчивого режима (если момент на валу постоянен) и останавливается.

Это обстоятельство вынуждает выбирать мощность двигателя так, чтобы при кратковременной перегрузке не был превышен максимальный момент; в противном случае привод должен быть снабжен соответствующим маховиком.

14-14. Двигатель с контактными кольцами (двигатель с фазным ротором)

В двигателе с контактными кольцами задача увеличения сопротивления на время пуска разрешается путем включения последовательно с обмоткой ротора трехфазного пускового реостата, соединенного в звезду (рис. 14-32). Обмотка ротора в этом случае обычно выполняется трехфазной, и концы ее присоединяются к трем медным или стальным кольцам, укрепленным на валу ротора (рис. 14-3, 14-5, 14-6). Эти кольца изолированы от вала и друг от друга. По кольцам сколь-

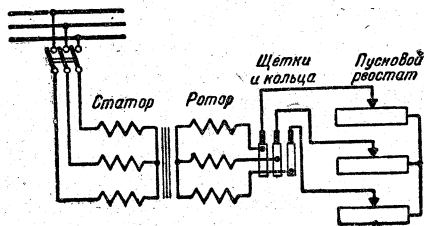


Рис. 14-32. Схема соединений двигателя с контактными кольцами.

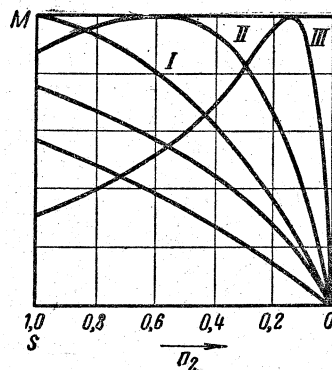


Рис. 14-33. Зависимость $M = F(s)$ при различных значениях активного сопротивления цепи ротора.

I— $8R_2$; II— $3R_2$; III— R_2 .

зят три неподвижные щетки, соединенные с тремя сопротивлениями пускового реостата.

Сопротивление каждой фазы реостата R_p , нужное для того, чтобы двигатель развивал при пуске максимальный момент, должно быть:

$$R_p = X_1'' + X_2 - R_2. \quad (14-44)$$

Вследствие включения реостата кривая $M = F(s)$ двигателя будет иметь максимум при $s=1$ (рис. 14-33, кривая I).

Как только ротор начинает вращаться, уменьшается скольжение, а вместе с ним э. д. с. и ток ротора, вследствие чего падает и вращающий момент.

Чтобы двигатель продолжал развивать вращающий момент, близкий к максимальному, сопротивление пускового реостата постепенно уменьшается. Наконец, когда двигатель достигает нормальной скорости, сопротивления пускового реостата замыкаются накоротко.

Для уменьшения механических потерь двигателя, а также износа колец и щеток двигателя часто снабжаются приспособлением для подъема щеток и замыкания колец накоротко.

Включение добавочного сопротивления в цепь ротора изменяет характер зависимости вращающего момента M от скольжения s . При этом не меняется максимальный момент двигателя, увеличение R только смещает его в сторону большего скольжения.

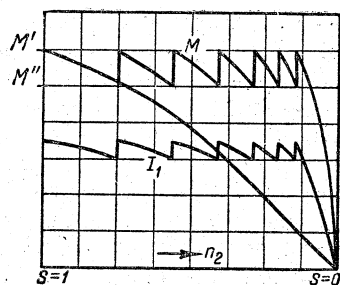


Рис. 14-34. Вращающий момент и ток статора асинхронного двигателя с контактными кольцами при пуске при помощи реостата.

Все кривые $M = F(s)$, поэтому имеют вершину характеристики на одинаковой высоте, как это показано на рис. 14-33. Выключение ступеней пускового реостата заставляет двигатель переходить с одной характеристики на другую. Сопротивления реостата обычно выводят на контакты, благодаря чему при пуске момент двигателя и ток изменяются по ступенчатой кривой (рис. 14-34), число ступеней которой определяется числом контактов пускового реостата. При этом пусковой момент изменяется в пределах $M' - M''$. Однако чем больше должен быть пусковой момент, чем ближе он к максимальному моменту, тем больше будет и пусковой ток. Лишь для особо тяжелых условий пуска реостат подбирается так, чтобы пусковой момент был равен максимальному.

Пусковой реостат рассчитывается таким образом, чтобы в течение времени пуска, не перегреваясь, он мог поглощать мощность, примерно равную мощности двигателя. Следовательно, размеры пускового реостата определяются частотой пусков. В большинстве случаев пусковые реостаты выполняются с масляным охлаждением — сопротивления реостата помещаются в резервуар с минеральным маслом. Часто также применяются водяные реостаты.

Применение пускового реостата значительно улучшает пусковые условия асинхронного двигателя, повышая момент и уменьшая толчок тока. Однако применение ротора с контактными кольцами удорожает двигатель (примерно на 20%), усложняет его обслуживание и, наконец, несколько

ухудшает $\cos \varphi$ двигателя. У крупных двигателей этой разницы в $\cos \varphi$ почти не имеется и недостатками ротора с кольцами являются лишь сложность пуска в ход и удорожание машины. В современной практике отчетливо заметна тенденция отказа от двигателей с кольцами путем перехода для мощностей до 100 кВт и выше на короткозамкнутые роторы.

14-15. Двигатели с вытеснением тока

Пусковые условия асинхронного двигателя могут быть значительно улучшены и без применения ротора с контактными кольцами путем использования принципа вытеснения тока переменным магнитным полем.

Короткозамкнутая обмотка ротора может быть выполнена в виде двойной беличьей клетки, т. е. короткозамкнутый ротор снабжается двумя клетками, лежащими одна над другой: верхней — пусковой и нижней — рабочей. Материалом стержней верхней клетки служит обыкновенная марганцовистая латунь, т. е. материал с повышенным сопротивлением. Материалом стержней нижней клетки служит красная медь. Кроме того, стержни нижней клетки имеют обычно большее сечение. Таким образом, активное сопротивление верхней клетки значительно больше активного сопротивления нижней клетки (в 4—5 раз). Обе клетки снабжены с торцовых сторон замыкающими кольцами.

Стержни клеток размещены в верхней и нижней частях паза, причем между стержнями наружной и внутренней клеток оставлена узкая щель, от высоты и ширины которой в значительной мере зависит поток рассеяния нижней клетки, а следовательно, и ее индуктивность. Последняя у нижней клетки относительно велика, так как ее стержни окружены сталью, прорезанной лишь сверху узкой щелью паза (рис. 14-35). У верхней клетки индуктивность значительно меньше, так как поток рассеяния вокруг ее стержней встречает на своем пути большое магнитное сопротивление воздушного промежутка между ротором и статором, а также щели паза под стержнями.

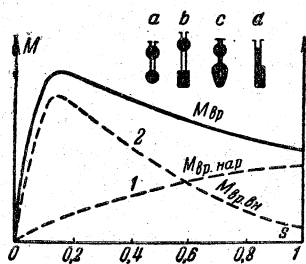


Рис. 14-35. Различные формы пазов и стержней ротора двигателей с двойной беличьей клеткой и характеристика двигателя.

В первый момент пуска двигателя (пока $n_2=0$) частота токов в роторе равна частоте сети; в этих условиях полное сопротивление внутренней клетки обуславливается главным образом ее большим индуктивным сопротивлением. В то же время полное сопротивление наружной клетки в большей своей части является активным сопротивлением. Благодаря этому ток нижней клетки является преимущественно реактивным, отстающим по фазе от э. д. с. и почти не участвующим в создании вращающего момента; ток верхней клетки и при пуске мало сдвинут по фазе по отношению к э. д. с.; он создает большой пусковой момент, как это имеет место и у двигателя с контактными кольцами при включении пускового активного сопротивления. Отношение токов верхней и нижней клеток зависит от отношения полных сопротивлений этих клеток; обычно при пуске ток нижней клетки значительно меньше тока верхней клетки.

По мере разбега ротора частота токов в нем уменьшается и вместе с тем уменьшается и влияние индуктивного сопротивления на распределение токов. При нормальном скольжении частота ротора имеет значение порядка 1 гц; в этих условиях распределение токов между клетками ротора определяется отношением активных сопротивлений клеток. При нормальной рабочей скорости ротора большая часть тока поэтому проходит по нижней клетке и результирующее активное и полное сопротивления ротора в таких условиях малы, как у обычного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Можно рассматривать характеристику $M=F(s)$ двигателя с двойной беличьей клеткой как сумму характеристик двигателя с относительно большим активным сопротивлением ротора (рис. 14-35, кривая 1) и двигателя с относительно малым активным сопротивлением ротора (кривая 2).

Таким образом, у двигателей с двойной беличьей клеткой активное сопротивление обмотки ротора в целом изменяется в зависимости от изменения скольжения, — оно велико при пуске и мало при нормальном рабочем скольжении. Благодаря этому двигатель, снабженный ротором с двойной беличьей клеткой, по сравнению с нормальным двигателем, имеющим короткозамкнутый ротор, развивает повышенный пусковой вращающий момент при пониженном пусковом токе.

В некоторых конструкциях обе клетки изготавливаются путем непосредственной заливки расплавленным алюминием пазов ротора (рис. 14-35, c и d); при этом алюминий заполняет и щель между пазами верхней и нижней клеток, благодаря чему стержни проводников обеих клеток образуют один цельный стержень фасонного сечения.

Статорные обмотки двигателя с двойной беличьей клеткой не отличаются от обмоток нормальных асинхронных двигателей.

Двигатель с глубоким пазом основан также на явлении вытеснения тока. Обмотка ротора этого двигателя изготавливается из прямоугольных стержней малой ширины и большой высоты, которые помещаются в соответствующие глубокие пазы в стали ротора. Как мы уже упоминали (§ 7-8), переменный ток распределяется по сечению проводника в общем случае неравномерно; это явление и использовано в данном двигателе. На рис. 14-36 показано поле рассеяния, замыкающееся поперек глубокого паза, когда по стержню обмотки проходит ток. Часть стержня, лежащая в глубине паза, сцеплена с большим потоком рассеяния чем верхняя часть того же стержня. В силу этого при пуске двигателя в ход повышенное реактивное сопротивление нижней части стержня вызывает вытеснение тока ротора в верх-

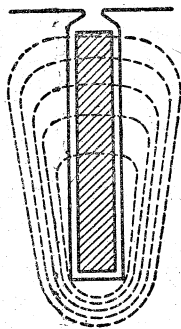


Рис. 14-36. Поле рассеяния тока ротора при наличии глубокого паза.

ную часть сечения стержня. Это эквивалентно увеличению активного сопротивления обмотки ротора. Благодаря увеличению активного сопротивления повышается начальный момент двигателя, а увеличение индуктивного сопротивления вследствие применения глубокого паза уменьшает пусковой ток. При нормальной скорости двигателя индуктивное сопротивление становится незначительным благодаря уменьшению частоты, ток распределяется по сечению стержня почти равномерно и двигатель работает как обычный короткозамкнутый.

Двигатель с глубоким пазом ротора проще в конструктивном отношении, чем двигатель с двойной клеткой. Зато второй может быть выполнен на различную величину начального момента и на различную кратность пускового тока, что дает возможность приспособлять этот двигатель для специальных случаев тяжелого пуска в ход.

14-16. Способы уменьшения пускового тока короткозамкнутого двигателя

Все недостатки короткозамкнутого двигателя относятся к его пусковому режиму; при нормальном режиме этот двигатель имеет ряд преимуществ перед остальными видами асинхронного двигателя. При всей важности пускового режима все же в большинстве случаев решающее значение имеет рабочий режим. Естественно поэтому стремление улучшить пусковой режим короткозамкнутого двигателя. Однако все специальные способы пуска короткозамкнутого двигателя снижают лишь пусковой толчок тока, что же касается вращающего момента, то все

эти способы пуска лишь уменьшают пусковой момент. Тем не менее в ряде случаев условия электропривода позволяют пускать двигатель вхолостую или при пониженной нагрузке, а это дает возможность снизить пусковой толчок тока путем понижения напряжения статора на время пуска. Такое понижение напряжения осуществляется переключением со Y на Δ , а также введением реактивного или активного сопротивления в цепь статора или же автотрансформатором.

Переключение обмотки статора с треугольника на звезду применяется для пуска в ход короткозамкнутых двигателей относительно малой мощности, примерно до 20 кВт, работающих нормально при соединении обмоток статора треугольником. При пуске обмотка статора соединяется звездой, благодаря чему фазное напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, примерно во столько же раз уменьшается фазный пусковой ток

$$I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}z},$$

где z — полное сопротивление фазы, а U_{ϕ} — линейное напряжение, и так как линейный ток звезды равен фазному, то $I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}z}$. Если бы обмотка была соединена треугольником, то линейный ток был бы

$$I_{\phi \Delta} = I_{\phi Y} \sqrt{3} = \frac{U_{\phi}}{z} \sqrt{3};$$

таким образом, переключение на звезду уменьшает пусковой линейный ток в отношении

$$\frac{I_{\phi \Delta}}{I_{\phi Y}} = \frac{\frac{U_{\phi}}{z} \sqrt{3}}{\frac{U_{\phi}}{z} \frac{1}{\sqrt{3}}} = 3.$$

Практически переключение выполняется при помощи простого трехполюсного переключателя (рис. 14-37) или при помощи барабанного переключателя типа контроллера (§ 20-3).

Переключение с треугольника на звезду используется также для того, чтобы дать возможность применять одни и те же двигатели при двух различных линейных напряжениях, нахо-

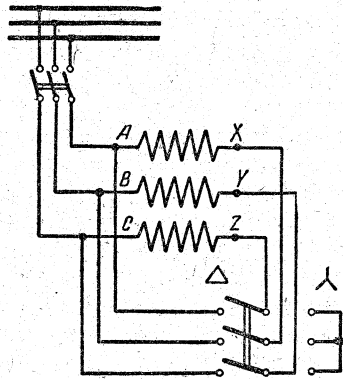


Рис. 14-37. Схема пуска двигателя с переключением со звезды на треугольник.

дящихся в отношении $\sqrt{3}$, например 127/220 и 220/380 в. Для упрощения переключения зажимы обмоток статора на щитке двигателя располагаются так, как показано на рис. 14-38.

Для мощных двигателей часто применяется пуск при помощи автотрансформатора (рис. 14-39). Благодаря автотрансформатору при пуске фазное напряжение двигателя и пусковой ток уменьшаются пропорционально коэффициенту трансформации k , но пусковой ток в линии меньше пускового тока двигателя в k раз, т. е. ток двигателя

$$I_{\text{дв}} = \frac{U}{kz},$$

а ток в линии

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{дв}}}{k} = \frac{U_{\text{л}}}{k^2 z};$$

следовательно, понижение напряжения автотрансформатором в k раз уменьшает пусковой ток в линии в k^2 раз. В то же время пусковой мо-

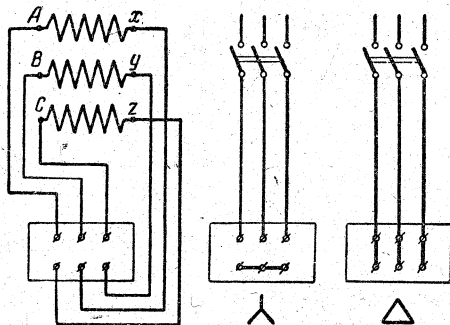


Рис. 14-38. Расположение зажимов обмотки статора на щитке машины и их соединение звездой и треугольником.

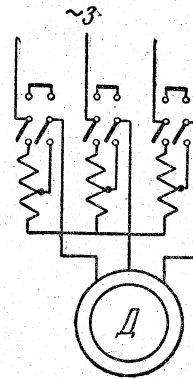


Рис. 14-39. Схема пуска короткозамкнутого двигателя при помощи автотрансформатора.

мент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшается в k^2 раз. Таким образом, благодаря применению автотрансформатора начальный момент уменьшается пропорционально линейному пусковому току, в то время как при поглощении части напряжения сопротивлением момент уменьшается пропорционально квадрату пускового тока. Например, при понижении напряжения автотрансформатором в $\sqrt{2}$ раз пусковой ток сети понизится в 2 раза и в 2 раза понизится и пусковой момент.

Наконец, для уменьшения пускового тока двигателей, пускаемых под нагрузкой, применяются пусковые шкивы. Такой шкив состоит из ведущей части, укрепленной на валу двигателя, и ведомой, укрепленной на валу машины. Ведущая часть шкива снабжается центробежным приспособлением, которое по достижении двигателем определенной скорости сцепляется с ведомой частью и этим путем пускает ход машину. Таким образом, двигатель пускается в ход вхолостую и нагружается лишь при достижении им нормальной скорости.

14-17. Регулирование скорости

Затруднения в регулировании скорости асинхронных двигателей является их существенным недостатком.

Простейшим способом регулирования скорости асинхронного двигателя является включение сопротивления в цепь ротора с контактными кольцами. Мы видели выше, что увеличение

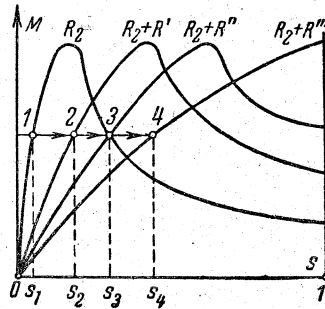


Рис. 14-40. Увеличение скольжения вследствие увеличения сопротивления цепи ротора.

сопротивления цепи ротора делает характеристику $M=F(s)$ более пологой (рис. 14-33); если при постоянном моменте на валу двигателя увеличивать сопротивление цепи ротора путем постепенного увеличения сопротивления ($R' < R'' < R'''$), то рабочая точка будет смещаться с одной кривой $M=F(s)$ на следующую (рис. 14-40), соответствующую возросшему сопротивлению цепи ротора (точки 1, 2, 3, и 4), соответственно чему будет расти скольжение, а следовательно, уменьшаться скорость двигателя. Этим путем возможно изменять скорость ротора в пределах от нормального скольжения до полной остановки. Однако такой способ регулирования связан с очень большими потерями энергии. Подобно $P_{\text{мех}}$ (§ 14-11) мощность вращающегося поля

$$P_{\text{вр}} = \frac{\omega}{p} M$$

и при постоянном моменте на валу двигателя не зависит от скольжения. Эта мощность состоит из мощности потерь в меди ротора (14-31)

$$P_{\text{м2}} = P_{\text{вр}} s$$

и мощности механической (14-32)

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{вр}} (1 - s)$$

и, следовательно,

$$\frac{P_{\text{м2}}}{P_{\text{мех}}} = \frac{s}{1-s} = \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \quad (14-45)$$

Таким образом, доля механической мощности уменьшается прямо пропорционально уменьшению скорости вращения ротора, в то же время соответ-

ственно увеличивается доля потерь в сопротивлениях цепи ротора, мощность же, забираемая двигателем из сети, остается неизменной. Следовательно, для уменьшения скорости двигателя, например, на 25% нужно включить такой реостат в цепь ротора, при котором в этой цепи будет бесполезно превращаться в тепло четверть энергии вращающегося поля.

По причине указанных недостатков регулирование скорости асинхронного двигателя при помощи реостата применяется лишь в специальных случаях.

Ценой усложнения и удорожания конструкции возможно все же осуществлять регулирование скорости асинхронного двигателя без таких больших потерь энергии, как при реостатном способе. Распространенным способом такого регулирования является переключение числа полюсов двигателя (многоскоростные двигатели).

При постоянной частоте сети скорость поля зависит только от числа полюсов этого поля, определяемого обмоткой статора. Если на статоре поместить две отдельные обмотки, одну на p пар полюсов, а другую на p' пар полюсов, то, включая в сеть первую или вторую обмотку, мы получим скорость поля

$$n_1 = \frac{60}{p} f \text{ или } n'_1 = \frac{60}{p'} f,$$

следовательно,

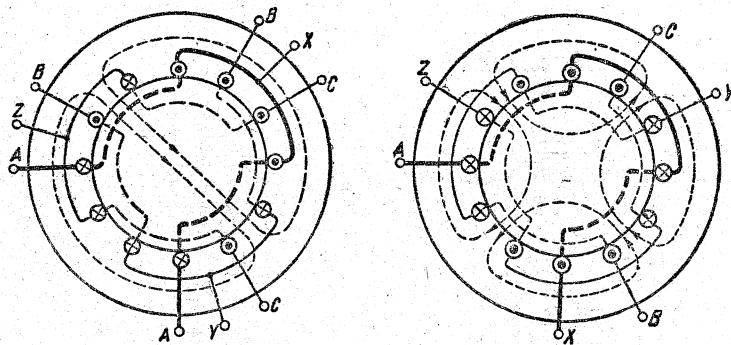
$$\frac{n_1}{n'_1} = \frac{p'}{p}, \quad (14-46)$$

соответственным образом будут отличаться и скорости ротора двигателя. При этом ротор двигателя должен иметь беличье колесо, для которого число фаз изменяется само собой с изменением числа полюсов поля:

$$m_2 = \frac{Z_2}{p} \text{ и } m'_2 = \frac{Z_2}{p'},$$

где Z_2 — число стержней беличьего колеса.

Числа полюсов обмоток статора в этом случае взаимно ничем не связаны и могут быть выбраны любыми в зависимости от условий работы двигателя. Само регулирование сводится к скачкообразному изменению скорости двигателя при включении в сеть

Рис. 14-41. Переключение обмотки статора с $p = 1$ на $p = 2$.

той или другой обмотки статора. При каждом переключении двигатель попадает в условия, по существу аналогичные пусковым, т. е. имеют место сильный толчок тока и понижение момента.

Двумя отдельными обмотками снабжаются статоры лишь у небольших двигателей, у крупных двигателей более целесообразным является переключение катушек одной и той же обмотки для получения различного числа полюсов. На рис. 14-41 показана схема переключения трехфазной обмотки с двух на четыре полюса. Переключение обмотки в ином отношении, чем 1:2, хотя и требует более сложного изменения схемы, но применяется также довольно часто.

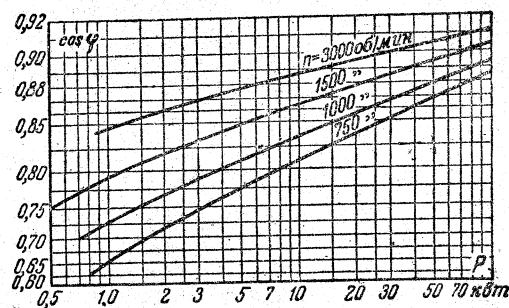
В большинстве случаев статор асинхронной машины снабжается двумя независимыми обмотками, из которых каждая переключается в отношении 1:2 или ином. Таким образом, двигатель имеет четыре ступени скорости (многоскоростной двигатель).

14-18. Коэффициент мощности

При полной нагрузке асинхронные двигатели имеют $\cos \phi$ от 0,7 до 0,9 (рис. 14-42), следовательно, реактивный ток составляет от 100 до 50% активного тока двигателя или от 70 до 40% номинального тока. Таким образом, асинхронные двигатели загружают электрическую станцию и сеть значительными реактивными токами, что является существенным недостатком этих двигателей. Этот реактивный ток является намагничивающим

током, поддерживающим переменное магнитное поле двигателя. Магнитный поток двигателя практически пропорционален фазному напряжению ($U_1 = \text{const } \Phi$), а намагничивающий ток пропорционален магнитному потоку и обратно пропорционален магнитному сопротивлению; в последнем большую часть составляет магнитное сопротивление воздушного промежутка между статором и ротором; влияние этого промежутка делает намагничивающий ток асинхронного двигателя во много раз больше намагничивающего тока трансформатора. Естественно, что при построении двигателей конструктор стремится сократить этот промежуток до минимума, определяемого условиями игры в подшипниках и запасом на их износ, прогибом станины и точностью центровки. У самых малых двигателей этот промежуток по указанным причинам составляет около 0,3 мм.

С увеличением мощности двигателя величина воздушного промежутка возрастает значительно медленнее роста

Рис. 14-42. Зависимость $\cos \phi$ полностью нагруженных нормальных асинхронных двигателей от их номинальной мощности и скорости.

мощности машины — это одна из существенных причин повышения $\cos \varphi$ с увеличением мощности машины.

Намагничивающий ток двигателя можно считать мало зависящим от нагрузки, так как с увеличением нагрузки пропорционально возрастают лишь потоки рассеяния, а главный магнитный поток незначительно уменьшается. Но активный ток двигателя пропорционален его механической нагрузке, следовательно, с уменьшением нагрузки доля реактивного тока быстро возрастает, а $\cos \varphi$ двигателя уменьшается. Таким образом, неполная загруженность асинхронных машин является причиной плохого $\cos \varphi$ промышленных предприятий. Для повышения $\cos \varphi$ прежде всего следует полностью загружать двигатели — это так называемое «естественное улучшение $\cos \varphi$ ».

Часто по производственным условиям двигатель должен длительно работать с малой нагрузкой. Если эта нагрузка менее 40% от номинальной и двигатель имеет нормальное соединение обмоток треугольником, то целесообразно пересоединить обмотки на звезду. Такое переключение понизит фазное напряжение обмоток и магнитный поток в $\sqrt{3}$ раз.

Уменьшению фазного намагничивающего тока в $\sqrt{3}$ раз соответствует уменьшение линейного тока, точнее соответствующей реактивной составляющей линейного тока в 3 раза. Благодаря влиянию магнитного насыщения стали реактивный ток уменьшается фактически примерно в 4 раза. Что касается активной составляющей тока, то, так как момент нагрузки на валу двигателя при переключении не изменяется, а поток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, то согласно уравнению вращающего момента

$$M = \text{const } \Phi I_2 \cos \varphi_2$$

при переключении ток в роторе и соответствующая активная составляющая тока статора I_2' должны возрасти в $\sqrt{3}$ раз, а следовательно, активная составляющая линейного тока должна остаться без изменения. Это, конечно, вытекает и из того, что механическая мощность, развиваемая двигателем,

при переключении должна остаться неизменной. Таким образом, благодаря переключению с треугольника на звезду в 4 раза уменьшается реактивный ток двигателя и соответственно повышается $\cos \varphi$. Отметим далее, что при таком переключении повышается к. п. д. двигателя, так как уменьшаются потери в стали (пропорциональные квадрату потока) и потери в меди статора. Конечно, переключение на звезду представляет собой только компромиссное решение вопроса для слабо нагруженных двигателей. Как мы уже отмечали, даже полностью нагруженный асинхронный двигатель должен потреблять значительный реактивный ток для поддержания своего переменного магнитного поля. Чтобы добиться в промышленной установке с асинхронными двигателями $\cos \varphi$, близкого к единице, необходимо компенсировать индуктивный отстающий ток опережающим емкостным.

14-19. Потери и коэффициент полезного действия

В асинхронной машине имеют место три вида потерь: электрические потери — на нагрев током в обмотках статора и ротора, их принято называть потерями в меди, магнитные потери в стали — на гистерезис и вихревые токи, их принято называть потерями в стали, механические потери — на трение в подшипниках и на вентиляцию. Первые два вида потерь могут быть определены на основании теоретического расчета, но механические потери определяются главным образом опытным путем.

Потери в меди статора и ротора: $P_{M1} = m_1 I_1^2 R_1$ и $P_{M2} = m_2 I_2^2 R_2$, однако активное сопротивление обмоток статора нельзя считать равным их сопротивлению при постоянном токе; в проводниках статора заметно сказывается на распределении тока явление поверхностного эффекта. Это увеличение сопротивления может быть учтено коэффициентом (§ 7-8), определяемым расчетным путем. В первом приближении можно принимать этот коэффициент равным 1,05—1,1, т. е. считать, что активное сопротивление об-

моток на 5—10% больше их сопротивления при постоянном токе («омического»). При нормальном рабочем скольжении частота тока в роторе весьма мала, поэтому для ротора можно считать активное сопротивление равным омическому.

Потери в стали машины практически можно отнести целиком к стали статора, так как благодаря малой частоте перемагничивания ротора потерями в его стали можно пренебречь. Потери в стали статора складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи, которые могут быть определены по формулам, приведенным в § 10-4, кроме того, существенное значение имеют потери в стали, создаваемые в основном пульсациями магнитного потока вследствие изменения относительного положения зубцов статора и ротора. Ориентировочно потери в стали можно считать пропорциональными квадрату магнитного потока.

Механические потери $P_{тр}$ (потери на трение) покрываются за счет механической мощности ротора, уменьшая полезную мощность на валу, т. е.

$$P = P_{мех} - P_{тр}$$

Мощность, подведенная из сети, представляет собой сумму

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{мех} + P_c + P_m + P_{доб} = \\ &= P + P_{тр} + P_c + P_m + P_{доб}; \end{aligned}$$

к. п. д. машины определится как отношение

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P + P_c + P_m + P_{тр} + P_{доб}} \quad (14-47)$$

14-20. Работа асинхронной машины в качестве электромагнитного тормоза, индукционного регулятора и фазорегулятора

В ряде случаев является необходимо или быстро затормаживать асинхронный двигатель, преодолевая его силу инерции, или использовать машину для торможения приводного механизма; последнее требуется, например,

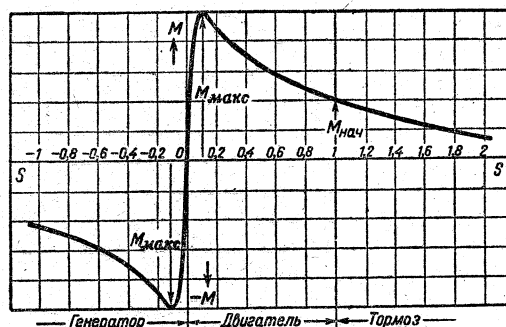


Рис. 14-43. Универсальная характеристика $M = F(s)$ асинхронной машины.

в крановых и подъемных устройствах при спуске грузов.

Простейшим способом торможения является противоключение. Оно заключается в том, что посредством переключения двух проводов (рис. 14-9), питающих статор, изменяется направление вращения магнитного поля; таким образом, направление вращения поля становится противоположным направлению вращения ротора. В этих условиях скольжение $s = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > 1$ и ротор вращается против поля за счет внешней механической силы (например, тяжести опускающегося груза) или за счет силы инерции. В таких условиях ток в роторе развивает момент, противодействующий этому внешнему движущему моменту. Подставив в известные нам уравнения момента (§ 14-13) значение $s > 1$, мы получим значение тормозящего момента, развиваемого машиной; соответствующая тормозная характеристика будет служить продолжением двигательной характеристики $M = F(s)$ (рис. 14-43). Однако для устойчивой работы необходимо, чтобы с увеличением скольжения тормозящий момент машины возрастал; нельзя работать на неустойчивой ветви кривой $M = F(s)$, как это будет иметь место, если мы воспользуемся условиями, соответствующими характеристике рис. 14-43, кроме того, в этих условиях машина потребляет очень большой ток, мы должны перейти на устойчивую ветвь кривой $M = F(s)$, лежащую между $s = 0$ и $s_{кр}$. Как известно (§ 14-14), включением активного сопротивления в цепь ро-

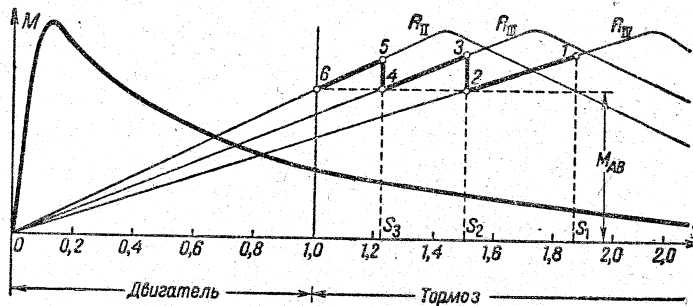


Рис. 14-44. Управление тормозной работой асинхронной машины посредством реостата в цепи ротора.

тора мы смещаем максимум момента в сторону большего скольжения, поэтому мы получим устойчивые условия работы машины при торможении, включив соответствующее активное сопротивление в цепь ротора, — нам нужно включить такое сопротивление R_{IV} , чтобы скольжение s_1 , при котором нам приходится начинать процесс торможения, оказалось меньше s_K (рис. 14-44).

Теперь, если внешний движущий момент M_{AB} окажется меньше тормозящего момента машины, то скольжение будет убывать, пока не установится равновесие моментов и машина не перейдет от режима точки 1 к режиму точки 2. Но если мы уменьшим активное сопротивление в цепи ротора до R_{III} , то тем самым мы переведем машину на новую реостатную характеристику в режим, соответствующий точке 3; благодаря преобладанию тормозящего момента машины вновь будет уменьшаться скорость, пока не установится равновесие моментов (точка 4).

Таким путем, уменьшая активное сопротивление, мы можем довести машину до остановки (точка 6). Если мы будем дальше уменьшать сопротивление, то машина начнет работать двигателем, т. е. будет вращаться в обратную сторону по сравнению с направлением внешнего движущего момента.

Заторможенная асинхронная машина с контактными кольцами может быть использована в качестве автотрансформатора с регулируемым в широких пределах отношением первичного и вторичного напряжений. Подобное устройство исполь-

зуется для регулирования напряжения в распределительных сетях. На рис. 14-45 показана схема соединений такой заторможенной машины, приспособленной в качестве индукционного регулятора; здесь обмотки статора включены под напряжение сети и служат первичными обмотками трансформатора. В каждой фазе системы по отношению ко вторичной сети обмотка ротора соединена последовательно с обмоткой соответствующей фазы статора, образуя известную схему автотрансформатора. Фазное напряжение во вторичной сети $U_{\phi 2}$ представляет собой векторную сумму фазного напряжения ротора $U_{рот}$ (равного фазному напряжению первичной сети $U_{\phi 1}$) и фазного напряжения статора $U_{ст}$, т. е.

$$\dot{U}_{\phi 2} = \dot{U}_{рот} + \dot{U}_{ст}$$

Путем соответствующего поворота ротора можно получить любой сдвиг фаз между напряжениями статора и ротора. Следовательно, векторная сумма этих напряжений U_2 , равная фаз-

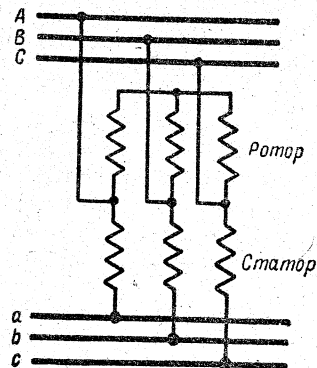


Рис. 14-45. Схема соединений индукционного регулятора.

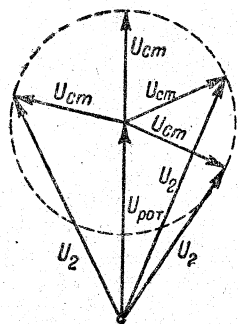


Рис. 14-46. Диаграмма изменения вторичного напряжения индукционного регулятора в зависимости от положения ротора.

ному напряжению вторичной сети, может изменяться в пределах от

$$U_{\text{ф2 макс}} = U_{\text{рот}} + U_{\text{ст}}$$

до

$$U_{\text{ф2 мин}} = U_{\text{рот}} - U_{\text{ст}},$$

вектор $\vec{U}_{\text{ст}}$ поворачивается по отношению к вектору $\vec{U}_{\text{рот}}$ в соответствии с поворотом ротора машины (рис. 14-46).

Индукционный регулятор из-за воздушного зазора, конечно, значительно менее экономичен, чем трансформатор. Вследствие отсутствия вращения условия охлаждения в индукционном регуляторе значительно хуже, чем в асинхронном двигателе, причем в регуляторе, помимо потерь в стали статора, имеют место значительные потери в стали ротора. По этой причине охлаждение индукционного регулятора должно быть довольно интенсивным; крупные регуляторы снабжаются масляным охлаждением.

Наконец, заторможенная машина может быть применена также в качестве фазорегулятора. В этом случае используется возможность регулирования фазы э. д. с. ротора путем соответствующего поворота ротора.

Фазорегуляторы применяются преимущественно для целей измерений и автоматики в тех случаях, когда нужно в широких пределах регулировать фазу напряжения, не меняя его величину.

14-21. Асинхронный генератор

Если посредством внешней механической силы заставить ротор асинхронной машины, включенной в трехфазную сеть, вращаться со скоростью выше синхронной, то ротор будет при вращении обгонять вращающееся магнитное поле и проводники ротора будут пересекать силовые линии в направлении, обратном по сравнению с пересечением при вращении двигателя. Вследствие этого э. д. с. и токи в роторе изменят свое направление на противоположное. В результате сила взаимодействия вращающегося поля и токов ротора также изменит свое направление и станет противодействовать вращению: для поддержания последнего потребуется подача механической энергии ротору, при этом намагничивающий ток останется неизменным, так как условия возбуждения вращающегося поля в асинхронном генераторе и двигателе одни и те же. Мощность машины в таких условиях отрицательна, т. е. машина не потребляет электрическую энергию, а отдает ее в цепь. Скольжение асинхронной машины при работе генератором отрицательно (рис. 14-43), и направление ее э. д. с. статора теперь совпадает с активной составляющей тока, а не противоположно ей, как это имеет место в двигателе. Отметим, что это последнее обстоятельство может служить характерным признаком перехода машины от режима двигателя к режиму генератора.

С возрастанием отрицательного скольжения индуктивное сопротивление ротора машины будет возрастать, в силу чего будет увеличиваться сдвиг фаз между э. д. с. и током в роторе; с другой стороны, пропорционально скольжению растет э. д. с. ротора, и так как тормозящий момент асинхронного генератора выражается так же, как вращающий момент двигателя

$$M_{\text{тор}} = \text{const } \Phi I_2 \cos \phi_2,$$

то, следовательно, так же как и в двигателе при скольжении, соответствующем условию

$$s_{\text{к}} = - \frac{R_2}{X_1'' + X_2},$$

будет иметь место максимальный момент, при превышении которого работа машины будет неустойчива. Таким образом, характеристика $M=F(s)$ у генератора будет в общем напоминать такую же характеристику двигателя (рис. 14-43).

Асинхронный генератор отдает активный ток в сеть, но при этом потребляет из сети отстающий реактивный (намагничивающий) ток, как и двигатель, и поэтому нуждается для получения этого тока в источнике реактивной энергии. Таким источником может служить синхронный генератор, работающий параллельно с асинхронным на общую сеть, следовательно, асинхронный генератор не может работать независимо, а работая параллельно на сеть, он своим реактивным током ухудшает ее коэффициент мощности. Отметим, однако, что необходимый реактивный ток асинхронному генератору могут давать включенные параллельно с ним статические конденсаторы. В этом случае при пуске асинхронного генератора в ход имеют место явления самовозбуждения устройства за счет остаточного магнетизма асинхронной машины.

Преимуществом асинхронного генератора является его простота устройства и обслуживания. По этой причине названные генераторы иногда используются для автоматических гидростанций небольшой мощности, работающих параллельно на общую сеть.

14-22. Однофазные асинхронные двигатели

Возможность простого получения вращающегося магнитного поля является одним из основных преимуществ трехфазного тока перед однофазным. Однако асинхронный двигатель может быть построен и для однофазного тока, только по своим техническим качествам однофазный двигатель существенно уступает трехфазному. Область применения этих двигателей весьма ограничена, они изготавливаются преимущественно в виде двигателей малой мощности (например, для вентиляторов).

Статор однофазного двигателя снабжается однофазной обмоткой, так как двигатель питается однофазным переменным током, но ротор имеет многофазную обмотку: короткозамкнутую или с контактными кольцами; в последнем случае двигатель снабжается пусковым реостатом.

Магнитное поле двигателя является переменным пульсирующим полем, ось которого

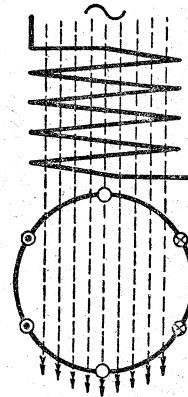


Рис. 14-47. Направление токов в стержнях ротора однофазного двигателя.

неподвижна в пространстве. В проводниках ротора это поле индуцирует токи, как во вторичной обмотке трансформатора. На рис. 14-47 схематически показано направление токов в стержнях короткозамкнутого ротора однофазного двигателя. Вращающие моменты, возникающие благодаря взаимодействию токов двух половин обмотки ротора с магнитным полем противоположны по направлению, в силу чего результирующий момент, действующий на неподвижный ротор, равен нулю.

Это отсутствие начального момента является характерной особенностью однофазного двигателя при обычной схеме соединения, следовательно, он не может сам тронуться с места. Однако если посредством внешней силы раскрутить ротор, то двигатель в дальнейшем будет вращаться самостоятельно и может быть нагружен.

Подобные же явления можно наблюдать у трехфазного двигателя при обрыве одного из питающих проводов. Если провод оборван у неподвижного двигателя, то он при создавшемся, таким образом, однофазном питании не может взять с места. Если же провод оборван у вращающегося трехфазного двигателя, то последний будет продолжать работать уже как однофазный. Но нагрузка его при этом должна быть снижена до 50—60% от номинальной. Режим работы двигателя в качестве однофазного не может быть допущен при мощности на его валу, близкой к номинальной, так как его обмотки вследствие увеличения токов за короткое время чрезмерно нагреваются.

Для объяснения указанных явлений представим себе переменное пульсирующее поле однофазной обмотки статора, как результирующее двух магнитных полей, вращающихся в противоположные стороны с синхронной скоростью. Соответствующие им потоки будут одинаковы и равны каждый половине пульсирующего потока (рис. 14-48):

$$\Phi_I = \Phi_{II} = \frac{\Phi}{2}.$$

Но приведенное соотношение правильно лишь для неподвижного ротора (также для ротора с разомкнутой обмоткой). При непо-

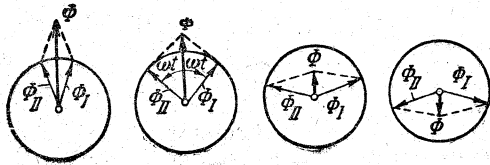


Рис. 14-48. Разложение переменного магнитного поля на два круговых вращающихся магнитных поля.

движном роторе оба вращающихся поля будут индуцировать в его обмотке одинаковые токи, которые, взаимодействуя с соответствующими полями, создадут одинаковые вращающиеся моменты, направленные в разные стороны и уравновешивающие друг друга. Следовательно, ротор самостоятельно не может прийти во вращение. Если же каким-либо способом привести ротор во вращение в любом направлении, то в дальнейшем он будет вращаться в этом направлении самостоятельно, дойдя до скорости, близкой к синхронной. То поле, которое вращается в том же направлении, что и ротор, называется прямо вращающимся или прямым, другое поле называется обратным вращающимся или обратным (инверсным). При вращении ротора приведенное выше соотношение для магнитных полей не будет правильным. Обратное поле будет сильно ослаблено и при скорости, близкой к синхронной, результирующее поле будет почти круговым вращающимся полем. Ослабление обратного вращающегося поля при работе однофазного двигателя объясняется следующим образом. Ротор относительно обратного поля имеет скольжение

$$\frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1-s)}{n_1} = 2-s.$$

Следовательно, частота токов, индуцированных в роторе обратным полем, высока [например, при $s=0,05$ она равна $(2-s) \cdot 50 = 97,5$ гц]. При такой частоте индуктивное сопротивление ротора во много раз больше его активного сопротивления и токи от обратного поля будут почти чисто реактивными. Они оказывают сильное размагничивающее действие, т. е. ослабляют обратное поле.

Таким образом, при малых значениях скольжения вращающийся момент в однофазном асинхронном двигателе создается главным образом прямым полем. Тормозящий момент от взаимодействия обратного поля, сильно ослабленного, и токов, индуцированных им (почти чисто реактивных), имеет малое значение.

На рис. 14-49 показаны как функции скольжения кривые моментов прямого M_I , обратного M_{II} и результирующего M . Отметим, что в отличие от трехфазного двигателя при синхронной скорости ($s=0$) на ротор однофазного двигателя воздействует небольшой отрицательный момент обратного поля.

Так как ток в роторе однофазного двигателя образуется наложением двух токов резко отличающихся частот, то потери в меди ротора можно считать равными сумме потерь, вызываемых каждым из токов отдельно. Поэтому потери в меди ротора однофазного двигателя

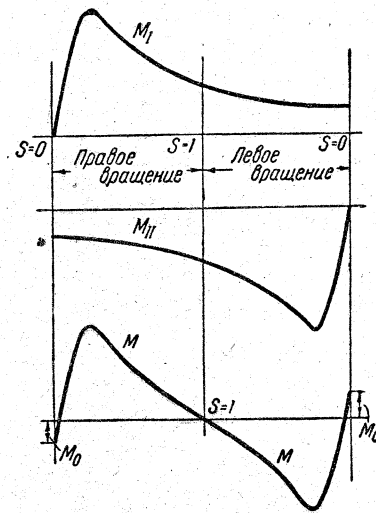


Рис. 14-49. Кривые зависимости от скольжения прямого M_I , обратного M_{II} и результирующего M вращающихся моментов однофазного двигателя.

примерно вдвое больше потерь в роторе соответствующего трехфазного двигателя.

Возрастание скольжения у однофазного двигателя, кроме увеличения I_1 и уменьшения $\cos \phi$, вызывает еще и увеличение тормозящего момента, создаваемого обратным полем. По этой причине работа однофазного двигателя менее устойчива и его максимальный момент меньше, чем у соответствующего трехфазного двигателя.

Коэффициент полезного действия однофазного двигателя вследствие дополнительных потерь ниже, чем у трехфазного двигателя.

Пуск в ход однофазного двигателя обычно осуществляется путем применения вспомогательной фазы. Последняя представляет собой дополнительную обмотку, размещенную в пазах статора так, чтобы ее поток был сдвинут пространственно на 90° по отношению к потоку главной обмотки статора. Ток в этой дополнительной обмотке должен быть сдвинут по фазе по отношению к току главной обмотки на угол, возможно более близкий к 90° . Если эти условия осуществлены, то магнитные потоки главной и дополнительной обмоток вместе создают вращающееся магнитное поле, это поле несимметрично и создает относительно небольшой, но достаточный для пуска двигателя вращающийся момент. Дополнительная обмотка выключается, когда двигатель достигает нормальной скорости, так как она рассчитывается на кратковременную нагрузку. Для получения большого сдвига фазы тока в дополнительной обмотке можно включить последовательно с ней емкость (рис. 14-50) или активное сопротивление. Емкость применяется чаще, так как в настоящее время статические конденсаторы относительно дешевы и надежны.

Если обмотка вспомогательной фазы не отключается во время работы, то, по существу,

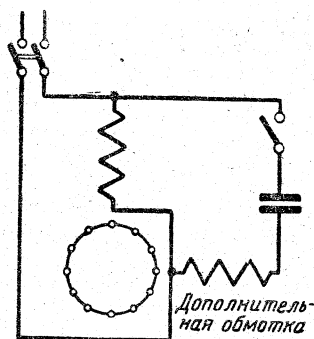


Рис. 14-50. Схема пуска однофазного двигателя при помощи вспомогательной фазы с конденсатором.

двигатель является двухфазным, питаемым от однофазной цепи. Такими двигателями с постоянно работающей вспомогательной фазой являются конденсаторные двигатели и двигатели с расщепленным полюсом.

Конденсаторные двигатели, отличаются от вышеописанных двигателей с дополнительной пусковой обмоткой (рис. 14-50) тем, что их вспомогательная обмотка и конденсаторы в ее цепи рассчитываются на длительную работу в условиях нагруженного двигателя. По свойствам своим эти двигатели приближаются к трехфазным асинхронным двигателям, по сравнению с однофазными двигателями они обладают большим максимальным моментом и лучшим $\cos \phi$.

В двигателе с расщепленным полюсом (рис. 14-51) применена короткозамкнутая обмотка K . Эта обмотка охватывает часть явно выраженного полюса, на котором размещена главная (первичная) обмотка I . Ток I_1 обмотки I , создаваемый напряжением сети, возбуждает магнитный поток Φ_1 . Часть последнего, пронизывая обмотку K , индуцирует в ней ток I_2 , значительно отстающий по фазе от I_1 . Этот ток возбуждает второй магнитный поток двигателя. Таким путем в двигателе создается система двух переменных магнитных потоков, не совмещенных пространственно и сдвинутых по фазе, — условия, подобные условиям в индукционных электроизмерительных приборах, следовательно,

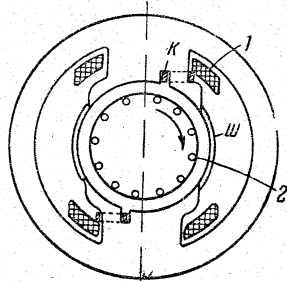


Рис. 14-51. Схема устройства двигателя с расщепленным полюсом.

но, создается вращающееся магнитное поле, которое, воздействуя на короткозамкнутый ротор, создает соответствующий вращающий момент. Эти двигатели изготовляются миниатюрными мощностью 0,5—30 вт и широко применяются для самых различных целей, в частности в качестве электропривода исполнительных механизмов различных устройств автоматики.

14-23. Лабораторная работа. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Опыт пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Для того чтобы правильно соединить зажимы обмоток статора двигателя, следует предварительно разметить их «начала» и «концы». Эта разметка выполняется при помощи вольтметра совершенно так же, как для обмоток трехфазного трансформатора (§ 13-23).

Схема соединений для опыта пуска в ход дана на рис. 14-52. Для уменьшения пускового тока в схеме предусмотрено часто применяемое на практике переключение со звезды на треугольник. На время пуска обмотки статора соединяются по схеме звезды; когда же двигатель достигнет примерно нормальной скорости, тогда его обмотки следует переключить на соединение треугольником. Такое переключение уменьшает пусковой ток более чем в 3 раза. Так как для самого двигателя пусковой ток не опасен и при соединении треугольником, то следует из опыта (ориентировочно) определить пусковой ток как при соединении звездой, так и при соединении треугольником. Во время этого опыта амперметр A' на малый ток и цепь тока ваттметра остаются замкнутыми накоротко посредством ключей.

Наконец, меняя местами два провода, соединяющие статор с сетью, следует осуществить реверсирование (изменение направления вращения) двигателя.

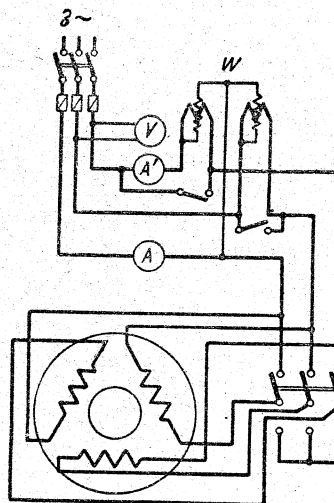


Рис. 14-52. Схема исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

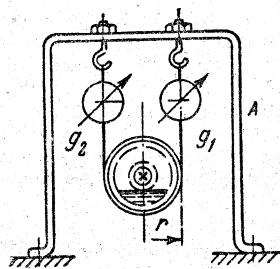


Рис. 14-53. Схема устройства ленточного тормоза.

Простейшими устройствами для нагрузки двигателей в лабораториях при исследованиях являются ленточный и электромагнитный тормоза и, наконец, нагрузочный генератор постоянного тока.

Опыт нагрузки двигателя посредством ленточного тормоза. Схема устройства ленточного тормоза показана на рис. 14-53. Этот тормоз состоит из железной рамы А, установленной на фундаменте над шкивом двигателя. К раме подвешены два пружинных динамометра g_1 и g_2 , которые можно поднимать или опускать при помощи болтов, пропущенных через раму А. Динамометры натягивают ленту или пеньковую веревку, которая охватывает шкив двигателя. Этот шкив для улучшения охлаждения сделан полым и в него наливается вода.

Нагрузка двигателя, создаваемая такой тормозной установкой, определяется следующим образом: усилие F на окружности шкива равно разности показаний динамометров

$$F = g_1 - g_2,$$

а соответствующий тормозной момент равен произведению силы на плечо, т. е. на радиус шкива

$$M = Fr = (g_1 - g_2)r \text{ [кг} \cdot \text{м]},$$

если g_1 и g_2 даны в килограммах, а r — в метрах.

Схема соединений для этого опыта та же, что и для опыта пуска в ход. Следует пустить двигатель в ход, переключить его на соединение треугольником и затем постепенно посредством динамометров увеличивать нагрузку двигателя, пока ток статора не достигнет номинального значения. На основании результатов опыта можно построить механическую характеристику двигателя $n_2 = f(M_{\text{вр}})$.

Далее результаты опыта дают возможность определить к. п. д. двигателя. Эта величина представляет собой отношение мощности P_2 , отдаваемой машиной на валу, к мощности P_1 , получаемой ею из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность P_1 измеряет ваттметр, а мощность P_2 , отдаваемая двигателем, определяется на основании измерения вращающего момента $M_{\text{вр}}$ и скорости вращения двигателя n_2 , так как мощность равна произведению момента на угловую скорость

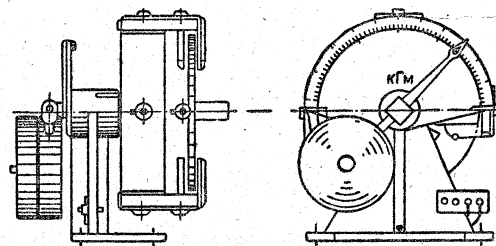


Рис. 14-54. Схема устройства электромагнитного тормоза.

$$P_2 = M_{\text{вр}} \omega,$$

но по показаниям динамометров момент определяется в кгм , поэтому, чтобы выразить отдаваемую мощность в ваттах, необходимо ввести соответствующие коэффициенты

$$\begin{aligned} P_2 &= 9,81 M_{\text{вр}} \omega = 9,81 \frac{2\pi n_2}{60} M_{\text{вр}} = \\ &= 1,027 n_2 M_{\text{вр}} \text{ [вт]}. \end{aligned}$$

Более совершенным и точным устройством для нагрузки двигателя является электромагнитный (индукционный) тормоз (рис. 14-54), сходный по принципу действия с тормозным устройством счетчика (§ 12-9). Система электромагнитов тормоза возбуждается постоянным током, укреплена на валу и может поворачиваться на нем в ограниченных пределах. Магнитный поток этих электромагнитов замыкается через стальной диск тормоза. Диск этот насажен на свободный конец вала нагружаемого двигателя или же вал диска соединяется с валом двигателя муфтой. На валу тормоза, несущем электромагниты, укреплены также груз и указательная стрелка. Отклонения последней отсчитываются на неподвижной шкале, установленной на основании тормоза.

При испытании стальной диск вращается в магнитном поле электромагнитов, вследствие чего в нем индуцируются вихревые токи. Последние, взаимодействуя с полем, электромагнитов, стремятся заставить электромагниты двигаться вслед за диском. Возникающий, таким образом, вращающий момент поворачивает электромагниты и соединенный с ними груз на некоторый угол. Поворот груза создает момент, противодействующий отклонению подвижной части тормоза и при некотором угле отклонения подвижной части (не превышающем 90°) устанавливается равновесие вращающего момента, создаваемого вихревыми токами, и противодействующего момента, создаваемого отклонением груза. Вращающий момент, действующий на подвижную часть тормоза, создается испытываемым двигателем. Противодействующий момент определяется только весом груза, плечом его приложения и углом отклонения. Это дает возможность проградуировать шкалу тормоза для непосредственного отсчета вращающего момента двигателя. Нагрузка двигателя регулируется посредством изменения тока возбуждения электромагнитов: чем больше магнитный поток тормоза, тем

9. На основании результатов опыта построить кривые:

$$n_2 = F(M_{\text{вр}}); \quad \eta = f(M_{\text{вр}}).$$

$$\cos \varphi_1 = \psi(M_{\text{вр}}); \quad I_1 = \varphi(M_{\text{вр}}).$$

14-24. Лабораторная работа. Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором

Опыт нагрузки двигателя. Нагрузкой двигателю могут служить тормозной шкив с динамометрами, электромагнитный тормоз или генератор постоянного тока (§ 14-23). На схеме соединений рис. 14-56 показана

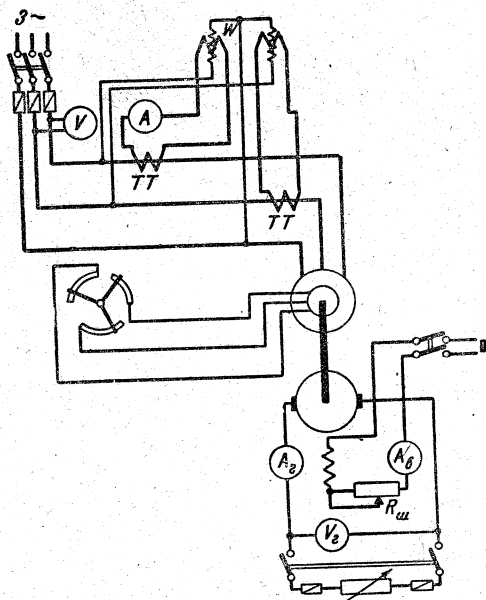


Рис. 14-56. Схема соединений для исследования асинхронного двигателя с фазным ротором.

нагрузка в виде генератора, но если нагрузка осуществляется посредством тормозного шкива, то отпадает лишь часть схемы, относящаяся к генератору.

Зажимы обмоток статора (начала и концы) следует разметить при помощи вольтметра (§ 13-23).

Прежде чем включать двигатель под напряжение, нужно полностью ввести пусковой реостат. Затем, включив ток, нужно постепенно выводить пусковой реостат, тем самым закорачивая кольца ротора. Пуск в ход выполнять при ненагруженном двигателе. Нагрузка осуществляется посредством ленточного тормоза или посредством генератора постоянного тока. В первом случае отдаваемая мощность в ваттах

$$P_2 = 1,027n_2(g_1 - g_2)r,$$

а момент на валу $M_{\text{вр}} = (g_1 - g_2)r$, здесь g_1 и g_2 — показания динамометров, кг; r — радиус шкива, м; n_2 — число оборотов в минуту.

Во втором случае мощность P_2 определяется на основании мощности, отдаваемой

генератором, и его к. п. д. $P_2 = \frac{U_r I_r}{\eta_r}$ (подробнее см. § 14-23); при этом вращающий момент двигателя будет:

$$M_{\text{вр}} = \frac{U_r I_r}{1,027n_2 \eta_r}.$$

Нагрузку двигателя следует увеличивать до тех пор, пока ток статора I_1 не достигнет своего номинального значения.

По данным этого опыта строятся рабочие характеристики двигателя, кривые зависимости от вращающего момента I_1 , $\cos \varphi_1$, n_2 и η . Так как амперметр и ваттметр включены через трансформаторы тока, то их показания следует умножить на k_i — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Опыт регулирования скорости. Для этого опыта нужно внести следующие изменения в соединения первого опыта. Во-первых, необходимо заменить пусковой реостат специальным реостатом больших габаритов, рассчитанным на длительную нагрузку током ротора. Во-вторых, для измерения сопротивления этого реостата нужно включить в цепь ротора амперметр и вольтметр (рис. 14-57).

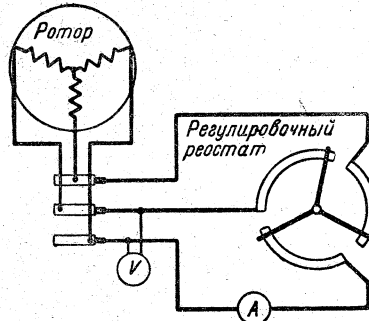


Рис. 14-57. Схема включения измерительных приборов в цепь ротора.

Сначала следует пустить двигатель в ход обычным порядком и вывести при этом полностью реостат. Затем нужно нагрузить двигатель примерно до 60% номинальной нагрузки и постепенно вводить реостат, что будет вызывать уменьшение скорости двигателя n_2 . Приборы в цепи ротора измеряют линейные величины, поэтому сопротивление одной фазы реостата будет:

$$R_p = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{I_2}.$$

На основании результатов этого опыта строится регулировочная характеристика двигателя $n_2 = F(R_p)$.

Кроме того, следует подсчитать к. п. д. $\eta = P_2 : P_1$ двигателя при реостатном регулировании.

План работы

А. Опыт нагрузки двигателя

1. Записать табличные данные двигателя.
2. Разметить при помощи вольтметра начала и концы обмоток статора.

3. Выполнить соединения согласно рис. 14-56.

4. Пустить двигатель в ход без нагрузки, а затем постепенно нагружать его при помощи тормозного шкива и динамометров или при помощи генератора постоянного тока.

Таблица опыта нагрузки асинхронного двигателя посредством ленточного тормоза

Наблюдено						Вычислено					
U	I_1	P_1	n_2	g_1	g_2	$M_{вр}$	s	η	$\cos \varphi_1$	P_2	

Записать показания приборов при 7—10 различных значениях нагрузки.

5. Построить кривые зависимости от момента на валу двигателя n_2 , $\cos \varphi_1$, η и I_1 .

Таблица опыта нагрузки асинхронного двигателя посредством генератора постоянного тока

Наблюдено				Вычислено								Примечания
Двигатель		Генератор		P_2	$M_{вр}$	s	η	$\cos \varphi_1$				
U	I_1	P_1	n_2						U_G	I_G	I_B	

Б. Опыт регулирования скорости двигателя

6. Изменить схему соединений, заменить пусковой реостат регулировочным и включить

амперметр и вольтметр в цепь ротора (рис. 14-57).

Таблица опыта реостатного регулирования скорости асинхронного двигателя, нагружаемого тормозным шкивом

Наблюдено								Вычислено					
U	I_1	P_1	n_2	U_2	I_2	g_1	g_2	R_D	P_2	$M_{вр}$	s	η	$\cos \varphi_1$

Таблица опыта реостатного регулирования скорости асинхронного двигателя, нагруженного генератором постоянного тока

Наблюдено										Вычислено				
Двигатель					Генератор					P_2	$M_{вр}$	s	η	$\cos \varphi_1$
U	I_1	P_1	n_2	U_2	I_2	U_G	I_G	I_B	R_D					

7. Пустить двигатель в ход и загрузить его затем примерно до 60% от номинальной нагрузки.

8. Постепенно вводить реостат в цепь ротора, уменьшая таким образом скорость двигателя; при этом поддерживать постоянной нагрузку P_2 . Записать показания приборов при 5—7 различных значениях n_2 .

9. На основании результатов измерения построить кривые зависимости скорости n_2 и к. п. д. η от сопротивления R_p .

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ

15-1. Значение коллектора

Характерной частью, общей для большей группы электрических машин, является коллектор (рис. 15-1),

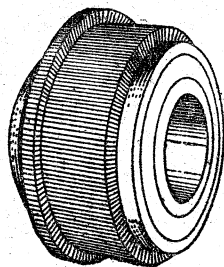


Рис. 15-1. Коллектор.

представляющий собой ряд медных изолированных друг от друга пластин, образующих цилиндрическую поверхность. Пластинки коллектора соединяются проводниками с обмоткой машины, размещенной на ее вращающейся части (на роторе). На коллектор накладываются неподвижные щетки, посредством которых осуществляется соединение вращающейся обмотки машины с внешней электрической цепью. Ниже мы рассмотрим подробнее принцип действия коллектора.

Применение коллектора дает машине ряд ценных свойств, из которых первое — возможность выпрямления переменной э. д. с., индуцируемой во

вращающейся обмотке, в постоянное напряжение на щетках.

Коллектор является необходимой частью машин постоянного тока, но, кроме того, применение коллектора позволило создать коллекторные двигатели переменного тока, обладающие некоторыми ценными особенностями. Наконец, коллектором снабжаются одноякорные преобразователи, применяемые для преобразования переменного тока в постоянный или постоянный в переменный.

С другой стороны, коллекторные машины значительно дороже в изготовлении, а в эксплуатации требуют специального ухода и менее выносливы.

В соответствии с относительным практическим значением отдельных типов коллекторных машин мы более подробно рассмотрим машины постоянного тока.

15-2. Основные части машины постоянного тока

Основными частями машины постоянного тока являются якорь и электромагниты.

Неподвижная часть — станина (рис. 15-2) — изготавливается обычно из литой стали. С внутренней стороны на станине укрепляются сердечники полюсов; на концах эти сердечники снабжаются полюсными наконечниками («полюсными башмаками»); задачей последних является более равномерное распределение магнитной индукции вдоль окружности якоря. На сердечники надеты катушки, составляющие обмотку возбуждения машины.

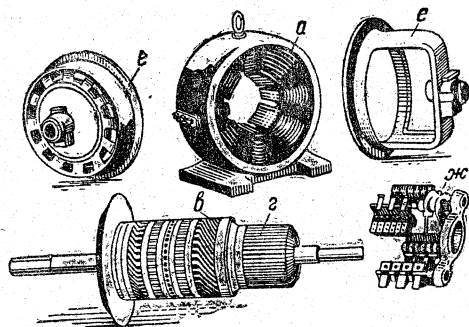


Рис. 15-2. Машина постоянного тока в разобранном виде.

a — станина; *b* — якорь; *c* — продлинниковые щиты; *г* — коллектор; *ж* — траверса со щеткодержателями.

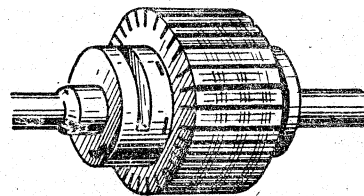


Рис. 15-3. Необмотанный якорь машины постоянного тока.

Станина машины служит замыкающей частью — ярмом магнитопровода.

Кроме основных полюсов возбуждения, на станине посередине между сердечниками главных полюсов помещаются сердечники дополнительных полюсов, катушки которых соединяются последовательно с якорем. Назначение дополнительных полюсов — улучшение коммутации (§ 15-8).

Якорь (ротор) машины представляет собой цилиндрическое тело, собранное из листовой электротехнической стали, обычно толщиной в 0,5 мм (рис. 15-3). Якорь является вращающейся частью машин, в его пазах размещается обмотка, соединенная проводниками с укрепленным на валу якоря коллектором.

Пластины коллектора изолируются друг от друга и от корпуса миканитом (рис. 15-4).

На коллектор опираются неподвижные в пространстве комплекты угольных или медных щеток, установленных в щеткодержателях. Таким образом, при вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение по отношению к полюсам машины.

В щеткодержателе щетка *щ* (рис. 15-5) пружиной *p* прижимается к коллектору. Щеткодержатели укрепляются на щеточных болтах и щеточной

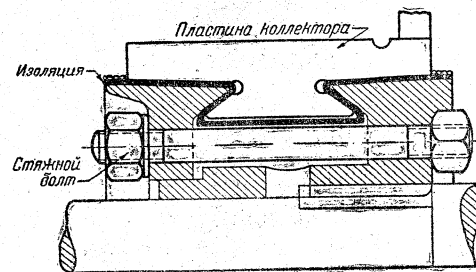


Рис. 15-4. Крепление пластин коллектора.

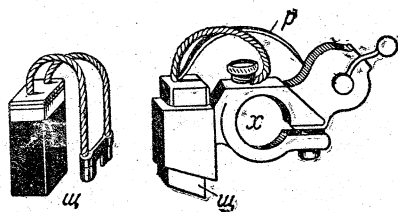


Рис. 15-5. Щетка, справа она же в щеткодержателе.
щ — щетка; р — пружина; х — отверстие для щеточного болта.

траверсе, которая связывается либо с подшипником щитом машины, либо с ее станиной. Траверсу можно поворачивать и тем самым изменять положение всей системы щеток по отношению к полюсам машины. Щеточные болты изолируются от траверсы. Через коллектор и щетки якорь машины соединяется с внешней цепью.

В машине имеются две электрические цепи: цепь якоря и цепь возбуждения.

Машина постоянного тока обратима: если машину вращает первичный двигатель и магнитное поле машины возбуждено, то в якоре наводится э. д. с. и через коллектор и щетки машина посылает постоянный ток во внешнюю цепь — в якорь этот ток, взаимодействуя с полем машины, создает тормозящий момент, преодолеваемый первичным двигателем. В таких условиях машина работает генератором. Если же якорь и обмотка возбуждения машины включены под постоянное напряжение, то ток, проходящий через обмотку якоря, взаимодействуя с полем машины, создает вращающий момент, под действием которого якорь вращается и в его обмотке наводится противо-э. д. с. Машина работает двигателем, превращая электрическую энергию в механическую.

15-3. Принцип действия коллектора

Простейший по устройству кольцевой якорь представляет собой полый цилиндр, собранный из листовой электротехнической стали. Обмотка якоря обвивает полый цилиндр, образуя замкнутый контур. Магнитный поток пронизывает якорь, минуя его внутреннюю полость (рис. 15-6).

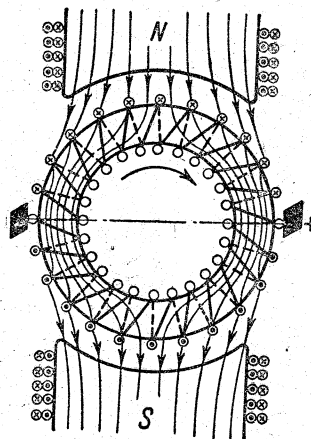


Рис. 15-6. Направление э. д. с. в обмотке кольцевого якоря.

При вращении якоря э. д. с. будет индуцироваться только в проводниках, лежащих на наружной стороне якоря, части же обмотки, лежащие на внутренней и торцовых сторонах якоря, не будут участвовать в образовании э. д. с. и будут выполнять лишь роль соединительных проводников. Схематически обмотка кольцевого якоря показана на рис. 15-6. Определяя направление э. д. с., мы видим, что э. д. с. в витках обмотки, движущихся под северным полюсом, направлено противоположно по направлению э. д. с., индуцируемым в витках, движущихся под южным полюсом. Так как устройство машины симметрично, то эти э. д. с. в замкнутой обмотке якоря взаимно уравновешиваются и никакого внутреннего тока в обмотке не возникает. Чтобы использовать э. д. с. обмотки, мы можем соединить ее с внешней нагрузочной цепью посредством неподвижных щеток. Место щеток мы должны выбрать так, чтобы полностью использовать э. д. с., даваемую обмоткой. Щетки делят обмотку на две параллельные ветви с одинаковыми э. д. с. В каждой из параллельных ветвей обмотки все э. д. с. должны иметь одинаковое направление, в противном случае мы не используем полностью э. д. с., даваемую обмоткой (в предельном случае, когда щетки поставлены под серединами полюсов, напряжение между ними будет равно

нулю). Направление э. д. с. в проводниках обмотки определяется направлением магнитного поля, направлением вращения якоря.

Индукция имеет наибольшее значение под серединой полюсов машины, а в точках, находящихся на линии, перпендикулярной к оси полюсов и проходящей через центр якоря, индукция будет равна нулю. Распределение индукции вдоль окружности якоря зависит от магнитного сопротивления вдоль окружности машины, а следовательно, от формы полюсных наконечников. На рис. 15-7 показана в развернутом виде кривая распределения индукции вдоль окружности якоря. Точки a и b носят название нейтральных линий, соединяющая их, — нейтральной линии, а область, в пределах которой можно считать индукцию практически равной нулю, — нейтральной зоны.

Следовательно, щетки должны стоять на нейтрали, т. е. в точках a и b (рис. 15-7).

Таким образом, на щетках мы будем получать постоянное напряжение, хотя э. д. с. каждого из проводников якоря является переменной. На щетках мы получаем напряжение параллельной ветви обмотки якоря; эта ветвь состоит из группы последовательно соединенных, непрерывно движущихся проводников, отдельные проводники переходят непрерывно из области северного полюса в область

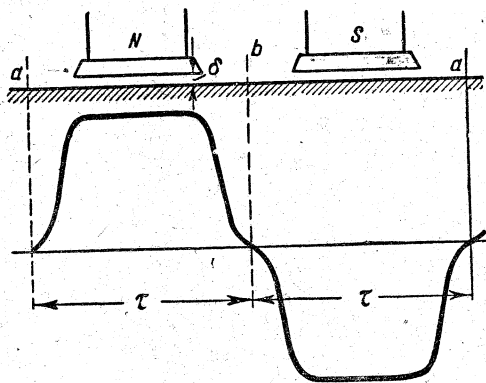


Рис. 15-7. Кривая распределения магнитной индукции вдоль окружного якоря.

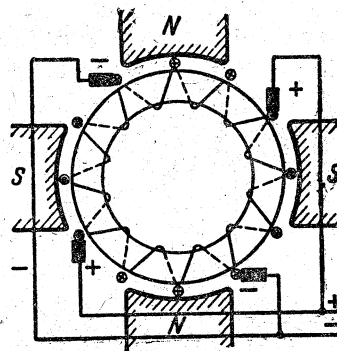


Рис. 15-8. Обмотка с двумя парами параллельных ветвей ($a = 2$).

южного полюса, меняя направление своей э. д. с., но в то же время положение каждой группы проводников, образующей параллельную ветвь обмотки, остается неизменным по отношению к полюсам машины и благодаря этому напряжению на щетках машины постоянно. Процесс переключения элементов обмотки из одной параллельной ветви в другую носит название коммутации.

Если вместо двух полюсов машина имеет четыре, то для использования ее э. д. с. при рассматриваемой нами спиральной обмотке понадобятся четыре щетки, которые должны быть соединены между собой попарно (рис. 15-8). Эти щетки разделяют обмотку на две пары параллельных ветвей, а в общем случае при p парах полюсов на a пар параллельных ветвей.

В рассматриваемой нами обмотке кольцевого якоря число пар полюсов p равно числу пар параллельных ветвей обмотки a .

Приспосабливать обмотку якоря для непосредственного контакта щеток нецелесообразно; гораздо лучше и надежнее этот контакт щеток с обмоткой якоря может быть осуществлен посредством специально для этого приспособленных пластин коллектора; эти пластины соединяются проводниками с отдельными витками замкнутой обмотки якоря (рис. 15-9) и, таким образом, щетки посредством коллектора также делят в нейтральных точках обмотку якоря на параллельные ветви.

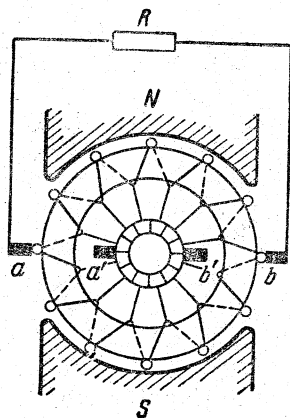


Рис. 15-9. Коллекторные пластины как замена непосредственного контакта щеток с проводниками якоря.

15-4. Барабанный якорь, петлевая и волновая обмотки

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяется по той причине, что при спиральной обмотке более половины длины ее не участвует в образовании э. д. с., а служит лишь для соединения между собой активных проводников, лежащих на внешней стороне кольцевого якоря.

Значительно лучше использована медь в обмотках барабанного якоря. Барабанный якорь — цилиндр, собранный из электротехнической стали, в пазах которого только с внешней стороны барабана размещаются проводники обмотки якоря (рис. 15-2 и 15-3). Объединяя проводники якоря в обмотку, мы не должны соединять непосредственно друг с другом два рядом лежащие проводника, так как их

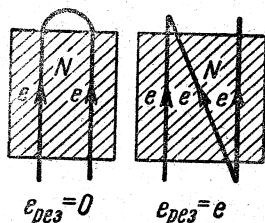


Рис. 15-10. Последовательное соединение двух проводников, соседних по окружности якоря.

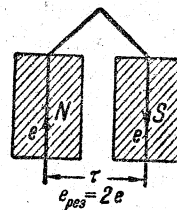


Рис. 15-11. Последовательное соединение проводников, лежащих под разноименными полюсами.

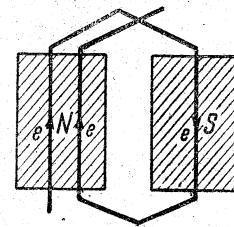


Рис. 15-12. Виток петлевой обмотки.

результатирующая э. д. с. будет близка к нулю (рис. 15-10). Целесообразно соединять последовательно проводники, э. д. с. которых противоположны по фазе, т. е. проводники, удаленные друг от друга примерно на одно полюсное деление (рис. 15-11). Тогда поток, образуемый двумя проводниками, будет охватывать почти весь поток полюса. Если машина имеет больше, чем одну пару полюсов, то, образовав виток из двух проводников, мы можем дальше присоединить третий проводник, вернувшись под исходный полюс (рис. 15-12); таким путем соединяются петлевые обмотки, называемые также параллельными обмотками, но мы можем присоединить к витку третий провод, лежащий по окружности полюсом (рис. 15-13), — это способ соединения волновой, иначе последовательной, обмотки.

Петлевая обмотка образует число параллельных ветвей, равное числу полюсов

$$2a = 2p.$$

Это — характерная особенность петлевой обмотки.

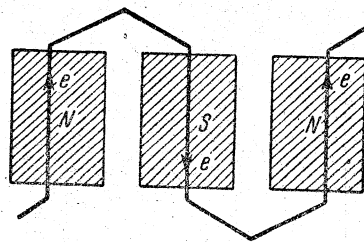


Рис. 15-13. Виток волновой обмотки.

Характерная особенность волновой обмотки — необязательность равенства числа полюсов и числа параллельных ветвей якоря.

15-5. Электродвижущая сила якоря

В проводниках якоря наводится переменная э. д. с. с частотой $f = \frac{pn}{60}$ совершенно так же, как в обмотке генератора переменного тока.

В каждом витке обмотки возникает э. д. с.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt},$$

виток обмотки якоря проходит расстояние полюсного деления τ за время полупериода переменной э. д. с. якоря, т. е. время $\frac{T}{2}$, причем поток, сцепленный с этим витком, изменяется в пределах от $+\Phi$ до $-\Phi$. Следовательно, среднее значение э. д. с. наводимой в одном витке за указанное время, будет:

$$E_{\text{ср}} = - \frac{2}{T} \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = 4\Phi \frac{pn}{60}.$$

Щетки машины суммируют э. д. с., индуцируемые в отдельных витках за полупериода, поэтому э. д. с. якоря будет равна сумме средних значений э. д. с. отдельных витков каждой параллельной ветви обмотки. Если обмотка состоит из N проводников, образующих $\frac{N}{2}$ витков и разделена щетками на $2a$ параллельных ветвей, то, следовательно, в каждой параллельной ветви обмотки последовательно соединены $\frac{N}{4a}$ витков, причем э. д. с. параллельной ветви равна э. д. с. якоря.

Таким образом, э. д. с. якоря будет:

$$E_{\text{я}} = E_{\text{ср}} \frac{N}{4a}$$

или

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = k_E n \Phi, \quad (15-1)$$

где k_E — величина, постоянная для данной машины.

Как показывает это уравнение, э. д. с. машины постоянного тока можно регулировать путем изменения или магнитного потока или скорости вращения якоря.

15-6. Тормозящий и вращающий моменты

В машине постоянного тока тормозящий момент генератора и вращающий момент двигателя весьма просто определяются на основании закона Ампера. Так как обмотка якоря состоит из $2a$ параллельных ветвей, между которыми делится ток якоря, то следовательно, в каждом из проводников якоря проходит ток $I = \frac{I_{\text{я}}}{2a}$. Ток в проводнике, взаимодействуя с магнитным полем машины, создает силу

$$F = BIl = B \frac{I_{\text{я}}}{2a} l.$$

Эта сила изменяется в зависимости от индукции B , следовательно, в зависимости от положения проводника под полюсом.

Если мы возьмем среднее значение индукции под полюсом, то получим среднее значение амперовой силы

$$F_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} l \frac{I_{\text{я}}}{2a}.$$

Соответствующий момент будет:

$$M_{\text{ср}} = F_{\text{ср}} \frac{D}{2}.$$

Момент, создаваемый всеми N проводниками якоря, будет соответственно больше:

$$M = M_{\text{ср}} N = B_{\text{ср}} l \frac{D}{2} \frac{I_{\text{я}}}{2a} N = C_m B_{\text{ср}} I_{\text{я}},$$

где C_m — величина, постоянная для данной машины.

Далее поверхность якоря в пределах полюсного деления машины равна $\frac{\pi D l}{2p}$;

произведение этой площади на среднюю индукцию дает поток одного полюса.

$$\Phi = B_{\text{ср}} \frac{\pi D l}{2p}.$$

Заменяя в уравнении момента

$$B_{\text{ср}} l D = \frac{\Phi 2p}{\pi},$$

находим:

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \Phi I_{\text{я}} = k_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}} \quad (15-2)$$

где $k_{\text{м}}$ — величина, постоянная для данной машины,

или, переходя от единиц практической электротехнической системы к килограммометрам, получим:

$$M = \frac{10,2}{2\pi} \frac{p}{a} N \Phi I_{\text{я}} \quad [\text{кгм}]. \quad (15-3)$$

Этот момент является тормозящим при преобразовании механической энергии в электрическую, т. е. в генераторе, и вращающим — при преобразовании электрической энергии в механическую, т. е. в двигателе.

15-7. Реакция якоря

Магнитное поле машины создается одной обмоткой возбуждения только в условиях холостого хода машины, т. е. пока в проводниках якоря нет тока.

В нагруженной машине ток, проходящий по проводникам якоря, создает собственное магнитное поле, поле яко-

ря, которое искажает поле машины. Якорь, по обмотке которого проходит ток, представляет собой соленоид, ось которого совпадает с осью щеток.

На рис. 15-14 схематически показаны главное поле машины, поле якоря и, наконец, результирующее поле. Это наложение поля якоря искажает распределение магнитного потока под полюсом машины, усиливая его с одной стороны полюса и ослабляя с другой стороны, т. е. имеет место поперечное намагничивание полей якоря. Если машина не насыщена, то это поперечное намагничивание не изменит ее э. д. с.; если же она насыщена, то э. д. с. якоря несколько уменьшится, так как вследствие насыщения магнитное поле усиливается под одним краем полюса меньше, чем ослабляется под другим. Когда витки якоря будут проходить то место под полюсом, где индукция усилена реакцией якоря, тогда в них будут индуцироваться соответственно повышенные значения э. д. с. Для большинства машин это обстоятельство не имеет существенного значения, но если машина должна работать при значительных напряжениях между соседними коллекторными пластинами, то такое повышение э. д. с. может вызвать проскакивание искр между пластинами, что в свою очередь может повлечь за собой искрообразование кругом по коллектору — так называемый круговой огонь.

Большое практическое значение имеет вызываемое реакцией якоря

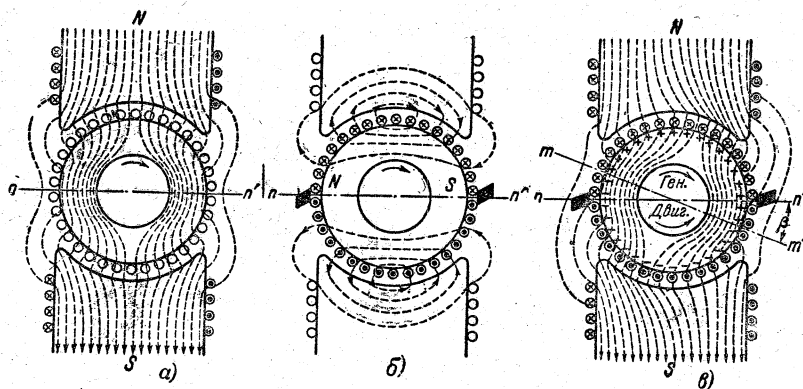


Рис. 15-14. Влияние реакции якоря на поле машины при положении щеток на геометрической нейтрали.

а — поле при холостом ходе; б — поле якоря; в — поле при нагрузке; (n — n' — геометрическая нейтраль; m — m' — физическая нейтраль).

смещение нейтрали в поле машины. В нагруженной машине вследствие наложения поля якоря на основное поле электромагнитов физическая нейтраль $m-m'$ (рис. 15-14) не совпадает с геометрической нейтралью $n-n'$, на которой устанавливаются щетки. В результате при коммутации щетка будет замыкать накоротко секцию обмотки, в которой индуцируется некоторая э. д. с., а последняя будет создавать в контуре щетка — короткозамкнутая секция значительный ток. Это вызовет сильное искрение под щеткой и выгорание пластин коллектора.

Пользуясь правилом «правой руки», мы можем убедиться в том, что при указанных на рис. 15-14 направлениях тока и потока генератор должен вращаться по часовой стрелке, а двигатель согласно правилу «левой руки» — против часовой стрелки. Следовательно, физическая нейтраль у генератора смещается по направлению вращения, а у двигателя — против направления вращения. Поле якоря пропорционально нагрузочному току машины, поэтому реакция якоря изменяется вместе с нагрузкой, а следовательно, вместе с нагрузкой изменяется положение физической нейтрали машины. Если бы мы пожелали установить щетки на физической нейтрали, то мы должны были бы при каждом изменении нагрузки передвигать щетки.

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали изменяется соответственно направление действия реакции якоря. При таком сдвиге щеток н. с. якоря следует рассматривать как состоящую из двух взаимноперпендикулярных составляющих: поперечной составляющей ($AW_{\text{поп}}$), искажающей основное магнитное поле, как это было описано выше, и продольной составляющей ($AW_{\text{пр}}$), которая в отличие от поперечной ($AW_{\text{поп}}$) не искажает поля и не смещает физической нейтрали, а прямо изменяет величину потока, ослабляя его или увеличивая в зависимости от того, куда смещены щетки в генераторном и двигательном режимах.

Для уменьшения вредного влияния реакции якоря в машине постоянного

тока может быть увеличено магнитное сопротивление на пути потока якоря. Это достигается посредством увеличения междужелезного пространства и применением больших индукций для стали зубцов; увеличение индукции вызывает вследствие магнитного насыщения возрастание магнитного сопротивления зубцов, что эквивалентно некоторому увеличению междужелезного пространства.

Конечно, увеличение магнитного сопротивления требует увеличения тока возбуждения для поддержания главного магнитного потока, а следовательно, это связано с увеличением габаритов и веса машины.

Обеспечение удовлетворительной коммутации является первоочередной задачей при компенсации реакции якоря; одно только увеличение магнитного сопротивления на пути потока якоря дает достаточный эффект лишь для малых машин. В большинстве машин постоянного тока для устранения смещения физической нейтрали при изменениях нагрузки и обеспечения хорошей коммутации применяется специальное устройство — дополнительные полюса, это полюса, устанавливаемые на станине машины в пространстве между основными полюсами по оси нейтральной линии (рис. 15-15). Обмотка дополнительных полюсов соединяется последовательно с обмоткой якоря, а направление их магнитного поля противоположно на-

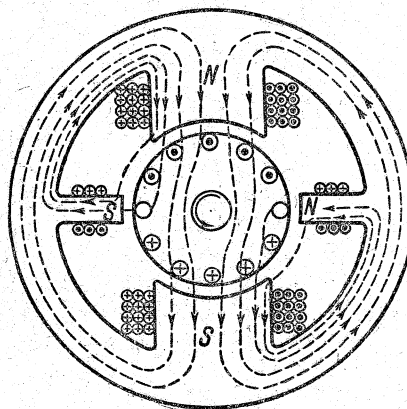


Рис. 15-15. Машина с дополнительными полюсами.

правлению поля якоря, благодаря этому в узкой зоне коммутируемых секций якоря уничтожается поле реакции якоря. Так как поток дополнительных полюсов создается тем же током, что и поток якоря, то компенсирующее действие дополнительных полюсов имеет место при любых изменениях нагрузки машины.

Намагничивающая сила дополнительных полюсов берется примерно на 20—30% больше н. с. реакции якоря в нейтральной зоне. Это делается для того, чтобы в зоне коммутации создавалось небольшое магнитное поле, которое должно индуцировать в коммутируемых секциях якоря так называемую коммутирующую э. д. с. e_k . Задача этой э. д. с. — уравнивать э. д. с. самоиндукции (реактивную э. д. с. e_p), возникающую при изменении тока в коммутируемых секциях. Этим обеспечивается выполнение условия идеальной коммутации — равенство нулю суммы всех э. д. с., возникающих в коммутируемой секции ($e_p + e_k = 0$, подробнее см. § 15-8).

В крупных машинах постоянного тока (примерно от 150 кВт) иногда недостаточно компенсации реакции якоря только в узких пределах нейтральной зоны, достигаемой посредством дополнительных полюсов. Деформация магнитного поля у такой машины, создаваемая реакцией якоря, может вызвать повышение напряжения между соседними пластинами коллектора до 40 в и выше.

Для компенсации реакции якоря вдоль всей окружности якоря в таких машинах используется то обстоятельство, что магнитный поток якоря неподвижен по отношению к станине машины, хотя сама обмотка якоря вращается. Ось потока якоря может быть передвинута лишь путем перестановки щеток, так как она совпадает с осью щеток. Это дает возможность компенсировать магнитный поток якоря встречным действием неподвижной обмотки, расположенной на станине. Такая компенсационная обмотка должна быть размещена в пазах станины возможно ближе к вращающемуся якорю; обычно она укладывается в пазы, протампованные в не-

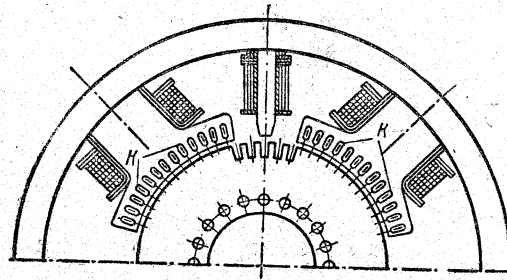


Рис. 15-16. Машина с дополнительными полюсами и компенсационной обмоткой в пазах полюсных наконечников.

сколько расширенных полюсных башмаках (рис. 15-16). Так как поле компенсационной обмотки должно изменяться так же, как и поле якоря при колебаниях нагрузки, то она соединяется последовательно с якорем (как и обмотка дополнительных полюсов).

15-8. Коммутация

Едва ли не важнейшим вопросом надежной работы машины постоянного тока является вопрос о коммутации. Под коммутацией в широком смысле понимается вся совокупность явлений, связанных с изменением тока в секциях обмотки якоря при замыкании этих секций накоротко щетками. Хорошая коммутация должна проходить без искрообразования на коллекторе, а неудовлетворительная коммутация, сопровождающаяся искрообразованием, вызывает при длительной работе машины заметную порчу коллектора и повреждения самой машины.

Искрение под щетками может иметь механические и электрические причины. Механические причины — это плохая подгонка щеток к коллектору, дрожание щеток, выступающие коллекторные пластины и т. п.; все эти причины ухудшают контакт между щеткам и коллектором. Электрической причиной искрообразования является повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, в частности, оно может быть вызвано явлениями самоиндукции секций обмотки якоря. При вращении якоря секции обмотки должны переходить из одной параллельной ветви в другую — соседнюю, что происходит, ког-

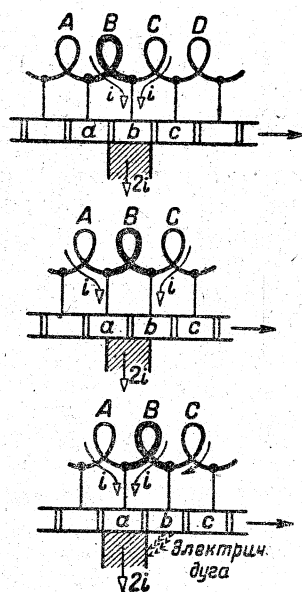


Рис. 15-17. Период коммутации (начало, середина и конец).

да пластины коллектора, к которым присоединяются концы секции, проходят под щеткой и замыкаются ею накоротко (рис. 15-17). За относительно короткий промежуток времени, который необходим для полного перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую, ток в секции должен изменить свое направление на обратное. Изменение тока неизбежно должно породить э. д. с. самоиндукции в коммутируемой секции, а эта э. д. с. может вызвать искрообразование при прерывании тока между сбегающим краем щетки и пластиной коллектора, покидаемой щеткой.

Промежуток времени коммутирования секции называется периодом коммутации T ; он тем больше, чем шире щетка и чем медленнее вращается машина:

$$T = \frac{b_{щ}}{v_k} = \frac{b_{щ} \cdot 60}{\pi D_k n}, \quad (15-4)$$

где $b_{щ}$ — ширина щетки;

v_k — окружная скорость коллектора;

D_k — его диаметр.

Хорошая коммутация может быть достигнута в простейшем случае, когда ход процесса изменения тока в коммутируемой секции определяется исклю-

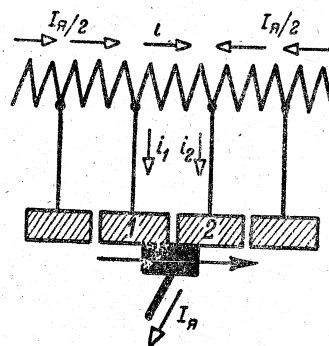


Рис. 15-18. Распределение токов при коммутации.

чительно переходными сопротивлениями контактов щетки с коллекторными пластинами, а э. д. с. с самоиндукции (e_p); так же как и э. д. с. от поля реакции якоря и главного поля, равны нулю (коммутация сопротивлением). Подобные условия имеют место при весьма медленном вращении якоря. Далее, рассматривая простейшие условия, мы пренебрежем небольшим сопротивлением самой коммутируемой секции и ее петушков (соединительных проводников между обмоткой якоря и пластинами коллектора) по сравнению с переходным сопротивлением $R_{щ}$ между щеткой и коллектором. Сопротивление $R_{щ}$ во время процесса коммутации делится между двумя замыкаемыми щеткой пластинами (1 и 2 на рис. 15-18), образуя два переходных сопротивления (мы рассматриваем простейший случай, когда щетка не шире коллекторной пластины).

В начальный момент коммутации вся контактная поверхность щетки покрывает пластину 1; в этот момент переходное сопротивление пластины 1 со щеткой будет равно $R_{щ}$. Затем щетка постепенно сбегает с пластины 1, площадь ее соприкосновения с пластиной уменьшается пропорционально времени t , протекшему с момента начала коммутации, и соответственно возрастает переходное сопротивление, достигая бесконечности в конце периода коммутации T ; таким образом, переходное сопротивление щетки и пластины 1 будет:

$$R_1 = R_{щ} \frac{T}{T-t}.$$

Переходное сопротивление с пластиной 2 у набегающей стороны щетки, наоборот, постепенно уменьшается обратно пропорционально времени t :

$$R_2 = R_{щ} \frac{T}{t}.$$

Так как мы пренебрегаем сопротивлением секции и петушков, то мы можем считать, что ток, поступающий в щетку из двух параллельных ветвей обмотки $\frac{I_{я}}{2} + \frac{I_{я}}{2} = I_{я}$ (мы считаем число пар ветвей, $a = 1$), распределится между двумя пластинами обратно пропорционально переходным сопротивлениям.

Следовательно,

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{T-t}{t},$$

причем ток коммутируемой секции

$$i = \frac{I_{я}}{2} - i_1,$$

а сумма токов в петушках

$$i_1 + i_2 = I_{я}.$$

Решая совместно эти три уравнения, получаем закон изменения тока в коммутируемой секции:

$$i = \frac{I_{я}}{2} \left(\frac{T-2t}{T} \right).$$

Такая зависимость тока i от времени t представляет собой уравнение прямой линии.

Весьма важно для хорошей коммутации то обстоятельство, что в рассматриваемых условиях плотность тока под щеткой будет всюду одинакова, ток будет равномерно распределяться по поверхности контакта.

Однако в действительности при изменении тока в коммутируемой секции неизбежно возникновение э. д. с. самоиндукции, а также э. д. с. взаимной индукции, наводимой в данной коммутируемой секции изменением тока в соседней секции обмотки (последнюю замыкает другая щетка). Результирующая э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции, возникающая в коммути-

руемой секции, называется реактивной э. д. с. $e_p = -L \frac{di}{dt}$; здесь L учитывает

как индуктивность, так и взаимную индуктивность секции. Предположим, что все же удалось сохранить линейное изменение тока при коммутации посредством компенсации э. д. с. e_p другой противоположной э. д. с. Тогда, поскольку линейный закон изменения тока не нарушен, постольку реактивная э. д. с.

$$e_p = -L \frac{di}{dt} = L \frac{I_{я}}{T} = \text{const } I_{я},$$

т. е. эта э. д. с. будет постоянна.

Чтобы компенсировать реактивную э. д. с., необходима другая э. д. с., противоположная e_p по направлению, но равная ей по величине, следовательно, тоже пропорциональная току якоря $I_{я}$. Как уже упоминалось, эта э. д. с., называемая коммутирующей e_k , создается за счет индукции B_k коммутирующего (избыточного) поля дополнительных полюсов:

$$e_k = B_k 2lv\omega_k,$$

где ω_k — число витков коммутируемой секции.

Идеальная коммутация имеет место тогда, когда во все время процесса алгебраическая сумма э. д. с. в коммутируемой секции равна нулю, реактивная э. д. с. полностью уравновешивается коммутирующей э. д. с.

$$e_p + e_k = 0. \quad (15-5)$$

В этом случае коммутация протекает так же, как при коммутации сопротивлением, ток i в коммутируемой секции изменяется линейно в общем случае от $+\frac{I_{я}}{2a}$ до $-\frac{I_{я}}{2a}$ (рис. 15-19).

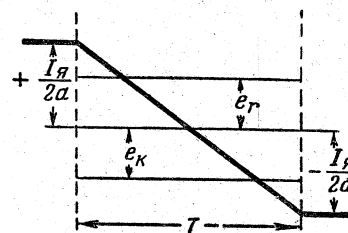


Рис. 15-19. Линейная коммутация.

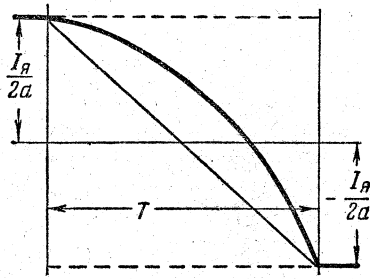


Рис. 15-20. Замедленная коммутация.

Если же во время коммутации $e_p > e_k$, то будет иметь место замедленная коммутация: во время первой части периода коммутации изменение тока i в коммутационной секции будет замедленно (рис. 15-20), а так как в конце периода коммутации ток в секции принудительно должен принять значение $-\frac{I_{\text{я}}}{2a}$, то в конце периода коммутации будет иметь место ускоренное изменение тока в коммутационной секции, вследствие чего в секции индуктируется значительная реактивная э. д. с. Кроме того, замедление в изменении тока i вызывает относительное увеличение тока i_2 (рис. 15-18), а следовательно, и плотности тока под сбегающей частью щетки. В конце процесса эта плотность тока может достигать весьма больших значений, что вызовет сильное нагревание сбегающего края щетки. Наличие значительной реактивной э. д. с. при сильно повышенной плотности тока под сбегающим краем щетки может вызвать искрение — миниатюрные электрические дуги у сбегающего края щетки, возникающие в момент, когда щетка оставляет пластину.

