

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ



А.Н.ЧЕКВАСКИН
В.Н.СЕМИН
К.Я.СТАРОДУБ

ОСНОВЫ
АВТОМАТИКИ

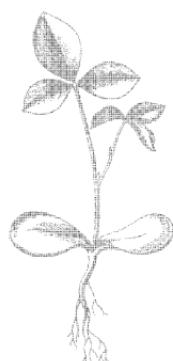
А. Н. ЧЕКВАСКИН, В. Н. СЕМИН,
К. Я. СТАРОДУБ

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования
СССР в качестве учебного пособия для
учащихся средних специальных учебных
заведений



МОСКВА
«ЭНЕРГИЯ» 1977



Scan AAW

6Ф6.5

Ч-37

УДК [62—52+681.3] (075)

Чекваскин А. Н. и др.

Ч-37 Основы автоматики. Учеб. пособие для техников-механиков. М., «Энергия», 1977.

448 с. с ил.

Перед загл. авт.: А. Н. Чекваскин, В. Н. Семин, К. Я. Стадуб.

Рассматриваются автоматические системы регулирования и их типовые звенья и основные элементы, широко применяющиеся в этих системах. Дается описание следящих систем, автоматических измерительных и вычислительных систем, а также систем телемеханики. Включено руководство к лабораторным работам по предмету «Основы автоматики и вычислительной техники».

Книга предназначена для учащихся средних специальных учебных заведений, которые изучают курс «Основы автоматики и вычислительной техники», и может быть полезна инженерно-техническим работникам, интересующимся вопросами автоматизации производства.

Ч $\frac{30501-243}{051(01)-77}$ 129-77

6Ф6.5

© Издательство «Энергия», 1977 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основной задачей авторов книги было создание учебника для средних специальных учебных заведений по курсу «Основы автоматики и вычислительной техники», так как в настоящее время такого учебника нет.

Книга состоит из трех частей.

В первой части рассматриваются общие и теоретические основы элементов автоматики. Особое внимание уделяется рассмотрению датчиков, усилителей и стабилизаторов, так как они являются наиболее распространенными элементами автоматики, вычислительной техники и телемеханики.

Во второй части рассматриваются системы автоматики, автоматические вычислительные устройства и системы телемеханики. Более подробно рассматриваются автоматические системы регулирования, так как они нашли широкое применение для управления разными технологическими процессами и механизмами.

В третьей части дается описание лабораторных работ, техника и методика их выполнения и некоторые методические советы учащимся по проведению лабораторных работ, что способствует более лучшему усвоению теоретического материала.

Введение, гл. 1—4 и 6—8 написаны А. Н. Чекваскиным, гл. 5, 9 и 10 — В. Н. Семиным, приложения — К. Я. Стародубом.

Список использованной литературы приведен в конце книги.

Авторы благодарны рецензентам доктору техн. наук А. В. Нетушилу и Ю. А. Силинскому за просмотр рукописи.

писи и ряд ценных замечаний. Авторы выражают свою признательность канд. техн. наук Ю. А. Турицыну, взявшему на себя нелегкий труд по редактированию рукописи, а также доктору техн. наук В. М. Эйгенброту за ценные замечания, способствовавшие улучшению содержания книги.

Все замечания и пожелания по книге авторы просят направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие народного хозяйства характеризуется широким внедрением автоматизации в производственные процессы. *Автоматизация* — это этап развития машинного производства. Она призвана не только освободить человека от выполнения тяжелого физического труда, но и помочь ему в управлении производством.

Не следует смешивать понятия автоматизации и механизации. *Механизация* представляет собой замену ручного труда энергией машин, причем функции управления машинами остаются за человеком. *Автоматизация* — это более высокая стадия *механизации*, при которой функции управления выполняются автоматическими устройствами. Следовательно, автоматизация механизирует не только труд, но и управление им. При автоматизации резко возрастают скорость и точность выполнения операций, что приводит к повышению производительности труда. Автоматизация позволяет также управлять процессами, которыми человек непосредственно управлять не может ввиду их вредности или удаленности, например управление химическими и ядерными процессами или беспилотными летательными аппаратами.