Так как замедленная коммутация создается действием реактивной э. д. с., то улучшение коммутации требует компенсации этой э. д. с. или ее уменьшения. Реактивная э. д. с. $e_p = -L \frac{di}{dt}$, здесь L — результирующая индуктивность секции, прямо пропорциональна квадрату числа витков w_k коммутационной секции и обратно пропорциональна магнитному сопротивлению $R_{\text{маг}}$ поля этой секции (§ 5-4). Реактивная э. д. с. e_p возрастает с увеличением скорости

машины, тока в якоре и числа витков в коммутационной секции. Реакция якоря в той мере, в какой она не компенсирована в зоне коммутации полем дополнительных полюсов, также усиливает реактивную э. д. с. (см. рис. 15-14).

При отсутствии дополнительных полюсов для компенсации реактивной э. д. с. может быть использовано смещение щеток с физической нейтральной по направлению вращения в генераторе или против направления вращения в двигателе, что и делается в машинах мощностью не свыше 1 квт. При таком смещении щеток коммутационная секция будет находиться не в физической нейтральной зоне, а в зоне набегающего полюса, и так как ее витки будут пересекать магнитное поле этого полюса, то в них будет наводиться э. д. с., направленная при указанном выше условии против реактивной э. д. с. Однако при таком способе получения коммутационной э. д. с. эта последняя не будет изменяться пропорционально току якоря, как изменяется реактивная э. д. с., и, следовательно, условие $e_p + e_k = 0$ может быть выполнено только для одной определенной нагрузки; компенсация э. д. с. при какой-либо другой нагрузке может быть осуществлена лишь путем перестановки щеток в новое положение. В большинстве современных машин коммутационная э. д. с. создается полем дополнительных полюсов.

Коммутационная э. д. с., создаваемая дополнительными полюсами, так же как и реактивная э. д. с., прямо пропорциональна току якоря, благодаря чему условие $e_p + e_k = 0$ сохраняется при изменениях нагрузки машины.

Если, наконец, e_k больше e_p , то имеет место ускоренная коммутация. Ускоренная коммутация иногда осуществляется в машинах, работающих с толчкообразной нагрузкой, частым реверсированием и т. п.

Получение ускоренной коммутации требует усиления полного тока дополнительных полюсов и связано с некоторым увеличением внутреннего сопротивления машины, а следовательно, и с увеличением в ней потерь на нагревание.

15-9. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения

Рабочие свойства машин постоянного тока в большей мере зависят от способа соединения обмотки возбуждения с якорем машины. По этому принципу машины разделяются на следующие системы:

А. *Машины параллельного возбуждения* (шунтовые) (рис. 15-21).

В этих машинах обмотка возбуждения присоединяется параллельно к зажимам якоря. Ток возбуждения $I_{\text{в}}$ у них при нормальных условиях работы составляет по отношению к току якоря от 5% у маленьких машин до 1% у крупных машин.

Так как обмотка возбуждения включается непосредственно под напряжение машины U , а ее ток $I_{\text{в}}$ во много раз меньше тока якоря, то сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = U : I_{\text{в}}$ должно быть относительно велико. Для регулирования тока в обмотке возбуждения последовательно с ней включается реостат — так называемый шунтовой регулятор. Для машин параллельного возбуждения характерным является относительное постоянство главного потока и его малая зависимость от нагрузки машины.

Б. *Машины последовательного возбуждения* (сериесные) (рис. 15-22). У этих машин весь ток якоря проходит через обмотку возбуждения. Последняя поэтому выполняется проводом относительно большого сечения и имеет небольшое сопротивление. В этих машинах магнитный поток изменяется в широких пределах в зависимости от изменения нагрузки.

В. *Машины смешанного возбуждения* (компаундные) (рис. 15-23). В этих машинах на полюсных сердечниках



Рис. 15-21. Машина параллельного возбуждения.

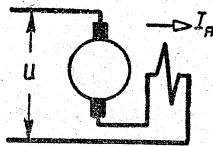


Рис. 15-22. Машина последовательного возбуждения.

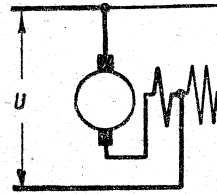


Рис. 15-23. Машина смешанного возбуждения.

размещены две обмотки возбуждения: одна, соединенная последовательно с якорем, и вторая, соединенная параллельно с якорем.

В зависимости от назначения такой машины одна из обмоток возбуждения является основной, имеющей относительно большой полный ток ($I_{\text{в}}$), а вторая служит лишь для относительно слабого дополнительного воздействия на главное поле машины. Таким образом, машина смешанного возбуждения может быть по своим характеристикам в основном машиной параллельного возбуждения с небольшой последовательной обмоткой (например, генератор смешанного возбуждения, дающий напряжение, практически не зависящее от нагрузки) или же машиной последовательного возбуждения с небольшой параллельной обмоткой (например, двигатель смешанного возбуждения с мягкой механической характеристикой). В случае смешанного возбуждения обмотки машины могут иметь согласное соединение, если их н. с. складываются, или же встречное соединение, если их н. с. вычитаются.

Г. *Машины независимого возбуждения* (рис. 15-24). В этих машинах ток возбуждения не зависит от напряжения на зажимах якоря машины, обмотка возбуждения получает ток от независимого источника $E_{\text{в}}$. По ряду свойств машины с независимым возбуждением весьма мало отличаются от машин параллельного возбуждения.

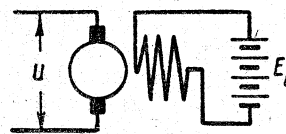


Рис. 15-24. Машина независимого возбуждения.

В прошлом для возбуждения главного магнитного поля машины широко применялись постоянные магниты, затем они были вытеснены электромагнитами, дающими значительную экономию в весе и габаритах машины, и, кроме того, применение электромагнитов дало возможность регулировать магнитный поток машины, что в ряде случаев также весьма ценно. Постоянные магниты применяются в настоящее время главным образом в машинах специального назначения, как-то: в индукторах, служащих для испытания изоляции, в запальных машинах, применяемых в горном и военном деле для взрывания мин электрической искрой на безопасном расстоянии, в автомобильных машинах и т. д.

Любая из машин постоянного тока может быть использована для работы генератором или двигателем, так как машины постоянного тока обратимы. При этом от генераторного режима машина автоматически переходит к двигательному режиму, если вращающий момент первичного двигателя на ее валу заменяется тормозящим моментом механической нагрузки (у машин последовательного возбуждения при таком переходе необходимо переключение зажимов якоря).

15-10. Генератор независимого возбуждения

Условия работы генератора независимого возбуждения являются наиболее простыми, так как рабочий процесс машины в этих условиях не осложнен взаимной зависимостью тока возбуждения и напряжения машины. Ряд характеристик генератора независимого возбуждения практически тождествен с характеристиками генератора параллельного возбуждения, а получение этих характеристик опытным путем в случае независимого возбуждения значительно проще, причем могут быть исследованы и те части кривых, которые при самовозбуждении соответствуют неустойчивому режиму машины. По этим причинам мы рассматриваем относительно обстоятельно работу генератора при независимом возбуждении, хотя практическое при-

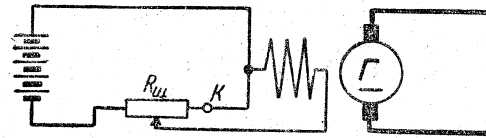


Рис. 15-25. Генератор независимого возбуждения.

менение такого способа возбуждения весьма ограничено.

Обмотка электромагнитов генератора независимого возбуждения включается под напряжение сети постоянного тока через регулировочный реостат $R_{ш}$ (рис. 15-25). Нулевой контакт K этого реостата соединяется со вторым зажимом обмотки возбуждения таким образом, чтобы при переводе ручки реостата в нулевое положение обмотка возбуждения замыкалась накоротко. Это делается для того, чтобы не имело место внезапное прерывание тока возбуждения. Обмотка возбуждения машины постоянного тока пронизывается большим магнитным потоком, вследствие чего быстрое исчезновение этого потока при прерывании тока возбуждения вызовет сильное искрообразование на контактах, замыкающих цепь, в результате возникновения большой э. д. с. самоиндукции. Указанная э. д. с. кроме того, может быть опасна для целостности изоляции обмотки возбуждения. Благодаря замыканию накоротко обмотки возбуждения на нулевом контакте реостата ток в этой обмотке постепенно затухает по экспоненциальному закону (§ 5-7)

$$i = I_{в} e^{-\frac{L}{R} t}$$

Вообще опасность возникновения больших э. д. с. самоиндукции в машинах постоянного тока вынуждает весьма осторожно, в определенной последовательности проводить выключение и включение машины.

Характеристика холостого хода или магнитная характеристика генератора (рис. 15-26) представляет собой зависимость э. д. с. якоря $E_{я}$ или главного потока Φ от тока возбуждения $I_{в}$ при постоянной скорости ($n = \text{const}$) и разомкнутой внешней цепи.

Характеристику холостого хода следует снимать, сначала постепенно по-

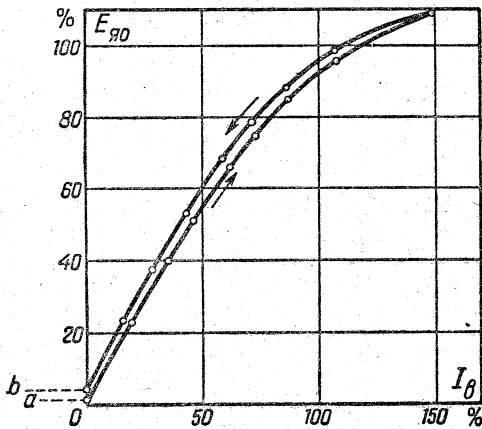


Рис. 15-26. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения.

вышая ток возбуждения до максимального значения, а затем также постепенно понижая его. При постепенном повышении тока возбуждения мы получим восходящую ветвь характеристики, а при понижении тока мы получим нисходящую ветвь характеристики, причем вторая ветвь кривой расположится несколько выше первой, что является следствием влияния остаточного магнетизма; благодаря этому же влиянию обе ветви характеристики не проходят через начало координат, а отсекают на оси отрезки, соответствующие э. д. с. $E_{я0}$, наводимой остаточным магнетизмом. После выключения тока возбуждения остаточный магнетизм, соответствующий отрезку Ob , постепенно в течение более или менее продолжительного промежутка времени уменьшается до значения, соответствующего отрезку Oa .

При малых значениях тока возбуждения I_B , пока сталь машины не насыщена, э. д. с. якоря пропорциональна I_B ; это соответствует прямолинейной части характеристики холостого хода; вследствие насыщения стали в верхней своей части характеристика загибается в сторону оси абсцисс.

В условиях, соответствующих этой части характеристики за «коленом» кривой, сталь машины насыщена и ее магнитное сопротивление относительно велико; обычно генераторы работают при возбуждении, соответствующем этой насыщенной части характеристики, так как при повышении магнитно-

го сопротивления ослабляется влияние реакции якоря на поток и э. д. с. машины, а следовательно, напряжение генератора меньше колеблется при изменениях нагрузки.

Внешней характеристикой генератора называется зависимость его напряжения от тока, отдаваемого им во внешнюю цепь, при постоянном токе возбуждения и скорости. Эту характеристику можно получить, если постепенно нагружать генератор.

Напряжение генератора представляет собой разность э. д. с. якоря $E_{я}$ и потери напряжения $I_{я}R_{я}$ в сопротивлении якоря (в последнее мы включаем и сопротивление переходного контакта щеток), следовательно,

$$U = E_{я} - I_{я}R_{я}. \quad (15-6)$$

При увеличении нагрузки генератора э. д. с. якоря $E_{я}$ постепенно уменьшается вследствие размагничивающего действия реакции якоря; таким образом, напряжение генератора должно уменьшаться с увеличением нагрузки по двум причинам: 1) вследствие увеличения потери напряжения в якоре; 2) вследствие ослабления потока машины действием реакции якоря. Если продолжать увеличивать дальше ток, отдаваемый генератором, сверх номинального значения, то напряжение генератора будет продолжать понижаться, пока не станет равным нулю при коротком замыкании щеток генератора ($R_H=0$). Эта часть кривой показана на рис. 15-27 пунктиром, так как практически мы не можем получить ее, не рискуя сжечь обмотку якоря и разрушить его коллектор чрезмерно большим током; отрезок OK на рис. 15-27 изображает ток короткого замыкания генератора.

Внутренней характеристикой генератора называется зависи-

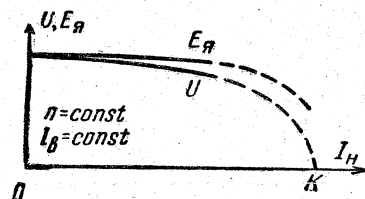


Рис. 15-27. Внешняя и внутренняя характеристики генератора независимого возбуждения.

мость его э. д. с. $E_{я}$ от нагрузочного тока I_H при постоянных скорости и токе возбуждения.

Эту характеристику можно построить на основании внешней характеристики, полученной из опыта, так как

$$E_{я} = U + I_{я} R_{я}.$$

Измерив отдельно $R_{я}$, мы прибавляем затем к ординатам кривой $U = f(I_H)$ соответствующие отрезки $I_{я} R_{я}$. С увеличением тока нагрузки I_H расстояние между кривыми внешней и внутренней характеристик возрастает.

Сопротивление $R_{я}$ относительно мало изменяется от нагрева с увеличением тока нагрузки, поэтому в первом приближении можно считать $R_{я}$ постоянным.

На основании внешней характеристики генератора можно определить его изменение напряжения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке, отнесенное к U_H — напряжению при номинальной нагрузке — и выраженное в процентах:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\% / \rho. \quad (15-7)$$

При работе генератора с независимым возбуждением, следовательно при $I_B = \text{const}$, изменение $\Delta U\%$ составляет от 5 до 10%: тем меньше, чем мощнее машина.

Если регулировать ток возбуждения генератора так, чтобы при увеличении тока нагрузки напряжение генератора оставалось постоянным, то соответствующая кривая зависимости тока возбуждения I_B от нагрузочного тока I_H будет представлять собой регулировочную характеристику машины (рис. 15-28).

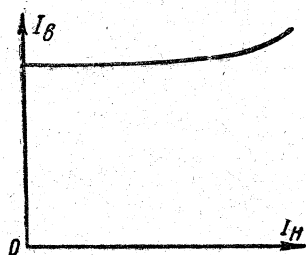


Рис. 15-28. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения.

15-11. Генератор параллельного возбуждения

Машины с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением, работая в качестве генератора, должны сами давать ток для обмоток возбуждения. Но при пуске машины ее э. д. с. равна нулю и, следовательно, отсутствует и ток возбуждения. Однако всегда можно рассчитывать на то, что в ярме и полюсах имеется остаточный магнетизм, причем для самовозбуждения достаточно весьма слабой магнитной индукции.

Первичный двигатель вращает якорь машины, проводники последнего пересекают силовые линии поля остаточного магнетизма; в проводниках якоря индуцируется небольшая э. д. с., которая посылает некоторый малый ток в обмотку возбуждения. Если последняя правильно соединена с якорем, то этот ток усиливает магнитное поле машины, а последнее в свою очередь индуцирует в якоре несколько большую э. д. с.; увеличение э. д. с. якоря вызывает дальнейшее возрастание тока возбуждения и повышение индукции в поле машины и т. д. до тех пор, пока вследствие насыщения стали машины процесс самовозбуждения не остановится при некотором определенном соотношении потока машины, тока возбуждения и э. д. с. якоря. Влияние насыщения стали на ход процесса самовозбуждения можно представить себе следующим образом.

Кривая зависимости главного потока Φ и пропорциональной ему э. д. с. якоря $E_{я}$ от тока возбуждения I_B по своей форме напоминает кривую намагничивания (рис. 15-29). Небольшое увеличение ΔI_B тока возбуждения

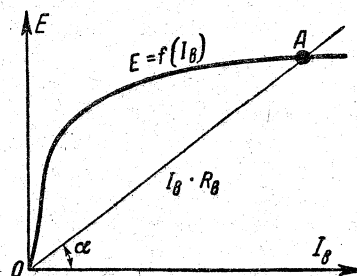


Рис. 15-29. Графическое определение режима генератора в конце процесса самовозбуждения.

при малых насыщениях машины вызывает значительное увеличение $E_{я}$ — э. д. с. якоря, что вызывает новое увеличение тока возбуждения.

Однако вследствие влияния насыщения стали магнитопровода при определенных условиях самовозбуждение прекращается и устанавливается равновесие, определяемое условиями питания цепи возбуждения. В частности, у генератора параллельного возбуждения зависимость тока возбуждения I_B от напряжения практически линейна:

$$I_B = \frac{U}{R_B},$$

а зависимость э. д. с. якоря $E_{я}$ от тока возбуждения $E_{я} = F(I_B)$ и изображается кривой магнитной характеристики (рис. 15-26). Если пренебречь небольшой потерей напряжения в якоре $I_{я}R_{я}$ (ничтожной при холостом ходе), то получим два условия, которым должно удовлетворять напряжение генератора; с одной стороны, оно является линейной функцией: $U = I_B R_B = E_{я}$, с другой стороны, оно же определяется условиями характеристики холостого хода $E_{я} = F(I_B)$. Устойчивый режим будет иметь место для значения, удовлетворяющего условиям обоих уравнений. Этот режим соответствует точке *A* (рис. 15-29), в которой пересекаются кривая $U = F(I_B)$ и прямая $U = I_B R_B$. Для данной машины положение этой точки определяется значением R_B , так как

$$\operatorname{tg} \alpha = k \frac{U}{I_B} = k R_B.$$

Следовательно, положение точки *A* можно регулировать посредством включения реостата $R_{ш}$ в цепь возбуждения. При наличии этого реостата напряжение

$$U = I_B (R_B + R_{ш}).$$

С увеличением сопротивления $R_{ш}$ точка *A* смещается влево — напряжение уменьшается; прямая $U = I_B R_B$ поворачивается против часовой стрелки. Наконец, когда прямая $U = I_B (R_B + R_{ш})$ совпадает с прямолинейной частью характеристики холостого хода, тогда сопротивление цепи возбуждения достигает своего критического значения. При дальнейшем

увеличении этого сопротивления самовозбуждение невозможно. При критическом значении сопротивления напряжение машины практически неустойчиво. Это делает невозможным при холостом ходе генератора получить путем регулирования $R_{ш}$ устойчивое напряжение меньше, чем 60—70% от номинального.

Так как направление э. д. с. якоря зависит от направления вращения, то выбор концов при соединении обмотки возбуждения с якорем зависит от выбора направления вращения якоря. При неправильном соединении якоря с обмоткой возбуждения машина не возбуждается. Иногда при коротком замыкании машина может потерять свой остаточный магнетизм. В этом случае для воссоздания поля остаточного магнетизма необходимо прибегнуть к постороннему источнику постоянного тока, хотя бы относительно малой мощности: обмотку размагнитившейся машины надо включить под напряжением этого источника, после чего соединить машину для нормального самовозбуждения.

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения $E_{я} = f(I_B)$ имеет такой же вид, как и у генератора с независимым возбуждением, но внешняя характеристика у генератора параллельного возбуждения имеет ряд особенностей. У генератора с независимым возбуждением напряжение при нагрузке понижалось вследствие падения напряжения в якоре $I_{я}R_{я}$ и вследствие размагничивающего действия реакции якоря. У генератора параллельного возбуждения (рис. 15-30) к этим причинам добавляется еще уменьшение тока возбуждения вследствие понижения напряжения, так как этот ток сам создается напряжением машины

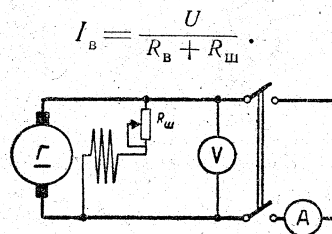


Рис. 15-30. Схема соединений генератора параллельного возбуждения.

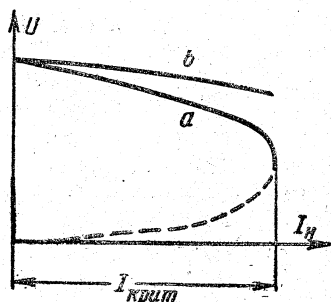


Рис. 15-31. Сопоставление внешних характеристик генератора параллельного возбуждения (а) и генератора независимого возбуждения (b).

По этой причине кривая напряжения генератора падает значительно круче, чем у генератора с независимым возбуждением (рис. 15-31).

При повышении нагрузки генератора параллельного возбуждения свыше определенного значения имеет место саморазмагничивание машины (пунктирная часть кривой).

При работе машины увеличение нагрузочного тока вызывает понижение напряжения машины, уменьшение тока возбуждения и ослабление главного магнитного потока машины. Когда с увеличением нагрузки этот поток достигнет значения, соответствующего прямолинейной — ненасыщенной части магнитной характеристики, тогда дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки вызовет вместо увеличения нагрузочного тока уменьшение этого тока и резкое падение напряжения машины. Увеличение тока понижает напряжение машины, что вызывает уменьшение тока возбуждения, а так как режим машины соответствует прямолинейной части магнитной характеристики (рис. 15-26), то небольшое уменьшение тока возбуждения вызывает значительное ослабление потока, что, в свою очередь, вызывает новое уменьшение э. д. с. якоря и напряжения, а затем дальнейшее уменьшение тока возбуждения. Работа машины в этих случаях (пунктирной части характеристик) неустойчива. При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения он сохраняет лишь небольшую э. д. с., наводимую остаточным магнетизмом, которая поддерживает некоторый ток I в короткозамкну-

том якоре. Таким образом, режим короткого замыкания не опасен для этого генератора. Однако во время перехода к этому режиму коллектор машины может серьезно пострадать от сильного искрообразования при больших перегрузочных токах. Предельное значение нагрузочного тока генератора, за которым машина переходит в неустойчивый режим, носит название «критического тока» $I_{\text{крит}}$ (рис. 15-31). Номинальный ток генератора обычно равен $1/3—1/2$ «критического тока».

Изменение напряжения у такого генератора в силу изложенного значительно больше, чем у генератора с независимым возбуждением. Оно составляет 8—15% у машины с добавочными полюсами и 12—20% у машины без добавочных полюсов.

Регулирование напряжения этого генератора осуществляется посредством реостата $R_{\text{ш}}$ (рис. 15-30) в цепи возбуждения. Сама регулировочная характеристика практически не отличается от характеристики генератора с независимым возбуждением.

Генераторы параллельного возбуждения применяются в большинстве случаев, когда нужен промышленный источник постоянного тока.

15-12. Генератор последовательного возбуждения

В генераторе последовательного возбуждения нагрузочный ток является вместе с тем током возбуждения, так как обмотка возбуждения соединена последовательно с якорем (рис. 15-32).

Благодаря такому способу соединения при холостом ходе генератор дает лишь небольшую э. д. с., наводимую остаточным магнетизмом. С увеличением нагрузки возрастают магнитный поток, э. д. с. и напряжение генератора; это возрастание продолжается

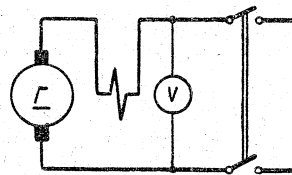


Рис. 15-32. Схема соединений генератора последовательного возбуждения.

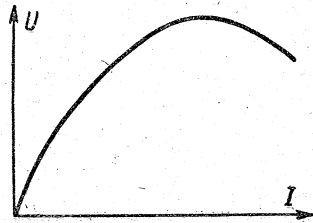


Рис. 15-33. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения.

до известного предела, обусловлено магнитным насыщением машины. При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки напряжение генератора

$$U = E_{\text{я}} - IR_{\text{я}} - IR_{\text{в}}$$

начинает понижаться, так как главный поток почти перестает увеличиваться, а размагничивающий поток реакции якоря и падение напряжения в якоре $IR_{\text{я}}$ и в обмотке возбуждения $IR_{\text{в}}$ продолжают возрастать. Таким образом, внешняя характеристика генератора имеет своеобразную горбовидную форму (рис. 15-33).

Так как напряжение генератора резко изменяется при изменении нагрузки, а при холостом ходе близко к нулю, то этот генератор непригоден для питания обычных осветительных и силовых сетей, где необходимо постоянство напряжения.

15-13. Генератор смешанного возбуждения

Ценное свойство последовательного возбуждения — усиление главного потока пропорционально возрастанию нагрузки — может быть использовано для того, чтобы выпрямить внешнюю характеристику $U = f(I_{\text{я}})$ генератора параллельного возбуждения, сделать его напряжение почти независимым от нагрузки. Это осуществлено в генераторе смешанного возбуждения, у которого обмотка возбуждения состоит из двух частей: основной параллельной обмотки $w_{\text{ш}}$ (рис. 15-34) и небольшой последовательной $w_{\text{с}}$. Ток возбуждения машины остается во время ра-

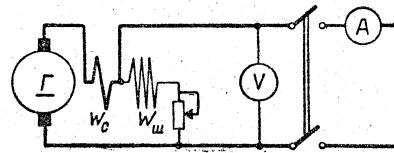


Рис. 15-34. Схема соединений генератора смешанного возбуждения.

боты постоянным; н. с. главной цепи машины представляет собой сумму

$$I_{\text{в}}w_{\text{ш}} + I_{\text{я}}w_{\text{с}}$$

— постоянной н. с. параллельной обмотки $I_{\text{в}}w_{\text{ш}}$ и н. с. последовательной обмотки $I_{\text{я}}w_{\text{с}}$, пропорциональной току нагрузки. Таким образом, магнитный поток машины, а вместе с ним и э. д. с. якоря $E_{\text{я}}$ возрастают с увеличением нагрузки. Соответствующим подбором числа витков обмотки $w_{\text{с}}$ можно достичь относительного постоянства напряжения машины, покрыв за счет возрастания потока падение напряжения в якоре и размагничивающее действие реакции якоря.

Этот генератор удобен в небольших установках, где выключения и включения отдельных потребителей могут вызывать значительные колебания напряжения. Однако он неудобен в мощных установках, где он должен работать параллельно с другими машинами, так как при случайном понижении скорости первичного двигателя, когда э. д. с. генератора $E_{\text{я}}$ становится меньше напряжения сети U , ток в якоре генератора и в его последовательной обмотке меняет направление, и эта обмотка может пермагнитить генератор, что повлечет за собой аварию.

Смешанное соединение, при котором н. с. обмоток возбуждения складываются, называется согласным; иногда применяется встречное соединение, при котором последовательная обмотка своей н. с. ослабляет поток, создаваемый параллельной обмоткой. Такое соединение целесообразно в тех случаях, когда машина работает в условиях частых коротких замыканий (дуговая сварочная машина), тогда при коротком замыкании последовательная обмотка почти размагничивает машину и понижает ток короткого замыкания до значения, безопасного для генератора.

15-14. Параллельная работа генераторов

Для включения генератора на параллельную работу в сеть, имеющую напряжение U , достаточно отрегулировать возбуждение включаемого генератора так, чтобы его э. д. с. E_2 была равна напряжению сети U , затем замкнув один полюс генератора G_2 на сеть (рис. 15-35), при помощи вольтметра V_k надо проверить соответствие полярностей включаемого генератора и сети. Если этот вольтметр показывает нуль, то замыкаем однополюсный рубильник S . Теперь генератор включен в сеть, но он не отдает ток и не потребляет его, так как э. д. с. генератора уравнивается напряжением сети:

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{я2}} = 0.$$

Чтобы нагрузить генератор, мы можем увеличить или его ток возбуждения, или скорость вращения первичного двигателя. В обоих случаях мы увеличиваем э. д. с. E_2 генератора G_2 . Возрастание этой э. д. с., с одной стороны, нагружает генератор током

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{я2}},$$

с другой стороны, несколько повышает напряжение сети U . Мы не изменили э. д. с. первого генератора G_1 , несшего ранее всю нагрузку сети; поэтому теперь увеличение напряжения сети

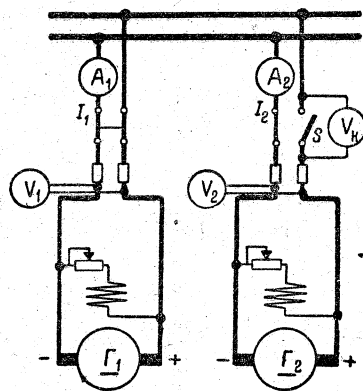


Рис. 15-35. Схема соединений генератора для параллельной работы.

несколько разгрузит этот генератор, так как его ток

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{я1}}.$$

Ток в обмотке якоря генератора G_2 , взаимодействуя с магнитным полем, создает соответствующий тормозящий момент, вследствие чего первичный двигатель (турбина, дизель и т. п.) генератора уменьшает скорость. Но тогда начинает работать регулятор скорости этого двигателя; он увеличивает приток пара или воды, или нефти и таким путем восстанавливает скорость первичного двигателя. Теперь генератор G_2 и его двигатель взяли на себя некоторую часть нагрузки сети. Обрато протекает процесс для генератора G_1 , у которого уменьшение тока разгружает первичный двигатель. Этот последний увеличивает скорость, но вмешивается регулятор скорости и, уменьшив приток рабочего вещества, восстанавливает установленную скорость. Таким путем генератор G_1 разгружается. Наконец, чтобы восстановить исходное напряжение сети U , мы должны несколько уменьшить возбуждение генератора G_1 .

Если нужно перевести всю нагрузку полностью на второй генератор G_2 , то для этого достаточно постепенно уменьшать возбуждение первого генератора G_1 и увеличивать возбуждение второго генератора G_2 , следя за тем, чтобы напряжение сети U оставалось постоянным. Когда э. д. с. генератора G_1 станет равна напряжению сети, тогда ток, отдаваемый им, упадет до нуля; вся нагрузка будет с него снята и его можно будет выключить.

Если же мы оставим генератор G_1 включенным и будем дальше уменьшать ток возбуждения, то ток в якоре переменит направление:

$$I_1 = \frac{U - E_1}{R_{я1}},$$

и вместо тормозящего момента этот ток создаст вращающий момент; машина перейдет к режиму двигателя. Однако при этом может тяжело пострадать первичный двигатель, поэтому все параллельно работающие генераторы снабжаются аппаратом, автоматически отключающим генератор

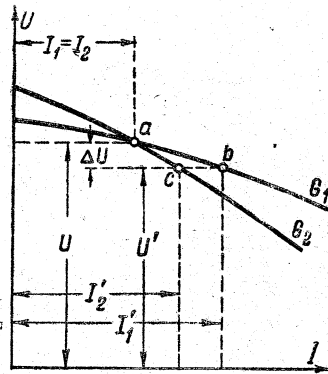


Рис. 15-36. Распределение нагрузки между генераторами с различными внешними характеристиками.

при изменении направления тока (§ 20-2).

Воздействуя на возбуждение параллельно работающих генераторов, мы можем любым желательным нам образом перераспределять между ними нагрузку.

Рассмотрим два генератора, имеющих внешние характеристики различной крутизны (рис. 15-36). Если путем регулирования возбуждения мы загрузили их поровну, то, следовательно, их рабочий режим при установленном напряжении U будет соответствовать точке пересечения a их внешних характеристик. Но вот проводимость нагрузки возросла и увеличивается ток, потребляемый в сети; должен возрасти и ток, отдаваемый каждым из генераторов, а следовательно, должно увеличиться в каждом из них падение напряжения и реакция якоря. В результате напряжение должно понизиться на ΔU . Но этому понижению напряжению

$$U' = U - \Delta U$$

соответствуют согласно внешним характеристикам генераторов различные значения токов I'_1 и I'_2 . Генераторы разделят изменившуюся нагрузку не поровну; большую долю ее I'_1 возьмет на себя генератор с более пологой (более жесткой) внешней характеристикой. Конечно, эту неравномерность нетрудно исправить (например, повысив возбуждение второго генератора), однако это усложняет работу обслуживающего персонала и при быстрых

колебаниях нагрузки довольно затруднительно. Желательно поэтому для параллельной работы иметь генераторы с одинаковыми внешними характеристиками.

15-15. Двигатели постоянного тока

Если постепенно ослаблять возбуждение генератора параллельного возбуждения, работающего на сеть постоянного тока, то его э. д. с. станет меньше напряжения сети, в результате чего ток в якоре переменит свое направление на обратное и будет пропорционален разности напряжения сети U и э. д. с. якоря $E_{я}$

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}. \quad (15-8)$$

В соответствии с этим изменит свое направление и момент, создаваемый взаимодействием тока в якоре и главного магнитного поля машины (рис. 15-37).

Он перестанет быть тормозящим и станет вращающим моментом. Машина перешла к режиму двигателя, она вращается самостоятельно, первичный двигатель ей не нужен и должен быть отключен. Машина работает за счет энергии, потребляемой ею из сети постоянного тока.

Такой простой переход посредством изменения возбуждения от режима генератора к режиму двигателя возможен лишь у машины параллельного возбуждения. У генератора последовательного возбуждения для перехода к режиму двигателя при том же напряжении и направлении вращения необходимо переключение направ-

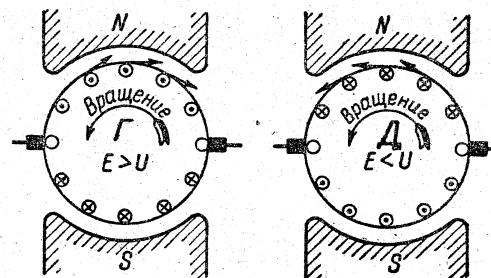


Рис. 15-37. Направление токов и электромагнитных сил при работе машины генератором (Γ) и двигателем (Δ).

ления тока в якоре или в обмотке возбуждения. Но для обоих видов двигателя справедливо уравнение тока (15-8), только у машины последовательного возбуждения $R_{я}$ нужно заменить суммой сопротивлений якоря и обмотки возбуждения.

Якорь двигателя вращается под действием вращающего момента электромагнитных сил; направление вращения определяется правилом левой руки, но при этом движении проводники якоря пересекают магнитное поле и согласно закону электромагнитной индукции в них наводится э. д. с. $E_{я}$, направление которой мы можем определить, пользуясь правилом правой руки. Эта э. д. с. — известная нам э. д. с. якоря, но в двигателе она направлена против тока и поэтому называется противоэлектродвижущей силой (противо-э. д. с.) якоря. Ее роль та же, что и э. д. с., наводимой в первичной обмотке трансформатора или в статоре асинхронного двигателя. Противо-э. д. с. якоря уравнивается той долей напряжения сети, которая соответствует механической нагрузке на валу двигателя.

В этом нетрудно убедиться. Преобразуем уравнение (15-8) в уравнение электрического равновесия двигателя:

$$U = I_{я} R_{я} + E_{я}; \quad (15-9)$$

оно напоминает нам ряд уравнений электрического равновесия машин переменного тока.

Умножив уравнение (15-9) на $I_{я}$, мы получим уравнение мощности

$$UI_{я} = I_{я}^2 R_{я} + E_{я} I_{я},$$

в котором последний член представляет собой механическую мощность. В самом деле, как известно, механическая мощность $P_{мех}$ равна произведению момента

M на угловую скорость $\omega = \frac{2\pi n}{60}$.

Следовательно,

$$P_{мех} = M\omega = M \frac{2\pi n}{60},$$

но согласно (§ 15-6)

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N\Phi I_{я},$$

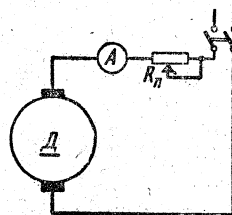


Рис. 15-38. Пусковой реостат двигателя постоянного тока.

следовательно,

$$P_{мех} = \frac{p}{a} N\Phi \frac{n}{60} I_{я},$$

и так как

$$\frac{p}{a} N\Phi \frac{n}{60} = E_{я},$$

то в результате

$$P_{мех} = E_{я} I_{я}.$$

Таким образом, противо-э. д. с. якоря является посредствующей величиной при преобразовании электрической энергии в механическую. Только при наличии этой э. д. с. машина может развивать механическую мощность.

Но, с другой стороны, эта э. д. с. ограничивает ток в якоре. Если пускать двигатель в ход путем включения под напряжение сети, то в момент пуска э. д. с. $E_{я}$, пропорциональная скорости, равна нулю. В этот момент двигатель представляет собой для напряжения сети лишь небольшое сопротивление $R_{я}$. Чтобы защитить двигатель от чрезмерно большого пускового тока, разрушительного для коллектора и опасного для обмотки якоря, все двигатели постоянного тока мощностью примерно свыше $\frac{1}{4}$ квт снабжаются пусковыми реостатами $R_{п}$ (рис. 15-38), включаемыми последовательно с якорем. Благодаря пусковому реостату пусковой ток двигателя будет:

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я} + R_{п}},$$

причем мы подбираем $R_{п}$ так, чтобы пусковой ток был больше номинального тока двигателя лишь в 1,1—1,5 раза.

При включении двигателя под напряжение сети под действием вра-

щающего момента двигатель трогается с места и постепенно увеличивает скорость; его противо-э. д. с. $E_{я}$ возрастает при этом пропорционально скорости, и мы постепенно выводим пусковой реостат, следя по амперметру за тем, чтобы во все время пуска ток не превысил номинальное значение больше чем в 1,1—1,5 раза.

По мере того как двигатель увеличивает скорость, возрастает $E_{я}$ и уменьшается ток $I_{я}$, но э. д. с. якоря двигателя всегда будет меньше напряжения сети U , так как если бы эта э. д. с. сравнялась с напряжением сети, то ток в якоре и вместе с ним вращающий момент упали бы до нуля. Якорь двигателя поэтому вращается с такой скоростью, при которой ток $I_{я}$ создает вращающий момент, равный тормозящему моменту на валу двигателя.

На основании уравнения (15-8) мы можем легко получить уравнение скорости двигателя.

Для этого заменим $E_{я}$ в уравнении (15-8) выражением

$$E_{я} = \frac{p}{a} N \Phi \frac{n}{60} = k_E \Phi n$$

и, преобразовав, получим:

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{k_E \Phi}, \quad (15-10)$$

т. е. скорость двигателя почти пропорциональна напряжению сети и обратно пропорциональна магнитному потоку машины Φ .

Это уравнение показывает вместе с тем, что мы располагаем двумя способами регулирования скорости двигателя. Во-первых, путем изменения магнитного потока, следовательно, посредством изменения возбуждения; во-вторых, путем изменения напряжения на зажимах якоря.

Для изменения направления вращения (реверсирования) двигателя постоянного тока нужно изменить направление тока в якоре или в обмотке возбуждения. Если же мы изменим направление тока и в якоре и в обмотке возбуждения, то направление вращения двигателя останется без изменения, в чем легко убедиться, пользуясь правилом левой руки.

15-16. Двигатель параллельного возбуждения

Двигатель параллельного возбуждения построен так же, как и генератор параллельного возбуждения¹. Однако схема его соединений существенно отличается от схемы генератора наличием пускового реостата (рис. 15-39).

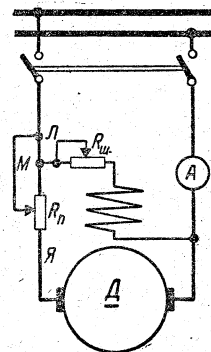


Рис. 15-39. Схема соединений двигателя параллельного возбуждения с пусковым и шунтовым реостатами.

При пуске важно, чтобы поток двигателя Φ имел наибольшее значение, благодаря чему двигатель будет развивать необходимый вращающий момент при возможно меньшем токе в якоре. С первого же момента пуска обмотка возбуждения двигателя поэтому должна быть включена под пол-

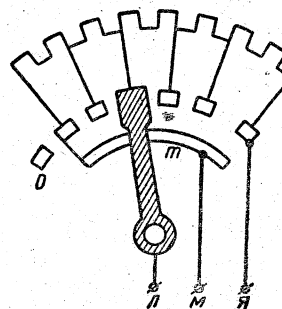


Рис. 15-40. Устройство пускового реостата двигателя параллельного возбуждения.

ное напряжение сети. С указанной целью пусковой реостат снабжается металлической пластиной $т$ (рис. 15-40), которой рукоятка реостата ка-

¹ Он часто именуется также двигателем независимого возбуждения, так как его ток цепи возбуждения не зависит от тока якоря.

сается, как только сойдет с первого «холостого» контакта O реостата. Благодаря такому устройству обмотка возбуждения двигателя во все время пуска находится под полным напряжением сети. Реостат $R_{ш}$, служащий для регулирования возбуждения, во время пуска должен быть выключен. Первый контакт пускового реостата соединяется с пластиной m . Это делается для того, чтобы при переводе рукоятки пускового реостата на холостой контакт O обмотка возбуждения оставалась замкнутой на якорь и пусковой реостат (рис. 15-39). Если бы этого не было сделано, то при выключении возбуждения возникала бы большая э. д. с. самоиндукции, которая создавала бы дугу на размыкающихся контактах и, кроме того, грозила бы целостности изоляции обмотки возбуждения.

Уравнение скорости и уравнение момента двигателя параллельного возбуждения, по существу, имеют ту общую форму, в которой они выведены нами для двигателей постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_{я}R_{я}}{k_E \Phi} \quad (15-11)$$

и

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{a} N \Phi I_{я} = k_M \Phi I_{я} \quad (15-12)$$

или, используя (15-12), можно уравнение скорости представить в следующем виде:

$$n = \frac{U}{k_E \Phi} - M \frac{R_{я}}{k_E k_M \Phi^2}. \quad (15-13)$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя нарушается механическое равновесие вращающего и тормозящего моментов, двигатель несколько уменьшает скорость, но благодаря этому уменьшается $E_{я}$, а следовательно, должен увеличиться ток $I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}$.

Пропорционально последнему возрастает вращающий момент двигателя и механическое равновесие восстанавливается при незначительно понижшейся скорости. Относительно небольшое влияние реакции якоря двигателя на скорость вращения опреде-

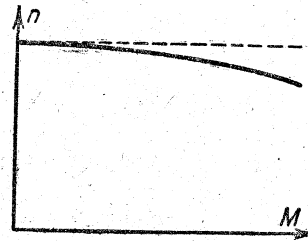


Рис. 15-41. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения.

ляется следующим: с увеличением тока возрастает поток якоря и ослабляется главный магнитный поток Φ в небольшой мере у двигателей с дополнительными полюсами и в несколько большей мере у двигателей без этих полюсов. Ослабление потока согласно уравнению скорости должно повышать n , таким образом несколько противодействовать снижению оборотов вследствие увеличения падения напряжения $I_{я}R_{я}$.

Если пренебречь реакцией якоря, то уравнения скорости (15-11) и (15-13) выражают механическую характеристику как прямую линию, угол наклона которой тем больше, чем относительно больше $R_{я}$ (рис. 15-41).

Скорость нормального двигателя параллельного возбуждения при переходе от холостого хода к полной нагрузке снижается лишь на 3—5% у двигателей без дополнительных полюсов и на 5—10% у двигателей с дополнительными полюсами. Такая механическая характеристика является жесткой. Она похожа на механическую характеристику асинхронного двигателя, но в отличие от последней не имеет обратного хода и неустойчивой части.

Основным способом регулирования скорости этого двигателя является регулирование путем изменения тока возбуждения, для чего служит реостат $R_{ш}$ в цепи возбуждения.

Уравнения (15-11) и (15-13) показывают, что увеличение тока возбуждения, воздействуя на поток Φ , вызывает уменьшение скорости n и тока якоря $I_{я}$ (при постоянном тормозящем моменте на валу двигателя). Сам процесс регулирования можно описать следующим образом.

Если уменьшить сопротивление реостата $R_{ш}$, то возрастает ток возбуждения $I_{в}$. Это вызывает увеличение потока Φ . Пропорционально Φ повышается э. д. с. якоря $E_{я} = k_E \Phi n$, а это вызывает убывание тока якоря $I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}$. Убывание $I_{я}$ пропорционально уменьшает вращающий момент $M = k_M \Phi I_{я}$, что нарушает равновесие вращающего и тормозящего моментов. В результате скорость вращения n убывает и вместе с ней понижается э. д. с. якоря, пока не восстановится равновесие напряжений и моментов. Таким образом, увеличение потока вызывает уменьшение скорости и увеличение тока якоря (при неизменном тормозящем моменте, приложенном к валу двигателя). Наименьшую скорость (при $M = \text{const}$) двигатель будет иметь, когда реостат $R_{ш}$ полностью выведен.

В обратном направлении идет процесс при увеличении сопротивления реостата $R_{ш}$. В этом случае уменьшение потока вызывает увеличение тока якоря и скорости двигателя. При холостом ходе и малой нагрузке, когда член $I_{я} R_{я}$ в уравнении скорости

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{k_E \Phi}$$

относительно весьма мал, скорость можно считать обратно пропорциональной потоку, что и отображает характеристика (рис. 15-42). При малой нагрузке и холостом ходе сильное уменьшение тока возбуждения, а также случайный обрыв цепи возбуждения может вызвать возрастание скорости двигателя до значений, опасных для механической целостности двигателя, — это так называемый «разнос» двигателя. Если же двигатель за-

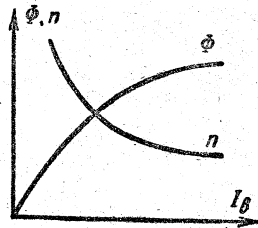


Рис. 15-42. Скоростная и магнитная характеристики двигателя параллельного возбуждения.

гружен, то обрыв цепи возбуждения, уменьшая до весьма малой величины вращающий момент, вызывает остановку двигателя и возникновение очень большого тока вследствие уменьшения $E_{я}$. Отметим, что «разнос» возможен только потому, что тормозящий момент мал и поэтому для вращения двигателя достаточно вращающего момента, развиваемого за счет остаточного магнитного потока Φ_0 двигателя. Если же двигатель загружен, то обрыв цепи возбуждения настолько уменьшает вращающий момент, что равновесие моментов не может восстановиться, двигатель останавливается, а ток якоря настолько возрастает (так как $E_{я} = 0$), что обмотка якоря сгорит, если двигатель не будет отключен соответствующей защитой (автоматическим максимальным выключателем или перегоранием плавкой вставки предохранителя).

На форме нисходящей части характеристики $n = F(I_{в})$ сказывается влияние насыщения стали магнитопровода двигателя (рис. 15-42), что делает эту часть характеристики более пологой.

Регулирование скорости изменением возбуждения весьма экономично, так как ток возбуждения $I_{в}$ составляет лишь 3—5% от номинального тока якоря, поэтому потери энергии в реостате практического значения не имеют.

Если считать ток в якоре двигателя неизменным, то при изменении потока в процессе регулирования в x раз ($\Phi' = \Phi x$) скорость двигателя n изменится в $\frac{1}{x}$ раз и, следовательно, э. д. с. якоря

$$E_{я} = k_E \Phi x n \frac{1}{x} = \text{const}$$

остается постоянной, а вместе с ней остается постоянной и механическая мощность двигателя. В то же время момент двигателя будет изменяться пропорционально потоку и, следовательно, обратно пропорционально скорости. Таким образом, при регулировании скорости двигателя посредством изменения возбуждения механическая мощность двигателя не меняется, а момент меняется обратно пропорционально скорости.

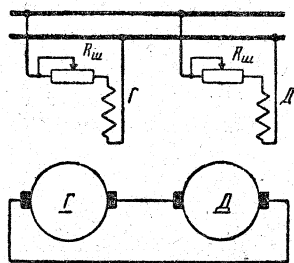


Рис. 15-43. Схема генератор — двигатель (ГД) для регулирования скорости двигателя в широких пределах.

Регулирование скорости двигателя посредством изменения напряжения на зажимах якоря при постоянном напряжении сети возможно лишь путем включения регулировочного реостата последовательно с якорем, т. е. на место пускового реостата. Однако этот реостат должен быть рассчитан на длительную работу при полном токе якоря, он должен иметь большие габариты и в нем будет поглощаться весьма значительная часть энергии. В такой своей форме регулирование путем изменения напряжения поэтому применяется редко. Однако если речь идет о крупных мощностях и широких пределах регулирования (порядка 5 : 1), то можно установить специальный генератор постоянного тока с независимым возбуждением и замкнуть цепь якоря этого генератора на якорь двигателя. Такой способ регулирования носит название схемы ГД (генератор — двигатель) (рис. 15-43). Вся установка состоит из асинхронного или синхронного двигателя, не показанного на схеме, вращающего генератора Г, и небольшого генератора параллельного возбуждения, также не показанного на схеме, питающего цепи возбуждения главного генератора Г и двигателя М.

Регулируя возбуждение генератора, мы имеем возможность в широких пределах с минимумом потерь изменять скорость двигателя n . Установки ГД применяются, например, для прокатных станов на металлургических заводах.

Характеристики двигателя параллельного возбуждения показывают, что он весьма удобен для всякого электропривода, требующего, с одной

стороны, устойчивую скорость, а с другой стороны, возможность плавного регулирования этой скорости. Отметим, однако, что при нормальном выполнении двигатель рассчитан на регулирование скорости в относительно узких пределах, тем меньших, чем мощнее двигатель. Так, для двигателя 5 кВт допустимо увеличение скорости на 50%, но для двигателя в 100 кВт не следует увеличивать скорость более чем на 20%. Двигатели с более широкими пределами регулирования (до 1 : 5) изготовляются заводами по специальным заказам.

15-17. Двигатель последовательного возбуждения

Особенностью двигателя последовательного возбуждения является зависимость его магнитного потока от нагрузки. Обмотка возбуждения этого двигателя соединена последовательно с якорем (рис. 15-44), благодаря чему главный поток машины меняется пропорционально току якоря. Для ограничения пускового тока двигатель снабжается реостатом с двумя зажимами. Основные уравнения двигателей постоянного тока мы должны преобразовать для этого двигателя следующим образом. Магнитный поток его прямо пропорционален н. с. его обмотки возбуждения $I_{я}\omega$ и обратно пропорционален магнитному сопротивлению машины R_m , т. е. $\Phi = \frac{I_{я}\omega}{R_m}$.

Подставляя это значение потока в уравнения момента и скорости двигателей, мы получим уравнения этого двигателя:

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \frac{\omega}{R_m} I_{я}^2; \quad (15-14)$$

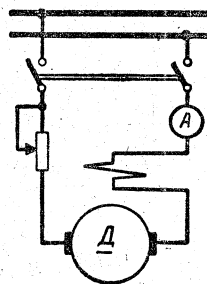


Рис. 15-44. Схема соединений двигателя последовательного возбуждения.

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{k_E \frac{I_{\text{я}} \omega}{R_{\text{маг}}}} \quad (15-15)$$

Следовательно, вращающий момент двигателя при магнитно ненасыщенном состоянии его возрастает пропорционально квадрату тока, а скорость убывает почти обратно пропорционально току. Механическая характеристика двигателя показана на рис. 15-45, здесь же дана кривая зависимости тока, потребляемого двигателем, от момента на его валу. При увеличении нагрузки на валу двигателя ток возрастает относительно медленно и обратно пропорционально этому току падает скорость. Если пренебречь магнитным насыщением и реакцией якоря, то можно считать, что при увеличении вдвое момента на валу двигателя ток, потребляемый им, возрастает лишь до 140% от первоначального, а число оборотов падает до 70%. У двигателя параллельного возбуждения повышение вдвое момента на валу лишь незначительно уменьшит скорость, зато двигатель будет потреблять ток, равный 200% от первоначального.

Двигатель последовательного возбуждения может, следовательно, выдерживать сильные перегрузки, умеренно увеличивая при этом потребление тока. Это — его важнейшее свойство. При уменьшении нагрузки на валу двигателя он медленно уменьшает потребление тока, зато быстро повышает скорость, и при нагрузках, примерно меньших 25% от номинальной, эта скорость приобретает значения, опасные для механической целостности двигателя, — двигатель «разносит». Двигатели последовательного возбуждения поэтому не следует пускать вхо-

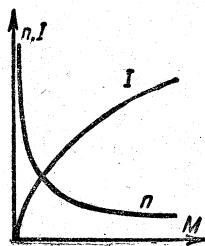


Рис. 15-45. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения.

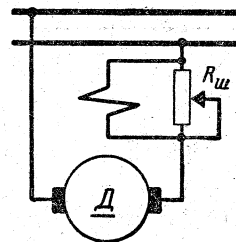


Рис. 15-46. Регулирование скорости двигателя последовательного возбуждения посредством шунтирования обмотки возбуждения.

лостую или с малой нагрузкой. Механическая характеристика такого двигателя является мягкой, так как изменение момента сильно сказывается на скорости двигателя.

Подобная характеристика и перегрузочная способность двигателя особенно ценны для электрической тяги. В СССР электрификация транспорта (трамвай, метрополитен, электрические железные дороги) осуществлена в основном с применением двигателей постоянного тока последовательного возбуждения в качестве тяговых двигателей. Для питания их постоянным током устраиваются преобразовательные подстанции, преобразующие переменный ток в постоянный.

Помимо электротяги, эти двигатели весьма удобны в качестве крановых двигателей там, где имеется постоянный ток для их питания.

Регулирование скорости двигателя последовательного возбуждения может быть осуществлено либо путем шунтирования обмотки возбуждения (рис. 15-46), либо путем изменения напряжения на его зажимах. Последний способ регулирования может быть экономично осуществлен, если имеются по крайней мере два двигателя (как это имеет место, например, в вагонах трамвая). Комбинируя последовательное и параллельное соединение якорей и обмоток возбуждения этих двигателей, можно достичь широкого регулирования с относительно небольшими потерями энергии в реостатах.

15-18. Двигатели смешанного возбуждения

Для некоторых видов электропривода желательно иметь электродвигатель, обладающий ценными свойства-

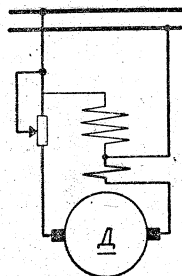


Рис. 15-47. Схема соединения двигателя смешанного возбуждения.

ми двигателя последовательного возбуждения, но в то же время допускающий работу при малых нагрузках и холостую. Для подобных условий можно взять двигатель последовательного возбуждения и снабдить его дополнительно небольшой параллельной обмоткой, магнитный поток которой $\Phi_{ш}$ должен складываться с потоком последовательной обмотки Φ_c (рис. 15-47). Мы получим таким путем двигатель смешанного возбуждения с согласным соединением обмоток. Уравнение скорости его будет:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_b)}{k_E(\Phi_c + \Phi_{ш})}. \quad (15-16)$$

Наличие магнитного потока $\Phi_{ш}$ ограничит возрастание скорости двигателя при холостом ходе. Он не будет разносить, сохранив все ценные свойства двигателя последовательного возбуждения. Его механическая характеристика лишь немного спрямится по сравнению с названным двигателем (рис. 15-48).

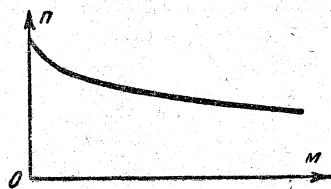


Рис. 15-48. Механическая характеристика двигателя со смешанным возбуждением при согласном соединении обмоток возбуждения.

15-19. Двигатель-генератор для преобразования переменного тока в постоянный

Для получения постоянного тока мы можем преобразовать энергию переменного тока сначала в механиче-

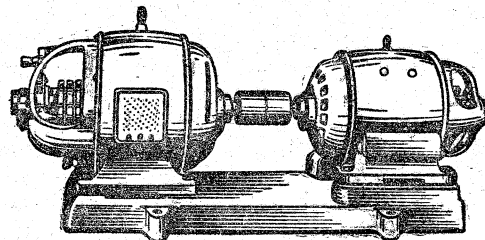
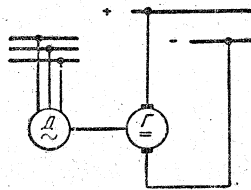


Рис. 15-49. Двигатель — генератор.

скую энергию при помощи двигателя переменного тока, а затем посредством генератора постоянного тока преобразовать механическую энергию обратно в электрическую, но уже в форме постоянного тока. Необходимый для этого агрегат двигатель-генератор должен, следовательно, состоять из двух машин, связанных между собой механически (рис. 15-49). Полная электрическая независимость сети постоянного тока от сети переменного тока представляет собой ценное преимущество этой системы преобразования; для ряда практических целей весьма важна возможность широкого регулирования напряжения постоянного тока, которую дает двигатель-генератор. Такой агрегат входит, например, как основная часть в схему ГД (рис. 15-43), часто применяемую в тех случаях, когда необходимо регулирование в весьма широких пределах скорости исполнительного механизма.

В двигателях-генераторах небольшой мощности двигателем обыкновенно является асинхронная машина, хорошо выдерживающая толчки сильно колеблющейся нагрузки со стороны постоянного тока. Для смягчения колебаний нагрузки этого двигателя агрегат часто снабжается маховиком. Если же двигатель-генератор должен иметь значительную мощность, то целесообразно применить синхронный двигатель, который имеет более высо-

кий к. п. д. и хороший коэффициент мощности.

Слабой стороной двигателя-генератора является прежде всего низкий к. п. д. агрегата в целом $\eta_{др}$, так как потери в агрегате, складываются из потерь в обеих машинах; потерь в двигателе P_d и потерь в генераторе P_g .

Легко понять, что к. п. д. агрегата $\eta_{др}$ равен произведению к. п. д. двигателя η_d и к. п. д. генератора η_g , т. е. $\eta_{др} = \eta_d \eta_g$. Поэтому даже при высоких значениях к. п. д. отдельных машин к. п. д. агрегата получается сравнительно низким: например, при

$$\eta_d = \eta_g = 0,90; \quad \eta_{др} = 0,81 (81\%).$$

15-20. Электромашинный усилитель

Усилителями именуется устройства, в которых изменения относительно малой управляющей входной мощности — мощности сигнала — вызывают значительные изменения большой мощности на выходе устройства — управляемой выходной мощности. Конечно, усилитель должен получать энергию от некоторого источника, мощностью которого, по существу, управляет мощность сигнала. В этом смысле усилителем может служить генератор независимого возбуждения: в нем небольшое изменение мощности, подводимой к обмотке возбуждения, вызывает значительно большее изменение мощности, отдаваемой во внешнюю цепь. Однако усиление в таком устройстве относительно мало — порядка 30—40, а процесс изменения протекает медленно из-за большой индуктивности обмотки возбуждения. Развитие электрификации производственных процессов потребовало создания на основе генератора независимого возбуждения более совершенных электромашинных усилителей.

Широко распространенный электромашинный усилитель — ЭМУ, известный в иностранной литературе под именем амплидина¹, является в основном генератором постоянного тока с независимым возбуждением, но основной магнитный поток, определяющий

¹ От английского amplifier — усилитель и дупато — генератор, динамомашинна.

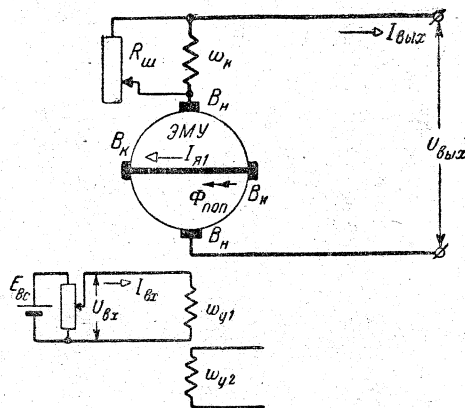


Рис. 15-50. Принципиальная схема электромашинного усилителя.

напряжение нагрузки, создается в ЭМУ полем якоря. Такой, способ возбуждения основного поля применяется в ряде специальных генераторов постоянного тока (в сварочных генераторах, в генераторах для освещения железнодорожных поездов и т. д.), именуемых машинами с поперечным возбуждением.

На рис. 15-50 дана принципиальная основная схема ЭМУ. Его магнитная система в отличие от нормальных генераторов постоянного тока выполняется обычно неявнополюсной (рис. 15-51) с пазами различных размеров, для нескольких обмоток возбуждения — управляющих обмоток и компенсационной обмотки. ЭМУ работает в режиме генератора при постоянной скорости вращения, а первичным двигателем для него обычно служит электродвигатель. Одна из обмоток возбуждения w_{y1} включается к некоторому небольшому источнику, по-

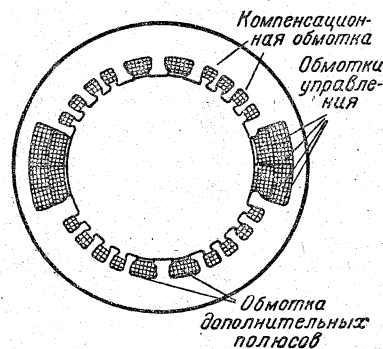


Рис. 15-51. Магнитная система явнополюсной машины и ЭМУ.

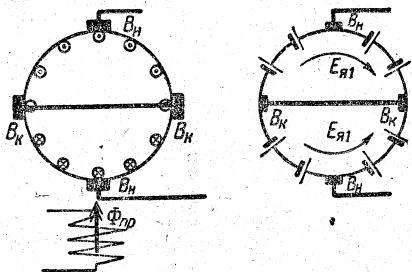


Рис. 15-52. Положение щеток по отношению к магнитным полям ЭМУ.

стоянного тока $E_{вс}$ и напряжение $U_{вх}$ на ее зажимах создает относительно малый ток возбуждения $I_{вх}$. Последний возбуждает пронизывающий обмотку якоря относительно небольшой магнитный поток $\Phi_{пр}$ — продольный поток ЭМУ. Этот поток индуцирует в обмотке якоря небольшую э. д. с. $E_{я1}$. Щетки B_k , установленные на коллекторе по поперечной оси машины, замкнуты накоротко, поэтому небольшая э. д. с. $E_{я1}$ создает значительный ток $I_{я1}$ в обмотке якоря.

На коллекторе установлена по вертикальной оси машины вторая пара щеток B_n , но э. д. с. $E_{я1}$ не создает между ними напряжение (рис. 15-52).

Ток $I_{я1}$, проходя по обмотке якоря, создает относительно большой поток $\Phi_{поп}$ — н. с. этого тока $I_{я1}\omega_{поп}$ велика, а благодаря неявнополюсной конструкции станины ЭМУ магнитное сопротивление на пути потока $\Phi_{поп}$ сильно уменьшено по сравнению с условиями в явнополюсной машине постоянного тока.

Поток $\Phi_{поп}$ — поперечный поток машины — индуцирует в обмотке якоря вторую относительно большую э. д. с. $E_{я2}$. Она создает напряжение $U_{вых}$ между щетками B_n , поставленными по продольной оси, вследствие чего создается некоторый ток $I_{вых}$ в нагрузочной цепи — управляемой цепи ЭМУ. Управляемая мощность на выходе ЭМУ $P_{вых} = U_{вых}I_{вых}$ будет во много раз больше мощности на входе $P_{вх} = U_{вх}I_{вх}$.

В обмотке якоря, конечно, создается некоторый результирующий ток, но удобно, руководствуясь принципом наложения, рассматривать токи $I_{я1}$ и $I_{вых}$ отдельно.

Необходимо, чтобы н. с. тока $I_{вых}$ не изменяла продольный поток $\Phi_{пр}$; чтобы достичь этого в пазах станины машины (рис. 15-51), кроме обмотки дополнительных полюсов, размещена еще компенсационная обмотка ω_k , включенная последовательно в цепь тока (ср. рис. 15-8), она должна компенсировать н. с. $I_{вых}$.

Можно использовать обмотку ω_{y1} для управления выходной мощностью $P_{вых}$, но удобнее иметь специальную обмотку управления (одну или чаще несколько) — сигнальную обмотку ω_{y2} . Ток этой обмотки, увеличивая или уменьшая $\Phi_{пр}$, будет вызывать соответствующие изменения $P_{вых}$. Чтобы обеспечить пропорциональность регулирования, в ЭМУ применяются значительно меньшие индукции и лучшая сталь, чем в обычных машинах постоянного тока.

Входная мощность ЭМУ $P_{вх}$ равна сумме мощностей, подаваемых во все обмотки управления, а выходная, управляемая мощность, получаемая за счет механической мощности первичного двигателя $P_{вых} = U_{вых}I_{вых}$. Отношение выходной мощности к входной именуется коэффициентом усиления ЭМУ

$$k_y = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \quad (15-17)$$

Можно считать ЭМУ объединением двух генераторов независимого возбуждения. У первого из них обмоткой возбуждения является управляющая обмотка ω_{y1} и его обмотка якоря замкнута накоротко поперечными щетками. Эта обмотка является обмоткой возбуждения второго генератора, работающего на внешнюю нагрузку. Таким образом, в ЭМУ имеются две ступени усиления и он заменяет два генератора. Соответственно коэффициент усиления ЭМУ k_y может быть выражен через коэффициенты усиления двух ступеней (каскадов) машины.

В первой ступени $k_{y1} = \frac{P_{поп}}{P_{вх}}$, здесь

$P_{псн}$ — мощность первой ступени, во

второй ступени $k_{y2} = \frac{P_{вых}}{P_{поп}}$. Подставив

значения $P_{вх}$ и $P_{вых}$ в (15-15), получим:

$k_y = k_{y1} k_{y2}$. Следовательно, если принять коэффициенты усиления ступеней равными коэффициенту усиления обычного генератора, то $k_y = 900 \div 1200$. В действительности благодаря особенностям конструкции ЭМУ коэффициент усиления k_y значительно выше и достигает значений 5000—10000, что дает возможность посредством мощности сигнала порядка долей ватта управлять мощностью порядка десятков киловатт. Ориентировочно зависимость коэффициента усиления ЭМУ от параметров машины может быть определена следующим образом.

Общая входная мощность обмоток управления может быть выражена через их суммарный ток $I_{вх}$ и эквивалентное сопротивление $R_{вх}$:

$$P_{вх} = I_{вх}^2 R_{вх}. \quad (15-18)$$

Мощность выходной цепи вместе с мощностью потерь от выходного тока в якоре и в компенсационной обмотке составляют мощность продольной цепи ЭМУ, которую можно выразить через э. д. с. $E_{я2}$, индуктируемую поперечным потоком машины $\Phi_{поп}$, и через суммарное сопротивление R всей продольной цепи машины, включающее сопротивление нагрузки; на основании (15-18) эта мощность будет:

$$P_{пр} = \frac{E_{я2}^2}{R}. \quad (15-18')$$

В свою очередь, э. д. с. $E_{я2}$ на основании (15-1) может быть выражена через поток и скорость:

$$E_{я2} = k_{E2} \Phi_{поп} n, \quad (15-19)$$

а поток на основании закона Ома для магнитной цепи

$$\Phi_{поп} = \frac{I_{я1} \omega_{поп}}{R_{маг.поп}}, \quad (15-20)$$

где $R_{маг.поп}$ — магнитное сопротивление на пути поперечного магнитного потока. Подставив (15-20) в (15-19) получим:

$$E_{я2} = k_{E2} n \frac{\omega_{поп}}{R_{маг.поп}} I_{я1}.$$

Ток короткозамкнутой цепи ЭМУ может быть выражен через э. д. с., ин-

дуктируемую продольным потоком, и сопротивление этой цепи R_1 , т. е. $I_{я1} = \frac{E_{я1}}{R_1}$ и, заменив э. д. с. ее выражением согласно (15-1), получим:

$$I_{я1} = \frac{k_{E1} \Phi_{пр} n}{R_1}.$$

Продольный поток можно выразить через результирующую намагничивающую силу $I_{вх} \omega_{вх}$ всех обмоток управления и через магнитное сопротивление на пути этого потока

$$\Phi_{пр} = \frac{I_{вх} \omega_{вх}}{R_{маг.пр}}.$$

Таким образом, э. д. с. выходной продольной цепи будет:

$$E_{я2} = k_{E1} k_{E2} n^2 \frac{\omega_{поп} \omega_{вх}}{R_{маг.поп} R_{маг.пр} R_1} I_{вх};$$

заменив постоянные величины общим коэффициентом k , получим:

$$E_{я2} = k \frac{n^2 I_{вх}}{R_1 R_{маг.поп} R_{маг.пр}}.$$

Для приближенного анализа соотношений можно пренебречь внутренними потерями в продольной цепи ЭМУ и принять, что $P_{пр} = P_{вых}$ и, следовательно, на основании (15-18) и (15-17) после подстановки значения $E_{я2}$ получаем:

$$k_y = k \frac{n^4}{R_{вх} (R_1 R_{маг.поп} R_{маг.пр})^2}. \quad (15-21)$$

Выражение (15-21) показывает, что при конструировании ЭМУ для увеличения усиления нужно уменьшать электрические и магнитные сопротивления цепей машины. Так как усиление пропорционально четвертой степени скорости, то желательно, чтобы номинальная скорость ЭМУ была возможно больше, причем эта скорость при работе должна поддерживаться постоянной. Номинальная скорость современных ЭМУ — порядка 3000 об/мин; дальнейшее повышение скорости затруднительно из-за ухудшения условий коммутации.

Внешняя характеристика ЭМУ подобна характеристике обычного генератора независимого возбуждения (рис. 15-27), но наклон ее мож-

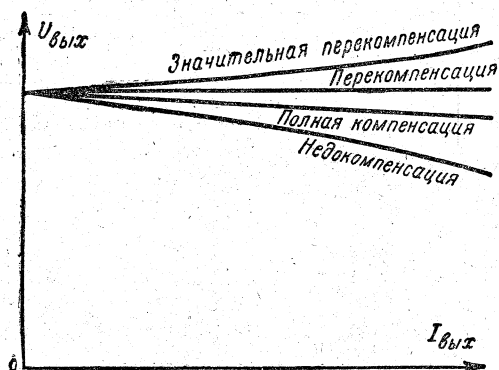


Рис. 15-53. Внешние характеристики ЭМУ при различных степенях компенсации.

но регулировать путем воздействия на компенсационную обмотку ЭМУ. Эта обмотка рассчитывается обычно так, что ее намагничивающая сила несколько больше размагничивающей силы реакции якоря ЭМУ, т. е. она может перекомпенсировать реакцию якоря, что необходимо для специальных режимов ЭМУ. Но обычно для уменьшения н. с. компенсационная обмотка шунтируется реостатом (рис. 15-50). Это дает возможность регулировать наклон внешней характеристики: при недокомпенсации падение напряжения с увеличением нагрузки будет создаваться не только потерей напряжения в якоре, но и реакцией якоря (рис. 15-53). При полной компенсации реакции якоря понижение напряжения ЭМУ с увеличением нагрузки будет вызываться лишь потерей напряжения в якоре. При небольшой перекомпенсации можно добиться того, что увеличение потока с увеличением нагрузки будет точно компенсировать возрастание потери напряжения в якоре ЭМУ и тогда напряжение машины не будет меняться при изменении нагрузки. Но при сильной перекомпенсации возможно нежелательное самовозбуждение ЭМУ, самопроизвольный рост напряжения и тока нагрузки при неизменном токе управления (или при разомкнутой цепи управления). Такое самовозбуждение (подобное самовозбуждению генераторов) продолжается, пока не скажется влияние насыщения магнитной системы ЭМУ. Самовозбуждение может вызвать значительную перегрузку ЭМУ и совершенно нару-

шить рабочий процесс установки, в которую входит ЭМУ.

ЭМУ работает обычно в условиях изменения режима нагрузочной цепи, т. е. в условиях переходных процессов; очень важно поэтому, чтобы электромагнитная инерция ЭМУ была возможно меньше, следовательно, должна быть мала общая постоянная времени цепей ЭМУ $\tau = \frac{L}{R}$. Здесь L и R — эквивалентные внутренние индуктивность и сопротивление цепей ЭМУ. Посредством относительного увеличения R в современных ЭМУ конструкторы снижают τ примерно до 0,05 сек.

На рис. 15-54 дана простейшая схема применения ЭМУ с двумя управляющими обмотками в системе генератор — двигатель (ГД) для поддержания постоянства напряжения U на зажимах основного двигателя D . Напряжение воздействует на «управляющую» обмотку возбуждения w_c ЭМУ, намагничивающая сила которой действует навстречу н. с. «задающей» обмотки возбуждения $w_{вс}$, возбуждающей исходный продольный поток $\Phi_{пр}$ машины. Таким образом, этот поток создается разностью н. с. обмоток $w_{вс}$ и w_c . Понижение U уменьшает размагничивающую н. с. обмотки w_c , вследствие чего поток $\Phi_{пр}$ возрастает и повышается выходное напряжение ЭМУ. Оно, в свою очередь, увеличивает выходной ток ЭМУ $I_{вых}$, являющийся током возбуждения главного генератора G системы, а вследствие этого повышается напряжение U на зажимах двигателя.

При повышении U происходят обратный процесс — уменьшение потока $\Phi_{пр}$ вследствие увеличения размагничивающего тока в w_c и понижение U . В установке имеет место автоматическое регулирование напряжения генератора G посредством ЭМУ. Было бы

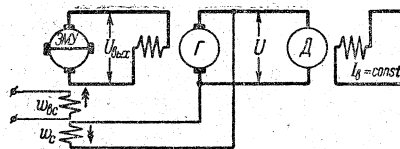


Рис. 15-54. Принципиальная схема применения ЭМУ в системе ГД для поддержания постоянного напряжения.

невыгодно питать мощный двигатель D непосредственно от ЭМУ соответствующей большой мощности, так как к. п. д. ЭМУ на 20—30% ниже к. п. д. нормального генератора постоянного тока.

Рассмотренная схема рис. 15-54 является также примером использования принципа обратной связи — принципа улучшения регулирования посредством использования обратного воздействия выходной величины на вход усилительного или регулирующего устройства. В нашем случае выходная величина установки — напряжение U воздействует на вход ЭМУ — на поток $\Phi_{пр}$. Изменения U вызывают обратные по знаку изменения $\Phi_{пр}$ — это отрицательная обратная связь. Подобная связь противодействует изменению режима устройства и применяется для стабилизации режима.

Особенности режима ЭМУ в сложных установках вынуждают конструктора увеличивать число управляющих обмоток ЭМУ. Вследствие наличия большого усиления существенную роль в нарушении режима ЭМУ может играть остаточное намагничивание сердечника ЭМУ. Оно может создавать на выходе ЭМУ напряжение, равное 20—30% от номинального. В ряде случаев это совершенно недопустимо и, чтобы уничтожить остаточное намагничивание, ЭМУ снабжается еще одной обмоткой управления, по которой пропускается небольшой переменный ток рис. 15-55.

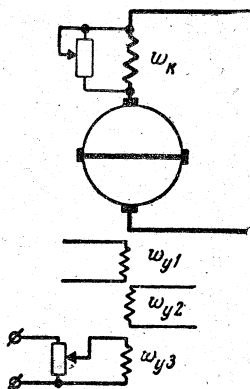


Рис. 15-55. Применение обмотки управления для уничтожения остаточного намагничивания.

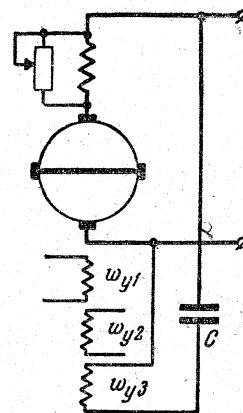


Рис. 15-56. Применение обмотки управления для гашения колебаний.

Наконец, при переходных в системе ЭМУ могут возникать нежелательные колебания режима вокруг нового положения равновесия. Для гашения этих колебаний также может быть применена дополнительная обмотка управления ЭМУ, включенная, например, под выходное постоянное напряжение ЭМУ через конденсатор¹ C (рис. 15-56); зарядный или разрядный ток конденсатора возникают только при изменениях постоянного напряжения на выходе ЭМУ и при надлежащем соединении, намагничивающая сила обмотки управления будет противодействовать изменениям напряжения — гасить колебания как успокоитель.

Область применения ЭМУ в настоящее время очень широка. Их можно найти в установках для управления реверсивными прокатными станами, станами холодной прокатки, доменными и шахтными подъемниками, металлорежущими станками, бумагоделательными машинами и т. д. Однако ЭМУ обладает некоторыми существенными недостатками: плохой коммутацией, вызывающей иногда нарушения режима установки, и низким к. п. д. Наладка установок с ЭМУ часто связана с большими трудностями. По этим причинам в промышленности естественна тенденция к замене ЭМУ

¹ Для этой же цели применяются стабилизационные трансформаторы, см. А. С. Белонковский и Б. М. Менский, Автоматизированный привод с электромашинным усилителем, Военное издательство, Москва, 1956.

статическими аппаратами—магнитным усилителем в соединении с полупроводниковым усилителем.

15-21. Коллекторные двигатели переменного тока

Асинхронные двигатели не позволяют экономично и плавно регулировать свою скорость, в этом отношении они существенно уступают двигателям постоянного тока. Между тем такое регулирование скорости нужно, с одной стороны, для электрической тяги, с другой стороны, для ряда видов электропривода. Применение коллектора в машинах переменного тока дает возможность получить двигатели с регулируемой скоростью, обладающие жесткой или мягкой механической характеристикой, причем коэффициент мощности некоторых из этих двигателей может быть доведен до единицы. Все эти полезные свойства коллекторных двигателей переменного тока достигаются ценой усложнения и удорожания машины, снижения ее надежности и ухудшения условий эксплуатации. Основной трудностью в построении коллекторных двигателей является получение удовлетворительной коммутации при переменном токе, в особенности при пусковых условиях.

Прежде всего вполне логично поставить вопрос, не могут ли двигатели постоянного тока работать также и на переменном токе. Мы знаем, что при одновременном изменении направления тока в якоре и обмотке возбуждения двигателя постоянного тока направление его вращения не изменяется. Если эти изменения будут повторяться периодически, как это имеет место при переменном токе, то будет возникать некоторый средний вращающий момент постоянного направления. Таким образом, принципиально двигатель постоянного тока при питании переменным током будет развивать некоторый вращающий момент, следовательно, возможно построение коллекторного двигателя переменного тока.

Однако вращающий момент, развиваемый нормальным двигателем постоянного тока, включенным под переменное напряжение, будет незначи-

телен по величине, сталь двигателя будет сильно греться, cos ϕ двигателя будет весьма низок и, наконец, под щетками на коллекторе будет происходить очень сильное искрообразование.

Такая плохая работа двигателя является результатом его непригодности к условиям переменного магнитного поля. Чтобы сделать коллекторный двигатель пригодным для питания переменным током, необходимо приспособить его магнитопровод к условиям переменного магнитного потока, свести к минимуму реактивное сопротивление обмоток и, наконец, улучшить условия коммутации.

В современных коллекторных двигателях переменного тока первые две задачи можно считать разрешенными удовлетворительно, правда, ценой значительного усложнения и удорожания машины; что же касается создания хороших условий коммутации, то все сделанное в этом направлении мало удовлетворяет электротехников: они считают эту проблему пока разрешенной недостаточно удовлетворительно и ищут лучшего решения.

Первая задача — приспособление магнитопровода в условиях переменного магнитного потока — разрешается так же, как во всех машинах и аппаратах переменного тока, путем замены массивной станины двигателя постоянного тока станией, собранной из изолированных друг от друга листов динамной стали.

Вторая задача — уменьшение реактивного сопротивления двигателя — сводится к следующему.

В двигателе имеются два магнитных потока: возбуждения и реакции якоря, обуславливающих соответствующие индуктивности двух цепей машины.

Поток реакции якоря в двигателях постоянного тока в большинстве случаев уничтожается лишь в зоне коммутации посредством поля дополнительных полюсов. В коллекторных двигателях переменного тока этого недостаточно, здесь желательно почти полностью уничтожить поток якоря, чтобы он не создавал большую реактивную э. д. с. самоиндукции, ухуд-

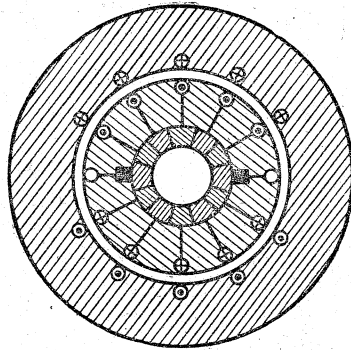


Рис. 15-57. Принцип устройства компенсационной обмотки коллекторного двигателя переменного тока

шающую $\cos \phi$ двигателя. С этой целью станина двигателя снабжается компенсационной обмоткой (рис. 15-57); эта обмотка размещается равномерно вдоль окружности статора и соединяется последовательно с ротором (якорем) машины и притом так, чтобы ток в ее проводниках был противоположен по направлению току в противоположащих проводниках ротора. Чтобы сделать компенсацию более совершенной, в коллекторном двигателе переменного тока в большинстве конструкций мы отказываемся от явных полюсов и выполняем статор в виде такого же стального кольца, как статор асинхронной и синхронной машин. Так как здесь мы рассматриваем лишь вопрос компенсации поля якоря, то на рис. 15-57 на статоре показана лишь компенсационная обмотка и опущены обмотки возбуждения и дополнительных полюсов.

Магнитный поток цепи возбуждения двигателя необходим для создания вращающего момента и не может быть компенсирован. В двигателе последовательного возбуждения соответствующая этому потоку индуктивность цепи возбуждения вызывает некоторое ухудшение $\cos \phi$. В двигателе параллельного возбуждения большая индуктивность обмотки возбуждения вызывает между потоком возбуждения и напряжением сдвиг фаз почти на 90° ; в то же время ток якоря этого двигателя будет по фазе почти совпадать с напряжением. В результате средний вращающий момент, создаваемый взаи-

модействием потока возбуждения и тока якоря, сдвинутых по фазе друг по отношению к другу почти на 90° , будет очень мал. По этой причине однофазные коллекторные двигатели параллельного возбуждения практического применения почти не имеют.

Третья задача — получение удовлетворительной коммутации для коллекторного двигателя переменного тока — имеет следующие особенности. В коммутируемой секции двигателя постоянного тока наводятся две э. д. с. (§ 15-8): реактивная e_p , представляющая собой э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции коммутируемой секции, и коммутирующая э. д. с. e_k , индуцируемая благодаря движению проводников секции в магнитном поле дополнительных полюсов. При помощи второй э. д. с., пропорциональной току якоря, мы компенсируем реактивную э. д. с. и добиваемся идеальной коммутации, при которой $e_p + e_k = 0$, или даже создаем ускоренную коммутацию при $e_k > e_p$. Для улучшения коммутации коллекторные двигатели снабжаются дополнительными полюсами, так же как и машины постоянного тока.

Но в коммутируемой секции двигателя переменного тока индуцируется еще третья — трансформаторная — э. д. с. $e_{тр}$. Причиной ее возникновения являются периодические изменения главного магнитного потока машины, пронизывающего коммутируемые витки. По отношению к переменному потоку коммутируемая секция, закороченная щеткой, является как бы замкнутой вторичной обмоткой трансформатора (рис. 15-58). Эта э. д. с. $e_{тр}$ может быть выражена так же, как э. д. с. трансформатора:

$$e_{тр} = -\omega_k \frac{d\Phi}{dt};$$

здесь ω_k — число витков секции обмотки ротора.

Действующее значение этой э. д. с. будет:

$$E_{тр} = 4,44 f \omega_k \Phi_m.$$

По фазе $e_{тр}$ отстает от индуцирующего ее потока, а следовательно, и от тока возбуждения, на четверть

периода. Она не зависит от скорости вращения ротора и сохраняет свое значение, даже когда последний неподвижен.

Идеальные условия коммутации для двигателя переменного тока те же, что и для двигателя постоянного тока, именно алгебраическая сумма э. д. с. в коммутируемой секции должна равняться нулю. Для выполнения этого условия конструктор располагает лишь коммутирующей э. д. с. e_k , индуцируемой полем дополнительных полюсов, но e_k пропорционально скорости вращения ротора и равна нулю при пуске в ход. Следовательно, при помощи потока дополнительных полюсов возможно осуществить условия идеальной коммутации только при одной определенной скорости. Это едва ли не самое слабое место коллекторных двигателей переменного тока. Если же наличие некомпенсированной трансформаторной э. д. с. $e_{тр}$ неизбежно в коммутируемых витках, то приходится лишь принять меры, с одной стороны, чтобы, по возможности, уменьшить $e_{тр}$ и, с другой стороны, чтобы ограничить ток короткого замыкания, создаваемый э. д. с. в коммутируемой секции.

Для ослабления э. д. с. $e_{тр}$ конструктор уменьшает число витков в каждой секции обмотки ротора; конечно, чтобы сохранить общее число витков обмотки ротора, конструктор увеличивает соответственно число секций, а следовательно, и число коллекторных пластин. Таким образом, характерным внешним признаком коллекторного двигателя переменного тока становится относительно большой коллектор. Далее конструктор может уменьшить поток Φ_m каждого полюса двигателя, соответственно увеличив число полюсов.

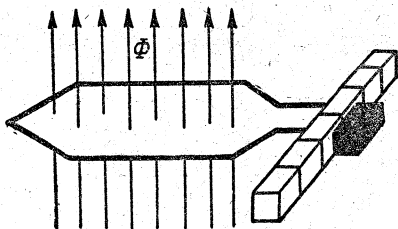


Рис. 15-58. Коммутируемую секцию пронизывает переменный магнитный поток машины.

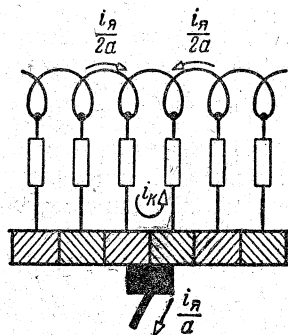


Рис. 15-59. Включение сопротивлений для уменьшения тока короткого замыкания в коммутируемых секциях.

Наконец, радикальным средством для уменьшения $e_{тр}$ является снижение частоты переменного тока. Вместе с тем при снижении частоты уменьшается и реактивное сопротивление двигателя. Это средство возможно применять, конечно, только в обособленных сетях переменного тока. Практически пониженная частота ($16^{2/3} = 50/3$ гц) применяется для электрической тяги на переменном токе.

Для ограничения тока короткого замыкания, возникающего в коммутируемой секции, можно ввести сопротивление в эту секцию, причем рабочий ток ротора должен проходить через такое сопротивление лишь во время коммутации. Это необходимо, чтобы не иметь слишком больших тепловых потерь. Указанный эффект может дать также применение угольных щеток, обладающих повышенным сопротивлением. Если этого недостаточно, то можно включить сопротивления в проводники, соединяющие обмотку якоря с пластинами коллектора (рис. 15-59). Комбинированное использование всех перечисленных средств позволяет конструктору строить практически пригодные коллекторные двигатели переменного тока. Однако они значительно дороже как асинхронных двигателей, так и двигателей постоянного тока. По сравнению с названными двигателями их габариты больше, к. п. д. ниже, коллектор скорее изнашивается и обслуживание сложнее.

Коллекторные двигатели переменного тока могут быть также трехфазными. У подобных двигателей статор

построен так же, как и у асинхронных машин; три тока возбуждения, проходящие по его обмотке, создают результирующее вращающееся магнитное поле. Ротор этих машин в основном напоминает якорь машины постоянного тока.

Условия коммутации в трехфазных коллекторных двигателях в основном так же неблагоприятны, как и в однофазных двигателях.

Наибольший практический интерес представляет собой трехфазный коллекторный двигатель параллельного возбуждения с питанием со стороны ротора. Скорость этого двигателя можно плавно регулировать в широких пределах путем перемещения щеток, установленных на подвижных траверсах. Однако этот двигатель сложен по устройству и дорог. Его применение оправдывает себя лишь в тех случаях, когда только к одному исполнительному механизму требуется двигатель с плавным регулированием скорости и потому нецелесообразно устройство преобразовательной установки для получения постоянного тока ввиду небольшой требующейся мощности.

По отмеченным выше причинам область применения всех коллекторных двигателей переменного тока весьма ограничена.

В СССР серийно изготавливаются лишь однофазные коллекторные двигатели последовательного возбуждения малой мощности (примерно до 150 вт). Они не имеют ни компенсационной обмотки, ни дополнительных полюсов. Известны они под названием универсальных двигателей, так как пригодны как для переменного, так и для постоянного тока. Область применения их — бытовой электропривод (швейные машины, пылесосы и т. п.), мелкий электроинструмент, вентиляторы и т. д.

15-22. Лабораторная работа. Генератор параллельного возбуждения и независимого возбуждения

Опыт холостого хода генератора параллельного возбуждения. Прежде чем приступить к выполнению соединений, нужно определить, какие зажимы относятся к цепи якоря и какие — к цепи возбуж-

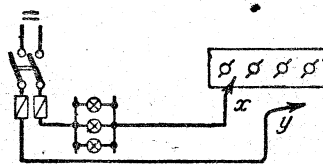


Рис. 15-60. Определение зажимов якоря и обмотки возбуждения.

дения машины. Если мощность машины невелика, то для этой цели можно воспользоваться ламповым реостатом (рис. 15-60), который включается последовательно с испытуемой цепью машины. Выполнив соединения согласно рис. 15-60, сначала замкнуть концы x и y накоротко, чтобы убедиться в исправности лампового реостата, затем присоединить конец x к одному зажиму машины, а конец y — к предполагаемому второму зажиму той же цепи машины (т. е. цепи якоря или цепи возбуждения). Если лампы не горят, то зажимы, к которым присоединены концы x и y , принадлежат к двум различным цепям машины; если лампы горят почти полным накалом, то x и y присоединены к зажимам якоря, если же лампы горят относительно тускло, то x и y присоединены к зажимам возбуждения.

В качестве первичного двигателя удобно пользоваться двигателем параллельного возбуждения. Роль этого двигателя в данном опыте вспомогательная, поэтому обычно у него соединения выполнены заранее (рис. 15-64).

Выполнить соединения генератора согласно рис. 15-61, причем в качестве нагрузки взять водяной, проволочный или же ламповый реостат.

Начинать исследование с опыта холостого хода. Обмотку возбуждения для первого наблюдения оставить разомкнутой. Пустить в ход первичный двигатель и довести его до номинальной скорости генератора. Скорость (число оборотов в минуту) измерять тахометром. В этих условиях э. д. с. в якоре будет индуцироваться только потоком остаточного магнетизма, она составляет 3—8% от номинального напряжения. Затем, включив максимальное сопротивление $R_{ш}$, замкнуть цепь возбуждения и постепенно уменьшать $R_{ш}$, пока не начнется процесс самовозбуждения генератора, во время которого $E_{я}$ и $I_{в}$ растут без внешнего воздействия на цепь возбуждения. Когда процесс самовозбуждения окончится, тогда выводить дальше $R_{ш}$. Таким путем постепенно увеличивать $E_{я}$ и $I_{в}$, пока реостат $R_{ш}$ не будет полностью выведен, при этом скорость двигателя сохранять постоянной и вести запись показаний вольтметра и амперметра. Затем также постепенно уменьшать ток воз-

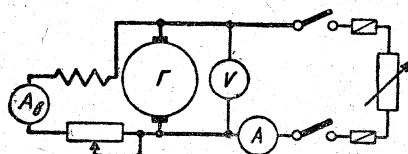


Рис. 15-61. Схема соединений для исследования генератора параллельного возбуждения.

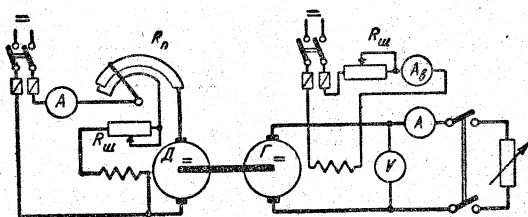


Рис. 15-62. Схема соединений для опыта нагрузки генератора независимого возбуждения.

буждения и записывать показания приборов. Во время данного опыта нельзя возвращаться к пройденным значениям, так как при этом будут смешиваться точки восходящей и нисходящей ветвей характеристики холостого хода, т. е. следует изменять ток возбуждения все время в одном направлении.

Опыт нагрузки генератора параллельного возбуждения. Перейти к снятию внешней характеристики (рис. 15-31). Сначала нагрузить генератор до номинального тока и установить ток возбуждения таким, чтобы при номинальном нагрузочном токе генератор давал номинальное напряжение. Затем постепенно уменьшать нагрузку генератора до нуля, не меняя больше сопротивления в цепи возбуждения. Наблюдать, как по мере уменьшения нагрузки постепенно увеличиваются напряжение генератора и ток возбуждения. В течение всего опыта поддерживать скорость генератора постоянной. На основании результатов этого опыта нужно построить в масштабе кривую внешней характеристики.

Перейти к изучению регулировочной характеристики генератора. Задача в данном случае заключается в регулировании тока возбуждения генератора таким образом, чтобы при всех значениях нагрузки генератор давал одно и то же номинальное напряжение. Опыт начинать с холостого хода генератора, затем постепенно увеличивать нагрузку; предельные условия регулирования имеют место, когда шунтовой реостат будет полностью выведен.

На основании результатов этого испытания нужно построить регулировочную характеристику генератора (рис. 15-28).

Опыты холостого хода и нагрузки генератора независимого возбуждения. Схема соединений для этого опыта дана на рис. 15-62. Опыт холостого хода в условиях независимого возбуждения будет отличаться от условий самовозбуждения тем, что в данном случае все точки характеристики устойчивы, сама характеристика будет такой же, как при самовозбуждении.

Для снятия внешней характеристики нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока, установив ток возбуждения так, чтобы генератор давал номинальное напряжение. Затем постепенно уменьшать нагрузку генератора до минимума, не меняя ток возбуждения.

Наблюдать, как по мере уменьшения нагрузки постепенно увеличивается напряжение генератора; однако это увеличение будет значительно меньше, чем в случае самовозбуждения (рис. 15-31).

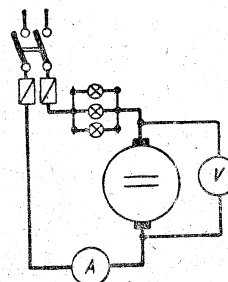


Рис. 15-63. Схема измерения сопротивления якоря.

В течение всего опыта поддерживать скорость генератора постоянной, соответственно регулируя ток возбуждения двигателя.

Опыт измерения сопротивления якоря и сопротивления изоляции машины. Соединить якорь с сетью постоянного тока через ламповый или проволочный реостат согласно рис. 15-63. На основании показаний амперметра и вольтметра определить сопротивление якоря при нескольких значениях тока и взять среднее значение за основу для подсчетов к. п. д. Это измерение нужно выполнять после нагрузочных опытов, так как сопротивление якоря меняется в зависимости от нагрева током и потому желательно его измерять, когда благодаря длительной работе под нагрузкой машина уже прогрета. На основании последнего измерения можно определить электрический к. п. д. генератора.

Измерение сопротивления изоляции следует производить также на прогретой машине. Нужно измерить сопротивление изоляции при помощи индуктора между коллектором и валом и между обмоткой возбуждения и корпусом машины; это сопротивление должно быть не меньше значения, определяемого Правилами устройства электроустановок.

Испытание изоляции необходимо при всякой приемке машины.

План работы

1. Записать паспортные данные генератора.
2. Определить зажимы якоря и возбуждения.

Опыт холостого хода генератора параллельного возбуждения

3. Выполнить соединения согласно рис. 15-61, цепь возбуждения не замыкать.
4. Пустить в ход первичный двигатель и, установив номинальную скорость, записать э. д. с., индуцируемую в якоре полем остаточного магнетизма.
5. Замкнуть цепь возбуждения и, не нагружая генератор, постепенно увеличивать ток возбуждения, отмечая соответствующие значения напряжения, пока шунтовой реостат не будет полностью выведен; затем также посте-

пенно уменьшать ток возбуждения. Скорость генератора во все время опыта поддерживать постоянной.

Таблица опыта холостого хода генератора

$U = E_{\text{я}} =$										Примечание
$I_{\text{в}} =$										

Опыт нагрузки генератора

6. Нагрузить генератор до номинального значения тока и установить $I_{\text{в}}$ так, чтобы при номинальном токе генератор давал номинальное напряжение. Скорость генератора n при этом должна быть также равна номинальной. Затем постепенно уменьшать нагрузку генератора, не меняя сопротивления $R_{\text{ш}}$ в цепи возбуждения и поддерживая скорость постоянной.

Таблица опыта: внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

U	$I_{\text{н}}$	$I_{\text{в}}$	Примечание

7. При холостом ходе генератора установить ток возбуждения таким, чтобы генератор давал номинальное напряжение. Затем постепенно увеличивать нагрузку, поддерживая напряжение и скорость генератора неизменными.

Таблица опыта: регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения

$I_{\text{н}} =$										Примечание
$I_{\text{в}} =$										$U = \dots n = \dots$

Опыты холостого хода и нагрузки генератора независимого возбуждения

8. Выполнить соединения согласно рис. 15-62 и проделать опыты холостого хода и нагрузки в той же последовательности, как и для самовозбуждения. Произвести 7—10 записей показаний приборов (табл. пп. 5 и 6).

9. Выполнить соединения согласно рис. 15-63. Включить ток и определить $R_{\text{я}} = \frac{U}{I}$ при нескольких значениях тока.

10. Измерить сопротивление изоляции генератора при помощи индуктора и указать, в какой мере оно удовлетворяет нормам.

11. Построить характеристику холостого хода генератора в условиях независимого возбуждения и самовозбуждения.

12. Построить внешние характеристики для условий самовозбуждения и независимого возбуждения.

13. Построить регулировочную характеристику генератора с параллельным возбуждением.

15-23. Лабораторная работа. Исследование двигателя параллельного возбуждения

Опыт холостого хода двигателя. Выполнить соединения согласно рис. 15-64, ввести полностью пусковой реостат $R_{\text{п}}$ и вывести шунтовой реостат $R_{\text{ш}}$. Включить ток и постепенно выводить пусковой реостат, при этом следить по амперметру, чтобы пуск происходил, по возможности, без резких скачков тока; после чего остановить двигатель, выключив ток, затем, изменив направление тока в якоре или электромагнитах двигателя, повторить опыт пуска в ход. Познакомившись таким образом с пуском двигателя в ход и реверсированием, перейти к снятию характеристики холостого хода. При помощи шунтового реостата постепенно уменьшать ток возбуждения, пока скорость двигателя не достигнет примерно 150% номинальной; при этом записывать показания электроизмерительных приборов; скорость двигателя измерять тахометром.

Таблица опыта холостого хода двигателя параллельного возбуждения

U	I	$I_{\text{в}}$	n	Примечание

Опыт нагрузки двигателя при помощи тормоза. Схема соединений для этого опыта остается той же, как и для холостого хода (рис. 15-64). Нагрузку на валу

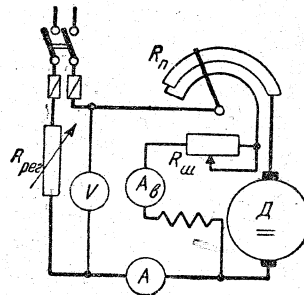


Рис. 15-64. Схема соединений для исследования двигателя параллельного возбуждения.

двигателя нужно постепенно увеличивать посредством динамометров, пока ток двигателя не достигнет своего номинального значения. Вращающий момент подсчитывается по формуле (см. § 15-23): $M_{вр} = (g_1 - g_2)r$ килограммометров, здесь g_1 и g_2 — показания динамометров; $кг$; r — радиус шкива, $м$. Мощность, отдаваемая двигателем на валу, подсчитывается на основании вращающего момента:

$$P_2 = M_{вр}\omega = 1,027nM_{вр} [вт].$$

Мощность P_1 , получаемая испытуемым двигателем, определяется на основании показаний вольтметра и амперметров

$$P_1 = U(I_a + I_b),$$

что дает возможность подсчитать и к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Таким образом, результаты опыта нагрузки двигателя дают возможность построить механическую характеристику двигателя и кривую зависимости к. п. д. двигателя от нагрузки на валу.

Таблица опыта нагрузки двигателя параллельного возбуждения посредством тормоза

Наблюдено						Вычислено		
U	I	I _в	n	g ₁	g ₂	M _{вр}	P ₂	η

Опыт нагрузки двигателя посредством генератора. Вместо нагрузки двигателя при помощи тормозных устройств можно применить способ агрегата. Для испытания по этому способу должны быть непосредственно соединены две машины параллельного возбуждения, из которых одна должна работать в качестве двигателя, а вторая — генератора (рис. 15-65).

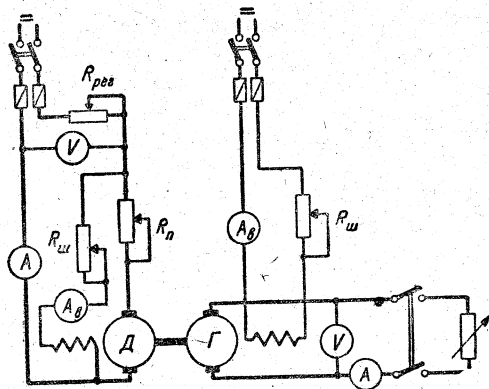


Рис. 15-65. Схема соединений для нагрузки двигателя посредством генератора независимого возбуждения.

Чтобы определить мощность P_2 , отдаваемую двигателем на валу, мы должны поделить мощность, отдаваемую генератором, на к. п. д. генератора: $P_2 = \frac{P_Г}{\eta_Г} = \frac{U_Г I_Г}{\eta_Г}$, тогда момент двигателя

$$M_{вр} = \frac{P_2}{\omega} = \frac{U_Г I_Г}{\omega \eta_Г}$$

или этот момент в $кг \cdot м$

$$M_{вр} = \frac{U_Г I_Г}{1,027n\eta_Г}.$$

Таким путем мы можем использовать опыт нагрузки по способу агрегата также и для построения механической характеристики двигателя, т. е. кривой зависимости скорости двигателя от вращающего момента.

Таблица опыта нагрузки двигателя параллельного возбуждения посредством генератора

Наблюдено						Вычислено			Примечание
Двигатель			Генератор			P ₂	M _{вр}	η	
U	I	I _в	U _Г	I _Г	I _{в.Г}				

Опыт проводим следующим образом: выполнив соединения агрегата согласно схеме рис. 15-65, пускаем двигатель в ход и возбуждаем генератор. Затем постепенно увеличиваем при помощи нагрузочного реостата ток, отдаваемый генератором, пока он не достигнет номинального значения.

Опыт измерения сопротивления якоря и сопротивления изоляции. Этот опыт выполняется совершенно так же, как и для генератора параллельного возбуждения (рис. 15-63).

План работы

1. Записать паспортные данные двигателя.
2. При помощи вольтметра или контрольной лампы определить зажимы якоря и зажимы обмотки возбуждения двигателя и генератора.
3. Выполнить соединения согласно рис. 16-64, пустить двигатель в ход, затем реверсировать двигатель.
4. Провести опыт холостого хода: сначала довести скорость двигателя до номинального значения, регулируя соответственно ток возбуждения, затем постепенно уменьшать этот ток, пока скорость двигателя не достигнет 150% номинальной. Реостатом $R_{рег}$ поддерживать напряжение постоянным.
5. На основании результатов опыта холостого хода построить характеристику холостого хода двигателя (рис. 15-42).
- 6а. Провести опыт нагрузки двигателя посредством ленточного тормоза: пустить двига-

тель в ход, затем довести ток двигателя до номинального значения при номинальной скорости, после чего постепенно разгружать двигатель до холостого хода. Произвести 7—10 отсчетов показаний приборов. Во все время опыта поддерживать напряжение постоянным.

66. Провести опыт нагрузки двигателя посредством генератора, выполнив соединения двигателя и генератора согласно рис. 15-65; пустить двигатель в ход и возбудить генератор, затем, нагружая генератор, довести ток, потребляемый двигателем, до номинального значения при номинальной скорости, после чего постепенно разгружать двигатель (уменьшая нагрузку генератора). Произвести 7—10 отсчетов показаний приборов. Напряжение на зажимах двигателя во все время опыта поддерживать постоянным, равным номинальному значению, посредством реостата $R_{рег}$.

7. На основании результатов измерений построить кривые зависимости скорости и к. п. д. от момента на валу двигателя. Определить относительное изменение скорости двигателя.

8. Измерить сопротивление обмотки возбуждения и сопротивление якоря двигателя.

9. Измерить сопротивление изоляции обмотки якоря и сопротивление изоляции обмотки возбуждения.

15-24. Лабораторная работа.

Исследование двигателя последовательного возбуждения

Опыт нагрузки. Для нагрузки двигателя применить вышеописанный ленточный тормоз. Выполнив соединения согласно рис. 15-66, пустить двигатель в ход; при этом несколько подтянуть динамометры, чтобы двигатель не разносил. Закончив пуск, нагружать двигатель при помощи динамометров до номинального тока. Затем постепенно уменьшать нагрузку, отмечая при этом показания всех приборов. На щитке двигателя указываются пределы скорости: низшая скорость, соответствующая полной нагрузке, и высшая скорость, допускаемая по соображениям механической прочности и коммутации. Постепенно разгружая двигатель, прекратить опыт, когда скорость двигателя достигнет высшего допустимого значения.

Выключив ток, переключить его направление в одной из обмоток двигателя и вновь пустить двигатель в ход, таким путем осуществить реверсирование двигателя.

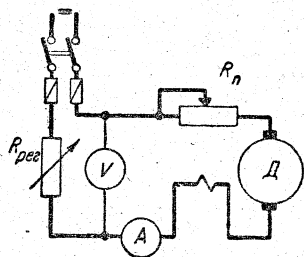


Рис. 15-66. Схема соединений для исследования двигателя последовательного возбуждения.

На основании результатов опыта построить кривые зависимости скорости и тока двигателя от момента на валу; последний определять так же, как и для двигателя параллельного возбуждения:

$$M_{вр} = (g_1 - g_2) r.$$

Наконец, можно определить к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

мощность, получаемая испытуемым двигателем:

$$P_1 = UI [см],$$

а мощность, отдаваемая им на валу:

$$P_2 = 1,027nM_{вр} [см],$$

следовательно,

$$\eta = \frac{1,027nM_{вр}}{UI}.$$

Вследствие неточностей отсчетов по динамометрам и тахометру можно ограничиться подсчетом двух-трех значений к. п. д., соответствующих условиям, когда двигатель загружен полностью или близок к такой нагрузке.

Наконец, при помощи амперметра и вольтметра измерить сопротивления якоря $R_я$ и обмотки возбуждения $R_в$ и подсчитать отдельно потери в меди двигателя при полной нагрузке

$$P_m = I^2 (R_я + R_в),$$

потери в стали и механические

$$P_c + P_{мех} = P_1 - P_2 - P_m.$$

П л а н р а б о т ы

1. Записать паспортные данные двигателя.
2. Выполнить соединения согласно рис. 15-66, пустить двигатель в ход и загрузить его до номинального значения тока, затем постепенно уменьшить нагрузку, пока скорость двигателя не достигнет наибольшего допустимого значения. Во все время опыта поддерживать постоянным напряжение на зажимах двигателя, пользуясь для этого реостатом $R_{рег}$.

Таблица опыта: тормозная нагрузка двигателя последовательного возбуждения

Наблюдено					Вычислено			Примечание
U	I	n	g ₁	g ₂	M _{вр}	η	P ₂	

3. Измерить при помощи амперметра и вольтметра (рис. 16-63) сопротивления $R_я$ и $R_в$.

4. Измерить омметром сопротивление изоляции обмоток двигателя.

5. Подсчитать к. п. д. при двух-трех значениях нагрузок, близких к номинальной.

6. Построить кривые зависимости скорости и тока двигателя от момента на валу (рис. 15-45).

7. Подсчитать механические потери и потери в стали двигателя при полной нагрузке.

15-25. Лабораторная работа. Исследование электромашинного усилителя

Характеристика холостого хода. Эта характеристика у ЭМУ представляет собой зависимость напряжения (э. д. с.) между выходными зажимами машины от тока одной из обмоток управления при разомкнутой выходной цепи. Схема соединений для этого и последующих опытов дана на рис. 15-67. Номинальный ток любой из обмоток управления ЭМУ измеряется в миллиамперах и для поддержания его достаточно небольшого аккумулятора $E_{вс}$. Чтобы получить возможно более плавную регулировку этого тока в широких пределах удобно использовать потенциометрическую схему включения регулировочного реостата R_n , дающую возможность плавно уменьшать ток возбуждения до нуля. В качестве первичного двигателя можно использовать асинхронный двигатель, скорость которого мало зависит от нагрузки, или двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Схема соединений первичного двигателя постоянная и учащимися не выполняется. Первичный двигатель должен поддерживать скорость ЭМУ постоянной при всех режимах работы.

От характеристики холостого хода генератора независимого возбуждения характеристика ЭМУ отличается прямолинейностью, обусловленной тем, что ЭМУ рассчитывается на работу при ненасыщенной магнитной цепи. Кроме того, из-за наличия усиления у ЭМУ значительно сильнее сказывается влияние остаточного магнетизма.

При выполнении опыта сначала оставить цель управляющей обмотки разомкнутой и, пустив в ход первичный двигатель, измерить э. д. с., индуцируемую потоком остаточного магнетизма. Затем включить источник управляющего входного тока и при помощи реостата R_n постепенно увеличивать управляющий ток, пока не будет достигнуто его наибольшее допустимое значение, после чего также постепенно уменьшать управляющий ток $I_{вх}$, записывая соответствующие показания приборов. Вследствие изменения остаточного магнетизма характеристика петлевидна. Следует иметь в виду, что изменение тока можно производить только в одном направлении, т. е. только увеличивать или только уменьшать.

Внешняя характеристика. Особенностью ЭМУ является возможность изменять наклон внешней характеристики путем шунтирования компенсационной обмотки реостатом (рис. 15-67).

Сначала полезно убедиться, что при отсутствии компенсации реакции якоря (когда компенсационная обмотка не включена или замкнута накоротко шунтирующей ветвью) небольшой нагрузкой током выходной цепи достаточно для того, чтобы понизить выходное напряжение ЭМУ почти до нуля.

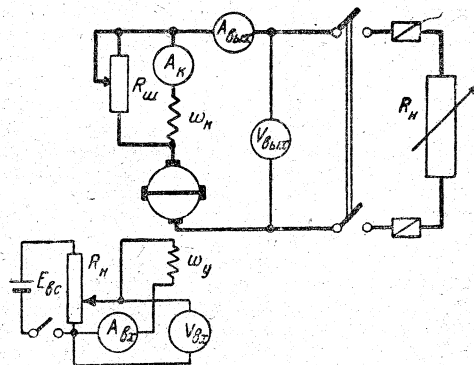


Рис. 15-67. Схема соединения для исследования электромашинного усилителя.

Внешнюю характеристику целесообразно снять для условий небольшой перекомпенсации и недокомпенсации (рис. 15-53). В начале ползушку реостата R_n , шунтирующего компенсационную обмотку, можно поставить примерно в среднее положение. Затем при холостом ходе генератора путем регулирования тока управляющей обмотки установить номинальное напряжение на выходных зажимах ЭМУ, после чего, не изменяя больше $I_{вх}$, нагрузить выходную цепь номинальным током и посредством увеличения компенсации установить номинальное напряжение на выходных зажимах при номинальном токе. Таким путем создаются условия небольшой перекомпенсации, так как за счет увеличения потока покрывается внутренняя потеря напряжения в якоре ЭМУ. Теперь, чтобы снять внешнюю характеристику $U_{вх} = f(I_{вх})$ при $I_{вх} = \text{const}$, следует постепенно разгружать генератор, записывая соответствующие показания измерительных приборов.

Для того чтобы получить внешнюю характеристику при недокомпенсации, нужно установить опять номинальные напряжение и ток. Затем посредством уменьшения компенсации (уменьшения R_n), понизить выходное напряжение на 20—30%, после чего путем увеличения тока $I_{вх}$ вновь довести выходное напряжение до номинального значения. Затем снимать характеристику как в предыдущем случае: постепенно уменьшать нагрузку, записывая соответствующие показания приборов. ЭМУ обычно работает в условиях недокомпенсации, чем обеспечивается большая устойчивость режима. С другой стороны, с уменьшением компенсации понижается и коэффициент усиления ЭМУ.

Изучение условий при значительной перекомпенсации целесообразно совместить с наблюдениями явлений самовозбуждения ЭМУ от остаточного магнетизма. Для такого опыта следует сначала полностью разгрузить ЭМУ, а затем плавно довести до нуля управляющий ток $I_{вх}$; наконец, разомкнуть ветвь реостата R_n , шунтирующую компенсационную обмотку. Затем нужно плавно уменьшать сопротивление выходной нагрузочной цепи. Выходное напряжение сначала будет постепенно возрастать по мере увеличения нагрузочного

тока, и если остаточный магнетизм был достаточно велик, то при некотором значении выходного тока начнется самовозбуждение — выходные напряжение и ток будут произвольно возрастать. Когда будет отмечено начало процесса самовозбуждения, тогда следует быстро выключить нагрузку. Во избежание повреждения машины, большим током последовательно с нагрузкой следует включить автоматический выключатель или плавкий предохранитель.

Коэффициент усиления ЭМУ при различных условиях нагрузки и компенсации может быть определен на основании результатов вышеописанных опытов, как отношение выходной мощности к входной.

Настоящая работа знакомит только с некоторыми основными особенностями ЭМУ.

П л а н р а б о т ы

1. Записать паспортные данные ЭМУ.
2. Выполнить соединения согласно рис. 15-67, цепь управляющей обмотки не замыкать. Пустить в ход первичный двигатель и записать значение э. д. с., индуктируемой остаточным магнетизмом.
4. Замкнуть цепь управляющей обмотки и, не нагружая генератор, постепенно увеличивать входной ток, отмечая соответствующие значения выходного напряжения, пока входной ток не будет доведен до предельного значения. Затем также постепенно уменьшать $I_{вх}$. Скорость ЭМУ во все время опыта должна оставаться постоянной.
5. На основании результатов измерений построить кривую характеристики холостого хода.
6. Провести опыт нагрузки ЭМУ при отсутствии компенсации.

Таблица внешних характеристик ЭМУ при различных условиях компенсации

$U_{вых}$	$I_{вых}$	$U_{вх}$	$I_{вх}$	Примечание

7. При холостом ходе ЭМУ установить номинальное напряжение на выходных зажимах. Затем включить нагрузку и путем регулирования компенсации достичь номинального напряжения на выходных зажимах при номинальном токе. Постепенно разгружая генератор записывать показания приборов.

8. Установить условия недокомпенсации и снять соответствующую внешнюю характеристику.

Таблица опыта холостого хода ЭМУ

$U_{вых}$	
$I_{вх}$	

9. На основании измерений пп. 7 и 8 построить соответствующие внешние характеристики.

10. Подсчитать коэффициент усиления ЭМУ при различных условиях нагрузки и компенсации.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

16-1. Основные определения

Синхронная машина представляет собой электрическую машину, скорость вращения n которой находится в строго постоянном отношении к частоте f сети переменного тока, с которой эта машина работает:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (16-1)$$

где p — число пар полюсов машины.

Генераторы переменного тока промышленной частоты (50 гц) все являются синхронными машинами. Далее, синхронные машины изготавливаются в качестве мощных двигателей для электропривода, требующего постоянную скорость. Наконец, эти машины уста-

навливаются также в качестве синхронных компенсаторов — синхронных двигателей, работающих вхолостую и дающих в сеть регулируемый реактивный ток, что, в частности, в промышленных установках дает возможность поддерживать высокий $\cos \phi$, заменяя большие батареи статических конденсаторов.

Синхронная машина состоит из неподвижной части статора, в пазах которого располагается трехфазная обмотка, и вращающейся части ротора с электромагнитами, питаемыми постоянным током через контактные кольца и щетки (рис. 16-1). Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины, а ротор выполняется или явнопо-

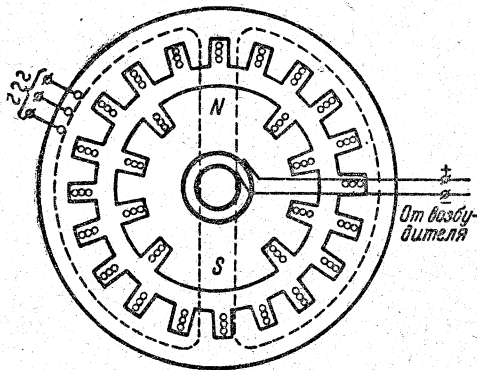


Рис. 16-1. Синхронная машина с вращающимися электромагнитами.

люсным (с выступающими полюсами — рис. 16-2), или неявнополюсным (цилиндрический ротор — рис. 16-1 и 16-3). Постоянный ток для возбуждения электромагнитов син-

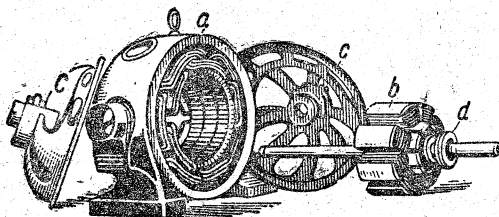


Рис. 16-2. Синхронная машина малой мощности с явнополюсным ротором в разобранном виде. а — статор; б — ротор; в — подшипниковые щиты; г — кольца для питания электромагнитов постоянным током.

хронная машина получает или от независимого источника, или же в большинстве случаев от небольшого генератора — возбуждателя, помещенного на общем валу с синхронной машиной; наконец, в последнее время для синхронных двигателей применяется питание цепи возбуждения от се-

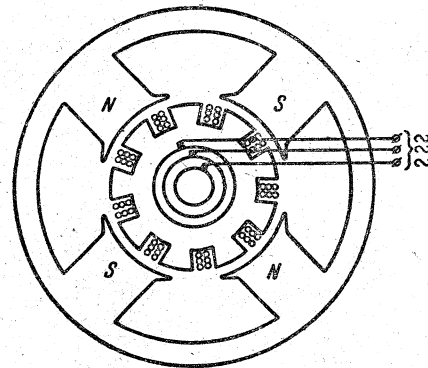


Рис. 16-4. Синхронная машина с неподвижными электромагнитами.

ти переменного тока через селеновые или механические выпрямители (§ 17-18), а для небольших генераторов — самовозбуждения при помощи тех же выпрямителей.

Довольно редко для синхронных машин мощностью не свыше 100 *кв*а применяется обратное расположение частей (рис. 16-4): электромагниты устраиваются неподвижными на статоре, а обмотка переменного тока размещается в пазах ротора, изготовленного из листовой электротехнической стали; в этом случае с внешней цепью обмотка переменного тока соединяется через контактные кольца и щетки.

Основным преимуществом конструкции с вращающимися электромагнитами являются возможность более надежной изоляции неподвижной обмотки переменного тока и относительная простота ее соединения с сетью переменного тока. Это весьма существенно при тех высоких напряжениях (до 33 *кв*) и больших мощностях (до 200 000 *кв*а), на которые строятся современные синхронные машины.

В зависимости от рода первичного двигателя, для работы с которым

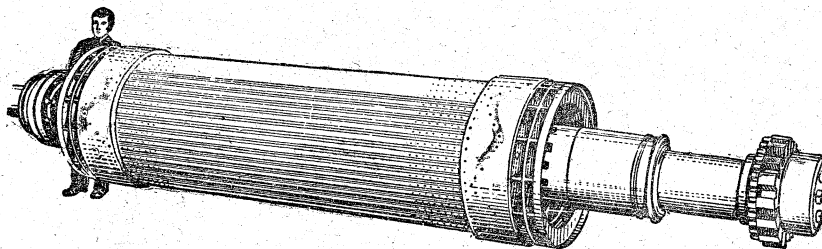


Рис. 16-3. Неявнополюсный ротор мощного турбогенератора.

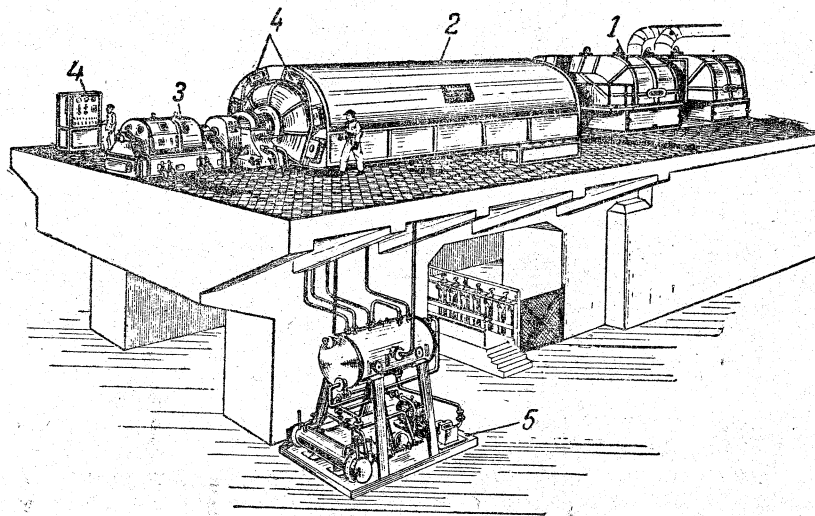


Рис. 16-5. Мощный турбогенератор с водородным охлаждением.
1 — паровая турбина; 2 — генератор; 3 — возбудитель; 4 — щит управления водородным охлаждением;
5 — установка для водородного охлаждения.

предназначен синхронный генератор, принято различать турбогенераторы, гидрогенераторы и дизельгенераторы.

Турбогенераторы (рис. 16-5) — это быстроходные неявнополюсные машины с горизонтальным ва-

лом, у которых первичным двигателем служит паровая турбина. Гидрогенераторы (рис. 16-6) — это в большинстве случаев тихоходные явнополюсные и многополюсные машины с вертикальным валом, у которых первичным двигателем служит гидравлическая турбина. Дизельгенераторы, — у которых первичным двигателем служит двигатель внутреннего сгорания.

Выбор между явнополюсным и неявнополюсным ротором определяется скоростью машины. Техника стремится создавать турбогенераторы с предельной скоростью вращения (3000 об/мин), так как с увеличением скорости уменьшается стоимость турбогенератора и повышается его к. п. д.

Синхронные двигатели имеют ряд преимуществ перед асинхронными при низких скоростях и больших мощностях. Они изготавливаются для мощностей порядка от 40 до 7500 квт при скоростях от 1000 до 125 об/мин. При таких скоростях целесообразно применение явных полюсов.

В синхронной машине, как и в других электрических машинах, в которых имеется отдельная обмотка для возбуждения главного магнитного поля, принято называть якорем ту часть машины, в обмотке которой индуцируется э. д. с., а магнитной системой —

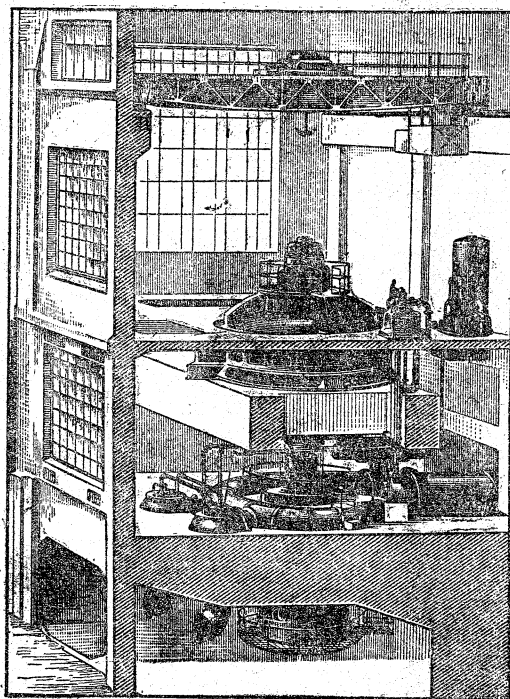


Рис. 16-6. Гидрогенератор.

индуктором — ту часть машины, обмотка которой служит для возбуждения главного магнитного поля. Следовательно, в синхронных машинах основного типа статор служит якорем, а ротор — индуктором.

Способ возбуждения главного магнитного поля является основным отличием синхронной машины от асинхронной. В синхронной машине магнитный поток создается при помощи постоянного тока, подводимого в ротор через контактные кольца от внешнего источника. Это дает возможность разгрузить сеть переменного тока от реактивного намагничивающего тока.

Синхронная машина обратима, т. е. она может работать как генератором, так и двигателем, причем она переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, воздействует ли на ее вал вращающая или тормозящая механическая сила. В первом случае она получает на валу механическую и отдает в сеть электрическую энергию, во втором случае она потребляет из сети электрическую и отдает на валу механическую энергию.

Рабочий процесс синхронной машины зависит от того, связана ли частота ее э. д. с. с частотой сети, питаемой другими синхронными генераторами, или же машина работает независимо и сама определяет частоту тока в сети.

При независимой работе частота сети меняется вместе с изменением скорости первичного двигателя, вращающего синхронный генератор. В этом случае индуцируемые в обмотках статора э. д. с. при включении нагрузки создают токи в обмотках статора. Последние, взаимодействуя с магнитным полем машины, создают тормозящую силу, которую должен преодолевать первичный двигатель. Чем больше нагрузка генератора, тем больше и эта тормозящая сила, при посредстве которой происходит преобразование механической мощности первичного двигателя в электрическую мощность, отдаваемую в сеть.

Ротор машины имеет $2p$ полюсов, и при n оборотах в минуту э. д. с., индуцируемая в обмотке статора, имеет частоту

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (16-2)$$

При параллельной работе синхронного генератора с сетью, питаемой другими генераторами, или при работе синхронной машины двигателем частота машины должна быть равна частоте сети, так как только при этом условии может поддерживаться во все время цикла переменного тока равновесие между напряжением сети и э. д. с. машины. Но для постоянства частоты машины необходима строго постоянная синхронная скорость вращения ротора, чтобы индуцируемая им э. д. с. попадала в такт с изменениями напряжения сети.

Помимо главного магнитного поля — поля ротора — трехфазная система токов статора создает свое вращающееся магнитное поле (поле якоря). Угловая скорость вращения этого поля ω_n определяется частотой переменного тока (§ 8-8).

$$\omega_n = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}, \quad (16-3)$$

где ω — угловая частота переменного тока, а p — число пар полюсов вращающегося поля, а так как число пар полюсов равно числу пар полюсов вращающегося поля то, следовательно,

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60},$$

т. е. угловая скорость вращающегося поля статора равна угловой скорости ротора. Таким образом, в синхронной машине имеются две намагничивающие силы: ротора и якоря (статора): н. с. якоря при этом вращается в ту же сторону и с такой же скоростью, как и полюса ротора, таким образом, она неподвижна по отношению к этим полюсам. На этом основании мы можем складывать геометрически векторы н. с. индуктора и якоря, так же как мы складывали н. с. ротора и статора асинхронной машины, и мы можем считать, что в действительности при нагрузке машины ее магнитное поле в воздушном зазоре создается совместным действием н. с. ротора и статора.

При замыкании независимо работающего генератора на чисто активную нагрузку, если пренебречь реактивным внутренним сопротивлением статора, ток в проводниках статора

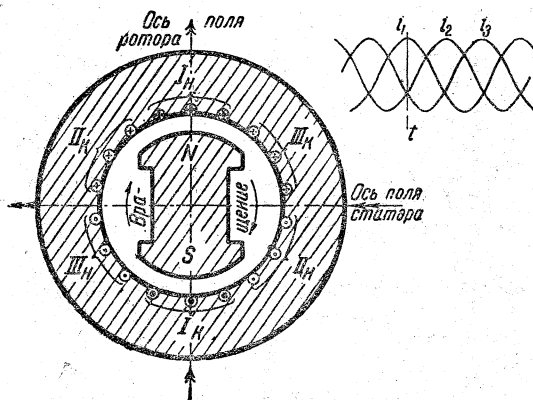


Рис. 16-7. Относительное положение осей потоков ротора и статора.

будет достигать амплитуды вместе с э. д. с. соответствующей фазы обмотки, т. е. в тот момент, когда проводники этой фазы находятся против середины соответствующего полюса ротора. Ось вращающегося поля статора совпадает в этот момент с осью той обмотки, ток которой имеет максимальное значение. Таким образом, ось поля ротора в рассматриваемом случае образует с осью поля статора угол в 90° электрических градусов (рис. 16-7). Если же ток генератора отстает по фазе от э. д. с. на угол ψ , то ток в соответствующей фазе обмотки статора будет достигать своего максимального значения только тогда, когда ось поля ротора повернется по отношению к проводникам данной фазы на угол ψ .

Если мы возьмем предельный случай сдвига фаз $\psi = 90^\circ$, то в этих условиях ток будет достигать максимального значения в тот момент, когда ось потока ротора будет прямо противоположна оси потока статора, т. е. оси потоков образуют угол в 180° . Таким образом, при индуктивном сдвиге фаз ось потока ротора (индуктора) опережает ось потока статора (якоря) на $90^\circ + \psi$. Ротор как бы упруго связан с вращающимся полем статора, и всякое изменение сдвига фаз в цепи генератора вызывает соответствующее изменение угла между осями полей статора и ротора.

Для генераторного режима машины характерно опережение ротором поля статора, при этом взаимодействие токов статора и поля машины создает

механическую силу, тормозящую вращение ротора; эту силу должен преодолеть первичный двигатель машины.

Сложнее условия при параллельной работе синхронной машины с другими синхронными машинами. В этом случае для включения машины в общую сеть требуется предварительная синхронизация, т. е. частота машины должна быть сделана строго равной частоте сети, а э. д. с. машины — равной по величине и противоположной по фазе напряжению сети. При идеальной синхронизации машины с сетью токи в обмотках статора после включения машины на параллельную работу будут равны нулю, так как поле ротора индуцирует в обмотках статора э. д. с., уравнивающие полностью напряжения сети (рис. 16-8). В таких условиях синхронная машина не отдает энергии в сеть и не потребляет ее, т. е. по отношению к сети она не служит ни генератором, ни двигателем. Собственные потери синхронной машины, механические и магнитные, при этом покрывает первичный двигатель. Для того чтобы заставить синхронную машину, включенную в сеть, работать генератором, отдавая в эту сеть электрическую энергию, необходимо увеличить механический момент, приложенный первичным двигателем к валу машины. Тогда под действием возросшего вращающего момента ротор машины сместится вперед, и если раньше середина полюса ротора находилась против проводников данной фазы статора как раз в тот момент, когда напряжение сети на этой фазе достигало своего максимума, то теперь это условие нарушается, и так как э. д. с. ротора и напряжение сети уже взаимно не уравниваются, то в обмотках статора возникает

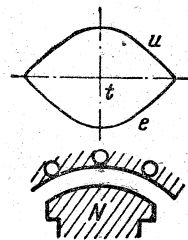


Рис. 16-8. Электродвижущая сила машины e уравнивает напряжение сети u .

ток, создаваемый результирующим напряжением. Взаимодействие этого тока с полем машины создает тормозящую силу, действующую на ротор.

При посредстве указанной силы механическая мощность первичного двигателя будет превращаться в электрическую мощность, отдаваемую генератором в сеть. Поле ротора будет как бы вести за собой поле статора. Если затем уменьшать вращающий момент на валу синхронной машины, то под действием тормозящего момента электромагнитных сил поле ротора будет уменьшать свой угол опережения по отношению к полю статора и вместе с уменьшением угла между осями полей будет уменьшаться и тормозящая сила взаимодействия токов статора и поля машины.

Наконец, когда напряжение сети будет уравниваться э. д. с. статора (рис. 16-8), тогда машина перестает отдавать энергию в сеть, ток в обмотках статора исчезает, и тормозящая электромагнитная сила становится равной нулю.

Если теперь приложить к валу машины вместо вращающего тормозящий момент механической нагрузки, то ротор сместится по отношению к вращающему полю в сторону отставания. Вновь возникнут токи в обмотках статора и создадут электромагнитные силы взаимодействия токов статора и поля ротора, но на этот раз эти силы будут стремиться сместить ротор вперед, они создадут теперь вращающий момент, при посредстве которого электрическая мощность сети превращается в механическую мощность на валу машины; таким путем синхронная машина переходит к работе двигателем. Режим машины меняется от генераторного на двигательный и обратно в зависимости от механического воздействия на вал машины, причем электромагнитные силы играют роль своеобразной упругой связи между полем ротора и полем статора. Можно сравнить их с пружинами, связывающими два шкива *A* и *B* (рис. 16-9), ведущий и ведомый. Шкив *A* изображает в такой модели поле ротора, шкив *B* — поле статора. Всякое изменение механической силы на

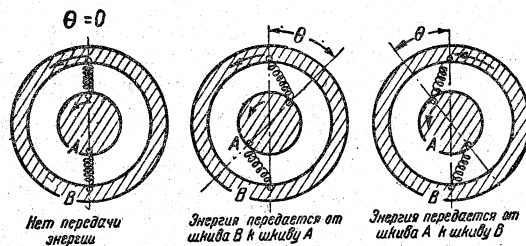


Рис. 16-9. Механическая модель условий работы синхронной машины.

Шкивы *A* и *B* соединены только пружинами.

валу шкива *A* вызывает изменение относительного положения шкивов и изменение натяжения пружин.

У синхронной машины при параллельной работе скорость вращения жестко определяется частотой сети, изменение режима меняет лишь угол между осями полей ротора и статора, в то время как в асинхронной машине в таких условиях меняется скорость вращения (скольжение). Но в синхронной машине в отличие от асинхронной основное магнитное поле — поле ротора — создается независимым постоянным током и, следовательно, поток ротора можно регулировать и тем самым изменять и э. д. с. статора.

16-2. Холостой ход генератора

Электродвижущая сила индуцируется в обмотке статора синхронной машины по существу та же, как и в асинхронной, только в синхронной машине индуцирующий магнитный поток возбуждается постоянным током, а в асинхронной машине он возбуждается трехфазной системой токов. Уравнение э. д. с. якоря синхронной машины составляется поэтому так же, как и уравнение э. д. с. статора асинхронной машины (§ 14-5). Как и там, поток, сцепляющийся с одним витком обмотки якоря, изменяется в пределах от $+\Phi$ до $-\Phi$; при этом средняя величина э. д. с., индуцируемой в витке за половину периода переменного тока, будет:

$$E_{1cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt,$$

где $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ — мгновенное значение э. д. с. одного витка; следовательно,

$$E_{1cp} = -\frac{2}{T} \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = \\ = \frac{4}{T} \Phi = 4f\Phi,$$

а так как действующее значение э. д. с. равно среднему, умноженному на коэффициент формы кривой k_Φ , то

$$E_1 = E_{1cp} k_\Phi = 4k_\Phi f\Phi.$$

Электродвижущие силы отдельных витков каждой фазы обмотки складываются, так же как в асинхронной машине, геометрически, что нужно учесть посредством обмоточного коэффициента $k < 1$ (§ 14-4). Геометрической сложение э. д. с. отдельных витков представляет собой в известной мере потерю э. д. с., но мы должны идти на эту потерю, чтобы лучше использовать окружность якоря.

Итак, вводя обмоточный коэффициент, мы получаем уравнение э. д. с. обмотки статора (якоря) синхронной машины, имеющей w витков на фазу:

$$E = 4k_\Phi f w k \Phi. \quad (16-4)$$

Однако для синхронной машины мы не можем ограничиваться только одним уравнением э. д. с.; нас интересует также магнитная характеристика этой машины, т. е. зависимость потока и э. д. с. машины от намагничивающего тока. В асинхронной машине условия были иные, там постоянство напряжения статора требовало практического постоянства магнитного потока.

При холостом ходе синхронной машины ее э. д. с. создается только глав-

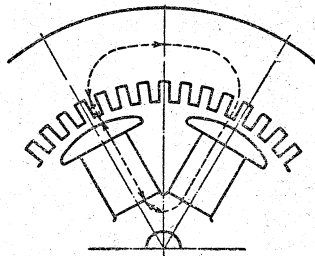


Рис. 16-10. Магнитная цепь синхронной машины.

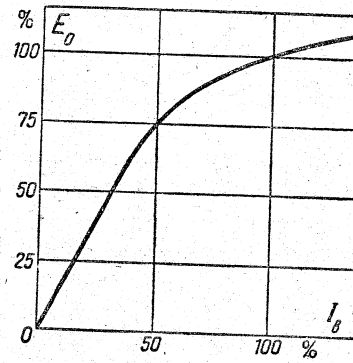


Рис. 16-11. Характеристика холостого хода (магнитная характеристика синхронной машины).

ным магнитным потоком, поэтому в условиях холостого хода кривая $E = F(I_b)$ будет отличаться только масштабом от кривой $\Phi = F_1(I_b)$. Эту зависимость принято называть характеристикой холостого хода или магнитной характеристикой. Она может быть получена путем расчета магнитной цепи машины для различных значений потока Φ .

Магнитная цепь машины состоит из пяти основных участков: воздушного зазора, зубцов статора, спинки статора, полюсного сердечника с башмаками и ярма ротора (рис. 16-10). Суммируя полный ток всех пяти участков, мы находим полный ток (ампер-витки) возбуждения полюса, необходимый для создания заданного значения потока в воздушном зазоре машины. Для построения характеристики необходимо повторить расчет не менее чем для пяти точек. Эту характеристику можно получить также опытным путем (рис. 16-11), для чего нужно при номинальной скорости вращения синхронной машины постепенно изменять ток возбуждения I_b от нуля до некоторого максимума, а от максимума опять до нуля. Замеренная при этом зависимость э. д. с. E_0 от тока возбуждения I_b изобразится двумя ветвями характеристики: восходящей и нисходящей. Однако это раздвоение невелико, оно обусловлено влиянием гистерезиса в полюсах и ярме машины (на рис. 16-11 показана средняя линия). В нижней своей части характеристика холостого хода прямолинейна, вследствие того что при малых индукциях

большая часть н. с. ($I_B \omega_B$) затрачивается на воздушный зазор между статором и ротором, для которого зависимость $\Phi = F(I_B)$ изображается прямой линией. При дальнейшем увеличении потока начинается магнитное насыщение стали, магнитное сопротивление быстро возрастает и требует уже значительной части н. с., а вследствие этого характеристика наклоняется в сторону оси абсцисс. Таким образом, характеристика холостого хода напоминает несколько спрямленную кривую намагничивания стали, причем спрямление кривой вызывается наличием воздушного промежутка в магнитной цепи.

Кривая мгновенных значений э. д. с. $e = F(t)$ синхронной машины должна быть синусоидальной; э. д. с., индуцируемая в проводнике статора, может быть выражена через постоянные величины: длину l проводника, окружную скорость v и через радиальную составляющую индукции в воздушном зазоре, т. е.

$$e = B_r l v.$$

Следовательно, для получения синусоидальной э. д. с. в проводниках обмотки статора необходимо синусоидальное распределение индукции вдоль окружности ротора. В случае явно выраженных полюсов целесообразно для этой цели использовать форму полюсных наконечников: нужно строить явнополюсную машину с неравномерным воздушным зазором, постепенно увеличивающимся от середины полюса к краям; тогда индукция распределяется обратно пропорционально магнитному сопротивлению. Это дает возможность посредством соответствующего подбора формы полюсного башмака достичь приближенно синусоидального распределения индукции вдоль окружности ротора. Однако такой способ получения синусоидальной кривой неприменим для неявных полюсов быстроходных машин.

В этих машинах путем соответствующего распределения обмотки возбуждения вдоль окружности ротора удается получить трапецевидное распределение индукции вдоль окружности ротора, что уже представляет со-

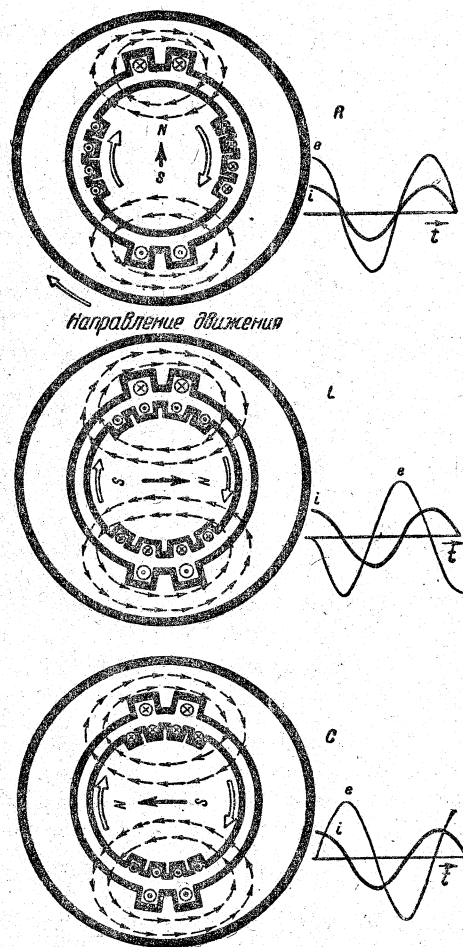


Рис. 16-12. Реакция якоря в синхронной машине при различных условиях нагрузки.

бой приближение к синусоиде, затем используются специальные свойства распределенной обмотки статора, благодаря которым удается подавить высшие гармонические э. д. с.

16-3. Реакция якоря

При нагрузке синхронной машины ее магнитное поле создается не одним возбуждением ротора, но на него воздействует и н. с. обмотки якоря, обтекаемой нагрузочным током. Форма кривой э. д. с. нагруженного генератора зависит поэтому не только от распределения поля ротора, но и от распределения поля статора. Последнее также должно быть, по возможности, синусоидальным для того, чтобы

результатирующее поле и кривая э. д. с. нагруженного генератора были синусоидальны. Воздействие поля якоря на основное магнитное поле носит название реакции якоря.

В асинхронной машине ток статора изменяется автоматически вслед за изменением тока ротора и, таким образом, сохраняется почти постоянным поток в воздушном зазоре.

В синхронной машине изменения тока статора (якоря) не вызывают автоматического изменения постоянного тока возбуждения. Поэтому результирующее магнитное поле изменяется с изменением нагрузки, причем в зависимости от сдвига фаз в цепи нагрузки изменяется относительное положение вращающегося поля статора по отношению к вращающемуся полю ротора, а следовательно, и характер реакции якоря.

При активной нагрузке ток в фазе статора достигает максимума в тот момент, когда против этой фазы находится середина полюса (рис. 16-12), поле статора в этом случае будет поперечным, ось потока полюсов перпендикулярна оси поля статора (см. также рис. 16-7), — у набегающего конца полюса оно направлено против поля ротора и ослабляет это поле, а у сбегающего конца полюса оно усиливает поле ротора. Реакция якоря, таким образом, в случае активной нагрузки вызывает смещение оси результирующего поля против направления вращения. Результирующий поток при этом несколько изменяется вследствие влияния насыщения, именно он ослабляется у набегающего конца полюса больше, чем усиливается у сбегающего.

При чисто индуктивной нагрузке ток в фазе статора будет достигать своего максимального значения только тогда, когда соответствующий полюс ротора уйдет вперед на 90 электрических градусов; при индуктивной нагрузке поток статора направлен вдоль полюса ротора против потока ротора. Следовательно, при индуктивной нагрузке ток статора создает размагничивающий продольный поток.

При чисто емкостной нагрузке ток статора будет достигать максимума тогда, когда соответствующий полюс

будет находиться еще на расстоянии 90° от середины фазы. В этом случае поле статора будет намагничивающим продольным.

Для получения синусоидальной кривой э. д. с. статора необходимо синусоидальное распределение вдоль окружности статора не только поля ротора, но и поля реакции статора. Последнее условие нарушается в случае явнополюсных роторов, у которых распределение поля статора вдоль окружности далеко не синусоидальное.

Таким образом, в синхронной машине как при явных, так и при неявных полюсах реакция якоря вызывает изменение магнитного поля машины, а следовательно, изменение ее э. д. с. В машине с явными полюсами это явление еще осложняется искажением кривой э. д. с. Для синхронных генераторов подобное влияние тока нагрузки на напряжение машины весьма нежелательно. Чтобы свести влияние реакции якоря к минимуму, необходимо, чтобы н. с. якоря была мала по сравнению с н. с. ротора. Для осуществления этого условия необходимо увеличить магнитное сопротивление машины.

Повышение магнитного сопротивления лучше и проще всего осуществляется путем увеличения воздушного зазора машины. Конечно, при этом необходимо соответствующее увеличение н. с. ротора, а следовательно, и намагничивающего тока, но в синхронной машине это увеличение намагничивающего тока допустимо, так как энергия магнитного поля здесь остается неизменной (и намагничивающий ток ротора является постоянным током), а возбудитель синхронной машины должен давать только энергию для покрытия тепловых потерь в цепи ротора. В асинхронной машине условия иные, там намагничивающий ток должен поддерживать колебания энергии магнитного поля машины — он является реактивным током, ухудшающим $\cos \varphi$ установки. У асинхронной машины поэтому принимаются все меры для уменьшения намагничивающего тока, в частности уменьшается до минимума воздушный зазор.

Конечно, нельзя чрезмерно увеличивать воздушный зазор в синхронной

машине, так как соответствующее повышение н. с. ротора требует увеличения тока ротора и числа витков его обмотки, что связано с большей затратой меди на обмотку возбуждения и с увеличением габаритов машины.

16-4. Векторная диаграмма синхронного генератора

При работе синхронного генератора э. д. с. статора изменяется вследствие реакции якоря, а также изменяется падение напряжения в обмотке статора, вызываемое индуктивным и активным сопротивлением обмотки. Рассмотрим сначала, какова природа и относительное значение этих двух сопротивлений.

Индуктивное сопротивление обмотки статора создается потоком рассеяния статора. Этот поток мы мыслим как часть потока статора, замыкающуюся помимо ротора: поперек пазов статора, по коронкам зубцов статора и вокруг головок обмотки статора (см. § 14-6).

Так как поток рассеяния проходит значительную часть своего пути в воздухе, то его можно считать пропорциональным току статора и совпадающим с ним по фазе. Поток рассеяния индуцирует в обмотке статора э. д. с. рассеяния E_p , отстающую по фазе от этого потока на 90° . Можно выразить напряжение, уравнивающее э. д. с. рассеяния, через ток статора I и некоторое индуктивное сопротивление X_p , следовательно,

$$-E_p = IjX_p.$$

Это индуктивное падение напряжения в синхронных машинах составляет при номинальной нагрузке от 10 до 15 и даже до 20% от номинального фазного напряжения. Такое значительное индуктивное сопротивление полезно в случаях коротких замыканий.

С другой стороны, активное сопротивление R обмотки относительно весьма мало, обычно падение напряжения в активном сопротивлении при номинальной нагрузке составляет для больших генераторов 1—2%. В большинстве расчетов им можно поэтому пренебречь; мы будем учитывать эту величину лишь в некоторых случаях для полноты картины.

Далее нужно учесть влияние реакции якоря на напряжение машины. Конечно, физически в машине существует лишь один результирующий магнитный поток, складывающийся из потока ротора, потока рассеяния статора и потока реакции якоря. Однако более удобно рассматривать эти потоки как существующие независимо друг от друга и индуцирующие в обмотках статора соответствующие э. д. с. Таким образом, мы принимаем, что в нагруженной синхронной машине поток ротора Φ индуцирует в обмотке статора э. д. с. E , равную э. д. с. холостого хода, поток рассеяния индуцирует э. д. с. E_p и, наконец, поток реакции якоря индуцирует в обмотке статора некоторую э. д. с. $E_{p.я}$. Наиболее простые соотношения мы получим, если не будем учитывать влияния насыщения стали на поток якоря (статора), и, следовательно, мы примем в этом случае, что поток якоря пропорционален току якоря I . В действительности это вполне справедливо лишь для ненасыщенной машины. При таком условии мы можем выразить э. д. с. реакции якоря $E_{p.я}$ так же, как э. д. с. рассеяния E_p , т. е. через ток I и некоторое индуктивное сопротивление $X_{я}$, и считать, что

$$E_{p.я} = -IjX_{я}.$$

Вектор $IjX_{я}$ должен опережать I на 90° . Он представляет собой то напряжение, которое нужно для преодоления э. д. с. реакции якоря.

При таком истолковании процессов э. д. с. E , индуцируемая потоком ротора, складывается из напряжения на зажимах машины \dot{U} , напряжения IjX_p , уравнивающего э. д. с. рассеяния E_p , напряжения IjX_p , уравнивающего э. д. с. реакции якоря $E_{p.я}$, и, наконец, из падения напряжения IR в активном сопротивлении обмотки, следовательно,

$$E = \dot{U} + Ij(X_p + X_{я}) + IR. \quad (16-5)$$

Величина

$$X_p + X_{я} = X$$

носит название синхронного индуктивного сопротивления

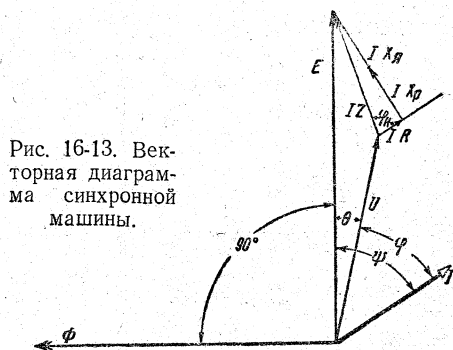


Рис. 16-13. Векторная диаграмма синхронной машины.

или синхронного реактанса. Для ненасыщенной машины это сопротивление будет постоянной величиной.

Пользуясь вышеуказанными упрощениями, можно построить векторную диаграмму синхронного генератора в наиболее простом виде. Эта диаграмма используется главным образом для качественного изучения явлений в синхронной машине, правильные количественные соотношения она дает только для неявнополюсной ненасыщенной машины.

В качестве исходного вектора диаграммы мы берем вектор постоянного потока ротора Φ , который направляем влево по оси абсцисс (рис. 16-13). Вектор э. д. с. E , индуцируемой потоком ротора Φ , отстает от вектора Φ на 90° . Вектор тока статора (якоря) I отстает от E на угол ψ , определяемый из условия

$$\psi = \arctg \frac{X_n + X}{R_n + R}, \quad (16-6)$$

где X_n и R_n — индуктивное и активное сопротивление цепи нагрузки генератора.

Вектор IR совпадает по направлению с вектором тока I , а вектор напряжения $Ij(X_n + X_n)$ опережает этот вектор на 90° . Таким образом, направление вектора напряжения U может быть определено согласно уравнению (16-5) путем вычитания из вектора э. д. с. реактивного и активного падения напряжения.

16-5. Потери и коэффициент полезного действия генератора

Для изучения энергетического баланса синхронного генератора обратимся к его упрощенной векторной диа-



Рис. 16-14. Векторная диаграмма напряжений синхронной машины.

грамме (рис. 16-14). Проектируя вектор E и его составляющие на направление вектора тока I , получим:

$$E \cos \psi = IR + U \cos \psi \quad (16-7)$$

и, умножая это уравнение на I , получаем уравнение электрической мощности для одной фазы

$$EI \cos \psi = I^2 R + UI \cos \psi, \quad (16-8)$$

согласно которому электрическая мощность, переданная статору, складывается из мощности потерь в меди якоря и мощности, отдаваемой в сеть. Но помимо этих электрических потерь в генераторе должны иметь место механические потери и магнитные потери в стали статора и полюсных башмаков. Уравнение (16-8) показывает, что эти потери покрываются не за счет электрической мощности, а непосредственно за счет механической мощности, развиваемой первичным двигателем. Наконец, в генераторе имеют место потери на возбуждение, покрываемые за счет возбудителя постоянного тока.

Мощность возбудителя составляет примерно от 0,3 до 1% номинальной мощности для больших генераторов.

Потери в генераторе, как и во всех электрических машинах, могут быть разделены на постоянные, почти не зависящие от нагрузки, и переменные, изменяющиеся в зависимости от нагрузки. К постоянным потерям следует отнести потери механические, возбуждения и в стали, к переменным — потери в меди и добавочные.

Отдаваемая генератором мощность $3UI \cos \psi$ при одних и тех же значениях тока зависит от $\cos \psi$ нагрузки, но проводники генератора рассчитываются на определенный ток, а его изоляция и магнитная система на определенное напряжение независимо от нагрузки;

по этой причине номинальной мощностью генератора считается его полная мощность, измеряемая в киловольт-амперах.

Так как генератор почти всегда работает при $\cos \varphi < 1$, то было бы нецелесообразно соединять его с турбиной, рассчитанной на полную мощность генератора (деленную на его к. п. д.); поэтому турбина к генератору обычно дается несколько меньшей мощности, чем полная мощность генератора.

С увеличением мощности генератора и увеличением его размеров уменьшается поверхность охлаждения, входящая на единицу мощности, вследствие чего приходится создавать усиленное охлаждение искусственным путем посредством вентиляции машины. В крупных турбогенераторах количество воздуха, потребного для такой вентиляции, весьма велико. В час машина требует по весу примерно столько воздуха, сколько она весит сама.

Если бы вентиляционный воздух поступал в машину непосредственно извне, то имело бы место быстрое засорение машины пылью, поэтому в крупных генераторах применяется замкнутая система вентиляции, при которой один и тот же объем воздуха непрерывно циркулирует в замкнутой системе: машина—воздухоохладитель; в последнем воздух, нагретый в машине, вновь охлаждается.

В последние годы получает все более широкое распространение водородное охлаждение синхронных машин (рис. 16-5), благодаря меньшей плотности водорода по сравнению с воздухом и его большей теплопроводности (в $7\frac{1}{2}$ раз) снижаются вентиляцион-

ные потери и улучшается охлаждение машины.

Коэффициент полезного действия генератора равен отношению мощности, отдаваемой машиной в сеть, к мощности, ею потребляемой; последнюю же удобно представлять себе как сумму отдаваемой мощности и мощности всех видов потерь в машине; следовательно, к. п. д.

$$\eta = \frac{3UI \cos \varphi}{3UI \cos \varphi + P_{\text{пост}} + P_{\text{пер}}} \quad (16-9)$$

Уравнение к. п. д. показывает, что с уменьшением нагрузки к. п. д. также уменьшается. На рис. 16-15 приведены кривые зависимости к. п. д. генератора от нагрузки при различных значениях $\cos \varphi$. Коэффициент полезного действия современных генераторов достигает 96—97%.

16-6. Включение генератора на параллельную работу

Параллельное включение синхронного генератора в сеть трехфазного тока связано с рядом трудностей.

При включении на параллельную работу (рис. 16-16) синхронного генератора мгновенное значение его э. д. с. должно быть равно по величине и противоположно по направлению в любой момент времени мгновенному значению соответствующего напряжения сети. Из этого требования вытекают следующие условия включения: э. д. с. включаемого генератора должна иметь одинаковое действующее значение с напряжением сети; частоту, равную частоте сети; фазу, прямо противоположную фазе напряжения сети, и чередование фаз генератора должно соответствовать чередованию фаз сети.

Выполнение условий параллельного включения требует предварительного синхронизирования включаемой маши-

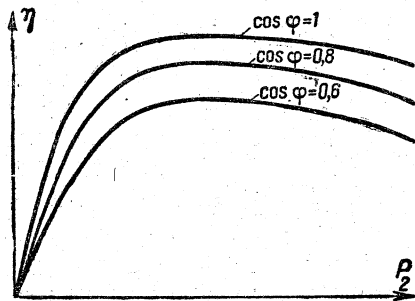


Рис. 16-15. Кривые к. п. д. синхронного генератора при различных значениях $\cos \varphi$.

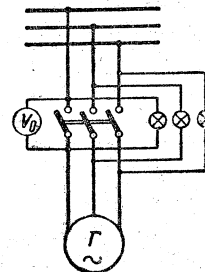


Рис. 16-16. Схема включения синхронной машины на параллельную работу при помощи фазоиндикаторных ламп и нулевого вольтметра.

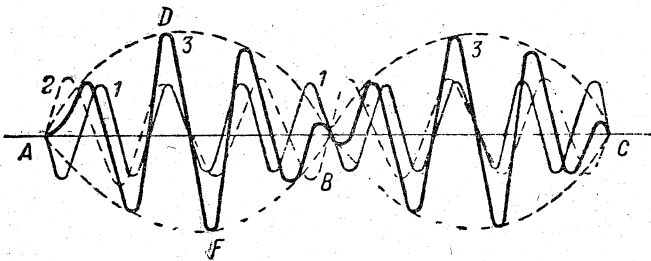


Рис. 16-17. Кривые мгновенных и действующего (пунктир) значений напряжений при синхронизации.

ны, которое осуществляется следующим образом. Машина Г (рис. 16-16) доводится примерно до синхронного числа оборотов и ее возбуждение регулируется так, чтобы вольтметр на зажимах машины показал значение, равное напряжению сети. При этом последовательность фаз машины должна соответствовать последовательности фаз сети. Однако перед включением на параллельную работу необходимо более точное регулирование частоты машины и в особенности фазы ее э. д. с. В качестве указателей для такого точного регулирования служат синхроскопы. В простейшем виде синхроскоп составляется из ламп накаливания, часто называемых в таких случаях фазоиндикаторными лампами.

На рис. 16-16 эти лампы включены между шинами станции и одноименными (1—1, 2—2, 3—3) в отношении последовательности фаз зажимами генератора («включение на потухание»).

На рис. 16-17 показаны кривые мгновенных значений напряжения сети (1), э. д. с. включаемого на параллельную работу генератора (2), результирующего напряжения (3). Пока нет точного совпадения частоты машины и сети в контуре включаемой машины, действующее значение результирующего напряжения будет то снижаться до нуля (моменты А, В и С), то повышаться до двойного значения напряжения сети (D и F) (рис. 16-17), в результате чего лампы будут то гаснуть, то вновь загораться. Чем больше будет частота генератора приближаться к частоте сети, тем медленнее будут происходить колебания света фазных ламп; они будут загораться и гаснуть на относительно длительные сроки. Нужно достичь возможно более точного совпадения частот, при котором

промежутки времени между следующими друг за другом вспышками ламп будут достаточно велики (не менее 3—5 сек). Затем, чтобы приучить глаз определять середину промежутка потухания, рекомендуется пропустить несколько периодов потухания, после чего замкнуть рубильник в момент пол-

ного потухания ламп.

Для большей надежности работы крупные генераторы снабжаются сразу несколькими различными синхроскопами. Наконец, в последнее время применяются автоматическая синхронизация и самосинхронизация.

Синхронное вращение машины, уже включенной на параллельную работу, поддерживается автоматически: при всяком случайном отклонении от синхронного вращения в обмотках статора возникают токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, восстанавливают синхронизм. Ниже мы рассмотрим эти явления.

16-7. Пуск синхронного двигателя

Синхронный двигатель получил значительное распространение лишь с тех пор, как был разработан простой асинхронный пуск двигателя, при котором двигатель развивает значительный пусковой момент. Для такого пуска в полюсные наконечники явнополюсного ротора закладывается пусковая короткозамкнутая обмотка из медных или латунных стержней. Она подобна беличьему колесу асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора. В конструкции завода «Электросила» специальной короткозамкнутой обмотки на роторе двигателя нет, а ее роль выполняют сам массивный сердечник ротора, металлические клинья, закрывающие пазы ротора, и бандажи, не имеющие электрического соединения с сердечником ротора.

Пуск двигателя состоит из двух операций: асинхронного набора скорости при отсутствии возбуждения постоянным током и втягивания в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. В первой части опе-

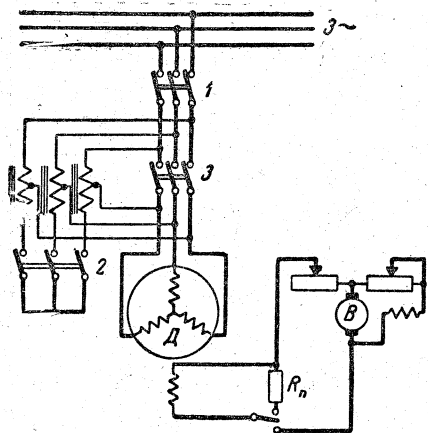


Рис. 16-18. Асинхронный пуск синхронного двигателя при посредстве автотрансформатора.

рации при асинхронном пуске обмотка возбуждения отключается от источника постоянного тока и замыкается на активное сопротивление R_n (рис. 16-18), превышающее активное сопротивление обмотки возбуждения в 10—15 раз. Было бы опасно оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, так как вращающееся поле может индуцировать в ней весьма значительную э. д. с., опасную для целости изоляции. Но также нецелесообразно было бы замыкать эту обмотку накоротко, так как в ней возникает значительный однофазный ток, который будет тормозить ротор по достижении им половины синхронной скорости. Так как синхронные двигатели имеют значительную мощность, то для уменьшения пусковых токов напряжение при пуске часто понижается посредством применения пускового автотрансформатора (рис. 16-18) или реактивной катушки. Для пуска сначала замыкается выключатель 2, соединяющий обмотки автотрансформатора АТ в звезду. Затем замыкается выключатель 1, благодаря чему на зажимы статора синхронного двигателя Д подается напряжение, пониженное автотрансформатором. Двигатель приходит во вращение как асинхронный, и по достижении им некоторой определенной скорости выключатель 2 размыкается, что превращает автотрансформатор в реактивную катушку, включенную последовательно со статором двигателя. Далее замыкается выключатель 3, и таким путем

обмотки статора включаются под полное напряжение сети. После этого включается постоянный ток в обмотку возбуждения, и двигатель втягивается в синхронизм. Если двигатель работает при высоком напряжении (6 кВ), то вместо воздушных выключателей применяются масляные выключатели (§ 20-5).

16-8. Электромагнитный момент синхронной машины

В § 16-1 было упомянуто, что при параллельной работе синхронной машины с сетью изменение момента, приложенного к валу машины, не меняя ее синхронную скорость, изменяет угол между полем ротора и результирующим полем машины. Обоснуем теперь это положение при помощи упрощенной векторной диаграммы машины.

Начнем построение такой диаграммы с вектора напряжения сети \dot{U} (рис. 16-19), который направим вниз по оси ординат. Это напряжение уравновешивается частью э. д. с., индуцируемой потоком ротора Φ в обмотке якоря. Соответствующую часть э. д. с. обозначим \dot{U}' , этот вектор равен по величине и противоположен по направлению вектору напряжения сети \dot{U} . Конечно, физически на зажимах машины существует только одно напряжение \dot{U} , но построение условного вектора \dot{U}' делает диаграмму машины бо-

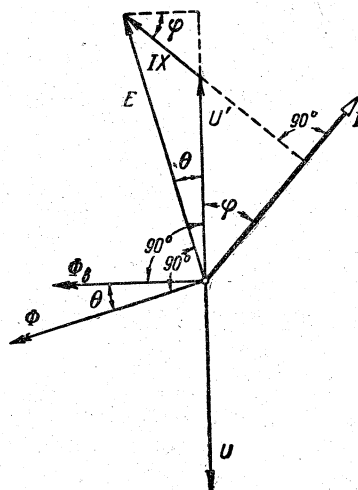


Рис. 16-19. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора.

лее наглядной. Электродвижущая сила E , индуцируемая потоком ротора, если пренебречь небольшим активным падением напряжения IR , затрачивается на уравнивание напряжения сети и на индуктивное падение напряжения в самой обмотке, т. е.

$$\vec{E} = \vec{U}' + IjX. \quad (16-10)$$

На основании этого выражения можем построить вектор \vec{E} ; ток I отстает по фазе от \vec{U}' на некоторый угол φ . Прибавив к \vec{U}' вектор IjX , перпендикулярный к I , получаем вектор \vec{E} . Он образует с \vec{U}' угол θ . Положение вектора потока ротора $\vec{\Phi}$ на диаграмме определяется тем, что он опережает индуцируемую им э. д. с. E на 90° . Напомним, что $IjX = (-\vec{E}_p - \vec{E}_я)$, т. е. равен сумме э. д. с., индуцируемых потоками рассеяния и реакции якоря. Следовательно, уравнение (15-10) можно представить в следующем виде:

$$\vec{E} + \vec{E}_p + \vec{E}_я = \vec{U}', \quad (16-11)$$

т. е. напряжение \vec{U}' равно векторной сумме э. д. с., индуцируемых в обмотке тремя потоками машины. Но физически эти потоки образуют один результирующий магнитный поток Φ_B (собственно поток в воздушном зазоре между ротором и статором). Следовательно, можно рассматривать \vec{U}' как э. д. с., индуцируемую результирующим магнитным потоком машины в ее обмотке якоря (статора). Это определяет положение вектора $\vec{\Phi}_B$ — он опережает вектор \vec{U}' на 90° .

Таким образом, угол между векторами $\vec{\Phi}$ и $\vec{\Phi}_B$ равен углу сдвига фаз θ между \vec{E} и \vec{U}' . Временному сдвигу фаз θ между векторами потоков соответствует пространственный сдвиг

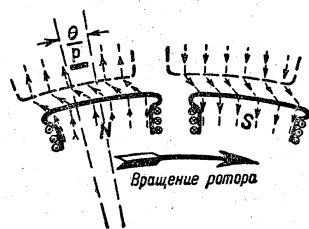


Рис. 16-20. Пространственный сдвиг между осями полюсов ротора и направлением результирующего поля машины.

на $\frac{\theta}{p}$ между осями полюсов ротора и направлением результирующего поля машины (рис. 16-20). Для наглядности на рис. 16-20 потоку Φ_B соответствуют явные полюсы.

Обратимся теперь к зависимости электрической мощности и электромагнитного момента синхронной машины от угла θ . Электрическая мощность всех трех фаз машины

$$P = 3EI \cos \varphi.$$

Построим на \vec{E} как на гипотенузе прямоугольный треугольник, частью катета которого будет \vec{U}' . Второй катет этого треугольника, противолежащий углу θ , будет равен:

$$IX \cos \varphi = E \sin \theta;$$

с другой стороны, на основании той же диаграммы $E \cos \varphi = U' \cos \varphi$; это позволяет выразить электрическую мощность машины в следующей форме.

$$P = 3EU' \frac{\sin \theta}{X}. \quad (16-12)$$

Электромагнитный момент, создаваемый взаимодействием тока якоря с магнитным потоком машины, связан с ее электрической мощностью известным простым соотношением

$$M_{эм} = \frac{P}{\omega_{вр}},$$

здесь $\omega_{вр}$ — синхронная скорость вращения ротора, поэтому

$$\omega_{вр} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi f}{p},$$

на основании чего

$$M_{эм} = \frac{3p}{2\pi f} EU' \frac{\sin \theta}{X}. \quad (16-13)$$

При работе машины параллельно с сетью напряжение сети обычно остается неизменным, следовательно, постоянно и U' , а если не меняется ток возбуждения, то остается постоянной и э. д. с. E . В таких условиях электрическая мощность и электромагнитный момент машины будут зависеть только от угла θ . Эта зависимость синусоидальна и именуется угловой характеристикой синхронной машины (рис. 16-21); для мощности и момента она отличается лишь масшта-

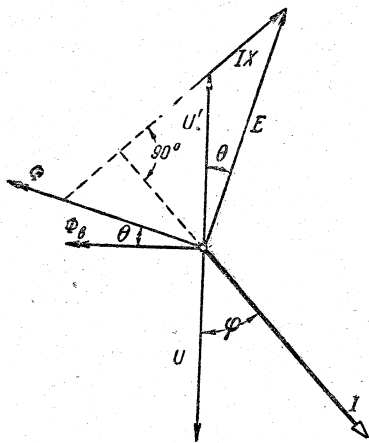


Рис. 16-22. Упрощенная векторная диаграмма синхронного двигателя.

в качестве исходных векторы \dot{U} и \dot{U}' (рис. 16-22). Подразумеваемая неизменная возбуждение машины, сохраним в диаграмме двигателя ту же длину для вектора \dot{E} , как и в диаграмме генератора (рис. 16-19), но отложим теперь \dot{E} отстающим от \dot{U}' на угол θ . Направление вектора \dot{IX} определяется условием $\dot{U}' + j\dot{I}X = \dot{E}$, т. е. он должен замыкать треугольник. Вектор \dot{I} должен отставать от \dot{IX} на 90° ; чтобы определить его направление, продолжим \dot{IX} и на эту прямую опустим перпендикуляр из начала координат, а на этом перпендикуляре отложим \dot{I} . Теперь \dot{I} отстанет от \dot{U}' более чем на 90° . Положительную мощность ток \dot{I} образует не с \dot{U}' , а с напряжением сети \dot{U} . Векторы потоков $\dot{\Phi}$ и $\dot{\Phi}_в$ строим каждый под углом 90° к вектору индуктируемой им э. д. с. (т. е. \dot{E} и к \dot{U}').

Угловая характеристика синхронного двигателя подобна угловой характеристике генератора и только строится в другом квадранте координат (рис. 16-21). По тем же соображениям, как и для генератора, режим двигателя устойчив при изменении θ в пределах от 0 до -90° и неустойчив при $\theta > 90^\circ$, когда возрастание θ не увеличивает, а уменьшает вращающий электромагнитный момент. Если механический тормозящий момент, приложенный к валу двигателя, превзойдет максимальное значение вращающего

электромагнитного момента $M_{эм. макс}$, то происходит выпадение двигателя из синхронизма, — ротор постепенно уменьшает скорость и, наконец, останавливается, э. д. с. в обмотке статора уменьшается до нуля, а токи достигают весьма больших значений, во много раз превышающих номинальные.

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, нагружается как в режиме генератора, так и в режиме двигателя путем изменения момента, приложенного к валу; автоматически при замене вращающего момента тормозящим она переходит от режима генератора к режиму двигателя. Однако практически такой переход генератора на электростанции в режим двигателя совершенно неприемлем и предупреждается защитой, а переход двигателя в режим генератора маловероятен и используется лишь кратковременно для целей быстрого торможения.

16-9. Синхронизирующие мощность и момент

Способность синхронной машины держаться в синхронизме с сетью называется ее устойчивостью. Работа машины устойчива, если $\frac{dM_{эм}}{d\theta} > 0$, что имеет место, когда положительному $d\theta$ соответствует положительное $dM_{эм}$ или когда отрицательному $d\theta$ соответствует отрицательное $dM_{эм}$. Чем большее приращение момента $\Delta M_{эм}$ соответствует некоторому приращению угла $\Delta\theta$, тем устойчивее работа синхронной машины.

Величина $\frac{dM_{эм}}{d\theta}$ именуется синхронизирующим моментом

$$M_{син} = \frac{dM_{эм}}{d\theta} = \frac{3p}{2\pi f} EU' \frac{\cos \theta}{X}, \quad (16-16)$$

а $\frac{dP}{d\theta}$ — синхронизирующей мощностью

$$P_{син} = \frac{dP}{d\theta} = 3EU' \frac{\cos \theta}{X}. \quad (16-17)$$

Случайное отклонение ротора от синхронизма вызывает возникновение синхронизирующих сил, стремящихся восстановить синхронное вращение, —

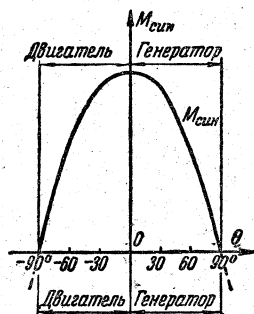


Рис. 16-23. Зависимость синхронизирующего момента и мощности от угла θ .

эти силы представляют собой своеобразную упругую связь между машиной и сетью.

Синхронизирующий момент с увеличением угла θ постепенно уменьшается (рис. 16-23) и достигает нулевого значения при $\theta = \pm 90^\circ$, т. е. когда достигает максимального значения электромагнитный момент машины

$$M_{\text{эм. макс}} = \pm \frac{3p}{2\pi f} EU';$$

это — предел статической устойчивости машины, т. е. при условии плавного увеличения нагрузки в этих пределах машина сохраняет синхронизм.

Максимальный момент $M_{\text{эм. макс}}$ является «опрокидывающим» моментом синхронной машины, за которым невозможна ее устойчивая работа.

Обычно синхронная машина работает сравнительно далеко от предела статической устойчивости. Объясняется это тем, что при увеличении угла θ примерно свыше 40° синхронизирующий момент быстро уменьшается, т. е. значительному изменению угла соответствует лишь небольшое приращение мощности, следовательно, возникает опасность, что при случайном увеличении момента на валу машины выйдет за пределы устойчивой работы и выпадет из синхронизма. У большинства синхронных машин поэтому угол θ при номинальной нагрузке не превышает $20-30^\circ$.

Отметим, что изменение нагрузки машины сопровождается колебаниями вокруг нового положения равновесия, так как ротор машины обладает известной инерцией, а синхронизирующий

момент действует подобно силам упругости. Эти колебания могут быть опасны для генератора и вызвать выпадение машины из синхронизма, если их частота случайно совпадет с частотой вынужденных колебаний, создаваемых неравномерным ходом первичного двигателя, например дизеля или паровой машины.

16-10. Влияние изменения возбуждения

Электродвижущая сила синхронной машины, включенной параллельно на общую сеть, может довольно точно совпадать по фазе с напряжением сети и быть равной этому напряжению по величине; тогда ток машины будет равен нулю, она не отдает энергию в сеть и не получает ее из сети и, следовательно, по отношению к сети машина не является ни генератором, ни двигателем. Относительное положение векторов э. д. с. машины и напряжения сети непосредственно связано с условиями вращения машины. Напряжение сети на зажимах какой-либо фазы генератора достигает максимума через определенные равные промежутки времени — через период переменного тока. Если частота сети и скорость первичного двигателя синхронной машины строго постоянны, то условия синхронного вращения ротора могут измениться лишь в результате воздействия новой механической силы и, следовательно, без воздействия такого рода силы не может измениться относительное положение векторов \vec{E} и \vec{U} .

Пока э. д. с. статора равна по величине и противоположна по фазе напряжению сети, э. д. с. и напряжение взаимно уравновешиваются, ток в статоре равен нулю, а следовательно, отсутствует и сила взаимодействия тока статора и поля машины. Однако можно изменить э. д. с. статора, не меняя ее фазы, т. е. без воздействия на первичный двигатель; это можно сделать путем изменения возбуждений. Тогда в контуре статора возникает некоторый уравнивающий ток, определяемый разностью э. д. с. статора и напряжения сети, а также сопротивлением статора; в последнем, как мы уже указы-

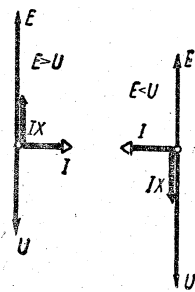


Рис. 16-24. Векторные диаграммы для условий совпадения \dot{E} и \dot{U} и изменения возбуждения.

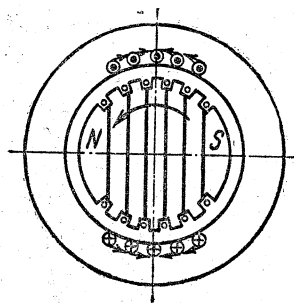


Рис. 16-25. Силы взаимодействия токов статора и поля ротора при $\theta = 0$.

вали выше, можно учитывать только реактивную составляющую

$$i = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jX}.$$

Однако этот ток не создает ни электромагнитной силы взаимодействия, ни активной мощности, отдаваемой в сеть, так как он будет чисто реактивным током по отношению к \dot{E} и \dot{U} . Ток должен отставать по фазе от напряжения $\dot{E} - \dot{U}$ на 90° , следовательно, по отношению к \dot{U} этот ток будет опережать на 90° при $E > U$ (рис. 16-24) и отставать на 90° при $E < U$.

Рассматривая положение полюса ротора по отношению к проводникам тока, легко наглядно убедиться, что электромагнитные силы в этом случае равны нулю (рис. 16-25). Таким образом, изменение возбуждения может лишь нагружать машину реактивными токами, но не может заставить ее отдавать энергию в сеть.

Мы называем синхронную машину перевозбужденной, если ток

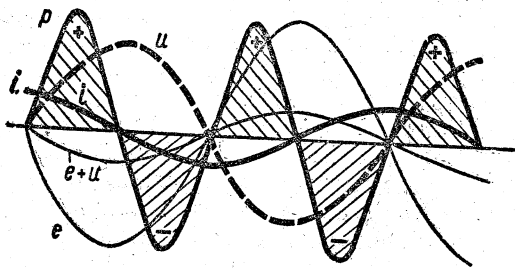


Рис. 16-26. Кривые мгновенной мощности перевозбужденной синхронной машины.

статора I опережает по фазе напряжение \dot{U} (это имеет место у нагруженной машины при $E \cos \theta > U$; наоборот, у недозабужденной машины ток статора I отстает по фазе от напряжения сети (у нагруженной машины это имеет место при $E \cos \theta < U$).

Недозабужденная машина будет брать из сети такой реактивный намагничивающий ток, какой необходим для усиления ее поля до условий равновесия э. д. с. и напряжения; перевозбужденная машина будет иметь $e > u$ (рис. 16-26) и вследствие этого будет при возрастании u потреблять реактивную энергию для ослабления поля ротора полем тока статора до пределов, соответствующих условиям равновесия, и будет отдавать реактивную энергию при уменьшении u за счет избытка силы магнитного поля ротора. Колебания энергии в цепи перевозбужденной машины и фаза тока по отношению к напряжению будут такими же, как в цепи, содержащей емкость. Можно считать, что эти «емкостные» условия в перевозбужденной машине создаются благодаря избытку магнитного потока ротора (избытку энергии в магнитном поле машины).

Проследим теперь влияние изменения возбуждения при различных условиях работы машины. Если мы обратимся к диаграмме (рис. 16-27) для работы машины генератором при $\dot{E} = \dot{U}$, то отметим, что в этих условиях машина будет недозабуждена, так как $E \cos \theta < U$, и потому машина нагружает сеть отстающим по фазе по отношению к \dot{U} намагничивающим реактивным током I . Увеличением возбуждения можно сделать $E \cos \theta = U$ и таким путем уничтожить реактивный намагничивающий ток; дальнейшее увеличение возбуждения вызовет реактивный опережающий ток; машина будет перевозбуждена. Пока момент на валу машины постоянен, должна быть постоянна и электрическая мощность машины, отдаваемая ею в сеть при работе генератором или получаемая при работе двигателем. Но так как

$$UI \cos \varphi = \text{const} \text{ и } U = \text{const},$$

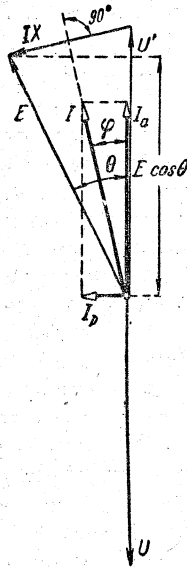


Рис. 16-27. Векторная диаграмма недовозбужденного генератора.

то при изменении возбуждения активная составляющая тока должна оставаться постоянной и, следовательно, конец вектора I должен перемещаться по прямой, перпендикулярной U (рис. 16-28).

С другой стороны, разделив и умножив выражение мощности на X , получим:

$$\frac{U}{X} IX \cos \varphi = \text{const},$$

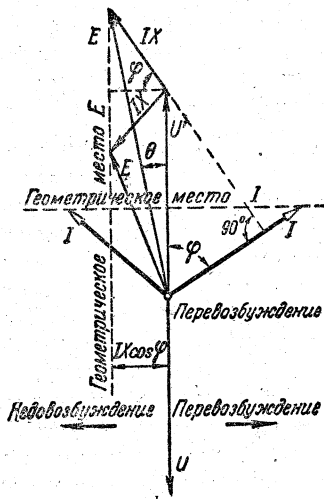


Рис. 16-28. Геометрические места векторов E и I при изменении возбуждения генератора.

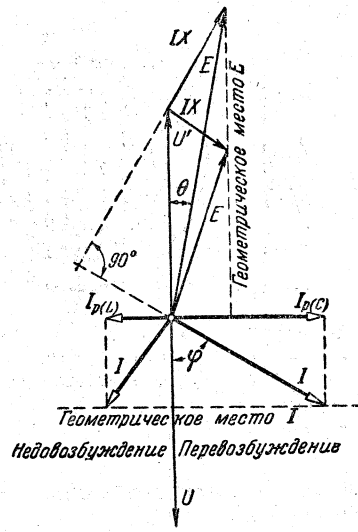


Рис. 16-29. Геометрические места векторов E и I при изменении возбуждения двигателя.

следовательно, $IX \cos \varphi = \text{const}$; но эта величина представляет собой перпендикуляр, опущенный из конца E на U' . Так как длина этого перпендикуляра постоянна, то, следовательно, конец вектора E при изменении возбуждения будет перемещаться по прямой, проведенной параллельно U на расстоянии $IX \cos \varphi$. Подобные условия имеют место как для генератора, так и для двигателя (рис. 16-29).

При изменении возбуждения ток I достигает минимума при $\varphi=0$; это — условие перехода от недовозбуждения к перевозбуждению. Соответствующая характеристика имеет U-образную форму, ее принято называть U-образной кривой (рис. 16-30).

Для промышленных установок особенно ценно свойство синхронного двигателя плавно изменять значение и фазу реактивного тока при регулировании постоянного тока возбуждения. Это дает возможность всегда так отрегулировать ток возбуждения двигателя, чтобы $\cos \varphi=1$ (рис. 16-31), но еще

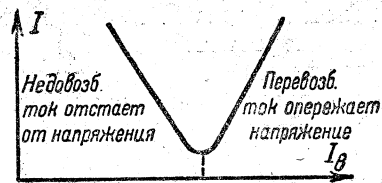


Рис. 16-30. U-образная кривая $I = F(I_b)$.



Рис. 16-31. Векторная диаграмма синхронного двигателя при $\cos \varphi = 1$.

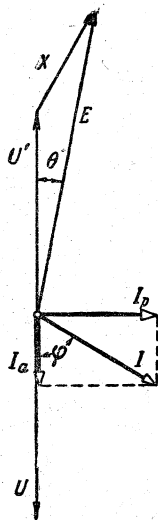


Рис. 16-32. Векторная диаграмма перевозбужденного синхронного двигателя.

чаще синхронный двигатель перевозбуждается (рис. 16-32), чтобы играть роль емкости в цепи и улучшать общий $\cos \varphi$ промышленного предприятия, снижаемый индуктивными токами асинхронных двигателей. Условно принято считать реактивную емкостную мощность генерируемой, а индуктивную — потребляемой реактивной мощностью. В соответствии с этим перевозбужденный синхронный двигатель является генератором реактивной мощности, а асинхронный двигатель — потребителем этой мощности.

Синхронные двигатели, служащие для улучшения общего $\cos \varphi$, обычно строятся на высокое напряжение (6 кВ) и значительной мощности (от 100 кВт и выше). Так как обмотка статора двигателя рассчитана на определенный ток $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, то чем больше нагрузка двигателя активным током I_a , тем меньше возможности его использования в качестве генератора реактивной мощности. По этой причине, когда потребность в генерировании реактивной мощности достаточно велика, устанавливаются синхронные компенсаторы. Это — синхронные двигатели, работающие вхолостую, предназначенные только для генерирования реактивной мощности.

Они выполняются облегченной конструкции, так как не передают на вал никакого вращающего момента.

Синхронные компенсаторы значительной мощности используются также для поддержания постоянства напряжения в конце линии передачи путем регулирования реактивного тока. При большой нагрузке линии синхронный компенсатор должен генерировать реактивную мощность (т. е. потреблять емкостный реактивный ток) и таким путем разгружать линию от индуктивного реактивного тока, а при малой нагрузке линии компенсатор должен потреблять реактивную мощность (индуктивный реактивный ток).

16-11. Характеристика синхронного двигателя

Синхронный двигатель имеет так называемую жесткую «неподвижную» механическую характеристику, так как изменение механической нагрузки на валу меняет относительное угловое положение ротора по отношению к результирующему магнитному полю машины, но не меняет скорости вращения ротора

$$n = \frac{60f}{p} = \text{const.}$$

По этой причине синхронный двигатель применяется только для нерегулируемого привода, например для непрерывных нерегулируемых прокатных станов, компрессоров, холодильных машин, поршневых насосов, камеродрилов и т. д.

Достаточная устойчивость работы синхронного двигателя, т. е. значительный синхронизирующий момент (следовательно, $\theta < 25 \div 20^\circ$), требуется в случаях пульсирующей нагрузки (например, на поршневой компрессор), когда имеют место значительные мгновенные колебания скорости.

Помимо высокого значения $\cos \varphi$ и возможности перевозбуждения, на стороне синхронного двигателя при сравнении его с асинхронным имеется преимущество меньших размеров: размеры электрической машины определяются ее полной мощностью (т. е. напряжением и током), а не

активной мощностью. При равной активной мощности полная мощность синхронного двигателя (потребляемая им из сети) меньше, так как он проектируется из расчета, что его $\cos \varphi = 1$. У асинхронного двигателя всегда $\cos \varphi < 1$, а потому его полная мощность больше. Так как при равной потребляемой активной мощности ток статора синхронного двигателя меньше, то и потери в обмотке статора у синхронного двигателя меньше, а его к. п. д. выше, чем у асинхронного (примерно на 1—3%).

Отмеченные преимущества синхронного двигателя тем больше, чем ниже скорость двигателя и чем больше его мощность, вследствие того что с уменьшением номинальной скорости асинхронного двигателя относительно возрастает его намагничивающий ток.

Наконец, преимуществом синхронного двигателя является также меньшая зависимость его вращающего момента от напряжения сети: у синхронного двигателя он пропорционален напряжению (16-13), а у асинхронного — квадрату напряжения.

Отношение максимального момента синхронного двигателя к номинальному, определяющее возможности кратковременной перегрузки двигателя, зависит от значения угла θ , соответствующего номинальному моменту. Обычно указанное отношение равно 2—3, но для специальных требований строятся двигатели, у которых это отношение достигает 3,5—4.

Наконец, $\cos \varphi$ двигателя при неизменном возбуждении зависит от нагрузки; с увеличением нагрузки усиливается поле якоря, что вызывает смещение вектора тока в сторону отставания от напряжения. Вследствие этого, если возбуждение двигателя было отрегулировано так, что в условиях холостого хода ток совпадал по фазе с напряжением $\cos \varphi = 1$, то при полной нагрузке у двигателя $\cos \varphi < 1$ (рис. 16-33, кривая 1). Если при полной нагрузке у двигателя $\cos \varphi = 1$ (кривая 2), то разгрузка вызывает возникновение опережающего сдвига фаз. Если же при полной нагрузке двигатель был перевозбужден, например $\cos \varphi = 0,8$ при опережающем токе, то с уменьшением нагрузки этот опе-

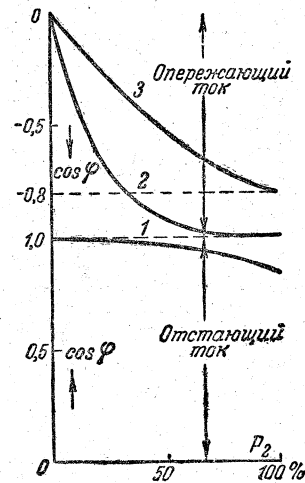


Рис. 16-33 Зависимость $\cos \varphi$ синхронного двигателя от нагрузки.

режающий сдвиг фаз быстро возрастает (рис. 16-33, кривая 3).

Для быстрого торможения синхронного двигателя его обмотки статора отключаются от сети и замыкаются на сопротивления. В таких условиях машина работает как независимый генератор за счет кинетической энергии; возникающий при этом электромагнитный момент создает сильное динамическое торможение машины.

Торможение синхронных двигателей противовключением, как асинхронных (§ 14-20), практически не применяется из-за больших толчков тока и сложности управления.

Дальнейшему расширению области применения синхронных двигателей будет способствовать замена дорогого возбудителя — генератора постоянного тока — дешевым и простым полупроводниковым выпрямителем.

16-12. Лабораторная работа. Исследование синхронной машины

В лабораторной установке синхронная машина должна быть соединена механически с машиной постоянного тока параллельного возбуждения. Последняя должна служить первичным двигателем, когда синхронная машина работает в режиме генератора, или нагрузочным генератором постоянного тока, когда синхронная машина переводится в режим двигателя. Схема соединений для опыта дана на рис. 16-34. Для питания установки необходимы сеть трехфазного тока и достаточно

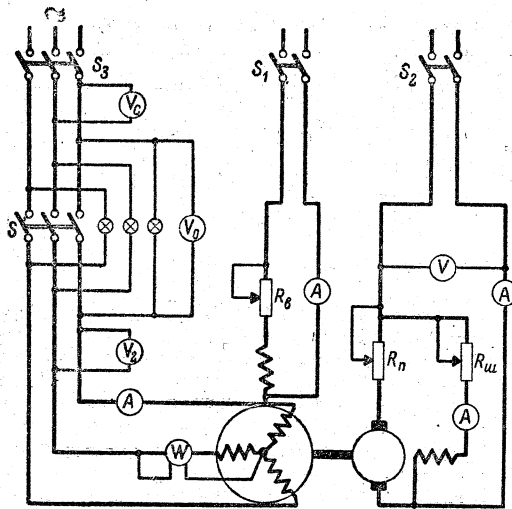


Рис. 16-34. Схема соединений для исследования синхронной машины.

мощный источник постоянного тока (сеть постоянного тока).

Опыт синхронизации машины с сетью трехфазного тока¹. Нужно пустить в ход машину постоянного тока как двигатель параллельного возбуждения, питаемый от источника постоянного тока: предварительно ввести полностью пусковой реостат R_n и вывести шунтовой реостат $R_{ш}$; затем, замкнув рубильник S_2 , включить двигатель под напряжение и постепенно вывести полностью пусковой реостат. Замкнув рубильник S_1 , возбудить синхронную машину — вольтметр V_r покажет некоторое напряжение, соответствующее данному возбуждению.

Для синхронизации в установке предусмотрены фазоиндикаторные лампы и нулевой вольтметр V_0 . Чтобы включить их под напряжение, нужно замкнуть рубильник S_3 . На фазоиндикаторные лампы в этих условиях будет действовать разность напряжений сети и генератора и они будут мигать (рис. 16-17), а стрелка нулевого вольтметра будет колебаться. С помощью реостата R_v нужно установить такое возбуждение синхронной машины, чтобы ее напряжение, измеряемое вольтметром V_r , было равно напряжению сети, измеряемому вольтметром V_c .

Наконец, регулируя скорость двигателя постоянного тока реостатом $R_{ш}$, нужно добиться, чтобы промежутки времени между следующими друг за другом вспышками ламп были достаточно длительны (примерно не менее 3 сек). Если лампы потухают неодновременно, то последовательность фаз синхронной машины не соответствует последовательности фаз сети и нужно поменять местами два зажима сети.

¹ Для изучения свойств машины полезно провести опыт синхронизации и в том случае, если машина по назначению является двигателем и ее ротор снабжен пусковой обмоткой для асинхронного пуска.

Само включение на параллельную работу производится посредством рубильника S . Но прежде чем замыкать его, следует приучить глаз определять середину промежутка потухания ламп и лишь затем включать рубильник в момент, соответствующий этой середине. Нулевой вольтметр служит здесь дополнительным средством синхронизации: в момент включения его стрелка должна стоять на нуле.

Опыт изменения нагрузки и режима машины. Когда синхронная машина уже включена на параллельную работу с сетью, тогда можно изменить режим ее работы путем изменения механического момента на ее валу. Если это вращающий момент, то машина работает в режиме генератора; если это тормозящий момент, — то в режиме двигателя. Такое изменение момента в данной установке осуществляется путем изменения тока возбуждения машины постоянного тока. После включения на параллельную работу машина работает в режиме мало загруженного генератора. Чтобы увеличить его нагрузку, нужно уменьшить $I_{в.п}$ ток возбуждения двигателя постоянного тока. Это вызовет уменьшение потока Φ , а следовательно, и э. д. с. якоря двигателя $E_{я} = k_E n \Phi$, а так как синхронная машина удерживает скорость n постоянной, то увеличивается ток якоря двигателя (см. § 15-15)

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}$$

и возрастает вращающий момент двигателя $M_{вр} = k_M \cdot \Phi I_{я}$. Этот последний, действуя на вал синхронной машины, заставит последнюю увеличить мощность, отдаваемую в сеть трехфазного тока.

Чтобы перевести синхронную машину в режим двигателя нужно увеличить ток возбуждения машины постоянного тока настолько, чтобы ее э. д. с. якоря $E_{я}$ стала больше напряжения U источника постоянного тока. Тогда ток якоря $I_{я}$ этой машины переменит свое направление. Это покажет амперметр (прибор магнитоэлектрической системы с нулем посредине шкалы). Электромагнитный момент машины постоянного тока переменит свой знак и станет тормозящим моментом. Таким путем машина постоянного тока перейдет в режим генератора и будет отдавать энергию в сеть постоянного тока, а ее тормозящий момент будет воздействовать на вал синхронной машины и заставит последнюю работать двигателем за счет энергии, забираемой из сети трехфазного тока.

Следовательно, лабораторная установка, соответствующая схеме рис. 16-34, дает возможность путем регулирования возбуждения машины постоянного тока изменять режим работы синхронной машины, заставляя ее работать генератором или двигателем — нагружать ее и разгружать. Одновременно соответственно меняется и режим машины постоянного тока; она работает то двигателем, то генератором. За этим процессом изменения режима и нагрузки агрегата удобно следить на стороне переменного тока по показаниям ваттметра¹,

¹ Это должен быть прибор с переключателем направления тока в параллельной цепи или с нулем посредине шкалы.

Таблица опыта: изменения нагрузки и режима синхронной машины

Машина постоянного тока			Синхронная машина					
U	$I_{\text{я}}$	$I_{\text{в. п}}$	U	I	$I_{\text{в.с}}$	$\pm P$	режим	$\cos \varphi$

а на стороне постоянного тока по показаниям амперметра.

Снятие U-образной характеристики. Изменение возбуждения синхронной машины, работающей параллельно с сетью, изменяет только реактивный ток, ею потребляемый. Это отражается в ее характеристиках $I = F(I_{\text{в}})$, имеющих U-образную форму (см. § 16-10). Такую характеристику можно получить как для генераторного, так и для двигательного режима работы машины. Нужно лишь, чтобы механический момент на ее валу оставался постоянным. В исследуемом агрегате это условие будет выполнено, если при изменении тока возбуждения синхронной машины ток возбуждения машины постоянного тока будет поддерживаться неизменным.

Удобно снимать U-образную кривую при работе синхронной машины в режиме холостого хода двигателя, в подобных условиях работают синхронные компенсаторы.

Чтобы создать режим, близкий к холостому ходу, сначала следует разгрузить машину постоянного тока путем изменения ее тока возбуждения, пока не покажет нуль амперметр, через который она соединена с сетью; затем нужно разомкнуть рубильник S_2 , ввести полностью пусковой реостат $R_{\text{п}}$ и разомкнуть цепь возбуждения.

В таких условиях синхронная машина будет работать двигателем с малой нагрузкой на валу за счет механических потерь машины постоянного тока.

Реостатом $R_{\text{в}}$ следует изменять ток возбуждения $I_{\text{в.с}}$ синхронной машины, осуществ-

ляя таким путем поочередно условия недовозбуждения, нормального возбуждения и перевозбуждения синхронного двигателя. Так как нагрузка на валу двигателя при изменении только тока возбуждения $I_{\text{в.с}}$ не меняется, то мощность, потребляемая двигателем из трехфазной сети, несмотря на изменения переменного тока, должна практически оставаться неизменной. Это можно проследить по показаниям ваттметра.

П л а н р а б о т ы

1. Записать паспортные данные синхронной машины и машины постоянного тока.
2. Выполнить соединения согласно рис. 16-34. Пустить в ход двигатель постоянного тока и возбудить синхронную машину так, чтобы ее напряжение равнялось напряжению сети.
3. Включить фазоиндикаторные лампы и нулевой вольтметр.
4. Синхронизировать машину с сетью трехфазного тока и включить ее на параллельную работу.
5. Проследить изменения нагрузки и режима работы синхронной машины при изменении тока возбуждения машины постоянного тока.
6. Включить машину постоянного тока, предварительно разгрузив ее.
7. При холостом ходе синхронного двигателя снять зависимость $I = F(I_{\text{в.с}})$.
8. На основании результатов измерений построить кривые зависимости тока статора I и $\cos \varphi$ синхронной машины от ее тока возбуждения $I_{\text{в.с}}$ при неизменной нагрузке на валу.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОННЫЕ, ИОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

17-1. Развитие электроники

Электроника есть наука, изучающая принципы действия и технику использования приборов, основанных на явлениях электрического тока в вакууме (электронные приборы), в разреженных газах (ионные приборы) и в электронных полупроводниках. В частности, электроэнергетика использует эти приборы для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямление) и для преобразования постоян-

ного тока в переменный (инвертирование), для автоматического поддержания постоянства напряжения генераторов, для регулирования скорости электродвигателей и т. д. Электроника явилась основой современной автоматики, так как позволила относительно простыми средствами решать сложнейшие задачи автоматизации производственных процессов благодаря характерным для электронной аппаратуры исключительной чувствительности,

чрезвычайно малой инерционности и возможности измерять и контролировать не только электрические величины (напряжение, ток, частоту и т. д.), но и почти любые неэлектрические величины (размеры, расстояние, скорость, давление, время, силу света, цвет и т. п.). Нет возможности даже кратко перечислить производственные и научные задачи, решаемые средствами современной электроники. Особенно быстро идет развитие электроники в Советском Союзе — стране передовой техники. Прогрессивная роль электроники во всех отраслях техники делает обязательным для советского инженера любой специальности знание хотя бы основных принципов этой науки.

Создание электронных приборов было подготовлено прежде всего глубокими исследованиями русского физика А. Г. Столетова, впервые сформулировавшего закон испускания электронов накалившимся телом (1888—1890 гг.). С другой стороны, изобретение вакуумного прибора — электронной лампы — было подготовлено изобретением А. Н. Лодыгиным первого вакуумного прибора, получившего широкое распространение — лампы накаливания (1873—1875 гг.). В лампе накаливания уже в 1881 г. Т. А. Эдисоном был обнаружен эффект термоэлектронной эмиссии: при включении гальванометра между нитью накала и специально вделанным в лампу вспомогательным электродом (рис. 17-1) через гальванометр проходит небольшой ток, направленный (вне лампы) от нити накала к электроду. Этот ток вызывается переносом электронов с накаливаемой нити к холодному электроду.