В условиях современной экономики автоматизация производственных процессов является одним из главных направлений технического прогресса. Автоматизация непосредственно и неразрывно связана с такой формой организации производства, при которой стираются грани между умственным и физическим трудом.

Современные достижения науки и техники в области автоматизации направлены на создание автоматических устройств, необходимых для разных отраслей промышленности и сельского хозяйства. *Автоматическим устройством* называется устройство, которое осуществляет контроль и (или) управление различными процессами и обеспечивает частичное или полное осво-

бождение человека от выполнения данных функций. К первым автоматическим устройствам можно отнести автоматический регулятор, изобретенный в 1765 г. русским механиком И. И. Ползуновым. Автоматический регулятор был установлен на Барнаульском заводе и осуществлял поддержание заданного уровня воды в паровом котле. В 1784 г. английский механик Дж. Уатт использовал такой же принцип работы регулятора на паровой машине, в которой поддерживалась частота вращения кривошипа в определенном диапазоне чисел оборотов. В основу первых автоматических регуляторов был положен принцип регулирования по отклонению регулируемой величины или принцип Ползунова — Уатта.

Большую роль в разработке теории автоматических регуляторов сыграла работа «О регуляторах прямого действия» (опубликована в 1877 г.) основоположника классической теории автоматического регулирования, профессора Петербургского технологического института И. А. Вышнеградского (1831—1895 гг.). В своих последующих работах И. А. Вышнеградский раскрыл динамику работы машины, снабженной регулятором Уатта, и показал, что машина и регулятор во время работы образуют единую систему.

Работы И. А. Вышнеградского были продолжены словацким ученым А. Стодола, который вывел условия устойчивости для линейных систем выше третьего порядка. По просьбе А. Стодола швейцарский математик А. Гурвиц вывел условия устойчивости для линейных систем любого порядка.

В конце XIX в. русский математик А. М. Ляпунов дал общую формулировку понятия устойчивости движения и описал основные методы для исследования устойчивости систем.

Первый теоретический курс по автоматическому регулированию был прочитан в МВТУ Н. Е. Жуковским. В 1909 г. лекции Н. Е. Жуковского были изданы отдельной книгой и получили широкую известность в России. В этой книге Н. Е. Жуковский изложил также результаты своих исследований в области нелинейной теории регулирования.

После Великой Октябрьской социалистической революции большой вклад в развитие теории автоматического регулирования внесли такие ученые, как М. А. Ай-

зерман, Н. Н. Богомолов, И. Н. Вознесенский, В. С. Кулебакин, В. А. Трапезников, Б. Н. Петров, Б. С. Сотков, В. В. Солодовников, Я. З. Цыпкин, А. М. Летов и др. Большое значение для изучения теории автоматического регулирования имела опубликованная в 1938 г. работа А. М. Михайлова «Гармонический метод в теории регулирования». В этой работе был предложен новый критерий устойчивости автоматических систем регулирования. Работы по теории автоматического регулирования выдвинули советскую науку на одно из первых мест в мире. Поэтому первый международный конгресс по вопросам автоматического управления проходил в Москве в 1960 г.

Новое качественное развитие автоматики получила после создания электронных цифровых вычислительных машин (цифровых ЭВМ), позволяющих быстро перерабатывать получаемую информацию о процессах, которые происходят в системе. Первые цифровые ЭВМ были созданы в 1945 г. В современных сложных системах автоматики цифровая ЭВМ включается непосредственно в цепь автоматического управления. Такими системами автоматики могут быть, например, системы автоматического управления с автоматическим поиском оптимального режима работы *управляемого объекта*¹, которые в простейшем виде представляют собой *самоприспособляющиеся системы*². Наиболее совер-

¹ Управляемый объект — это устройство (совокупность устройств), осуществляющее технический процесс, который нуждается в оказании специально организованных воздействий извне для выполнения его алгоритма функционирования.

² Алгоритмом функционирования называется совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению технического процесса в каком-либо устройстве или совокупности устройств (системе) [23].