Однако, только изобретение радио А. С. Поповым явилось мощным стимулом для развития электроники. Первые двухэлектронные лампы — детекторы для приемников беспроводной связи — были построены вскоре после этого изобретения, в 1904 г.

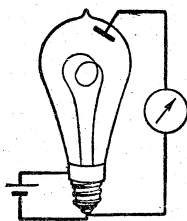


Рис. 17-1. Эффект Эдисона.

Важным дальнейшим усовершенствованием электронных приборов было примене-

ние сетки: между накаленной нитью — катодом и холодным анодом был помещен третий электрод — проволочная сетка (1907 г.). Малейшие изменения потенциала сетки вызывают значительные изменения электронного потока в лампе, а следовательно, и тока, проходящего через лампу. Это усовершенствование дало возможность использовать трехэлектродную лампу сначала в качестве усилителя (1911 г.), а затем в качестве лампового генератора переменного тока (1913 г.).

Исключительный прогресс применения электроники в технике связи поставил на очередь вопрос об использовании принципов электроники для целей электроэнергетики. Первым из таких энергетических ионных приборов явился ртутный выпрямитель — прибор для экономичного преобразования переменного тока в постоянный.

Использование явлений электрического тока в разреженном газе повело к созданию приборов промежуточного типа между электронной лампой и ртутным выпрямителем ионных (газоразрядных) приборов с накаливаемым катодом — газотронов (1928 г.). Преимуществами этих приборов являются относительно малое падение напряжения в проводящем направлении прибора и возможность получения больших рабочих токов.

Применение сетки в ионных приборах дает возможность регулировать среднее значение выпрямленного переменного тока, т. е. делает выпрямление управляемым. На этом принципе основан ионный прибор с управляющей сеткой — тиратрон, производимый в СССР с 1931 г., вслед за тем сетка была применена для регулирования тока мощного ртутного выпрямителя. Это повело к развитию ионного электропривода.

Развитие электронных усилителей позволило практически использовать ряд ранее известных физических явлений. Особенно важным было использование в электронике явления фотоэффекта — эмиссии электронов металлом под действием света, открытого А. Г. Столетовым в 1885 г. Первый фотоэлемент был построен самим Сто-

летовым, однако широкое практическое применение фотоэлементы могли получить лишь в соединении с электронными лампами. Вместе с последними фотоэлементы были применены сначала для звукового кино, а затем для разрешения самых различных технических задач.

В электронных лампах осуществляется управление интенсивностью потока электронов, пролетающих от катода к аноду. Ряд важных технических проблем может быть решен применением принципа воздействия электрическим или магнитным полем на направление электронного луча (сосредоточенного потока электронов) в вакууме или в разреженном газе. Этот принцип используется в электронно-лучевых трубках, нашедших себе применение сначала в практически безынерционных электронно-лучевых (электронных) осциллографах, затем в телевизорах, электронных микроскопах, радиолокации (определение положения объектов на расстоянии) и т. д.

Полупроводниковые приборы основаны на совсем иных принципах, чем электронные и ионные; в них осуществляется управление током, проходящим через твердую среду сложной структуры и обладающую большим удельным сопротивлением. Но полупроводниковые приборы в общем выполняют те же функции, что и электронные и ионные приборы, поэтому они обычно рассматриваются как входящие в число электронных приборов.

В 70-х годах прошлого столетия был открыт вентильный эффект у полупроводников. В 1888 г. профессор Казанского университета В. А. Ульянин изучил явление возникновения э. д. с. при освещении кристаллического селена, единственного известного в то время электронного полупроводника. Вентильные свойства полупроводников были практически использованы А. С. Поповым при приеме радиосигналов. В 1922 г. советский физик О. Б. Лосев применил полупроводниковые детекторы для генерирования электрических колебаний. На базе всех этих научных исследований были созданы практически применимые полупроводниковые усилительные прибо-

ры (1948 г.), что послужило в свою очередь стимулом для развития и усовершенствования самых различных полупроводниковых устройств: усовершенствования вентиляей с перспективой замены ими всех других видов вентиляей; создание новых фотоэлементов с высоким к. п. д. (фотоэлементы на советских искусственных спутниках Земли); разработки термоэлементов с высоким к. п. д. и т. д. Широкое применение полупроводниковых приборов по существу только еще начинается, но уже намечаются коренные изменения в радиотехнике, промышленной электронике, электрической тяге и т. д.

17-2. Классификация электронных и ионных приборов

Выше был перечислен ряд важнейших электронных и ионных приборов и указано их назначение. Теперь следует остановиться на их главных классификационных признаках.

Для приборов электроники характерно наличие вакуума или сильно разреженного газа между электродами внутри баллона прибора.

Для того чтобы создать ток через прибор, необходим источник заряженных частиц в баллоне. Этим источником электронной эмиссии в большинстве случаев является катод прибора. Для получения свободных электронов у катода используются: 1) термоэлектронная эмиссия, когда катод нагревается током специального источника до относительно высокой температуры; 2) фотоэлектронная эмиссия, когда катод эмитирует электроны под действием падающего на него света; 3) электростатическая эмиссия (автоэлектронная), когда имеет место вырывание электронов с поверхности тела действием электрического поля высокой напряженности (ртуть является единственным металлом, широко используемым в качестве катода с электростатической эмиссией); 4) вторичная эмиссия — освобождение электронов металлом вследствие ударов электронов, обладающих большой кинетической энергией (динаatronный эффект), и др. По типу катода можно различать: приборы с накаливаемым катодом, приборы с холодным катодом,

дом, приборы с жидким (ртутным) катодом и приборы с фотокатодом.

Необходимо уточнить принцип действия приборов на электронные и ионные. Разрежение в баллоне прибора, достигаемое средствами современной вакуумной техники, может быть очень велико ($10^{-7} \div 10^{-8}$ мм рт. ст.), но все же при этом в баллоне остается еще значительное количество молекул газа (при указанных разрежениях $10^8 \div 10^9$ молекул в 1 см^3). Из-за этого происходят столкновения с молекулами свободных электронов, летящих от катода к аноду. Однако эти столкновения относительно редки, и для электровакуумной техники важной является средняя длина свободного пробега λ электрона между двумя столкновениями. Эта длина обратно пропорциональна давлению газа. При атмосферном давлении $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-5}$ см.

Если в приборе разрежение настолько велико, что λ намного больше расстояния между электродами, то электроны пролетают от катода к аноду почти без столкновений с молекулами газа — ток в приборе создается только движением электронов, и прибор именуется электронным, вакуумным. Для них характерно большое внутреннее сопротивление и они пропускают относительно малые токи; зато этими токами легко управлять посредством электрических или магнитных полей.

В основу классификации самых распространенных электронных приборов — электронных ламп — положено число их электродов, выраженное в греческом исчислении. Эти наименования: диод¹, триод, тетрод, пентод, гексод, гептод.

Если же λ меньше расстояния между электродами, то при движении между ними значительная часть электронов сталкивается с молекулами газа. Вследствие таких столкновений у некоторых молекул происходит отрыв электрона: вместо нейтральной молекулы образуются свободный электрон и положительный ион, т. е. имеет

место ионизация газа. Ионы также участвуют в образовании тока, и их наличие вызывает сильное уменьшение внутреннего сопротивления прибора, на основании чего подобные приборы именуются ионными (газоразрядными).

17-3. Термоэлектронный катод

У многих электронных и ионных приборов поток свободных электронов в баллоне прибора создается путем использования термоэлектронной эмиссии.

Явления этой эмиссии во многом сходны с явлениями испарения. В нагретом металле, помимо беспорядочного движения молекул и атомов, имеет место беспорядочное движение свободных электронов. Однако для того, чтобы выйти из металла, электроны должны обладать относительно большой кинетической энергией. Покидая металл, электрон лишает его отрицательного заряда, что равносильно появлению в металле равного положительного заряда (рис. 17-2). Этот последний будет притягивать электрон обратно к металлу. Кроме того, как показали исследования советских ученых Я. И. Френкеля и И. Е. Тамма, выходу электрона противодействует особый двойной электрический слой, создаваемый выступающими электронными оболочками поверхностного слоя атомов. Та кинетическая энергия, которую электрон должен потерять, пройдя сквозь поверхность металла и уйдя за пределы действия сил притяжения, называется работой выхода $W_{\text{вых}}$. Она равна произведению заряда

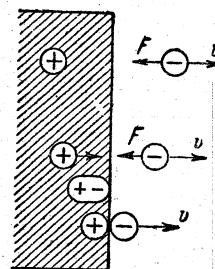


Рис. 17-2. Схема электростатического взаимодействия зарядов при выходе электрона из металла.

¹ По гречески *дио* (дио) — два; наименование *диод* представляет собой сокращение слов *дио* и *электрод*. Подобным же образом составлены и остальные наименования.

электрона e на так называемый потенциал выхода ϕ :

$$W_{\text{вых}} = e\phi.$$

Эта работа, выражаемая обычно в электрон-вольтах, зависит от материала и состояния поверхности выхода. Например, для вольфрама эта работа 4,52 эв, для тория 3,35 эв, для тория на вольфраме 2,63 эв, для никеля 4,30 эв, а для никеля, покрытого окислами щелочноземельных металлов (бария, стронция), работа выхода только 0,5—1,5 эв. Для того чтобы электрон покинул металл, его кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$ должна быть больше работы выхода. Если эмиссия электронов создается путем нагревания, то чем меньше работа выхода, тем ниже может быть температура нагрева, что очень важно для электронных приборов.

Количественная зависимость между плотностью δ тока термоэлектронной эмиссии (у поверхности накаливаемой металлической нити) и абсолютной температурой T металла выражается уравнением термоэлектронной эмиссии:

$$\delta = AT^2 e_n^{-\frac{e\phi}{kT}} = AT^2 e_n^{-\frac{w}{kT}}, \quad (17-1)$$

где A — постоянная, зависящая от материала нити, равная 60 для чистых материалов;

k — универсальная газовая постоянная ($8,36 \cdot 10^{-5}$ эв/град).

Это уравнение показывает, что термоэлектронная эмиссия возрастает очень быстро с повышением температуры, поэтому для получения большей эмиссии желательно, чтобы рабочая температура катода была возможно выше.

Катоды из чистого вольфрама обладают большим постоянством эмиссии и применяются в мощных и сверхмощных лампах. В мощных лампах применяются также карбидированные катоды, у которых основа из карбидированного вольфрама покрыта одноатомным слоем тория. Но наибольшее распространение имеют оксидные катоды, у которых на металлическое основание на-

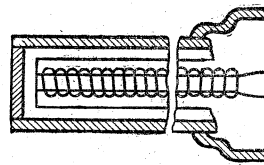


Рис. 17-3. Подогревный катод.

несена смесь окислов щелочноземельных металлов бария, стронция и кальция.

Эмиссионные качества катода характеризуются его удельной эмиссией и экономичностью.

Удельная эмиссия определяется как эмиссионный ток (выражаемый обычно в миллиамперах) с 1 см^2 активной поверхности катода.

Эффективность (экономичность) катода в миллиамперах на ватт определяется как эмиссионный ток, приходящийся на 1 вт мощности, затраченной на накал катода. У вольфрамового катода это от 2 до 16 ма/вт, у карбидированного 50—70 ма/вт и у оксидного 60—100 ма/вт.

По конструкции термоэлектронные катоды делятся на катоды прямого накала и катоды косвенного накала (подогревные). В первых ток накала проходит непосредственно через тело катода (проволоку или ленту из чистого металла или покрытую слоем оксида).

Подогревный катод был предложен акад. А. А. Чернышевым в 1918 г. В нем нагревающая катод проволока помещается внутри керамического цилиндра; на последний надета металлическая тонкостенная трубка, на внешнюю поверхность которой нанесен эмитирующий слой (рис. 17-3). При питании переменным током катода прямого накала электронная эмиссия пульсирует, что во многих случаях весьма нежелательно. При подогревном катоде благодаря его большой тепловой инерции питание переменным током накала практически не вызывает пульсаций эмиссии. Однако по этой же причине при включении катод требует прогрева в течение 30—60 сек.

17-4. Двухэлектродная лампа (диод)

Диод с катодом прямого накала является простейшей конструкцией электронной лампы. Он состоит из

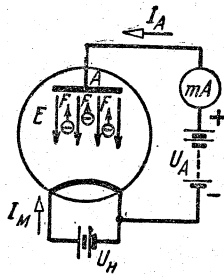


Рис. 17-4. Движение электронов и условное направление тока в электронном приборе.

стеклянного баллона, откачанного до глубокого вакуума; в этом баллоне помещены металлический анод — цилиндрический или плоский — и катод в виде металлической нити накала, нагреваемой при помощи тока накала I_n .

Вывод анода и два вывода катода сделаны в виде штырьков, впрессованных в изолирующий цоколь лампы.

Ток накала I_n дает небольшая батарея накала U_n (рис. 17-4). Под действием высокой температуры электроны покидают поверхность металла катода и выходят в окружающее нить пространство. Чтобы направить эмитированные электроны к аноду, внутри баллона между катодом и анодом создается электрическое поле, вектор напряженности E которого направлен от анода к катоду. Это поле создается при помощи анодной батареи U_a , отрицательный полюс которой соединен с накаливаемым катодом, а положительный — с «холодным» анодом. При обратном соединении полюсов батареи силы электрического поля, создаваемого батареей, будут стремиться вернуть эмитированные электроны обратно на катод и ток через лампу проходить не будет. Таким образом, вакуумный прибор с термоэлектронным катодом пропускает электрический ток только в одном направлении — от холодного анода к накаливаемому катоду (так как направление тока принято считать обратным направлению движения электронов — отрицательных зарядов). Это вентильное действие диода — его односторонняя проводимость — является его наиболее характерным свойством.

Ток, проходящий от анода к катоду и называемый анодным током

I_a (в отличие от тока накала), зависит от анодного напряжения U_a . Пока оно относительно мало, не все эмитированные электроны достигают анода. Электроны в пространстве между электродами образуют пространственный отрицательный заряд («электронное облако»). Последний стремится вернуть на катод электроны, испускаемые с малой начальной скоростью. Пространственный заряд создает у катода замедляющее поле, направленное против ускоряющего поля анодного напряжения. С увеличением анодного напряжения возрастает ускоряющее поле, что вызывает увеличение анодного тока, так как вся большая часть электронов, испускаемых катодом, достигает анода (рис. 17-5). Предел этому увеличению тока положен величиной термоэлектронной эмиссии.

Возрастание анодного тока с увеличением напряжения должно прекратиться, когда все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. В анодной цепи устанавливается ток насыщения $I_{нас}$, величина которого определяется уравнением термоэлектронной эмиссии (17-1). Увеличение тока накала I_n , повышая температуру катода, соответственно увеличивает ток насыщения.

Однако явление насыщения резко выражено только у ламп с вольфрамовым катодом, а у наиболее распространенных ламп с оксидным катодом явление насыщения мало заметно. Это следствие имеющего место в оксидных лампах увеличения эмиссии при возрастании напряженности электрического поля у поверхности катода.

В некоторых случаях существенным является то обстоятельство, что при $I_a=0$ диод все-таки проводит не-

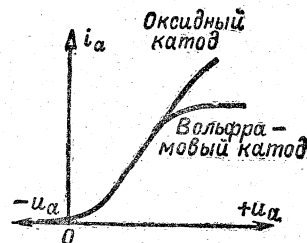


Рис. 17-5. Зависимость анодного тока от анодного напряжения при различных материалах катода.

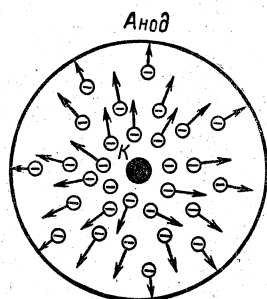


Рис. 17-6. Объемный заряд вокруг катода.

который весьма малый ток. Последний создается электронами термоэмиссии, кинетическая энергия которых достаточна для того, чтобы достичь анода. Если необходимо прекратить этот ток, то на электроды диода следует подать отрицательное «запирающее» напряжение порядка $-0,5$ в.

При увеличении тока накала возрастает термоэлектронная эмиссия. Тем не менее, если поддерживать анодное напряжение постоянным, то при некотором значении тока накала имеет место явление насыщения — при дальнейшем увеличении тока накала анодный ток почти не увеличивается. Это следствие уже упомянутого выше эффекта объемного заряда — явления, важного для всех электронных приборов. Пока катод не эмиттирует, потенциал между катодом и анодом изменяется примерно линейно. Но когда катод накален, тогда между катодом и анодом движется большое число отрицательных зарядов электронов (рис. 17-6). Это эквивалентно наличию в указанном пространстве неподвижного объемного заряда, сосредоточенного преимущественно около катода, так как там объемная плотность движущихся электронов больше. Такой заряд стремится вернуть эмиттируемые электроны назад на катод, т. е. противодействует силам анодного поля. При определенной термоэмиссии устанавливается равновесие этих сил — объемный заряд не допускает дальнейшего увеличения анодного тока.

Максимальная мощность диода, определяемая максимальным анодным током и максимальным анодным напряжением, ограничивается термоэлек-

тронной эмиссией катода (эффективностью катода), максимальной допустимой температурой стенок баллона (сильно нагревающихся при работе лампы) и допустимым повышением температуры анода.

Температура анода повышается главным образом вследствие бомбардировки анода электронами. На анод в одну секунду приходят N электронов со скоростью v , обладающих каждый массой m . Следовательно, мгновенная мощность, выделяемая на аноде, будет $N \frac{mv^2}{2}$. Но кинетическая энергия электрона получена за счет работы сил электрического поля, созданного анодным напряжением, и равна произведению заряда электрона e на анодное напряжение u_a (в общем случае мгновенное значение), т. е.

$$\frac{mv^2}{2} = eu_a \quad (17-2)$$

и так как заряд, проходящий в единицу времени, определяет ток, то $Ne = i_a$ мгновенному значению анодного тока; следовательно,

$$N \frac{mv^2}{2} = Neu_a = i_a u_a = p_a, \quad (17-3)$$

т. е. на аноде выделяется вся энергия, сообщаемая лампе анодным источником тока. При установившейся температуре анод должен отдавать всю эту энергию в окружающую среду, поэтому чем выше излучательная способность анода, тем ниже его установившаяся температура при заданной мощности или же тем большей мощностью можно нагружать лампу при заданной температуре анода. По этой причине для повышения излучения поверхность анода часто чернится; кроме того, мощные лампы снабжаются специальными радиаторами, соединенными с анодом. Материалом для анода в приемных лампах служат никель и железо, а в генераторных — молибден, тантал и графит. При сколько-нибудь значительной относительной мощности диоды — выпрямители принято называть кенотронами.

Стремление уменьшить габариты электронной лампы приводит к тому, что на единицу ее поверхности прихо-

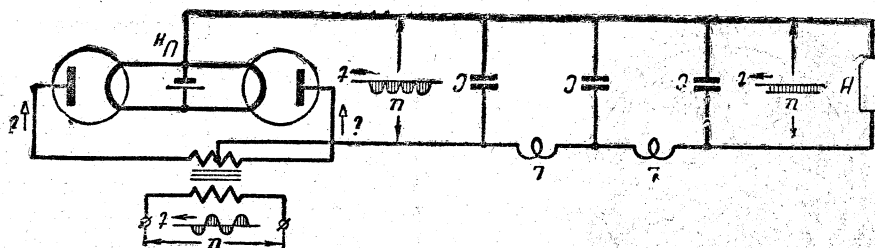


Рис. 17-7. Двухполупериодная схема выпрямления переменного тока при помощи двух диодов.

дится значительное количество излучаемого тепла. Вследствие этого баллон большинства ламп сильно нагревается. Однако во избежание выделения газов стеклянный баллон не должен нагреваться свыше примерно 400°C .

Характерное свойство диода — односторонняя проводимость — используется главным образом для выпрямления переменного тока и для детектирования¹.

Задача детектирования заключается в преобразовании колебаний при помощи нелинейного сопротивления с целью выделения колебаний частоты сигнала, в частности, в радиоприемнике посредством детектирования происходит выделение колебаний звуковой частоты, действующих на громкоговоритель.

Задачей выпрямления является преобразование переменного тока в постоянный. Желательно при этом использовать обе полуволны переменного тока (двухполупериодное выпрямление — см. § 10-8). Для этого нужны два диода. На рис. 17-7 дана соответствующая принципиальная схема включения двух диодов с общей батареей накала. При выпрямлении напряжение на стороне постоянного тока сильно пульсирует, поэтому для уменьшения пульсаций между нагрузкой H и диодами целесообразно включить сглаживающий фильтр из индуктивности и емкостей (§ 10-10). Это дает возможность получить на зажимах нагрузки практически постоянное напряжение.

Внутреннее падение напряжения в электронной лампе относительно вели-

ко. Значительная потеря напряжения имеет место также в фильтре. По этим причинам к. п. д. лампового выпрямителя невысок, но в большинстве случаев в установках электроники это имеет второстепенное значение. Такой выпрямитель рассчитывается на токи порядка десятков миллиампер. Ламповые выпрямители больших мощностей применяются для высоких напряжений.

При выпрямлении переменного тока во время обратной полуволны диод должен выдерживать, не пробиваясь, амплитудное значение выпрямляемого переменного напряжения. По этой причине важной характеристикой диода является то максимальное анодное обратное напряжение, которое он может выдерживать, не пробиваясь.

Фактически два диода, нужных для двухполупериодного выпрямления, при низких напряжениях заменяются часто одним двойным диодом.

На рис. 17-8 показан в частичном разрезе металлический диод 6Х6 (цифра 6 — округленное напряжение накала, Х — двойной диод, 6 — типовой номер). В общем баллоне помещены два диода, нагревательные элементы которых соединены последовательно. Эти диоды разделены металлическим экраном. На рис. 17-8 виден только один из диодов с частичными разрезами анода и катода. Выводы электродов прибора сделаны через стеклянные изоляторы к металлическим штырькам, впрыснутым в пластмассовый цоколь лампы.

В варианте, показанном на рис. 17-8, лампа имеет семь штырьков, расположенных по вершинам правильного восьмиугольника (октальный цо-

¹ Латинское detector — обнаруживающий.

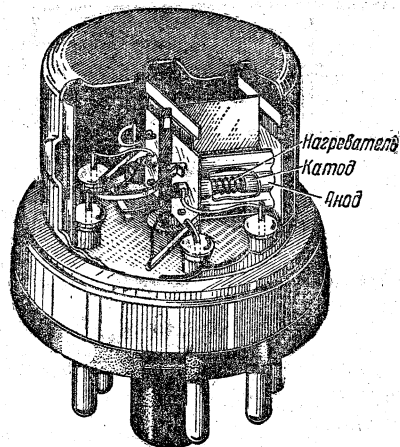


Рис. 17-8. Металлический двойной диод 6X6 в частичном разрезе.

коль), причем одна вершина оставлена пустой. В центре цоколя помещен пластмассовый «ключ» — выступ с направляющим ребром, благодаря которому невозможно вставить неправильно лампу в ламповую панель установки. Ближайший к нему штырек 1 соединен с корпусом лампы. Практически важна цоколевка лампы — схема соединений отдельных элементов со штырьками. На рис. 17-9 даны два способа изображения цоколевки лампы 6X6. Цоколевка дается для вида снизу лампы. Нумерация штырьков ведется по часовой стрелке, начиная от штырька ближайшего к ребру ключа.

Мы остановились относительно подробно на устройстве диода, так как вопросы его конструкции во многом являются общими для всех электронных ламп.

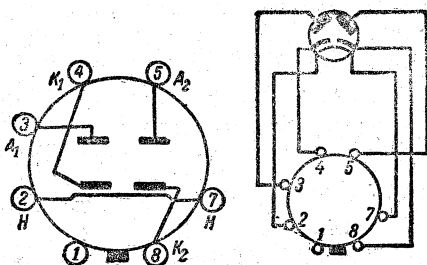


Рис. 17-9. Два способа изображения цоколевки диода 6X6.

17-5. Параметры диода

Зависимость анодного тока от анодного напряжения у электронной лампы нелинейна. В ряде случаев приходится графически определять кривую анодного тока на основании характеристики диода и кривой изменения по времени анодного напряжения (рис. 17-10). Но в большом числе случаев не только для диода, а для ряда электронных ламп расчеты могут быть упрощены посредством подстановки в соответствующие уравнения некоторых средних величин, характеризующих данную электронную лампу и называемых ее параметрами. Таким общим для всех электронных ламп параметром является крутизна характеристики S : отношение изменения тока i_m в цепи одного электрода лампы к изменению напряжения u_n другого электрода при условии, что все прочие напряжения лампы остаются постоянными, точнее, это отношение бесконечно малых изменений:

$$S_{mn} = \frac{\partial i_m}{\partial u_n}. \quad (17-4)$$

Для диода крутизна характеристики

$$S = \lim_{u_a \rightarrow 0} \frac{\Delta i_a}{\Delta u_a} = \frac{\partial i_a}{\partial u_a}$$

тождественна его динамической проводимости. Чем больше S диода, тем меньше в нем потеря напряжения и мощность, рассеиваемая на аноде, а следовательно, тем лучше лампа.

Величина, обратная крутизне характеристики диода, есть его дина-

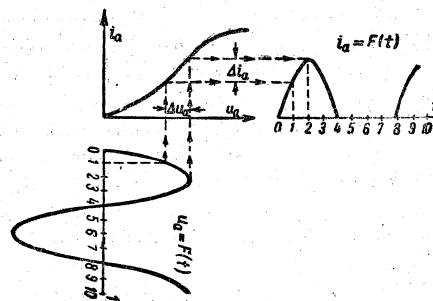


Рис. 17-10. Построение кривой изменения анодного тока в зависимости от изменений анодного напряжения.

мическое внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{du_a}{di_a}, \quad (17-5)$$

называемое также дифференциальным сопротивлением или сопротивлением переменному току.

Последнее наименование хорошо поясняет роль этой величины. Покажем это на следующих простых отношениях: если в анодную цепь диода включить источник постоянного напряжения U_0 и, кроме того, источник относительно малого переменного напряжения u , то отношение амплитуды переменного напряжения U_M к амплитуде I_M переменной составляющей анодного тока будет равно R_i при условии, что характеристику лампы можно считать линейной в узких пределах изменения переменного напряжения.

В большом числе случаев рабочую характеристику диода можно изобразить приближенно прямой (см. рис. 17-5), что позволяет считать его динамическое сопротивление R_i постоянным.

17-6. Трехэлектродная лампа (триод)

Открытие радио А. С. Поповым и последующее развитие радиотехники требовали создания совершенного безынерционного усилителя сигналов. Таким усилителем явилась электронная лампа с управляющим электродом, помещенным между катодом и анодом. В первых образцах ламп этот электрод представляет собой металлическую сетку, что и создало традицию именовать его «сеткой», хотя в современных электронных приборах сетка выполняется обычно в виде проволочной спирали, окружающей катод (рис. 17-11). Концы спирали сетки привариваются к проволочным вводам, положение которых фиксируется посредством стеклянных или иных изолирующих держателей.

Так как расстояние между сеткой и катодом значительно меньше расстояния между анодом и катодом, то

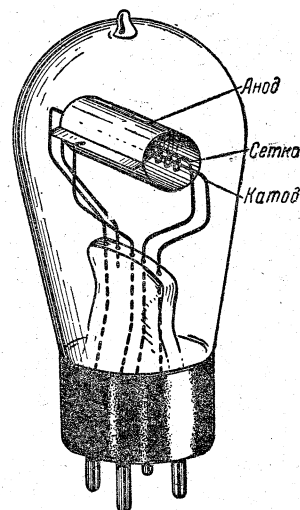


Рис. 17-11. Трехэлектродная лампа (триод).

одно и то же напряжение, приложенное между сеткой и катодом или анодом и катодом, в первом случае будет создавать у катода значительно более интенсивное поле. Это дает возможность посредством небольшого изменения напряжения между сеткой и катодом сильно изменять величину анодного тока, в чем и заключается управляющее действие сетки.

Рис. 17-12 дает упрощенную картину поля триода в пределах двух витков сетки при трех различных значениях напряжения последней. Здесь построены линии эквипотенциальных поверхностей, перпендикулярно к ним направлены силовые линии поля, не показанные на рисунке. Когда сетка имеет по отношению к катоду некоторый отрицательный потенциал ($u_c < 0$), то лампа заперта (рис. 17-12, а), — все электроны, испускаемые катодом, отталкиваются сеткой назад на поверхность катода. Даже быстрее из них не могут преодолеть потенциальный барьер, созданный отрицательным зарядом сетки. С повышением потенциала сетки этот барьер снижается и между проволоками сетки могут проскакивать электроны, имеющие значительную начальную энергию (рис. 17-12, б), — возникает небольшой анодный ток.

При дальнейшем приближении потенциала сетки к нулю между ее вит-

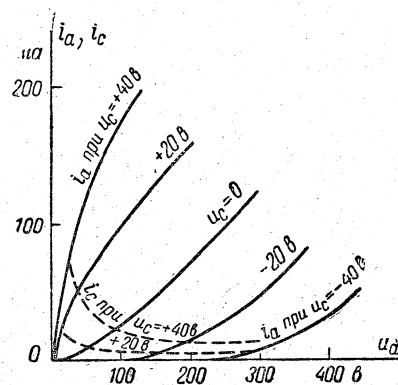
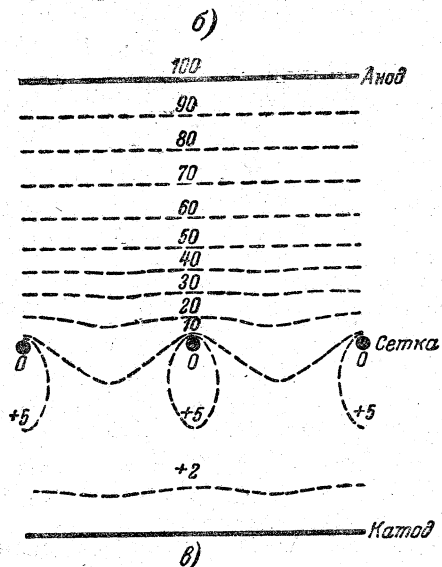
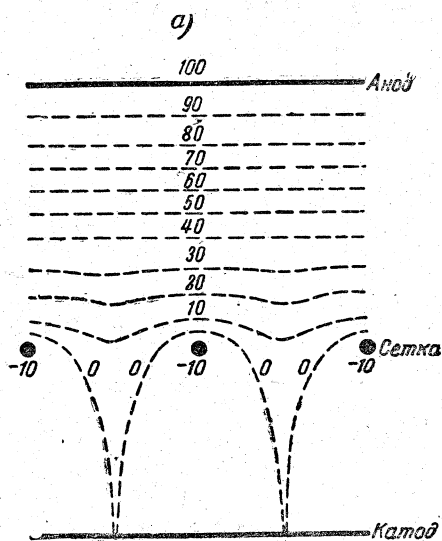
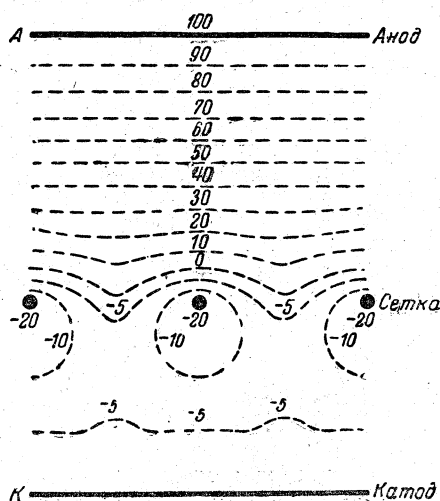


Рис. 17-13. Анодные характеристики анодного и сеточного токов.

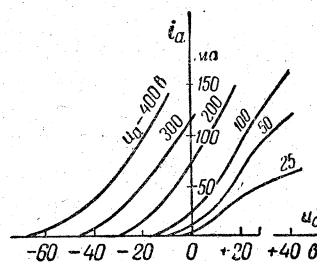


Рис. 17-14. Сеточные характеристики анодного тока.

ками образуется свободный путь даже для электронов с малой начальной скоростью (рис. 17-12,б) — анодный ток становится значительным.

В соответствии с наличием двух напряжений u_a и u_c , приложенных к электродам триода (кроме напряжения накала), отдельные характеристики триода можно строить как зависимость тока одного электрода от одного из напряжений при неизменном втором напряжении, в соответствии с чем характеристики триода разделяются на четыре группы: анодные характеристики анодного тока (рис. 17-13) $i_a = f(u_a)$, анодные характеристики сеточного тока (рис. 17-13) $i_c = F(u_a)$, сеточные характеристики анодного тока (рис. 17-14) $i_a = f'(u_c)$ и сеточные характеристики сеточного тока (рис. 17-15) $i_c = F(u_c)$. На рис. 17-16 дана схема соединения приборов

Рис. 17-12. Картина поля у катода триода при различных потенциалах сетки.

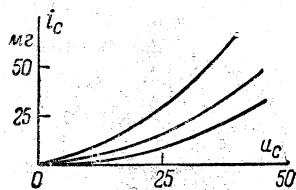


Рис. 17-15. Сеточные характеристики сеточного тока.

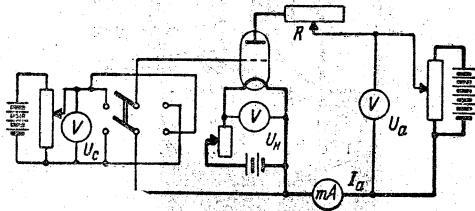


Рис. 17-16. Схема соединения приборов для снятия характеристик триода.

для снятия характеристик триода. Все характеристики снимаются при номинальном напряжении накала. Чтобы не разрушить лампу при испытании, необходимо иметь в виду во-первых, нельзя превосходить при опыте предельную допустимую мощность рассеяния на аноде данной лампы; во-вторых, при снятии характеристики в области положительных напряжений на сетке, когда возникает сеточный ток, следует учесть, что мощность, которую можно рассеять на сетке без разрушающего ее перегрева, весьма невелика. По этим причинам для быстрого снятия характеристик ламп в широком диапазоне часто применяются автоматические записывающие устройства, в частности электронный осциллограф.

Характеристика $i_a = i(u_a)$ триода подобна характеристике диода, причем обычно триод работает далеко от условий насыщения. Повышение положительного потенциала сетки, увеличивая анодный ток, смещает характеристику влево, а возрастание отрицательного потенциала сетки смещает характеристику вправо, не меняя ее наклона, кроме начальной части. Но при отрицательном потенциале сетки характеристика выходит уже не из начала координат.

Сеточная характеристика анодного тока триода $i_a = f(u_c)$ сокращенно име-

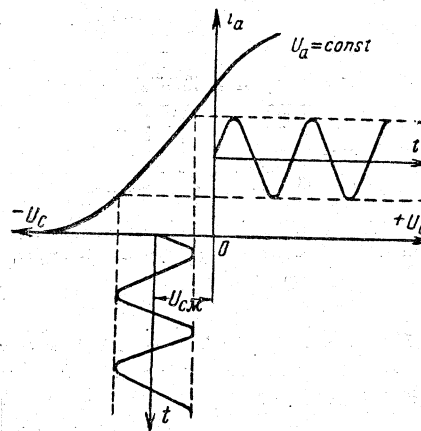


Рис. 17-17. Изменения анодного тока i_a , вызываемые изменениями сеточного напряжения u_c при наличии отрицательного сеточного смещения $U_{см}$.

ется сеточной характеристикой. Точка, в которой характеристика $i_a = f(u_c)$ пересекает ось напряжения, называется точкой отсечки, а соответствующее напряжение — напряжением отсечки.

На основании сеточной характеристики можно графически определить изменения анодного тока, вызываемые изменениями напряжения сигнала u_c , включенного между сеткой и катодом (рис. 17-17). Если на сетку подать только переменное напряжение сигнала, то потенциал сетки будет то отрицательным, то положительным и в последнем случае будет возникать нежелательный сеточный ток. При наличии сеточного тока искажается характеристика лампы вследствие перехвата части электронов анодного тока сеткой и уменьшается входное сопротивление лампы, что нагружает цепь сигнала. Чтобы лампа работала при отрицательном потенциале сетки, кроме напряжения сигнала, на сетку подается еще небольшое постоянное напряжение смещения $U_{см}$, создающее отрицательное сеточное смещение (рис. 17-18). Благодаря нему потенциал сетки под действием напряжения сигнала u_c будет колебаться вокруг значения $U_{см}$, оставаясь всегда отрицательным (рис. 17-17).

В большом числе ламповых схем для получения сеточного смещения

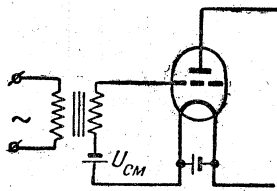


Рис. 17-18. Схема создания сеточного отрицательного смещения при помощи батареи смещения $U_{см}$.

вместо особого источника тока используется падение напряжения от постоянной составляющей анодного тока (рис. 17-19) — так называемое автоматическое сеточное смещение. Конденсатор C служит для того, чтобы пропустить переменную составляющую анодного тока, помимо сопротивления $R_{см}$, и таким путем устранить возможность возникновения нежелательной переменной составляющей напряжения сеточного смещения.

Приведенные выше сеточные характеристики триода получены при постоянном в каждом случае анодном напряжении, подобные характеристики именуется статическими. Фактически изменения анодного тока вследствие падения напряжения в анодной цепи вызывают изменения анодного напряжения, следовательно, изменения анодного тока происходят при одновременном изменении сеточного и анодного напряжений. Соответствующие характеристики, учитывающие эту более сложную зависимость, именуется динамическими характеристиками. Они дают возможность более точного расчета токов и напряжений в цепях лампы.

Изменения напряжения накала триода, конечно, сильно влияют на характеристики, но это напряже-

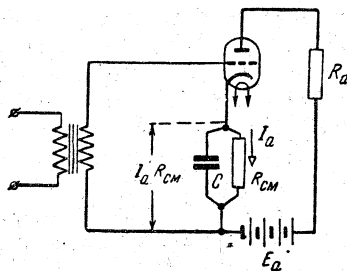


Рис. 17-19. Схема автоматического сеточного смещения $U_{см} = I_a R_{см}$.

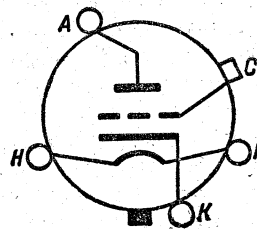
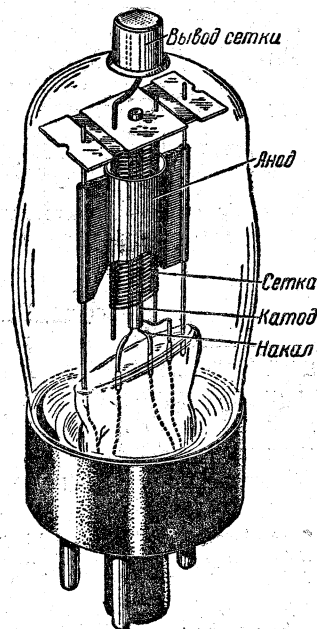


Рис. 17-20. Триод 6С4С в частичном разрезе (опущены некоторые детали) и его цоколевка.

ние при работе лампы должно поддерживаться неизменным, равным номинальному значению. Понижение этого напряжения ухудшает работу лампы, а повышение напряжения сильно сокращает срок службы лампы.

Область применения триодов: усиление токов низкой частоты, усиление мощности при высокой частоте и в качестве генераторных ламп. На рис. 17-20,а показана с подогревным катодом — триод 6С4С*, применяемый для усиления низкой частоты. На рис. 17-20,б дана цоколевка этой лампы. Здесь,

* Первая цифра обозначает напряжение накала (округленно) 6 в; вторая буква — конструктивные особенности прибора — С — триод (сетка), третья — типовой номер 4; четвертая буква — внешнее оформление — С — стеклянная лампа.

так же как в диоде 6Х6 (рис. 17-9), цоколь октальный, но замещены несимметрично только четыре вершины восьмиугольника. Сетка этой лампы имеет вывод в купол баллона для уменьшения внутриламповых емкостей.

17-7. Параметры триода

Помимо номинальных напряжений и тока величинами, определяющими ориентировочно возможности применения триода, его параметрами являются внутреннее сопротивление R_i , крутизна характеристики S и коэффициент усиления μ .

Внутреннее сопротивление (динамическое) определяется как отношение изменения анодного напряжения к соответствующему изменению анодного тока при постоянном сеточном напряжении:

$$R_i = \left(\frac{\partial u_a}{\partial i_a} \right)_{u_c = \text{const}} \quad (17-6)$$

Внутреннее сопротивление выражается через угол наклона анодной характеристики (рис. 17-21): $R_i = k_R \text{tg } \alpha$.

Под крутизной характеристики триода принято понимать отношение изменения анодного тока к соответствующему изменению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении:

$$S = \left(\frac{\partial i_a}{\partial u_c} \right)_{u_a = \text{const}} \quad (17-7)$$

Эта величина выражается через угол наклона сеточной характеристики (рис. 17-22)

$$S = k_s \text{tg } \beta$$

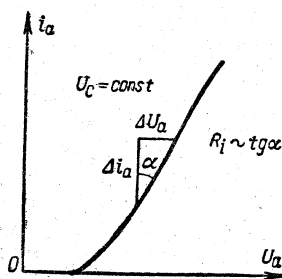


Рис. 17-21. Определение R_i на основании анодной характеристики.

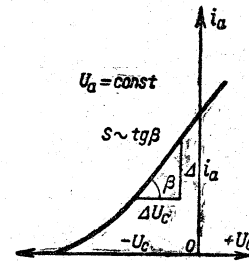


Рис. 17-22. Определение S на основании анодно-сеточной характеристики.

Наконец, особенно важным параметром триода является коэффициент усиления (статический), определяемый как отношение изменения анодного напряжения к изменению сеточного напряжения, необходимому для того, чтобы анодный ток остался постоянным:

$$\mu = - \left(\frac{\partial u_a}{\partial u_c} \right)_{i_a = \text{const}} \quad (17-8)$$

В частности, повышение анодного напряжения вызывает увеличение анодного тока; чтобы уменьшить этот ток до исходной величины, необходимо подать на сетку большее по абсолютной величине отрицательное напряжение, т. е. понизить потенциал сетки.

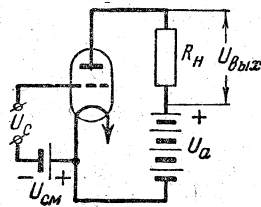
Так как для сохранения $i_a = \text{const}$ изменения ∂u_a и ∂u_c всегда должны быть различны по знаку, то производная имеет отрицательный знак.

У триодов коэффициент усиления имеет значение примерно от 4 до 100 в зависимости от назначения триода.

Нетрудно установить связь между тремя вышеназванными параметрами. Анодный ток является функцией анодного и сеточного напряжений: $i_a = F(u_a, u_c)$; следовательно, изменение анодного тока можно выразить уравнением

$$\begin{aligned} di_a &= \frac{\partial i_a}{\partial u_a} du_a + \frac{\partial i_a}{\partial u_c} du_c = \\ &= \frac{1}{R_i} du_a + S du_c. \end{aligned} \quad (17-9)$$

Это выражение по существу есть разложение функции $F(u_a, u_c)$ в степенной ряд, в котором рассматриваются только первые два члена, а все члены высших порядков опущены.

Рис. 17-23. Триод, нагруженный сопротивлением R_n .

Для определения μ напряжения u_a и u_c должны быть изменены так, чтобы анодный ток остался постоянным $i_a = \text{const}$, следовательно, чтобы $di_a = 0$.

Такая подстановка дает:

$$\frac{1}{R_i} du_a + S du_c = 0,$$

на основании чего

$$-\frac{du_a}{du_c} = \mu = R_i S. \quad (17-10)$$

Необходимо иметь в виду, что параметры триода фактически зависят от режима работы лампы, причем различные типы и конструкции ламп имеют различную степень постоянства параметров при изменении режима.

Особенно резко изменяются параметры триода при положительном потенциале сетки.

При работе лампы на некоторую нагрузку R_n (рис. 17-23) практически важны изменения напряжения на этой нагрузке, вызываемые изменениями сеточного напряжения; эти соотношения определяются рабочим коэффициентом усиления

$$\mu_{\text{раб}} = -\frac{du_n}{du_c}.$$

Последний может быть выражен через статический коэффициент усиления μ и параметры цепи лампы. Переменная составляющая анодного тока создается переменной составляющей анодного напряжения

$$di_a = \frac{du_a}{R_i + R_n},$$

а так как $du_a = -\mu du_c$, то

$$di_a = -\mu \frac{du_c}{R_i + R_n}.$$

Изменение напряжения нагрузки

$$du_n = R_n di_a = -\mu \frac{R_n}{R_i + R_n} du_c,$$

на основании чего

$$\mu_{\text{раб}} = \mu \frac{R_n}{R_i + R_n} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_n}}. \quad (17-11)$$

Рабочий коэффициент усиления меньше статического вследствие внутреннего падения напряжения в лампе, поэтому при $R_i = 0$ или при $R_n = \infty$ имеет место равенство $\mu_{\text{раб}} = \mu$.

Зависимость между анодным током и напряжением U_a называется нагрузочной характеристикой триода. Она определяется на основании следующего: напряжение U_a , т. е. напряжение между анодом и катодом триода $U_a = E_a - I_a R_n$ (рис. 17-23), на основании чего анодный ток

$$I_a = \frac{E_a}{R_n} - \frac{U_a}{R_n}. \quad (17-12)$$

Это уравнение прямой линии в системе координат I_a, U_a . Такая прямая пересекает ось абсцисс (рис. 17-24) в точке, определяемой условием $I_a = 0$, т. е. когда $U_a = E_a$; это условие запертой лампы.

Ось ординат рассматриваемая прямая пересекает в точке, определяемой условием $U_a = 0$, т. е. когда $I_a = \frac{E_a}{R_n}$.

Угол наклона прямой к оси абсцисс определяется сопротивлением нагрузки R_n в анодной цепи

$$\alpha = \text{arc tg} \frac{\frac{E_a}{R_n}}{E_a} = \text{arc tg} \frac{1}{R_n}.$$

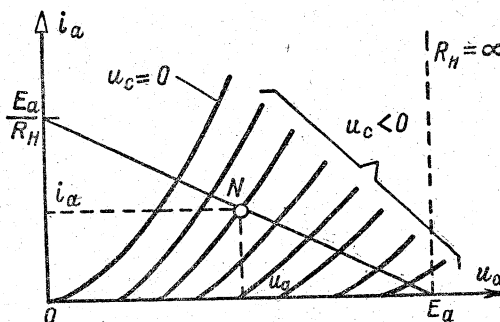


Рис. 17-24. Нагрузочная характеристика триода.

При $R_n = 0$ характеристика совпадает с осью абсцисс, а при $R_n = \infty$ она параллельна оси ординат.

В той же координатной системе можно построить семейство анодных характеристик анодного тока (при различных сеточных напряжениях). Точки пересечения этих характеристик с нагрузочной прямой будут определять соответствующие значения анодного тока, т. е., задавшись определенным сопротивлением нагрузки и сеточным напряжением, можно определить величину анодных тока и напряжения (точка N на рис. 17-24).

17-8. Многоэлектродные лампы

На поток электронов, направленный от катода к аноду в электронной лампе, помимо управляющей сетки, могут воздействовать вспомогательные сетки с относительно постоянным потенциалом. Такое дополнительное воздействие позволяет значительно улучшить и видоизменить характеристики электронной лампы, но основные положения, относящиеся к триоду, остаются справедливыми и для большинства многоэлектродных ламп.

Тетрод — четырехэлектродная, двухсеточная лампа; в нем между управляющей сеткой (играющей ту же роль, что и в триоде) и анодом помещен четвертый электрод — экранная (экранирующая) сетка. Эта сетка почти полностью охватывает анод, однако отверстия ее достаточно велики для того, чтобы не создавать сколько-нибудь значительное механическое препятствие на пути электронного потока.

Экранная сетка включается так, что она имеет по отношению к катоду постоянный положительный потенциал (рис. 17-25); в нормальных рабочих условиях этот потенциал несколько меньше потенциала анода. Отметим, что воздействие экранной сетки повышает напряженность поля у поверхности катода, так как эта сетка находится к нему ближе, чем анод, и, следовательно, при прочих равных условиях наличие экранной сетки увеличивает анодный ток лампы по сравнению с током триода. Однако, часть электро-

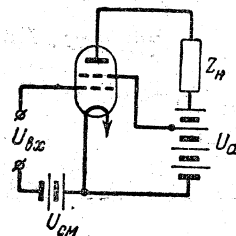


Рис. 17-25. Схема включения экранной сетки тетрода.

нов на пути катод—анод задерживается экранной сеткой и создает экранный ток порядка 30% анодного тока. Но главное то, что вторая сетка экранирует катод от анода, вследствие чего изменения анодного напряжения при постоянном напряжении на экранной сетке очень мало сказываются на анодном токе, т. е. по сравнению с триодом в тетроде нужно значительно большее изменение анодного напряжения Δu_a , чтобы вызвать то же изменение анодного тока Δi_a , а так

как $\frac{\Delta u_a}{\Delta i_a} = R_i$ — внутреннему (динамическому) сопротивлению лампы, то следовательно, наличие положительно заряженной экранной сетки сильно увеличивает внутреннее сопротивление лампы. Полезным результатом этого является соответствующее большее увеличение коэффициента усиления лампы, так как $\mu = R_i S$.

Весьма важно еще следующее обстоятельство: экранная сетка сконструирована и расположена так, что ее действие уменьшает вредную емкость между анодом и управляющей сеткой примерно в 1000 раз, что особенно важно при работе лампы в устройствах высокой частоты.

Следовательно, тетрод выгоднее, чем триод, в ряде отношений. Однако у тетрода имеется существенный недостаток. Так как i_a мало изменяется при изменении u_a (при постоянных напряжениях на экранной и управляющей сетках), то характеристика $i_a = F(u_a)$ должна была бы идти весьма полого (рис. 17-26), круто падая лишь при приближении u_a к нулю. Реальная характеристика тетрода $i_a = F(u_a)$ в начальной своей части будет выглядеть иначе, так как в вышеприведен-

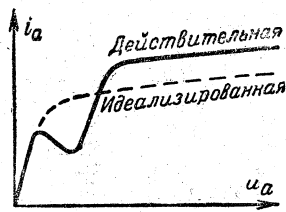


Рис. 17-26. Анодная характеристика тетрода.

ных рассуждениях не учтено явление вторичной эмиссии, называемое также динаatronным эффектом.

Это явление обуславливает своеобразный провал характеристики, соответствующий условиям, когда напряжения анода ниже напряжения экранной сетки ($u_a < u_{c2}$). В этих условиях вторичные электроны, освобождаемые из анода вследствие ударов электронов, движущихся от катода, направляются к экранной сетке, так как ее потенциал выше потенциала анода. Это движение вторичных электронов в сторону, обратную движению основного электронного потока, эквивалентно току, направленному навстречу анодному току. В результате в определенных пределах, пока $u_a < u_{c2}$, повышение анодного напряжения вызывает уменьшение анодного тока. Внутреннее (динамическое) сопротивление лампы, соответствующее этому падающему участку характеристики, отрицательно: $R_i < 0$. Когда же потенциал анода становится выше потенциала экранной сетки, тогда вторичные электроны, выбиваемые с анода, притягиваются обратно к аноду. В этих условиях увеличение анодного напряжения уже увеличивает анодный ток. Провал характеристики затрудняет и осложняет применение тетрода.

В пентоде — пятиэлектродной трехсеточной лампе — использованы преимущества, даваемые экранной сеткой, а недостатки тетрода устранены при помощи третьей защитной (антидинаatronной) сетки, помещенной между экранной сеткой и анодом (рис. 17-27). Потенциал этой сетки должен быть всегда ниже мгновенных значений потенциала анода. Практически эту сетку обычно соединяют с катодом. При этом услови относитель-

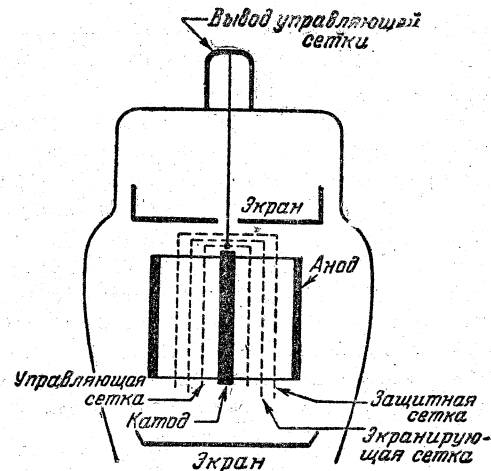


Рис. 17-27. Схема размещения сеток пентода.

тельно медленные вторичные электроны, освобождаемые анодом, будут отталкиваться полем защитной сетки и возвращаться обратно на анод. Что же касается электронов, испускаемых катодом и прошедших экранную сетку, то воздействие на них защитной сетки вызывает некоторое изменение их скорости, но в общем это воздействие невелико. На рис. 17-28 приведены для сравнения анодные характеристики тетрода и пентода.

Для того чтобы уменьшить емкость между анодом и сеткой, в пентодах часто вывод анода делается в купол баллона лампы.

Возникновение тока вторичной эмиссии можно предупредить и без применения защитной сетки посредством использования эффекта объемного заряда внутри лампы, как это осуществлено в лучевых тетродах. В этих лампах для образования сосредоточенного электронного луча управляющая и экранная сетки имеют одинаковый шаг витков и располагаются так, чтобы проекции их витков на катод совпадали (рис. 17-29). Бла-

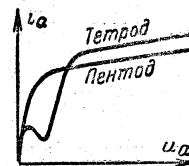


Рис. 17-28. Сравнение анодных характеристик тетрода и пентода.

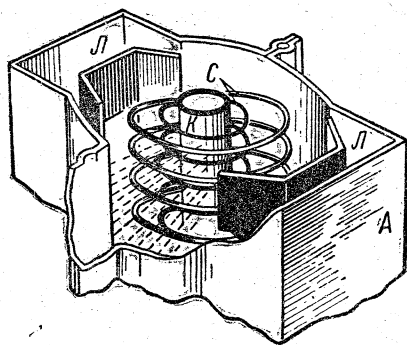


Рис. 17-29. Устройство лучевого тетрода.

годаря такому совмещению положения витков двух сеток электронный поток почти не рассеивается в направлении оси лампы. Затем для сжатия электронного луча между второй сеткой и катодом помещены лучеобразующие пластины L , обычно соединенные с катодом внутри лампы. Большая плотность электронного потока создает в пространстве между экранной сеткой и анодом эффект отрицательного объемного заряда, достаточного для того, чтобы отталкивать электроны вторичной эмиссии назад на анод. При малых рабочих токах (менее 25 мА) этот заряд недостаточен и в характеристике лучевого тетрода появляется провал. По этой причине лучевые тетроды рассчитываются на работу при относительно больших анодных токах и применяются главным образом в качестве усилителей мощности.

Коэффициент усиления тетродов и пентодов превышает коэффициент усиления триодов в десятки и сотни раз.

Постоянное напряжение на экранной сетке в них создается путем подачи на эту сетку анодного напряжения через добавочное сопротивление R_0 , следовательно, напряжение экранной сетки

$$U_0 = U_a - I_0 R_0.$$

Здесь I_0 — ток экранной сетки.

Для стабилизации U_0 между экранной сеткой и катодом включается емкость.

Для уменьшения числа ламп применяются комбинированные лампы (см. рис. 17-8), в которых в одном баллоне совмещаются две лампы.

17-9. Электронно-лучевая трубка

Название этого прибора указывает, что в нем используется поток электронов, собранный в относительно узкий пучок — электронный луч. Длина последнего достигает десятков сантиметров. В вакуумном баллоне трубки осуществляется управление направлением электронного луча посредством воздействия электрических или магнитных полей¹. Для сравнения отметим, что в электронных лампах поток электронов имеет относительно большое поперечное сечение и малую длину (порядка миллиметров), а управление в основном заключается в воздействии на интенсивность электронного потока.

Электронный луч является практически безынерционной подвижной частью электронно-лучевой трубки, дающей возможность наблюдения и фотозаписи быстро протекающих процессов или безынерционного переключения электрических цепей. К приборам, в которых электронно-лучевая трубка служит для первой цели (рис. 17-30), принадлежат электронные осциллоскоп и осциллограф (§ 18-6), для второй цели служит электронно-лучевой коммутатор.

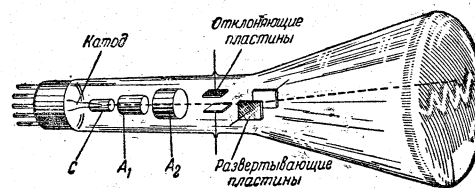


Рис. 17-30. Схема устройства электронно-лучевой трубки с экраном.

Основными частями электронно-лучевой трубки являются: устройство для создания относительно мощного направленного потока электронов — электронный луч, именуемое иногда электронной пушкой, устройства для возбуждения отклоняющих полей электрических (или магнитных) и, наконец, в расширенной части труб-

¹ Кроме управления направлением электронного луча, в электронно-лучевых трубках часто используется также и управление интенсивностью этого луча, например в телевизорах.

ки люминесцирующий экран или коллектор.

В электронной пушке подогреватель в виде металлической бифилярной спирали помещен внутри никелевого стаканчика катода, от которого он изолирован керамиковой массой. На торцовую поверхность катода нанесен эмитирующий слой. На пути электронного луча вдоль трубки размещены три электрода, имеющие форму стаканчика с отверстием в центре торцовой поверхности. Первый из них — управляющий электрод C — играет в трубке роль управляющей сетки электронной лампы и служит для воздействия на интенсивность электронного луча. Потенциал управляющего электрода по отношению к катоду может быть положительным или отрицательным и достигать значений порядка десятков вольт. Следующий электрод — первый анод A_1 — или ускоряющий электрод имеет по отношению к катоду положительный потенциал порядка 200 в и выше. Наконец, последний электрод электронной пушки — второй анод A_2 — или фокусирующий электрод имеет еще более высокий потенциал, порядка от 800 в до 100 кв (в трубках высокого напряжения).

Фокусировка светящегося пятна на экране трубки обычно осуществляется регулированием напряжения анода A_2 . В большинстве случаев электронная пушка значительно сложнее вышеописанной, так как она имеет ряд вспомогательных электродов, например анод A_1 снабжается несколькими диафрагмами для улучшения фокусировки электронного потока.

Из электронной пушки, минуя аноды, поток электронов выходит в виде узкого луча в отклоняющую область трубки. Здесь на электронный луч воздействует отклоняющее электриче-

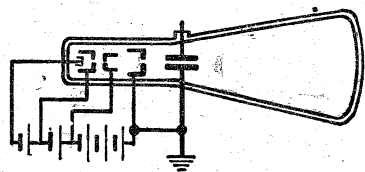


Рис. 17-31. Схема заземления электродов электронно-лучевой трубки.

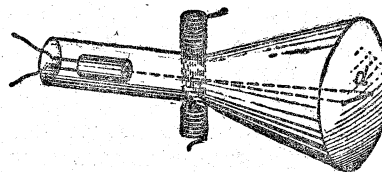


Рис. 17-32. Схема магнитного отклонения электронного луча.

ское поле, напряженность которого пропорциональна исследуемому напряжению (электростатическое отклонение), или же на луч воздействует отклоняющее магнитное поле, индукция в котором пропорциональна исследуемому току (магнитное отклонение).

В простейшей своей форме электростатическое отклонение осуществляется посредством напряжения, приложенного к двум плоским параллельным пластинам, помещенным внутри трубки. Одна из этих пластин обычно заземляется, при этом заземляется и второй анод (рис. 17-31) для того, чтобы между ними и отклоняющими пластинами не образовалось сильно искаженное электрическое поле.

Смещение светящегося пятна на экране прямо пропорционально отклоняющему напряжению, так как поле между пластинами практически равномерно. Отклонение в миллиметрах, соответствующее отклоняющему напряжению 1 в, именуется чувствительностью по напряжению S_u электронно-лучевой трубки.

Магнитное отклонение создается посредством катушек, помещаемых вне трубки (рис. 17-32) и создающих в пространстве отклонения трубки относительно равномерное магнитное поле. Отклонение прямо пропорционально току отклоняющих катушек.

Чувствительностью по току S_i электронно-лучевой трубки называется отклонение в миллиметрах, соответствующее отклоняющему току 1 ма. Ее можно изменять в широких пределах посредством смены отклоняющих катушек.

Чувствительность уменьшается с повышением анодного напряжения, при этом увеличивается яркость пятна на экране; иными словами, откло-

нение зависит от скорости электронов в отклоняющем поле, и медленные электроны отклоняются больше, но, с другой стороны, энергия этих электронов может быть недостаточной для получения достаточно яркого пятна на экране. Это противоречие разрешается в ряде трубок путем создания поля, дающего дополнительное ускорение электронам уже после того, как они прошли отклоняющее поле. Ускоряющее поле создается при помощи кольцевого электрода, помещаемого непосредственно на внутренней поверхности трубки в непосредственной близости от экрана. На этот электрод подается напряжение (до 15 кВ), значительно превышающее напряжение второго анода. Таким путем увеличивается яркость свечения без существенного уменьшения чувствительности.

Воздействие только одного отклоняющего поля вызывает отклонение луча в одной плоскости — на экране светящееся пятно дает изображение в виде прямой линии (в специальных трубках — окружности). Для того чтобы наблюдать на экране изменение исследуемой величины как функции некоторой независимой переменной (например, времени), необходимо сообщить лучу отклонение в плоскости, перпендикулярной к плоскости первого отклонения. Это отклонение должно быть прямо пропорционально независимой переменной (времени). Такое отклонение именуется электронной разверткой. Она воздействует на электронный луч примерно так же, как воздействует на световой луч в магнитоэлектрическом осциллографе синхронное вращение зеркального многогранника (рис. 12-53). Развертка создается воздействием на электронный луч в отклоняющей области трубки второго отклоняющего поля, электрического или магнитного. Простейшей является электростатическая развертка, для которой трубка снабжается второй парой отклоняющих пластин, перпендикулярных к первой паре, и между ними создается поле электростатической развертки.

Бомбардировка экрана, расположенного в расширенной части трубки, потоком свободных электронов вызы-

вает катодолюминесценцию¹ вещества, которым покрыт экран. В зависимости от назначения устройства, в которое входит электронно-лучевая трубка, к люминофору, покрывающему экран, предъявляются различные требования. Для экранов измерительных электронно-лучевых трубок желателен люминофор со спектральным максимумом, близким к области максимальной спектральной чувствительности глаза. Этим требованиям хорошо удовлетворяет ортосиликат цинка, называемый виллемитом.

Послесвечение экрана должно быть возможно более кратким у осциллографов, а в радиолокаторах применяются люминофоры с послесвечением порядка 10 мин и более.

17-10. Газотрон

Вакуумные электронные лампы имеют значительное падение напряжения и ограниченную величину тока вследствие большого внутреннего сопротивления. Это сопротивление может быть сильно уменьшено введением в баллон прибора паров ртути (в мощных приборах) или инертного газа (в приборах средней и малой мощности).

Газотрон (рис. 17-33) представляет собой двухэлектродный вентиль с холодным анодом 2 (графитовым или металлическим) и накаливаемым от независимого источника тока подогреваемым катодом 1, окруженным тепловым экраном 3. Баллон 4 газотрона после откачки до предельно возможного вакуума заполняется затем парами ртути или инертным газом (давление паров ртути порядка 0,1 мм рт. ст., давление газа 0,15—0,5 мм рт. ст.).

Газотрон используется в качестве мощного вентиля. Электроны, испускаемые накаленным катодом, ионизируют молекулы газа в колбе, создавая вторичные электроны и положительные ионы. Газ в баллоне находится в сильно ионизированном состоянии, образуя газовую плазму. В ней

¹ Термин «катодолюминесценция» уточняет, что свечение возникает под ударами свободных электронов, а не положительных ионов и т. п.

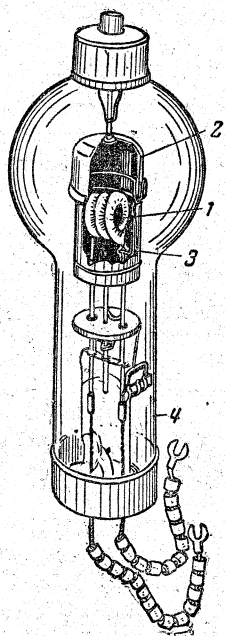


Рис. 17-33. Газотрон типа ВГ-236: напряжение обратного зажигания 7 кВ; выпрямленный ток 1,3 а; ток подогревателя катода 20 а; напряжение накала 2,5 в.

средние концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц равны друг другу, а следовательно, в плазме отсутствует пространственный заряд. Состояние плазмы газа в ионных приборах поддерживается за счет ускоряющего электрического поля, создаваемого анодным напряжением. При этом относительно устойчивом состоянии плазмы пространство, занимаемое ею внутри прибора, подобно хорошему проводнику, что обуславливает соответственно весьма малое падение напряжения в пределах указанного пространства.

В результате в ионных приборах основная потеря напряжения (15—20 в) приходится на пространство вблизи катода и обуславливается работой первичной ионизации.

В газотроне проходит относительно большой ток, создаваемый за счет термоэмиссии катода, поэтому катод газотрона должен обладать значительно большей эмиссией, чем катоды вакуумных ламп. Однако прежде чем включать газотрон под напряжение, необходимо нагреть его катод до нормальной рабочей температуры. Из-за значи-

тельной массы катода нагрев продолжается примерно от 1 мин в малых газотронах и до 20 мин в больших. Если же включить под напряжение газотрон с непрогретым катодом, то падение напряжения в нем будет слишком велико, вследствие чего положительные ионы, возникающие в газе, своими ударами разрушат поверхностный оксидный слой катода. В результате катод потеряет большую часть своей эмиссионной способности. Ток накала подогревных катодов газотронов имеет значения порядка от 4 до 50 а при напряжении накала от 2,5 до 5 в. Среднее значение выпрямленного тока у газотронов 0,4—35 а при максимальном обратном напряжении от 2 до 10 кВ.

17-11. Тиратрон

Газотрон служит лишь для выпрямления тока; между тем в ряде случаев желательно воздействие на ток в приборе. Снабдив газотрон сеткой, мы получим так называемый тиратрон (от греческого слова «тира», что значит «дверь»). На рис. 17-34 показана схема устройства тиратрона. Рабочий процесс тиратрона не отличается, по существу, от процесса газотрона, новым в тиратроне является

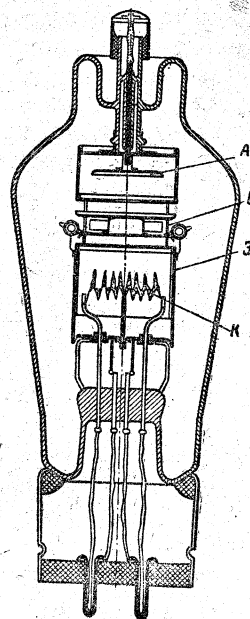


Рис. 17-34. Тиратрон.

А—анод; С—сетка; К—катод; Э—электрод

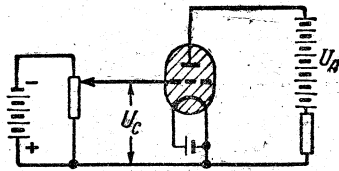


Рис. 17-35. Схема включения тиратрона для снятия характеристики зажигания.

воздействие сетки на разряд. В отличие от сетки в электронной лампе сетка тиратрона не может непрерывно регулировать анодный ток, она может лишь задерживать возникновение дугового разряда в тиратроне, но если последний начался, то сетка теряет способность управления током тиратрона. Если приложить к катоду и аноду постоянное напряжение U_a , а сетке дать отрицательный потенциал (рис. 17-35), то так же, как это имеет место в электронной лампе, отрицательное напряжение сетки U_c может запереть тиратрон, свободные электроны термоэлектронной эмиссии будут отталкиваться сеткой назад к катоду и газ в колбе не будет ионизироваться. Уменьшение отрицательного потенциала сетки будет пропорционально увеличивать поток проходящих к аноду электронов. Ход кривой $i_a = f(u_c)$ будет в этой части таким же, как и у электронной лампы (рис. 17-36).

Как только сеточное напряжение достигнет величины $U_{кр}$ (точка Z), так начинается стремительное возрастание анодного тока. От долей миллиампера он повышается сразу до нескольких ампер и выше. Вместо электронного тока в колбе возникает дуговой разряд.

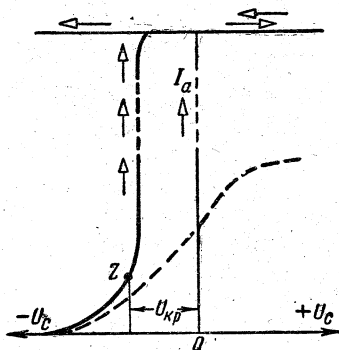


Рис. 17-36. Кривые зависимости анодного тока от сеточного напряжения у триода (пунктир) и у тиратрона.

После возникновения дугового разряда изменение отрицательного потенциала сетки перестает влиять на анодный ток вследствие того, что многочисленные положительные ионы газа при возникновении ионизации окружают сетку, образуя вокруг нее ионную оболочку; положительный заряд этой оболочки компенсирует отрицательный потенциал сетки, а это дает возможность электронам свободно проходить сквозь сетку. Таким образом, после возникновения дугового разряда изменения потенциала сетки не сказываются больше на анодном токе. Следовательно, сетка в тиратроне не может быть использована для усиления колебаний.

Если между анодом и катодом включить переменное напряжение, т. е. если включить тиратрон как вентиль, то он будет погасать в конце каждого полупериода переменного тока. Подадим теперь на сетку также переменное напряжение, сдвинутое по фазе по отношению к анодному напряжению на некоторый угол γ (рис. 17-37). Тогда тиратрон будет зажигаться только в тот момент, когда сеточное напряжение будет превышать значения $U_{кр}$; в эти моменты тиратрон будет вспыхивать и гореть до конца полупериода. Таким образом, изменение фазы сеточного напряжения тиратрона позволяет регулировать среднее значение выпрямленного тока и выпрямленного напряжения. Регулирование фазы сеточного напряжения осуществляется самыми различными способами, например при помощи фазовращающей схемы или фазорегулятора.

Так как тиратрон может пропускать довольно значительные токи, то

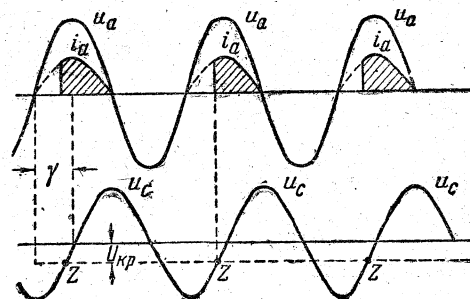


Рис. 17-37. Зависимость момента зажигания тиратрона от фазы его сеточного напряжения.

он широко используется во всякого рода устройствах управления, в автоматике, телемеханике и т. д.

Так же как и газотрон, тиратрон требует при включении предварительного прогрева катода.

17-12. Принцип действия ртутного выпрямителя

По своему принципу действия ртутный выпрямитель имеет много общего с газотроном. В отличие от последнего в ртутном вентиле катодом служит жидкий металл — ртуть, электростатическая эмиссия с которого создает дугу в колбе. Эта дуга во время работы выпрямителя меняет свое пространственное положение в колбе и служит своеобразным практически безынерционным коммутирующим устройством, выпрямляющим переменный ток в постоянный (рис. 17-38).

Простейшей формой ртутного выпрямителя является однофазный стеклянный выпрямитель, показанный на рис. 17-39. Его рабочий процесс принципиально не отличается от рабочего процесса всех более сложных и мощных ртутных выпрямителей. Выпрямитель этот состоит из стеклянного вентилля B , вакуум в колбе которого доведен примерно до $0,01$ мм рт. ст. В колбу вентилля впаяны два железных или графитовых анода A_1 и A_2 , соединенных с двумя зажимами вторичной обмотки трансформатора T . Нижняя часть колбы заполнена ртутью, служащей катодом K выпрямителя. В ртути находится металлический диск, соединяющий ее с внешней цепью через

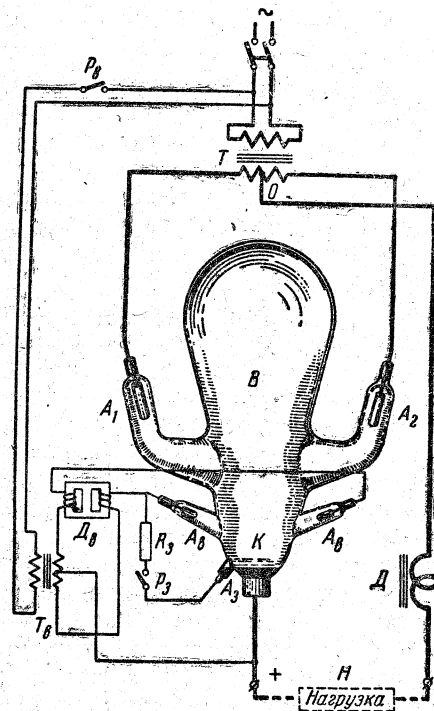


Рис. 17-39. Схема устройства стеклянного однофазного ртутного выпрямителя.

впаянный в стекло металлический стержень. Катод вентилля служит положительным полюсом цепи выпрямленного тока, а средняя точка O обмотки трансформатора — ее отрицательным полюсом. Таким образом, нагрузка H , которую выпрямитель питает постоянным током, включается между катодом K и средней точкой вторичной обмотки трансформатора T .

В течение одного полупериода переменного напряжения анод A_1 будет иметь по отношению к катоду положительный потенциал, а анод A_2 — отрицательный. Вместе с изменением напряжения трансформатора будут соответственно изменяться и потенциалы анодов: спустя полпериода A_1 приобретает отрицательный потенциал, а анод A_2 — положительный. Во время работы вентилля на поверхности ртути катода образуется светящееся катодное пятно, которое является областью испарения ртути и источником элект-

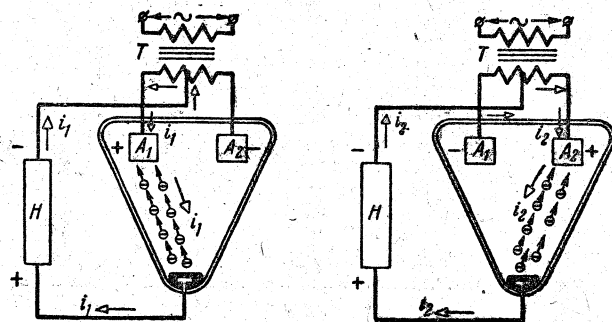


Рис. 17-38. Схема выпрямляющего действия дуги в колбе ртутного выпрямителя.

тронов, поддерживающих дугу в колбе выпрямителя.

Электроны, покидающие поверхность катода, устремляются к тому из анодов, который в данный момент имеет положительный потенциал. На своем пути электроны сталкиваются с молекулами паров ртути и ионизируют их, т. е. отделяют у молекул электроны, тем самым превращая молекулы в положительные ионы. Эти последние движутся к катоду и создают здесь условия, необходимые для поддержания катодного пятна.

Дуга обходит аноды, при этом ток посылает то одна, то другая половина обмотки трансформатора, но направление тока между зажимом катода и средней точкой вторичной обмотки трансформатора остается неизменным — здесь проходит выпрямленный ток.

Разрядный процесс, происходящий в вентиле, представляет собой самостоятельный разряд в парах ртути. Для самостоятельного разряда характерным является то, что свободные электроны и ионы, необходимые для поддержания разряда, возникают непрерывно на катоде и в пространстве между электродами в результате самого процесса разряда.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного тока последовательно с нагрузкой H включается реактивная катушка D , э. д. с. самоиндукции которой противодействует изменениям выпрямленного тока.

17-13. Зажигание и возбуждение ртутного выпрямителя

При пуске в ход выпрямителя в колбе нет ни свободных электронов, ни ионов, вследствие чего ток через вентиль проходить не может. Чтобы вызвать образование катодного пятна, выделяющего электроны, необходимо произвести «зажигание» выпрямителя. С этой целью рассматриваемый нами вентиль (рис. 17-39) снабжен анодом зажигания A_3 , который представляет собой заполненный ртутью отросток в нижней части колбы с впаянным в него электродом. Анод зажигания соединен через сопротивление R_3 с вспомогательным небольшим трансформато-

ром $T_в$. Для того чтобы пустить в ход выпрямитель, мы включаем под напряжение трансформатор $T_в$, затем, наклонив слегка колбу влево и нажав кнопку P_3 , мы создаем мостик из ртути между анодом зажигания A_3 и катодом K . Этот ртутный мостик замыкает цепь половины обмотки трансформатора $T_в$. Возникает небольшой по величине ток. Мы возвращаем колбу в вертикальное положение; ртутный мостик в ней разрывается и образует электрическую дугу, заканчивающуюся на поверхности ртути маленьким катодным пятном. Это последнее дает энергичную электронную эмиссию; выделяющиеся здесь электроны устремляются к тому из главных анодов (или анодов возбуждения $A_в$), который в данный момент имеет положительный потенциал. Таким путем возникает дуга между катодом и одним из анодов, и выпрямитель начинает работать.

Существование катодного пятна является необходимым условием дугового разряда в вентиле. При уменьшении нагрузки в цепи постоянного тока выпрямителя уменьшается ионный поток и эмиссия — катодное пятно — гаснет, вместе с этим прекращается и дуговой разряд. Опыт показывает, что для поддержания катодного пятна необходим ток не меньше 3—5 а. Если катодное пятно погасло; то для возобновления разряда при включении нагрузки необходимо повторить операцию зажигания выпрямителя.

Чтобы предупредить возможность погасания вентиль при малых нагрузках, он снабжается специальной цепью возбуждения. В колбу вдельваются два анода возбуждения $A_в$, они присоединяются к трансформатору возбуждения $T_в$, дающему относительно небольшое напряжение (рис. 17-39). Нулевая точка этого трансформатора соединяется с катодом колбы и, таким образом, создается вспомогательный выпрямитель, замкнутый через две обмотки реактивной катушки $D_в$.

Между вспомогательными анодами и ртутью катода возникает дуга возбуждения, горящая независимо от нагрузки выпрямителя. Она образует катодное пятно, которое обеспечивает зажигание главной дуги выпрямителя.

(между анодами A_1, A_2 и катодом) при любых условиях нагрузки на стороне постоянного тока. В целях экономии энергии цепь возбуждения может быть выключена (ключ P_B), если нагрузка на стороне постоянного тока достаточно велика и постоянна.

17.14. Многофазные выпрямители

При многофазном выпрямлении сильно уменьшаются пульсации выпрямленного тока (§ 10-10), следовательно, уменьшается нежелательная переменная составляющая выпрямленного тока, по этой причине ртутные выпрямители сколько-нибудь значительной мощности изготавливаются многофазными — трехфазными и шестифазными.

Для питания трехфазного ртутного выпрямителя нужен трехфазный трансформатор, вторичные обмотки которого соединяются в звезду (рис. 17-40); нулевая точка этой звезды служит отрицательным полюсом стороны постоянного тока выпрямителя. В подобных условиях дуга в колбе будет всегда соединять катод с тем из электродов, который в данный момент имеет наивысший потенциал. Аноды проводят ток поочередно каждый до того момента, когда кривая напряжения данного анода пересечется с кривой напряжения следующего анода (рис. 17-40, б); тогда дуга переходит на этот анод, следующий в порядке чередования фаз. Напряжение работающей в данный момент фазы трансформатора опреде-

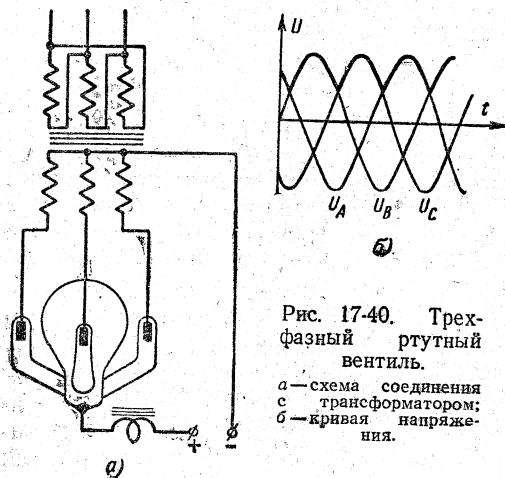


Рис. 17.40. Трехфазный ртутный вентиль.

а — схема соединения с трансформатором; б — кривая напряжения.

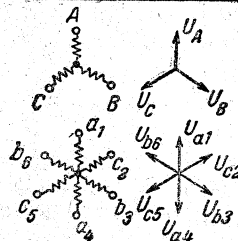
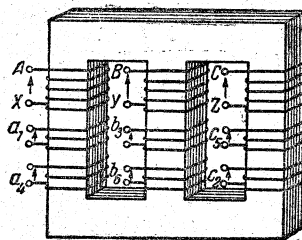


Рис. 17-41. Схема устройства и векторная диаграмма трансформатора для преобразования трехфазной системы в шестифазную.

ляет напряжение выпрямителя на стороне постоянного тока, а следовательно, и выпрямленный ток.

Таким образом, дуга в вентиле переходит непрерывно от анода к аноду, как бы вращаясь с опорной точкой в катодном пятне и описывая полный конус за один период переменного тока.

Для дальнейшего улучшения условий выпрямления мощные ртутные вентили изготавливаются шестифазными и для питания их применяется преобразование трехфазной системы в шестифазную посредством трехфазного трансформатора с шестью вторичными обмотками (рис. 17-41).

При многофазном выпрямлении кривая выпрямленного тока практически сглаживается до прямой индуктивностью, включенной на стороне постоянного тока, при этом ток в каждой из вторичных обмоток трансформатора будет проходить не в течение всего периода переменного тока, а лишь в течение времени $\frac{T}{m}$, что соответствует

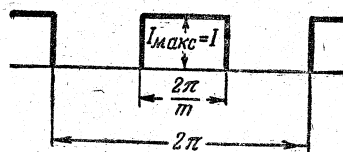


Рис. 17.42. Упрощенная кривая тока вторичной обмотки трансформатора.

фазному углу $\frac{2\pi}{m}$; здесь m равно числу фаз вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, ток во вторичной обмотке трансформатора будет изменяться по прямоугольной кривой рис. 17-42, а его действующее значение будет:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_m^2 \frac{2\pi}{m}} = \frac{I_m}{\sqrt{m}} = \frac{I_1}{\sqrt{m}}.$$

17-15. Металлический ртутный выпрямитель

Хрупкость и непрочность стеклянной колбы заставили конструкторов заменить ее для больших мощностей металлом — перейти к металлическим ртутным вентилям. В СССР производство металлических ртутных вентиляй начато в 1927 г. на ленинградском заводе «Электросила». Выпрямители с вентилями этого типа в настоящее время являются источниками питания постоянным током почти всех электрифицированных железных дорог в Советском Союзе, установок городских трамваев, метрополитена и т. п. На рис. 17-43 показан внешний вид такого вентиля.

На рис. 17-44 показана схема металлического вентиля. Стальной вакуумный сосуд 1 окружен кожухом из листовой стали, и в промежутке меж-

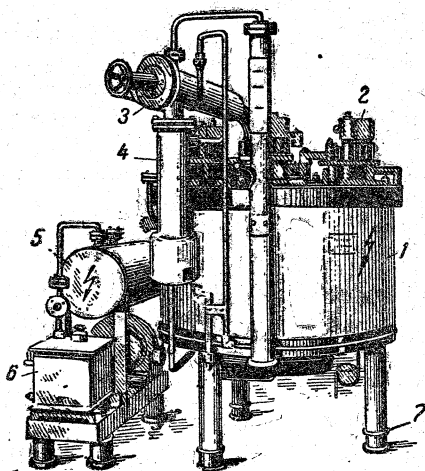


Рис. 17-43. Металлический ртутный вентиль.
1—вакуумный корпус; 2—главный анод; 3—вакуумная трубка с краном; 4—ртутный насос; 5—бак предварительного разряда; 6—насос предварительного разряда; 7—опорный изолятор.

ду этим кожухом и сосудом пропускается охлаждающая вода (водяная рубашка). Катод 3 состоит из металлической чашки — донницы, в которую наливается ртуть, донница изолируется от вакуумного сосуда фарфоровым кольцом. К ней присоединяется кабель, и она служит положительным полюсом для внешней нагрузки. Количество ртути берется примерно из расчета 2,5—1,4 кг на каждые 100 а выпрямленного тока — тем меньше, чем мощнее выпрямитель. В условиях вакуума ртуть, нагреваемая в области катодного пятна, образует значительно большее количество паров, чем это необходимо для нормальной работы установки. Для уменьшения испарения ртути через двойное дно катода пропускается охлаждающая вода. Аноды (на схеме показан один главный анод 2 из шести) изготавливаются из железа или графита, их вводы изолируются от корпуса вакуумного сосуда. Они окружены железными анодными манжетами, представляющими собой цилиндры, изолированные от анода и корпуса. Задача манжет — защита анода от капелек ртути, падающих сверху, от ионных потоков соседних анодов и от непосредственного действия ртутных паров катода. Эта защита необходима для того, чтобы предупредить возникновение основной аварии ртутного выпрямителя — появление катодного пятна на аноде и образование дуги обратного направления на катод или на один из анодов, имеющих в данный момент положительный потенциал. Это — так называемое обратное зажигание. В подобных условиях вторичная обмотка трансформатора оказывается замкнутой накоротко через дугу одновременно работающих анодов и, кроме того, нарушается вентильное действие выпрямителя.

Аноды во время работы довольно сильно нагреваются; для улучшения теплоотдачи их концы, выходящие наружу, снабжаются радиаторами. Возбуждение металлического вентиля осуществляется так же, как и стеклянного, при помощи анодов возбуждения 4, питаемых от небольшого трансформатора возбуждения. Зажигание в металлических вентилях устроено иначе, чем

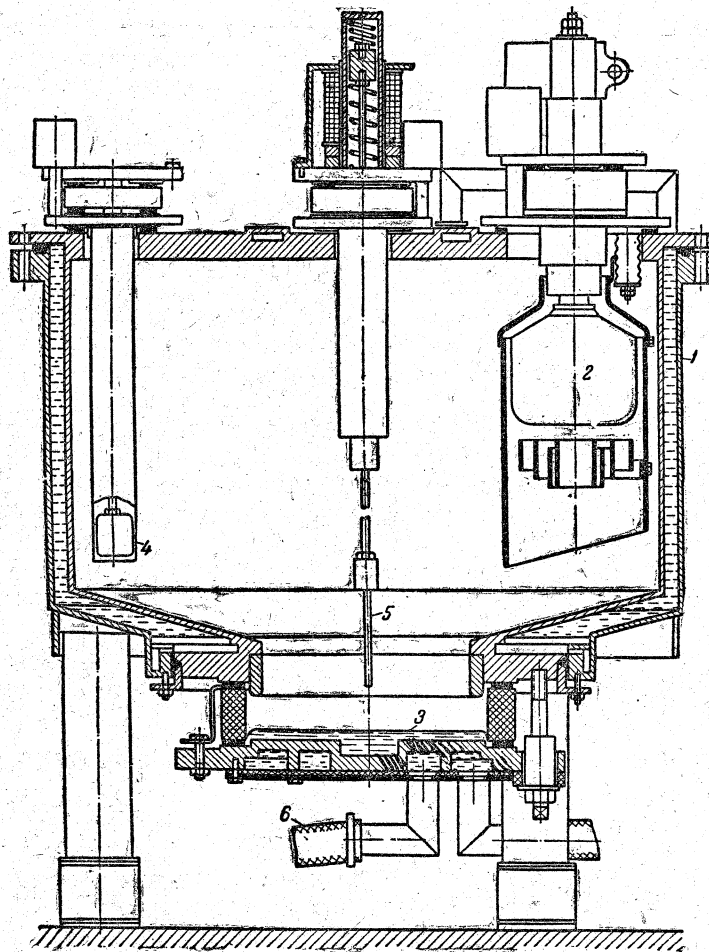


Рис. 17-44. Схема устройства металлического ртутного вентиля.

в стеклянных, анод зажигания *5* сделан подвижным, нормально он висит на пружине на высоте нескольких сантиметров от поверхности ртути. Чтобы зажечь дугу вентиля, нужно заставить анод на мгновение опуститься в ртуть. Это воздействие осуществляется самыми различными способами.

На рис. 17-44 показано схематически следующее устройство: тугоплавкая вольфрамовая игла укреплена на конце длинного стального стержня, подвешенного на пружине и снабженного в верхней своей части стальным якорем. Узкий цилиндр, в котором висит этот якорь, в нижней его части охватывает катушку, присоединенная через пусковой выключатель к трансформатору. Замкнув на короткий срок этот выключатель, мы заставляем

якорь втянуться в катушку и опустить анод в ртуть; при этом замыкается цепь тока, питаемая половиной обмотки трансформатора возбуждения. При выключении катушки пружина поднимает анод *5*, и во время размыкания цепи между ним и поверхностью ртути возникает искра; этого достаточно для того, чтобы зажечь дугу возбуждения, а затем и главную дугу вентиля. Подобный способ зажигания используется и в новых конструкциях колб стеклянных выпрямителей.

Вакуум в сосуде вентиля поддерживается при помощи системы, состоящей из ртутного насоса (для глубокого вакуума), откачивающего газ в бак предварительного разрежения; далее масляный насос, работая уже в атмосферу, поддерживает разреже-

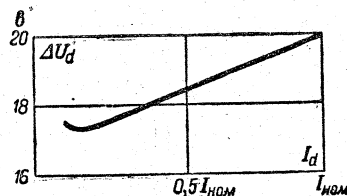


Рис. 17-45. Зависимость падения напряжения в дуге ртутного вентиля от тока.

ние в баке (рис. 17-43). Такая система применяется по той причине, что масляный насос не может создать высокого вакуума, а ртутный насос для высокого вакуума не может работать против атмосферного давления. В ртутном насосе пары ртути, подогреваемой электрическим путем, захватывают своими тяжелыми молекулами молекулы газа и проталкивают их в бак предварительного разрежения, давление в котором не должно превышать 1 мм рт. ст., в противном случае ртутный насос работать не может. Разрежение в баке предварительного разрежения поддерживается при помощи масляного насоса, который приводится во вращение небольшим электродвигателем мощностью 0,3—0,5 квт. Ртутный насос работает непрерывно, а масляный пускается в ход периодически минут на 20 несколько раз в сутки.

Падение напряжения в дуге ртутного вентиля имеет значения порядка 12—25 в. С увеличением нагрузочного тока падение напряжения возрастает относительно медленно (рис. 17-45). Вследствие этого для ртутных выпрямителей характерна относительно малая зависимость к. п. д. от нагрузки; к. п. д. ртутного выпрямителя значительно понижается только при нагрузках менее 25% от номинальной, главным образом из-за влияния постоянных потерь во вспомогательных цепях и устройствах выпрямителя. Следует помнить, что ртутный выпрямитель представляет собой агрегат, состоящий из вентиля и трансформатора, поэтому его общий к. п. д. равен произведению к. п. д. вентиля и трансформатора, кроме того, к. п. д. крупных выпрямителей снижается вследствие потребления мощности обслуживающими устройствами: цепью возбужде-

ния, вентилятором обдува, насосами для поддержания вакуума и т. п. Тем не менее результирующий к. п. д. для ртутных выпрямителей оказывается весьма высоким и достигает 95%, а для высоких напряжений и крупных мощностей — даже 99%.

Падение напряжения в ртутном вентиле мало зависит от номинального напряжения выпрямителя, а так как потеря мощности пропорциональна падению напряжения, то ртутный выпрямитель имеет тем более высокий к. п. д., чем на более высокое напряжение он рассчитан.

По сравнению с одноякорным преобразователем ртутный выпрямитель обладает значительно более высоким к. п. д. (исключение составляют выпрямители низкого напряжения), далее на стороне ртутного выпрямителя преимущества меньшего веса и габарита; выпрямитель не требует специальных фундаментов, не производит шума или вибраций, требует меньших эксплуатационных расходов, при пуске в ход не нуждается в синхронизации, а при перегрузке не выпадает из синхронизма. Стоимость ртутного выпрямителя несколько меньше стоимости одноякорного преобразователя. По этим причинам ртутные выпрямители полностью вытеснили одноякорные преобразователи на преобразовательных подстанциях.

17-16. Игнитрон

Игнитрон¹ представляет собой видоизменение ртутного выпрямителя. В отличие от последнего это прибор однофазный. Сосуд игнитрона изготовляется стеклянным (рис. 17-46) или металлическим и тщательно откачивается. Игнитрон имеет только один анод, между которым и ртутным катодом горит дуга, пока анод имеет положительный потенциал: в конце положительного полупериода дуга погасает и вновь восстанавливается в начале следующего положительного полупериода. Дуга вновь зажигается благодаря действию специального неподвижного зажигающего устройства (игнитора), погруженного в ртуть катода. Этот зажига-

¹ От латинского слова ignis — огонь.

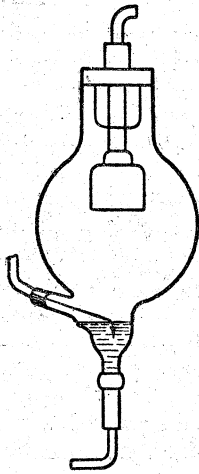


Рис. 17-46. Стекланный игнитрон.



Рис. 17-47. Карборундовый зажигатель (игнитрон).

Ртуть не смачивает зажигатель, вследствие чего вдоль поверхности его соприкосновения с ртутью создаются большие напряженности электрического поля, при этом возникает искра, развивающаяся в дугу, а на поверхности ртути вокруг зажигателя образуется светлое пятно. Затем дуга зажигателя переходит в дугу между анодом и катодом. Цепь зажигателя включается обычно в ту же сеть переменного тока, как и главная дуга игнитрона, но в цепи зажигателя необходим вентиль (газотрон — рис. 17-48, а, тиратрон — рис. 17-48, б, полупроводниковый выпрямитель) для того, чтобы предупредить обратное зажигание во время отрицательной полуволны напряжения. Падение напряжения в главной дуге относительно мало (15—25 в), поэтому как

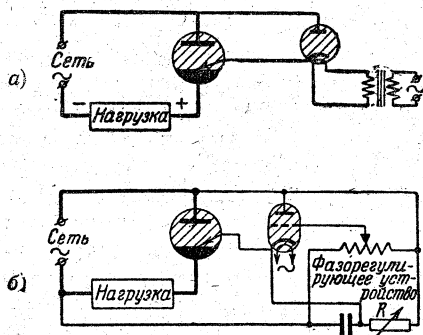


Рис. 17-48. Схема игнитрона:
а — с газотроном в ветви зажигателя; б — с тиратроном в ветви зажигания и фазным управлением.

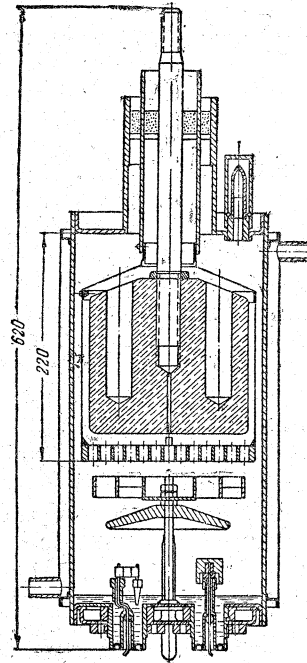


Рис. 17-49. Схема устройства металлического игнитрона с сеточным управлением.

только она загорается, напряжение ветви зажигателя резко уменьшается и дуга зажигателя гаснет. Если в цепь зажигателя введен управляемый вентиль, например тиратрон (рис. 17-48, б), то это делает возможным регулирование момента зажигания главной дуги игнитрона, а следовательно, позволяет регулировать выпрямленный ток. Воздействие на тиратрон, управляющий током зажигателя, осуществляется путем регулирования фазы его сеточного напряжения (§ 17-11).

В новых конструкциях игнитрон снабжается сеткой и управление выпрямленным током осуществляется путем воздействия одновременно на фазу сеточного напряжения и фазу напряжения зажигателя (рис. 17-48, б).

Преимуществами игнитрона перед ртутным выпрямителем являются значительно меньшие размеры и потери, кроме того, игнитрон выдерживает большие перегрузки (он переносит толчки тока до 100-кратного от допустимого среднего значения).

Недостатком игнитрона является относительная недолговечность зажигателя. Он расположен в самой нагре-

той части аппарата и легко меняет свои физические свойства, тогда происходит смачивание зажигателя ртутью, вследствие чего имеют место пропуски зажигания и нарушение работы игнитрона.

Для выпрямления трехфазного тока требуется не менее трех игнитронов.

Область применения игнитронов: для установок электролиза алюминия и магния, для управляемого электропривода, для прерывания тока в машинах контактной сварки, для электрифицированных железных дорог и т. д. Эта область расширяется по мере усовершенствования зажигателя.

17-17. Некоторые особенности полупроводников

За последнее десятилетие развитие¹ техники создало возможность решать более успешно ряд задач электроники и радиотехники при помощи новых по своему принципу полупроводниковых приборов. Эти приборы не только заменяют электронные и ионные, но, кроме того, позволяют решать ряд проблем, неразрешимых старыми методами (например, выпрямление переменного тока статическими приборами с очень малыми потерями). Развитие полупроводниковых приборов было подготовлено длительной работой ученых в области физики полупроводников. Здесь мы кратко отметим наиболее важные для нас физические свойства полупроводников.

Вещества, обладающие удельным сопротивлением порядка $10^{-3} - 10^{10}$ ом·см, относятся к числу полупроводников. Однако из этих веществ большое техническое значение в последнее время приобрели лишь электронные полупроводники, чаще именуемые просто полупроводниками.

Характерным отличием этой группы веществ от проводников — металлов является то, что движущиеся носители тока в них возникают вследствие поглощения ими энергии внешнего источника (тепловой, световой, электрической), в то время как в металлах носители тока (свободные электроны) существуют независимо от поступле-

ния энергии извне. С понижением температуры проводимость металлов возрастает, а проводимость электронных полупроводников уменьшается.

Носителями тока в полупроводниках служат электроны или дырки, причем в практически применяемых полупроводниках имеет место резкое преобладание того или другого типа проводимости электронной или дырочной.