² Самоприспособляющаяся система — это автоматическая система управления, в составе которой имеется дополнительное автоматическое устройство, изменяющее алгоритм управления основного автоматического управляющего устройства таким образом, чтобы автоматическая система в целом осуществляла заданный алгоритм функционирования.

Алгоритмом управления называется совокупность предписаний, определяющая характер воздействий извне на управляемый объект с целью выполнения им заданного алгоритма функционирования.

Автоматическое управляющее устройство — это устройство, осуществляющее воздействие на управляемый объект, соответствующее алгоритму управления. Операция включения автоматического устройства в работу при этом не учитывается [23].

жизниной самоприспособливающейся системой является живой организм. Поэтому в настоящее время ученые, которые работают в области кибернетики¹, большое внимание уделяют изучению процессов управления в живых организмах. Это необходимо для того, чтобы все лучшее, что создала живая природа, можно было бы использовать при создании новых совершенных самонастраивающихся и самоприспособливающихся систем.

¹ *Кибернетика* — это наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах, живых организмах и их объединениях.

Часть первая

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕМЕНТАХ ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

1-1. СТРУКТУРА И НАЗНАЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Системы автоматики и телемеханики широко применяются в народном хозяйстве. Они позволяют механизировать трудоемкие и тяжелые работы, помогают человеку в управлении производством, дают возможность снизить себестоимость продукции и увеличить производительность труда.

Прежде чем рассмотреть более подробно назначение и применение систем автоматики и телемеханики, дадим краткое понятие автоматики и телемеханики.

Автоматикой называется отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения автоматических устройств и систем, выполняющих свои основные функции без непосредственного участия человека.

Телемеханикой называется отрасль науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения устройств, преобразующих информацию в сигналы и передающих их на расстояния по линии связи для измерения, сигнализации и управления без непосредственного участия человека.

Системы автоматики, в зависимости от выполняемых функций, делятся на автоматические системы контроля и автоматические системы регулирования (или управления), последние в свою очередь могут быть замкнутыми или разомкнутыми. На рис. 1-1 изображены структурные схемы¹ систем автоматики.

¹ Структурной схемой называется схематическое изображение системы, которое отражает состав и назначение элементов, а также взаимодействие между ними.

Автоматическая система контроля (АСК) (рис. 1-1, а) осуществляет сравнение контролируемой величины с заданным (эталонным) ее значением и фиксирование результатов сравнения в форме, удобной для наблюдения и длительного хранения. Контролируемая величина с контролируемого объекта *КО* поступает на датчик *Д*, в котором преобразуется в сигнал, удобный для измерения. С выхода датчика преобразованный сигнал подается на сравнивающее устройство *СУ*. В

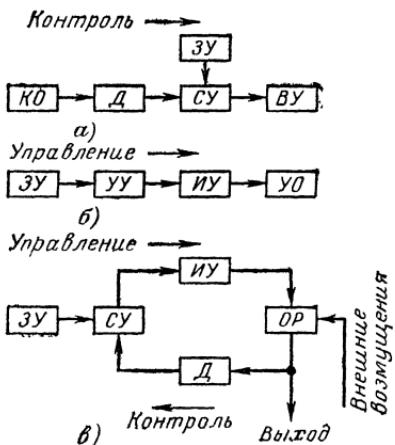


Рис. 1-1. Структурные схемы систем автоматики.

а — автоматическая система контроля; б — автоматическая система управления (разомкнутая); в — автоматическая система регулирования [автоматическая система управления (замкнутая)].

последнем осуществляется сравнение преобразованного сигнала контролируемой величины с сигналом эталонной величины, поступающим с *задающего устройства ЗУ*¹.

Полученный результат сравнения подается на *воспроизводящее устройство ВУ*, которое указывает, сигнализирует или записывает значение контролируемой величины. Задающее устройство может отсутствовать, если АСК предназначена для измерения абсолютного значения контролируемой величины.