Электронная проводимость возникает тогда, когда, например, повышение температуры сообщает электрону энергию, достаточную для того, чтобы порвать парноэлектронную связь. Оторвавшись от атома, электрон может свободно перемещаться. Освобождение электрона образует в кристаллической решетке полупроводника свободную незамещенную междуатомную связь — электронную дырку. На это незамещенное место может перейти электрон соседней связи, в свою очередь оставив после себя свободное место. Подобное последовательное перемещение электронов с заполнением освобождающихся электронных дырок удобно рассматривать как движение положительных зарядов-дырок в направлении, обратном движению электронов, — это дырочная проводимость. Движение дырок может происходить под действием внешнего электрического или магнитного поля, причем дырка ведет себя как частица с положительным зарядом, равным по своей абсолютной величине заряду электрона, и с массой, близкой к массе электрона. Отметим, что название электронные полупроводники указывает на то, что оба типа проводимости — электронная и дырочная — обусловлены движением электронов (нет движения ионов).

Существование дырки кратковременно¹ вследствие того, что при столкновении со свободным электроном они рекомбинируют, т. е. исчезают и дырка и свободный электрон. Рекомбинация электронно-дырочной пары вызывает освобождение электрона и дырки — «генерацию» их в другом месте полупроводника, что является следствием

¹ От нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд в монокристаллах полупроводника германия.

закона сохранения энергии: при рекомбинации энергия освобождается, при генерации она же поглощается.

Как следует из самой природы собственной проводимости чистого полупроводника освобождение электрона сопровождается возникновением дырки, таким образом в чистом полупроводнике число электронов равно числу дырок. Но перемещение дырок происходит с большей инерционностью, чем движение свободных электронов. По этой причине собственная проводимость чистых полупроводников, как правило, имеет электронный характер.

В современных полупроводниковых приборах, служащих вентилями или усилителями, используется исключительно примесная проводимость, возникающая, когда к полупроводнику добавляется незначительное количество (10^{-8} — 10^{-7}) определенной примеси. Такая проводимость имеет резко выраженный определенный характер: электронный — *n*-проводимость¹ или дырочный — *p*-проводимость², а кроме того, она во много раз больше проводимости чистого полупроводника. Электронная примесная проводимость возникает, если у примесного атома будет одним валентным электроном больше, чем у замещаемого им атома полупроводника. Этот лишний электрон будет слабо связан с атомом. Например, атом германия обладает четырьмя валентными электронами; при замещении его в кристаллической решетке вещества примесным атомом мышьяка, обладающим пятью валентными электронами, пятый электрон уже при комнатной температуре создает примесную проводимость *n*-типа. Такая примесь к полупроводнику именуется донорной³.

Дырочная примесная проводимость — проводимость *p*-типа — может возникнуть, если примесный атом имеет на один валентный электрон меньше, чем замещаемый им в кристаллической решетке атом полупроводника.

¹ Первая буква латинского слова *negativus* — отрицательный.

² Первая буква латинского слова *positivus* — положительный.

³ От латинского слова *donator* — даритель, мать.

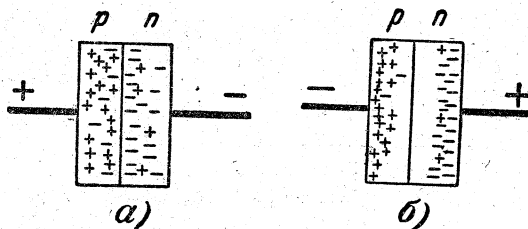


Рис. 17-50. Схема распределения носителей тока в области перехода *p-n*.

a — при прямом направлении внешнего напряжения;
б — при обратном направлении внешнего напряжения

Этот атом примеси не может заполнить все межузельные связи и на свободную связь может перейти электрон соседней связи, оставив за собой незамещенное место — дырку. Такая примесь именуется акцепторной¹.

Важнейшие для современной техники полупроводники германий и кремний четырехвалентны. По отношению к ним элементы пятой группы — мышьяк, сурьма и фосфор — могут служить донорами, а элементы третьей группы — индий, галлий, алюминий и бор — акцепторами.

В одном и том же кристалле полупроводника вследствие диффузии или сплавления различных примесей может иметься область *n*-проводимости и область *p*-проводимости. Граница между этими областями именуется переходом *p-n* или электронно-дырочным переходом.

Одним из характернейших свойств полупроводников является односторонняя проводимость перехода *p-n*, что широко используется для выпрямления переменного тока. Это действие в первом приближении может быть пояснено следующим образом. Когда с областью *p* соединен положительный, а с областью *n* отрицательный зажим источника электроэнергии, тогда дырки в области *p* и электроны в области *n* движутся друг другу навстречу (рис. 17-50, *a*), при этом рекомбинирующие носители тока замещаются новыми, создаваемыми за счет выделения энергии. Таким образом, в этом прямом направлении через переход ток проходит относительно легко.

При обратном направлении внешнего напряжения под действием внеш-

¹ От латинского слова *acceptare* — принимать.

него электрического поля дырки и электроны движутся в противоположные стороны, удаляясь от перехода. В области последнего остается очень мало носителей тока (рис. 17-50,б) — переход приобретает свойства изолирующего слоя — запирающего слоя.

Ток обратного направления при правильном выборе и обработке полупроводника может быть близок к нулю.

Отметим, что *p*- или *n*-проводимость не обозначают наличие в полупроводнике в качестве носителей тока только одних дырок или только одних электронов. Тип проводимости указывает только, что в данном полупроводнике значительно больше дырок, чем электронов (*p*-тип), или же больше электронов, чем дырок (*n*-тип).

Эти неосновные носители тока и создают весьма малый обратный ток. Число неосновных носителей тока очень сильно зависит от температуры, быстро увеличиваясь с ее повышением. В результате проводимость теряет свой определенный электронный или дырочный характер и полупроводниковый прибор перестает работать.

17-18. Полупроводниковые диоды

Для выпрямления переменного тока в настоящее время широко используются полупроводниковые диоды-вентили. По мере их усовершенствования область их применения непрерывно расширяется, так как они обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с ионными и электронными вентилями. Эти преимущества — малая потеря напряжения, отсутствие цепи накала, длительный срок службы, исключительно малые размеры (рис. 17-51).

В свою очередь по мере изобретения новых лучших по своим свойствам полупроводниковых устройств ранее применявшиеся диоды вытесняются из электротехнической практики.

Меднозакисный («купроксный») диод, изобретенный 30 с лишним лет назад (1926 г.) и применявшийся только в качестве вентиля, имел к. п. д. порядка 55% (в настоящее время до 70%). За последние 15 лет он в большой мере вытеснен из промышленной

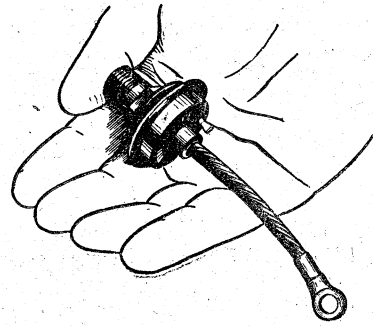


Рис. 17-51. Кремниевый диод-вентиль мощностью 10 квт (рабочая температура 200° С, к. п. д. 99%).

практики селеновым диодом, дающим к. п. д. порядка 75%, а последний теперь быстро уступает место несравненно более экономичному (к. п. д. 98%) и более компактному германиевому диоду. Много шансов за то, что германиевый диод в свою очередь в ряде технических устройств будет заменен значительно более нагревостойким и более компактным кремниевым диодом.

Эффект односторонней проводимости имеет место и при контакте полупроводника с металлом, но здесь он выражен относительно слабо, поэтому во всех современных полупроводниковых вентилях для выпрямления используется свойство односторонней проводимости перехода *p-n* (§ 17-17) между двумя слоями полупроводника — одного с дырочной проводимостью и второго с электронной проводимостью.

Между этими слоями создается запирающий слой, обладающий малым прямым сопротивлением $R_{пр}$ и большим обратным сопротивлением $R_{об}$.

Выше, в гл. 10, мы рассмотрели условия в цепи переменного тока при различных схемах выпрямления посредством идеального вентиля, не пропускающего совершенно обратный ток. Таким идеальным вентилем является электронная лампа. Полупроводниковый вентиль пропускает более или менее заметный обратный ток, поэтому его важной практической характеристикой служит статический коэффициент выпрямления

$$g = \frac{I_{пр}}{I_{об}}$$

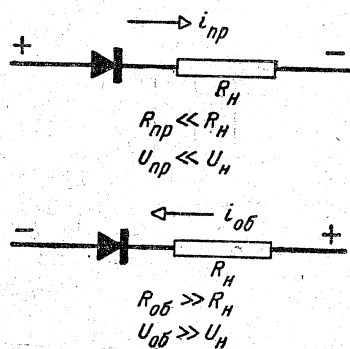


Рис. 17-52. Распределение напряжений между нагрузкой и полупроводниковым вентилям при прямом и обратном токе в однополупериодной схеме выпрямления.

равный отношению прямого тока к обратному или обратному отношению сопротивлений $g = \frac{R_{об}}{R_{пр}}$ при одинаковом по величине постоянном напряжении.

Однако в большинстве случаев (кроме электроизмерительных схем) в рабочих условиях вентиля прямое напряжение во много раз меньше обратного вследствие того, что последовательно с вентилям включено сопротивление нагрузки R_n , на которое приходится большая часть напряжения источника, при прямом направлении тока и малая часть напряжения при обратном направлении тока. В простейшем случае при однополупериодном выпрямлении (рис. 17-52) в условиях прямого тока $\frac{U_n}{U_{пр}} = \frac{R_n}{R_{пр}}$ и $U_{пр} \gg U_n$, а при обратном направлении $\frac{U_n}{U_{об}} = \frac{R_n}{R_{об}}$ и $U_{об} \gg U_n$.

Эта разница между прямым и обратным напряжениями вентиля тем больше, чем лучше выпрямление.

Следовательно, значение коэффициента g не определяет действительно качества выпрямления. Более точной характеристикой работы полупроводникового вентиля в реальных условиях выпрямления является его действительный (динамический) коэффициент выпрямления

$$\gamma = \frac{I'_{пр}}{I'_{об}}$$

где $I'_{пр}$ и $I'_{об}$ — средние значения прямого и обратного тока в реальных условиях работы выпрямителя в цепи переменного тока.

Прямое и обратное сопротивления полупроводникового диода зависят от напряжения. В частности, обратное сопротивление с возрастанием напряжения сначала повышается, а затем уменьшается. Если обратное напряжение превысит некоторое предельное значение, то происходит необратимый процесс — пробой вентиля, при котором обратное сопротивление уменьшается до долей ома и вентиляльное действие прекращается. Нужно различать обратное пробивное напряжение вентиля, разрушающее его при кратковременном воздействии, и значительно меньшее длительно допустимое обратное напряжение. Если в схеме выпрямляемое напряжение больше допустимого обратного, то применяется последовательное соединение вентиля, например в виде столбиков (рис. 17-59). Чем больше допустимое обратное напряжение для данного вида диода, тем меньше нужно этих вентиля при заданном выпрямляемом напряжении, следовательно, тем меньше габариты полупроводникового выпрямителя. Размеры каждого из диодов зависят от наибольшего допустимого среднего выпрямленного тока. Последний в основном определяется, как у большинства электрических машин и аппаратов, наибольшей допустимой температурой нагревания диода. Тепло, выделяющееся в диоде, тем меньше, чем меньше его прямое сопротивление и чем больше обратное сопротивление, иными словами, чем выше к. п. д. диода в режиме вентиля. С другой стороны, чем больше нагревостойкость диода, тем выше его допустимый рабочий нагрев. С повышением к. п. д. и нагревостойкости полупроводниковых диодов быстро уменьшались их размеры и вес — современный полупроводниковый выпрямитель является статическим аппаратом, вес которого на единицу мощности значительно меньше, чем у трансформатора (рис. 17-50).

В условиях работы в выпрямитель-

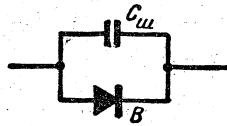


Рис. 17-53. Эквивалентная схема полупроводникового диода.

ном устройстве выпрямленное напряжение при данном токе может быть тем выше, чем больше длительно допускаемое обратное напряжение диода, поэтому наибольшая мощность в цепи выпрямленного тока определяется этим напряжением и допустимым средним выпрямленным током.

Процесс выпрямления тока полупроводниковым диодом не является также идеальным вследствие неизбежного наличия шунтирующей емкости. При обратном напряжении запирающий слой играет роль изолятора, разделяющего два проводника — два электрода диода. Под действием обратного напряжения эта емкостная система заряжается соответствующим током (обратного направления). Следовательно, полупроводниковый диод можно рассматривать как вентиль V , шунтированный некоторой емкостью $C_{ш}$ (рис. 17-53). Эта емкость пропорциональна активной площади диода и обратно пропорциональна толщине запирающего слоя. Так как эта толщина весьма мала, то емкость диода на единицу площади величина заметная. Тем не менее учитывать ее влияние приходится главным образом при высокой частоте.

Старейший из полупроводниковых диодов меднозакисный («куп-

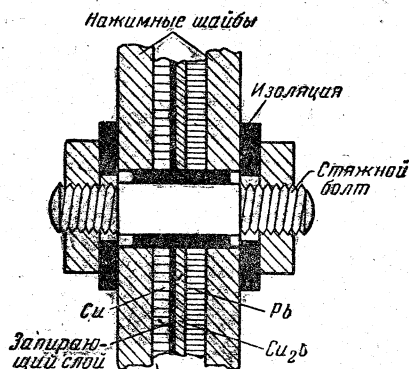


Рис. 17-54. Схема устройства меднозакисного диода.

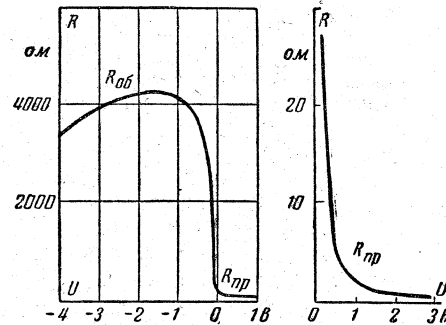


Рис. 17-55. Кривые зависимости от напряжения прямого и обратного сопротивления меднозакисного диода.

роксный») состоит из пластины красной меди—опорного электрода, на котором посредством соответствующей термической обработки создан слой полупроводника — закиси меди Cu_2O (рис. 17-54); на закись меди накладывается контактный электрод — пластина мягкого металла, свинца (Pb), или же контактный электрод создается напылением на закись меди расплавленного металла (Al или Zn), или же посредством нанесения электролитическим путем слоя красной меди.

В результате применения специальной технологии при изготовлении поверхностный слой закиси обогащается кислородом воздуха — акцептором и приобретает свойства дырочной проводимости (p -область), а в слое закиси, прилегающем к красной меди, примесные атомы меди создают электронную проводимость (n -область). Между этими двумя областями и создается переход $p-n$, обладающий несимметричным сопротивлением (рис. 17-55). Проводящее направление диода: контактный электрод — закись меди — опорный электрод (медь).

Температурный коэффициент для прямого и обратного сопротивлений у меднозакисного диода отрицателен и довольно значителен (1,5—2,5%/град для прямого и 4—6%/град для обратного), что ставит температурные границы для применения диода примерно от $-50^\circ C$ до $+50^\circ C$.

Меднозакисный диод по габаритам, весу и температурному коэффициенту существенно уступает селеновому, но все же он обладает существенными преимуществами — в любой момент он

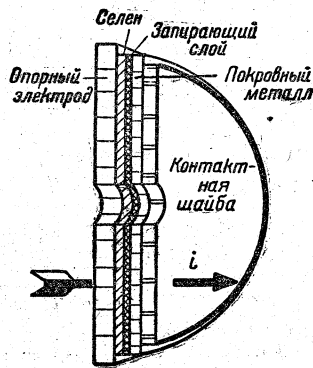


Рис. 17-56. Устройство селенового диода.

может быть включен на полное напряжение и его параметры во время работы мало изменяются, по этим причинам меднозакисным диодам все же в ряде случаев отдается предпочтение перед селеновыми: в частности, они продолжают применяться в измерительных приборах.

Селеновые диоды в настоящее время очень широко используются в качестве вентилях в выпрямительных устройствах. Опорным электродом этого диода служит стальная никелированная или алюминиевая пластина, на которую нанесен тонкий слой селена (рис. 17-56). На селен напыляется слой сплава олова и кадмия, образуя покровный слой диода, а сверх этого покровного слоя накладывается контактный электрод. В селене диода образуются две области: атомы кадмия, проникая в селен и образуя селенид кадмия, играют роль примеси — донора, следовательно, создают область электронной проводимости (*n*-область), а вторая (*p*-область) создается в самом селене, обладающем дырочной проводимостью. Таким образом, в селене возникает переход *p-n*, а следовательно, запирающий слой. Проводящее направление диода — от опорного стального электрода через селен к покровному электроду. На рис. 17-57 приведена вольт-амперная (статическая) характеристика селенового диода, а на рис. 17-58 — кривые зависимости от напряжения прямого и обратного сопротивлений диода. Обе характеристики даны на 1 см^2 активной поверхности диода.

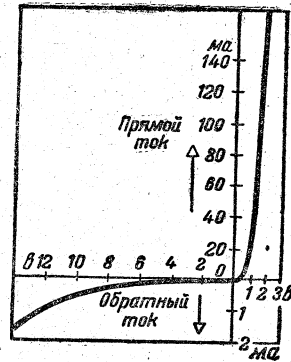


Рис. 17-57. Вольт-амперная характеристика селенового диода.

Пробивное и допускаемое обратное напряжения у селенового диода значительно выше, чем у меднозакисного (табл. 17-1).

Таблица 17-1

Пробивные и допускаемые напряжения меднозакисных и селеновых вентилях

Тип вентиля	Пробивное напряжение, в	Допускаемое максимальное значение обратного напряжения в однополупериодной схеме, в
Меднозакисный . . .	20—30	8—10
Селеновый	50—80	20—25

Для рабочих напряжений, превышающих допускаемое обратное напряжение одного диода, селеновые элементы, изготовленные в виде дисков, собираются в столбики и снабжаются радиаторами (рис. 17-59) для

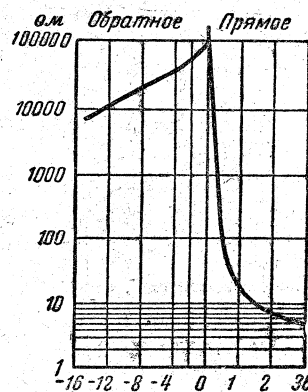


Рис. 17-58. Кривые зависимости от напряжения прямого и обратного сопротивлений селенового диода.

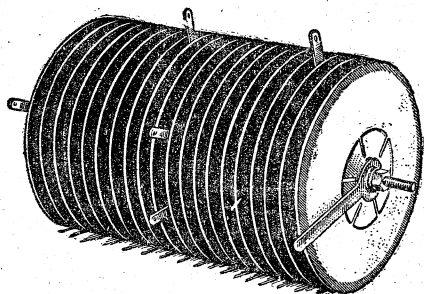


Рис. 17-59. Столбик селеновых диодов с радиаторами и выводами для включения по мостовой схеме выпрямления.

улучшения теплоотдачи в окружающую среду.

Существенными недостатками селенового выпрямителя являются расформовка его в нерабочем состоянии (временное уменьшение обратного сопротивления), старение со временем (возрастание прямого сопротивления) и, наконец, относительно высокое напряжение начала выпрямления порядка 100 мв (см. рис. 17-57).

В настоящее время селеновые выпрямители широко применяются для самых различных целей; для зарядки аккумуляторов, для возбуждения синхронных двигателей и самовозбуждения генераторов, для питания постоянным током электромагнитов — подъемных, магнитных плит и т. д. Однако к. п. д. селеновых и меднозакисных выпрямителей (порядка 70%) значительно ниже, чем у ртутных выпрямителей или чем у контактных синхронных выпрямителей. Это выпрями-

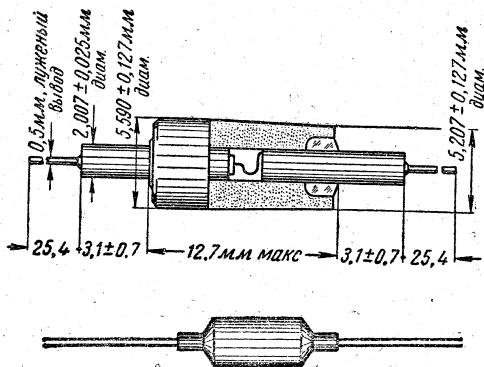


Рис. 17-60. Германиевый точечный диод в натуральную величину (внизу) и его разрез.

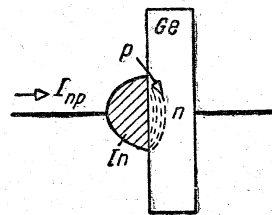


Рис. 17-61. Схема получения плоскостного диода путем сплавления индия в пластину германия.

тели низкого напряжения (примерно до 30 в) и небольших мощностей.

Германиевые диоды являются одними из наиболее совершенных полупроводниковых вентилях, т. е. для них характерно очень большое обратное сопротивление и весьма малое прямое. Сначала были осуществлены диоды с точечным контактом (рис. 17-60). В них вольфрамовая игла упирается в пластину германия. Запирающий слой создается вокруг точечного контакта путем формовки пульсирующим током. При этом вокруг иглы создается область дырочной проводимости, а так как чистый германий обладает электронной проводимостью, то таким образом вокруг точечного контакта создается очень малый формованный *p-n*-переход, имеющий форму полусферы. Этот формовочный процесс не поддается точному контролю. Вследствие малой площади перехода точечный диод может служить для выпрямления лишь малых токов порядка миллиампер¹, зато шунтирующая емкость точечных диодов весьма мала, меньше одной пикофарды, что делает их очень ценными для устройств, работающих при сверхвысоких частотах.

Плоскостные германиевые диоды по сравнению с точечными обладают преимуществами более низкого прямого сопротивления, меньшего обратного тока, высокого коэффициента выпрямления, более высокого допустимого обратного напряжения.

Такой диод создается (рис. 17-61) путем сплавления металла—акцептора в пластинку германия. Для этого

¹ Например, средний выпрямленный ток 50 ма. $R_{пр} = 250 \text{ ом}$ при 1 в; $R_{об} = 10\,000\,000 \text{ ом}$ при 50 в (длительное).

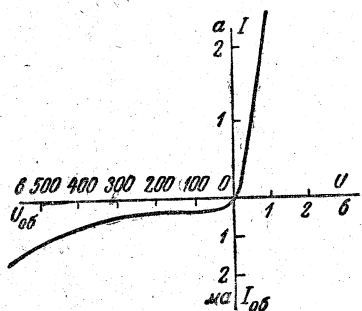


Рис. 17-62. Динамическая вольт-амперная характеристика плоскостного германиевого диода.

на пластинку германия наносится капля расплавленного индия. Атомы последнего, проникая в поверхностный слой германия, создают слой с примесной дырочной проводимостью, который и образует с электронным германием переход $p-n$. Кроме емкости, во всех остальных отношениях плоскостной диод лучше точечного. Он может обладать очень высоким коэффициентом выпрямления, т. е. весьма малым прямым и большим обратным сопротивлениями, и выдерживать значительное обратное напряжение. На рис. 17-62 дана динамическая (при переменном токе) характеристика подобного диода. Он рассчитан на выпрямленный ток $0,5 \text{ а}$ (кратковременно $1,5 \text{ а}$), которому соответствует падение напряжения $0,7 \text{ в}$, его длительное обратное рабочее напряжение 185 в (пиковое обратное напряжение 400 в).

Германиевые диоды малой мощности быстро вытесняют электронные лампы-диоды, а плоскостные диоды большей мощности заменяют большинство ионных вентилях, по отношению к которым они имеют преимущество весьма малых габаритов, более высокого к. п. д., длительного срока работы (порядка не менее $10\,000 \text{ ч}$) и т. д.¹

Недостатком германиевых диодов является зависимость их параметров от температуры. С повышением температуры $R_{пр}$ возрастает, а $R_{об}$ уменьшается. Рабочая температура герма-

¹ Например, плоскостной диод при выпрямленном среднем токе $1\,000 \text{ а}$ имеет падение напряжения 1 в , а плотность тока 500 а/см^2 , при обратном напряжении 100 в — обратный ток 10 мА , что дает динамический коэффициент выпрямления $\gamma = 1 \cdot 10^7$ и к. п. д. свыше 99% .

ниевых диодов (т. е. предельная температура, при которой изменения характеристик еще обратимы) примерно $50-60^\circ \text{ С}$. Кроме того, они относительно дороги.

Кремниевые плоскостные диоды впервые описаны только в 1953 г. В них переход $p-n$ создается посредством сплавления в пластину кремния с одной стороны металла-акцептора, создающего дырочную проводимость, а с другой стороны в пластину сплавляется донор.

Преимуществом этих диодов является высокая рабочая температура, до 200° С , очень малый обратный ток, порядка 10^{-10} а , и коэффициент выпрямления порядка 10^8 . Это дает возможность изготавливать соответствующие вентили исключительно компактными (рис. 17-50). Хотя кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре (57%), тем не менее получение сверхчистого кремния, нужного для диодов, связано с очень значительными трудностями и стоит дорого.

17-19. Полупроводниковый триод (транзистор)

Полупроводниковый триод, известный в иностранной литературе под названием транзистора, является прибором, обладающим усилительными свойствами, подобными электронной лампе-триоду, т. е. дает возможность посредством малых изменений электрической величины (мощности, напряжения, тока) на входе прибора вызывать значительные изменения соответствующей электрической величины на выходе прибора. Однако в самом принципе управления и в ряде особенностей полупроводниковый триод существенно отличается от электронной лампы-триода, поэтому и схемы применения полупроводниковых триодов в различных устройствах промышленной электроники и радиотехники имеют ряд очень существенных особенностей.

Полупроводниковые триоды, так же как и диоды, делятся на точечные и плоскостные.

На рис. 17-63 показано схематически устройство точечного триода, а на

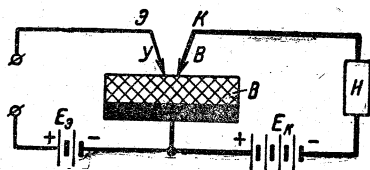


Рис. 17-63. Схема устройства точечного германиевого триода.

рис. 17-64 одна из практических конструкций такого триода. Пластина, вырезанная из монокристалла германия высокой чистоты (площадью порядка 4 мм^2 и толщиной $0,3 \text{ мм}$), припаяна к металлическому основанию и является «базой» триода. В поверхность пластины германия упираются две тонкие (диаметром $0,002 \text{ мм}$) контактные пружины, образующие с германием два точечных контакта. Последние должны находиться на очень близком расстоянии друг от друга ($0,25\text{--}0,05 \text{ мм}$). Одна из этих пружин Э, являющаяся электродом управляющей цепи, именуется эмитером, а вторая К, служащая электродом управляемой цепи, носит название коллектора. В качестве материала для пружины эмитера применяется сплав платины с рутением, а пружина коллектора изготавливается из фосфористой бронзы.

Исходными элементами простейшей рабочей схемы полупроводникового триода (рис. 17-65) являются ис-

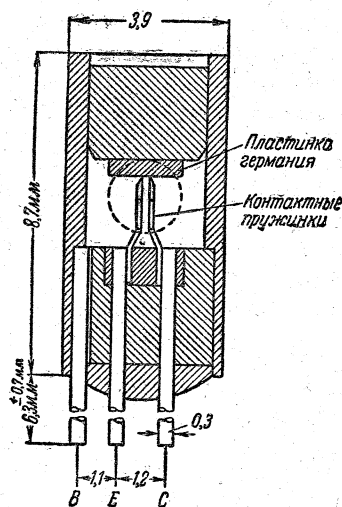


Рис. 17-64. Практическая конструкция (разрез) точечного триода.

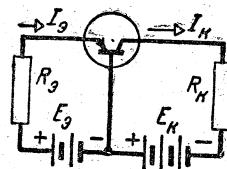


Рис. 17-65. Простейшая схема включения полупроводникового триода.

точник электроэнергии $E_к$, включенный в цепь коллектора, и батарея смещения $E_э$, обеспечивающая положительный потенциал эмитера по отношению к базе; на рис. 17-65 показано также условное графическое обозначение триода.

Вокруг точечных контактов образуются области с дырочной проводимостью и создаются два перехода $p-n$. По отношению к переходу $p-n$ у эмитера батарея $E_э$ включена в прямом (проводящем) направлении. По отношению к переходу $p-n$ у коллектора батарея $E_к$ включена в обратном (непроводящем) направлении. Пока цепь эмитера выключена, в цепи коллектора ток очень мал, так как обратное сопротивление перехода $p-n$ весьма велико. Для создания тока в цепи эмитера достаточно небольшой э. д. с., так как переход $p-n$ в этой цепи имеет малое прямое сопротивление.

Включение тока эмитера вызывает сильное изменение сопротивления перехода в цепи коллектора и в ней возникает заметный ток $I_к$. Изменения тока эмитера вызывают пропорциональные изменения тока коллектора $I_к$. Таким образом, ток $I_э$ в цепи эмитера, обладающей малым сопротивлением, управляет током в цепи коллектора, обладающей большим сопротивлением. Так как $E_к \gg E_э$, то при одинаковом порядке изменения тока $\Delta I_э$ и $\Delta I_к$ имеет место значительно большее изменение мощности в цепи коллектора: $\Delta P_к \gg \Delta P_э$, в чем и заключается усиление по мощности.

Эффект воздействия $I_э$ на $I_к$ может быть объяснен тем, что ток эмиттера вводит в базу дырки, являющиеся для базы неосновными носителями заряда (рис. 17-66). Часть дырок рекомбинирует с электронами базы. Наибольшая часть благодаря диф-

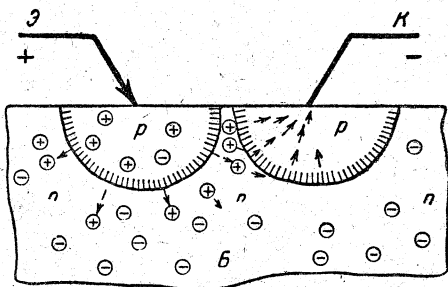


Рис. 17-66. Схема диффузии дырок в область коллектора.

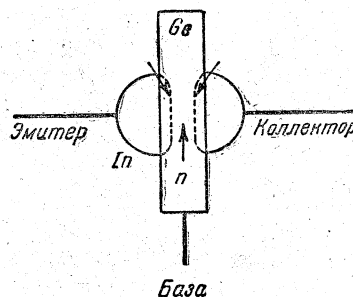


Рис. 17-68. Схема получения сплавного плоскостного триода.

фузии, вызываемой беспорядочным тепловым движением, достигает коллектора. Здесь движение дырок под действием сильного поля коллектора значительно увеличивает его ток I_K . Рассматривая тот же процесс с точки зрения воздействия тока эмитера на параметры цепи коллектора, можно сказать, что поступление дырок в область перехода коллектора существенно уменьшает сопротивление этого перехода. Для того чтобы значительное количество дырок из области контакта эмитера достигло области контакта коллектора, необходимо, чтобы расстояние между этими контактами было весьма мало, что и осуществляется в точечном триоде путем соответствующего сближения контактных точек.

Плоскостной полупроводниковый триод является соединением двух плоскостных переходов $p-n$. Он может состоять из двух областей с дырочной проводимостью, разделенных областью с электронной проводимостью, — это триод $p-n-p$ (рис. 17-67), но изготавливаются также триоды $n-p-n$. Способы создания областей электронной или дырочной проводимостей были уже указаны в § 17-17. Средний электрод триода служит базой, а два крайних электрода — эмитером и коллектором.

Плоскостной триод может быть получен путем сплавления и диффузии

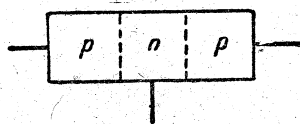


Рис. 17-67. Схема плоскостного триода. $p-n-p$.

примесей в пластину германия. На противоположные поверхности этой пластинки наносятся две капли расплавленного индия (рис. 17-68). Индий в германии является акцепторной примесью, поэтому каждая из капель, вплавляясь в германий, создает в нем область примесной дырочной проводимости; последняя образует с электронным германием пластины переход $p-n$. Таким образом, две застывшие капли индия представляют собой два электрода — эмитер и коллектор, а пластина германия, обладающего электронной проводимостью, служит базой.

В плоскостном триоде, так же как и в точечном часть дырок, введенных током эмиттера в базу, диффундируя, достигает коллектора, здесь их захватывает электрическое поле коллектора, и они увеличивают ток в цепи коллектора. Большое сопротивление перехода $p-n$ объясняется отсутствием в нем носителей заряда (см. § 17-17); дырки, инъецированные в этот переход со стороны эмиттера и являющиеся для базы неосновными носителями заряда, становясь носителями коллекторного тока, сильно уменьшают сопротивление перехода. Но дырки, пока они находятся в области базы, быстро рекомбинируют с электронами, основными носителями тока базы. Следовательно, чтобы большая часть дырок достигала области коллектора, необходимо, чтобы толщина пластины базы была мала, поэтому для триодов пластины германия берутся толщиной порядка 0,025—0,005 мм.

В случае триода $n-p-n$ механизм управления остается тем, что и вышерассмотренный для триода $p-n-p$,

только неосновными носителями заряда, инжектируемыми в базу эмиттером, вместо дырок будут электроны. Кроме того, характеристики триода $n-p-n$ будут несколько иными вследствие большей подвижности электронов.

17-20. Параметры полупроводникового триода

Одним из основных параметров полупроводникового триода является его коэффициент передачи тока

$$\alpha = \left(\frac{\partial i_k}{\partial i_3} \right)_{U_k = \text{const}},$$

называемый также коэффициентом усиления тока, хотя у многих триодов $\alpha < 1$. Ламповый триод является в основном усилителем напряжения, с коэффициентом усиления $\mu \gg 1$; в полупроводниковом триоде основной является функция управления током, а эффект усиления тока может отсутствовать: $\alpha < 1$. Важно достигаемое в этом триоде усиление мощности.

Для того чтобы пользоваться более конкретной терминологией, мы будем исходить в дальнейшем из условий более распространенного триода $p-n-p$.

Если бы весь ток эмитера создавался только движением дырок и если пренебречь рекомбинацией этих дырок в области базы, т. е. счесть, что все дырки достигают области коллектора, то в этом идеальном случае

$$\alpha = 1.$$

В реальных условиях α может быть выражено как произведение трех коэффициентов, природа которых довольно сложна и во многом еще не выяснена $\alpha = k_3 k_p m$.

Рассмотрим отдельно, какие процессы должны отображать эти коэффициенты:

$k_3 \lesssim 1$ — относительная часть I_3 , создаваемая движением в базу неосновных носителей тока — дырок; некоторая часть тока I_3 создается движением электронов из базы

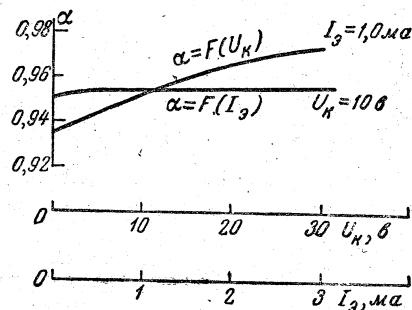


Рис. 17-69. Зависимость коэффициента управления током плоскостного триода от тока эмитера и от напряжения коллектора.

в эмитер и эта часть в процессе управления током I_k не участвует.

$k_p \lesssim 1$ — коэффициент рекомбинации, это относительная часть дырок, не рекомбинировавшая в базе и достигшая коллектора; дырки в области базы не создают пространственного заряда, так как их заряд полностью компенсируется электронами — основными носителями заряда базы, для увеличения k_p необходимо сближать коллектор и эмиттер.

$m \lesssim 1$ — коэффициент умножения, учитывающий возможность умножения носителей заряда в области коллектора при поступлении туда дырок, прошедших от эмитера через базу; в области коллектора эти дырки, являясь основными носителями заряда, резко уменьшают обратное сопротивление перехода $p-n$, а это вызывает изменение распределения напряжения в цепи коллектора и некоторое увеличение тока коллектора, в частности за счет движения электронов в направлении, обратном движению дырок. Эти явления резко выражены лишь у точечных триодов, где α бывает порядка 2,1—2,3, а у плоскостных триодов $\alpha = 0,9—0,99$. На рис. 17-69 дана характеристика $\alpha = F(I_3)$ при $U_k = \text{const}$ для плоскостного триода. Легко видеть, что в определенных пределах α мало изменяется.

На рис. 17-70 дана схема для снятия статических характеристик триода. Из них семейство коллекторных характеристик $I_k = F(U_k)$ при $I_3 = \text{const}$ (рис. 17-71) может быть сопоставлено с семейством анодных характери-

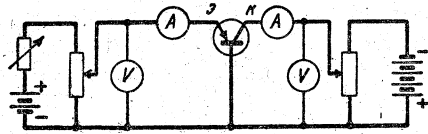


Рис. 17-70. Схема для снятия статистических характеристик полупроводникового триода.

стик электронной лампы-триода (рис. 17-13). У плоскостных триодов, как показывают эти характеристики, резко выражено явление насыщения. Коллекторный ток является обратным током перехода $p-n$. Подобно тому как в электронной лампе возрастание анодного тока при повышении анодного напряжения ограничено величиной термоэлектронной эмиссии катода, в полупроводниковом триоде возрастание коллекторного тока при повышении коллекторного напряжения ограничено количеством неосновных носителей заряда, инжектируемых током эмиттера в область перехода база — коллектор. С увеличением тока эмитера возрастает пропорционально коллекторный ток насыщения, подобно тому как в электронной лампе ток

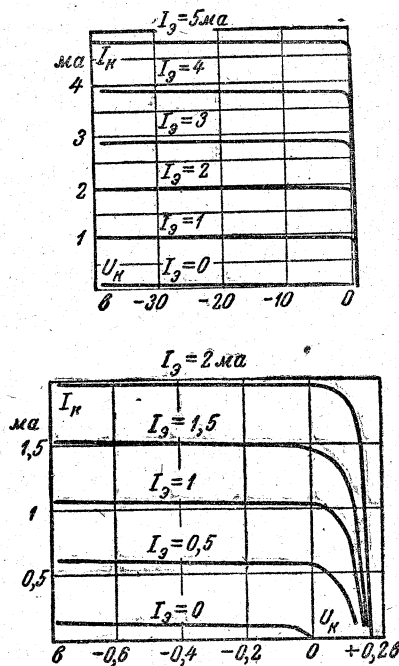


Рис. 17-71. Семейство коллекторных характеристик полупроводникового триода; внизу — начальная часть характеристик в увеличенном виде.

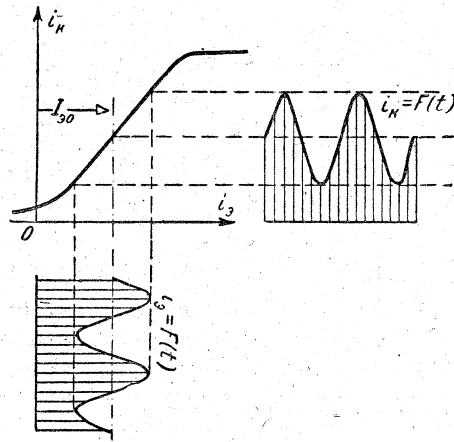


Рис. 17-72. Переходная характеристика полупроводникового триода.

насыщения растет с увеличением термоэлектронной эмиссии катода.

Коллекторный ток может быть выражен уравнением

$$I_k = I_{k0} + aI_e \approx aI_e;$$

здесь I_{k0} — коллекторный ток при токе эмиттера, равном нулю.

На основании семейства коллекторных характеристик, каждая из которых соответствует определенному постоянному значению тока эмиттера, строится переходная характеристика (рис. 17-72), графическое изображение зависимости $I_k = F(I_e)$ при $U_k = \text{const}$. Эта характеристика в рабочей части почти линейна, но при больших значениях тока эмиттера пропорциональность эта нарушается

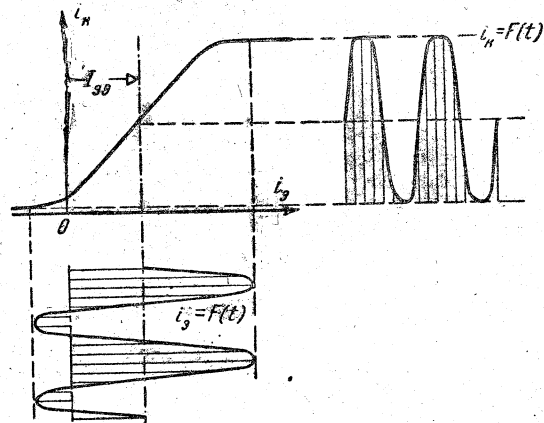


Рис. 17-73. Характеристика триода при больших сигналах.

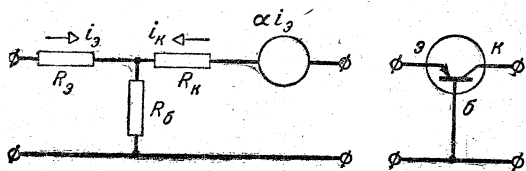


Рис. 17-74. Т-образная схема замещения полупроводникового триода при малых сигналах.

и создаются условия насыщения, когда увеличение тока эмитера почти не изменяет ток коллектора, при этом α резко падает (рис. 17-73); с другой стороны, если изменения сигнала столь велики, что потенциал эмитера по отношению к базе становится отрицательным, то сказываются вентиляционные свойства перехода эмиттер — база и имеет место отсечка соответствующей части периода сигнала. Таким образом, положительное смещение на эмиттере необходимо для того, чтобы предупредить явления отсечки. Насыщение и отсечка сказываются только на сигналах, амплитуда которых весьма значительна, поэтому такие сигналы принято называть большими и сигналами в отличие от малых сигналов, при которых нет ни насыщения, ни отсечки. Схема замещения триода для малых сигналов может быть дана Т-образной (рис. 17-74), состоящей из трех динамических активных сопротивлений — трех переходов триода и из генератора тока, т. е. идеализированного источника, дающего определенный ток αi_3 , независимо от сопротивления цепи. Для больших сигналов эквивалентная схема триода должна содержать вентили.

17-21. Фотоэлементы

Изобретение усилительной электронной лампы сделало возможным использование для практических целей ряда весьма тонких физических явлений, в частности явлений фотоэффекта. Сущность последних — преобразование в освещаемом полупроводнике или металле лучистой энергии фотонов (квантов световой энергии) в энергию носителей тока. Фотоэлемент — это прибор, в котором воздействие лучистой энергии оптического диапазона (область инфракрасных, ви-

димых и ультрафиолетовых лучей) вызывает временное изменение электрических свойств. В большинстве случаев в фотоэлементе свет управляет электронным потоком или электрическим током. Современная техника широко использует фотоэлементы для целей контроля и измерения в различных устройствах автоматизации. Фотоэлемент служит своеобразным электрическим «глазом», не знающим утомления и ошибок. В настоящее время практическое значение имеют три типа фотоэлементов:

1. *Фотоэлементы с внешним фотоэффектом*, в которых световой поток вынуждает электроны фотокатода покидать последний и выходить во внешнюю среду.

2. *Фотоэлементы с внутренним эффектом*, в которых воздействие светового потока на полупроводник увеличивает число носителей тока в последнем, следовательно, уменьшает электрическое сопротивление (фотосопротивления).

3. *Фотоэлементы с запирающим слоем*, в которых воздействие светового потока создает разность потенциалов на границах запирающего слоя (фотогальванический эффект).

Наибольшее распространение имеют фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Они подразделяются на вакуумные и газонаполненные; принцип действия их в основном один и тот же, но характеристики существенно различаются. Электроды этих фотоэлементов — анод и катод — заключены в стеклянный баллон, тщательно откачанный у вакуумных фотоэлементов или после откачки воздуха наполненный разреженным инертным газом (аргоном) при давлении порядка сотых долей миллиметра ртутного столба у газонаполненных фотоэлементов. Активным слоем фотокатода служат щелочноземельные металлы, так как лишь они дают достаточный фотоэффект. Этот активный слой (например, сурьмяноцезиевый) наносится на серебряную подложку, осажденную непосредственно на стекло баллона с внутренней стороны, или же для увеличения сопротивления изоляции на металлическую пластинку, помещенную в середине баллона. Если катод

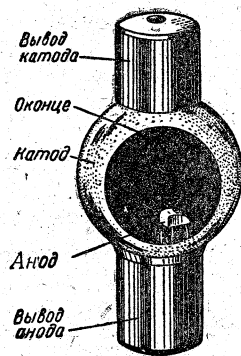


Рис. 17-75. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом.

нанесен непосредственно на стекло, то ostается достаточно прозрачное оконце (рис. 17-75) для того, чтобы световой поток достигал активной поверхности фотокатода.

Внешний фотоэффект используется в этом фотоэлементе следующим образом. Мы уже ознакомились при изучении термоэлектронной эмиссии (§ 17-3) с потенциальным барьером, возникающим на границе металла и вакуума в колбе, препятствующем выходу электронов из металла. Поглощая один фотон, электрон приобретает энергию, превышающую работу выхода щелочноземельного металла, и покидает последний. Процесс поглощения лучистой энергии протекает для каждой из пар фотона и электрона совершенно независимо; благодаря этому число фотоэлектронов, покидающих поверхностный слой освещенного металла, строго пропорционально числу падающих на него фотонов. Следовательно, фотоэлектронная эмиссия пропорциональна световому потоку, падающему на металл фотокатода (закон Столетова). Чтобы использовать эту эмиссию, необходимо создать в баллоне между анодом и фотокатодом электрическое поле, которое должно направить электроны к аноду. Таким образом, для получения фототока в цепях с фотоэлементами, основанными на внешнем фотоэффекте, необходимо напряжение, приложенное между анодом и катодом, — анодное напряжение (рис. 17-76).

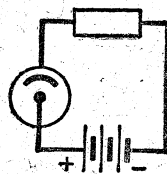


Рис. 17-76. Схема соединения фотоэлемента с анодной батареей.

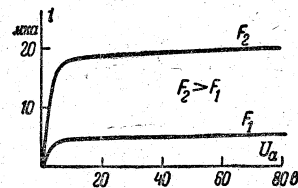


Рис. 17-77. Семейство вольт-амперных характеристик вакуумного фотоэлемента при различных значениях освещенности.

При постоянной освещенности фотокатода зависимость фототока от анодного напряжения — вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента сходна с подобными характеристиками диодов. Фототок растет с увеличением напряжения (рис. 17-77), пока не достигнет значения тока насыщения, когда все эмитируемые катодом электроны достигают анода. В этих условиях изменения напряжения мало влияют на фототок. Если фотоэлемент работает в режиме тока насыщения, то его фототок практически зависит лишь от освещенности фотокатода, — это существенное преимущество вакуумного фотоэлемента.

Световой характеристикой фотоэлемента называется зависимость фототока от светового потока, падающего на фотокатод, при постоянном напряжении. Согласно закону Столетова количество эмитируемых фотокатодом электронов прямо пропорционально падающему на него световому потоку, поэтому у вакуумного фотоэлемента названная характеристика линейна (рис. 17-78). Фактически эта линейность несколько нарушается при значительных фототоках

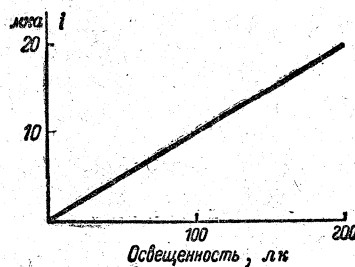


Рис. 17-78. Световая характеристика вакуумного фотоэлемента.

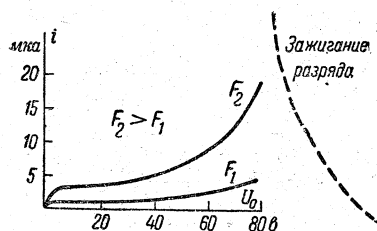


Рис. 17-79. Вольт-амперная характеристика газонаполненного фотоэлемента.

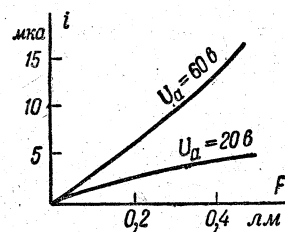


Рис. 17-80. Световая характеристика газонаполненного фотоэлемента.

возникновением пространственного заряда у катода и, в особенности, потерей чувствительности фотокатодом при продолжительном освещении («угнетаемостью» фотокатода).

Чувствительностью фотоэлемента именуется отношение его фототока (в микроамперах) к световому потоку (в люменах): $S_i = i_a : F$ — это статическая чувствительность, динамическая же чувствительность определяется как $S_i = \frac{di_a}{dF}$. Чувствительность вакуумного фотоэлемента — величина порядка от 20 до 80 мкА/лм . В ряде случаев желательна большая чувствительность. В газонаполненных фотоэлементах наличие молекул газа создает возможность использования ионизации для увеличения фототока. Благодаря этой ионизации между электродами фотоэлемента возникает поток положительных ионов в одном направлении и усиливается поток электронов в обратном направлении. Это — газовое усиление в фотоэлементе. Благодаря ему чувствительность газонаполненного фотоэлемента достигает 100—400 мкА/лм .

Наличие газа сильно изменяет характеристики фотоэлемента. Вольт-амперная характеристика газонаполненного фотоэлемента при малых анодных напряжениях, пока скорость электронов недостаточна для ионизации газа, совпадает с характеристикой аналогичного вакуумного фотоэлемента, но затем начинается ионизация и характеристика поднимается все круче (рис. 17-79), и при определенном напряжении зажигания (потенциале зажигания) в фотоэлементе возникает самостоятельный разряд (не зависящий от освещения фотокатода), большой ток которого быстро

разрушает активный слой фотокатода. Для того чтобы предупредить возникновение самостоятельного разряда, необходимо выбирать рабочее напряжение фотоэлемента значительно ниже напряжения зажигания, учитывая также, что напряжение зажигания понижается с увеличением освещенности.

Световая характеристика газонаполненного фотоэлемента отстает от прямой пропорциональности, несколько изгибаясь кверху (рис. 17-80). Вакуумный фотоэлемент практически безынерционен, а газонаполненный обладает заметной инерцией.

Так как фототоки вышеописанных фотоэлементов относительно весьма малы, то эти фотоэлементы всегда соединяются с усилительными электронными лампами. На рис. 17-81 приведена простейшая схема соединения фотоэлемента и электронной лампы для усиления фотосигнала. Ток в контуре, образуемом фотоэлементом, сопротивлением R_a и батареей U_c , зависит от освещения фотоэлемента. Пока фотоэлемент освещен, этот ток достаточен для того, чтобы создать отрицательный потенциал на сетке электронной лампы и запереть последнюю. Но если хотя бы на мгновение затемнить фотоэлемент, то он перестанет пропускать ток; отрицательный потен-

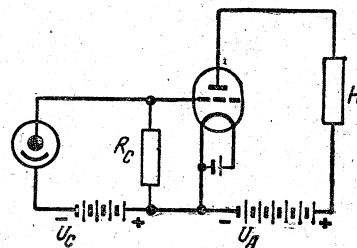


Рис. 17-81. Соединение фотоэлемента с усилительной электронной лампой.

циал сетки исчезнет, так как не будет падения напряжения в сопротивлении R_c ; электронная лампа отопрется, т. е. в ее анодной цепи возникнет ток, а этот ток вызовет срабатывание исполнительного механизма, питаемого анодным током, например включение звукового сигнала. В гл. 18 мы познакомимся подробнее с устройством соответствующих фотореле.

В случаях, когда нужна особо высокая чувствительность, применяются фотоэлектронные умножители, представляющие собой фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Внутри фотоэлемента путем многократного использования вторичной эмиссии усиливается поток электронов, освобождаемых фотокатодом под действием света, и направляется посредством воздействия электрического или магнитного поля последовательно на ряд вспомогательных электродов — эмиттеров. При этом электронный поток последовательно возрастает за счет вторичных электронов, испускаемых эмиттерами под действием электронного потока. Результирующий электронный поток, достигающий анода, во много раз превосходит поток электронной эмиссии фотокатода, благодаря чему чувствительность прибора достигает 1—10 а/лм при рабочем напряжении 1000 в. Выходные токи умножителя достигают 10—15 ма. Впервые умножитель с фокусировкой магнитным полем был построен в СССР Л. А. Кубецким в 1930 г.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом представляет собой сопротивления, материалом для которых служат полупроводники (закись меди, кристаллический селен, сернистый таллий, сернистый свинец и др.). Эти сопротивления включаются последовательно с источником электроэнергии. Световой поток, облучая полупроводник, вызывает значительное увеличение числа носителей тока (электронов или дырок), что равносильно сильному уменьшению сопротивления. Следовательно, под действием светового потока увеличивается ток в цепи фотоэлемента, а этот ток воздействует на исполнительный механизм непосредственно

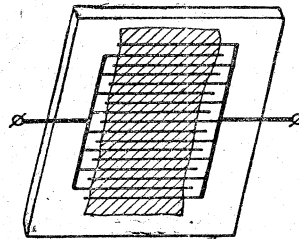


Рис. 17-82. Схема устройства селенового фотосопротивления.

или через ламповый усилитель. В качестве примера рассмотрим устройство селеновых фотосопротивлений. При изготовлении такого сопротивления в стеклянной пластинке протравливается система параллельных желобков (рис. 17-82), расстояние между которыми берется порядка 0,1 мм. Желобки заполняются хорошо проводящим материалом (графитом, золотом, платиной) и образуют две гребневидных электрода. Затем на пластинку испарением в вакууме наносится тонкий слой селена. Такое устройство обеспечивает большую светочувствительную поверхность селена и большое его сопротивление в неосвещенном состоянии (темновое сопротивление). Спектральная характеристика такого фотосопротивления имеет максимум в красной области спектра. Чувствительность селеновых фотосопротивлений относительно велика — порядка сотен микроампер на люмен вольт.

Существенными недостатками этого вида фотоэлементов являются их значительная инерционность и резко выраженная нелинейность световой характеристики. Их область применения — автоматические и телемеханические устройства, для которых инерционность и нелинейность характеристики мало существенны, а важна высокая общая чувствительность, в особенности в красной части спектра.

Фотоэлементы с запирающим слоем по устройству сходны с полупроводниковыми вентилями. Схема построения подобного фотоэлемента следующая (рис. 17-83): на опорный металлический электрод наносится слой полупроводника, а на последний в вакууме осаждается по-

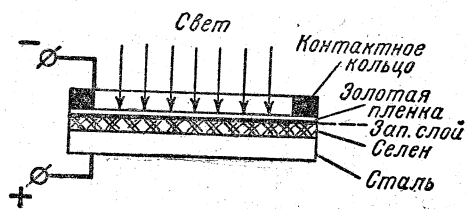


Рис. 17-83. Схема устройства селенового фотоэлемента с запирающим слоем.

лупрозрачная пленка золота. Между ней и полупроводником создается запирающий слой. Для соединения с внешней цепью на золотую пленку накладывается контактное металлическое кольцо. Наконец, пленка покрывается защитным слоем прозрачного лака.

В частном случае, у селенового фотоэлемента опорным электродом служит стальная пластина, на которую наносится слой селена.

Световой поток проходит через золотую пленку и поглощается в полупроводнике. Такое поглощение лучистой энергии вызывает увеличение концентрации носителей тока (электронов или дырок). Последние диффундируют в полупрозрачный электрод, тем самым заряжая полупроводник зарядом обратного знака, вследствие чего между полупроводником и покрывным золотым электродом создается разность потенциалов и возникает потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии. Количество диффундирующих в полупрозрачный электрод носителей тока пропорционально числу поглощенных фотонов; следовательно, указанная разность потенциалов пропорциональна световому потоку, падающему на фотоэлемент.

Чистый селен обладает электронной проводимостью, поэтому лучистая энергия освобождает в нем электроны. Последние, диффундируя в золотой электрод, заряжают его отрицательно, а селен положительно.

Процесс диффузии носителей тока

здесь тот же, что и при внешнем фотоэффекте.

При замыкании электродов фотоэлемента на внешнее сопротивление в цепи фотоэлемента возникает ток. Последний пропорционален освещенности, если сопротивление внешней цепи мало (желательный режим — короткое замыкание). Таким образом, фотоэлемент с запирающим слоем непосредственно преобразует световую энергию в электрическую. Это дает возможность использовать его без всяких вспомогательных источников тока для непосредственного питания ряда измерительных приборов: люксметров, фотометров, экспонетров и т. п. Чувствительность этих фотоэлементов относительно весьма высока и зависит от выбора полупроводника; у селеновых фотоэлементов она достигает 500 мка/лм ; у серногаллиевых 5000 мка/лм ; у германиевых 10 ма/лм . Однако у последних большая часть спектральной характеристики лежит в пределах инфракрасной части спектра, в то время как спектральная характеристика селенового фотоэлемента близка к спектральной характеристике человеческого глаза (§ 21-2).

Система электродов, разделенных тончайшим запирающим слоем, образует значительную емкость, вследствие чего эти фотоэлементы весьма инерционны. Использование их совместно с ламповыми усилителями затруднено из-за того, что фотоэлемент с запирающим слоем должен замыкаться на малое сопротивление, а нельзя включать такое сопротивление между катодом и сеткой электронной лампы.

Коэффициент полезного действия современных германиевых и кремниевых фотоэлементов с запирающим слоем настолько высок (пока до 11%), что вполне вероятно их использование в промышленных установках для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ АППАРАТУРА

18-1. Общие положения

В гл. 17 был изложен принцип действия и описано устройство важнейших электронных и ионных приборов. Практическое использование таких приборов в промышленной аппаратуре для управления производственными процессами и их автоматизации в большинстве случаев требуют соединения нескольких электронных приборов в относительно сложную схему и комбинирования их действия с неэлектронными приборами и аппаратами. Современная промышленная электроника охватывает очень широкую область и располагает аппаратурой, специализированной для самых различных производственных целей: электронными и ионными регуляторами и реле, ламповыми генераторами для обработки металлов, сушки дерева и т. п. токами высокой частоты, фотоэлектронными устройствами для контроля качества всех видов продукции, электронной аппаратурой для измерения самых различных физических величин и т. д. Но мы не можем рассматривать здесь подобную сложную промышленную аппаратуру, так же как мы не можем касаться здесь вопросов радиотехники и техники связи. Наша ограниченная задача заключается в первую очередь в ознакомлении с принципом действия так называемых основных узлов электронной аппаратуры.

В большинстве сложных электронных устройств можно выделить определенный комплекс приборов и аппаратов, выполняющих совместно какую-либо одну функцию: выпрямление переменного тока, усиление напряжения или мощности колебаний, генерирование колебаний определенного вида и частоты, стабилизацию напряжения и т. д. Это — так называемые узлы (блоки), из которых складывается сложное электронное устройство. В качестве характерного примера такого сложного устройства мы рассмотрим ниже электронный осциллограф, который, помимо элек-

тронно-лучевой трубки, содержит узел выпрямления, два узла усиления, узел генератора развертки и узел синхронизации; вторым примером послужит электронный потенциометр. В качестве важнейших узлов электронных схем мы рассмотрим усилители ламповые и полупроводниковые, а также ламповые генераторы. Кроме того, мы ознакомимся с некоторыми простейшими электронными реле.

18-2. Электронные усилители

Назначение усилителя заключается в увеличении напряжения или мощности слабого входного сигнала за счет мощности источника тока, питающего усилитель, до такой величины, которая достаточна для приведения в действие более или менее мощного исполнительного механизма. В усилителях электронные лампы служат для управления мощностью местного источника. Усилители классифицируются по четырем основным признакам: по схеме, по режиму работы, по применению и по диапазону частот.

Схемы усилителей различаются по числу каскадов усиления и по типу контуров связи между этими каскадами. В большом числе случаев усиления сигнала, даваемого одной лампой, недостаточно для приведения в действие исполнительного устройства; поэтому применяется несколько каскадов усиления. Переменная составляющая напряжения анодной цепи одной лампы (первый каскад) подается через контур связи на сетку второй лампы для дальнейшего усиления (второй каскад) и т. д. Таким путем составляется усилитель с несколькими каскадами усиления. Каждый каскад вносит неизбежно при этом некоторые искажения в усиливаемый сигнал, что ставит практический предел увеличению числа каскадов усилителя. Таким образом, схемы усилителей различаются по числу каскадов.

Далее схемы усилителей классифицируются по виду связи между ка-

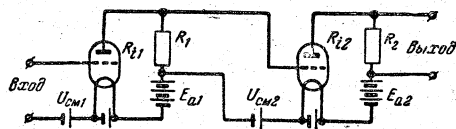


Рис. 18-1. Схема двухкаскадного усилителя с гальванической связью.

каскадами. Простейший вид связи — непосредственная связь или иначе гальваническая связь (рис. 18-1), при которой лампы каскадов электрически не разделены. При гальванической связи возможно усиление сколь угодно медленных изменений напряжения сигнала, поэтому такой усилитель называется также усилителем постоянного тока.

В схеме рис. 18-1 этот усилитель — двухкаскадный с двумя триодами прямого накала. Источниками его питания служат две анодные батареи E_{a1} и E_{a2} и две батареи накала; кроме того, в цепи сеток ламп включены две батареи U_{cm1} и U_{cm2} для создания отрицательного сеточного смещения. Падение напряжения на внешнем сопротивлении R_1 анодной цепи первого триода приложено между катодом и сеткой второго триода («подано на сетку»). Сопротивление R_2 представляет собой нагрузку второго триода, в которую мы включаем и исполнительный механизм.

Для этой относительно простой схемы легко определить зависимость напряжения на выходе усилителя u_2 от напряжения на входе u_{c1} , являющегося переменной составляющей сеточного напряжения первого триода. Переменная составляющая анодного напряжения первой лампы u_{a1} может быть выражена через ее сеточное напряжение u_{c1} и коэффициент усиления этой лампы μ_1 , т. е. $u_{a1} = -\mu_1 u_{c1}$. Это напряжение делится последовательно между соединенными последовательно сопротивлениями: внешним сопротивлением анодной цепи первого триода R_1 и его внутренним (динамическим) сопротивлением R_{i1} . Следовательно, напряжение на сопротивлении R_1 будет:

$$u_1 = u_{a1} \frac{R_1}{R_1 + R_{i1}}$$

или

$$u_1 = -\mu_1 u_{c1} \frac{1}{1 + \frac{R_{i1}}{R_1}}$$

Выходное напряжение первого триода u_1 является сеточным напряжением второго триода: $u_1 = u_{c2}$.

Выходное напряжение второй лампы u_2 выражается через ее сеточное напряжение так же, как у первой лампы:

$$\begin{aligned} u_2 &= -\mu_2 u_{c2} \frac{1}{1 + \frac{R_{i2}}{R_2}} = \\ &= -\mu_2 u_1 \frac{1}{1 + \frac{R_{i2}}{R_2}}; \end{aligned}$$

подставляя сюда выражение выходного напряжения первой лампы, получим:

$$u_2 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\left(1 + \frac{R_{i1}}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_{i2}}{R_2}\right)} u_{c1}.$$

Отношение напряжения на выходе усилителя к напряжению на входе именуется коэффициентом усиления на напряжении данного усилителя, следовательно, в рассматриваемом случае этот коэффициент равен

$$K_u = \frac{\mu_1 \mu_2}{\left(1 + \frac{R_{i1}}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_{i2}}{R_2}\right)} = k_1 k_2. \quad (18-1)$$

Здесь k_1 и k_2 — коэффициенты усиления двух каскадов усилителя, в данном случае равные рабочим коэффициентам усиления триодов (§ 17-7).

Таким образом, общий коэффициент усиления данного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов.

Что же касается определения самого коэффициента усиления каскада k , то в общем случае для этого удобно воспользоваться схемой замещения каскада. Она составляется как цепь переменного тока — только для переменных составляющих напряжений и токов цепей лампы. Схема замещения каскада усилителя с гальванической связью представляет собой простую последовательную цепь (рис. 18-2), в которой роль источника

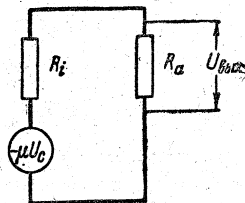


Рис. 18-2. Схема замещения каскада усилителя гальванической связью.

переменного тока играет переменная составляющая анодного напряжения лампы u_a . Последняя равна произведению сеточного напряжения лампы u_c на статический коэффициент усиления μ . Последовательно с этим источником напряжения включено внутреннее сопротивление лампы R_i . Напряжение $u_{\text{вых}}$ на зажимах R_a является выходным напряжением каскада.

Рассмотренная нами схема рис. 18-1 не содержит реактивных элементов, поэтому мы могли определять коэффициент усиления, исходя из отношения мгновенных значений напряжений, но в большинстве случаев схемы усилителей содержат реактивные элементы, поэтому эквивалентные схемы их каскадов рассчитываются как цепи переменного тока символическим методом, а коэффициент усиления k определяется как отношение амплитуд выходного и входного напряжений каскада, причем этот коэффициент является комплексной величиной.

Недостатком рассмотренной нами гальванической связи в усилителях является прежде всего требование отдельных источников постоянного тока для анодных цепей. От этого недостатка свободны другие виды контурной связи в усилителях, при которых цепи постоянного тока ламп каскада разделены электрически конденсаторами или трансформаторами, благодаря чему является возможность дать общие источники постоянного тока для всех ламп усилителя.

Широко применяется реостатно-емкостная связь каскадов в усилителях, при которой выходное напряжение каскада, как и при гальванической связи, создается падением напряжения в активном сопротивлении — реостате, но анодная цепь лам-

пы отделена емкостью от сетки лампы следующего каскада. Эта емкость пропускает лишь переменную составляющую анодного напряжения.

На рис. 18-3 дана основная схема двухкаскадного усилителя с подогревными лампами. Входное напряжение подается здесь на сетку лампы первого каскада через конденсатор C_1 , емкостное сопротивление которого $\left(\frac{1}{\omega C_1}\right)$

при частоте сигнала должно быть достаточно мало для того, чтобы практически все напряжения сигнала (переменная составляющая) воздействовало на сетку. Падение напряжения в анодной цепи первой лампы на сопротивлении R_1 через малое емкостное сопротивление конденсатора C воздействует на сетку лампы второго каскада, являясь входным напряжением этой лампы. На выходе усилителя конденсатор C_2 пропускает только переменную составляющую напряжения анодной цепи второй лампы. Обе лампы работают с автоматическим отрицательным смещением, создаваемым падением напряжения в сопротивлении $R_{\text{см}}$, от постоянной составляющей анодного тока. Емкость $C_{\text{см}}$ устраняет падение напряжения от переменной составляющей анодного тока, так как ее малое сопротивление этой переменной составляющей как бы замыкает для последней накоротко сопротивление $R_{\text{см}}$. Сопротивления R_{c1} и R_{c2} нужны для подачи на сетки отрицательных смещений. Триоды имеют общий источник анодного напряжения U_a (обычно это напряжение дает ламповый выпрямитель через фильтры). Источником тока для накала катодов служит трансформатор накала.

Эквивалентная схема каскада уси-

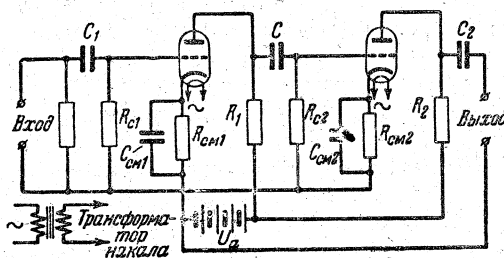


Рис. 18-3. Схема двухкаскадного усилителя с реостатно-емкостной связью.

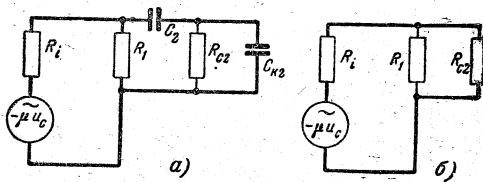


Рис. 18-4. Схема замещения каскада усилителя с реостатно-емкостной связью при средних частотах.

лителю с реостатно-емкостной связью дана на рис. 18-4,а. Здесь μU_c — входное напряжение каскада; R_i — внутреннее сопротивление лампы; R_1 — нагрузочное сопротивление в анодной цепи (рис. 18-3); C_2 — разделительная емкость между данным каскадом и следующим; $R_{с2}$ — сопротивление между сеткой и катодом следующего каскада (входное сопротивление второго каскада) и $C_{к2}$ — внутренняя емкость лампы второго каскада между сеткой и катодом. При средних частотах емкостное сопротивление разделительного конденсатора C_2 настолько мало, а сопротивление емкости $C_{к2}$ настолько велико, что ими обоими можно пренебречь и тем самым свести эквивалентную схему каскада к вышерассмотренной схеме рис. 18-2 (с тем только отличием, что нагрузочным сопротивлением здесь является разветвление R_1 и $R_{с2}$; (рис. 18-4,б). Коэффициент усиления на средних частотах является основной расчетной величиной усилителей с реостатно-емкостной связью. Он именуется номинальным коэффициентом усиления.

Расчет этого коэффициента для усилителя облегчается тем, что при средних частотах можно считать, что каждый из каскадов работает независимо и его коэффициент усиления можно подсчитывать отдельно, а результирующий коэффициент усиления усилителя определять как произведение коэффициентов усиления отдельных каскадов [см. (18-1)].

В усилителе с трансформаторной связью изменения анодного тока одной лампы через трансформатор воздействуют на потенциал сетки лампы следующего кас-

када. На рис. 18-5 дана простая схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью. В схеме две подогревные лампы имеют общий источник анодного напряжения U_a . Обе они работают при автоматическом отрицательном сеточном смещении, создаваемом падением напряжения от постоянной составляющей анодного тока в сопротивлении $R_{см}$. Благодаря наличию повышающего трансформатора коэффициент усиления напряжения в каждом каскаде усилителя может быть больше статического коэффициента усиления μ соответствующей лампы.

В первом приближении можно определить коэффициент усиления такого каскада, считая трансформатор идеальным. У идеального трансформатора равны нулю все потери и ток холостого хода. При этом условии переменная составляющая анодного тока равна нулю, а следовательно, отсутствует и потеря напряжения в лампе, благодаря чему напряжение (амплитуда или действующее значение) на входных зажимах трансформатора будет $\dot{U}_{вх} = \mu \dot{U}_c$, а выходное напряжение трансформатора, поданное на сетку лампы следующего каскада, будет:

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{вх}^* \frac{\omega_2}{\omega_1} = \mu \dot{U}_c \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

и, следовательно, коэффициент усиления каскада

$$k_{и} = \mu \frac{\omega_2}{\omega_1} = \mu k_{21}. \quad (18-2)$$

Коэффициент трансформации k_{21} современных междуламповых трансформаторов имеет величину от 1 до 3. Увеличение усиления за счет увеличения k_{21} нецелесообразно из-за чрезмерного возрастания вредной емкости между обмотками.

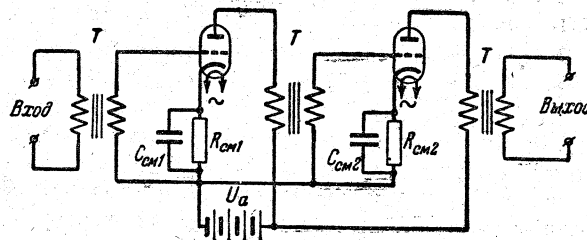


Рис. 18-5. Схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью.

Трансформаторы снабжаются ферромагнитным сердечником для частот примерно до 20 кГц; для более высоких частот применяются воздушные трансформаторы.

Область применения усилителей с трансформаторной связью (например, в качестве усилителей мощности) ограничена, так как в большинстве случаев целесообразнее применение усилителей с реостатно-емкостной связью, имеющих меньшие размеры и стоящих дешевле.

Рабочий режим усилителя определяется величиной постоянного отрицательного сеточного смещения. Если, например, это смещение примерно равно напряжению запирания лампы, то усилитель передает только положительную полуволну гармонического сигнала (рис. 18-6, класс В). По режиму работы в зависимости от части периода, в течение которой проходит анодный ток, усилители делятся на классы А, АВ, В, С. Рис. 18-6 достаточно поясняет принцип деления. При усилении по классу А сеточное смещение относительно мало, анодный ток поддерживается в течение всего периода сигнала и весь сигнал передается усилителем, а при работе по классу С сеточное смещение значительно превышает напряжение запирания лампы, поэтому при отсутствии сигнала анодный ток равен нулю, а появляется этот ток только в течение части положительной волны сигнала, т. е. на время меньшее, чем полпериода, вследствие чего передается только часть одного полупериода сигнала.

Но, с другой стороны, размеры усилителя зависят от его к. п. д., т. е. от отношения его выходной мощности переменного тока к мощности, затрачиваемой источниками постоянного тока, питающими усилитель. Чем меньше постоянная составляющая анодного тока, тем выше к. п. д.

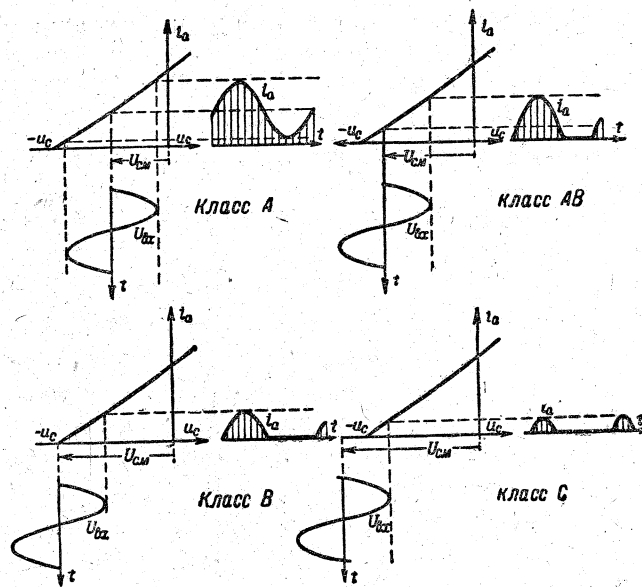


Рис. 18-6. Рабочий режим усилителей различных классов.

усилителя; поэтому к. п. д. усилителя по классу А не выше 25%, а по классу С может достигать 80%. Усилители напряжения в большинстве случаев работают по классу А, но для усилителей мощности применяются и другие классы.

Отрицательная обратная связь (см. § 15-20) в электронных усилителях широко применяется для повышения стабильности коэффициента усиления, уменьшения искажений сигнала, создаваемых нелинейными элементами усилителя. С этой целью, например, через делитель напряжения часть выходного напряжения подается обратно на вход усилителя.

В зависимости от усиливаемой величины усилители делятся на усилители напряжения и усилители мощности. Выше мы рассматривали вопросы, связанные преимущественно с усилением напряжения. Обратим внимание на то, что в усилителе напряжения всегда $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$; что же касается выходной мощности, то в большинстве случаев она больше входной, но вообще может быть и меньше ее. Для пояснения отметим, что повысительный трансформатор в каскаде усиливает напряжение, но его выходная мощность меньше вход-

ной. В большом числе случаев конечная задача усилительного устройства в целом заключается в приведении в действие некоторого исполнительного механизма, для чего нужна более или менее значительная мощность. По этой причине роль усилителя напряжения в большом числе случаев состоит в повышении переменного напряжения сигнала до величины, достаточной для эффективного воздействия на сетку мощной лампы усилителя мощности. Схема каскада усилителя мощности может быть такой же, как рассмотренные выше схемы каскадов усилителей напряжения, но условия работы усилителя мощности существенно отличны.

Как мы видели выше, коэффициент усиления напряжения тем больше, чем больше сопротивление нагрузки, и увеличение этого сопротивления ограничивается лишь условиями характеристики лампы. Иные положения имеют место при усилении мощности. Если схема замещения каскада усилителя мощности может быть сведена к простой последовательной цепи (рис. 18-2), то максимум выходной мощности $P_{\text{вых}}$ в зависимости от значения сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ определяется из условия

$$\frac{dP_{\text{вых}}}{dR_{\text{н}}} = 0,$$

а так как

$$P_{\text{вых}} = i_a^2 R_{\text{н}} = (\mu_c)^2 \frac{R_{\text{н}}}{(R_i + R_{\text{н}})^2},$$

то, следовательно,

$$(\mu_c)^2 \frac{(R_i + R_{\text{н}})^2 - R_{\text{н}}(2R_i + 2R_{\text{н}})}{(R_i + R_{\text{н}})^4} = 0.$$

Так как $\mu_c \neq 0$, а $R_i + R_{\text{н}} \neq \infty$, то, следовательно, $(R_i + R_{\text{н}})^2 - 2R_i R_{\text{н}} - 2R_{\text{н}}^2 = 0$, на основании чего условие максимума отдаваемой мощности будет:

$$R_i = R_{\text{н}}, \quad (18-3)$$

т. е. сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению лампы.

В большом числе случаев сопротивление нагрузки относительно мало

(например, сопротивление обмоток исполнительного электромагнитного механизма), а следовательно, должно быть мало и внутреннее сопротивление лампы усилителя мощности. Но коэффициент усиления лампы пропорционален ее внутреннему сопротивлению. По этой причине лампы усилителя мощности, рассчитанные на значительный анодный ток, имеют относительно малое μ , вследствие чего для получения от них достаточной выходной мощности необходимо подавать на их сетку относительно высокое напряжение. Таким образом, в распространенных схемах усиления сначала осуществляется усиление напряжения в одном или нескольких каскадах, а в выходном каскаде — усиление мощности.

Как уже ясно из изложенного, усилительные лампы тоже подразделяются на лампы для усиления напряжения и лампы для усиления мощности; первые имеют большой коэффициент усиления, большое внутреннее сопротивление и малый анодный ток; лампы усиления мощности имеют сравнительно малый коэффициент усиления μ и малое внутреннее сопротивление, но они рассчитаны на относительно большие анодные токи и напряжения.

18-3. Ламповые генераторы

Применение машинных генераторов для получения переменных токов высокой частоты представляло бы большие трудности и было бы технически нецелесообразно. Но эта задача решается относительно просто посредством ламповых генераторов, являющихся, по существу, преобразователями энергии постоянного тока питающих их источников в энергию переменного тока.

Первый в мире мощный ламповый генератор с водяным охлаждением анода был построен советским ученым М. А. Бонч-Бруевичем в 1919 г. Ламповые генераторы были созданы для радиопередающих устройств. Однако в настоящее время они широко используются для самых различных промышленных целей. Советскому Союзу принадлежит приоритет в применении токов высокой частоты,

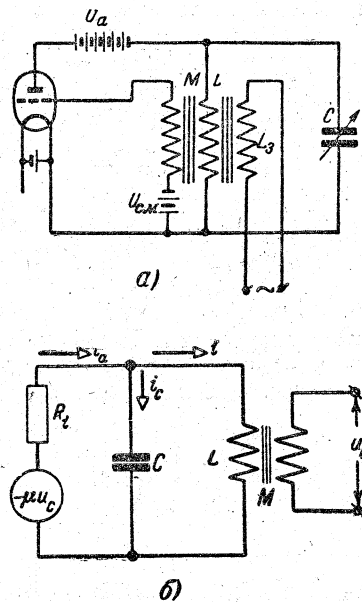


Рис. 18-7.

а — схема лампового генератора с трансформаторной обратной связью; б — схема замещения генератора.

получаемых от ламповых генераторов, для поверхностной закалки (работы 1935 г. В. П. Вологодина и Б. Н. Романова). Электрическое поле высокой частоты используется и для обработки диэлектриков (например, для сушки древесины).

Мы рассмотрим принцип действия генератора с обратной связью.

Генератор с обратной связью (рис. 18-7,а) принадлежит к числу генераторов с колебательным контуром (генераторов L, C), т. е. в основном состоит из колебательного контура и электронной лампы (простейшая схема). При посредстве последней энергия источника постоянно тока покрывает потери в колебательном контуре и колебания в нем поддерживаются незатухающими. Обратной связью в данном случае называется воздействие выходной величины — колебаний тока в контуре $L-C$ на потенциал сетки, что, в свою очередь, вызывает изменения анодного тока и таким путем воздействует на колебательный контур, усиливая в нем колебания. Обратная связь может быть трансформаторной (рис. 18-7), емкостной или индуктивной.

Рабочий процесс генератора с трансформаторной обратной связью можно приближенно описать следующим образом: конденсатор C , заряжаемый анодной батареей U_a через лампу, разряжается на индуктивный контур L ; этот разряд колебательный (§ 12-8). Катушка L колебательного контура индуктивно связана с обмоткой, замкнутой на сетку и катод лампы, а также с обмоткой L_3 — выходной обмоткой лампового генератора. Изменения тока i в катушке L вызывают изменения напряжения на сетке, так как $u_C = \pm M \frac{di}{dt}$

здесь M — взаимная индуктивность катушки L и обмотки в цепи сетки. Колебания напряжения u_C , в свою очередь, вызывают колебания анодного тока той же частоты, следствием чего является усиление колебаний в контуре $L-C$, и т. д. Это самовозбуждение лампового генератора продолжается, пока не установится равновесие между энергией, поступающей в контур, и потерями (включая отдачу энергии во внешнюю цепь через выходную обмотку).

Для генераторов с обратной связью может быть составлена схема замещения (рис. 18-7,б), подобная тем, какие составлялись для каскадов усилителей. Роль источника тока в схеме играет переменная составляющая анодного напряжения лампы, равная произведению переменной составляющей сеточного напряжения на статический коэффициент усиления лампы. В свою очередь, переменная составляющая сеточного напряжения индуктируется током колебательного контура: $u_C = \pm M \frac{di}{dt}$. Знак (+) или (—) зависит от выбора концов обмотки. Таким образом, источник переменного тока в схеме замещения дает напряжение $\pm \mu M \frac{di}{dt}$. Этот источник тока через внутреннее сопротивление лампы R_i замкнут на колебательный контур.

Составим дифференциальное уравнение схемы замещения генератора, характерное для всех подобных устройств. Согласно первому закону Кирхгофа анодный ток $i_a = i + i_C$ или

$$i = i_a - i_C. \quad (18-4)$$

На основании второго закона Кирхгофа составим уравнения напряжения для двух контуров схемы замещения:

$$\pm \mu M \frac{di}{dt} = i_a R_i + iR + L \frac{di}{dt} \quad (18-5)$$

и

$$\frac{1}{C} \int i_C dt = iR + L \frac{di}{dt}, \quad (18-6)$$

где R — активное сопротивление обмотки L . На основании уравнений (18-5) и (18-6) определяем токи i_a и i_C через ток i и параметры схемы:

$$i_a = -\frac{R}{R_i} i - \frac{L}{R_i} \frac{di}{dt} \pm \mu M \frac{di}{dt};$$

$$i_C = RC \frac{di}{dt} + LC \frac{d^2i}{dt^2}$$

и, подставив эти значения в (18-4), получаем дифференциальное уравнение второй степени:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R_i RC + L \mp \mu M}{LCR_i} \frac{di}{dt} + \frac{R_i + R}{LCR_i} i = 0.$$

Структура этого уравнения тождественна структуре дифференциального уравнения простого колебательного контура (§ 11-8), и решение такого уравнения достаточно подробно рассмотрено в гл. 11. В общей форме подобные уравнения принято записывать в следующем виде:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\beta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0;$$

здесь ω_0 представляет собой угловую частоту незатухающих колебаний в системе, а коэффициент при первой производной 2β определяет характер процесса. В простом колебательном контуре $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, $2\beta = \frac{R}{L}$; в более сложных случаях эти коэффициенты могут иметь самые различные значения. Но всегда процесс имеет колебательный характер, если $\omega_0 > \beta$; если $\beta > 0$, то процесс затухает. При $\beta = 0$ процесс становится незатухающим. Применяя эти положения к рассматриваемой нами схеме замещения лампового генератора, мы видим, что условие возникновения незатухающих колебаний в генераторе с обратной связью будет:

$$\frac{R_i RC + L \mp \mu M}{LCR_i} = 0,$$

а так как

$$LCR_i \neq \infty,$$

то, следовательно,

$$R_i RC + L \mp \mu M = 0$$

или

$$\mu M = R_i RC + L; \quad (18-7)$$

решение, соответствующее $-M \frac{di}{dt}$, отпадает, так как $R_i RC + L > 0$.

Взаимная индуктивность $M < L + R_i RC$, поэтому наличие усиления $\mu > 1$ является необходимым условием генерирования незатухающих колебаний.

Собственная частота этих колебаний

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_i + R}{LCR_i}},$$

т. е. в отличие от простого колебательного контура она зависит не только от индуктивности и емкости, но также и от активных сопротивлений цепи.

Фактически ламповый генератор является системой нелинейной и первоначально колебания в нем нарастают, т. е.

$$R_i RC + L - \mu M < 0,$$

но затем увеличение тока вызывает увеличение R_i и в цепи устанавливаются незатухающие колебания, удовлетворяющие условию (18-7).

18-4. Усилители на полупроводниковых триодах¹

Большие преимущества германиевых триодов перед электронными лампами заставили осваивать их применение в исключительно быстрых темпах. Несмотря на то, что триоды изобретены только в 1948 г., в настоящее время трудно даже просто перечислить области их применения, причем они используются в таких устройствах, в которых применение электронных ламп было невозможно. Мы здесь, конечно, можем изложить лишь некоторые основные принципы построения и применения усилителей на полупроводниковых триодах.

Знакомясь с усилителями на электронных лампах, мы могли ограничиться схемами, в которых входными электродами триода являются сетка и катод. Это наиболее распространенный, но отнюдь не единственный путь использования усилительного действия электронной лампы. Рассматривая усилители на полупроводниковых триодах, необходимо ознакомиться с тремя основными схемами использования усилительного действия триода. Эти схемы классифицируются по признаку общего электрода, т. е. электрода, являющегося одновременно входным и выходным. В соответствии с условиями установок высокой

¹ См. Р. Ши, Полупроводниковые триоды и их применение; перевод с английского, Госэнергоиздат, Москва, 1957; К. Э. Эрглис и И. П. Степаненко, Электронные усилители, Физматгиз, Москва, 1961.

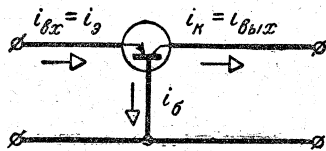


Рис. 18-8. Схема включения полупроводникового триода с общей базой.

частоты в радиотехнике этот электрод именуется «заземленным». Выше уже была приведена первая из трех схем (рис. 18-8) — схема с общей базой (она же схема с заземленной базой). Будем считать в этой и прочих схемах триода положительными направлениями токов рис. 18-8, установленные при объяснении принципа действия триода. В схеме с общей базой входным током $i_{вх}$ является ток эмиттера $i_{э}$, а выходным $i_{вых}$ ток коллектора $i_{к}$, а так как мы рассматриваем в усилителе только переменные составляющие токов триода, то коэффициент усиления тока равен

$$k_i = \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = \frac{i_{к}}{i_{э}} = \alpha. \quad (18-8)$$

Но у полупроводниковых плоскостных триодов $\alpha < 1$, поэтому в схеме с общей базой, по существу, нет усиления тока (есть усиление мощности). Практически в этой схеме $i_{к} \approx i_{э}$.

В схеме с общим эмиттером (рис. 18-9) входным током служит ток базы, а выходным — ток коллектора. Ток эмиттера, управляющий переходом коллектора, здесь больше тока сигнала, благодаря чему $k_i > \alpha$. Пренебрегая током $I_{к0}$ (током холостого хода), можем считать:

$$i_{к} = \alpha i_{э},$$

а на основании первого закона Кирхгофа

$$i_{к} = i_{э} - i_{б},$$

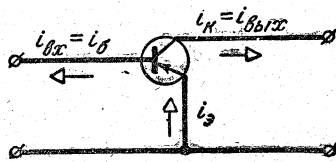


Рис. 18-9. Схема с общим эмиттером.

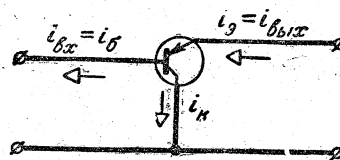


Рис. 18-10. Схема с общим коллектором.

следовательно (для переменных составляющих токов),

$$k_i = \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = \frac{i_{к}}{i_{б}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} - 1}, \quad (18-9)$$

т. е. при $\alpha < 1$, здесь $k_i > 1$. При этом положительное направление входного тока — тока базы — противоположно положительному направлению выходного тока — тока коллектора, следовательно, в схеме с общим эмиттером выходной ток противоположен по фазе входному, иными словами, при усилении фаза тока меняется на 180° .

В схеме с общим коллектором (рис. 18-10) $i_{вх} = i_{б}$, $i_{вых} = i_{э}$. На основании первого закона Кирхгофа

$$i_{э} = i_{к} + i_{б}$$

и далее

$$i_{к} = \alpha i_{э},$$

следовательно,

$$k_i = \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = \frac{i_{э}}{i_{б}} = \frac{1}{1-\alpha}, \quad (18-10)$$

причем фаза тока при усилении не меняется.

Здесь также $k_i > 1$.

Соотношения (18-8), (18-9) и (18-10) являются приближенными, так как при составлении их не учтено влияние выходной цепи нагрузки.

Для сопоставления трех схем, не вдаваясь в подробности, заметим, что при $\alpha = 0,96 = k_i$ для схемы с общей базой; для схемы с общим эмиттером $k_i = 24$, а для схемы с общим коллектором $k_i = 25$. Входные сопротивления триода, выходные зажимы которого замкнуты во всех случаях на одну и ту же нагрузку, будут наименьшим в схеме с общей базой, больше в схеме с общим эмиттером и максималь-

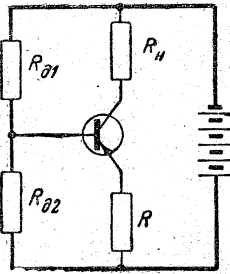


Рис. 18-11. Схема питания триода от одного источника.

ным для схемы с общим коллектором¹. Усиление по напряжению у схем с общей базой и общим эмиттером одинаково, а у схемы с общим коллектором оно меньше единицы. Усиление по мощности k_p наибольшее дает схема с общим коллектором. Оно может быть рассчитано по приближенной формуле

$$k_p = \frac{1}{1-\alpha} = k_i,$$

что естественно, так как усиление по напряжению для этой схемы близко к единице. Для других схем усиление по мощности зависит от сопротивления нагрузки.

Необязательно иметь два источника энергии для триода. Необходимое постоянное положительное смещение на эмиттере может быть создано путем деления напряжения батареи коллектора (рис. 18-11) посредством сопротивлений ($R_{д1}$ и $R_{д2}$).

Важной задачей при расчете полупроводниковых усилителей является также стабилизация условий питания и свойств триода. Как мы уже отмечали выше, германиевый триод весьма чувствителен к изменениям температуры, параметры его сильно зависят от режима, в частности, от напряжения коллектора и имеют значительный разброс от образца к образцу. В частности, для стабилизации используется отрицательная обратная связь — воздействие выходной величины на входную, противодействующее изменениям последней. В схеме рис. 18-11 стабильность режима питания триода тем выше, чем боль-

¹ Например, для одного из типов при нагрузке 10 ком эти три сопротивления будут 70, 850 и 200 000 ом.

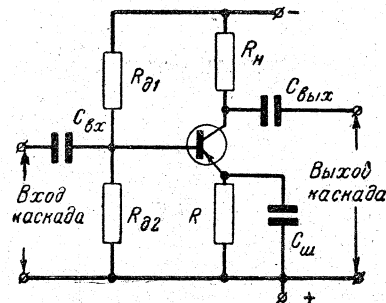


Рис. 18-12. Каскад усилителя с реостатно-емкостной связью.

ше сопротивление R в цепи эмиттера и меньше сопротивления $R_{д1}$ и $R_{д2}$, так как при этом уменьшается влияние изменения сопротивлений переходов триода на ток эмиттера и на напряжение положительного смещения. С другой стороны, с увеличением стабилизирующего действия сопротивлений R , $R_{д1}$ и $R_{д2}$ возрастают потери в них энергии.

В многокаскадных усилителях на полупроводниковых триодах, так же как и в ламповых, применяется между каскадами связь гальваническая, реостатно-емкостная и трансформаторная. На рис. 18-12 дана схема одного каскада усилителя с реостатно-емкостной связью при общем эмиттере. Здесь $C_{вх}$ соединяет каскад со входом или с предыдущим каскадом, а $C_{вых}$ — со входом следующего каскада или с выходом усилителя. Емкость $C_{ш}$ шунтирует активное сопротивление R и служит путем для переменной составляющей сигнала, для того чтобы мощность сигнала не рассеивалась бесполезно в стабилизирующем сопротивлении R .

На рис. 18-13 дана схема одного каскада усилителя с трансформаторной связью со входным трансформатором $T_{вх}$ и выходным $T_{вых}$. Конденсаторы $C_{ш1}$ и $C_{ш2}$ служат для передачи сигнала помимо сопротивлений $R_{д1}$ и R . Зажимы (+) и (-) соединяют каскад с общим для всего усилителя источником постоянного напряжения.

В отличие от многокаскадных ламповых усилителей, где обычно лишь выходной каскад рассчитывается на передачу значительной мощности исполнительному устройству на выходе, а все остальные каскады служат лишь

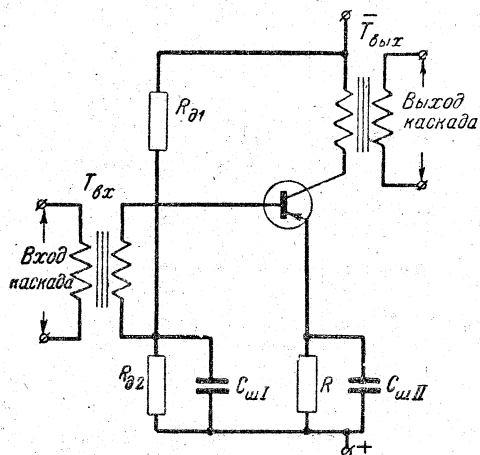


Рис. 18-13. Каскад усилителя с трансформаторной связью.

усилителями напряжения, в полупроводниковом устройстве каждый из каскадов служит ступенью в усилении мощности, а следовательно, должен быть рассчитан на передачу некоторой мощности.

18-5. Фотореле

По ходу изложения мы неоднократно отмечали возможности использования электронных и ионных приборов для управления более или менее значительными мощностями посредством малой мощности, в чем собственно и заключаются функции реле. Из числа многочисленных реле с электронными и ионными приборами в промышленной практике особое распространение имеют фотореле, так как являющийся их чувствительной частью фотоэлемент служит преобразователем самых различных неэлектрических величин в электрические.

По схеме действия фотореле подразделяются на фотореле прямого действия, у которых срабатывание устройства происходит при воздействии лучистой энергии на фотоэлемент (схемы включения «на свет»), и схемы обратного действия, срабатывающие при затемнении фотоэлемента (схемы включения «на темноту»).

На рис. 18-14 приведена простая схема фотореле прямого действия. Пока фотоэлемент затемнен, он практически не проводит тока и потенциал

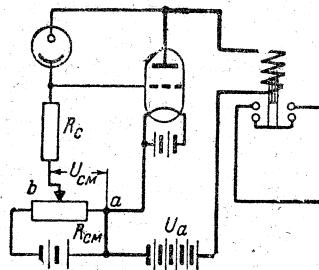


Рис. 18-14. Схема фотореле прямого действия.

сетки лампы по отношению к катоду ее отрицателен, так как на сетку подано отрицательное смещение, создаваемое на части $a-b$ сопротивления $R_{см}$ током вспомогательного источника. Отрицательный потенциал сетки запирает лампу и ток в ее анодной цепи равен нулю или недостаточен для срабатывания исполнительного механизма. Лучистая энергия, направленная на фотоэлемент, вызывает возникновение фототока, вследствие чего потенциал сетки повышается, так как через фотоэлемент она соединяется с положительным полюсом анодной батареи U_a . Лампа отпирается, и ее анодный ток вызывает срабатывание исполнительного механизма, например электромагнит втягивает сердечник и таким путем замыкает контакты в цепи более значительного тока, таким образом пускается в ход двигатель или включается световой сигнал и т. д.

Схема обратного действия может быть получена из схемы рис. 18-14 переменной мест фотоэлемента и R_c . Здесь сетка имеет отрицательный потенциал, пока фотоэлемент освещен, так как через фотоэлемент на сетку подается отрицательное смещение. Когда же фотоэлемент затемняется, тогда отрицательное смещение с сетки снимается, и она получает положительный потенциал, так как через большое сопротивление R_c она соединяется с плюсом анодной батареи U_a : лампа отпирается, и ее анодный ток вызывает срабатывание исполнительного механизма.

Благодаря тому, что фотоэлемент с внешним эффектом и усилительная лампа являются вентильными приборами, фотореле могут питаться непосредственно переменным током через

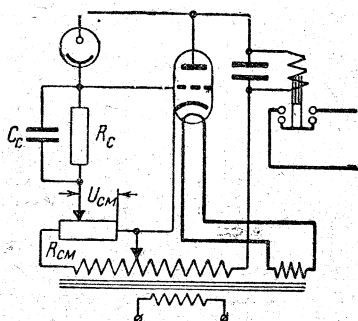


Рис. 18-15. Схема фотореле прямого действия на переменном токе.

соответствующий трансформатор. В этом случае фототок будет проходить через освещенный фотоэлемент только в течение полупериода, когда напряжение на фотоэлементе соответствует его проводящему направлению. Схемы фотореле должны быть дополнены конденсаторами, задача которых заключается в шунтировании сопротивления в цепи сетки и исполнительного механизма для переменных составляющих выпрямленных токов. На рис. 18-15 показана схема прямого действия на переменном токе, по существу тождественная схеме рис. 18-14. Поменяв местами фотоэлемент и R_c вместе с C , получаем схему обратного действия. Переход на переменный ток снижает чувствительность фотореле более чем в 2 раза.

18-6. Электронный осциллограф

Помимо электронно-лучевой трубки, электронный осциллограф содержит ряд электронных вспомогательных устройств, образующих отдельные узлы (блоки) с определенным целевым назначением каждого из них. Для подобных устройств часто дают так называемые скелетные схемы (блок-схемы), на которых указывается только место соответствующего узла в общей схеме (рис. 18-16). Детальные схемы узлов рассматриваются отдельно, если эти узлы имеют какие-либо специфические особенности. Мы не будем рассматривать вспомогательные узлы осциллографа, а ограничимся описанием его работы в целом.

Измерительным элементом в осциллографе является электронно-лу-

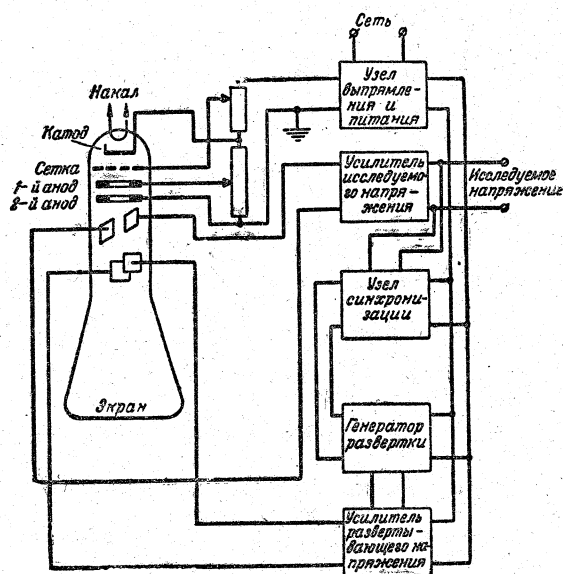


Рис. 18-16. Скелетная схема электронного осциллографа.

чевая трубка (§ 17-9). Исследуемое напряжение u_x подается на отклоняющие пластины трубки. Отклонение светового пятна на экране, создаваемое полем этих пластин, пропорционально мгновенным значениям u_x . Переменное u_x создает колебания пятна на экране в одной плоскости. Для глаза наблюдателя эти колебания будут иметь вид светлой полосы. Чтобы наблюдать их в виде кривой зависимости u_x от времени, необходима развертка их по времени, имеющая такое же значение, как развертка при помощи зеркального многогранника в магнитоэлектрическом осциллографе. В электронном осциллографе эта развертка осуществляется воздействием на электронный луч второго электрического поля, перпендикулярного к отклоняющему полю.

Развертывающее поле должно периодически изменяться во времени, причем закон этого изменения должен быть известен, а частота равна или кратна частоте u_x . В осциллографе для развертки обычно применяется напряжение с пилообразной кривой (рис. 18-17), даваемое специальным генератором развертки (ламповый релаксационный генератор). Это напряжение изменяется по времени линейно по пилообразной кривой, причем

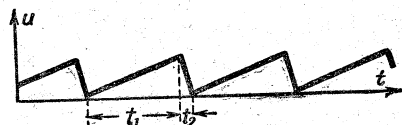


Рис. 18-17. Пилообразная кривая напряжения.

t_1 — длительность повышения напряжения — в несколько раз больше, чем t_2 — длительность его понижения. Пологие участки (t_1) пилообразной кривой используются как наблюдаемая часть цикла, а крутые участки (t_2) служат для обратного хода электронного луча (рис. 18-18). Пилообразные колебания должны быть синхронизированы с u_x . Для поддержания синхронизма в осциллографе имеется специальный узел синхронизации. Воздействие на потенциал сетки электронно-лучевой трубки дает возможность запереть ее на время обратного хода луча, что освобождает экран от мешающего изображения этого хода.

Осциллограф снабжен двумя ламповыми усилителями с регулированием в широких пределах коэффициентов усиления. Один из них для усиления напряжения генератора развертки, а второй — для усиления u_x . Наличие усиления u_x дает возможность наблюдать и фотографировать также и кривые тока; для этого на вход усилителя u_x подается падение напряжения, создаваемое исследуемым током в относительно небольшом сопротивлении (в шунте). Для фотографирования кривых служит специальная фотоприставка. Усилители и генератор развертки монтируются в общем ящике осциллографа (рис. 18-19). Управление ими сосредоточено на

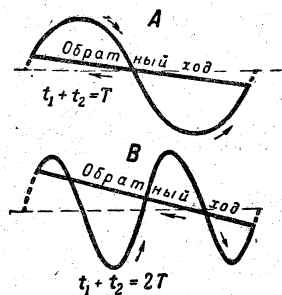


Рис. 18-18. Прямой и обратный ход электронного луча на экране.

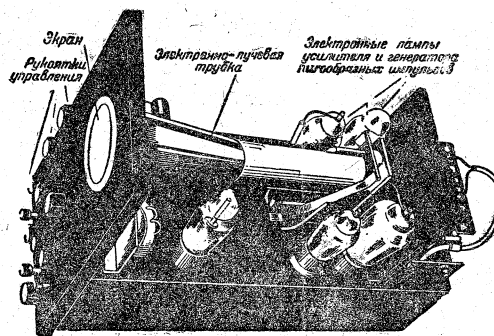


Рис. 18-19. Электронный осциллограф без кожуха.

панели осциллографа (рис. 18-20). Для удобства отсчета отклонений луча сверх экрана на трубку надевается прозрачный целлулоидный кружок с сеткой делений.

В большинстве случаев электронные осциллографы изготовляются однопучевыми, редко — двухлучевыми; четырехлучевые осциллографы являются уникальными приборами.

По сравнению с магнитоэлектрическим осциллографом электронный осциллограф обладает преимуществами практической безынерционности, дешевизны, простоты в обращении и высокой чувствительности. На стороне магнитоэлектрического осциллографа остаются преимущества лучших усло-

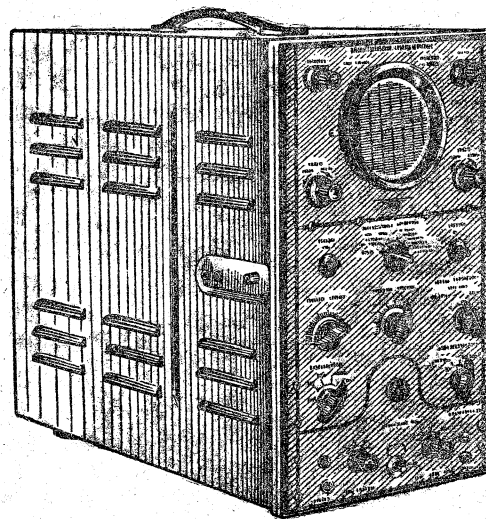


Рис. 18-20. Общий вид панели управления электронного осциллографа.

вий для фотографирования и возможности одновременного наблюдения значительного числа процессов благодаря простоте увеличения числа вибраторов.

18-7. Электронное реле

Реле есть аппарат, посредством которого относительно малая мощность приводит в действие или регулирует режим значительно более мощной системы. Из числа весьма многочисленных и разнообразных электронных реле одним из простейших по принципу действия является реле времени. На рис. 18-21 показана принципиальная схема подобного реле, работающего на размыкание управляющей цепи. Пока управляющий контакт K замкнут, на сетку триода подано отрицательное напряжение U и триод заперт. При размыкании этого контакта отрицательное напряжение на сетке поддерживается конденсатором C , но последний постепенно разряжается на сопротивление R и напряжение на его обкладках уменьшается согласно известному выражению (см. § 6-5)

$$u_c = Ue^{-\frac{t}{RC}}.$$

Вследствие уменьшения отрицательного сеточного напряжения на сетке триод отпирается и его анодный ток постепенно возрастает, пока не достигнет значения, достаточного для срабатывания исполнительного механизма $ИМ$ (например катушка $ИМ$ втянет сердечник и таким путем замкнет контакты мощной цепи, в которую включен электродвигатель $Д$). Регулируя R и C , можно установить необходимую выдержку времени — промежуток времени между размыканием контакта K и срабаты-

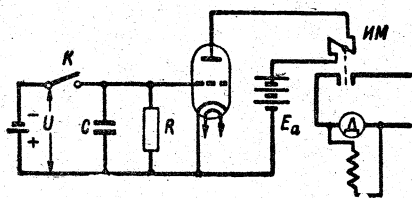


Рис. 18-21. Схема электронного реле времени.

ванием исполнительного механизма. Контакт K можно заменить, например, фотоэлементом, — при затемнении последнего конденсатор будет разряжаться и устройство срабатывать.

18-8. Автоматический электронный потенциометр

В этом приборе электронное устройство применено для управления автоматическим уравниванием измеряемой величины, и оно же может служить для автоматического регулирования производственного процесса. Прибор состоит из блоков: измерительного, преобразовательного, усилительного и исполнительного.

В измерительном блоке используется компенсационный метод измерения. Его простейшая принципиальная схема показана на рис. 18-22. Вспомогательный источник постоянного тока I через регулировочное сопротивление R_p замкнут на потенциометр; R_n — постоянное сопротивление, разность потенциалов двух точек которого используется для уравнивания измеряемой э. д. с. E_x . Чтобы установить точно определенную величину тока I , при компенсационном измерении используется образцовая мера — э. д. с. нормального элемента $E_{нэ}$, включенная через гальванометр G_1 к точкам потенциометра, сопротивление $R_{нэ}$ между которыми точно установлено. Напряжение $IR_{нэ}$ противоположно по направлению $E_{нэ}$. Путем регулирования тока I путем изменения R_p сводится к нулю отклонение гальванометра G_1 , и, следовательно, э. д. с. нормального элемента компенсируется: $E_{нэ} = IR_{нэ}$.

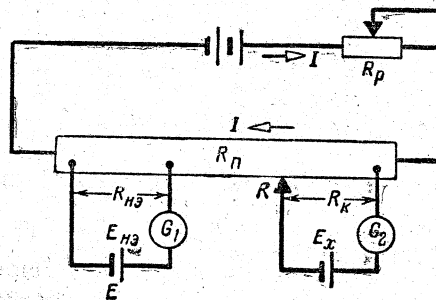


Рис. 18-22. Простейшая схема компенсационного измерения.

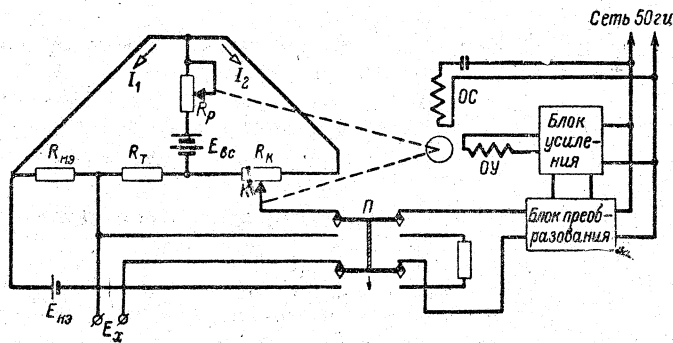


Рис. 18-23. Измерительный блок электронного потенциометра.

Значение E_{H3} точно известно, поэтому посредством компенсации E_{H3} в потенциометре устанавливается определенное значение тока I ; оно должно оставаться неизменным при дальнейших измерениях.

Для компенсации измеряемой э. д. с. E_x нужно перемещать движок K до тех пор, пока гальванометр G_2 не покажет отсутствие тока. Тогда достигнута компенсация, а измеряемую э. д. с. можно определить из условия компенсации: $E_x = IR_K$, так как значение тока I известно, а значение R_K отсчитывается на шкале потенциометра. Важное преимущество метода — возможность измерять (или использовать для управления) э. д. с. объектов малой мощности.

В измерительном блоке электронного потенциометра ЭПДО7, изготовляемого в СССР серийно, сам потенциометр выполнен по мостовой схеме (рис. 18-23), специально приспособленной для термоэлектрических измерений. Вспомогательный источник тока (сухие элементы) помещен в диагональ моста. Ток этого источника делится между плечами моста на две части I_1 и I_2 , отношение между которыми известно и постоянно. Перед началом измерений в приборе компенсируется э. д. с. нормального элемента E_{H3} посредством автоматического регулирования сопротивления R_P , изменяющего ток I_1 до тех пор, пока не будет осуществлено условие $I_1 = \frac{E_{H3}}{R_{H3}}$.

При этом устанавливается и определенное значение тока I_2 . Затем автоматическое регулирующее устройство переключается в цепь измеряемой

э. д. с., и осуществляется уравнивание E_x посредством перемещения движка K по реохорду R_K . Падение напряжения, компенсирующее E_x , создается двумя противоположными по знаку напряжениями $I_2 R_K$ и $I R_T$, т. е. при компенсации $E_x = I_2 R_K - I_1 R_T$. Такая схема компенсации выбрана с учетом специального назначения потенциометра — измерения температуры посредством измерения э. д. с. термопар. Но э. д. с. термопары пропорциональна не температуре горячего спая, а разности температур горячих и холодных концов термопары. Для устранения влияния температуры холодных концов на результаты измерения температуры объекта в схеме потенциометра служит сопротивление R_T , величина которого изменяется при изменении температуры. Это сопротивление помещается в такие же температурные условия, как и холодные концы термопары. Благодаря этому, например, при повышении температуры холодных концов э. д. с. термопары уменьшается, хотя температура объекта не изменилась, компенсация была бы нарушена, но одновременно возросло соответственно сопротивление R_T , что уменьшило компенсирующее напряжение и компенсация сохранилась.

Для осуществления автоматического уравнивания («наводки») необходим механизм, перемещающий движки на соответствующих сопротивлениях потенциометра. Величиной, управляющей этим механизмом, является напряжение небаланса потенциометра, т. е. разность компенсируемой э. д. с. и компенсирующего напряжения, — сначала это $E_{H3} - I_1 R_{H3}$, а затем $E_x - I_2 R_K + I_1 R_T$.

Переключатель Π дает возможность сначала подать на вход блоков преобразования и управления напряжение небаланса E_{H3} , а затем для всех измерений — напряжение небаланса E_x .

Мощность, которую можно снять

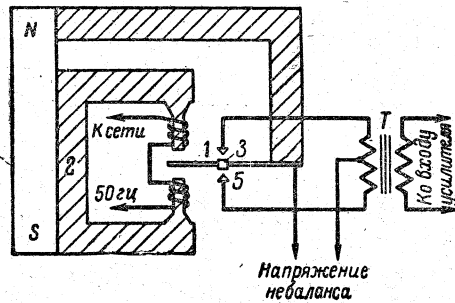


Рис. 18-24. Схема блока преобразования.

непосредственно с потенциометра, ничтожна. Поэтому напряжение небаланса нужно усилить, а предварительно его нужно преобразовать в переменное напряжение.

Блок преобразования состоит из вибропреобразователя и трансформатора (рис. 18-24). Вибропреобразователь в основном представляет собой поляризованный электромагнит: постоянный магнит MS подмагничивает подвижную часть прибора — стальную упругую пластину 1 , свободный конец которой может колебаться между полюсами электромагнита 2 , подмагничиваемого тем же постоянным магнитом. По обмоткам электромагнита пропускается переменный ток промышленной частоты. В зависимости от направления этого тока пластина притягивается то к одному, то к другому полюсу электромагнита, а так как ее собственная частота достаточно велика, то она колеблется с частотой, равной частоте переменного тока, возбуждающего электромагнит.

Один полюс цепи небаланса потенциометра электрически соединен с пластиной, а второй полюс этой цепи — с серединой первичной обмотки трансформатора T . При колебаниях пластины укрепленные на ней подвижные контакты 3 соприкасаются с неподвижными контактами 4 и 5 . Таким путем они замыкают цепь постоянного тока небаланса то через одну, то через другую половину первичной обмотки трансформатора T . В этих условиях намагничивающие силы двух половин обмотки трансформатора имеют противоположное направление, поэтому они возбужда-

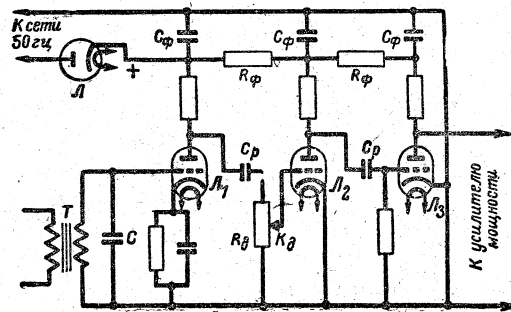


Рис. 18-25. Схема трехкаскадного усилителя напряжения электронного потенциометра.

ют в сердечнике трансформатора магнитный поток, периодически изменяющий свое направление. В результате во вторичной обмотке трансформатора индуцируется переменная э. д. с., частота которой равна частоте сети, а относительная фаза зависит от знака напряжения небаланса. Эта э. д. с. подается на вход электронного усилителя.

Усилитель состоит из трех каскадов, образующих усилитель напряжения (рис. 18-25), и одного каскада — фазочувствительного усилителя мощности.

Для питания всех каскадов усилителя напряжением анодным током используется диод L , причем пульсации выпрямленного им напряжения сглаживаются реостатно-емкостным фильтром, состоящим из сопротивлений R_{ϕ} и конденсаторов C_{ϕ} . Конденсатор C , включенный параллельно входу первого триода L_1 , служит фильтром для подавления высших гармонических в кривой э. д. с. (см. § 10-10). Первый триод работает с автоматическим смещением. Усиленное напряжение подается на сетку второго триода L_2 через разделительный конденсатор C_p и делитель напряжения R_d . Сетка триода L_2 соединена с движком K_d делителя напряжения, что дает возможность регулировать коэффициент усиления. Этот триод работает по упрощенной схеме без автоматического отрицательного смещения, так как для целей данного усилителя не имеет значения возникновение сеточного тока во втором каскаде и некоторое искажение кривой усиливаемого напряжения. Схема соединений третьего

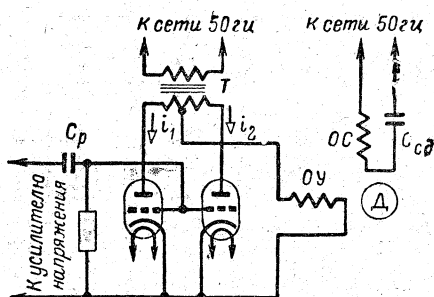


Рис. 18-26. Схема усилителя мощности и исполнительного двигателя.

каскада с триодом L_3 не отличается от схемы соединений второго каскада.

Выход усилителя напряжения является входом усилителя мощности (рис. 18-26), состоящего из двух триодов. Сетки этих двух ламп соединены между собой параллельно, а аноды присоединены к двум противоположащим зажимам вторичной обмотки трансформатора T . Катоды обеих ламп через обмотку управления OY двигателя D соединяются со средней точкой обмотки трансформатора. Пока на сетках ламп нет напряжения, они работают как два диода, соединенных по схеме двухполупериодного выпрямления (см. § 17-4), вследствие чего через обмотку OY проходит пульсирующий ток (рис. 18-27), переменная составляющая которого имеет частоту, в 2 раза большую частоты сети. Через вторую обмотку OC этого же двигателя проходит ток, имеющий частоту сети. В таких условиях вра-

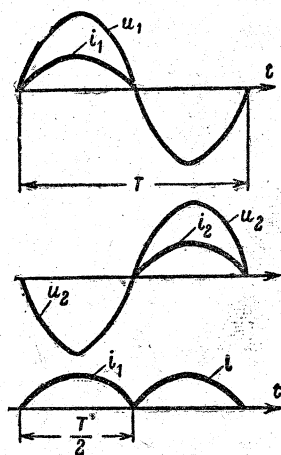


Рис. 18-27. Кривые напряжений и токов усилителя мощности при компенсации.

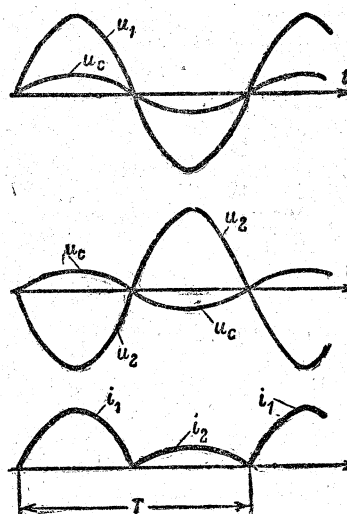


Рис. 18-28. Кривые токов усилителя мощности при наличии напряжения небаланса потенциометра.

шающееся магнитное поле в двигателе не возникает и его ротор остается неподвижным.

Но при наличии небаланса в цепи потенциометра на сетки ламп усилителя мощности подается переменное напряжение, которое совпадает по фазе с одним из анодных токов (рис. 18-28) и усиливает его, а во вторую половину периода сеточное напряжение запирает или ослабляет ток второй лампы. В результате через обмотку OY будет проходить пульсирующий ток со значительной переменной составляющей, имеющей частоту сети. В этом случае магнитные потоки двигателя образуют вращающееся поле и ротор придет в движение. Конденсатор $C_{сд}$ в цепи сетевой обмотки OC двигателя служит для того, чтобы сдвиг фаз между переменными потоками двух обмоток был близок к 90° (см. § 14-22). Через соответствующую механическую передачу ротор воздействует на движок реохорда, перемещая его так, чтобы напряжение небаланса уменьшалось. При достижении компенсации ротор останавливается. В зависимости от знака напряжения небаланса меняется на 180° фаза напряжения на сетках усилителя мощности, а следовательно, изменяется направление вращения двигателя D . С движком K связаны стрелка, показывающая значение E_x или темпе-

ратуры на шкале прибора. Одновременно перо, также соединенное с движком, записывает показания прибора на бумажном диске или ленте.

Потенциометр применяется также для автоматического регулирования температуры. В подобном случае движок реохорда устанавливается в определенное положение, задающее требуемую температуру объекта регулирования, а двигатель воздействует не на положение движка потенциометра, а на регулятор, управляющий поступ-

лением горючего (газа, нефти, электроэнергии). Напряжение небаланса заставляет двигатель воздействовать на этот регулятор до тех пор, пока э. д. с. термопары (соответствующая заданному значению температуры) не уравнивает компенсирующее напряжение.

Фактическая схема потенциометра отличается от принципиальной здесь описанной применением двойных ламп, вспомогательных трансформаторов и т. д.

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ЭЛЕКТРОПРИВОД

19-1. Развитие электропривода

«Всякая развитая совокупность машин состоит из трех существенно различных частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец, машины-орудия, или рабочей машины»¹. Первые две части — двигатель и передаточный механизм — должны приводить в движение третью часть — рабочую машину; поэтому указанные две части в совокупности именуются приводом машины.

В настоящее время самым распространенным видом привода, в особенности в Советском Союзе², является электропривод. Под этим названием подразумевается часть машинного устройства, состоящая из электродвигателя, передаточного механизма к рабочей машине и всей аппаратуры для управления электродвигателем.

В данной главе рассматриваются только вопросы, относящиеся к выбору электродвигателя для привода, так как общим вопросам электрической аппаратуры посвящена следующая глава.

До появления электропривода универсальным двигателем в крупной

промышленности была паровая машина, работавшая через ременную или канатную передачу на общую трансмиссию, соединенную ремнями с группой станков. Первоначально электродвигатель лишь заменил паровую машину у трансмиссии, а принцип группового привода был сохранен.

Механическая передача от электродвигателя к станку через трансмиссию, затем через ряд последовательно включенных канатных, ременных, зубчатых и других передач связана с большими потерями энергии в передающих устройствах (часто больше 50%). Кроме того, подобные устройства занимают много места. По этим причинам групповой привод был постепенно вытеснен одиночным приводом, при котором электродвигатель работает только на один станок и соединяется с ним, по возможности, непосредственно.

В нашей отечественной промышленности примерно к 1930 г. одиночный привод сменил групповой. Эта смена произошла в результате реконструкции промышленности в ходе индустриализации страны.

Приближение электродвигателя к рабочей машине (станку) при одиночном приводе дало возможность взаимно их приспособить. В связи с этим встал вопрос о дальнейшем уменьшении потерь при работе, на этот раз потерь внутри рабочей машины. Наличие только одного двигателя требует в ря-

¹ К. Маркс, Капитал, т. I, стр. 378—379, Госполитиздат, 1949.

² По коэффициенту электрификации (отношению установленной мощности электродвигателей к общей установленной мощности двигателей всех видов) СССР с 1938 г. стоит на первом месте в мире, оставив далеко позади большинство капиталистических стран.

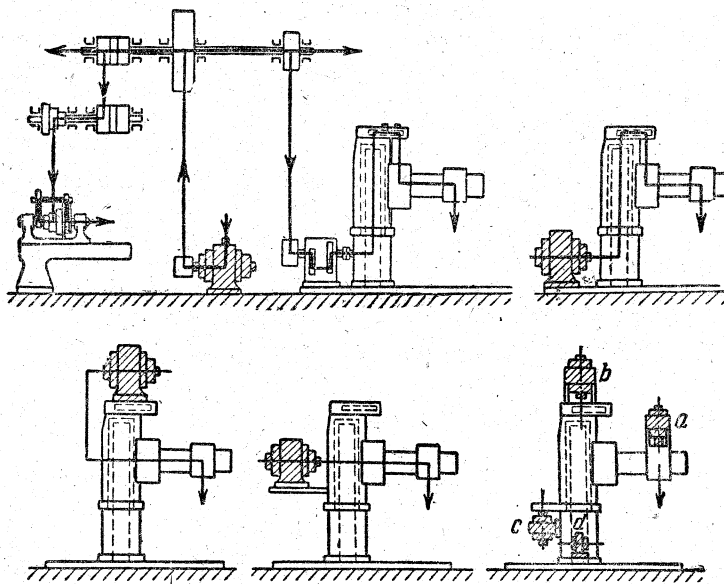


Рис. 19-1. Постепенное приближение электродвигателя к рабочим органам радиально-сверлильного станка.

де случаев специальных устройств (зубчаток, ремней, эксцентриков и т. п.) для передачи энергии внутри рабочей машины. Естественным развитием электропривода явилось устранение механического звена при передаче энергии внутри машины — переход к многодвигательному приводу одной рабочей машины. В подобном устройстве отдельные рабочие органы машины имеют свой индивидуальный привод. Одновременно часто решается электрическим методом и задача регулирования скорости движения данного рабочего органа машины, что дает возможность отказаться от соответствующих сложных механических устройств (коробок скоростей и т. п.). Непосредственное соединение электродвигателя с рабочим органом машины делает целесообразным изменение всей конструкции последней, в результате чего в ряде современных станков электрическое оборудование и механическое оборудование настолько объединены, что затруднительно указать границы между ними.

На рис. 19-1 схематически показано постепенное приближение электродвигателя к рабочим органам радиально-сверлильного станка — переход от группового привода через по-

степенно совершенствуемый одиночный привод к многодвигательному (*a*, *b*, *c* и *d*) приводу рабочих органов станка.

Применение одиночного и многодвигательного приводов дало возможность также перейти от механического управления работой машины посредством сцепных муфт, фрикционных, приводных ремней и т. п. к электрическому управлению (в большинстве случаев кнопочному). Следствием этого было не только коренное изменение конструкции машины, но и ее эксплуатации, так как явилась возможность очень быстро выполнять регулирование машины, чередовать рабочие циклы, а следовательно, резко повысить темпы работы и производительность машины. Но быстрое чередование рабочих операций машины делает необходимым освобождение человека от труда по контролю и управлению однородными рабочими циклами машины-орудия. Это достигается посредством автоматизации, осуществляемой особенно целесообразно, экономично и относительно просто электрическими методами.

Развитие электропривода тесно связано с автоматизацией, применяемой в настоящее время как в слож-

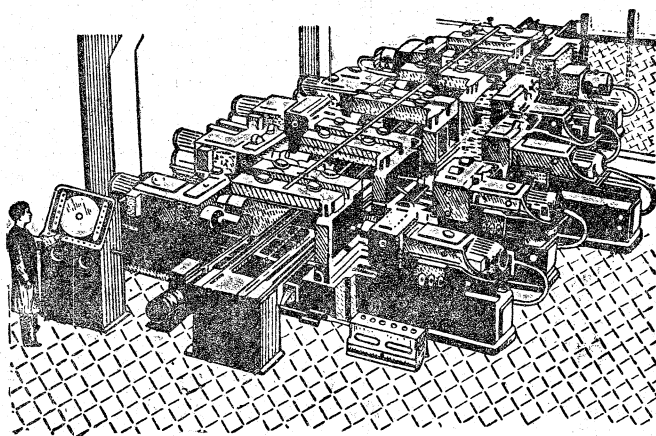


Рис. 19-2. Автоматическая линия станков.

ных, так и в простых приводах, как для управления многочисленными электродвигателями блуминга (прокатного обжимного стана) общей мощностью порядка нескольких тысяч киловатт, так и для управления простейшим короткозамкнутым асинхронным двигателем мощностью меньше 1 квт. В одних случаях автоматически производятся лишь простейшие операции — пуск двигателя в ход и его остановка; в других случаях автоматически выполняются весьма сложные производственные процессы — осуществление определенной последовательности операций или работа по шаблону: автоматически действует защита от перегрузок и повреждений и т. д. Автоматизация необходима для управления мощными механизмами, для сложных приводов, требующих быстрой и частой регулировки скорости двигателей, для привода с частым пуском двигателя в ход (например, у блуминга пуск в ход ряда механизмов повторяется до 2000 раз в час). Автоматизированный электропривод позволяет получать большую производительность рабочих машин при высоком качестве продукции и дает значительную экономию энергии.

В числе различных автоматизированных устройств особой сложностью отличается система автоматической загрузки доменной печи, требующая для осуществления необходимой последовательности операций полной согласованности работы большого числа

механизмов. Современная доменная печь управляется при помощи примерно 500 различных контакторов и реле. Вот такой сложнейший автоматизированный электропривод загрузки доменной печи ХЭМЗ начал выпускать еще в 1933 г.

В годы первых пятилеток было быстро развернуто производство автоматизированных электроприводов для самых различных отраслей промышленности: многодвигательный привод для бумагоделательной машины, электропривод врубных машин, электрические копировальные станки, автоматизированный электропривод для управления механизмами гидротехнических сооружений и т. д. После победоносного окончания Великой Отечественной войны рост электропривода в СССР идет особенно быстрыми темпами.

Дальнейшим развитием автоматизации в промышленном производстве является создание автоматических линий машин. Эта группа машин выполняет последовательно одна за другой цикл операций по обработке изделий, причем эти изделия автоматически перемещаются от одной машины к другой (рис. 19-2). Рабочий, обслуживающий автоматическую линию, выполняет роль командира группы машин и, таким образом, в производстве исчезают существенные различия между физическим и умственным трудом, что характерно для будущего коммунистического общества. Первая автоматиче-

ская линия была создана советским рабочим И. П. Иночкиным (Сталинградский тракторный завод) в 1939 г.

19-2. Классификация режимов работы электроприводов

При выборе электрооборудования для привода важное значение имеют особенности режима работы этого привода. Принято различать три основных режима работы: длительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

При длительном режиме нагрузка двигателя изменяется мало и температура электродвигателя привода достигает своего установившегося значения (рис. 19-3,а). В качестве примеров исполнительных механизмов с длительным режимом работы можно назвать: вентиляторы, компрессоры, центробежные насосы, конвейеры непрерывного транспорта, дезинтеграторы в металлургической промышленности, дымососы на электрических станциях, бумагоделательные машины, машины для отделки тканей и т. д.

В условиях кратковременного режима рабочий период относительно краток (рис. 19-3,б) и температура двигателя не успевает достигнуть установившегося значения. Перерыв же в работе исполнительного механизма достаточно велик для того, чтобы двигатель успел охладиться практически до температуры окружающей среды. Такой режим работы характерен для самых различных механизмов кратковременного действия: шлюзов, разводных мостов, подъемных шасси самолетов и многих других.

При повторно-кратковременном (прерывистом) режиме периоды работы чередуются с паузами (остановка или холостой ход), причем ни в один из периодов работы температура двигателя не достигает установившегося значения, а во время снятия нагрузки двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Общая продолжительность цикла работы T (рис. 19-3,в) не должна превосходить 10 мин. Характерной величиной для повторно-кратковременного режима является отно-

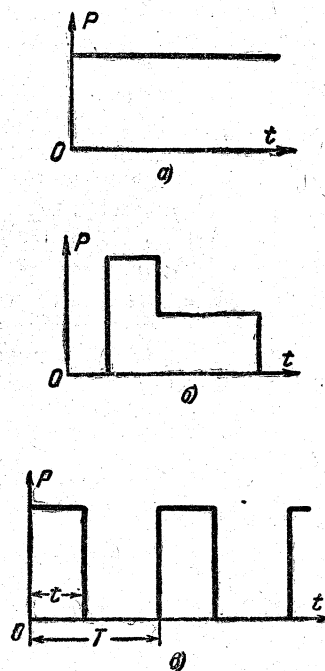


Рис. 19-3.

а — характеристика длительного режима привода; б — характеристика кратковременного режима привода; в — характеристика повторно-кратковременного режима привода.

шение рабочей части периода t ко всему периоду T . Эта величина именуется относительной продолжительностью работы (ПР%) или относительной продолжительностью включения (ПВ%). Примерами механизмов с повторно-кратковременным режимом работы могут служить: ряд металлорежущих станков, прокатные станы, буровые станки в нефтяной промышленности и т. д.

Длительной мощностью электродвигателя является мощность, которую данный двигатель может отдавать на валу в течение произвольного долгого времени, не перегреваясь свыше допустимой температуры. Так как наименьшей нагревостойкостью в электрической машине обладают изолирующие материалы, то наибольшая допустимая температура нагрева изоляции двигателя является и наибольшей температурой нагрева, допустимой для двигателя. Конечно, нагревание двигателя зависит от температуры окружающей среды, следовательно, от этой температуры зависит длительная

мощность двигателя. Номинальная мощность, указываемая на щитке двигателя, определяется для условной стандартной температуры окружающей среды, равной 35°C . Если же температура окружающей среды будет выше 35°C , то длительная мощность двигателя будет меньше указанной на щитке.

В течение весьма короткого промежутка времени двигатель может развивать мощность, значительно большую, чем номинальная. Мгновенная перегрузочная мощность двигателя—это наибольшая мощность, которую двигатель может отдать на валу в течение весьма малого промежутка времени без каких-либо повреждений. Такая мощность определяется в большинстве случаев электрическими свойствами двигателя (максимальным моментом у асинхронных двигателей или условиями коммутации у двигателей постоянного тока), а иногда и механической конструкцией двигателя. Мгновенные перегрузочные свойства электродвигателя обычно характеризуются коэффициентом перегрузки по моменту λ_m , т. е. отношением максимального кратковременного допустимого перегрузочного момента к номинальному: $\lambda_m = M_{\text{макс}} : M_{\text{ном}}$. Для большинства электродвигателей λ_m —величина порядка 2 (у специальных электродвигателей она доводится до 3—4).

В ряде случаев для привода важна перегружаемость не мгновенная, а на определенный, относительно короткий промежуток времени. Кратковременная перегрузочная мощность двигателя (временная мощность)—это мощность, которую двигатель может отдавать в течение определенного ограниченного промежутка времени (5, 10, 15, 30 мин и т. д.), после чего двигатель должен быть выключен на столько времени, чтобы он успел охладиться до температуры окружающей среды. Для одного и того же двигателя соотношения между его длительной, мгновенной перегрузочной и кратковременной перегрузочной мощностями зависят от электрических характеристик, конструкции и материалов двигателя.

19-3. Выбор мощности двигателя

Правильный выбор мощности двигателя для привода является важным условием экономичной, производительной и надежной работы машины. Установка двигателя большей мощности, чем это необходимо по условиям привода, ведет к излишним потерям энергии при работе машины и обуславливает излишние капитальные затраты. С другой стороны, установка двигателя недостаточной мощности снижает производительность рабочей машины и делает ее работу ненадежной, а сам электродвигатель в подобных условиях легко может быть испорчен.

Двигатель должен быть выбран так, чтобы его мощность использовалась возможно полнее. Во время работы двигатель должен нагреваться до предельно допустимой температуры, но не свыше ее. Кроме того, двигатель должен нормально работать при возможных временных перегрузках и развивать пусковой момент, требуемый данной рабочей машиной. В соответствии с этим мощность двигателя выбирается в большинстве случаев на основании условий нагревания (выбор мощности по нагреву), а затем производится проверка соответствия перегрузочной способности двигателя условиям пуска машины и временным перегрузкам.

В некоторых неблагоприятных случаях (при большой кратковременной перегрузке) приходится выбирать двигатель, исходя из требуемой максимальной мощности. В подобных условиях длительная мощность двигателя часто полностью не используется.

Относительно простым является выбор мощности двигателя для привода с длительным режимом работы. Здесь мощность двигателя P должна быть равна мощности нагрузки, а проверки на нагрев и перегрузку во время работы не нужны. Необходимо лишь проверить, достаточен ли пусковой момент двигателя для пусковых условий данной машины.

Мощность длительной нагрузки ряда хорошо изученных механизмов определяется в одних случаях на основании проверенных практикой теоретических расчетов.

Например, мощность двигателя для вентилятора должна быть:

$$P = \frac{Vh}{102\eta_{\text{вен}}\eta_{\text{пер}}} \text{ [квт]},$$

где V — количество нагнетаемого или всасываемого воздуха, $\text{м}^3/\text{сек}$;

h — давление или разрежение, мм вод. ст. (напор вентилятора: у крыльчатых вентиляторов 4—10, у центробежных до 400);

$\eta_{\text{вен}}$ — к. п. д. вентилятора (у крыльчатых вентиляторов 0,2—0,35, у центробежных до 0,8),

$\eta_{\text{пер}}$ — к. п. д. передачи от двигателя к вентилятору.

В приведенной формуле произведение Vh представляет собой полезную мощность вентилятора в кгм/сек , а 102 — коэффициент для перевода мощности в квт .

В других случаях приводов длительной нагрузки для расчета мощности двигателя используются эмпирические формулы, проверенные длительной практикой.

Наконец, для малоизученных приводов длительной нагрузки мощность двигателя определяется на основании удельного расхода энергии при выпуске продукции или же экспериментально путем испытания привода.

При кратковременном и повторно-кратковременном режимах нагрузка двигателя непостоянна. При кратковременной перегрузке двигатель не успевает нагреться до той слишком высокой температуры, которая соответствовала бы такой длительной нагрузке. Поэтому важно знать закон изменения во времени превышения температуры ϑ двигателя. Электрическая машина с точки зрения нагревания представляет собой весьма сложное тело. Опыт показывает, что при расчетах, не требующих большой точности, можно считать электрическую машину однородным телом.

Это позволяет применить для нее упрощенное уравнение нагревания (§ 1-8):

$$Q_0 dt = Cd\vartheta + kS\vartheta dt, \quad (19-1)$$

где C — теплоемкость машины;

$Cd\vartheta$ — тепло, затрачиваемое на ее нагревание.

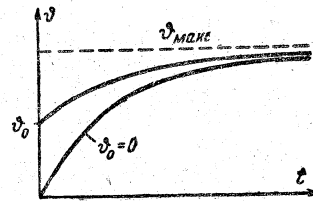


Рис. 19-4. Кривые нагревания при наличии начального превышения температуры.

Далее

$$\frac{Q_0}{kS} dt = \vartheta_{\text{макс}} dt = \frac{C}{kS} d\vartheta + \vartheta dt.$$

Решая это уравнение (см., например, § 5-7), получаем:

$$Ne^{-\frac{t}{\tau}} = \vartheta_{\text{макс}} - \vartheta,$$

где $\tau = \frac{C}{kS}$ — постоянная времени машины, определяемая экспериментально. При $t=0$ превышение температуры $\vartheta = \vartheta_0$ — начальному превышению температуры машины, на основании чего постоянная $N = \vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0$, а закон нарастания температуры машины будет иметь следующую форму:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{макс}} - (\vartheta_{\text{макс}} - \vartheta_0) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (19-2)$$

Таким образом, в данном случае, как и при $\vartheta_0=0$, превышение температуры возрастает по показательному закону, стремясь к значению $\vartheta_{\text{макс}}$. Наличие начального превышения температуры лишь изменяет скорость повышения температуры, не изменяя характера процесса (рис. 19-4). Постоянная времени машины — величина, определяющая скорость изменения температуры, находится экспериментально при типовом испытании электрической машины.

При различных значениях длительной нагрузки одной и той же машины кривые $\vartheta = f(t)$ будут отличаться лишь ординатами рис. 19-5. Наибольшее допустимое для данной машины превышение температуры изображается $\vartheta_{\text{ном}}$. Параллельная оси абсцисс прямая $\vartheta_{\text{ном}}$ пересекает кривые нагревания, соответствующие различным значениям нагрузки электродвигателя. Абсцисса точки пересечения определяет тот

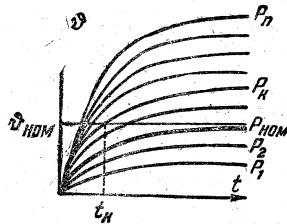


Рис. 19-5. Кривые нагрева при различных нагрузках.

промежуток времени t_k , в течение которого двигатель может быть временно загружен до мощности P_k , представляющей собой перегрузку по отношению к его номинальной (длительной) мощности. Кривая нагревания, асимптотически приближающаяся к $\varphi_{ном}$, соответствует номинальной мощности двигателя $P_{ном}$. При нагрузках, меньших чем $P_{ном}$, мощность двигателя полностью не используется. Однако если двигатель загружается до номинальной мощности только на относительно короткое время, то, по существу, он тоже используется не полностью. Целесообразно его кратковременно перегрузить, и чем меньше время работы, тем больше должна быть эта перегрузка. Наглядно это показывают кривые рис. 19-5. Предел повышению нагрузки двигателя по мере уменьшения длительности включения поставлен мгновенной перегрузочной мощностью двигателя.

В случае повторно-кратковременной нагрузки двигатель попеременно то нагревается, то охлаждается. Его температура во время каждого цикла зависит при этом от предыдущего теплового состояния.

Кривая нагревания и охлаждения в подобных условиях показана на рис. 19-6. Конечное превышение температуры каждой данной части цикла является начальным превышением температуры для последующей части цикла. Если во время той или иной части цикла наступает значительное из-

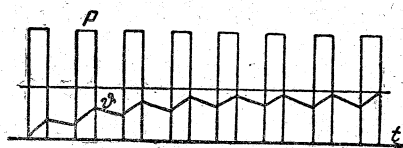


Рис. 19-6. Изменение температуры двигателя при повторно-кратковременном режиме.

менение условий охлаждения (остановка двигателя или заметное изменение скорости), то это меняет τ — постоянную времени двигателя, что должно быть учтено при построении кривых.

Определение мощности двигателя по условиям нагревания посредством построения кривых нагревания (или соответствующим аналитическим методом) требует значительной затраты времени и не дает особо точных результатов. Здесь эти построения приведены лишь, чтобы наглядно показать картину изменения нагрева двигателя при переменной нагрузке. В большинстве случаев для такого выбора мощности двигателя применяются более простые методы, в частности метод эквивалентного тока.

В основу этого метода положено допущение, что при переменной нагрузке двигателя его средние потери должны быть равны потерям при длительно неизменной (номинальной) нагрузке. Как известно, потери двигателя складываются из постоянных $P_{пос}$ и переменных $P_{пер}$. К постоянным относятся потери на трение, потери в стали (у асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока параллельного возбуждения) и потери на возбуждение у синхронных двигателей и двигателей параллельного возбуждения. Переменные потери можно считать пропорциональными квадрату рабочего тока I двигателя и сопротивлению соответствующей обмотки R , причем приближенно можно считать последнее постоянным. Если этот ток изменяет свое значение за соответствующие промежутки времени, то за все рабочее время $\Sigma t = T$ суммарные потери двигателя будут:

$$(P_{пос} + I_1^2 R) t_1 + (P_{пос} + I_2^2 R) t_2 + \dots + (P_{пос} + I_n^2 R) t_n.$$

При эквивалентной неизменной нагрузке за то же время T потери двигателя будут:

$$(P_{пос} + I_{эк}^2 R) T,$$

где $I_{эк}$ — рабочий ток двигателя при неизменной нагрузке.

Нагревание двигателя, обусловленное потерями, в обоих случаях должно быть одинаковым. Приравнивая потери

при переменной нагрузке потерям при постоянной нагрузке, определяем эквивалентный ток

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (19-3)$$

Затем по этому току и напряжению определяем номинальную мощность двигателя.

Метод эквивалентного тока можно применять лишь при условии постоянства потерь в стали и на трение в течение всего рабочего времени. Этому условию, например, не удовлетворяет двигатель последовательного возбуждения, у которого при изменениях нагрузки сильно изменяются поток и скорость (следовательно, потери в стали и на трение).

В ряде случаев условия нагрузки определяют непосредственно момент, требуемый от двигателя, а не ток. В этих случаях можно пользоваться методом эквивалентного момента. У всех электродвигателей вращающий момент пропорционален произведению тока и потока. У двигателей переменного тока можно весьма приближенно считать постоянным коэффициент мощности. Наконец, магнитный поток можно считать практически постоянным у всех двигателей, кроме двигателей последовательного возбуждения. При таких упрощениях можно считать вращающий момент равным

$$M_{\text{вр}} = k_{\text{вр}} I,$$

где $k_{\text{вр}}$ приближенно принимается за постоянную величину. Это позволяет от уравнения эквивалентного тока перейти путем умножения на постоянную величину к уравнению эквивалентного момента

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (19-4)$$

По эквивалентному моменту определяется мощность двигателя $P_{\text{ном}} = M_{\text{эк}} \omega_{\text{ном}}$; здесь $\omega_{\text{ном}}$ — номинальная угловая скорость двигателя.

После того как мощность двигателя выбрана на основании расчета по

методу эквивалентного тока или эквивалентного момента, необходимо проверить, достаточен ли максимальный момент $M_{\text{макс}}$ двигателя этой мощности для того, чтобы удовлетворить требованиям кратковременных перегрузок данного привода; иными словами, должно быть выполнено условие: коэффициент перегрузки двигателя λ_m должен быть больше отношения максимального момента $M_{\text{макс}}$ нагрузки к номинальному моменту двигателя

$$\lambda_m > \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}. \quad (19-5)$$

19.4. Выбор рода тока и типа двигателя

Помимо мощности двигателя, необходимо выбрать род его тока и конструктивную форму выполнения. Выше уже были рассмотрены характерные свойства различных электродвигателей, их пусковые, рабочие и тормозные режимы, способы управления их скоростью. Важнейшими преимуществами двигателей переменного трехфазного тока — асинхронных и синхронных — являются: дешевизна, простота устройства и обслуживания; кроме того, в подавляющем большинстве случаев промышленные предприятия получают электроэнергию от сетей трехфазного тока при частоте 50 гц. По этим причинам обычно применяются приводы трехфазного тока с асинхронными и синхронными двигателями. Из них наиболее надежным и простым в эксплуатации и вместе с тем дешевым является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Двигатель с фазным ротором дороже, его обслуживание сложнее, габариты больше, а cos φ меньше (из-за большего воздушного зазора). Преимущества фазного ротора в отношении пускового момента незначительны по сравнению с короткозамкнутым ротором, имеющим двойное беличье колесо. Поэтому двигатели с контактными кольцами устанавливаются лишь при наличии особых требований к пусковому моменту или к величине пускового тока (требование, связанное с ограниченной мощностью трансформаторной подстанции

и характером подключенных к ней приемников). Таким образом, основным видом двигателя для мощностей до 100 кВт при нерегулируемом приводе является асинхронный короткозамкнутый двигатель.

При мощности свыше 100 кВт в качестве нерегулируемого двигателя целесообразнее синхронный. Он стоит несколько дороже, но благодаря высокому $\cos \varphi$ его эксплуатация обходится значительно дешевле, чем асинхронного двигателя (благодаря скидке в оплате электроэнергии за 1 кВт·ч, см. § 22-3).

Однако если требуется регулирование скорости двигателя, то при переменном токе оно может быть осуществлено лишь весьма несовершенно: посредством сопротивления в цепи фазного ротора или посредством переключения числа полюсов. Первый способ экономически целесообразен лишь при узких пределах регулирования (20% при постоянстве момента на валу двигателя). Второй способ дает ступенчатое регулирование скорости и применяется для небольших мощностей в приводах металлорежущих станков.

Преимуществом двигателей постоянного тока является возможность плавного и экономичного регулирования скорости в широких пределах (1:3 и даже 1:4). Особенно широки пределы регулирования при использовании системы генератор — двигатель.

Получение постоянного тока для питания двигателей требует дополнительных значительных затрат на установку соответствующих преобразователей — выпрямителей ионных, а иногда полупроводниковых с необходимыми для них трансформаторами или автотрансформаторами. Сам двигатель постоянного тока стоит значительно дороже, требует большего ухода и изнашивается быстрее, чем двигатель переменного тока. Наконец, при преобразовании переменного тока в постоянный неизбежны значительные потери энергии. Тем не менее в ряде случаев плавное регулирование скорости является обязательным условием для производительной работы машины-орудия, а дополнительные затраты

с избытком покрываются производственными выгодами от регулирования скорости. Вопрос этот в целом выходит за пределы настоящего курса. В заключение в качестве примеров приводов, для которых рекомендуется постоянный ток, назовем: в металлургической промышленности — реверсивные прокатные станы, регулируемые нереверсивные станы при многодвигательном приводе, вспомогательные механизмы повторно-кратковременного режима работы, доменные подъемники; в металлообрабатывающей промышленности — специальные станки с многодвигательным приводом.

Выбор конструкции (типа) двигателя делается в зависимости от условий окружающей среды. Здесь приходится учитывать необходимость защиты двигателя от воздействия окружающей среды и, с другой стороны, необходимость защиты среды от возможных искрообразований в двигателе (при наличии горючей пыли, взрывоопасных смесей и т. п.). Такое искрообразование может иметь место даже в асинхронном короткозамкнутом двигателе, у которого при пуске (когда в роторе наводятся значительные э. д. с.) могут проскакать искры вдоль ротора, возникающие вследствие замыкания токов через активную сталь помимо стержней беличьей клетки. Чем легче доступ охлаждающего воздуха к нагревающимся частям двигателя, тем лучше условия охлаждения, тем меньше и дешевле может быть сделан двигатель. Однако открытый тип двигателя с большими вентиляционными отверстиями в подшипниковых щитах и станине целесообразно применять в немногих случаях; придется считаться с легкостью засорения такого двигателя в производственных условиях и опасностью поражения током обслуживающего персонала при прикосновении к открытым токоведущим частям.

В большинстве случаев устанавливаются двигатели защищенного типа, в которых вентиляционные отверстия закрыты решетками, защищающими двигатель от попадания внутрь капель дождя, посторонних частиц, опилок и т. д., но не от пыли. Такие двигатели

могут устанавливаться на открытом воздухе.

В запыленных помещениях при наличии в воздухе паров, едких испарений и т. п. устанавливаются двигатели закрытого типа. Для улучшения охлаждения таких двигателей применяется продувание охлаждающего воздуха. Последний подводится и отводится по специальным воздухопроводам.

В сырых помещениях применяются

защищенные двигатели с влагостойкой изоляцией.

В помещениях с едкими парами и газами устанавливаются закрытые двигатели в герметическом исполнении или же закрытые, продуваемые, со специальной кислотоупорной изоляцией. Во взрывоопасных помещениях, содержащих горючие газы или пары, устанавливаются взрывонепроницаемые двигатели.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

20-1. Гашение электрической дуги

Выше были рассмотрены все элементы, составляющие нормальную схему электроснабжения: генераторы, трансформаторы, электродвигатели и т. д., а также законы, определяющие условия работы электрических цепей. Но процессы управления электрическими машинами и устройствами осуществляются посредством ряда вспомогательных аппаратов, обеспечивающих бесперебойное электроснабжение, облегчающих и упрощающих работу обслуживающего персонала. Простейшими аппаратами для размыкания рабочих токов являются рубильники, а простейшей защитой электрических цепей — плавкие предохранители (§ 1-8). Однако даже в цепях низкого напряжения часто необходима более совершенная аппаратура: автоматические выключатели, контроллеры, контакторы и т. д. Особенно сложна аппаратура для высоких напряжений, так как в этих условиях разрыв электрической дуги при отключении должен осуществляться в специальной среде, быстро гасящей эту дугу.

Гашение электрической дуги, возникающей между контактами при размыкании тока, является общей важной задачей для всей аппаратуры. При значительных токах и напряжениях тепловое действие дуги легко может разрушить контакты. Для предупреждения этого разрушения аппаратура снабжается различными дугогасительными устройствами. В выключателях

низкого напряжения размыкающиеся контакты часто выполняются в виде расходящихся рогов (рис. 22-32). Тепло, выделяемое дугой, создает поток воздуха, выдувающий дугу по рогам кверху, где она растягивается и обрывается. Это простейший пример использования для гашения дуги воздушного (или газового) дутья. Последнее в значительно более сложных формах широко применяется для гашения дуги в выключателях высокого напряжения.

Часто используется для гашения дуги принцип магнитного дутья, предложенный М. О. Доливо-Добровольским. Контакты размыкаются в сильном магнитном поле, создаваемом электромагнитом (рис. 20-1) или постоянным магнитом; это поле заставляет поток заряженных частиц дуги согласно закону электромагнитной силы смещаться в сторону, растягивая дугу. В ряде устройств магнитное дутье втягивает дугу в глубь дугогасительной камеры, где, например, она входит в дугогасительную ре-

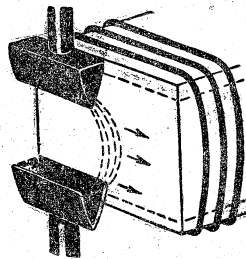


Рис. 20-1. Принцип магнитного дутья.

ш е т к у, состоящую из ряда стальных пластин, и делится на ряд коротких дуг между пластинами решетки, а затем вследствие энергичного охлаждения гаснет.

Эффект растягивания дуги достигается также за счет использования электродинамических сил взаимодействия отдельных частей дуги или дуги и токов в токоведущих частях аппарата.

20-2. Автоматические выключатели

Как мы уже отмечали, плавкие предохранители представляют собой простую и дешевую, но весьма несовершенную и часто недостаточную защиту электрических устройств от коротких замыканий и перегрузок; значительно совершеннее функции защиты выполняются в установках низкого напряжения автоматическими воздушными выключателями — так называемыми автоматами. Они производят отключение электрических цепей автоматически при нарушении нормальных рабочих условий, причем в зависимости от рода автомата это отключение производится или когда определенная электрическая величина переходит установленное предельное значение (максимальные и минимальные автоматы), или когда изменяется направление передачи энергии (автоматы обратной мощности).

Автомат максимального тока является наиболее распространенным из автоматических воздушных выключателей. Его принципиальная схема показана на рис. 20-2,а. Когда ток в защищаемой цепи достигает предельного значения, катушка *К* втягивает стальной сердечник и защелка *С* освобождает пружину *П*; последняя разрывает контакты *А* и, таким образом, выключает цепь. Конструктивные оформления этих автоматов весьма разнообразны.

Автоматы максимального тока в настоящее время применяются даже в осветительных сетях в жилых помещениях взамен плавких предохранителей. Обратное включение автомата производится от руки, причем часто автомат снабжается свободным расцеплением, благодаря которому перегруженная

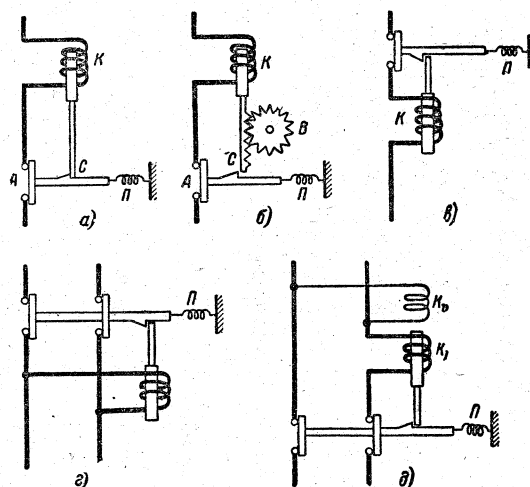


Рис. 20-2. Принципиальные схемы автоматических воздушных выключателей.

а — автомат максимального тока; б — автомат максимального тока с выдержкой времени; в — автомат минимального тока; г — автомат понижения напряжения; д — автомат обратной мощности.

цепь отключается, даже если включающий удерживает рукоятку автомата в положении включения.

В большинстве случаев автоматы снабжаются приспособлением для регулирования предельного тока, т. е. значения тока, при котором происходит отключение. Точность установки автомата на определенный предельный ток несравненно выше, чем при защите плавкими предохранителями, и в этом заключается одно из важных преимуществ автомата.

В силовых установках часто имеют место кратковременные толчки тока, не опасные для установки (например, пусковые токи двигателей); чтобы избежать отключения цепей при таких толчках тока, автоматы имеют выдержку времени (приспособление, которое создает определенный промежуток времени между воздействием тока на автомат и моментом отключения цепи). На рис. 20-2,б показан принцип подобного устройства: зубчатая система *В* не позволяет катушке *К* мгновенно втянуть сердечник и освободить защелку *С* — сначала колесико *В* должно повернуться на определенный угол; тем самым создается определенная выдержка времени, которую можно регулировать. Для механизма выдержки времени используются: масляный или воздушный тор-

моз, часовой механизм и т. д. Если толчок тока закончится прежде, чем механизм выдержки времени позволит освободить защелку, то сердечник вернется в исходное положение и отключение не произойдет.

Автомат минимального тока применяется в тех случаях, когда цепь должна быть отключена, если в ней или в одной из ее ветвей ток уменьшился ниже предельного значения. Принцип действия такого автомата поясняет рис. 20-2, в; катушка K удерживает сердечник и защелку до тех пор, пока ток в катушке не понизится до определенного предельного значения; тогда сердечник опускается и защелка освобождает пружину Π , которая размыкает контакты.

Автомат понижения напряжения (рис. 20-2, г) по принципу действия сходен с автоматом минимального тока. Он применяется, например, для защиты двигателей, снабженных пусковым реостатом: автомат отключает эти двигатели при понижении напряжения на их зажимах. При отсутствии такого автомата понижение напряжения или его исчезновение вызывают остановку двигателя, а затем при обратном повышении напряжения, вследствие того что пусковой реостат не введен, возникает большой пусковой ток, нежелательный для сети и опасный для двигателя.

Автомат обратной мощности применяется, например, для защиты параллельно работающих гене-

раторов от перехода к работе двигателем. Принцип действия такого автомата показан на рис. 20-2, д; катушка тока K_1 автомата при нормальном направлении передачи энергии создает магнитное поле, противоположное полю катушки напряжения K_U ; благодаря этому катушки не могут втянуть сердечник и освободить защелку C ; но при изменении направления передачи энергии меняется направление тока в катушке K_1 , поля катушек в этих условиях складываются и втягивают сердечник, что вызывает размыкание контактов цепи.

20-3. Контроллеры

Контроллеры представляют собой коммутационные аппараты, дающие возможность посредством простого поворота ручки или маховичка не только включать и выключать электрические цепи, но и производить сложные переключения элементов схемы управления электрических машин и аппаратов (например, пуск в ход, регулирование скорости, реверсирование, электрическое торможение). Применение контроллера чрезвычайно упрощает работу обслуживающего персонала (водителя электровоза, рабочего у специального станка и т. д.). Одним из наиболее распространенных типов контроллеров является барабанный контроллер (рис. 20-3). На изолированном вращающемся валу 1 такого контроллера укреплены имеющие различную длину сегменты 2 (отрезки медных колец). Сегменты служат подвижными контактами, причем отдельные сегменты смещены на различные углы по отношению друг к другу. Некоторые сегменты электрически соединены между собой. Неподвижные пружинящие контакты контроллера — так называемые контактные пальцы 3 — укреплены на неподвижном изолированном основании 4 . Каждому контактному пальцу соответствует определенный сегмент на вращающейся части.

Контактные пальцы изолированы друг от друга, к ним подведены провода, соединяющие контроллер с управляемой цепью.

При поворачивании вала 1 сегменты 2 в определенной последовательно-

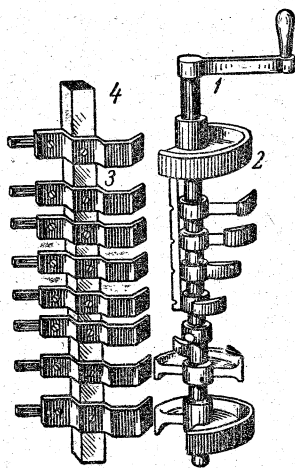


Рис. 20-3. Барабанный контроллер.

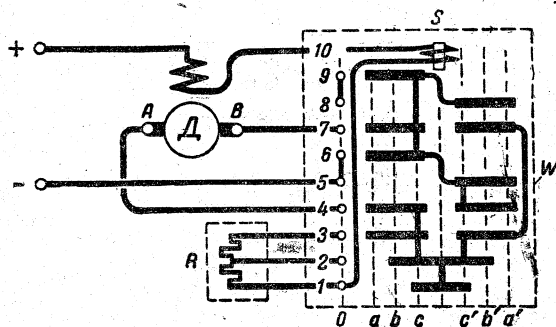


Рис. 20-4. Схема барабанного контроллера для управления двигателем последовательного возбуждения.

сти соприкасаются с контактными пальцами Z и таким путем осуществляются необходимые переключения в управляемой цепи.

В качестве примера применения контроллера для управления двигателем на рис. 20-4 показана развернутая на плоскость схема контроллера для пуска, регулирования скорости и реверсирования двигателя последовательного возбуждения. Здесь W — развернутый на плоскость барабанный контроллер. Вертикальный ряд кружочков слева за номерами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 обозначает контактные пальцы. Контроллер имеет семь различных положений: 0, a , b , c , a' , b' , c' . При положении 0 все контактные пальцы касаются лишь изолированной поверхности барабана и двигатель выключен. Поворот барабана в положение a (т. е. когда вертикальная линия a приходит под контактные пальцы) замыкает цепь тока, последний проходит через последовательную обмотку возбуждения двигателя, через катушку магнитного дутья S (служащую для гашения дуги в контроллере), через контактный палец 1, через все сопротивления реостата R , через палец 3 и два сегмента барабана в палец 4 и и через него в щетку A двигателя и затем в якорь; из последнего через щетку B в палец 7 и через два сегмента в палец 6 и в сеть.

При повороте барабана в положение b отключается половина сопротивления реостата R , а при повороте в положение c реостат отключается полностью и двигатель оказывается под полным напряжением сети. Включение

сопротивления R может быть использовано как для пуска в ход, так и для регулирования скорости двигателя (конечно, во втором случае реостат должен быть рассчитан на длительную нагрузку рабочим током двигателя).

Если повернуть барабан из положения 0 не в положение a , а в положение a' , то ток в якоре двигателя переменит направление и двигатель будет вращаться в обратную сторону.

20-4. Контактторы

Контактторы представляют собой аппараты, предназначенные для повторных замыканий и размыканий участков электрических цепей в схемах пуска и управления электрическими машинами. В случаях больших токов и высоких напряжений весьма затруднительно осуществить безопасное и удобное ручное управление электрическими машинами; с другой стороны, относительно просто изготовить управляемый на расстоянии аппарат (обычно это электромагнитный контактор), способный отключать большие токи при высоком напряжении. Управление контактором осуществляется посредством вспомогательной цепи оперативного тока, проходящего по катушкам контактора, причем это управление выполняется простым нажимом одной кнопки в цепи оперативного тока.

На рис. 20-5 показано устройство электромагнитного контактора постоянного тока. Оперативный (вспомогательный) ток проходит по катушке контактора и притягивает к ее сердечнику стальной якорь; последний, поворачиваясь вокруг оси, замыкает главные контакты в цепи рабочего тока. Пружина обеспечивает хороший нажим подвижного контакта. Главная цепь присоединена к зажимам 1 и 2, ее ток проходит в контакторе через катушку магнитного дутья, главные контакты и соединительный гибкий провод.

Рассматриваемый контактор, помимо главной цепи, замыкает также контакты в цепи оперативного тока — так называемые блок-контакты, служащие для выполнения вспомогательных операций управления.

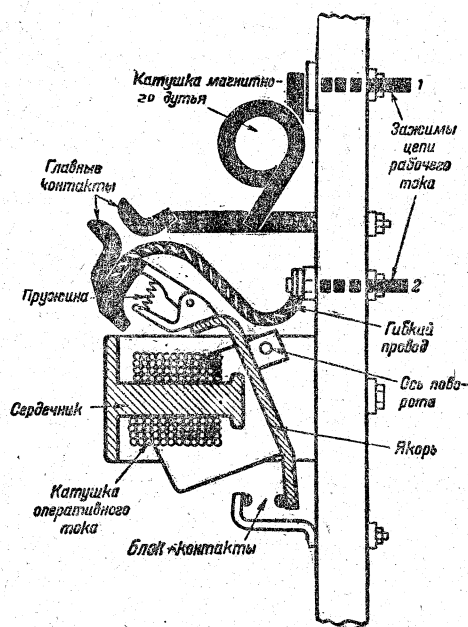


Рис. 20-5. Схема устройства электромагнитного контактора.

Магнитным пускателем называется комплектное устройство управления машиной, состоящее из электромагнитных контакторов, теплового реле и кнопок управления. На рис. 20-6 показана схема магнитного нереверсивного пускателя переменного тока серии П. Управление пускателем осуществляется посредством двух кнопок: «пуск» и «стоп», находящихся вне ящика пускателя, под рукой у рабочего. При нажатии кнопки «пуск» замыкается цепь оперативного тока — от провода А сети через контакты 4 одного теплового реле 5, через катушку 1 контактора, через контакты 4

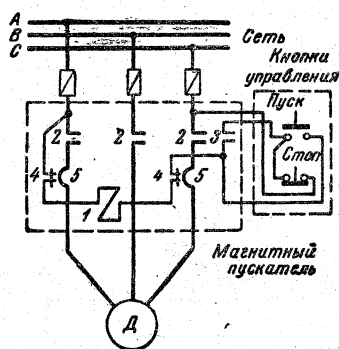


Рис. 20-6. Схема магнитного нереверсивного пускателя переменного тока типа П.

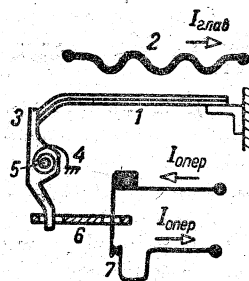


Рис. 20-7. Принципиальная схема теплового реле.

второго теплового реле 5, через контакты кнопок «пуск» и «стоп» к проводу С сети. Под действием оперативного тока снабженный катушкой 1 электромагнит трехполюсного контактора притянет подвижный якорь. С последним жестко соединены главные подвижные контакты 2 (образующие двукратный разрыв цепи главного тока в каждой фазе) и блок-контакты 3 в цепи оперативного тока. Все эти контакты замкнутся, и двигатель будет пущен в ход.

Замыкание блок-контактов 3 нужно для того, чтобы замкнуть цепь оперативного тока помимо контактов кнопки «пуск» и, таким образом, предупредить размыкание оперативного тока, когда кнопка «пуск» после нажатия возвратится в исходное положение.

Нажатие кнопки «стоп» размыкает цепь оперативного тока, катушка 1 контактора освобождает якорь, и главные контакты 2 под действием пружин размыкаются; двигатель останавливается.

Для защиты двигателя от перегрузок пускатель снабжен двумя тепловыми реле. Такое реле действует при помощи биметаллического элемента, который представляет собой две механически связанные пластины из металлов с различными температурными коэффициентами расширения. На рис. 20-7 показана принципиальная схема устройства теплового реле. Тепло, выделяемое нагревателем 2, включенным в цепь главного тока, воздействует на биметаллический элемент 1. При перегрузке в цепи главного тока обе пластины биметаллического элемента, нагреваясь, значительно удлиняются, но одна из них удлиняется

больше, вследствие чего биметаллическая пластина изгибается вверх и выходит из зацепления с защелкой 3. Последняя под действием пружины 4 поворачивается вокруг оси 5 по часовой стрелке и посредством изоляционной тяги 6 размыкает контакты 7 реле, прерывая цепь оперативного тока, что действует так же, как нажатие кнопки «стоп». Из-за значительной тепловой инерции тепловые реле не обеспечивают защиты от токов короткого замыкания, поэтому для защиты от внезапных коротких замыканий в цепи главного тока должны быть установлены плавкие предохранители.

20-5. Выключатели высокого напряжения

Размыкание контакта выключателя в воздухе, начиная примерно с 500 в, становится затруднительным даже для небольших мощностей — при таком выключении возникает длинная электрическая дуга, время выключения затягивается, контакты выключателя быстро разрушаются вследствие сильного обгорания.

Чтобы улучшить условия отключения, можно поместить разрывающие ток контакты в бак с маслом, как это сделано в масляных выключателях. Масляный выключатель в первоначальной своей форме представлял собой выключатель с рубящими контактами, помещенный в бак с ми-

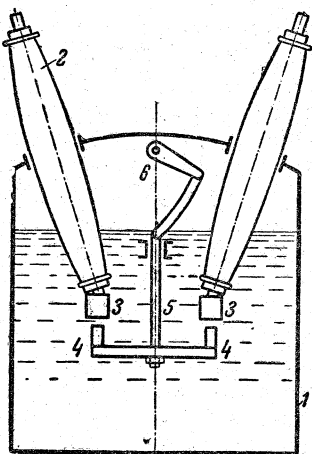


Рис. 20-8. Принципиальная схема устройства бакового масляного выключателя.

неральным маслом. Современные масляные выключатели можно разделить на выключатели с простым удлинением дуги вследствие расхождения контактов и выключатели со специальными устройствами для гашения дуги. На рис. 20-8 показана принципиальная схема устройства масляного выключателя первого типа. Основными частями этого выключателя являются: бак с маслом 1, проходные изоляторы 2, укрепленные на массивной крышке бака, неподвижные верхние контакты 3, укрепленные на концах изоляторов, подвижные нижние контакты 4, металлически соединенные между собой и укрепленные на изолирующей штанге 5; эта последняя поднимается посредством рычажного приспособления 6 с длинным валом и маховичком или со специальными тягами.

Система, несущая подвижные контакты (траверса), отжимается книзу пружинами (не показанными на схеме) и действием собственной тяжести; во включенном положении она удерживается запорными механизмами привода, и как только запирающий механизм освобожден, она падает вниз и размыкает цепь тока.

Когда выключатель замкнут, ток проходит через один ввод, неподвижные и подвижные контакты и второй ввод. При выключении, когда система подвижных контактов движется вниз, цепь тока разрывается в двух местах (выключатель с двукратным разрывом) и образуется электрическая дуга. Вследствие высокой температуры дуги окружающие ее слои масла испаряются и разлагаются, благодаря чему вокруг расходящихся контактов образуется газовый пузырь. Таким образом, в масляном выключателе дуга, возникающая при размыкании контактов, горит в газовой среде при повышенном давлении. Последнее важно, так как с повышением давления электрическая прочность газовой среды быстро возрастает. По мере увеличения расстояния между контактами возрастает длина дуги, а следовательно, увеличивается и напряжение, которое нужно для поддержания дуги. При переменном токе каждые полпериода ток проходит через нулевое значение и дуга гаснет. Однако во время прохождения тока в

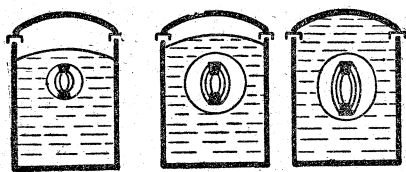


Рис. 20-9. Образование газового пузыря в баке масляного выключателя при размыкании контактов.

дуговым промежутке образуется значительное количество ионов (главным образом за счет термической ионизации газа); при гашении дуги благодаря падению температуры начинается сильное перемешивание ионизированных и неионизированных горячих и холодных газов, вследствие чего происходит интенсивная деионизация дугового промежутка; тем не менее некоторое время после гашения дуги в дуговом промежутке еще будет содержаться значительное количество свободных ионов. Затем, если изменяющееся по времени напряжение между размыкающимися контактами станет больше пробивного напряжения дугового промежутка, то произойдет вторичное зажигание дуги и она будет гореть еще полпериода до нового нулевого значения тока, пока, наконец, в один из моментов прохождения тока через нуль дуга не погаснет окончательно.

Количество газа, образующегося в масляном выключателе, может быть весьма значительным. Газ вытесняет масло кверху и, кроме того, создает давление на стенки и дно бака. Из-за обязательного наличия свободного воздушного пространства («буферного пространства») между уровнем масла оно может подняться кверху и освободить место для газового пузыря (рис. 20-9). Тем не менее процесс протекает весьма бурно и масло с силой ударяет в крышку выключателя. Для выхода воздуха при подъеме масла, а также для выхода газов масляный выключатель снабжается газоотводами. Все же кинетическая энергия масла, ударяющего в крышку выключателя, бывает весьма значительна и при недостаточно прочной конструкции внутреннее давление может разрушить выключатель. Такой взрыв масляного выключателя обычно сопровождается

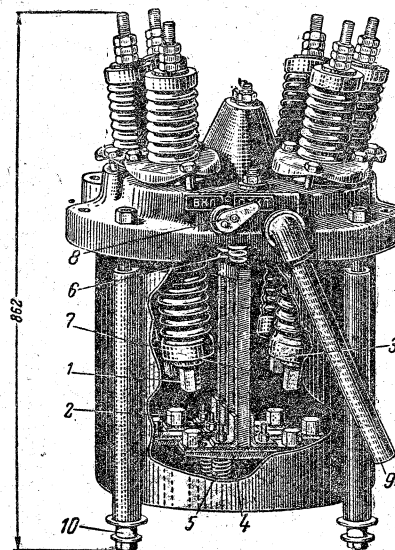


Рис. 20-10. Масляный выключатель типа ВМБ-10 на 10 кВ, 400 а.

1—неподвижный контакт; 2—подвижной контакт; 3—изолятор; 4—контактная траверса; 5—контактные пружины; 6—отключающие пружины; 7—траверса; 8—указатель положения выключателя; 9—газоотводная труба (смещена в сторону); 10—предохранительная тонкостенная трубка.

загоранием масла вследствие соединения горячих продуктов разложения с кислородом воздуха.

По этим причинам баковые масляные выключатели должны устанавливаться в отдельных, достаточно прочных так называемых взрывных ячейках, имеющих выход наружу. Эти ячейки должны быть полностью изолированы от других частей распределительного устройства.

Примером многообъемного масляного выключателя без специальных дугогасящих устройств может служить показанный на рис. 20-10 с разрезом части бака трехфазный выключатель типа ВМБ-10 (выключатель масляный баковый). Отдельные детали его устройства достаточно пояснены на рисунке. Газоотводная труба 9, соединяющая буферное пространство выключателя с окружающим воздухом, имеет относительно малое сечение и не может полностью предупредить возникновение опасного давления в баке при ненормальных условиях отключения. Поэтому выключатель снабжен простейшим предохранительным устройством против чрезмерного повышения давления: на проходящие через

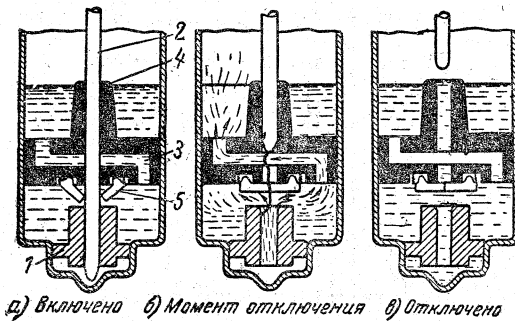


Рис. 20-11. Гашение дуги в камере масляного выключателя МГГ.

крышку соединительные болты надеты тонкостенные трубки, на которые и опирается бак. При опасном давлении в баке эти трубки сминаются, бак опускается и между крышкой и стенками бака образуется круговой зазор. Ту же роль в других конструкциях выключателей играет металлическая мембрана, закрывающая выхлопное отверстие и разрывающаяся при опасном давлении.

Многообъемные масляные выключатели без специальных дугогасящих устройств являются недостаточно совершенными отключающими аппаратами, так как они не удовлетворяют в должной мере требованиям надежности, безопасности и простоты обслуживания. Вследствие этого они постепенно вытесняются более совершенными выключателями и в настоящее время применяются главным образом при напряжениях не выше 10 кВ в установках небольшой мощности.

Важными усовершенствованиями масляных выключателей являются применение специальных дугогасящих устройств и уменьшение количества масла в баке выключателя.

В качестве примера дугогасительного устройства на рис. 20-11 показана схема и принцип действия дугогасительного устройства с поперечным масляным дутьем, применяемого в современных советских масляных выключателях. Размыкание контактов выключателя здесь происходит внутри стального цилиндра, внутренняя поверхность которого покрыта листовым изолирующим материалом, чтобы предупредить перебрасывание дуги на

стенки цилиндра. Внутреннее пространство цилиндра разделяется изолирующей перегородкой 3 на две камеры. В этой перегородке имеются центральное отверстие для подвижного стержневидного контакта («дугогасящего стержня») 2 и поперечная щель для масляного дутья. Во включенном положении подвижной контакт 2 входит в розеточный неподвижный контакт 1 и отжимает в стороны две латунные заслонки 5, снабженные пружинами. В начале отключения дуга возникает между подвижным контактом 2 и неподвижным розеточным контактом 1. Эта дуга вызывает образование газов и создает давление в нижней камере. Когда подвижной контакт 2 выходит из нижней камеры, тогда заслонки 5 захлопываются, закрывая центральный канал перегородки, и дуга поддерживается уже между заслонками 5 и стержнем 1. Давление газов в нижней камере создает поток масла в поперечной щели, под действием которого дуга быстро гаснет.

В масляных выключателях с малым объемом масла (рис. 20-12) последнее служит только дугогасящей средой и не предназначено для изоляции токоведущих частей от заземленных, поэтому баки 1 выключателя изолируются от земли (от рамы 5) фарфоровыми изоляторами 2.

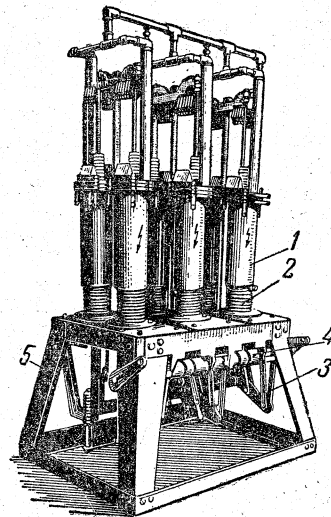


Рис. 20-12. масляный выключатель МГГ-229 на 10 кВ и 4 000 а.
1 — бак; 2 — опорный изолятор; 3 — приводной рычаг для соединения с приводом; 4 — вал; 5 — рама.

Один токоподводящий проводник в этих выключателях присоединяется непосредственно без изоляции к крышке масляного резервуара. Вследствие этого бак выключателя, изолированный от земли фарфоровым изолятором, опасен для прикосновения. Масляный резервуар у большинства подобных выключателей горшковидный.

В показанном на рис. 20-12 масляном выключателе этого типа применены дугогасительные камеры с поперечным масляным дутьем. Малый объем масла делает подобные выключатели менее опасными в отношении взрыва и пожара, что позволяет упростить их установку.

Наиболее совершенными выключателями высокого напряжения (35—220 кВ) являются выключатели со сжатым воздухом («воздушные выключатели»). В них струя сжатого воздуха (при давлении от 7 до 20 ат) выдувает и разрывает дугу. По сравнению с масляным выключателем воздушный выключатель имеет меньший вес¹, габариты и время отключения и включения. Недостатком этих выключателей является потребность в системе подачи сжатого воздуха от компрессора, причем воздух должен быть очищен и просушен.

Масляные выключатели всегда выполняются в виде автоматических выключателей. С этой целью приводное устройство снабжается защелкой и храповичком, удерживающими подвижные контакты во включенном положении (рис. 20-13). При коротком замыкании или перегрузке электромагнит, управляемый рабочим током, отодвигает защелку и освобождает сильную пружину, действующую на подвижной контакт; последний, быстро перемещаясь, размыкает цепь тока. Таким образом, масляный выключатель на стороне высокого напряжения играет роль предохранителя при коротких замыканиях и перегрузке. Но чем больше ток короткого замыкания, тем большее количество тепла должно выделиться в дуге при выключении, тем труднее условия для гашения дуги

¹ Масляный выключатель на 220 кВ с мощностью отключения 2,5 млн. кВА весит 100 т, воздушный выключатель на те же напряжения и мощность весит 15 т.

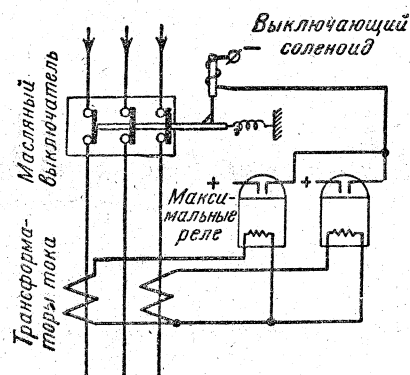


Рис. 20-13. Принципиальная схема автоматического отключения масляного выключателя от максимального тока.

в выключателе. Каждый масляный выключатель может надежно разрывать токи короткого замыкания не выше определенного значения. Поэтому при выборе масляного выключателя, помимо номинальных напряжений и тока, необходимо знать также и предельный отключаемый ток; это тот наибольший ток, который масляный выключатель может отключить при данном напряжении, причем выключение должно происходить без выбрасывания пламени и без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе. Выбор масляных выключателей, как и большей части аппаратуры высокого напряжения, производится на основании специального расчета токов короткого замыкания.

Для отключения цепей высокого напряжения при осмотре, ремонте и т. д., а также для некоторых переключений широко применяются разъединители; они представляют собой простейший тип выключателя высокого напряжения, который можно размыкать под напряжением, но не под током. Разъединители имеют разные конструкции; на рис. 20-14 показан разъединитель, каждый полюс которого смонтирован на двух изоляторах; на одном изоляторе укреплен подвижной нож, на другом — неподвижные пружинящие контакты, в которые в замкнутом положении входит нож.

Включение и выключение разъединителей осуществляются посредством изолированной штанги или разъедини-

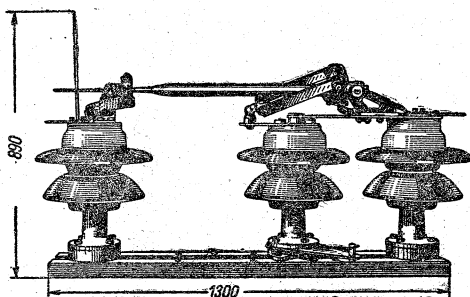


Рис. 20-14. Разъединитель для наружной установки на 35 кв.

тели снабжаются приводами с тягами из изолирующего материала.

Разъединители рассчитаны на отключение цепи при отсутствии тока, масляные и воздушные выключатели — на отключение не только рабочих токов нагрузки, но и во много раз больших токов короткого замыкания. В условиях эксплуатации часто оказывается нужным отключение отдельной нагрузки при токах, не превышающих нормального рабочего. Установка дорогого и громоздкого масляного выключателя в подобных условиях нецелесообразна. Для подобных условий советская электропромышленность создала воздушный выключатель нагрузки — это выключатель промежуточного типа, рассчитанный на отключение рабочего тока нагрузки, но не предназначенный для выполнения функций защиты — автоматического отключения токов короткого замыкания; для отключения этих токов цепь должна быть еще защищена плавкими предохранителями высокого напряжения.

20-6. Реле и релейная защита

Для обеспечения бесперебойности работы электрических установок сильного тока необходимо быстрое устранение всякого рода факторов, нарушающих эту работу; в крупных электрических установках, и в особенности на станциях и подстанциях, это выполняется автоматически релейной защитой.

Реле в общем смысле этого слова принято называть аппарат, служащий для приведения в действие или регулирования режима какой-либо мощной

системы при воздействии на реле относительно малой мощностью. Реле электрическое есть механизм, который приводит в действие добавочные электрические цепи или механические приспособления при воздействии на него электрических факторов. Механизм реле состоит из воспринимающей и исполнительной частей; первая воспринимает действие электрических факторов и приводит в действие исполнительную часть, которая и выполняет ту или иную работу.

Реле, применяемые для защиты, могут реагировать на изменения тока, напряжения, мощности, температуры и т. д.

Реле срабатывают при выходе электрического фактора за назначенные ему пределы. В зависимости от характера изменения, вызывающего срабатывание, реле разделяются на:

- а) максимальные, действующие, когда электрическая величина повышается сверх определенного, заранее установленного значения;
- б) минимальные, действующие, когда электрическая величина понижается ниже определенного, заранее установленного значения;
- в) дифференциальные, воспринимающая часть которых реагирует на разность механических моментов, вызываемых действием двух сравниваемых однородных электрических величин.

Действие защиты должно быть избирательным (селективным): при повреждении должны отключаться только выключатели, ближайšie к месту повреждения, тогда после выключения вся остальная сеть будет продолжать бесперебойно работать.

Одним из способов достижения избирательности защиты является выдержка времени, которая осуществляется или в самом реле, или путем включения специального реле времени. При наличии выдержки времени между моментом воздействия импульса на реле и моментом срабатывания исполнительной части реле происходит строго определенный промежуток времени, обусловленный не только инерционными свойствами подвижной системы реле, но и специальными приспособлениями для создания выдержки

времени. В зависимости от скорости и продолжительности действия воспринимающих частей реле делятся на реле безынерционные (например, электронные реле), реле мгновенно действующие (со временем срабатывания не больше 0,10 сек) и реле с выдержкой времени. Выдержка времени может быть сделана зависимой или независимой от величины нарушения режима.

Наиболее простой и дешевой защитой с выдержкой времени является максимальная токовая защита, осуществляемая посредством реле максимального тока с выдержкой времени. Как показывает само название, защита эта действует тогда, когда ток в защищаемой сети превысит некоторое определенное значение. Избирательность выключения при этой защите достигается применением различных выдержек времени, тем больших, чем ближе пункт установки реле к источнику электроснабжения. У наиболее удаленного участка выдержка времени обычно может быть взята равной нулю и, таким образом, время действия защиты в этом пункте определяется лишь собственным временем действия реле. Основным недостатком этой защиты является чрезмерное повышение выдержки времени близ источников питания, что противоречит принципу быстроты отключения аварии.

По способу включения реле разделяются на первичные, воспринимающая часть которых включается непосредственно в защищаемую цепь, и вторичные, включаемые в цепь через измерительные трансформаторы.

По способу действия различают реле прямого действия, воздействующие непосредственно на механизм выключателя, и реле косвенного действия, управляющие только цепью вспомогательного оперативного тока (рис. 20-13), служащего для воздействия

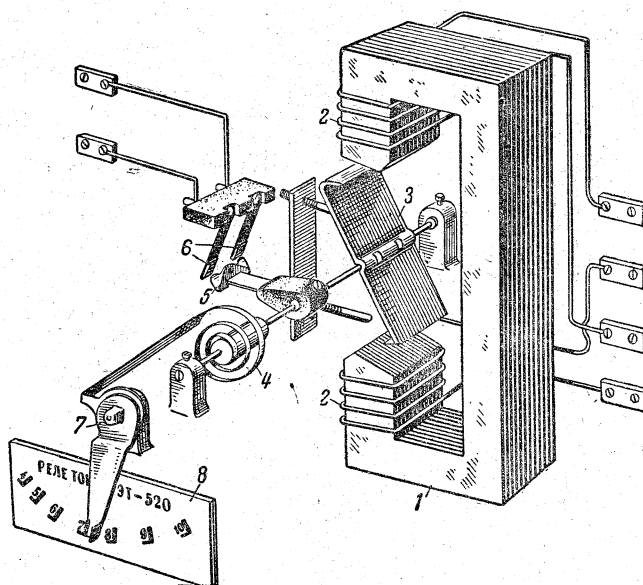


Рис. 20-15. Электромагнитное токовое реле с вращающимся якорем.

1 — магнитопровод; 2 — обмотки электромагнита; 3 — якорь; 4 — противодействующая пружина; 5 — подвижной контакт; 6 — неподвижные контакты; 7 — поводок для изменения установки реле изменением натяжения пружины; 8 — шкала.

на отключающий механизм выключателя.

На рис. 20-15 схематически показано вторичное реле косвенного действия электромагнитной системы (максимальное токовое реле мгновенного действия серии ЭТ). Катушки этого реле включаются во вторичную цепь трансформатора тока; когда ток проходящий по ним, достигает значения тока трогания, Z-образный стальной якорь 2 поворачивается и подвижной контакт 4, касаясь неподвижного контакта 5, замыкает цепь оперативного тока. Так как контакты реле рассчитаны на замыкание относительно небольших токов, недостаточных для расцепления механизма выключателя, то в большинстве случаев рассматриваемое реле замыкает цепь тока промежуточного реле, а последнее уже посредством более мощных контактов замыкает цепь оперативного тока, отключающего масляный выключатель. Промежуточное реле в большинстве случаев выполняется электромагнитным (рис. 20-16). Ток, замыкаемый главным реле, притягивает стальной сердечник 3 к катушке 2 промежуточного реле и при этом замыкает кон-

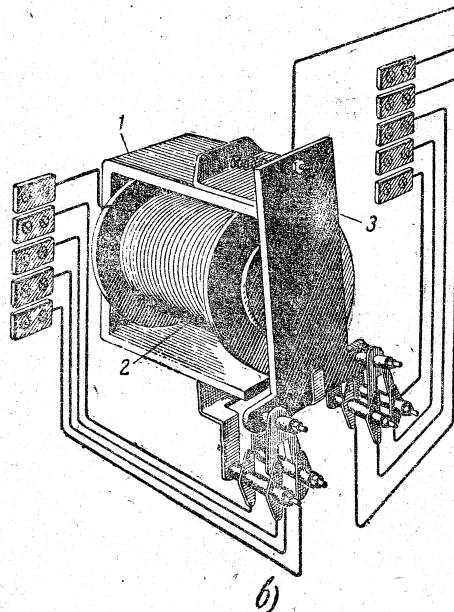
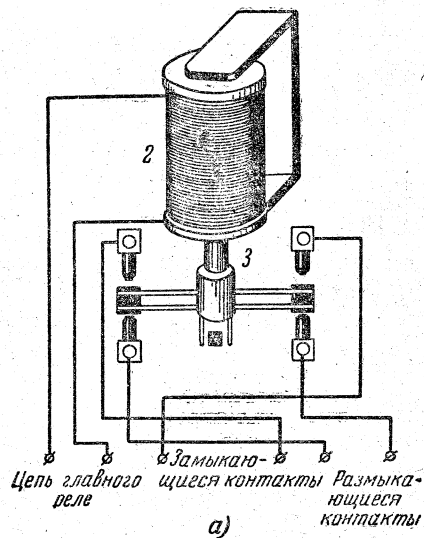


Рис. 20-16. Промежуточное электромагнитное реле с двумя размыкающимися и двумя замыкающимися контактами.

а — принципиальная схема; б — конструктивное оформление аппарата.

такты цепи оперативного тока, воздействующего на выключатель. Контактная система промежуточного реле может быть довольно сложной: реле может одновременно замыкать цепи оперативного тока нескольких выключателей; на рис. 20-16 при втягивании сердечника размыкаются контакты од-

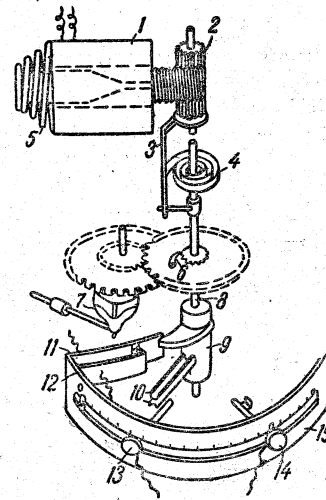


Рис. 20-17. Конструкция и принцип действия реле времени типа ЭВ.

1 — обмотка; 2 — колесо; 3 — поводок; 4 — пружина; 5 — пружина; 6 — храповичок; 7 — часовой механизм; 8 — ось; 9 — втулка; 10 — подвижной контакт; 11 и 12 — мгновенные контакты; 13 и 14 — неподвижные контакты; 15 — шкала.

ной цепи и замыкаются контакты второй цепи.

Главное реле рис. 20-15 не имеет приспособления для выдержки времени, и если нужно создать эту выдержку, то между главным реле и выключателем должно быть введено реле времени.

На рис. 20-17 показана схема устройства электромагнитного реле времени.

Когда по обмотке катушки 1 проходит ток, тогда сердечник (показанный на рисунке пунктиром) втягивается в катушку, сжимая возвратную пружину 5. При этом червячная передача 2, с осью которой соединен сердечник, через поводок 3 заводит ведущую пружину 4 часового механизма 7. Под действием этой пружины начинает работать система часового механизма, благодаря действию которой вал 9 вращается со строго определенной скоростью. На этом валу укреплен подвижной контакт 10; при перемещении последнего в реле замыкаются поочередно три различных контакта: 1) мгновенный контакт (11—12) с выдержкой времени 0,1 сек; 2) скользящий контакт 13, замыкающийся после установленной выдержки времени и дающий замыкание це-

пи, пока контакты 10 скользят по его поверхности; 3) контакт 14, имеющий упор, ограничивающий ход контакта 10.

Установка выдержки времени реле достигается перемещением по шкале контактов 13—14.

Реле косвенного действия требует отдельного источника оперативного тока. Этот ток может быть переменным или постоянным. Источниками переменного оперативного тока могут слу-

жить трансформаторы напряжения или специальные трансформаторы тока. Постоянный ток применяется в качестве оперативного для установок с достаточно сложной защитой, а также в тех случаях, когда источник постоянного тока необходим для других целей (аварийное освещение, сигнализация и т. д.). Для получения постоянного оперативного тока служат аккумуляторные батареи 24, 110 и 220 в.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

21-1. Развитие электрического освещения

Улучшение освещения в промышленности несет с собой повышение производительности труда и качества продукции, уменьшение брака и числа несчастных случаев. В себестоимости продукции расходы на освещение обычно составляют малую долю, поэтому увеличение этих расходов с лихвой окупается. Инженер любой специальности должен видеть в рационализации освещения одно из важных средств борьбы за повышение производительности труда, улучшение его условий и снижение себестоимости продукции. Увеличение освещенности рабочих мест обеспечивается ростом энергетической базы нашей Родины, предусмотренным семилетним планом. В 1965 г. выработка электроэнергии для целей освещения должна составить 70—75 млрд. квт·ч.

Развитие практической электротехники в первый период ее существования было тесно связано с распространением и развитием электрического освещения. Первоначально электрическая энергия применялась почти исключительно для освещения, так как для каких-либо иных целей она была слишком дорогой, а преимущества электрического освещения перед всеми другими способами искусственного освещения были очевидны даже на первых этапах развития электротехники.

Наше отечество является родиной электрического освещения. Впервые на возможность применения электрического тока для целей освещения указал академик, первый русский электротехник Василий Владимирович Петров (1761—1834 гг.), который открыл электрическую дугу и предсказал многочисленные ее применения.

Задача практического применения дуги для целей освещения была удачно решена П. Н. Яблочковым, построившим «электрическую свечу», не требовавшую применения регуляторов для управления процессом горения (1876 г.). Свеча Яблочкова получила довольно широкое распространение; на Парижской всемирной выставке в 1878 г. ее называли «рус-

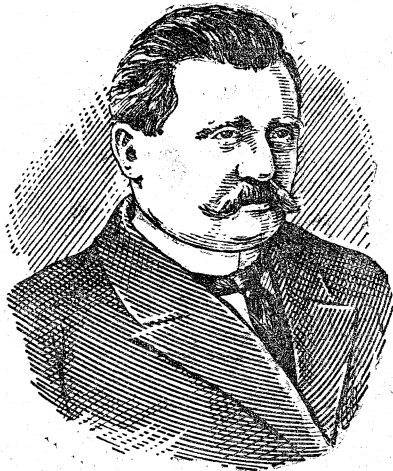
ским светом» или «северным светом»; даже в царской России в 1881 г. было установлено свыше 500 фонарей со свечами Яблочкова, за границей их было значительно больше.

Электрическая дуга — слишком мощный источник света для жилых помещений. Потребность в электрическом источнике света для широкого применения была удовлетворена изобретенной А. Н. Лодыгиным лампой накаливания с угольной нитью (1873 г.). Поместив эту нить в откачанный стеклянный баллон, он создал прототип современной лампы накаливания. В 1890 г. А. Н. Лодыгин получил патент на лампу накаливания с металлической нитью из тугоплавкого металла (вольфрама, молибдена, тантала). Лампа накаливания с вольфрамовой нитью и по сегодняшний день остается самым распространенным электрическим источником света.

Таким образом, русские электрики изобрели важнейшие электрические источники света, но почвы для практического применения их изобретений в царской России не было. Лампы накаливания были изобретены в России, а в 1913 г. более 90% потребности России в этих лампах покрывалось импортом. Небольшие полукустарные фабрики ламп накаливания в Москве и Петербурге ввозили нити накаливания и ряд деталей ламп из-за границы.

Само электрическое освещение в дореволюционной России представляло собой роскошь, доступную только господствующему классу. В 1913 г. в центре Москвы большое число домов освещалось керосиновыми лампами, а на рабочих окраинах электрическое освещение совершенно отсутствовало. Искусственное освещение промышленных предприятий было так плохо, что быстро портило зрение рабочим. В деревне об электрическом освещении и не слыхивали.

Лишь после Великой Октябрьской социалистической революции электрическое освещение получает широкое распространение. Одним из первых проявлений заботы советской власти о благосостоянии трудящихся было повсеместное электрическое освещение домов рабочих, — из роскоши, доступной лишь богатым,



Александр Николаевич Лодыгин
(1847—1923 гг.)

электрический свет стал достоянием широких трудящихся масс, сначала города, а затем и деревни. Недаром электрическая лампочка в советской деревне получила ласковое многозначное имя «лампочка Ильича». Был построен ряд заводов, которые ежегодно выпускают миллионы ламп накаливания. Не останавливаясь на этом, советские люди выполнили большую работу по организации промышленного производства и изобретения новых более совершенных «холодных» электрических источников света, сначала газоразрядных ламп, а затем люминесцентных ламп.

Рост материальной культуры Советского Союза находит свое отражение и в том ярком зареве электрических огней над советскими городами там, где 40 лет назад тускло мерцали редкие керосиновые фонари.

Учение об электрическом освещении составляет часть светотехники — науки об искусственном получении видимой лучистой энергии и о техническом использовании этой энергии. Кроме вопросов осветительной техники (источники света, осветительные приборы, оборудование осветительных устройств и экономика освещения), светотехника изучает также вопросы: световой проекции (в частности, кино), световой сигнализации и т. п. Далее, так как получение и использование видимой лучистой энергии часто тесно связаны с получением и использованием ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, то современная светотехника рассматривает также и ряд вопросов получения и использования этих излучений вместе с видимой лучистой энергией или обособленно: лечебное облучение, облучение для обеззараживания воздуха и пищевых продуктов, облучение животных и растений для сельскохозяйственных целей, производственную сушку и нагрев посредством лучистой энергии, облучение светящихся красок и т. п. В настоящей главе мы ограничиваемся лишь кратким изложением основных принципов осветительной техники.

21-2. Светотехнические величины и единицы

Светящееся тело посылает в окружающее пространство энергию — электромагнитные волны весьма большой частоты. Лишь часть этой лучистой энергии, действуя на человеческий глаз, вызывает в нем ощущение света, этим свойством обладают только те колебания, длина волны которых лежит приблизительно в пределах от 380 нм (фиолетовый цвет) до 770 нм (красный цвет)¹.

Чувствительность глаза к излучению различных длин волн в этих пределах неодинакова, как показывает кривая относительной видности (рис. 21-1), нормальный глаз обладает наибольшей чувствительностью к излучению, имеющему длину волны $\lambda = 555$ нм (желтые лучи).

Чувствительность глаза к этому излучению условно принята за единицу относительной видности (V_λ). Относительная видность излучения с другой длиной волны меньше единицы: так, например, для длины волны $\lambda = 460$ нм относительная видность $V_\lambda = 0,06$; это означает, что 1 вт излучения с этой длиной волны вызывает в глазу человека световое ощущение такой же силы, как 0,06 вт излучения длины волны $\lambda = 555$ нм. Поэтому мощность, излучаемая источником света в пределах видимой части спектра, не может служить мерой даваемого этим источником количества света; такой мерой служит так называемый световой поток, определяемый как мощность лучистой энергии, оцениваемая по световому ощущению, которое она вызывает

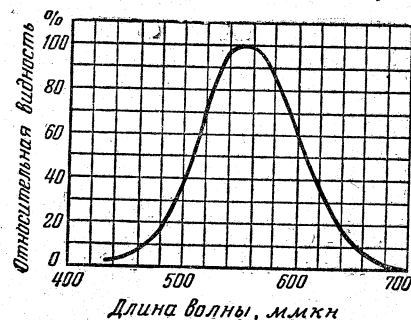


Рис. 21-1. Кривая относительной видности излучения и зависимости от длины волны.

в нормальном человеческом глазу. Таким образом, световой поток однородного (мономатического) излучения мощностью P_λ , имеющего длину волны λ , равен произведению мощности лучистой энергии на относительную видность данной длины волны, т. е.

$$F_\lambda = P_\lambda V_\lambda. \quad (21-1)$$

Мощность сложного излучения представляет сумму мощностей отдельных мономатических излучений

$$P = \Sigma P_\lambda,$$

¹ нм — нанометр единица измерения длины световых волн. $1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ мм} = 1 \text{ миллимикрон} = 10 \text{ ангстрем}$.

она дает световой поток

$$F = \Sigma P_{\lambda} V_{\lambda}. \quad (21-2)$$

Единицей светового потока служит люмен (*лм*)—это световой поток, испускаемый полным платиновым излучателем (абсолютно черным телом) при температуре затвердевания платины с площади в $5,305 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$. Световому потоку в 1 *лм* соответствует приблизительно но мощность излучения в $\frac{1}{683} \text{ вт}$ при длине волны 555 *нм*. Если мощность излучения дана в ваттах, то для выражения светового потока в люменах необходимо в формулы (21-1) и (21-2) ввести множитель 683:

$$F = 683 \Sigma P_{\lambda} V_{\lambda}.$$

Приведем пример определения светового потока: натриевая лампа испускает в видимой части спектра 12 *вт* излучения длины волны $\lambda = 590 \text{ нм}$. Относительная видность для $\lambda = 590 \text{ нм}$ равна $V = 0,76$ (рис. 21-1); таким образом, излучение лампы вызывает такое же световое ощущение, что и $12 \cdot 0,76 = 9,1 \text{ вт}$ излучения длины волны $\lambda = 555 \text{ нм}$; поэтому световой поток данной лампы равен $9,1 \cdot 683 = 62153 \text{ лм}$.

В качестве примера приведем значения светового потока нескольких источников света:

Лампа накаливания 15 <i>вт</i>	125 <i>лм</i>
Люминесцентная лампа 15 <i>вт</i> (БС)	560 <i>лм</i>
Лампа накаливания 500 <i>вт</i>	9100 <i>лм</i>
Лампа накаливания 10 <i>квт</i>	280000 <i>лм</i>

Для характеристики распределения светового потока источника по различным направлениям в пространстве применяется понятие силы света. Силой света I источника называется отношение потока, излучаемого источником в телесном угле ω , к величине этого телесного угла, т. е. силой света называется угловая плотность светового потока (рис. 21-2)

$$I = \frac{F}{\omega}. \quad (21-3)$$

Средней сферической силой света I_0 источника называется отношение полного светового потока источника к полному телесному углу вокруг точки, равному 4π . При неравномерном распределении потока в пределах угла ω

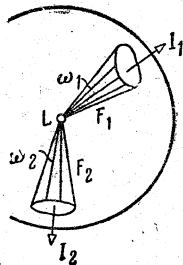


Рис. 21-2. Определение силы света как угловой плотности светового потока.

сила света в заданном направлении выражается отношением

$$I = \frac{dF}{d\omega}.$$

Единицей силы света служит международная свеча (*св*)*, определяемая как сила света точечного источника в тех направлениях, в которых он излучает равномерно распределенный световой поток в 1 *лм* внутри телесного угла в 1 стерадиан (*стер*)**, т. е.

$$1 \text{ св} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ стер}}.$$

Приводим в качестве примера значения силы света различных источников:

Автомобильные лампы	3—21 <i>св</i>
Лампа накаливания 1000 <i>вт</i>	1500 <i>св</i>
Дуговая лампа интенсивного горения	1000000 <i>св</i>
Прожектор дальнего действия	До 10^9 св

Наименование «свеча» для единицы силы света установилось исторически. В действительности эта основная светотехническая единица определяется посредством специального светового эталона.

Весьма важными для характеристики источников света являются кривые силы света. При построении этих кривых значения силы света в различных направлениях откладывают от точки, изображающей световой центр источника (рис. 21-3).

Если же измерить силу света во всех направлениях пространства, то совокупность кривых силы света определит фотометрическое тело источника света.

Для того чтобы характеризовать интенсивность освещения, в светотехнике употребляется понятие освещенности.

Освещенностью E поверхности называется поверхностная плотность светового потока, т. е. отношение светового потока F к величине освещаемой им поверхности:

$$E = \frac{F}{S}.$$

При неравномерном распределении потока освещенность в данной точке определяется из соотношения

$$E = \frac{dF}{dS}. \quad (21-4)$$

Освещенность измеряется в люксах.

Люкс (*лк*) есть поверхностная плотность светового потока в 1 *лм*, равномерно распределенного на площади в 1 *м*², т. е.

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}.$$

* В зарубежной литературе международная свеча получила наименование кандела (*candela*) — сокращенно *cd*.

** Стерадиан есть угол, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса данной сферы.

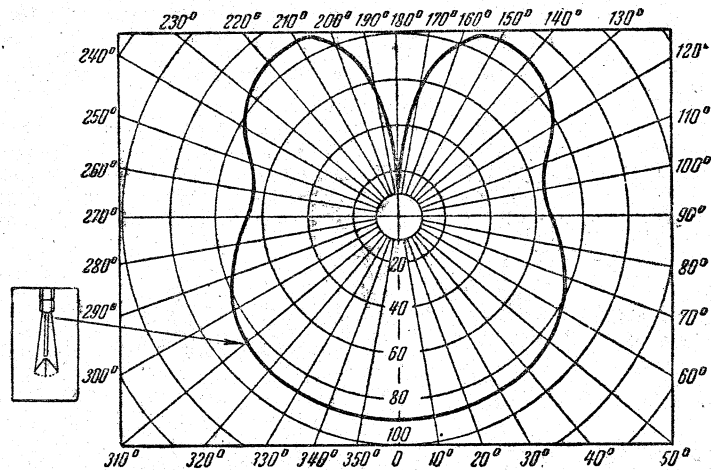


Рис. 21-3. Кривая силы света нормальной лампы накаливания.

Приведем некоторые характерные значения освещенности:

Луна в полнолуние	Около 0,2 лк
Уличное освещение	0,1—4 лк
Освещение промышленных предприятий	30—300 лк
Освещение классов и аудиторий	75 лк
Освещение под открытым небом в зимний пасмурный день	1 000—5 000 лк
То же в летний день при безоблачном небе	До 150 000 лк

Величину освещенности, создаваемой в данной точке поверхности каким-либо точечным источником света (т. е. таким источником, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности), нетрудно вычислить, зная силу света источника по направлению к данной точке (рис. 21-4).

Пусть dS — элемент освещаемой поверхности, заключающий точку A , в которой определяется освещенность E .

Согласно определению

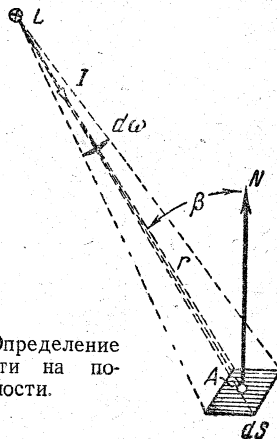
$$E = \frac{dF}{dS},$$


Рис. 21-4. Определение освещенности на поверхности.

где dF — световой поток, падающий от источника света на элемент dS . По определению силы света

$$dF = I d\omega,$$

где $d\omega$ — телесный угол с вершиной в источнике света, опирающийся на dS ;

I — сила света источника в направлении к освещаемой поверхности.

Так как согласно рис. 21-4

$$d\omega = \frac{dS \cos \beta}{r^2},$$

где r — расстояние источника от точки A ;

β — угол между нормалью N к освещаемой поверхности и лучом, то

$$E = I \frac{d\omega}{dS} = \frac{I \cos \beta}{r^2}. \quad (21-5)$$

Если световой поток перпендикулярен к освещаемой поверхности, то

$$\beta = 0, \cos \beta = 1;$$

$$E = \frac{I}{r^2}.$$

Если точечный источник света находится на высоте h от освещаемой плоскости, то на горизонтальном расстоянии a освещенность в точке A (рис. 21-5) может быть выражена следующим образом:

$$E_h = \frac{I \cos \alpha}{\left(\frac{h^2}{\cos^2 \alpha}\right)} \text{ или } E_h = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}. \quad (21-6)$$

Эта формула является основной для расчета горизонтальной освещенности в отдельных точках помещения.

Яркостью B светящейся поверхности в данном направлении называется отношение силы света поверхности в этом направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же

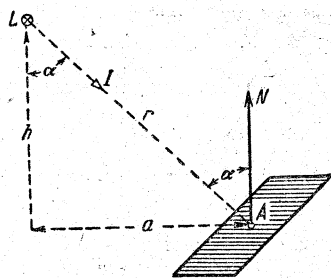


Рис. 21-5. Определение горизонтальной освещенности.

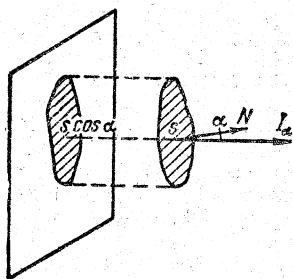


Рис. 21-6. Определение яркости.

направлению (рис. 21-6). В случае равномерно светящейся плоской площадки S яркость

$$B = \frac{I}{S \cos \alpha} \quad (21-7)$$

Единицей яркости служит нит ($нт$) — яркость равномерно светящейся поверхности в перпендикулярном к ней направлении, испускающей в том же направлении свет силой в одну свечу с одного квадратного метра, т. е.

$$1 \text{ нт} = \frac{1 \text{ св}}{1 \text{ м}^2}.$$

Приведем значения яркости некоторых источников света:

Пламя стеариновой свечи . . .	700 нт
Пламя керосиновой лампы . . .	1 100 нт
Вольфрамовая проволока в газополной лампе	$8 \cdot 10^6$ — $12 \cdot 10^6$ нт

Ранее единицей яркости служил стильб ($сб$), равный 10^4 нт (один нит равен одному децимиллестильбу).

21-3. Электрические источники света

Задачей источника света является преобразование электрической энергии в свет с наименьшими потерями. Экономичность источника характеризуется его световой отдачей, которая представляет собой отношение светового потока источника, выраженного в люменах, к потребляемой им мощности в ваттах:

$$\eta = \frac{F}{P} \quad (21-8)$$

Если световой поток выражать не в люменах, а в ваттах излучения длины волны

$\lambda = 555$ мкм, то на основании выражения (21-6) мы получим величину светового к. п. д. источника η_c . Очевидно, что $\eta = 683 \eta_c$. Наибольшей возможной экономичностью обладал бы такой источник света, который превращал бы всю потребляемую им мощность в желто-зеленое излучение волны $\lambda = 555$ мкм. Такой воображаемый источник света имел бы световой к. п. д., равный единице, и световую отдачу 683 лм/вт.

Современные источники света можно разделить на четыре основные группы: лампы накаливания, дуговые лампы, газосветные лампы и люминесцентные лампы.

В лампах накаливания энергия электрического тока используется путем нагревания до высокой температуры нити, которая излучает энергию в соответствии с известными законами температурного излучения.

Коэффициент полезного действия ламп накаливания невелик, так как большая часть их излучения приходится на область невидимых инфракрасных лучей. Световой к. п. д. температурного излучения возрастает при повышении температуры накала и достигает наибольшего значения, 14%, при температуре 6 500° К; в лампах накаливания до сих пор не удалось, однако, достигнуть температуры более чем 3 000—3 200° К.

Первые лампы накаливания выполнялись с угольной нитью и давали только 3 лм/вт. В дальнейшем для повышения световой отдачи лампы А. Н. Лодыгин заменил уголь тугоплавким вольфрамом (1890 г.). Благодаря этому явилась возможность повысить температуру нити при сроке службы в 1 000 ч примерно до 2 400—2 500° К, что, в свою очередь, увеличило световую отдачу до 8—10 лм/вт.

Дальнейшим усовершенствованием ламп накаливания явились газополные лампы. Исследования показали, что испарение вольфрама существенно уменьшается в атмосфере инертного газа (аргона или азота) при давлении около 1 ат. Вероятно, что частицы испаряющегося вольфрама, вылетающие из накаленной нити, отражаются обратно на нить молекулами газа. Заполнение лампы нейтральным газом позволяет повысить температуру нити до 2 700—3 000° К в мощных лампах. Однако в этих условиях в лампе появляются значительные потери энергии вследствие теплопроводности газа и конвекции. Относительная величина потерь тепла через газ тем больше, чем меньше мощность лампы; поэтому газовое наполнение целесообразно применять лишь для более мощных ламп, так как в менее мощных лампах выгоды от повышения температуры не оправдывают повышения потерь вследствие теплоотдачи через газ. В настоящее время газовое наполнение применяется для ламп мощностью в 60 вт и выше.

Последним усовершенствованием газополных ламп является заполнение их колб смесью малотеплопроводных инертных редких газов криптона и ксенона. Это дает возможность уменьшить размеры баллона, повысить температуру нити и благодаря этому увеличить световую отдачу до 12—15 лм/вт.

Для уменьшения тепловых потерь вольфрамовая нить накаливания свертывается в биспираль (рис. 21-7).

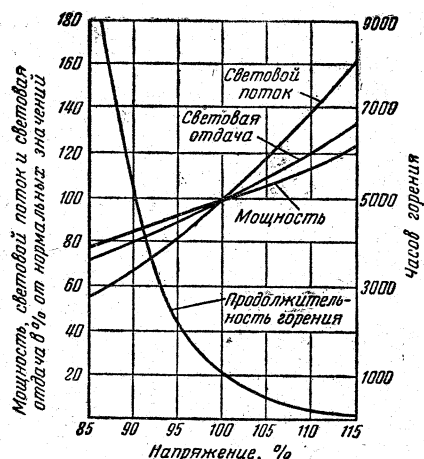


Рис. 21-7. Зависимость основных характеристик лампы накаливания от напряжения.

Для уменьшения слепящей яркости ламп накаливания их колбу можно матировать, благодаря чему она будет рассеивать световой поток. Лучшие результаты дает матирование внутренней поверхности колбы; при этом потеря светового потока в колбе возрастает лишь на 2—3%.

Чем мощнее лампа, тем толще ее нить, тем меньше отношение поверхности, с которой испаряется вольфрам, к общему объему вольфрама и, следовательно, тем выше может быть рабочая температура нити. По этой причине световая отдача лампы растет с повышением ее мощности. С другой стороны, чем выше напряжение, тем при той же мощности должна быть тоньше нить и, следовательно, ниже ее температура; по этой причине лампы на 220 в менее экономичны, чем лампы на 127 в (примерно на 25—10%; разница в экономичности тем меньше, чем больше мощность лампы).

Для нормального горения лампы накаливания необходимо поддержание номинального напряжения; повышение напряжения существенно сокращает срок службы лампы; например, повышение напряжения на 5% снижает срок службы лампы на 45%. Понижение напряжения повышает срок службы лампы, но одновременно уменьшает световой поток и световую отдачу; например, понижение на-

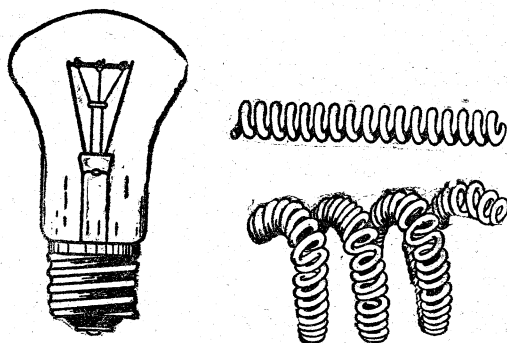


Рис. 21-8. Лампа накаливания с двойной спиралью.

пряжения на 5% понижает световой поток на 18% (рис. 21-7). Причиной такого резкого изменения светового потока являются понижение температуры нити и смещение максимума излучения из области видимых излучений.

Сопротивление накаленной металлической нити лампы примерно в 20 раз больше ее сопротивления в холодном состоянии, поэтому в момент включения лампы накаливания с металлической нитью дают кратковременный, порядка 0,1 сек, толчок тока.

Полезно отметить, что в наиболее совершенной современной лампе накаливания — криптоновой биспиральной — в видимое излучение преобразуется только 13% подводимой энергии, но в идеальном случае абсолютно черное тело, нагретое до температуры 6500° К, способно превратить в энергию видимого излучения только 14,5% подводимой энергии. Следовательно, невозможно добиться дальнейшего существенного повышения экономичности ламп накаливания.

Дуговые лампы из-за сложности эксплуатации в настоящее время применяются очень редко.

Газосветные лампы основаны на использовании явлений люминесценции при электрических разрядах в разреженных газах (неоне, аргоне, гелии и др.) и в парах (ртути и натрия). Преимущество многих видов газосветных ламп — высокая световая отдача. Их общая особенность, осложняющая их схемы соединений и понижающая к. п. д. ламп, — это отрицательная (падающая) характеристика, т. е. с увеличением тока напряжение на лампе уменьшается. Вследствие этого при постоянном напряжении на зажимах лампы может иметь место самостоятельное увеличение тока из-за уменьшения сопротивления газового промежутка лампы, что может повести к разрушению лампы.

Чтобы сделать горение газосветной лампы устойчивым, последовательно с ней включается стабилизирующее сопротивление, индуктивная катушка или конденсатор. При наличии подобного добавочного сопротивления Z в цепи лампы напряжение сети U будет делиться между лампой (U_L) и добавочным сопротивлением:

$$\dot{U} = \dot{U}_L + IZ;$$

случайное увеличение тока ΔI будет увеличивать падение напряжения в добавочном сопротивлении, напряжение на лампе U_L будет понижаться, а это будет способствовать поддержанию тока через лампу неизменным.

Газосветные лампы можно подразделить на лампы высокого и низкого напряжений.

Газосветные лампы высокого напряжения весьма просты по своему устройству (рис. 21-9). Такая лампа состоит из стеклянной трубки диаметром около 20 мм, в концах которой в специальных расширениях помещены электроды. Эти электроды изготовляются в виде пустотелых железных цилиндров. Трубка заполняется разреженным газом, от выбора которого зависит цвет свечения трубки; при заполнении неона трубка дает красный свет, при заполнении аргон — голубой и т. д.

Стеклянной трубке может быть придана

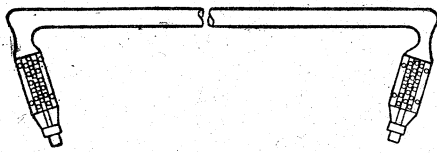


Рис. 21-9. Газосветная лампа высокого напряжения.

самая различная форма, что широко используется для иллюминационного, рекламного и сигнального освещения.

Для получения необходимого напряжения лампу приходится включать через специальный трансформатор, дающий напряжение порядка нескольких тысяч вольт. Световая отдача лампы — около 15 лм/вт. Срок службы лампы при тщательном ее выполнении — около 5 000 ч.

Газосветные лампы низкого напряжения можно разделить на лампы с тлеющим разрядом и лампы интенсивного горения.

Неоновые лампы с тлеющим разрядом представляют собой источник слабого света оранжево-розового цвета малой яркости, в котором используется отрицательное свечение. Свет возникает в них благодаря тлеющему разряду на электродах, причем при постоянном токе светится только один электрод — катод, а при переменном токе — оба электрода. Тлеющий разряд создается в разреженном неоне, заполняющем лампу при давлении около 10 мм рт. ст. Электроды могут иметь любую форму (рис. 21-10), но расстояние между ними должно быть невелико. Как упоминалось выше, свечение при тлеющем разряде сопровождается значительными тепловыми потерями, поэтому световая отдача этих ламп весьма мала — около 0,2 лм/вт при мощности 4,5 вт и сроке службы 2 000 ч.

Для получения устойчивого горения последовательно с лампой включается стабилизирующее сопротивление 3 000 ом, скрытое в ножке лампы. Лампы эти изготавливаются для напряжений: 220, 127 и даже 80 в мощностью 2—5 вт. Неоновая лампа с тлеющим разрядом применяется в качестве источника слабого света, как сигнальный аппарат, для стробоскопических измерений и т. д.

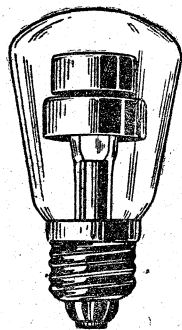


Рис. 21-10. Неоновая лампа тлеющего разряда.

В газосветных лампах интенсивного горения используется свечение паров металла: ртути или натрия. Задача получения разряда при низком напряжении разрешена путем использования термоэлектронной эмиссии катода; последняя дает возможность поддерживать в лампе дугу достаточной длины при напряжении даже 80 в.

Таким образом, названные лампы должны иметь накаливаемый катод, излучающий необходимые для поддержания разряда электроны.

Интенсивность термоэлектронной эмиссии в большой степени зависит от материала катода — накаливаемые окиси щелочных металлов интенсивно излучают электроны даже при относительно низких температурах. Изготовление катода лампы из вольфрама со слоем оксидов этих металлов дает возможность получать необходимую термоэлектронную эмиссию при значительно меньшей затрате энергии.

Во время работы лампы накал катода может поддерживаться за счет ударов положительных ионов, но при включении лампы для возбуждения самостоятельного разряда катод необходимо прогреть.

В современных лампах для зажигания используется тлеющий разряд в инертном газе, который при небольшом давлении находится в разрядной трубке лампы; таким образом, в трубке лампы помещается смесь паров металла и инертного газа.

Для поддержания нужного давления паров металла в разрядной трубке необходима повышенная температура. Поэтому разрядная трубка помещается внутри стеклянной колбы, из которой воздух выкачан. В настоящее время практическое распространение имеют ртутные и натриевые лампы.

Ртутные лампы современных конструкций работают при давлениях паров ртути порядка атмосферы и даже нескольких атмосфер, так как исследования показали, что с повышением давления возрастает световая отдача лампы. Разрядная трубка лампы заполняется инертным газом (аргоном или неоном) при давлении порядка нескольких миллиметров ртутного столба и в нее вводится строго дозированное количество ртути (доли грамма).

Так как в разрядной трубке поддерживается довольно высокая температура, то трубка эта изготавливается из тугоплавкого стекла или из кварца.

Внутри стеклянной колбы или в ее цоколе монтируется сопротивление зажигания. Таким образом, лампа в целом имеет только два ввода и может быть снабжена таким же цоколем, как и лампа накаливания.

Единственное изменение в монтаже, необходимое при замене лампы накаливания газосветной ртутной, — это включение реактивной катушки, обеспечивающей устойчивый режим горения.

При включении давление паров ртути в разрядной трубке ничтожно, почти вся ртуть находится в жидком состоянии, практически трубка заполнена лишь инертным газом. В этом газе между электродами начинается тлеющий разряд, который прогревает катод, вызывает термоэлектронную эмиссию, испарение ртути и возникновение разряда в парах

ртути при высоком давлении. Таким образом, в первые минуты после начала разряда лампа дает лишь слабое свечение, характерное для инертного газа, ее заполняющего (например, оранжевое для неона), в дальнейшем по мере выделения тепла возрастает давление ртутного пара и его свечение, первоначально бледное, становится все ярче, а свечение газа прекращается. Наконец, разряд в парах ртути постепенно образует ярко светящийся цилиндр «шнур» в середине трубки. Неустановившийся режим лампы занимает 5—6 мин. Процесс разряда в лампе весьма сложен; ток лампы в значительной мере отклоняется от синусоидальной формы, и поэтому мощность лампы меньше произведения действующих значений напряжения и тока; соответствующий коэффициент мощности

$$k_p = \frac{P}{UI}$$

составляет около 0,95. Вследствие включения катушки соос лампы в целом значительно понижается. Поэтому для улучшения общего соос установки параллельно лампам включаются конденсаторы. При зажигании лампы потребляется ток, превышающий нормальный на 70—80%.

Световая отдача этих ламп 40—50 лм/вт, что примерно в 2—2½ раза выше световой отдачи лампы накаливания.

В силу того, что в лампе используется для свечения разряд в парах металла, свет лампы имеет линейчатый, характерный для ртути спектр, излучение имеет зеленовато-голубой оттенок и искажает естественную окраску освещаемых предметов главным образом вследствие отсутствия красных лучей. Эти лампы используются главным образом в различных отраслях фотохимии (фотокиносъемки, светокопирование и т. д.).

Срок службы ртутной лампы не меньше 1000 ч.

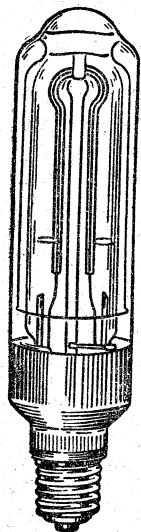


Рис. 21-11. Натриевая лампа.

Натриевая лампа (рис. 21-11) принадлежит к газосветным лампам низкого давления, так как давление паров в ней во время работы равно лишь нескольким миллиметрам ртутного столба. Зажигается она так же, как и ртутная, при помощи разреженного инертного газа; тепло тлеющего разряда этого газа испаряет металлический натрий, после чего разряд идет уже в парах натрия и дает резко выраженный желтый свет. Натриевая лампа требует относительно длинной разрядной трубки; последняя изготовляется обычно U-образной формы и помещается в вакуумной колбе (рис. 21-11). Для трубки применяется специальное стекло, так как оно должно противостоять, не мутнея, весьма активному химиче-



Сергей Иванович Вавилов
(1891—1951 гг.)

скому воздействию паров натрия.

Свет этой лампы не содержит красных лучей и значительно более монохроматичен (одноцветен), чем у ртутной лампы, в силу чего эта лампа сильно искажает естественную окраску предметов.

Световая отдача натриевой лампы 60—70 лм/вт, т. е. значительно выше, чем у ртутной лампы. В сеть она включается последовательно со стабилизирующей дроссельной катушкой.

Люминесцентные лампы представляют собой дальнейшее усовершенствование газосветной лампы. В этих лампах используется свойство некоторых веществ — так называемых люминофоров — светиться под влиянием возбуждения ультрафиолетовым излучением. обстоятельные исследования явлений люминесценции провел русский пионер электротехники В. В. Петров еще в начале XIX в. Большое значение в создании и усовершенствовании современных люминесцентных ламп сыграли работы акад. С. И. Вавилова и его школы.

Люминесцентная лампа представляет собой газосветную ртутную лампу низкого давления; внутренняя сторона колбы этой лампы покрыта тонким слоем люминофора. При прохождении электрического тока через лампу люминофор светится под действием излучения, даваемого парами ртути, преимущественно под действием ультрафиолетовой части этого излучения. Таким образом, в люминесцентной лампе имеются две последовательные ступени преобразования энергии: первая ступень — превращение электрической энергии в ультрафиолетовое излучение разреженного газа и вторая ступень — преобразование ультрафиолетового излучения и видимое свечение люминофора.

Несмотря на двойное преобразование энергии, световая отдача люминесцентной лампы оказывается значительно выше, чем у всех других электрических источников света, но ГОСТ она имеет гарантированные значения

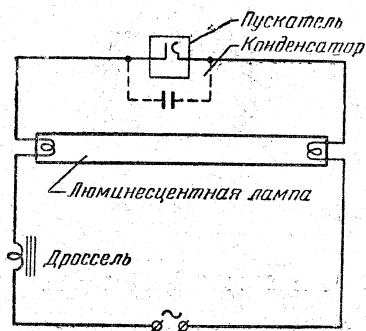


Рис. 21-12. Схема включения люминесцентной лампы в сеть.

32—48 лм/вт, а фактически часто бывает больше.

Окрашенность светового излучения люминофоров зависит от типа люминофора и способа его приготовления, но в основном не зависит от частоты возбуждающего излучения; от последней зависит интенсивность излучения люминофора, причем лучшая световая отдача создается ультрафиолетовым излучением с частотами, близкими к $1182 \cdot 10^{12}$ гц (253,7 нм). Такая частота является вместе с тем частотой наиболее экономичного ультрафиолетового излучения ртутной лампы низкого давления.

Конструктивно люминесцентная лампа выполняется в виде стеклянной трубки, снабженной по обоим концам цилиндрическими цоколями. На этих цоколях укреплены контактные штыри, соединенные с проволочными вольфрамовыми электродами. В лампу помещается капля ртути, и колба заполняется разреженным аргоном.

Схема включения люминесцентной лампы в сеть показана на рис. 21-12. Последовательно с лампой включается реактивная катушка для создания устойчивого режима горения. Пускатель соединяется последовательно с проволочными вольфрамовыми электродами лампы. Он представляет собой тепловое реле с биметаллической пластинкой, помещенное в газоразрядный стеклянный баллон, наполненный неоном. Напряжение зажигания тлеющего разряда в баллоне пускателя ниже напряжения сети (но выше напряжения зажигания прогретой лампы); поэтому при включении лампы под напряжение сети в баллоне начинается тлеющий разряд, причем одним из электродов служит биметаллическая пластинка. Последняя нагревается и, изгибаясь, замыкает, помимо газоразрядного промежутка пускателя, цепь тока проволочных электродов лампы. Ток нагревает эти электроды до температуры порядка 800—1000° С, что создает условия для термоэмиссии в трубке лампы. В результате в последней возникает разряд сначала в атмосфере аргона, а затем, когда благодаря повышению температуры внутри трубки произойдет испарение ртути, разряд идет уже в парах ртути.

Так как биметаллическая пластинка пускателя замыкает его электроды накоротко, то тлеющий разряд в баллоне пускателя прекращается и биметаллическая пластинка охлаж-

дается; вследствие этого она выпрямляется и размыкает цепь тока накала проволочных электродов лампы. Тлеющий разряд в пускателе при этом не возобновляется, так как его напряжение зажигания выше напряжения на лампе, а последнее ниже напряжения на реактивной катушке. Конденсатор нужен для устранения радиопомех от размыканий пускателя.

Недостатком всех газосветных ламп является стробоскопический эффект — множественность изображения движущихся предметов, возникающий вследствие периодического частичного потухания лампы (100 раз в секунду при частоте 50 гц). Наиболее простым средством борьбы с этим эффектом является включение во все три фазы трехфазного тока ламп одного помещения. Если же для освещения используется только одна фаза, то применяются схемы с искусственным сдвигом фаз токов в лампах посредством конденсаторов и индуктивностей.

В справочных сведениях о световой отдаче люминесцентных ламп обычно не учитываются потери в реактивной катушке. Эти потери снижают общую светоотдачу осветительной установки примерно на 20%.

По цветности люминесцентные лампы делятся на марки: БС — белого света (имеющие наиболее высокую световую отдачу), ДС — дневного света и ТБ — теплого света. Из них лампы ДС рекомендуются только для помещений, в которых необходимо правильно различать цветные оттенки.

Ряд исследований показал, что при освещении люминесцентными лампами уменьшается утомление зрения и повышается производительность труда. Однако эти преимущества сказываются лишь при высоких освещенностях, порядка не менее 100 лк. Приходится считаться с тем, что человеческое зрение привычно к высоким освещенностям дневного света, а поскольку люминесцентное освещение спектрально близко к дневному, постольку при низких освещенностях люминесцентные лампы создают отрицательно действующий на человека неприятный эффект сумеречности.

Отчасти по этой причине для люминесцентных ламп даны нормы освещенности существенно повышенные по сравнению с нормами для ламп накаливания (в 2,5—3 раза). Но повышение норм освещенности приводит к тому, что потребление электроэнергии осветительной установкой с люминесцентными лампами примерно такое же, как установкой с лампами накаливания. Первоначальные расходы на устройство установки с люминесцентными лампами больше, а замена люминесцентных трубок обходится значительно дороже, чем замена перегоревших ламп накаливания. Таким образом, первоначальные расходы по содержанию установки при люминесцентных лампах больше.

Однако это повышение расходов оправдывается большим повышением освещенности и спектральным улучшением качества освещения, а все это способствует повышению производительности труда и, следовательно, экономически в большинстве случаев оправдано. Замена ламп накаливания люминесцентными особенно целесообразна в помещениях, где выполняют-

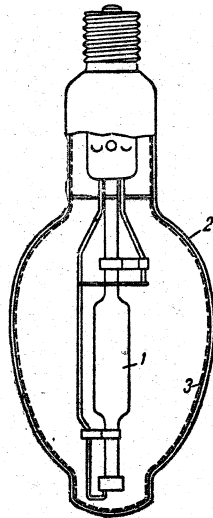


Рис. 21-13. Лампа ДРЛ.

ся точные и напряженные зрительные работы, в учебных и лечебных учреждениях и в помещениях, которые предназначены для длительной работы людей, но в которых нет достаточного естественного освещения.

Мощность люминесцентной лампы ограничена (не свыше 80—125 *вт*); при температуре окружающей среды около 0° ее экономичность существенно снижается и приходится прибегать к специальным стартерным устройствам, так как обычные пускатели в этих условиях не работают. По этим причинам для освещения открытых пространств и больших производственных помещений применяется свободная от этих недостатков лампа ДРЛ (дуговая, ртутная, люминесцентная). Это ртутная лампа высокого давления 1 с исправленной цветностью, в которой световой поток создается свечением паров ртути и люминофора. Свечение люминофора 3, нанесенного на внутреннюю поверхность внешней стеклянной колбы 2 лампы (рис. 21-13) спектрально дополняет световой поток лампы преимущественно оранжево-красным светом. Включение ламп ДРЛ в сеть производится через специальное пускорегулирующее устройство, состоящее из дросселя, конденсатора и селенового вентиля. Мощность этих ламп 250—1 000 *вт*, световая отдача 38—45 *лм/вт*.

21-4. Осветительные приборы

Большинство электрических источников света обладает чрезмерной яркостью, ослепляющей глаз, и кривая светораспределения их не соответствует требованиям целесообразного использования светового потока лампы. Для того чтобы предохранить глаз от слепящей яркости источника света и перераспределить желательным образом световой поток, лампа заключается в осветительную арматуру.

Осветительная арматура вместе с лампой называется осветительным прибором. Эти приборы, в свою очередь, разделяются на приборы ближнего освещения — светиль-

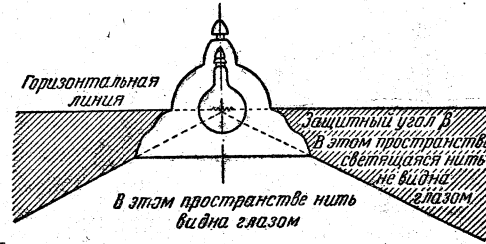


Рис. 21-14. Защитный угол.

ники и приборы дальнего освещения — прожекторы.

При отражении или преломлении света в осветительном приборе неизбежно теряется некоторая часть светового потока лампы. Отношение потока, испускаемого световым прибором, к потоку лампы называется к. п. д. прибора.

Общие требования, предъявляемые к арматуре, можно свести к следующим: арматура должна надлежащим образом распределять световой поток, иметь возможно больший к. п. д.; защищать глаз от ослепления, не нагреваться до температуры, опасной для изоляции проводов или могущей вызвать тление пыли, не накапливать, по возможности, пыль, быть удобной для чистки, разборки и замены частей.

Светильники классифицируются, с одной стороны, по светотехническим свойствам, с другой стороны, по их практическому назначению. Основными светотехническими характеристиками светильника являются:

1) кривая силы света $I_\alpha = f(\alpha)$, изображающая зависимость силы света I_α от угла α , образуемого осью светильника и радиусом-вектором силы света;

2) к. п. д. светильника — отношение светового потока светильника $F_{св}$ к световому потоку лампы $F_{л}$:

$$\eta = \frac{F_{св}}{F_{л}}; \quad (21-9)$$

3) защитный угол (рис. 21-14).

Светильники разделяются на:

а) светильники прямого света (класс П), у которых не менее 90% всего излучаемого потока выходит в нижнюю полусферу;

б) светильники отраженного света (класс О), у которых не менее 90% всего излучаемого светового потока выходит в верхнюю полусферу;

в) светильники рассеянного света (класс Р), у которых световой поток распределяется по обеим полусферам более равномерно, чем у светильников классов П и О.

Светильники прямого света имеют более высокий к. п. д., зато они более опасны в отношении ослепления. Для характеристики светильника в указанном отношении большое значение имеет защитный угол светильника (рис. 21-14).

Наиболее распространенным типом светильника для промышленного освещения является «Универсальный эмалированный» (рис. 21-15). Это светильник прямого света,

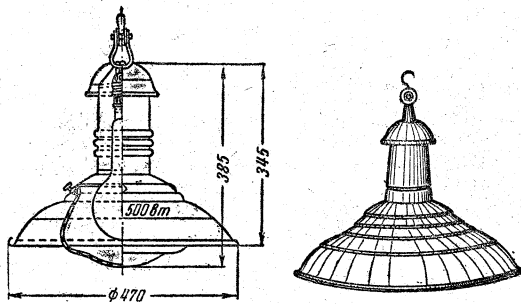


Рис. 21-15. Светильник „Универсаль“.

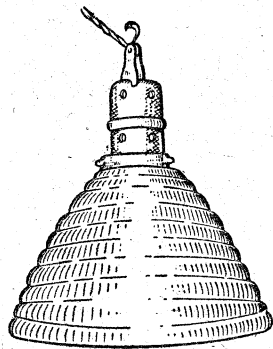


Рис. 21-16. Светильник „Глубокоизлучатель зеркальный“.

среднего светораспределения, его защитный угол 14° , а к. п. д. 58%. Применение этого светильника целесообразно в помещениях, высота которых не превышает 6—8 м.

Светильник «Глубокоизлучатель зеркальный» (рис. 21-16) снабжен зеркальным отражателем и обладает большой концентрацией светового потока. В основном он предназна-

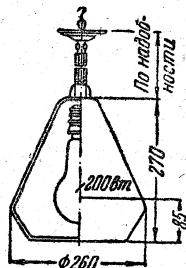


Рис. 21-17. Светильник „Люцетта“ (Лц) и его кривая силы света.

Пунктирная кривая относится к голый лампе.

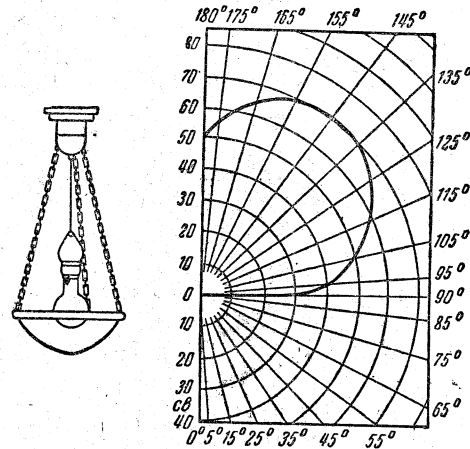
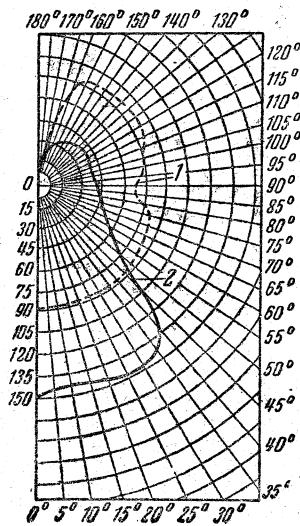


Рис. 21-18. Светильник отраженного света и его кривая силы света.

чен для высоких помещений, его защитный угол 35° , а к. п. д. 80—85%.

В качестве примера светильника рассеянного света приведем конический светильник «Люцетта» (рис. 21-17), изготавливаемый из молочного или матированного стекла.

Конический светильник рекомендуется для общего внутреннего освещения контор, бюро, чертежных, аудиторий, библиотек и т. д.

На рис. 21-18 показан светильник отраженного света в виде чаши, открытой сверху.

Для люминесцентных ламп применяется для прямого внутреннего освещения арматура желобообразной формы с эмалированными или зеркальными отражателями (рис. 21-19); на рис. 21-20 показана люстра для люминесцентных ламп с арматурой в виде трубок молочного стекла.

Пржекторы направляют световой поток в пределах небольшого телесного угла, благодаря чему создаются значительные силы света.

Основными частями прожектора являются источник света большой яркости и отражатель металлический или стеклянный. Источником света служит мощная газополная лампа специального типа или стандартная; для прожекторов дальнего действия применяется электрическая дуга. Отражатель представляет вогнутое зеркало параболической формы. Источник света помещается в фокусе этого зеркала.

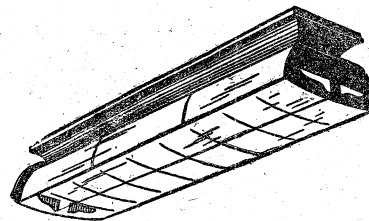


Рис. 21-19. Арматура для прямого освещения люминесцентной лампы.

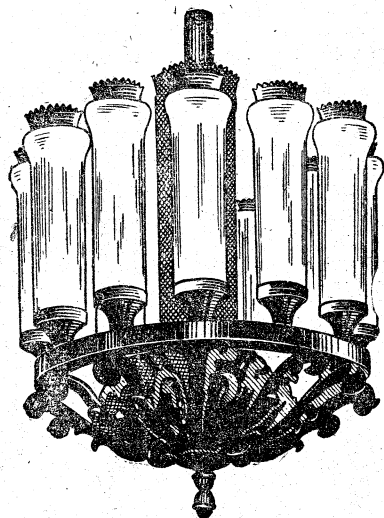


Рис. 21-20. Люстра с люминесцентными лампами (Московский метрополитен).

Так как прожектор дает поток, концентрированный в небольшом угле, то его кривую светораспределения удобнее строить не в полярных, а в прямоугольных координатах. Ось ординат совмещается с оптической осью прожектора, по оси ординат откладываются в масштабе значения силы света прожектора, а по оси абсцисс—значения углов в обе стороны от оптической оси прожектора (рис. 21-21).

Светотехнические свойства прожектора характеризуются несколько иными величинами, чем свойства светильника.

Прожектор должен собирать лучи лампы в относительно узкий пучок; эти свойства прожектора характеризуются углом рассеяния, который представляет собой тот угол, в пределах которого сила света прожектора составляет не менее 0,1 от его максимальной

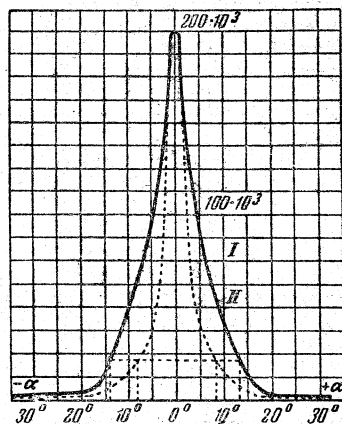


Рис. 21-21. Кривая силы света прожектора заливающего света ПЗ-45.

I—в горизонтальной плоскости; *II*—в вертикальной плоскости.

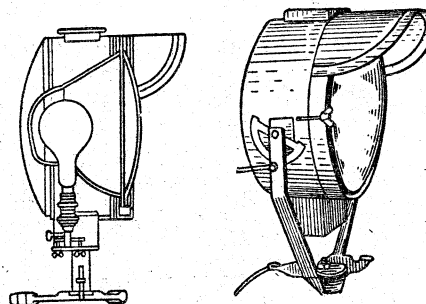


Рис. 21-22. Прожектор заливающего света типа ПЗ-45.

силы света $I_{\text{макс}}$. Принято различать угол рассеяния в горизонтальной плоскости и угол рассеяния в вертикальной плоскости.

Коэффициентом усиления прожектора называется отношение максимальной силы света прожектора к средней сферической силе света лампы, помещенной в прожектор, т. е.

$$k_{\text{ус}} = \frac{I_{\text{прож. макс}}}{I_{\text{лампы}}}$$

Различают два основных типа прожекторов: прожекторы дальнего действия и прожекторы заливающего света.

Прожекторы дальнего действия предназначены для освещения весьма удаленных предметов. Они имеют весьма малый угол рассеяния, большую максимальную силу света и применяются в авиации, морском и военном деле.

Прожекторы заливающего света, называемые также прожекторами ближнего действия, предназначены для освещения сравнительно близких предметов и поверхностей, открытых площадок при ночных работах, фасадов зданий, аэродромов и т. п. Такие прожекторы имеют горизонтальный угол рассеяния около 30° и вертикальный—около 20° . На рис. 21-22 показан прожектор ПЗ-45.

21-5. Основные требования, предъявляемые к искусственному освещению

Освещение должно создавать наиболее благоприятные условия для восприятия зрительных ощущений человеческим глазом, что соответствует освещенности примерно от 450 до 3 000 лк. Такая освещенность, однако, практически имеет место лишь при естественном дневном свете. По экономическим соображениям мы вынуждены в большинстве случаев создавать значительно меньшие освещенности.

Мы остановимся на основных требованиях, предъявляемых к искусственному освещению промышленных предприятий. Эти требования: достаточная освещенность рабочей поверхности, благоприятное распределение яркости в поле зрения, ограничение ослепленности и постоянство освещенности.

Таблица 21-1

Наименьшая освещенность на рабочих поверхностях в производственных помещениях

Характеристика работы	Размер объекта ¹ различия, мм	Разряд работы	Подразряд	Контраст ² объекта с фоном	Фон ³	Наименьшая освещенность, лк										
						при люминесцентных лампах		при лампах накаливания								
						комбинированное освещение	одно общее освещение	комбинированное освещение	одно общее освещение							
Особо точная	0,1 и менее	I	a	Малый	Темный	3 000	750	1 500	300							
			б	Малый	Светлый	2 000	750	1 000	300							
			в	Средний	Темный	2 000	750	1 000	300							
			г	Средний	Светлый	1 500	500	750	300							
				Большой	Темный	1 500	500	750	300							
						Светлый	750	300	400	150						
							Высокой точности	Более 0,1 до 0,3	II	a	Малый	Темный	2 000	750	1 000	300
										б	Малый	Светлый	1 000	400	500	150
в	Средний	Темный	1 000	400	500					150						
г	Средний	Светлый	750	200	400	100										
				Большой	Темный	750	200	400	100							
						Светлый	500	200	400	100						
							Точная	Более 0,3 до 1	III	a	Малый	Темный	1 000	300	500	150
										б	Малый	Светлый	750	200	400	100
в	Средний	Темный	750	200	400					100						
г	Средний	Светлый	500	150	300	75										
				Большой	Темный	500	150	300	75							
						Светлый	400	150	200	50						
							Малой точности	Более 1 до 10	IV	a	Малый	Темный	150	150	150	50
										б	Малый	Светлый	150	150	150	50
в	Средний	Темный	150	150	150					50						
г	Средний	Светлый	100	100	100	30										
				Большой	Темный	100	100	100	30							
						Светлый	100	100	100	30						
							Грубая	Более 10	V	—	Независимо от коэффициента отражения фона и контраста объекта с фоном	100	100	100	30	
										Требуемая общего наблюдения за ходом производственного процесса без выделения отдельных деталей	—	VI	—	То же	75	75
Работы с самосветящимися предметами или материалами	—	VII	—	То же	150								150	—	50	

¹Под термином „Объект различия“ понимается отдельная часть рассматриваемого предмета (например, нить ткани, точка, линия, царапина, пятно и т. д.), которую требуется различать при работе.

²Контраст объекта различения с фоном считается: малым, если его величина менее 0,2 (яркость объекта и фон мало отличаются); средним, если его величина равна 0,2—0,5 (заметно отличаются); большим, если его величина более 0,5 (резко отличаются).

³Фон (степень светлоты) считается: темным — при коэффициенте отражения поверхности 0,3 и менее; светлым — при коэффициенте отражения поверхности более 0,3.

Достаточная освещенность обеспечивает нормальную работоспособность человеческого глаза, что является одним из условий высокой производительности труда. Чем больше напряженность зрения при работе, тем больше необходима освещенность. Поэтому значение минимально необходимой освещенности устанавливается в зависимости от характера выполняемой работы: чем меньше детали, которые нужно различать при работе, тем больше должно быть значение освещенности. Но напряжение зрения при процессе различения зависит не только от размеров объекта, но и от фона, на котором различается объект, от контраста этого объекта с фоном. Видимость тем лучше, чем больше этот контраст.

Далее видимость зависит и от коэффициента отражения этого фона: чем он светлее, тем легче различается деталь. Все эти обстоятельства учтены в нормах освещенности производственных помещений, установленных Правилами устройства электроустановок (табл. 21-1). В таблице нормируется наименьшая освещенность на рабочих поверхностях, чем обеспечивается необходимый уровень видимости на всех рабочих поверхностях.

В таблице фон назван светлым, если его коэффициент отражения (отношение светового потока, отражаемого поверхностью, к световому потоку, падающему на нее) более 0,2. Таким образом, чтобы определить по табл. 21-1 нормируемую освещенность для данного производственного помещения, нужно знать линейные размеры деталей и условия фона.

Далее важным для освещения является распределение яркости в поле зрения работающего. Требуемая освещенность может быть обеспечена посредством как общего, так и местного освещения.

Общее освещение имеет своей целью освещение всего помещения в целом, а не только рабочих поверхностей. Светильники общего освещения размещаются в большинстве случаев на большом расстоянии от рабочих поверхностей, под потолком помещения.

Местное освещение имеет своей непосредственной задачей освещение лишь рабочих поверхностей; поэтому светильники местного освещения размещаются в непосредственной близости к рабочему месту. Преимуществом местного освещения является возможность получения большой освещенности при относительно малой мощности источника света, причем световой поток последнего может быть направлен на рабочую поверхность наиболее выгодным образом. Однако применение только местного освещения в производственных помещениях не допускается, так как это повело бы к весьма неравномерному распределению яркости в поле зрения работающего и вызвало бы повышенную утомляемость зрения. По этой причине местное освещение должно обязательно дополняться общим и таким путем создается комбинированное освещение. Чтобы обеспечить надлежащее распределение яркости в поле зрения работающего (равномерность освещения), правила требуют, чтобы при комбинированном освещении за счет общего освещения создавалось не менее 10% нормированной для дан-

Таблица 21-2

Наименьшая высота подвеса над полом светильников в установках внутреннего освещения

Характеристика светильников	Наименьшая высота подвеса, м	
	при лампах до 200 вт включительно	при лампах более 200 вт
А. С лампами накаливания		
Светильники с диффузными отражателями с защитным углом в пределах 10—30° без рассеивателей	3	4
То же с защитным углом более 30°	Не ограничивается	3
Светильники с диффузными отражателями, снабженные рассеивателями, а также без отражателей с рассеивателями:		
а) с коэффициентом пропускания до 80% в зоне 0—90°; с коэффициентом пропускания до 55% в зоне 60—90°	3	4
б) с коэффициентом пропускания до 55% в зоне 0—90°	2,5	3
Светильники с зеркальными отражателями:		
а) глубокого излучения	2,5	3
б) широкого излучения	4	6
Открытые лампы с колбой из матированного стекла	4	6
Б. С люминесцентными лампами		
Светильники прямого света с диффузными отражателями, с защитным углом 15—25	4	4,5
То же с защитным углом 25—40	3	3,5
То же с защитным углом более 40	—	—
Светильники рассеянного света с коэффициентом рассеивателей:		
а) менее 55%	2,6	3,2
б) от 55 до 80%	3,5	4,2

ных условий освещенности (остальные 90% за счет местного освещения).

Ограничение ослепленности также должно быть предусмотрено при устройстве освещения. Ослепленность — это состояние глаза после воздействия на него источника света большой яркости, например накаленной спирали лампы накаливания, не закрытой арматурой, или расплавленного металла и т. п. Ослепленность понижает работоспособность и может быть причиной не-

счастливых случаев на производстве. Степень ослепленности зависит от яркости и силы света ослепляющего источника по направлению к глазу, а также от положения этого источника в поле зрения. Конструкция светильника, величина его защитного угла, характер рассеивателя и мощность лампы определяют яркость видимой поверхности светильника и его силу света по направлению к глазу. По этим причинам в целях ограничения ослепленности ГОСТ устанавливает наименьшую допустимую высоту подвеса светильников общего освещения над полом помещения, причем эта высота определяется в зависимости от конструкции и мощности светильников (табл. 21-2). Для ограничения ослепленности от светильников местного освещения ГОСТ, не устанавливая их высоту подвеса, требует, чтобы их защитный угол был не менее 30° , а отражатель был выполнен из непросвечивающего материала.

Постоянство освещенности может нарушаться колебаниями напряжения в осветительной сети. Частые значительные изменения освещенности сильно утомляют зрение. Поэтому в осветительных сетях колебания напряжения не должны превышать 4%.

В ряде случаев наряду с рабочим освещением обязательным является устройство аварийного освещения, присоединяемого в зависимости от особенностей производственного процесса и помещения или к независимому источнику питания, или к сети, не зависящей от сети рабочего освещения. Специальные правила определяют требования, предъявляемые к этому виду освещения¹.

21-6. Размещение светильников

Размещение светильников должно быть таким, чтобы требуемая освещенность обеспечивалась при наименьшей установленной мощности. Принято различать два способа размещения светильников общего освещения: равномерное и локализованное. При равномерном размещении расстояния между со-

седними светильниками в каждом ряду и между рядами берутся неизменными. При локализованном размещении положение каждого светильника зависит от расположения оборудования и выбирается так, чтобы обеспечить наиболее выгодное направление светового потока и устранить тени на рабочих местах.

Равномерное размещение светильников соответствует наиболее равномерному распределению освещенности по рабочей поверхности, а, следовательно, экономически оно наиболее выгодно. Оно применяется в производственных помещениях там, где желательно обеспечить равномерное освещение всего помещения,—это помещения с равномерным распределением оборудования (например, сборочные, деревообделочные цехи), помещения, где применяется комбинированное освещение, и т. д.

Основной расчетной величиной при определении размещения светильников является относительное расстояние между

светильниками $\frac{L}{H_p}$ — это отношение расстояния между ними L к высоте подвеса H_p светильника над рабочей поверхностью. Эта величина и кривая силы света светильника определяют распределение освещенности по освещаемой поверхности. Определенному значению относительного расстояния для каждого типа светильника соответствует наименьшая неравномерность освещенности (оптимальное относительное расстояние). В табл. 21-3 приведены оптимальные относительные расстояния для наиболее распространенных типов светильников при размещении их по вершинам квадрата или ромба. Исследования показывают, что наиболее выгодным является размещение светильников по углам квадрата; однако по производственным соображениям и условиям помещения часто приходится заменять квадрат прямоугольником.

Если руководствоваться при размещении светильников оптимальным расстоянием, то остается возможность выбирать только высоту подвеса над рабочей поверхностью H_p , но возможность выбора этой высоты в производственных помещениях ограничена очень узкими

Таблица 21-3

Оптимальные относительные расстояния между светильниками, m

Тип светильника	Относительное расстояние		Предельная ширина помещения, при которой целесообразно однорядное размещение
	Многорядное расположение	Однорядное расположение	
Шар молочного стекла	2,3—3,2	1,9—2,5	$1,3 H_p$
„Универсаль“ без затенителя; „Универсаль“ с опаловым и матированным затенителем	1,8—2,5	1,8—2,0	$1,2 H_p$
„Люцетта“ открытая молочного стекла; „Глубокоизлучатель эмалированный“	1,6—1,8	1,5—1,8	$1,0 H_p$
„Глубокоизлучатель зеркальный“	1,2—1,4	1,2—1,4	$0,75 H_p$

Примечание. Первая цифра определяет оптимальный вариант размещения, вторая — допустимый.

пределами. Помимо часто решающих производственных соображений (например, наличия подъемного крана), минимальная допустимая высота подвеса определяется требованиями ограничения ослепленности (табл. 21-2), а максимальная — потолком помещения.

Оптимальные расстояния l крайних рядов светильников от стен помещения определяются в зависимости от наличия у стен рабочих поверхностей: если последние налицо, то $l = 0,25 \div 0,32 L$, если же их нет, то $l = 0,4 \div 0,5 L$.

Выбор расположения светильников определяет и число светильников в помещении.

Локализованное размещение светильников общего освещения целесообразно в тех случаях, когда по производственным соображениям необходим дополнительный подсвет больших по площади рабочих поверхностей, не осуществимый средствами местного освещения (например, при конвейерной сборке крупных изделий). Здесь вопрос размещения светильников решается индивидуально для данных конкретных производственных условий.

21-7. Способы расчета осветительных установок

При проектировании электрического освещения прежде всего приходится выбирать источник света. Как мы видели, практически

ламп преимущества значительно более высокой светоотдачи и при соответствующем выборе люминофора более благоприятной цветности. Но, с другой стороны, стоимость установки с люминесцентными лампами примерно в 3 раза больше, чем с лампами накаливания, и эксплуатационные годовые расходы по этой установке значительно выше.

Расчет осветительных установок производится методом удельной мощности, методом коэффициента использования и точечным методом. По существу эти методы дополняют друг друга.

Метод удельной мощности применяется при приближенном подсчете необходимой мощности электрических ламп осветительной установки. При ориентировочном определении потребления электроэнергии для освещения тем или иным проектируемым объектом. Таким ориентировочным расчетом освещения можно ограничиться в неотчетливых случаях. Наконец, этот метод применяется для проверки выполненных проектов освещения.

Сначала определяется размещение светильников и их число n . Затем определяется удельная мощность осветительной установки помещения, т. е. мощность, отнесенная к единице площади пола помещения. Для этого необходимы специальные таблицы¹, составленные для различных типов светильников на

Таблица 21-4

Удельная мощность общего равномерного освещения лампами накаливания, $вт/м^2$

Н _р , м	S, м ²	Светильники „Универсаль“ (при любой окраске стен и потолков)					Светильники „Люцетта“ при коэффициентах отражения потолка $\rho_{п} = 50\%$ и стен $\rho_{ст} = 30\%$					
		Нормированная освещенность E, лк										
		5	10	20	30	50	75	10	20	30	50	75
От 2 до 3	10—15	3,3	6,2	11	15	22	30	7,8	13,7	18	28	38
	15—25	2,7	5	9	12	18	25	6,5	11,3	15	23	30
	25—50	2,3	4,3	7,5	10	15	21	5,4	9,5	12,5	19	25
	50—150	2	3,8	6,7	9	12	18	4,6	8	11	16	20
	150—300 более 300	1,8 1,7	3,4 3,2	6 5,8	8 7,5	12 11	17 16	4 3,6	6,9 6,5	9,2 8,5	13 13	18 17
От 3 до 4	10—15	4,3	7,5	12,7	17	29	36	9,5	15	24	36	53
	15—20	3,7	6,4	11	14	22	31	8	13	19	29	42
	20—30	3,1	5,5	9,3	13	19	27	6,8	11,4	15	23	34
	30—50	2,5	4,5	7,5	10,5	15	22	5,7	9,6	13	19	28
	50—120	2,1	3,8	6,3	8,5	13	18	4,6	8	10,5	15	23
	120—300 Более 300	1,8 1,7	3,3 2,9	5,6 5	7,5 7	12 11	16 15	3,8 3,3	6,5 5,6	8,6 7,2	12,8 10,5	19 16

приходится выбирать между тремя видами источников, выпускаемых нашей промышленностью: лампами накаливания, газосветными лампами и люминесцентными лампами. Газосветные лампы, несмотря на их высокую экономичность вследствие неблагоприятной цветности, применяются главным образом для наружного освещения. При сопоставлении с лампами накаливания на стороне люминесцентных

основании сопоставления данных по ряду готовых объектов. Мы приводим здесь только две такие табл. 21-4 и 21-5 в качестве примера.

¹ См. Электротехнический справочник, т. 2, Госэнергоиздат, 1961; Кнорринг Г. М., Справочник для проектирования электрического совещания, Госэнергоиздат, 1956.

Таблица 21-5

Удельная мощность общего равномерного освещения люминесцентными лампами типа БС, *вт/м²*

Н _р , м	S, м²	Нормированная освещенность E, лк					
		50	75	100	150	200	300
От 2	10—15	5,8	8,7	11,6	17,5	23,2	34,8
	15—25	5,1	7,7	10,2	15,3	20,4	30,6
до 3	25—50	4,9	7,3	9,8	14,7	19,6	29,4
	50—150	3,9	5,8	7,8	11,7	15,6	23,4
	150—300	3,7	5,6	7,4	11,1	14,8	22,2
От 3	10—15	8,7	13,1	17,4	26,1	34,8	52,2
	15—25	6,7	10,1	13,4	20,1	26,8	40,2
до 4	25—50	5,8	8,7	11,6	17,4	23,2	34,8
	50—150	4,3	6,4	8,6	12,9	17,2	25,8
	150—300	3,7	5,6	7,4	11,1	14,8	22,2

Для подсчета установленной мощности P на основании удельной мощности P₀ необходимо определить коэффициент запаса k_{зап}. Посредством этого коэффициента учитывается уменьшение светового потока светильника с течением времени вследствие загрязнения светильника и уменьшения светового потока лампы по мере ее старения. Значение коэффициента запаса выбирается в зависимости от пыльности помещения и тщательности ухода за светильником (табл. 21-6). Таким образом, установленная мощность для помещения площадью S будет P = P₀Sk_{зап}, а мощность одной лампы:

$$P_{л} = \frac{P_0 S k_{зап}}{n} \quad (21-10)$$

Метод коэффициента использования (он же метод светового потока). Основной величиной при расчете освещения по названному методу служит световой поток, который нужен на рабочей поверхности для получения требуемой средней освещенности E. Этот поток нетрудно определить, если знать коэффициент использования η светильника, который представляет собой отношение полезного светового потока F_{пол}, падаю-

щего на освещаемую рабочую поверхность S, к световому потоку F_л лампы:

$$\eta = \frac{F_{пол}}{F_{л}} \quad (21-11)$$

Расчет в основном сводится к определению коэффициента η, который зависит от ряда условий, вызывающих потери светового потока в данной осветительной установке.

На коэффициент использования влияют:

- а) тип светильника, т. е. совокупность лампы и осветительной арматуры;
- б) геометрические условия освещаемого помещения (отношение длины и ширины);
- в) высота подвеса светильника над рабочей поверхностью;

г) отражение света стенами и потолком, зависящее от окраски стен и потолка.

Так как зависимость эта носит весьма сложный характер, то практически для определения коэффициента использования служат специальные таблицы, которые составляются отдельно для каждого типа светильника. В этих таблицах учитывается влияние всех перечисленных факторов.

По таблицам на основании всех условий установки определяется коэффициент использования установки η.

Чтобы определить полезный поток

$$F_{пол} = ES, \quad (21-12)$$

нужно знать освещенность E. В большинстве случаев приходится руководствоваться для этой цели нормами минимальной освещенности E.

На основании величины полезного потока и коэффициента использования определяется поток F_л, который должны дать все лампы установки:

$$F_{л} = \frac{F_{пол}}{\eta} \quad (21-13)$$

Затем на основании пыльности помещения и тщательности ухода за светильником определяется коэффициент запаса k_{зап} (табл. 21-6) и, наконец, подсчитывается поток, требуемый от одной лампы, по формуле

$$F_{1л} = \frac{ESk_{зап}}{\eta n} \quad (21-14)$$

Таблица 21-6

Коэффициенты запаса

Характеристика объекта	Коэффициент запаса		Расчетная частота чистки светильников (не реже)
	при люминесцентных лампах	при лампах накаливания	
Помещения с большими выделениями пыли, дыма или копоти	2,0	1,7	4 раза в месяц
Помещения со средними выделениями пыли, дыма или копоти	1,8	1,5	3 раза в месяц
Помещения с малыми выделениями пыли, дыма или копоти . . .	1,5	1,3	2 раза в месяц

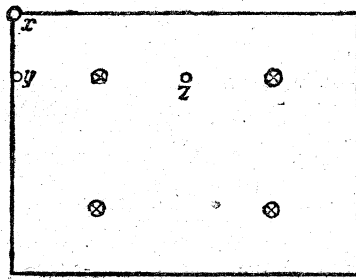


Рис. 21-23. Характерные точки помещения при расчете по точечному методу.

На основании найденного значения $F_{1л}$, можно подобрать по таблицам лампу, дающую световой поток, наиболее близкий к расчетному.

Точечный метод представляет собой расчет освещенности в отдельных характерных точках помещения на основании кривой светораспределения светильников и применяется обычно в качестве поверочного к вышеописанному. Расчет производится для наиболее характерных точек помещения, в первую очередь для наименее освещенных, т. е. наиболее удаленных от источников света. Освещенность E в наиболее удаленных точках задана нормами. В каждой из характерных точек освещенность определяется как сумма освещенностей, создаваемых в рассматриваемой точке отдельными светильниками, т. е.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n.$$

Так, на рис. 21-23 освещенность в каждой из рассматриваемых точек (x, y, z, \dots) будет

представлять собой сумму освещенностей, создаваемых четырьмя светильниками 1—4. Каждая из этих слагаемых равна:

$$E = \frac{I \cos^3 \alpha}{H^2 p}.$$

В случае люминесцентных ламп освещенность подсчитывается по формулам, при составлении которых эти лампы рассматриваются как светящиеся линии.

Кроме характерных точек, иногда приходится отдельно подсчитывать освещенность в специальных точках помещения, например вертикальную освещенность на распределительном щите электростанции.

Задаваясь значением освещенности, мы можем определить требуемое значение I , а затем соответственно подобрать лампу для светильника. Существенным недостатком точечного метода являются весьма длительные вычисления; кроме того, при пользовании этим методом не учитывается освещенность, создаваемая светом, отраженным от стен и потолка. По этим причинам при расчете освещения закрытых помещений точечный метод применяется лишь в качестве контрольного для проверки минимальной освещенности в наиболее удаленных точках и для определения неравномерности, а основной расчет обычно выполняется по методу коэффициента использования. Однако применение точечного метода неизбежно при несимметричном размещении светильников и для открытых пространств. Расчет по точечному методу значительно облегчается таблицами освещенности, которые даются в каталогах для соответствующих типов светильников.

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

22-1. Строительство электрических станций в СССР

Крупные электрические станции являются основной базой электрификации, так как концентрация производства электроэнергии имеет исключительное значение для ее удешевления. Такие электростанции, как правило, должны быть расположены вблизи мест, где имеются большие природные запасы энергии в виде залежей низкокачественного топлива, которое нецелесообразно перевозить на сколько-нибудь значительное расстояние или в виде падения воды. Крупные электростанции не должны строиться для работы на дальнепривозном топливе (исключение — тепло-

электроцентрали, см. ниже), так как передача энергии электрическим током совершается со значительно меньшими потерями, чем затраты энергии при перевозке топлива. Этому положению совершенно не удовлетворяли электростанции царской России. Дореволюционная энергетика нашей Родины, как мы уже упоминали во введении, характерна для отсталого хищнического капиталистического хозяйства — это множество мелких электростанций, принадлежавших отдельным группам капиталистов и отдельным частным собственникам. Мощность станций общественного пользования составляла меньше трети мощности электростанций страны (330 тыс. квт

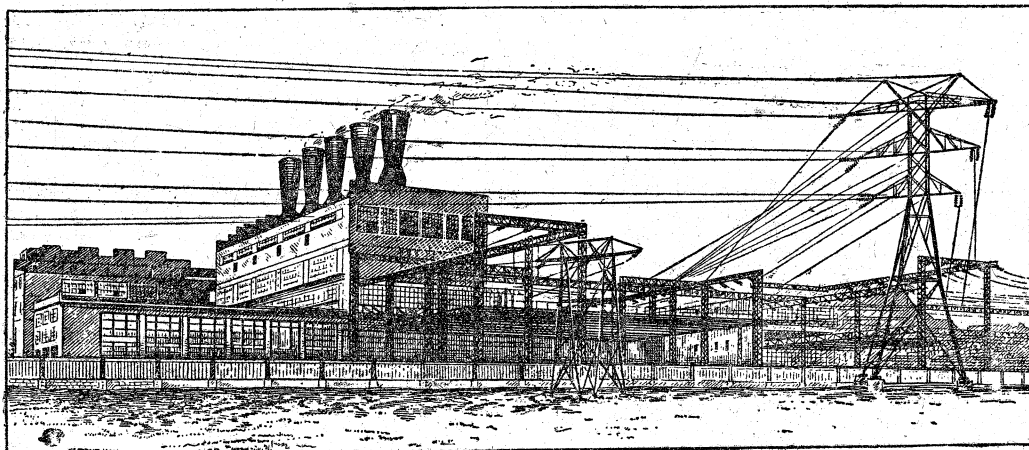


Рис. 22-1. Каширская районная электрическая станция.

в 1913 г.), причем это были станции относительно малой мощности. В 1916 г. только 47 из них имели мощность свыше 1 000 квт, а 842 имели мощность меньше 350 квт.* Самой крупной была московская электростанция «Общества электрического освещения 1886 г.», имевшая мощность 57 000 квт и работавшая на дальнепривозном топливе.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции в нашей стране началось строительство крупных электростанций вблизи природных источников. Это — районные электрические станции, передающие большую часть вырабатываемой ими электроэнергии на дальние расстояния по линиям высокого напряжения и обеспечивающие этой энергией электроснабжение отдельных районов страны. Строительство таких электростанций Советской властью началось с первого года ее существования и никогда не прекращалось, даже в самые тяжелые месяцы гражданской и Отечественной войн.

Грандиозное плановое строительство электростанций начинается, конечно, созданием плана ГОЭЛРО. В. И. Ленин в письме к Г. М. Кржижановскому от 23 января 1920 г., намечая создание этого плана, указывал: «Примерно: в 10 (5) лет построим 20—30 (30—50) станций, чтобы всю страну усеять центрами на 400

* Электроснабжение Петербурга обеспечивалось работой 204 электростанций.

(или 200, если не осилим больше) верст радиуса; на торфе, на воде, на сланце, на угле, на нефти...». Руководствуясь указаниями В. И. Ленина, комиссия ГОЭЛРО наметила строительство 20 тепловых станций с общей установленной мощностью 1 110 000 квт и 10 гидроэлектростанций с общей установленной мощностью 640 000 квт. При составлении плана ведущим явился ленинский принцип использования местных энергоресурсов — станции проектировались на местном низкокачественном топливе и гидроэлектрические; в частности, было запроектировано строительство Волховской, двух Свирских и Днепровской гидроэлектростанций. В плане был также последовательно проведен и второй ленинский принцип электрификации — рациональное, равномерное размещение электроэнергетического хозяйства по территории страны. В частности, на базе новых электростанций планом предусматривалось быстрое развитие индустрии и сельского хозяйства в ранее отсталых национальных районах.

Ленинские принципы плана ГОЭЛРО проходят красной нитью через всю историю советской электроэнергетики. Благодаря их неуклонному осуществлению с точки зрения экономической энергетической база электрификации СССР является наиболее совершенной в мире.

Первенцем выполнения плана ГОЭЛРО явилась Каширская электростанция (рис. 22-1), пущенная в мае

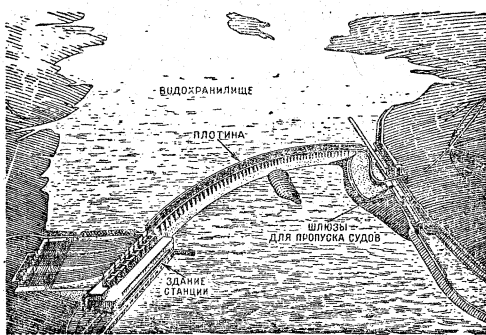


Рис. 22-2. Днепро́вская гидроэлектростанция. Общий вид сооружения (1935 г.): слева от плотины — здание электростанции; справа от плотины — шлюзы для пропуска судов.

1922 г. Эта станция, отапливаемая подмосковным углем, имела первоначальную мощность 12 000 *квт*. Она соединена с Москвой линией передачи длиной 120 км, для которой впервые в стране было применено напряжение 110 *кв*. Строительство этой станции было предметом неусыпных личных забот В. И. Ленина. Он говорил: «12 тысяч киловатт — очень скромное начало. Быть может иностранец, знакомый с американской, германской или шведской электрификацией, над этим посмеется. Но хорошо смеется тот, кто смеется последним».¹

Это было только началом. Трудящиеся Советского Союза, выполняя заветы Ленина, строили электростанций одну за другой, все более мощные и технически совершенные. Уже в 1932 г. была пущена Днепро́вская ГЭС мощностью 558 000 *квт* (рис. 22-2), являвшаяся самой большой гидроэлектростанцией Европы (до пуска Волжской ГЭС имени Ленина). На ней были установлены самые крупные в мире гидравлические турбины мощностью по 90 000 л. с., соединенные с генераторами мощностью по 77 500 *кв*а (при восстановлении станции после Великой Отечественной войны советской промышленностью поставлены генераторы мощностью 103 000 *кв*а).

В 1935 г. мощность электростанций СССР превысила план ГОЭЛРО в 2½ раза. В 1940 г. эта мощность превысила 10 700 000 *квт*.

¹ В. И. Ленин, Соч., т. 32, стр. 470.

Целесообразную организацию использования природных ресурсов в энергетике СССР показывает, например, то обстоятельство, что в 1940 г. 72% всей электроэнергии было получено за счет сжигания низкосортных топлив (в том числе 20% за счет сжигания торфа), а 13% — за счет гидроэлектрических станций.

Гитлеровские варвары нанесли тяжелый ущерб советской энергетике. Ими была взорвана, сожжена или частично разрушена 61 крупная электростанция. Всего ими была выведена из строя на электростанциях установленная мощность около 5 млн. *квт*.

Но в самый разгар Великой Отечественной войны на востоке СССР шло интенсивное строительство электростанций — энергетической базы обороны Советского Союза.

Благодаря самоотверженному труду советских людей, вдохновляемых великой Коммунистической партией, индустриальная мощь Советского Союза за время войны не уменьшилась, а значительно возросла. В этом сказались преимущества советского строя.

Послевоенный четвертый пятилетний план восстановления и развития народного хозяйства СССР (1945—1950 гг.) намечал не только полное восстановление всех электростанций, но и большое строительство новых электростанций общей мощностью 11,7 млн. *квт*. Этот план был перевыполнен, причем особо крупный шаг вперед был сделан в области строительства гидроэлектростанций. По сравнению с 1940 г. выработка электроэнергии этими станциями возросла в 2½ раза, а их относительная доля в выработке электроэнергии станциями Советского Союза увеличилась до 18,3%. Из числа этих электростанций отметим две крупные волжские гидроэлектростанции: Угличскую и Рыбинскую; площадь созданного при Рыбинской станции Рыбинского водохранилища (4 500 км²) равна половине площади Онежского озера, второго по величине в Европе.

Решениями XIX съезда КПСС было намечено увеличение в 3 раза мощ-

ности гидроэлектростанций Советского Союза за пятилетие 1950—1955 гг. Пятый пятилетний план замечателен, в частности, по темпам роста электроэнергетики. За пятилетие 1950—1955 гг. общая мощность электростанций почти удвоилась. Выработка электроэнергии возросла с 90 млрд. *квт·ч* (1950 г.) до 170 млрд. *квт·ч*.

В директивах XX съезда КПСС было уделено много внимания развитию электроэнергетики. В частности, было отмечено, что темпы строительства электростанций должны опережать темпы промышленного строительства и что необходимо создать резервы мощности электростанций, обеспечивающие бесперебойность электроснабжения.

XXI съезд КПСС поставил ряд новых задач перед строителями электростанций. При составлении плана на семилетие 1959—1965 гг., был критически рассмотрен вопрос о преимущественном строительстве тепловых электростанций или гидроэлектростанций. Электрическая энергия, вырабатываемая на гидроэлектростанциях, дешевле, но строительство ГЭС требует много времени и стоит относительно очень дорого. Например: строительство Саратовской ГЭС мощностью в 1 млн. *квт* должно продолжаться 4 года и стоить свыше 400 млн. руб., а тепловая электростанция той же мощности, работающая на природном газе Саратовского района, может быть построена менее чем за 3 года и будет стоить около 100 млн. руб.* (в старом исчислении). Вместе с тем благодаря большому прогрессу в теплоэнергетике, значительно снизилась себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях. Наконец, усилиями геологов выявлено значительное число новых богатых залежей горючего.

«В целях выигрыша времени и наиболее эффективного использования капитальных вложений в семилетнем плане предусмотрено преимущественное строительство тепловых электростанций на природном газе, мазуте и

* Пример, приведенный Н. С. Хрущевым в речи, произнесенной в Жигулевске на открытии Волжской ГЭС имени Ленина.

дешевых углях»**. В течение семилетия будут строиться 85 крупных тепловых конденсационных станций общей мощностью 30 млн. *квт*. На этих станциях будут устанавливаться турбины мощностью до 600 000 *квт* в единице, причем расход металла на 1 *квт* мощности этих турбин будет в 2,5 раза меньше, чем у турбин мощностью 100 000 *квт*.

Однако важная роль сохраняется и за строительством гидроэлектростанций. За семилетие на этих станциях должна быть введена мощность 10 млн. *квт*; больше чем за предыдущие 8 лет (1951—1958 гг.), когда было введено 7,4 млн. *квт*, и больше чем за 30 лет, с 1921 до 1950 г., когда было введено всего 3,2 млн. *квт*.

Во исполнение семилетнего плана уже пущена крупнейшая в мире Волгоградская ГЭС мощностью 2530 000 *квт*; строятся ГЭС: Братская (4,5 млн. *квт*), Красноярская (5 млн. *квт*), Кременчугская, Воткинская, Бухтарминская и другие. Предусмотрено также начало строительства нескольких новых ГЭС, главным образом в районах, не располагающих достаточными и дешевыми топливными ресурсами.

Для советской гидроэнергетики характерно строительство каскадов электростанций на крупнейших реках страны (рис. 22-3 и 22-4). Последовательное регулирование стока в таких каскадах позволяет наилучшим образом использовать гидроэнергию для выработки электроэнергии. Это регулирование тем совершеннее, чем больше водохранилища станций каскада. Вместе с тем благодаря подъему уровня воды в реке создаются благоприятные условия для судоходства вплоть до верховий реки. Наконец, за счет использования запасов водохранилищ является возможность широкого проведения орошения и обводнения засушливых территорий.

Классическим примером каскада является Волжско-Камский (рис. 22-3), который будет состоять из 12 гидроэлектростанций общей мощностью свыше 10 млн. *квт* и выработкой электроэнергии около 50 млрд. *квт·ч*

** Н. С. Хрущев. Доклад на XXI съезде.

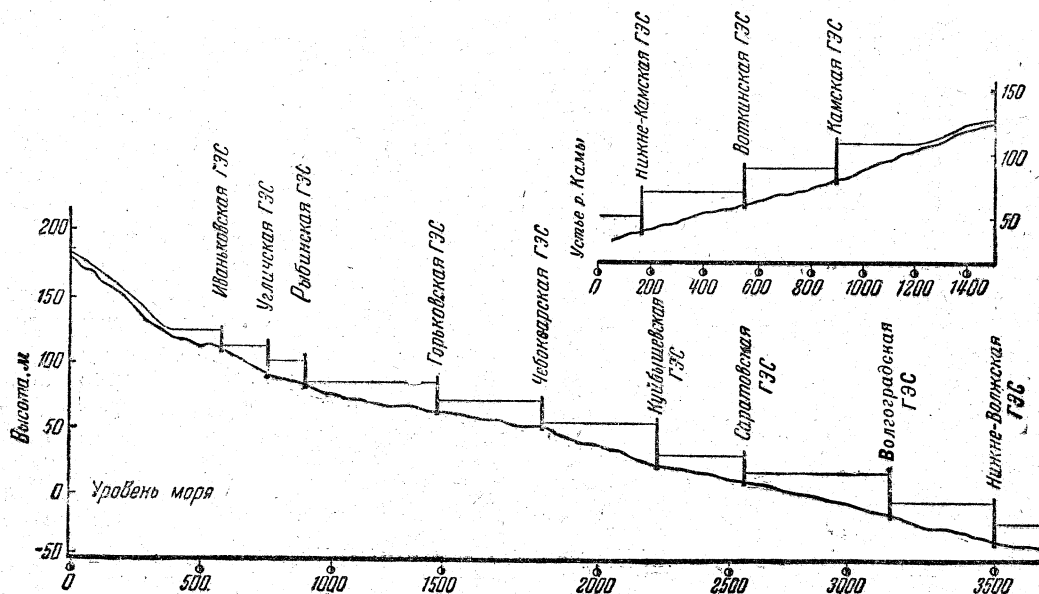


Рис. 22-3. Волжско-Камский каскад гидроэлектростанций.

в средний по стоку воды год. Семь станций каскада уже работают: Ивановская (30 000 кВт), Угличская (110 000 кВт), Рыбинская (330 000 кВт),

Горьковская (400 000 кВт), Камская (504 000 кВт), Волжская имени Ленина (2 300 000 кВт), Волгоградская (2 530 000 кВт). Исключительно грандиозным по мощности является строящийся Енисейский каскад (рис. 22-4), в состав которого входят Братская ГЭС мощностью 4,5 млн. кВт и Красноярская мощностью 5 млн. кВт. Выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях СССР в 1965 г. составит 85 млрд. кВт·ч (рис. 22-5).

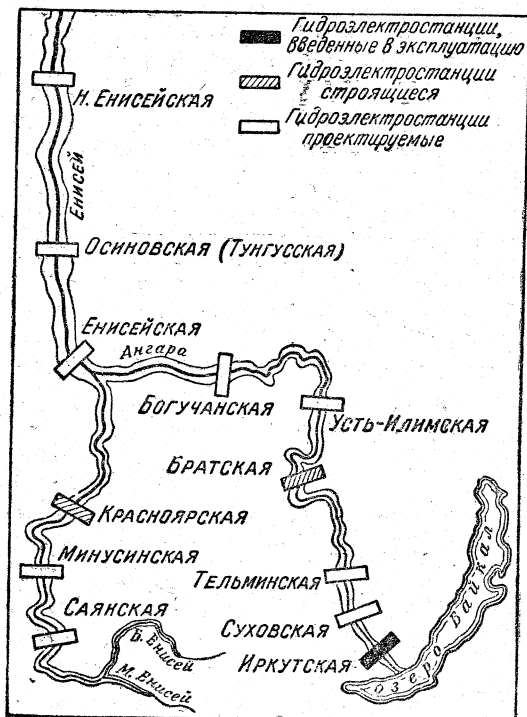


Рис. 22-4. Енисейский каскад гидроэлектростанций.

В 1961 г. общая мощность всех электростанций СССР должна достигнуть примерно 100 млн. кВт. «Претворение в жизнь ленинских идей электрификации страны — верный путь к победе коммунизма» (Н. С. Хрущев, доклад на XXI съезде).

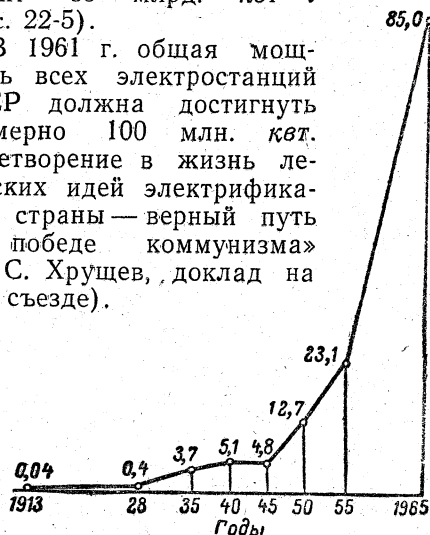


Рис. 22-5. Выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях СССР.

22-2. Напряжение в сетях электрических станций

В системе электроснабжения переменного тока центральным пунктом является районная электрическая станция (рис. 22-6), расположенная вблизи природных запасов энергии; генераторы станции работают при напряжениях 6—10 кВ. Такое напряжение достаточно для передачи энергии близлежащим потребителям; но для длинных линий передачи, которые связывают электрическую станцию с населенными и промышленными центрами, это напряжение нужно повысить до 110—220 кВ. С повышением напряжения линии передачи при данной мощности соответственно уменьшается ток, а вместе с ним — потери на нагревание проводов, если рассчитывать на определенное сопротивление линии. Однако не следует думать, что во всех случаях целесообразно применять для линий передачи самое высокое напряжение, существующее в современной электротехнической практике. С повышением напряжения непропорционально быстро растут затраты на усиление изоляции, увеличиваются размеры опор, растет стоимость повысительных и понизительных трансформаторов и т. д.; наконец, сильно возрастают ежегодные расходы на поддержание электрических устройств. Все эти обстоятельства могут перевесить выгоды, даваемые уменьшением потерь на нагревание проводов. Таким образом, напряжение линии передачи выбирается, с одной стороны, в зависимости от стоимости сооружений линий и, с другой стороны, в зависимости от стоимости электрической энергии. В каждом данном случае экономически целесообразным является такое напряжение, которому соответствуют наименьшие суммарные расходы. Кроме того, выбранное напряжение должно соответствовать шкале стандартных напряжений.

С целью повышения напряжения генераторы центральной станции соединяются с линиями передачи через трансформаторы. Линии передачи ведут к населенным центрам, но здесь напряжение порядка сотни киловольт слишком высоко для непосредственного распределения электрической энергии. Поэтому высокое напряжение линии передачи понижается на крупных трансформаторных подстанциях (расположенных в большинстве случаев на окраинах города или при крупных заводах) до такого значения (6—10 кВ), при котором распределение энергии потребителям более экономично благодаря удешевлению аппаратуры и т. п. В городах такое распределение энергии производится при помощи кабельных сетей, проложенных в земле.

Вблизи места непосредственного потребления энергии она еще раз преобразуется. Это выполняется в отдельных пунктах города или в цехах завода на потребительских трансформаторных подстанциях; здесь напряжение понижается до 500 или 380/220 в. При таком напряжении электрическая энергия поступает в сеть низкого напряжения, доставляющую ее к приемникам тока: двигателям, лампам и т. д.

Схема электроснабжения, показанная на рис. 22-6, является типичной при наличии только одной станции. В настоящее время часто встречаются сложные энергосистемы, состоя-

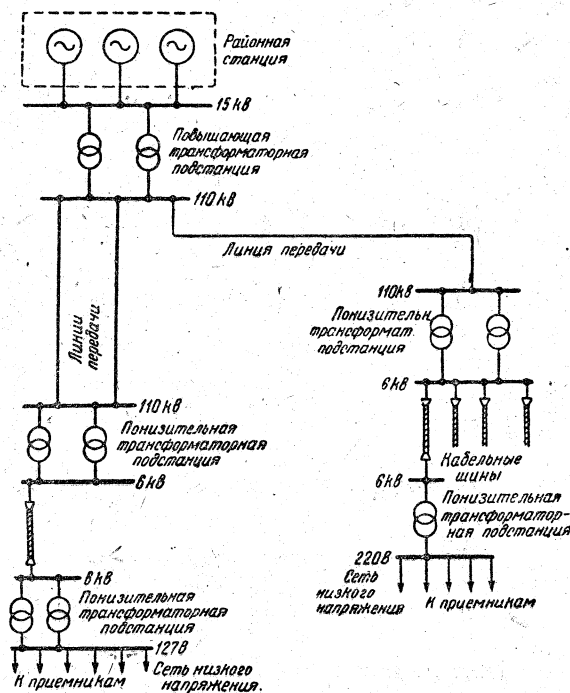


Рис. 22-6. Схема электроснабжения от районной электрической станции.

щие из нескольких станций, соединенных между собой и с центрами потребления линиями электропередачи. В таких системах образуются замкнутые сети высокого напряжения.

Кроме того, в большинстве энергосистем приходится устраивать промежуточную распределительную сеть, работающую при напряжении 35 кВ. Это необходимо по той причине, что напряжения 6 или 10 кВ недостаточны для распределения электрической энергии по относительно большой площади, а при напряжении 110 или в особенности 220 кВ устройство понизительных подстанций относительно небольшой мощности стоит слишком дорого.

22-3. Нагрузка электрической станции

Нагрузка изолированно работающей электрической станции определяется требованиями на электрическую энергию со стороны присоединенных к станции потребителей: в каждый данный момент производство электрической энергии должно соответствовать предъявляемым требованиям. Таким образом, электрическая станция должна приспосабливать свой производственный процесс к требованиям на электрическую энергию и изучать изменение последних в различные часы суток и в различные месяцы года.

В основном всю нагрузку электрической станции можно разделить на осветительную и силовую. Осветительная нагрузка резко колеблется в зависимости от времени суток (рис. 22-7) и времени года. Силовая нагрузка более постоянна (рис. 22-8); ее колебания об-

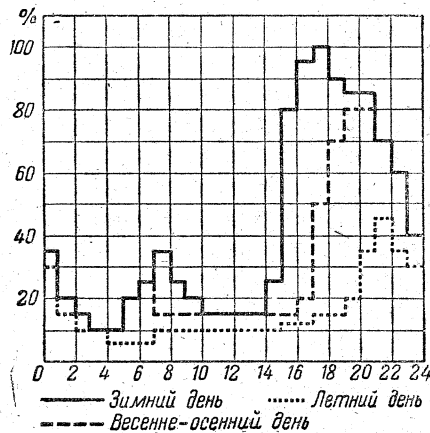


Рис. 22-7. Суточный график осветительной нагрузки.

условливаются характером и организацией производственного процесса (числом смен, временем обеденного перерыва, временем остановки для ремонта и т. д.). В зависимости от изменений нагрузки станция вынуждена пускать и останавливать машины, растапливать и тушить котлы на паровой станции, использовать запасы воды или накапливать их в водоемах на гидроэлектростанции. Эти колебания нагрузки, конечно, являются неблагоприятным фактором в работе станции.

Однако электрическая станция может рассчитывать мощность своих устройств не на всю присоединенную мощность потребителя, а только на максимум его нагрузки, который зависит от коэффициента спроса (§ 22-8).

Для станции имеет значение не только нагрузка активной мощностью, так как сечение проводов, мощность трансформаторов, сечение линий и т. д. определяются по существу, полной мощностью потребителей. Следовательно, необходимо знать также и реактивную нагрузку потребителя. Этот вид нагрузки определяется на основании активной нагрузки потребителя и его $\cos \varphi$.

Последний в среднем можно принимать равным 0,8, если у потребителя нет специальной установки для повышения коэффициента мощности.

От значения среднего $\cos \varphi$ потребителя зависит и оплата им электрической энергии.

Согласно дифференциальному тарифу, применяемому электростанциями СССР, потребитель оплачивает электрическую энергию W , учтенную счетчиками, по n копеек за $1 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ (переменная часть), и, кроме того, он платит ежемесячно за установленную мощность своих трансформаторов $S_{\text{т.уст}}$ по m рублей за 1 ква ; таким образом, потребитель должен ежемесячно уплачивать станции

$$M = W \frac{n}{100} + S_{\text{т.уст}} m \text{ [руб.]}$$

Однако тариф учитывает также и качество потребления энергии, т. е. коэффициент мощности. Как мы уже отмечали выше, низкое значение $\cos \varphi$ вызывает удорожание электрических установок вследствие необходимости применения оборудования, рассчитанного на большую полную мощность (трансформаторов, выключателей, кабелей и т. д.) и увеличение потерь при генерировании и передаче электрической энергии. По этим причинам оплата электрической энергии потребителями за $1 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ определяется в зависимости от среднего значения $\cos \varphi$ потребителя за контрольный промежуток времени (за месяц). При установленном тарифном нормальном $\cos \varphi$ потребитель платит 100% тарифа. Если же $\cos \varphi$ ниже или выше указанного нормального значения, то производится надбавка (+) или скидка (—) от основной стоимости $1 \text{ квт} \cdot \text{ч}$. Таким образом, полное уравнение тарифа будет:

$$M = W \frac{n}{100} \frac{k}{100} + S_{\text{т.уст}} m \text{ [руб.]}$$

где k представляет собой надбавку или скидку, устанавливаемую на основании среднего месячного $\cos \varphi$ потребителя, по таблице надбавок и скидок данного энергообъединения.

Средневзвешенный $\cos \varphi$ определяется на основании показаний счетчиков активной энергии W и реактивной энергии W_p по формуле

$$\cos \varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_p^2}}$$

Осветительная нагрузка оплачивается отдельно только за потребленную энергию, но стоимость $1 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ в этом случае берется примерно вдвое большей.

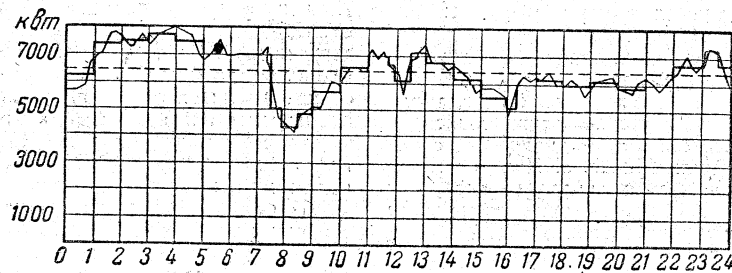


Рис. 22-8. Суточный график нагрузки крупного завода с трехсменной работой.

22-4. Классификация электрических станций

Задачей электрических станций является преобразование в электрическую энергию различных видов энергии. Для этой цели на электрических станциях имеются первичные двигатели (тепловые, гидравлические и даже ветровые), которые приводят во вращение генераторы электрического тока.

В зависимости от рода тока различаем станции переменного тока (почти исключительно трехфазного) и станции постоянного тока. Ввиду весьма ограниченного и специального значения станций постоянного тока мы их рассматривать не будем.

В зависимости от рода первичных двигателей, иными словами в зависимости от вида энергии, потребляемой станцией, мы различаем тепловые, гидроэлектрические и ветросиловые станции.

Особую группу составляют теплофикационные станции (теплоэлектроцентрали — ТЭЦ), задачей которых является снабжение потребителей не только электрической, но и тепловой энергией; пар, отработавший в турбинах такой станции, затем используется для целей отопления зданий или для каких-либо производственных целей. СССР по развитию системы ТЭЦ занимает первое место в мире. Более чем в 160 городах имеются теплоцентрали, отпускающие ежегодно свыше 100 млрд. ккал тепловой энергии.

Тепловые станции имеют в качестве первичных двигателей паровые турбины и машины или двигатели внутреннего сгорания.

Паровые турбины применяются в большинстве случаев в качестве первичных двигателей, что же касается паровых машин, то в настоящее время они используются лишь в отдельных случаях в мелких установках (например, локомобильные установки).

Двигатель внутреннего сгорания имеет по сравнению с системой паровой турбины и котла более высокий к. п. д. (до 38%), но он тре-

бует определенного, в большинстве случаев высокоценного, топлива (нефть, керосин, бензин) и предельная мощность его ограничена. Для электростанций достоинством двигателей внутреннего сгорания является также их чрезвычайно быстрый пуск в ход. В настоящее время эти двигатели применяются преимущественно на электрических станциях местного значения с ограниченной мощностью, а также для временных установок в период строительства предприятий в безводных местностях и, наконец, в качестве пиковых и аварийных агрегатов.

Мы различаем три основные группы топлива, сжигаемого на тепловых станциях: твердое, жидкое и газообразное.

Группу твердого топлива составляют каменный и бурый уголь и торф. Из них наибольшее применение имеет уголь, причем на электрических станциях сжигаются преимущественно низкосортные угли. В большинстве случаев для повышения к. п. д. котельных установок эти угли сжигаются в пылевидном состоянии. Торф в качестве топлива для электрических станций у нас в Советском Союзе используется в довольно больших размерах: ряд мощных электрических станций построен для сжигания торфа. Он сжигается под котлами или во взвешенном состоянии (фрезерный торф) или в кусках (формованный торф и гидроторф).

Группу жидкого топлива составляют мазут, нефть, бензин и керосин. Из них под котлами электрических станций сжигается наименее ценное топливо — мазут, прочие же используются для двигателей внутреннего сгорания.

Группу газообразного топлива составляют природные горючие газы, доменные и коксовые газы, получающиеся в виде отходов производства на металлургических заводах. Эти газы сжигаются или под котлами, или в газовых двигателях внутреннего сгорания.

На рис. 22-9 схематически показана паровая станция; надписи на рисунке достаточно

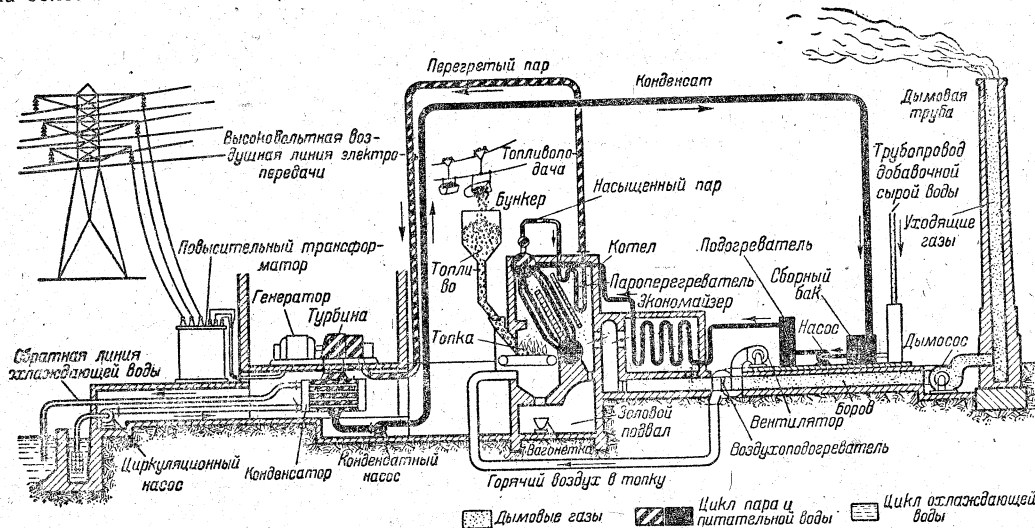


Рис. 22-9. Схема конденсационной паровой станции.

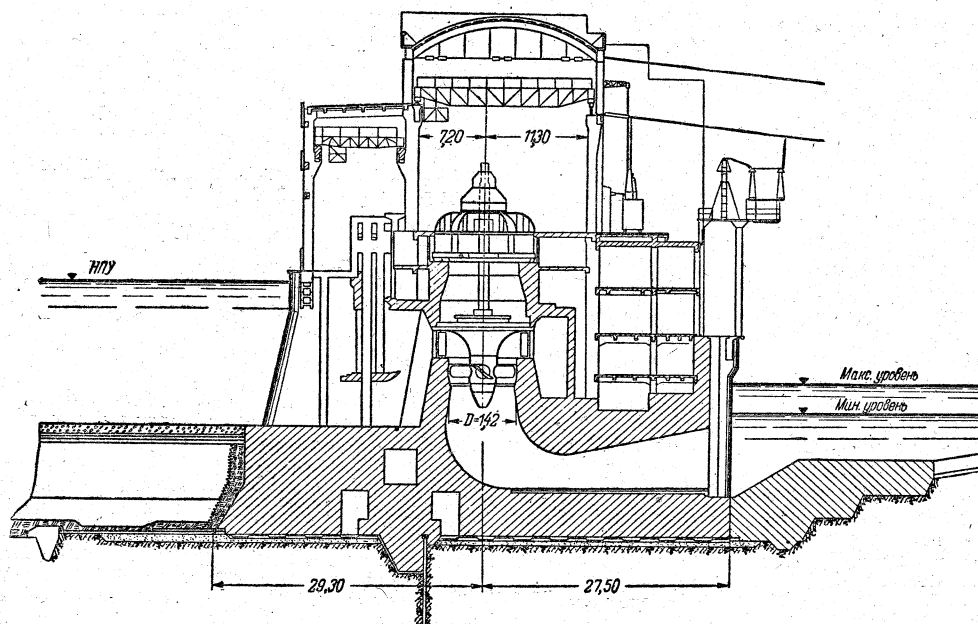


Рис. 22-10. Разрез приплотинной гидроэлектростанции.

поясняют отдельные этапы производственного процесса и расположение отдельных устройств, обслуживающих этот процесс. В нем имеются две фазы: первая фаза — в котельной энергия топлива превращается в энергию водяного пара; вторая фаза — в машинном зале энергия пара в паровых турбинах превращается в механическую энергию, а механическая энергия

в генераторах — в электрическую энергию. Наивысший к. п. д., с которым работают паротурбинные станции, 25—26%, однако у теплоцентралей этот коэффициент доходит до 50—60%.

Паровые станции, не снабжающие потребителей тепловой энергией, принято называть конденсационными, так как на этих станциях отработанный пар из турбин поступает в конденсаторы, охлаждаемые проточной водой; таким путем теряется значительная часть тепловой энергии.

Гидроэлектрические станции (ГЭС) по роду сооружений разделяются на приплотинные и деривационные. Приплотинные гидроэлектростанции строятся на многоводных реках; напор создается посредством подпора уровня воды в реке плотиной, сооруженной поперек русла. Машинное здание, в котором устанавливаются гидрогенераторы и электротехническое оборудование, располагается у самой плотины, на берегу или в теле плотины. На рис. 22-10 схематически показаны такая станция и расположение отдельных ее устройств, обслуживающих производственный процесс.

Деривационные гидроэлектростанции строятся на относительно немногочисленных реках с большим падением; плотина такой станции перегородивает реку на некотором расстоянии от машинного зда-

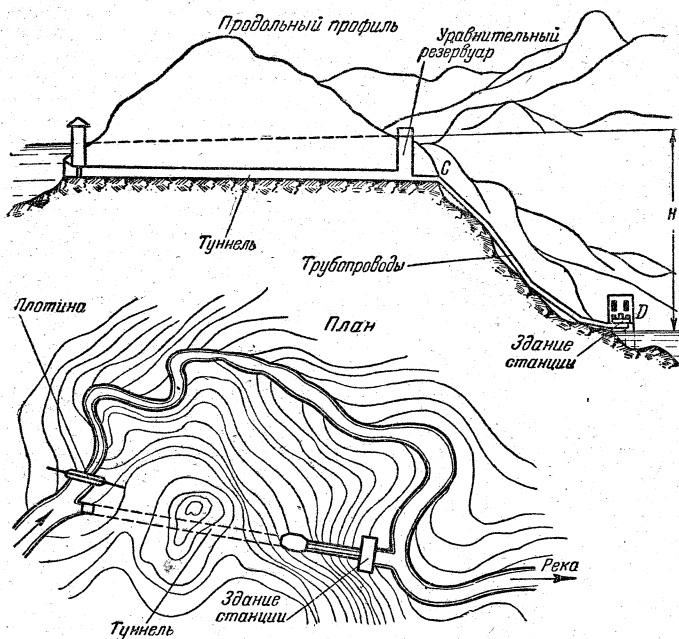


Рис. 22-11. Схема расположения деривационной гидроэлектростанции.

ния и отводит воду в более или менее длинный деривационный канал (рис. 22-11). Этот канал подает воду в напорный бассейн, из которого вода по трубам поступает в турбины станции.

Производственный процесс гидростанции замыкается в одной фазе, так как энергия движущейся воды в одном агрегате превращается сначала в энергию механическую, а затем последняя превращается в электрическую энергию.

С одной стороны, естественный расход воды в реках сильно меняется в течение года; с другой стороны, в течение суток колеблется потребление электрической энергии, из-за чего турбины гидростанции должны усиленно потреблять воду в дневные и вечерние часы. Для регулирования стока воды, если это позволяют геологические условия, выше гидростанции сооружаются искусственные водохранилища, посредством которых осуществляется суточное, годовое и даже многолетнее регулирование стока воды.

Тепловые станции по своей суммарной мощности в большинстве стран имеют основное значение. Гидростанции могут быть построены только в местах наличия гидроресурсов и требуют значительно больших капитальных затрат, зато их электрическая энергия обходится значительно дешевле. Для СССР характерно непрерывное и быстрое увеличение доли электроэнергии, вырабатываемой гидроэлектростанциями: с 1940 по 1956 г. выработка электроэнергии на гидростанциях возросла в 5,6 раза, а на тепловых станциях — в 3,75 раза.

В зависимости от положения станции по отношению к основным потребителям ее энергии можно различать: станции местного значения, районные станции и теплоцентрали.

Станции местного значения снабжают электрической энергией лишь близлежащих потребителей, благодаря этому нет необходимости применять трансформаторы для повышения напряжения; станция отдает энергию в распределительную сеть при генераторном напряжении (до 10 кВ). Это — станции городских, промышленных предприятий, сельскохозяйственных и т. д. Если станция имеет небольшую мощность и потребители расположены в непосредственной близости от нее (электроснабжение строителей, поселков, небольших промышленных предприятий), то применяются напряжения 220, 380 и 500 в, при которых энергия передается потребителю без трансформирования. Принципиальная однолинейная схема такой станции мощностью порядка нескольких десятков киловатт дана на рис. 22-12. На этой станции установлены два трехфазных синхронных генератора Г. Каждый из них снабжен трехполюсным рубильником Р и защищен плавкими предохранителями ПП. Генераторы присоединены к общим сборным полюсам (шинам) станции, посредством которых производится распределение энергии между линиями отдельных потребителей. Каждая из этих линий имеет свой рубильник и плавкие предохранители. Рубильники, предохранители, сборные полюсы, электроизмерительные приборы и приборы для синхронизации (опущенные на схеме) монтируются на распределительном

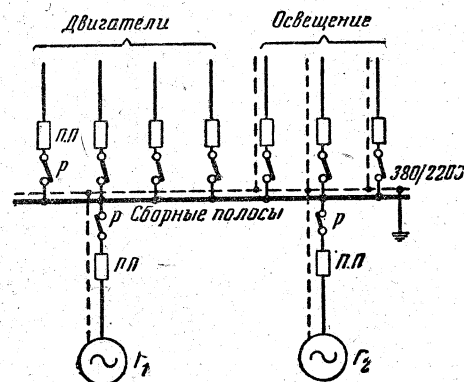


Рис. 22-12. Принципиальная однолинейная схема станции небольшой мощности.

щите станции, который обычно соединяется с генераторами посредством кабелей, проложенных в каналах. Для освещения применяется напряжение не выше 220 в, а так как линейное напряжение рассматриваемой станции 380 в, то осветительные линии выполнены четырехпроводными; на схеме нулевой провод показан пунктиром. Согласно правилам техники безопасности нулевой провод осветительной сети с линейным напряжением 380 в должен быть заземлен и не иметь предохранителей и рубильников. На рис. 22-13 показан фасад распределительного щита такой станции. Он состоит из семи панелей, из которых первая и третья обслуживают генераторы, вторая содержит приборы для синхронизации, четвертая и пятая — аппаратуру четырех силовых линий, а седьмая — аппаратуру трех осветительных линий. Шестая панель оставлена свободной на случай присоединения новых линий. Рубильники расположены позади щита и имеют рычажные приводы на фасадной стороне; также позади щита помещены предохранители и реостаты цепей возбуждения генераторов. Маховички этих реостатов выведены на панели генераторов. Релейной защиты такая небольшая установка обычно не имеет.

Станции большей мощности, снабжающие потребителей в большем радиусе, строятся на высокое напряжение (линейные напряжения генераторов 3,15; 6,3; 10,5 и 15,75 кВ) — это генераторные станции высокого напряжения, т. е. станции, работающие без повысительных трансформаторов и отпускающие энергию в распределительную сеть при напряжении, даваемом генераторами.

В качестве коммутационных аппаратов на такой станции должны применяться масляные выключатели и разъединители.

На рис. 22-14 дана схема относительно небольшой станции указанного типа с двумя генераторами. Здесь каждая цепь схемы соединяется со сборными полюсами через разъединители и масляные выключатели, последние выполняются с автоматическим выключением посредством соответствующей релейной защиты.

При ремонте отдельных линий после отключения от полюсов станции необходимо их заземлять, чтобы полностью обезопасить ремонт-

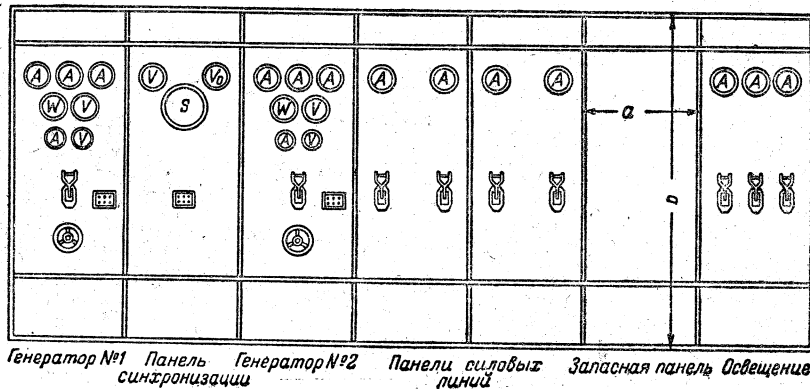


Рис. 22-13. Фасад распределительного щита применительно к схеме рис. 21-12.

ный персонал от случайного появления на линии опасного потенциала; с этой целью на схеме показаны дополнительные ножи линейных разъединителей, служащие для заземления линии, отключенной для ремонта.

Такая станция может, конечно, также отдавать часть энергии через повысительные трансформаторы (обычно 35 кВ) для снабжения более удаленных потребителей.

Районные электрические станции обычно располагаются около местных источников энергии: запасов топлива или падения рек. Они обладают большой мощностью (примерно 25—300 тыс. кВт) и снабжают энергией обширные районы; с центрами мест потребления эти станции связаны длинными линиями передачи энергии высокого напряжения (110 и 220 кВ). Таким образом, в системе станции должно иметься, кроме генераторного напряжения, также и повышенное напряжение, получаемое при помощи повысительных трансформаторов. В большинстве случаев линии передачи связывают районную станцию не только с отдаленными районами потребления, но и с другими станциями; таким образом, электрическая станция входит в энергетическую систему.

Теплоэлектроцентрали находятся вблизи центров потребления электрической энергии, но и в их системе линии передачи повышенного напряжения могут быть нужны как связь с энергетической системой; в теплое время года, когда пара для отопления не требуется, работа теплоэлектроцентрали становится

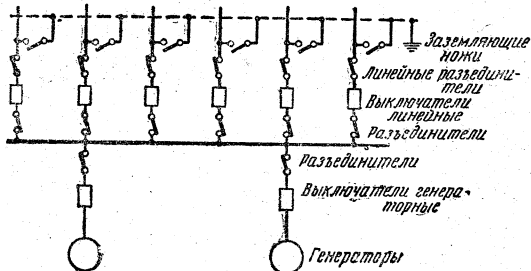


Рис. 22-14. Схема генераторной станции небольшой мощности с одинарной системой сборных полюсов.

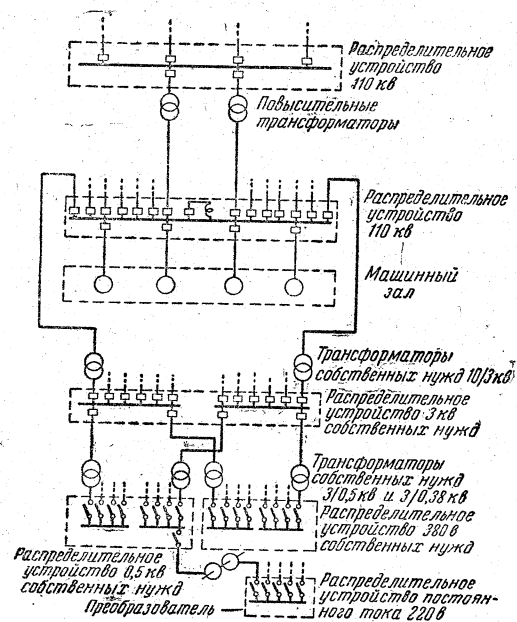


Рис. 22-15. Принципиальная схема распределительных устройств мощной станции.

менее экономичной, так как она потребляет обычно привозное топливо; в это время целесообразно часть ее нагрузки передать другим станциям энергетической системы, работающим на местном топливе, или гидроэлектрическим станциям.

Распределительное устройство электрической станции состоит из аппаратов, измерительных приборов и токоведущих частей, служащих для приема электрической энергии и распределения ее между потребителями. Можно считать, что распределительное устройство мощной станции состоит из нескольких обособленных распределительных устройств генераторного напряжения, распределительного устройства повышенного напряжения и одного или нескольких распределительных устройств собственных нужд станции

(питание вспомогательных электродвигателей станции, ее освещения, ее преобразовательной установки для зарядки аккумуляторных батарей).

Эти распределительные устройства обычно территориально разобщены, а электрически связаны через соответствующие трансформаторы.

Распределительное устройство высокого напряжения занимает тем больше места, чем выше рабочее напряжение, поэтому для напряжения примерно от 35 кВ выгоднее выполнять распределительное устройство открытым, так как это дает значительную экономию в стоимости здания, т. е. размещать все аппараты устройства на площадке на открытом воздухе. Конечно, эти аппараты должны иметь соответствующую конструкцию, предохраняющую их от атмосферных влияний.

22-5. Энергетические системы

Для снабжения электрической энергией крупных промышленных центров и районов является целесообразным сооружение нескольких станций для наиболее полного и экономичного использования энергетических ресурсов.

Например, вблизи центра потребления могут быть сооружены теплоэлектроцентрали, работающие на природном топливе и снабжающие близлежащих потребителей, кроме электрической энергии, также и тепловой энергией; для использования ресурсов местного малощелочного топлива (например, торфа или бурого угля) могут быть построены районные тепловые конденсационные станции, связанные с центрами потребления и другими станциями линиями передачи; наконец, для использования гидроресурсов района могут быть построены гидростанции, связанные линиями передачи также с остальными станциями. Таким образом, создается энергетическая система, состоящая из ряда станций с различными источниками энергии, связанными между собой сетью высокого напряжения. В такой системе нагрузка может быть распределена между отдельными станциями наиболее целесообразным образом, с учетом всех особенностей работы отдельных станций; вместе с тем достигается бесперебойность электроснабжения потребителей, понижается себестоимость электрической энергии, уменьшаются размеры необходимых капиталовложений и т. д.

По этим причинам большинство электрических станций у нас в Советском Союзе строятся как части постепенно развиваемых энергетических систем.

Управление энергетической системы осуществляется централизованной диспетчерской службой системы. В первую очередь загружаются теплоэлектроцентрали, так как их электрическая нагрузка связана с постоянной тепловой нагрузкой, которая не может быть уменьшена без ущерба для потребителя (рис. 22-16). Во вторую очередь загружаются станции, работающие на местном дешевом топливе, и гидростанции; последние загружаются так, чтобы обеспечить использование всей суточной энергии их водного потока.

Колебания нагрузки для гидростанции, ра-

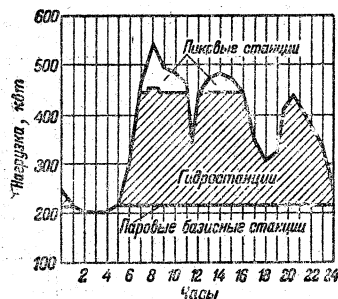


Рис. 22-16. График распределения нагрузки в энергетической системе.

ботающей в энергосистеме, имеют малое значение; гидрогенераторы дают возможность регулировать свою нагрузку быстро и в широких пределах благодаря тому, что они не связаны котельной. Суммарная продолжительность пуска гидрогенератора 5—15 мин, в то время как паровой турбогенератор требует для пуска и приема нагрузки 1—2 ч. По этим причинам гидростанция хорошо удовлетворяет требованиям, предъявляемым к регулирующей станции энергосистемы.

Равномерная нагрузка тепловых станций понижает себестоимость их электрической энергии. Пики нагрузки может принимать на себя также гидростанция.

Конечно, приведенный график является только примерным; в зависимости от местных условий возможна, например, передача базисной нагрузки гидростанции и т. п.

Для СССР основным энергетическим ресурсом пока остается топливо, размещение запасов которого на территории Европейской части Советского Союза таково, что ряд важнейших промышленных районов должен работать на дальнепривозном топливе. Однако использование больших гидроресурсов Советского Союза дает возможность постепенно заменить это дальнепривозное топливо энергией гидравлических станций. Рациональная организация энергетического хозяйства в таких больших масштабах требует создания электроэнергетических систем большой мощности с особым развитием гидроэлектростанций вблизи водных ресурсов.

Таким путем постепенно, в плановом порядке Советский Союз осуществляет объединение линиями высокого напряжения всех электроэнергетических систем в единую электроэнергетическую систему Европейской части СССР. Такое объединение резко улучшит топливный баланс Советского Союза, увеличит надежность электроснабжения, создаст возможности свободного развития промышленности на всей территории системы без ограничений со стороны электроснабжения, будет иметь большое оборонное значение и т. д.

Объединение систем Европейской части Советского Союза потребовало освоения весьма высоких напряжений (400—500 кВ) для преодоления расстояний свыше 500 км (длинные линии передач Москва — Куйбышев и Москва — Волгоград и др.).

22-6. Атомная электростанция

Запасы горючих ископаемых на земном шаре ограничены, и вследствие быстрого роста их промышленного использования они будут исчерпаны в относительно не очень далеком будущем. К тому же горючие ископаемые, а в особенности нефть, было бы целесообразнее использовать как сырье для химической промышленности.

Естественны поэтому поиски новых источников энергии. В течение первой половины XX в. работы ученых разных стран создали необходимые научные предпосылки для технического использования нового источника энергии — энергии атомного ядра некоторых элементов. Значение этого источника энергии может быть оценено хотя бы на основании того, что 1 кг используемого в настоящее время атомного материала (урана или тория) по теплотворной способности эквивалентен 2700 т каменного угля. Соответственно энергия, которую могут дать ориентировочно оцененные доступные запасы урана и тория на земном шаре, примерно в 23 раза больше энергии, которую могут дать все известные запасы ископаемых горючих.

Советский Союз в деле мирного использования атомной энергии явился передовой страной; в нем с 1954 г. работает первая в мире промышленная электростанция на атомной энергии мощностью 5000 квт. Эта станция являлась опытной и сейчас ведутся работы по проектированию и строительству атомных станций большой мощности. В семилетнем плане предусмотрено строительство ряда таких станций разных типов. В 1958 г. пущена первая очередь 100 000 квт атомной электростанции (АЭС) мощностью 600 000 квт.

В настоящее время строятся мощные атомные электрические станции: Нововоронежская в районе г. Воронеж и Белоярская на южном Урале.

Энергия атомного ядра, используемая в подобных устройствах, именуется атомной энергией, так как это тепловая энергия, получаемая при делении ядра атома тяжелого вещества (термоядерная энергия). Это ядро под воздействием попадающего в него извне нейтрона распадается на две примерно равные части и несколько нейтронов; вместе с тем возникают бета- и гамма-излучения. В частности, при делении ядра изотопа 235 урана (U^{235} — содержащегося в природном уране в количестве 0,72%) кинетическая энергия двух осколков ядра составляет 162 мегаэлектронвольта (Мэв), все остальные виды освобождаемой энергии только 33 Мэв, т. е. в основном выделяется тепловая энергия. Для длительного получения этой энергии (не в виде взрыва) служат атомные котлы, называемые также реакторами. Так как атомная энергия освобождается в виде тепловой энергии, то тем самым определяются условия преобразования этой энергии в электрическую: атомная электростанция должна быть, по существу, тепловой электростанцией, на которой атомный котел заменяет паровой котел. Конечно, имеется ряд очень существенных особенностей, отличающих атомную электростанцию от тепловой. Количество потребляемого в атомном котле «атомного горючего» относительно весьма мало: для полу-

чения тепловой мощности 100 000 квт должно ежесуточно «сгорать» только 100 г ядерного материала. С другой стороны, регулирование этого «сгорания» представляет собой весьма сложную задачу. Наконец, при распаде ядра атомного материала возникают очень интенсивные радиоактивные излучения, смертельные для всего живого; следовательно, необходимо устройство специальной системы защиты от излучений обслуживающего персонала.

В атомном котле должна поддерживаться цепная реакция распада атомного материала, т. е. самопроизвольно развивающаяся реакция, при которой нейтроны, освобождаемые при делении n атомов атомного горючего, попадая в другие ядра того же горючего, должны вызвать распад не менее чем n новых атомов.

Скорость нейтрона, освобождающегося при распаде U^{235} , величина порядка 10 000 км/сек, а средний свободный пробег нейтрона до места столкновения с ядром U^{235} около 10 см. Для того чтобы возникла цепная реакция, необходимо, чтобы кусок урана был больше 10 см (критический размер); при меньших размерах цепная реакция не может возникнуть. Большая часть быстрых нейтронов, освобождаемых при распаде U^{235} , захватывается ядрами изотопа V^{238} (составляющего около 99% природного урана), вследствие чего после ряда радиоактивных преобразований этот изотоп превращается в искусственный новый химический элемент плутоний Pu^{239} . Относительно малая часть быстрых нейтронов поглощается ядрами U^{235} и вызывает их деление.

При уменьшении скорости нейтронов уменьшается быстро и вероятность их захвата ядрами U^{238} , в то же время быстро возрастает вероятность попадания этих нейтронов в ядра U^{235} . По этой причине в ряде котлов между кусками атомного горючего вводится тот или иной замедлитель — вещество, при столкновении с ядрами атомов которого нейтроны передают последним часть своей кинетической энергии, вследствие чего их движение замедляется. Сам замедлитель не должен практически поглощать нейтроны. Таким замедлителем могут служить графит (рис. 22-17), тяжелая вода, обычная вода под давлением 100 ат и т. д. Атомное горючее может быть непосредственно растворено в жидком замедлителе; соответствующий гомогенный¹ котел в основном представляет собой бак, заполненный раствором в тяжелой воде соли урана, обогащенной искусственно изотопом U^{235} .

При работе котла с атомным горючим U^{235} в кусках урана уменьшается содержание U^{235} , а накапливаются плутоний и осколки деления. Плутоний подобно U^{235} может служить атомным горючим, так как, поглощая медленные нейтроны, в соответствующих условиях его атомное ядро делится, освобождая большое количество энергии и нейтроны.

Куски урана обычно в форме стержней (рис. 22-17), в которых накопилось относительно большое количество осколков деления, извлекаются из котла и на химическом заводе производится разделение урана, плутония и

¹ Гомогенный (греч.) — однородный.

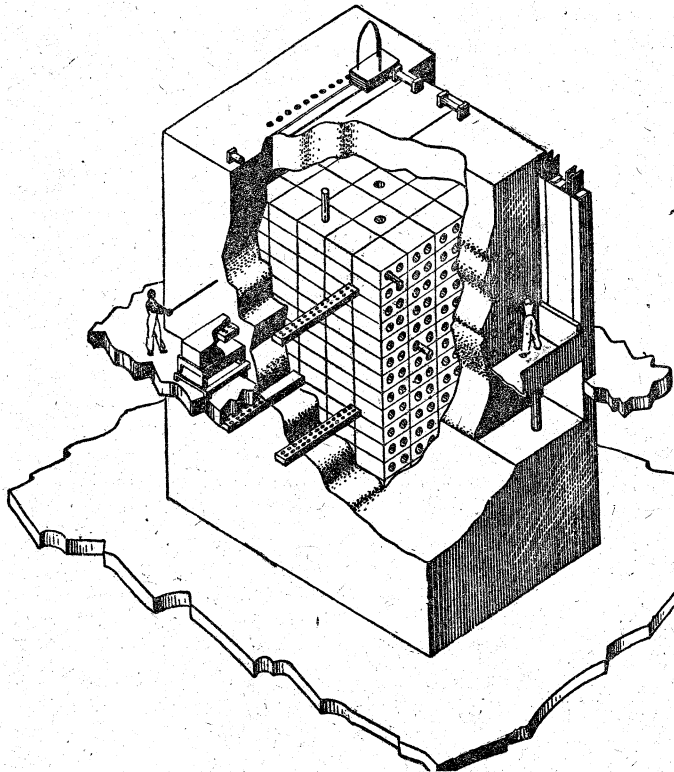


Рис. 22-17 Схема устройства атомного гетеродинного котла с графитовым замедлителем.

осколков деления. Последние обладают большой радиоактивностью и могут быть использованы в качестве «меченых» атомов и т. д. Разделенные уран и плутоний направляются вновь в котел для использования в качестве атомного горючего.

На рис. 22-17 показана одна из простейших схем атомного котла. Здесь атомным горючим служит U^{235} , а замедлителем графит: в графитовых блоках сделаны цилиндрические отверстия для стержней атомного горючего. Эти стержни изготавливаются из урана, покрытого защитным слоем алюминия; они помещаются внутрь алюминиевых трубок, а последние вставляются в графитовые гнезда. Для регулирования скорости цепной реакции в котел вводятся стержни бористой стали, хорошо поглощающей нейтроны.

Тепло, выделяемое в котле, должно быть отведено при посредстве того или иного теплоносителя — воды, тяжелой воды, газа, расплавленного металла (натрия или висмута). Этот теплоноситель должен возможно меньше поглощать нейтроны. Система охлаждения котла, осуществляемая посредством этого теплоносителя, должна отводить весьма большие количества тепла и работать безотказно. В схеме рис. 22-17 предполагается, что охлаждающий теплоноситель накачивается внутрь алюминиевых трубок, в промежуток между урановыми стержнями и стенками трубок (рис. 22-18). Чем выше допустимая температура теплоносителя, тем выше к. п. д. всей энергетической установки. В частности, это является

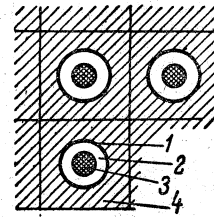


Рис. 22-18. Схема охлаждения для котла рис. 22-17.

причиной использования в качестве теплоносителя в некоторых котлах жидкого металла (натрия и висмута).

Для уменьшения потери нейтронов в окружающую среду котел снабжается отражательным экраном (называемым «тепловым» экраном, так как скорость медленных нейтронов равна скорости теплового движения), а для защиты обслуживающего персонала от радиоактивных излучений котел окружается вторым «биологическим» экраном, обычно бетонным.

В котле теплоноситель становится радиоактивным и потому опасно направлять его непосредственно в турбину, около которой должен находиться обслуживающий персонал. Между атомным котлом и турбиной вводится промежуточное звено — теплообменник. В схеме станции с теплоносителем натрием (рис. 22-19) таких теплообменников два: первичный жидкий натрий, поступающий из резервуара 1, нагревается в атомном котле 2 и, в свою очередь, нагревает в теплообменнике 3 вторичный жидкий натрий, нагреваемый из

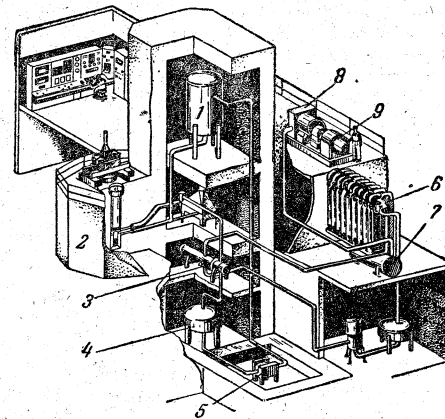


Рис. 22-19. Схема атомной электростанции с теплоносителем жидким натрием.

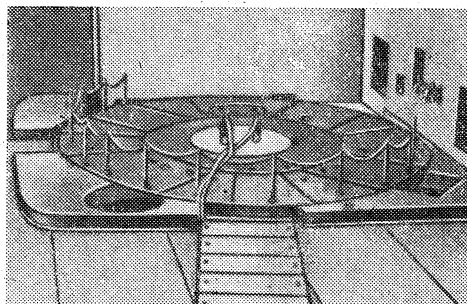


Рис. 22-20. Верхняя часть атомного котла и центральная часть пульта управления первой атомной электростанции СССР.

резервуара 4 электромагнитным насосом 5*. Тепло вторичного натрия используется сначала для перегрева водяного пара в перегревателе 6, а затем для получения водяного пара в паровом котле 7. Водяной пар не радиоактивен и безопасно используется в паровой турбине 8, снабженной конденсационной установкой и вращающей генератор переменного тока 9.

В современных энергетических атомных установках общий к. п. д. составляет примерно 25—30%, поэтому для получения электрической мощности, например в 50 000 кВт, нужна тепловая мощность атомного котла порядка 200 000 кВт.

На рис. 22-20 показаны верхняя часть атомного котла и центральная часть пульта управления Атомной электростанции Академии наук СССР.

22-7. Классификация электрических сетей

Электрические сети являются промежуточным звеном между электрической станцией и потребителем электроэнергии.

Схемы электрических сетей довольно сложны. Для упрощения и достижения наглядности часто применяется однолинейный способ изображения их, т. е. все соединения показы-

* Через жидкий металл пропускается большой электрический ток, взаимодействие которого с сильным магнитным полем приводит металл в движение.

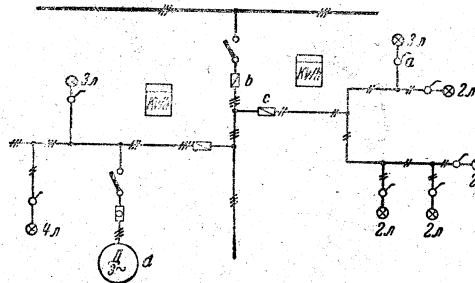


Рис. 22-21. Однолинейная схема проводки.

a — выключатель однополюсный; *b* — плавкий предохранитель; *c* — пробочный плавкий предохранитель; *d* — трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

ваются только для одной фазы. Иногда на таких схемах число проводов указывается числом поперечных штрихов (рис. 22-21). При этом отбрасывается и ряд деталей схемы.

Принято различать: принципиальные однолинейные, принципиальные трехлинейные (рис. 22-22) и монтажные схемы: последние составляются так же, как и трехлинейные схемы, но они должны также показывать территориальное расположение элементов электрической системы. Монтажные схемы служат руководством для непосредственного практического осуществления установки. Они разрабатываются на основании принципиальных схем.

Электрические сети по их рабочему напряжению можно разделить на три группы:

сети высокого напряжения более 100 кВ;
сети высокого напряжения до 35 кВ включительно;

сети низкого напряжения — так называются сети, в которых действующее напряжение между любым проводом и землей не превышает 250 в.

В первую группу входят главным образом длинные линии передачи энергии. При расчете сечения проводов таких сетей необходимо учитывать то обстоятельство, что емкость, индуктивность и сопротивление равномерно распределены вдоль линии (цепи с распределенными параметрами), вследствие чего при расчетах приходится учитывать конечную скорость распространения электромагнитных процессов вдоль проводов линии. Кроме того, из-за весьма высокого напряже-

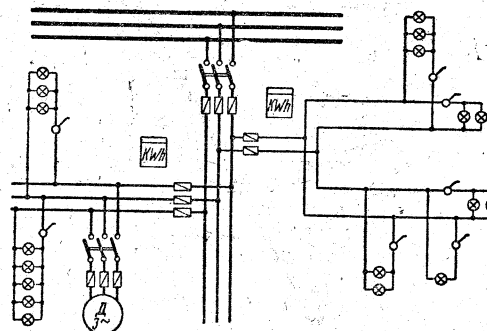


Рис. 22-22. Трехлинейная схема проводки.

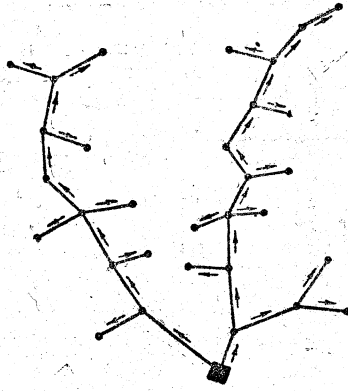


Рис. 22-23. Разомкнутые сети

ния этих линий часто приходится искусственно увеличивать диаметр проводов, чтобы снизить напряженность электрического поля близ поверхности провода и, таким образом, устранить возможность возникновения короны, вызывающей дополнительные потери энергии. Для увеличения диаметра проводов без повышения расхода цветных металлов применяются полые провода специальных конструкций; эта же цель иногда может быть достигнута применением сталалюминиевых проводов.

Вторую и третью группы составляют преимущественно распределительные сети. При расчете проводов воздушных сетей, принадлежащих к этим двум группам, учитываются только активное сопротивление и индуктивность линий, а при расчете проводов внутренних сетей и кабельных линий учитывается только активное сопротивление проводов.

Для расчета проводов существенное значение имеет, кроме протяженности, также и конфигурация сетей. В этом отношении сети делятся на разомкнутые (рис. 22-23) и замкнутые (рис. 22-24). Первые представляют собой совокупность разветвленных линий, получающих питание с одной стороны: направление движения энергии здесь строго определено. Расчет этого вида сетей значительно проще

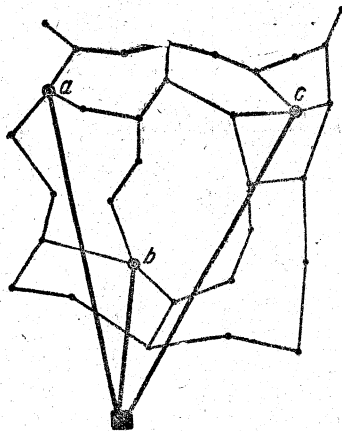


Рис. 22-24. Замкнутые сети.

расчета замкнутых сетей. В последних места потребления энергии соединены системой проводов, которые образуют замкнутые контуры. Направление движения энергии здесь во многом зависит от распределения нагрузки между отдельными точками сети. В замкнутой сети любой пункт потребления может получать энергию по крайней мере с двух сторон. Важным преимуществом замкнутых сетей является большая надежность в отношении бесперебойности электроснабжения.

В зависимости от способа подачи тока мы различаем в сетях питательные и распределительные линии; первые подводят электрическую энергию к важнейшим точкам сети — питательным пунктам (*a, b, c* на рис. 22-24), от которых энергия по проводам распределительных линий подается непосредственно потребителям.

Питательные линии рассчитываются по экономически выгодной потере напряжения с учетом возможного предела регулирования напряжения на шинах станций и трансформаторных подстанций. С увеличением сечения проводов уменьшаются потери энергии, но возрастают капитальные затраты на прокладку линии. При определенных условиях, очевидно, должен иметь место минимум ежегодных расходов, которому соответствует экономически выгодная потеря напряжения.

Экономическим сечением проводов воздушных линий или жил кабелей называется такое их сечение, при котором будут наименьшими ежегодные эксплуатационные расходы, складывающиеся из стоимости потерь энергии при передаче энергии и ежегодных расходов на обслуживание и амортизацию линии передачи. Конечно, эта величина зависит, с одной стороны, от стоимости электрической энергии, а с другой стороны, от стоимости оборудования линий. Она изменяется в зависимости от условий каждой данной энергосистемы или станции.

Для облегчения выбора экономического сечения Техническое управление Министерства строительства

Таблица 22-1

Предельная экономическая плотность тока, $a/м^2$

Наименование проводников	При продолжительности использования максимума нагрузки, ч		
	свыше 1 000 до 3 000	свыше 3 000 до 5 000	свыше 5 000 до 8 700
Голые провода и шины:			
а) медные	2,5	2,1	1,8
б) алюминиевые	1,3	1,1	1,0
Кабели с бумажной и про- вода с резиновой изоля- цией с жилами:			
а) медными	3,0	2,5	2,0
б) алюминиевыми	1,6	1,4	1,2
Кабели с резиновой изоля- цией и медными жилами	3,5	3,1	2,7

электростанций СССР рекомендовало принимать в качестве экономической плотности тока (т. е. плотности тока, рассчитанной на основании экономического сечения) значения, приведенные в табл. 22-1, для различной длительности использования максимальной нагрузки. Для изолированных проводов сечением 16 мм² и менее экономические плотности тока должны быть повышены на 40%.

Распределительные сети рассчитываются так, чтобы отклонения напряжения (§ 1-7) у приемников не выходили за допустимые пределы. Такие отклонения вызываются изменениями потери напряжения в проводах при изменениях нагрузки. Исходя из этого, на основе существующего опыта эксплуатации в расчетах городских сетей низкого напряжения принята величина потери напряжения от трансформаторной подстанции до последнего приемника не более 6% от номинального напряжения приемников.

22-8. Подсчет электрических нагрузок проводов

Для расчета проводов на потерю напряжения и нагревание необходимо предварительно подсчитать соответствующие электрические нагрузки и уточнить их размещение. Принято различать установленную и присоединенную мощности потребителя.

Установленная мощность есть суммарная мощность всех приемников энергии данного потребителя, определяемая на основании действительной полезной отдачи их, в частности, установленная мощность двигателя есть мощность, отдаваемая им на валу (указываемая на щитке двигателя в качестве его номинальной мощности).

Присоединенная мощность есть суммарная мощность, потребляемая всеми приемниками энергии данного потребителя при полной их нагрузке. В частности, для двигателей

$$P_{\text{прис}} = \frac{P_{\text{уст}}}{\eta},$$

где η — к. п. д. двигателя.

Для осветительной нагрузки и электроногревательных приборов (нагрузка «свет — быт») присоединенная мощность считается равной установленной мощности:

$$P_{\text{прис}} = P_{\text{уст}}.$$

Практически никогда не включаются одновременно все приемники тока, а двигатели не все время полностью загружаются. Это учитывается при подсчете нагрузки посредством коэффициента, учитывающего неодновременность работы и недогрузку двигателей, т. е.

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{прис}} k_c;$$

величина k_c называется коэффициентом спроса. В табл. 22-2 приведены ориентировочные значения этого коэффициента для различного рода нагрузок.

Таблица 22-2

Ориентировочные значения коэффициента спроса

Внутреннее освещение жилых, общественных и административных зданий	0,8
Внутреннее освещение промышленных предприятий	0,85—0,95
Освещение торговых помещений	1
Наружное освещение	1
Промышленность	
Металлообрабатывающая	0,6—0,8
Металлургическая	0,6—0,7
Горная	0,6—0,8
Химическая	0,9—1
Текстильная	0,8
Кустарная	0,3—0,5

22-9. Расчет проводов постоянного тока на потерю напряжения

Рассмотрим линию, питающую несколько приемников энергии, присоединенных к ней в разных местах (рис. 22-25). Такая линия обычно называется магистралью, а провода, ведущие к отдельным приемникам тока, — ответвлениями. Токи и сопротивления отдельных участков магистрали («участковые токи») обозначим римскими цифрами, а токи отдельных приемников — арабскими цифрами. Потерю напряжения ΔU определяем до наиболее удаленного приемника. В условиях рассматриваемой схемы

$$\Delta U = I_I R_I + I_{II} R_{II} + I_{III} R_{III} \quad (22-1)$$

заменяем токи магистрали токами приемников согласно первому закону Кирхгофа:

$$I_I = I_1 + I_2 + I_3; \quad I_{II} = I_2 + I_3$$

и, наконец, ток последнего участка магистрали равен току наиболее удаленного приемника:

$$I_{III} = I_3;$$

подставляя эти значения в уравнение (22-1), получаем:

$$\Delta U = I_1 R_I + I_2 (R_I + R_{II}) + I_3 (R_I + R_{II} + R_{III}).$$

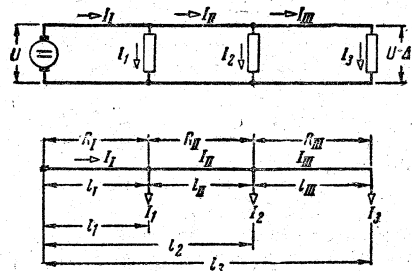


Рис. 22-25. Двухлинейная и однолинейная схемы линии постоянного тока одностороннего питания с несколькими сосредоточенными нагрузками.

Обозначив теперь суммарные сопротивления от питательного пункта до отдельных ответвлений

$$R_I + R_{II} + R_{III} = R_3;$$

$$R_I + R_{II} = R_2; R_I = R_1,$$

получим следующее выражение для потери напряжения:

$$\Delta U = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3, \quad (22-2)$$

т. е. потеря напряжения равна сумме произведений нагрузочных токов на сопротивления участков магистрали от питательного пункта до соответствующего ответвления.

Применение провода одинакового сечения по всей длине магистрали упрощает устройство линии, так как в каждом пункте изменения сечения требуется установка плавких предохранителей, соответствующих сечению провода. Поэтому весьма часто для более или менее значительных участков линии берется одинаковое сечение провода. В подобном случае уравнение (22-2) преобразуется следующим образом:

$$R_1 = \rho \frac{2l_1}{S}; R_2 = \rho \frac{2l_2}{S}; R_3 = \rho \frac{2l_3}{S};$$

следовательно,

$$\Delta U = \frac{2}{S} \rho (I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3)$$

или искомое значение

$$S = \frac{2\rho}{\Delta U} (I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3); \quad (22-3)$$

величина в скобках по аналогии с механикой носит название суммы моментов токов.

22-10. Расчет линий трехфазного тока

В трехфазной линии потерей напряжения называется арифметическая разность между линейными напряжениями $U_{1л}$ и $U_{2л}$ в начале и конце линии.

Расчет трехфазной линии на потерю напряжения проводится для случая полной симметричной нагрузки ее. Симметричность нагрузки позволяет вести весь расчет на одну фазу установки, считая, что и генератор и приемники соединены звездой, так как при заданных линейном напряжении, мощности и $\cos \varphi$ приемников — линейные токи, а следовательно, и потеря напряжения не зависят от фактического способа соединения приемников.

Так как

$$U_{1л} = U_{1ф} \sqrt{3} \quad \text{и} \quad U_{2л} = U_{2ф} \sqrt{3},$$

то потеря напряжения

$$\Delta U = U_{1л} - U_{2л} = \sqrt{3} (U_{1ф} - U_{2ф}), \quad (22-4)$$

т. е. потеря напряжения в линии $\sqrt{3}$ раз больше арифметической разности фазных напряжений в начале и конце линии. Геометрическая разность этих же двух напряжений, называемая падением напряжения в проводе:

$$U_{1ф} - U_{2ф} = Z, \quad (22-5)$$

где I — линейный ток, а Z — полное сопротивление провода, состоящее из активного сопротивления R и индуктивного сопротивления X , обусловленного охватывающим провод переменным магнитным потоком Φ , создаваемым токами всех трех проводов линии.

Обратимся теперь к определению потери напряжения в проводе. Эта величина вычисляется так же, как потеря напряжения в трансформаторе (§ 13-10). Предположим, что ток I отстает на произвольный угол φ от фазного напряжения у приемника $U_{2ф}$ (рис. 22-26). Активное падение напряжения $IR = IR_0 l$ (где R_0 — активное сопротивление 1 км провода) совпадает по фазе с током I , тогда как индуктивное падение напряжения $IX = IX_0 l$ опережает ток на 90° . Складывая два этих вектора с вектором $U_{2ф}$, получим вектор фазного напряжения $U_{1ф}$ в начале линии. Падение напряжения IZ в проводе изображается, следовательно, на векторной диаграмме отрезком

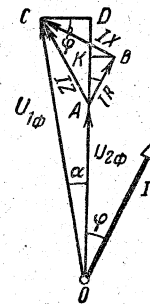


Рис. 22-26. Определение потери напряжения в линии переменного тока.

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC}.$$

Для вычисления потери напряжения в линии нам нужна не эта величина, а арифметическая разность $U_{1ф} - U_{2ф}$, т. е. разность длин отрезков OC и OA . Однако при отстающем токе и небольшой по сравнению с $U_{2ф}$ величиной падения напряжения AC угол α между OA и OC оказывается настолько малым, что длина проекции OD вектора OC на направление вектора OA с достаточной для практики точностью может быть принята равной длине самого вектора OC . В этом случае разность $U_{1ф} - U_{2ф}$ представится отрезком AD , который можно рассматривать как сумму проекций AK — вектора $AB = IR$ и KD — вектора $BC = IX$ на направление вектора $U_{2ф}$.

Так как

$$AK = AB \cos \varphi = IR \cos \varphi = IR_0 l \cos \varphi,$$

а

$$KD = BC \sin \varphi = IX \sin \varphi = IX_0 l \sin \varphi,$$

то разность фазных напряжений

$$U_{1ф} - U_{2ф} = IR_0 l \cos \varphi + IX_0 l \sin \varphi = Il (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi),$$

а потеря напряжения в линии согласно (22-4)

$$\Delta U = \sqrt{3} Il (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi). \quad (22-6)$$

По этой формуле и производится расчет трехфазных линий на потерю напряжения.

Для того чтобы определить сечение провода на основании уравнения (22-6), необходимо знать значение L_0 индуктивности на 1 км провода линии. Эта величина может быть определена, в свою очередь, по расстоянию между проводами линии и их радиусу.

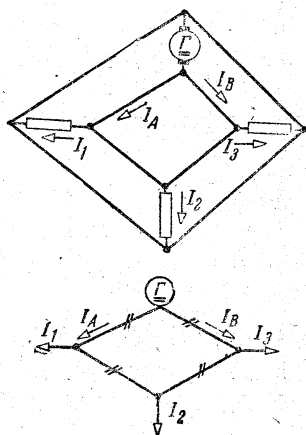


Рис. 22-27. Двухлинейная и однолинейная схемы кольцевой линии.

Индуктивное сопротивление линии относительно мало меняется при изменениях в практически употребительных пределах расстояния между проводами воздушной линии и их сечения. При расчете проводов воздушной линии мы можем ориентировочно принять до выяснения сечения проводов индуктивное сопротивление на 1 км линии равным 0,35—0,40 ом/км.

Индуктивность внутренних проволок незначительна; равным образом можно пренебречь влиянием индуктивного сопротивления кабельных линий.

Выше рассмотрены расчеты проводов при одностороннем питании нагрузки: при двухстороннем питании нагрузки (рис. 22-27), прежде чем приступить к расчету проводов, необходимо сначала на основании законов Кирхгофа найти распределение токов между проводами, питающими нагрузку с двух сторон.

Сечение провода, определенное по потере напряжения, затем округляется до ближайшего стандартного значения, после чего полученное сечение и нагрузочный ток сопоставляется с таблицей допустимых по нагреву нагрузок током.

Расчет длинных проводов на потерю напряжения почти всегда дает сечение, с избытком удовлетворяющее требованиям таблицы допустимых нагрузок по нагреву, но при расчете сечения коротких внутренних проводов требования таблицы являются основными для выбора сечения проводов.

Расчет проводов на механическую прочность имеет большое значение для воздушных линий, в особенности для длинных линий передач с большими пролетами между опорами. Механическая нагрузка проводов воздушных линий складывается из веса самих проводов, возможной нагрузки весом льда (при явлении гололеда) и нагрузки давлением ветра. В основу расчета нагрузки берется суммарная тяжесть провода и льда. Не останавливаясь на соответствующих специальных расчетах, мы приводим таблицу минимальных сечений медных проводов, допускаемых по соображениям механической прочности (табл. 22-3).

Алюминиевые провода для воздушных линий допускаются только многопроволочные

Таблица 22-3

Минимальное сечение медных проводов, мм²

Для проводов внутри и снаружи арматур	0,5
Для изолированных проводов при прокладке в трубах или на роликах, находящихся один от другого на расстоянии не более 1 м	1
Для шнуров, проложенных неподвижно	0,75
Для голых проводов в зданиях при пролете до 12 м	4
Для воздушных линий низкого напряжения до 1 кв	6
Для воздушных линий высокого напряжения 3—10 кв	10

сечением не менее 16 мм² при напряжении до 10 кв включительно и сечение не менее 25 мм² при напряжении 35 кв. Стальные голые провода для наружных установок допускаются диаметром 3,5 мм и выше.

22-11. Выбор сечения проводников по нагреву и выбор плавких вставок предохранителей

В недавнем прошлом сечения проводов при проверке на нагрев определялись на основании выбора номинального тока плавкой вставки предохранителей. Опыт показал, что такой порядок выбора в некоторых практических случаях не обеспечивал должной защиты проводов от перегрева. По этой причине в новом (3-м) издании «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) Министерства строительства электростанций вопросы выбора сечения проводников рассматриваются независимо от вопросов выбора их защиты. В ПУЭ содержатся весьма детальные указания по обоим вопросам.

В этих правилах даны таблицы допустимых длительных токовых нагрузок различных видов проводников (табл. 22-4) и указано, что проводники должны удовлетворять требованиям в отношении предельно допустимого нагрева с учетом не только нормальных, но и аварийных режимов. Рабочий ток нормального режима определяется на основании подсчета нагрузки с учетом коэффициента спроса (см. § 22-8). Расчет аварийных токов является специальным электротехническим вопросом, выходящим за пределы данного курса. В ПУЭ отмечается, что «при проверке на нагрев принимается получасовой максимум токовой нагрузки, который представляет собой максимальную из средних получасовых токовых нагрузок данного элемента сети».

При повторно-кратковременном, кратковременном и тому подобных режимах (§ 19-2) вычисляется эквивалентный длительный ток (§ 19-3); причем, если сечение медных проводников превышает 10 мм², а алюминиевых 16 мм², то токовые нагрузки определяются путем умножения на коэффициент $\frac{0,875}{\sqrt{I \cdot B}}$, где

Таблица 22-4

Наибольшие длительно допускаемые нагрузки в амперах для проводов и кабелей с медными жилами, а также для голых медных и алюминиевых проводов

Сечение проводящей жилы, мм ²	Провода марок ПР, ПРД, ПВ, ППВ, проложенные открыто	В закрытых помещениях									Вне помещений						
		Провода и кабели марок СРГ, СРА, СРБ, ВРГ, ВРБ, ТПРФ, ПРП, проложенные открыто (см. примечание)		Провода марок ПР, ПРГ, ПРТО в газовых трубах			Провода марки ПРТО в газовых трубах			Кабели с бумажной изоляцией до 1000 в, проложенные открыто			Кабели с бумажной изоляцией, проложенные в земле			Голые провода на открытом воздухе	
		двух-жилные	трех-жилные	2 одно-жилных	3 одно-жилных	4 одно-жилных	1 двух-жилный	1 трех-жилный	двух-жилные	трех-жилные	четырёх-жилные	двух-жилные	трех-жилные	четырёх-жилные	Медь	Алюминий	
0,5	10	Допускается только для зарядки светильников															
0,75	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1	15	—	—	14	13	12	13	12	—	—	—	—	—	—	—	—	
1,5	20	17	17	17	15	14	16	13	25	18	—	35	30	—	—	—	
2,5	27	24	22	24	22	22	22	19	30	28	25	45	40	—	—	—	
4	36	34	31	34	31	27	28	24	40	37	35	60	55	50	50	—	
6	46	45	37	41	37	35	35	30	55	45	45	80	70	60	70	—	
10	70	60	50	60	55	45	50	45	75	60	60	105	95	85	95	75	
16	90	80	65	75	70	65	70	60	95	80	80	140	120	115	130	105	
25	125	100	85	100	90	80	90	75	130	105	100	185	160	150	180	135	
35	150	125	105	120	110	100	110	90	150	125	120	225	190	175	220	170	
50	190	155	130	165	150	135	140	120	185	155	145	270	235	215	270	215	
70	240	190	160	200	185	165	175	155	225	200	185	325	285	265	340	265	
95	290	230	195	245	225	200	215	190	275	245	215	380	340	310	415	325	
120	340	265	230	280	255	230	260	220	320	285	260	435	390	350	485	375	

Примечание. Нагрузки для одножильных проводов этих марок принимаются по графе 2, т. е. те же что и для проводов марок ПР, ПРГ и т. д.

ПВ — продолжительность включения, выраженная в относительных величинах (§ 19-2).

О выборе номинальных токов плавких вставок уже было упомянуто в § 1-8. Согласно ПУЭ эти токи следует выбирать, по возможности, минимальными, но иметь в виду, что не должно происходить отключений при кратковременных перегрузках пусковыми токами электродвигателей, токами пиков технологических нагрузок и т. п. При этом номинальные токи плавких вставок не должны превосходить допустимые длительные нагрузки защищаемых проводников более чем в 3 раза. Когда номинальные токи плавких вставок значительно превышают допустимые длительные токи проводов, тогда предохранители защищают провода от коротких замыканий, но не от длительных перегрузок.

Учитывая указанные возможности, правила указывают особо, когда необходима защита от перегрузки, именно такая защита обязательна для осветительных сетей и сетей бытовых и передвижных электроприемников в жилых и общественных зданиях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, торговых и складских помещений, а также пожаро- и взрывоопасных помещений. Следовательно, в этих сетях номинальный ток плавких вставок следует выбирать в зависимости от допустимых длительных токов защищаемых про-

водников. В подобных случаях отключение при перегрузке обеспечивается тем, что согласно ПУЭ номинальный ток плавкого предохранителя (или другого аппарата защиты) должен составлять не более 125% от допустимого длительного тока проводника.

Что же касается сетей промышленных предприятий и силовых сетей жилых, административных и общественных зданий и торговых помещений, то эти сети должны быть защищены от токов перегрузки только в случаях, когда по условиям технологического процесса или режиму работы сети может возникнуть длительная перегрузка проводов и кабелей.

Требование защиты от перегрузок в ряде случаев обуславливает увеличение сечения проводников, так как плавкие вставки, защищающие от перегрузки, могут не выдерживать толчков пусковых токов электродвигателей и т. п., а увеличение номинального тока вставок в соответствии с пусковыми токами требует увеличения сечения проводников.

Если сечение проводника, определенное по нагреву, оказалось меньше сечения, необходимого по другим условиям (потери и отклонению напряжения, механической прочности, устойчивости термической и динамической при токах короткого замыкания), то следует применять наибольшее сечение.

22-12. Материалы и конструктивные элементы сетей

Материалами для проводов распределительных сетей и сетей низкого напряжения служат медь и алюминий. Для воздушных линий применяются сталеалюминиевые провода или полые медные провода особой конструкции.

В целях увеличения гибкости и механической прочности провода изготавливаются многопроволочными, т. е. скрученными из нескольких проволок. Однопроволочные провода применяются при малых сечениях; по прочности они уступают многопроволочным.

Медь в качестве материала для проводов имеет преимущества хорошей проводимости наряду с механической прочностью. Для голых проводов применяется твердотянутая медь, которая должна иметь предел прочности при растяжении не менее 38 кг/мм^2 ; допускаемая нагрузка $14-18 \text{ кг/мм}^2$. Удельное сопротивление проводниковой меди должно быть не более $0,01784 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, удельный вес твердотянутой меди $\gamma=8,96$. Медные провода изготавливаются однопроволочными и многопроволочными, но однопроволочные провода наибольшего сечения 16 мм^2 допускаются для линий с номинальным напряжением не выше 10 кв .

Алюминий обладает по сравнению с медью большим удельным сопротивлением, меньшим удельным весом и меньшей механической прочностью. Для проводов допускается алюминий с удельным сопротивлением не выше $0,029 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; его удельный вес $2,7$; допускается нагрузка 9 кг/мм^2 . При одинаковом сопротивлении проводов сечение алюминиевого провода должно быть больше примерно в $1,7$ раза; однако в этих условиях алюминиевый провод будет почти в 2 раза легче. Из-за меньшей механической прочности алюминия приходится считать с большим провесом алюминиевых проводов в воздушных линиях; следовательно, для алюминиевых проводов необходимы более высокие опоры (мачты).

Сталеалюминиевые провода состоят из стальной сердцевинки, скрученной из стальных оцинкованных проволок; на эту сердцевинку навиты в два слоя алюминиевые проволоки. Благодаря стальной сердцевинке эти провода обладают большой механической прочностью, что необходимо для линий с большими пролетами между опорами.

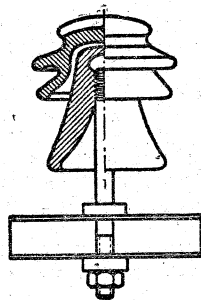


Рис. 22-28. Штыревой изолятор.

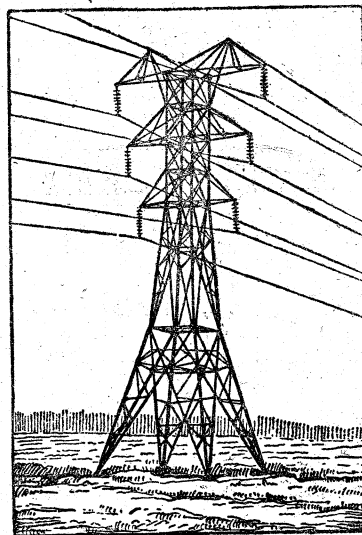


Рис. 22-29. Металлическая опора для двух трехфазных линий 110 кв с двумя заземленными защитными тросами.

Сталь является наиболее дешевым материалом для проводов и обладает, кроме того, большей механической прочностью; с другой стороны, удельное сопротивление торговых сортов стали (т. е. стали с примесями углерода, кремния и марганца) относительно велико ($0,12-0,16 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), вследствие чего стальной провод весит в $7-8$ раз больше медного провода того же сопротивления. Увеличение веса проводов требует соответствующего повышения механической прочности опор и изоляторов, а следовательно, удорожает установку. Наконец, стальные провода подвержены ржавлению, от которого их не вполне защищает оцинкование. В силу всех этих причин стальные провода применяются в сетях с небольшой нагрузкой, например в загородных поселковых сетях, в сельскохозяйственных сетях и, наконец, для линий связи.

По способу прокладки проводов мы различаем: воздушные линии, внутренние проводки и кабельные линии. Воздушные линии всегда прокладываются голым проводом, однопроволочным или многопроволочным. При напряжениях примерно до 35 кв провод укрепляется на штыревых изоляторах (рис. 22-28) и монтируется на деревянных или металлических опорах. Для более высоких напряжений применяются гирлянды подвесных изоляторов (рис. 22-29 и 22-30).

Изоляторы конструируются так, чтобы при возникновении перенапряжений в линии (напряжений, значительно превосходящих нормальное рабочее, например вследствие удара молнии) происходило перекрытие изолятора электрической дугой по воздуху, но не пробой фарфора изолятора. Для ввода воздушной линии в здание применяются проходные изоляторы (рис. 22-31).

Расстояние между опорами следует выбирать так, чтобы суммарная стоимость опор и

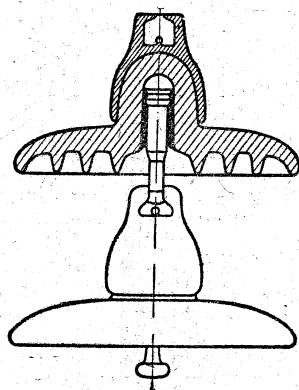


Рис. 22-30. Два подвесных изолятора.

изоляторов была минимальной. Увеличивая вдвое расстояние между опорами, мы вдвое уменьшаем число опор и изоляторов, зато повышается стоимость опор, так как резко возрастает их механическая нагрузка. Последняя складывается из веса самих проводов, возможной нагрузки весом льда и нагрузки давлением ветра.

Если же, напротив, сократить расстояния между опорами, то можно уменьшить высоту опор (благодаря уменьшению провеса проводов), их поперечные сечения, а следовательно, и стоимость отдельных опор. Но так как при этом одновременно возрастает число опор и изоляторов на каждый километр линии, то суммарная стоимость единицы длины начинает возрастать при уменьшении длины пролета ниже некоторого определенного значения. Поэтому для каждого рабочего напряжения существует определенное наиболее выгодное расстояние между опорами; с повышением рабочего напряжения это расстояние увеличивается.

Для относительно небольших рабочих напряжений расстояние между опорами берется равным 30—50 м, для более высоких напряжений оно доходит до 400 м и больше. При прочих равных условиях предпочтительнее большие пролеты между опорами, так как каждая точка подвеса провода является вместе с тем слабым местом изоляции линии и путем для тока утечки через изоляцию.

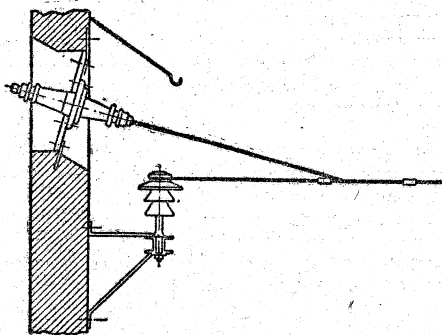


Рис. 22-31. Проходной изолятор.

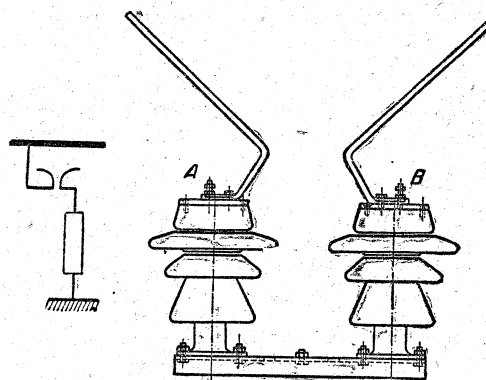


Рис. 22-32. Роговой разрядник.

Расстояние между проводами воздушной линии выбирается так, чтобы при качаниях их, вызываемых ветром, не мог произойти пробой воздушного промежутка. С увеличением пролета между опорами растет, конечно, и размах качаний проводов, поэтому расстояние между проводами при больших пролетах приходится брать большим, чем при малых.

Для того чтобы предохранить провода воздушной линии от влияния атмосферного электричества, по верхушкам опор над проводами прокладываются заземленные тросы из стальной оцинкованной проволоки. Эти тросы прикрепляются непосредственно к вершинам металлических опор (рис. 22-29), а сами опоры присоединяются к заземлениям (металлическим пластинам, трубам или полосам, закопанным в землю ниже уровня промерзания почвы). В случае деревянных опор тросы заземляются посредством особых вертикальных проводников, опускающихся вдоль опор. Заземленные тросы должны принимать на себя прямые удары молнии и быстро отводить атмосферные заряды в землю; в этом основное назначение их. Кроме того, тросы увеличивают механическую устойчивость опор, что особенно важно при одностороннем обрыве проводов линии.

Помимо заземленных тросов, линии передачи снабжаются рядом других устройств для защиты от перенапряжений, возникающих вследствие грозных разрядов; в частности, для такой защиты служат искровые (роговые) разрядники, включаемые между защищаемой линией и землей (рис. 22-32).

При нормальных рабочих условиях линии напряжение между проводом и землей не может пробить воздушный промежуток разрядника, но при возникновении опасного перенапряжения этот промежуток пробивается, и заряд атмосферного электричества отводится в землю. Таким образом, разрядник является специально созданным слабым местом в изоляции установки. Для того чтобы ток дуги в разряднике не достигал слишком больших значений и прерывался, как только напряжение в линии понизится до нормального, разрядник снабжается специальным дугогасительным устройством.

Несмотря на все меры защиты, грозные разряды все же вызывают отключения воз-

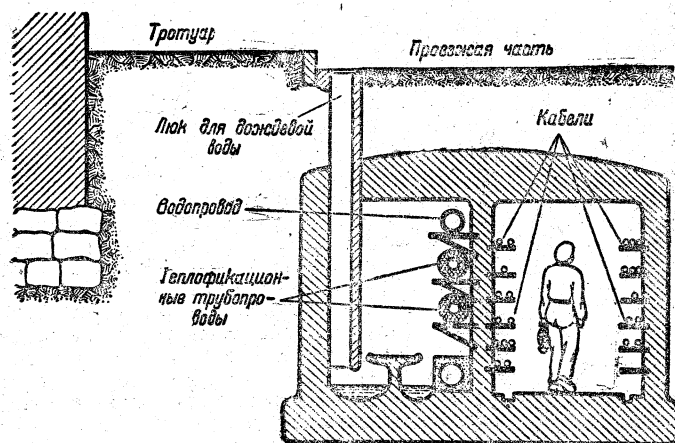


Рис. 22-33. Разрез городского коллектора.

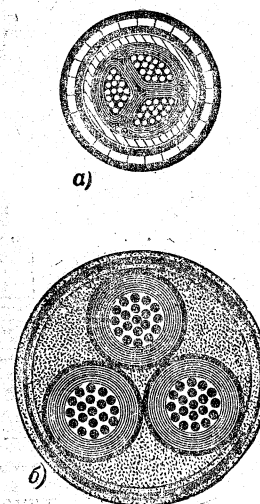


Рис. 22-34. Трехфазные бронированные кабели.

душных линий, а следовательно, и перебои в снабжении энергией. В этом отношении несомненно преимущества кабельной линии, которая прокладывается в земле и благодаря этому находится вне влияния атмосферного электрического поля. Преимуществами такого способа прокладки является также и то, что кабельная линия защищена от внешних механических воздействий, безопасна для населения, не занимает места на улицах. Зато устройство кабельной линии стоит значительно дороже (примерно втрое), чем устройство воздушной линии, а изготовление кабелей для напряжений свыше 100 кВ связано с большими техническими трудностями. По этим причинам кабельные линии прокладываются в тех случаях, когда их специфические преимущества имеют большее значение, чем увеличение капитальных затрат на прокладку линии. Так, например, городские распределительные сети (6—10 кВ) выполняются преимущественно в виде кабельных линий. Внутри помещений кабели прокладываются в каналах под полом.

В больших городах и на крупных заводах подземные электрические сети помещаются в общем коллекторе. На рис. 22-33 показан городской коллектор, в одной части которого проложены силовые и телефонные кабели, а в другой, отделенной сплошной стеной, размещены трубы водопровода, теплофикации и канализации.

В кабеле проводящая жила окружена кабельной бумагой, пропитанной смесью масла с канифолью; поверх бумаги лежит свинцовая оболочка (рис. 22-34) без швов, защищающая изоляцию от проникновения влаги. В свою очередь свинцовая оболочка прикрыта слоем джута, пропитанного асфальтовой смолой. Сверх этой оболочки для защиты от механических повреждений лежит броня из стальной ленты или проволоки; последняя, в свою очередь, защищена от ржавления слоем асфальтированного джута. Такая тщательная изоля-

ция необходима потому, что малейшие следы влаги в изоляции во время эксплуатации могут вызвать пробой изоляции и аварию кабеля. Кабели переменного тока должны быть построены так, чтобы в броне кабеля не могло замыкаться переменное магнитное поле, что повело бы к значительным потерям на вихревые токи, а главное — к недопустимому перегреву. Поэтому одножильные кабели переменного тока не должны иметь стальной брони. Результирующее магнитное поле трех проводов трехфазной линии значительно слабее однофазного. Поэтому для трехфазного тока применяется трехфазный кабель (рис. 22-34), в котором три изолированные одна от другой жилы снабжаются общей стальной броней, а для уменьшения пустот отдельным жилам придается вид секторов (рис. 22-34,а). Для того чтобы электрическое поле было направлено перпендикулярно слоям бумаги, каждая жила высоковольтного кабеля снабжается заземленной свинцовой оболочкой (рис. 22-34,б).

Кабель должен быть тщательно защищен от доступа влаги в полости, заполненные изолирующей прокладкой; в частности, при хранении на складах и транспортировке концы кабеля заделываются. При работе кабеля нагревание его рабочим током вызывает различное расширение составных частей кабеля, вследствие чего в кабеле образуется внутренний вакуум, и кабель может засосать влагу из почвы или воздуха. В целях предохранения кабеля от проникновения влаги концы кабеля в местах ввода, например к потребителю, оборудуются специальными концевыми муфтами (рис. 22-35) или воронками, заполненными кабельной массой на битуминозном основании.

Для напряжений от 60 до 220 кВ применяются кабели с масляным наполнением (рис. 22-36). В таких кабелях проводящая жила располагается вокруг полой стальной спирали; внутренняя полость последней служит каналом для минерального масла. Это масло находится

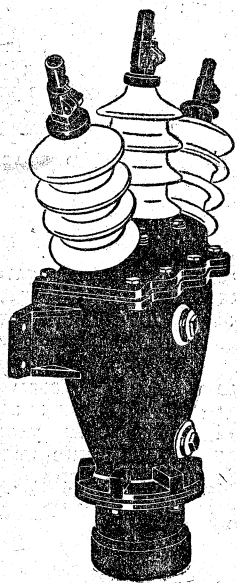


Рис. 22-35. Концевая кабельная муфта.

под давлением, создаваемым посредством баков давления, размещенных на определенных расстояниях вдоль кабельной линии. При высоком напряжении для изоляции пагубное значение имеет наличие пузырьков воздуха в массе изолятора; в кабеле с масляным наполнением даже мельчайшие пузырьки воздуха и влаги вытесняются маслом, пропитывающим изолирующий бумажный слой.

Внутренняя проводка должна выполняться изолированными проводами. Голые провода допускаются в тех специальных помещениях, в которых изолирующая оболочка заведомо подвержена опасности быстрого разрушения вследствие химических процессов (например, в аккумуляторных); в таких помещениях голые провода должны быть в достаточной мере защищены от случайного прикосновения либо путем укрепления их на недоступной по условиям эксплуатации высоте, либо посредством сплошных прочных покрытий. В изолированных проводах наиболее существенной частью изоляции является цельная резиновая трубка (рис. 22-37), охватывающая жи-

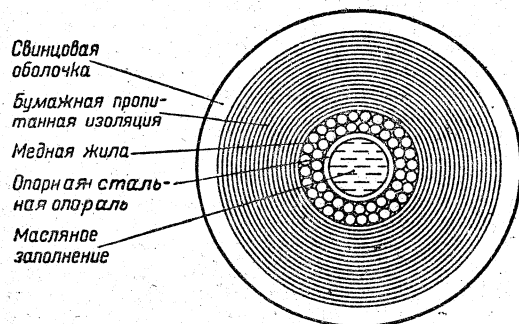


Рис. 22-36. Кабель с масляным наполнением.



Рис. 22-37. Изолированный провод.

лу провода, оплетенную хлопчатобумажной нитью. Этот тонкий слой резины защищает провод от проникновения влаги. Обычно применяется вулканизированная резина, а так как она химически действует на медь, то для защиты от таких воздействий медная жила провода облуживается. Для защиты от механических повреждений резина снабжается защитным покровом из хлопчатобумажной ткани. Этот внешний покров, в свою очередь, может быть асфальтирован в целях придания ему непроницаемости для воздуха. Чем лучше закрыта резина от воздуха, тем дольше она сохраняет свои изолирующие свойства, не высыхает и не крошится.

Для присоединения передвижных приемников тока (например, настольных и ручных ламп, паяльников, утюгов и т. д.) служат шнуры, которые представляют собой системы из двух или нескольких соединенных вместе изолированных гибких жил. С целью усиления механической защиты шнуры и гибкие провода снабжаются иногда металлической броней.

Для сетей с напряжением не выше 220—500 в употребляются следующие основные типы изолированных проводов.

ПР — провод медный с резиновой изоляцией;

АПР — алюминиевый провод с резиновой изоляцией;

ПВ — провод медный в полихлорвиниловой изоляции;

АПВ — то же, но с алюминиевой токопроводящей жилой;

ПРЛ — подобен проводу ПР, но в оплетке, покрытой лаком;

ПРГ — подобен проводу ПР, но обладает повышенной гибкостью и служит для присоединения подвижных частей машин, приборов и аппаратов;

ПГВ — то же, но в полихлорвиниловой изоляции;

ПРГЛ — подобен проводу ПРГ, но в оплетке, покрытой лаком;

ПРД — подобен проводу ПР, но имеет две жилы;

ШР — шнур с резиновой изоляцией, двухжильный;

ПРТО — провод с резиновой изоляцией для прокладки в трубах;

ПРГД — провод для электрической дуговой сварки;

ПРП — провод с резиновой изоляцией панцирный (защитная и экранирующая оплетка из стальной проволоки);

ПРШП — провод с резиновой изоляцией в шланге панцирный;

ТПРФ — провод с резиновой изоляцией в трубчатой металлической фальцованной оболочке;

АР — арматурный одножильный провод с резиновой изоляцией, служит для прокладки внутри и поверх осветительной арматуры в установках с напряжением до —220 в;

АРД — арматурный провод с резиновой изоляцией двухжильный, применяется подобно АР;

ШРП — шнур с резиновой изоляцией подвесной для подвеса блочных осветительных арматур, применяется в быту.

Изолированные провода прокладываются открыто на роликах и изоляторах. Под штукатуркой провода прокладываются в эбонитовых трубках (скрытая проводка). Наконец, в сырых помещениях, в помещениях с проводящей пылью, помещениях с едкими парами и газами изолированные провода прокладываются в стальных трубах.

22-13. Трансформаторные подстанции

Трансформирование переменного тока требует в условиях установок высокого напряжения, помимо самих трансформаторов, соответствующей коммутационной аппаратуры (разъединителей, масляных выключателей, предохранителей и т. д.), щитов управления, измерительных приборов и т. д. Совокупность

всего этого оборудования, служащего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, называется трансформаторной подстанцией.

В зависимости от установленной мощности и напряжения к такого вида установкам принадлежат, с одной стороны, весьма мощные районные подстанции со сложным оборудованием, питательные подстанции крупных заводов и т. п.; с другой стороны, к их же числу нужно отнести и трансформаторные киоски (будки) на один-два трансформатора, устраиваемых для питания энергией осветительных установок, мелких предприятий и т. д.

Вопросы схем и оборудования таких подстанций являются предметом специальных электротехнических дисциплин и выходят за рамки данной книги. Мы упомянем здесь лишь некоторые характерные положения, связанные с работой трансформаторных подстанций.

Довольно часто на подстанциях разделяется питание силовой и осветительной нагрузок. Например, устанавливаются два транс-

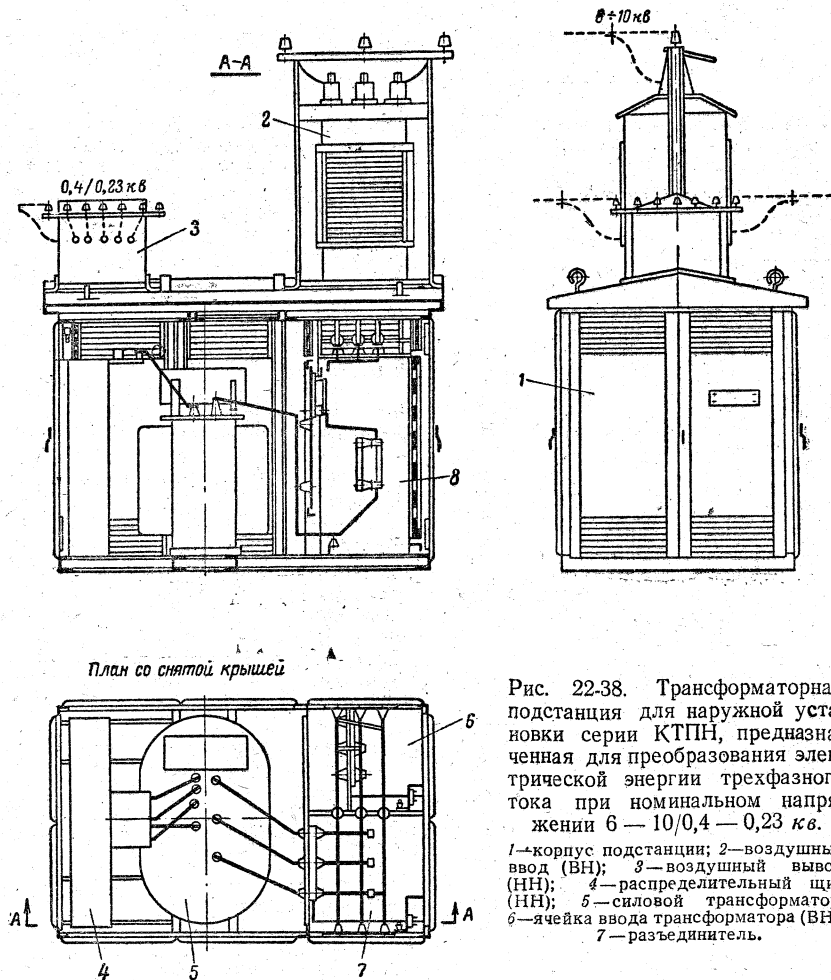


Рис. 22-38. Трансформаторная подстанция для наружной установки серии КТПН, предназначенная для преобразования электрической энергии трехфазного тока при номинальном напряжении 6 — 10/0,4 — 0,23 кВ.

1 — корпус подстанции; 2 — воздушный ввод (ВН); 3 — воздушный вывод (НН); 4 — распределительный щит (НН); 5 — силовой трансформатор; 6 — ячейка ввода трансформатора (ВН); 7 — разъединитель.

форматора: один — для силовой, а второй — для осветительной нагрузки.

Подобное раздельное питание освещения и двигателей желательно даже при одинаковом напряжении силовой и осветительной сетей, так как при объединенном питании пусковые токи двигателей вызывают заметные колебания напряжения, результатом чего являются неприятные «мигания» ламп накаливания.

Со стороны высокого напряжения трансформаторы присоединяются через разъединители и масляные выключатели.

Счетчики для учета энергии на трансформаторных подстанциях включаются через измерительные трансформаторы на стороне высокого напряжения; при таком включении они учитывают также и потери трансформаторов. Для определения среднего коэффициента мощности силовые трансформаторы снабжаются счетчиками реактивной энергии.

На рис. 22-38 изображен разрез закрытой трансформаторной подстанции серии КТПН.

Для исправной работы трансформаторной подстанции весьма существенным является ее масляное хозяйство. В результате соприкосновения с воздухом масло воспринимает влагу, окисляется и загрязняется, вследствие чего ухудшаются его изолирующие свойства, а образовавшиеся в масле кислоты вредно действуют на изоляционные материалы аппарата. По этим причинам следует периодически проверять состояние масла путем соответствующих испытаний его проб, взятых из баков трансформаторов и масляных выключателей. У трансформаторов на 2—20 кВ, находящихся в длительной нормальной эксплуатации, при естественном охлаждении отбор проб масла производится раз в 12 мес. и, кроме того, при искусственном охлаждении — раз в 6 мес. У масляных выключателей на напряжении до 20 кВ этот отбор проб производится раз в 12 мес. и, кроме того, при первой возможности после каждых трех автоматических выключений.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Абсолютная погрешность 155 | Векторная диаграмма 79 |
| — практическая система единиц 13 | — — асинхронного двигателя 242, 244 |
| Аварийное освещение 431 | — — синхронной машины 320, 323, 329 |
| Автоматический выключатель 406 | — — трансформатора 196, 200 |
| Автотрансформатор 210 | Взаимная индукция 62 |
| Аккумулятор 17 | Взаимодействие проводов 56 |
| Активная мощность 94 | Вибрационная система 185 |
| — проводимость 100 | Вибропреобразователь 394 |
| — составляющая тока 99 | Видность 418 |
| Активное напряжение 82 | Вихревые токи 59, 140 |
| — сопротивление 83 | Включение цепи 64 |
| Акцептор 363 | Внешняя цепь 12 |
| Алюминиевые провода 454 | Внутреннее сопротивление 13 |
| Ампер М. А. 55 | Внутренний фотоэффект 377 |
| Амперметр 160 | Внутренняя проводка 457 |
| Амплидин 296 | Возбудитель 311 |
| Амплитуда 77 | Волжская ГЭС им. Ленина 436 |
| Анод 338 | Волновая обмотка 272 |
| Анодный ток 338 | Вологодин В. П. 385 |
| Асинхронная машина 232 | Вольт 13 |
| Асинхронный генератор 261 | Вольтампер 97 |
| — пуск 322 | Вольтамперметр 166 |
| Атомная электростанция 446 | Вольтметр 161 |
| База триода 370 | Вольтсекунда 44 |
| Барабанный контроллер 407 | Вращающееся магнитное поле 126 |
| — якорь 271 | Вращающий момент 245, 273, 325 |
| Безреактивная цепь 81 | Вторичная эмиссия 349 |
| Беличье колесо 233 | Выбор двигателя 400 |
| Биметаллический элемент 409 | Выдержка времени 392 |
| Блок-схема 379, 390 | Выключатель масляный 410 |
| Бонч-Бруевич М. А. 384 | — нагрузки 414 |
| Броневого сердечник 214 | Вынужденная составляющая 152 |
| Вавилов С. И. 424 | Выпрямитель 357 |
| Вариация показаний 157 | Выпрямительный мост 147 |
| Ватт 21 | Выпрямление 145 |
| Ваттметр 172 | Высшие гармонические 132 |
| Вебер 44 | |
| Вектор 79 | Газовая плазма 352 |
| | Газосветная лампа 422 |

- Газотрон 352
 Гальванический элемент 16
 Гаусс 44
 Генератор 12, 59
 — ламповый 384
 — постоянного тока 281
 — реактивной мощности 104
 Генри 60
 Германиевый диод 368
 Герц 75
 Гидрогенератор 312
 Гидроэлектрические станции 442
 Глубина проникновения 84
 ГОЭЛРО 435
 График нагрузки 440
 Группа соединений 209
 Групповой привод 388
 — щиток 26
- Датчик 188
 Двигатель 232, 288, 301, 322
 — с вытеснением тока 252
 — — контактными кольцами 251
 Двигатель-генератор 295
 Двойная клетка 252
 Двух ваттметров способ 176
 Двухполупериодное выпрямление 146
 Двухслойная обмотка 237
 Действующее значение тока 78, 133
 Деривационная гидростанция 442
 Детектирование 340
 Джоуль 21
 Динамическое сопротивление 41
 — торможение 331
 Динатронный эффект 349
 Диод 337
 Дифференциальное реле 414
 Диэлектрик 67
 Диэлектрическая проницаемость 67
 Днепрогэс 436
 Добавочное сопротивление 160
 Доливо-Добровольский М. О. 116, 207
 Донор 363
 Дополнительные полюса 275
 Дуговые лампы 422
 Дугогасительное устройство 405, 412
 Дутье магнитное 405
 Дырочная проводимость 362
- Емкостная проводимость 87
 Емкостное сопротивление 87
 Емкостный датчик 190
 Емкость 70
 — аккумулятора 19
- Железо-никелевые аккумуляторы 19**
- Зажигатель 360
 Закон Ампера 54
 — Ленца 57
 — Ленца-Джоуля 21, 75
 — магнитной цепи 50
 — Ома 14, 86, 105
 — полного тока 44
 — электромагнитной индукции 57
 Законы Кирхгофа 27
 Замкнутая сеть 449
 Запирающий слой 364
 Зарядка аккумулятора 18
- Зарядный ток 73
 Защитный угол 426
 Звезда 32, 118, 123
- Игнитрон 360**
 Изменение напряжения 204
 Измерения электрические 154
 Измерительная цепь 162
 Измерительные клещи 222
 — трансформаторы 217
 Измерительный механизм 162
 Изолированный провод 457
 Изоляция 68, 183, 215
 Индивидуальный привод 397
 Индуктивное сопротивление 83
 Индуктивность 59, 82, 142
 — взаимная 61
 Индуктивный датчик 189
 Индукционные приборы 170
 Индукционный регулятор 260
 — счетчик 180
 Ионизационный датчик 190
 — уровнемер 191
 Ионные приборы 336
 Искрение под щетками 276
 Искусственная нулевая точка 175
 Источник света 421
 — энергии 14
- Кабель 456
 Кандела 419
 Каскад усиления 379
 Катод 336
 Катушка со сталью 137
 Кенотрон 339
 Киловатт 21
 Кирхгоф Р. К. 28
 Кислотный аккумулятор 17
 Класс точности 156
 Колебательный контур 90, 153
 Коллектор 269
 — триода 370
 Коллекторная машина 268 *
 Коллекторные двигатели 301
 Кольцевой якорь 269
 Комбинированное освещение 430
 Коммутация 278
 Компенсатор трения 179
 Компенсационная обмотка 276
 Компенсация сдвига фаз 103
 Комплексное сопротивление 106
 Конденсатор 70
 Конденсаторный двигатель 264
 Контактная э. д. с. 13
 Контактные кольца 76, 251
 Контакттор 408
 Контроллер 407
 Контур 13
 Контурный ток 35
 Короткое замыкание 13
 Корректор 159
 Коэффициент силы 48
 Коэффициент амплитуды 79, 133
 — использования 433
 — мощности 94, 257
 — передачи тока 372
 — полезного действия 207, 320
 — пульсации 148
 — спроса 450

- Коэффициент стабилизации 42
 — теплоотдачи 24
 — трансформации 196
 — усиления 297, 346
 Кратковременный режим 401
 Кратность тока 27
 Кремниевый диод 369
 Кржижановский Г. М. 435
 Кривая намагничивания 47
 — намагничивающего тока 139
 Критическое скольжение 249
 Круговой огонь 274
 Крутизна характеристики 341
 Кубецкий А. А. 377
- Л**
 Лампа накаливания 421
 Ламповый генератор 384
 Ларионов А. Н. 148
 Ленин В. И. 10, 418, 435, 436, 438
 Ленц Э. Х. 21, 57, 59
 Линеаризация характеристик 41
 Линейное напряжение 119
 Линейный ток 121
 Лобовые соединения 236
 Логометр 181
 Лучевой тетрод 349
 Люкс 419
 Люмен 419
 Люминесцентные лампы 424
 Люминофор 424
- М**
 Магистраль 120, 450
 Магнитная индукция 44
 — постоянная 45
 — проницаемость 45
 — характеристика 51, 145, 316
 — цепь 49
 Магнитное сопротивление 52
 Магнитные линии 49
 Магнитный пускатель 409
 — усилитель 223
 Магнетодиэлектрики 49
 Магнетоэлектрическая система 163
 Максимальное реле 414
 Максимальный момент 250
 Манганин 161
 Маркс К. 396
 Маслоуказатель 216
 Масляное хозяйство 459
 Масляный выключатель 410
 — трансформатор 215
 Машина постоянного тока 268
 Мгновенная мощность 93
 Мгновенное значение 78
 Мегомметр 184
 Медные провода 454
 Местное освещение 430
 Метод контурных токов 35
 — наложения 37
 — узлового напряжения 34
 Механическая характеристика 247
 Минимальное реле 414
 Миткевич В. Ф. 147
 Многоскоростные двигатели 257
 Многофазная система 115
 Многофазное выпрямление 147
 Момент тока 451
 Мощность 20
 — двигателя 399
- Мощность несинусоидального тока 135
 — переменного тока 93
 — трехфазной системы 122
 Муфта кабельная 457
- Н**
 Наложения принцип 37
 Намагничивающая сила 45
 Нанометр 418
 Напряжение 13
 — короткого замыкания 204
 — накала 345
 — отсечки 344
 Напряженность магнитного поля 44
 — электрического поля 67
 Нарастание тока 65
 Насосы вакуумные 359
 Натриевая лампа 424
 Начальная фаза 77
 Начальный пусковой момент 259
 Недовозбуждение 328
 Независимое возбуждение 280
 Нейтраль 121
 Нейтральная зона 270
 Нелинейная цепь 39, 137
 Нелинейное сопротивление 39
 Неоновая лампа 422
 Несимметричная нагрузка 123
 Несинусоидальные токи 131
 Неэлектрические величины 187
 Неявнополюсный ротор 311
 Нит 421
 Номинальная мощность 321
 Номинальный ток 25
 Нулевая точка 118, 175
- Обмотка волновая 272**
 — петлевая 272
 — ротора 288
 — статора 235
 Обратная связь 300
 Обратное зажигание 358
 — напряжение 340
 — сопротивление 365
 Общее освещение 430
 Объемное сопротивление 69
 Объемный заряд 339
 Однолинейная схема 448
 Однослойная обмотка 237
 Однофазный двигатель 262
 Ом 13
 Омметр 184
 Опыт короткого замыкания 204
 Осветительные установки 432
 Осветительный прибор 426
 Освещенность 419, 429
 Ослепленность 431
 Основная погрешность 155
 — синусоида 132
 Остаточная индукция 48
 Осциллограф 186, 390
 Ответвление 120
 Относительная проницаемость диэлектрическая 67
 — — магнитная 45
 Отсечка 344
- Паз 237**
 Параллельная работа 212, 287, 321
 Параллельное возбуждение 280

- Параллельное соединение 30, 33, 100
 — — конденсаторов 71
 Параллельный двигатель 290
 Пентод 342
 Перевозбуждение 328
 Перегрузочная мощность 400
 Переменный ток 75
 Перенапряжения 455
 Переходная характеристика 373
 Переходное напряжение 154
 Период 75
 — коммутации 276
 Пермаллой 48
 Петлевая обмотка 272
 Петля гистерезиса 48
 Петров В. В. 417, 424
 Пироцкий Ф. А. 24
 Плоский конденсатор 72
 Поверхностное сопротивление 69
 Поверхностный эффект 84
 — — магнитный 142
 Повышающий трансформатор 194
 Погрешность 155
 — напряжения 218
 — тока 220
 — угловая 218
 Подогревный катод 337
 Подпятник 157
 Подстанция 458
 Подъемная сила 64
 Полная мощность 94, 97
 — проводимость 100
 Полное сопротивление 83, 88
 Полупроводники 362
 Полупроводниковый выпрямитель 364
 — диод 364
 — каскад 388
 Полюса 52, 67
 Полюсное деление 234
 Понижающий трансформатор 194
 Попов А. С. 334, 342
 Поправка 155
 Последовательное возбуждение 280
 — соединение 22, 85, 89
 — — конденсаторов 71
 Последовательный двигатель 293
 Постоянная времени 65, 74, 155
 — составляющая 131
 Постоянные магниты 52
 Потенциал выхода 337
 Потенциометр 392
 Потери в асинхронной машине 258
 — — меди 207
 — — синхронной машине 320
 — — стали 141, 207
 — переменные 320
 Потеря напряжения 23
 Поток магнитный 44
 — — рассеяния 51, 142
 — смещения 68
 Потокосцепление 57
 Правило левой руки 54
 — правой руки 58
 Превышение температуры 24
 Предельная температура 25
 Предохранители плавкие 25
 Приборы непосредственного отсчета 154
 — сравнения 154
 Приведенная погрешность 155
 Приведенное сопротивление 202
 Приведенный трансформатор 201
 Привод 396
 Приемник энергии 14
 Примесная проводимость 363
 Принцип наложения 37
 — обратимости 59
 Приплотинная гидростанция 442
 Присоединенная мощность 450
 Пробивное напряжение 367
 Пробой 68
 — вентиля 365
 Проводимость 14
 Проводники 14
 Прожектор 426
 Промежуточное реле 415
 Проницаемость диэлектрическая 67
 — магнитная 45, 47
 Противодействующий момент 158
 Прямая последовательность 116
 Пускатель магнитный 409
 Пусковой реостат 289
 — ток 254

 Работа выхода 336
 — электрического тока 20
 Развертка 187, 352
 Разветвленные цепи 28, 100
 Размещение светильников 431
 Разнос двигателя 292
 Разомкнутая сеть 449
 Разрешающая способность 188
 Разрядка аккумулятора 18
 Разрядник 455
 Разрядный ток 74
 Разъединитель 413
 Распределительная сеть 449
 Рассеяние 142, 200, 239, 319
 Расчет проводов 24, 450
 Расширитель 216
 Реактивная мощность 94, 98, 177
 — проводимость 100
 — составляющая тока 99
 — энергия 99
 Реактивное напряжение 82
 — сопротивление 83, 87
 Реакция якоря 274, 317
 Реверсирование 235
 Регулирование скорости 255, 291, 294
 Режим работы 399
 Резонанс 90
 — напряжений 92
 — токов 101
 Резонансная кривая 93
 Реле 392, 414
 Релейная защита 414
 Реостат 14
 Реостатно-емкостная связь 381, 388
 Ротор 233, 310
 Ртутная лампа 423
 Ртутный выпрямитель 355

 Светильник 426
 Световая характеристика 375
 Световой указатель 158
 Свеча международная 419
 Свинцовый аккумулятор 17
 Свободные составляющие 152
 Сглаживающий фильтр 151

- Сдвиг фаз 77
 Сегнетоэлектрики 70
 Секция обмотки 235
 Селеновый выпрямитель 367
 Сердечник 213
 Сети 449
 Сетка 342
 — защитная 349
 — экранная 348
 Сигнал 341
 Сила света 419
 — тока 12
 Силовая линия 72
 Символический метод 104
 Симметричная нагрузка 118
 — система 116
 Синусоидальный ток 77
 Синхронизация 321
 Синхронизирующая мощность 326
 Синхронная машина 310
 Синхронное сопротивление 319
 Синхронный компенсатор 330
 Синхроскоп 321
 Скольжение 232
 Смешанное возбуждение 280
 — соединение 29
 Собственное потребление 160
 Согласное соединение 286
 Соединение обмоток 280
 Сопротивление 14
 — динамическое 41, 346
 — короткого замыкания 205
 — статическое 41
 Среднее значение тока 78, 145
 Средняя мощность 93
 Стабилизатор напряжения 42, 144
 Сталеалюминиевые провода 454
 Статические параметры 41
 Статор 76, 234, 310
 Стержневой трансформатор 213
 Стилб 421
 Столетов А. Г. 47
 Стробоскопический эффект 425
 Сухой трансформатор 215
 — элемент 16
 Схема замещения 202, 246, 381
 Счетчик 179

 Тамм И. Е. 336
 Тариф 440
 Температура предельная 25
 Температурный коэффициент 16
 Теорема Гаусса 68
 Тепловая нить 172
 Тепловое реле 409
 Тепловые станции 441
 Термоэлектрическая система 166
 Тетрод 348
 Типы проводов 457
 Тиратрон 353
 Тлеющий разряд 423
 Ток 12
 — контурный 35
 — холостого хода 198
 Тормозящий момент 273
 Торид 47
 Точечный метод 434
 Точность прибора 155
 Транзистор 369

 Трансформатор 194
 — напряжения 217
 — тока 219
 Трансформаторная связь 382, 389
 — э. д. с. 138
 Треугольник 33, 120
 — мощностей 99
 — напряжений 83
 — проводимостей 100
 — сопротивлений 83
 Трехлинейная схема 448
 Трехобмоточный трансформатор 211
 Трехфазная система 115
 Триод 342
 Трубчатые предохранители 25
 Турбогенератор 312

 Угловая погрешность 173, 218
 — характеристика 325
 — частота 77
 Угол рассеяния 428
 Удельная электропроводность 14
 — эмиссия 337
 Удельное сопротивление 14, 69
 Узел 29
 Уменьшение пускового тока 254, 289
 Универсальный двигатель 304
 — трансформатор 241
 Управляющая обмотка 223
 Усиление мощности 297, 384, 389
 Усилитель 380, 386, 394
 — мощности 384
 Усилительный каскад 382
 Успокоитель 159
 Установка подвижной части 157
 Установленная мощность 450

 Фаза 77, 115
 Фазное напряжение 118
 Фазометр 186
 Фазорегулятор 192, 261
 Фарадей М. 58
 Ферродинамическая система 169
 Ферромагнитные материалы 47
 Феррорезонанс 143
 Физическая нейтраль 275
 Фильтр 148
 Формула Эйлера 106
 Фотореле 389
 Фотоэлектронная эмиссия 375
 Фотоэлектронный умножитель 377
 Фотоэлемент 374
 Френкель Я. И. 336

 Характер сдвига фаз 193
 Характеристики триода 343
 — электрических машин 285, 291, 299, 316, 321, 329, 331
 Холостой ход 13, 197
 Хрушев Н. С. 11, 437, 438

 Цепная реакция 446
 Цепь электрическая 12
 Цоколевка лампы 341

 Частота 75
 Частотомер 185
 Четырехполюсник 107

- Число пазов 236
Чувствительность датчика 188
— фотоэлемента 376
- Шаг обмотки 237
Шунт 160
- Щетки 269
Щеткодержатель 269
- Эдисон Т. А. 334
Эквивалентная емкость 70
— звезда 31
Эквивалентное напряжение 136
— сопротивление 30
Эквивалентный момент 403
— ток 402
Экономическая плотность тока 419
Электрификация 9
Электрическая постоянная 67
— прочность 68
Электродинамическая сила 56
— система 171
Электромагнитная индукция 56
— система 166
- Электромагнитные силы 56
Электромагнитный момент 323
— тормоз 259, 265
Электромашинный усилитель 296
Электронная лампа 326
— пушка 351
— развертка 352
Электроннодырочная проводимость 362
Электронный луч 350
— осциллограф 390
Электростатическая система 171
Эмиссия 335
Эмиттер 370
Энергетическая система 445
Энгельс Ф. 9
Энергия магнитного поля 45
— электрического поля 75
Эффект близости 85
Эффективность катода 337
- Яблочков П. Н. 75, 195, 417
Якоби Б. С. 59
Якорь 269
Яркость 420