Автоматическая система управления (АСУ) разомкнутая служит для автоматического выполнения опера-

¹ *Задающее устройство* — это устройство, которое вводит в систему некоторое эталонное значение величины, равное значению величины, получаемой от датчика, если контролируемое значение равно заданному. Оно может быть программным. В этом случае оно последовательно выдает различные значения эталонной величины [78].

ций, которые задаются внешними источниками воздействий (задающими устройствами) на входе этой системы, причем сам процесс управления не зависит от его конечного результата [60]. В этой системе управление каким-либо процессом или группой процессов осуществляется без непосредственного участия человека. В данном случае человек может лишь подавать первоначальный пусковой импульс, но чаще такой импульс подается автоматическим устройством.

Структурная схема разомкнутой АСУ приведена на рис. 1-1, б. Задающее устройство ЗУ выдает управляющий сигнал на вход системы, т. е. на вход *управляющего устройства УУ*, которое в свою очередь оценивает (измеряет) и преобразует этот сигнал в физическую величину, удобную для передачи. С выхода УУ преобразованный сигнал поступает на *исполнительное устройство ИУ*, которое выполняет команду, заложенную в сигнале, и воздействует на *управляемый объект УО*. Примером такой системы может служить *автоматическая система компенсации*, применяемая в том случае, когда необходимо поддерживать постоянство выходной величины УО.

Автоматическая система регулирования (АСР) (рис. 1-1, в) предназначена для автоматического поддержания с заданной точностью постоянства значений одной или нескольких физических величин (регулируемых величин) объекта регулирования *ОР*, которые характеризуют производственный процесс. Кроме того, АСР может изменять значения указанных величин по заданному закону.

Автоматическую систему регулирования можно получить, если объединить между собой автоматические системы контроля и управления. Она представляет собой автоматическую систему с замкнутой цепью воздействий, в которой управляющие воздействиярабатываются в результате сравнения действительного значения управляемой величины с предписанным значением.

Если значения этих величин не равны, то на выходе сравнивающего устройства возникает сигнал от их разности, который воздействует на систему таким образом, что в дальнейшем эта разность автоматически сводится к очень малому значению величины (теоретически к нулю).

В промышленности при значительном расстоянии между объектом и диспетчерским пунктом (пунктом управления) применяются *системы телемеханики*, которые отличаются от систем автоматики тем, что имеют дополнительно включенные *линии связи*¹, *приемники* и *передатчики*. Например, с помощью систем телемеханики можно надежно осуществлять централизованное управление территориально разобщенными объектами.

По характеру выполняемых функций системы телемеханики делятся на системы: *телеизмерения* (ТИ), *телесигнализации* (ТС), разомкнутые системы *телеуправления* (ТУ), *телеуправления и телесигнализации* (ТУ — ТС) и замкнутые системы *тегерегулирования* (ТР). На рис. 1-2 изображены структурные схемы систем телемеханики.

Система телеизмерения (рис. 1-2, а) предназначена для передачи через линию связи *ЛС* на значительные расстояния различных значений измеряемых электрических и неэлектрических величин. В этой системе особое внимание уделяется уменьшению погрешностей измерений, возникающих в результате изменения рабочих характеристик линий связи. Сигнал с контролируемого объекта *КО* поступает на датчик *Д*, а затем на передатчик *П*, в котором преобразуется в другой вид сигнала, удобный для передачи по линии связи *ЛС*. Пройдя по *ЛС*, преобразованный сигнал поступает на приемник *Пр*, где происходит преобразование сигнала в вид, удобный для воздействия на воспроизводящее устройство *ВУ*. Последнее может указывать значение измеряемой величины, записывать ее или вводить в другие устройства автоматики.

Система телесигнализации позволяет передавать на значительные расстояния сигналы критических и характерных промежуточных значений контролируемых величин, сигнализируя о состоянии контролируемого объекта. Для привлечения внимания диспетчера об изменении состояния объекта или возможности аварий на диспетчерском пункте предусмотрены звуковые и световые сигналы.

¹ *Линия связи* — это физическая среда, по которой с наименьшими потерями передаются сигналы. В качестве линий связи могут использоваться различные провода или радиолинии.

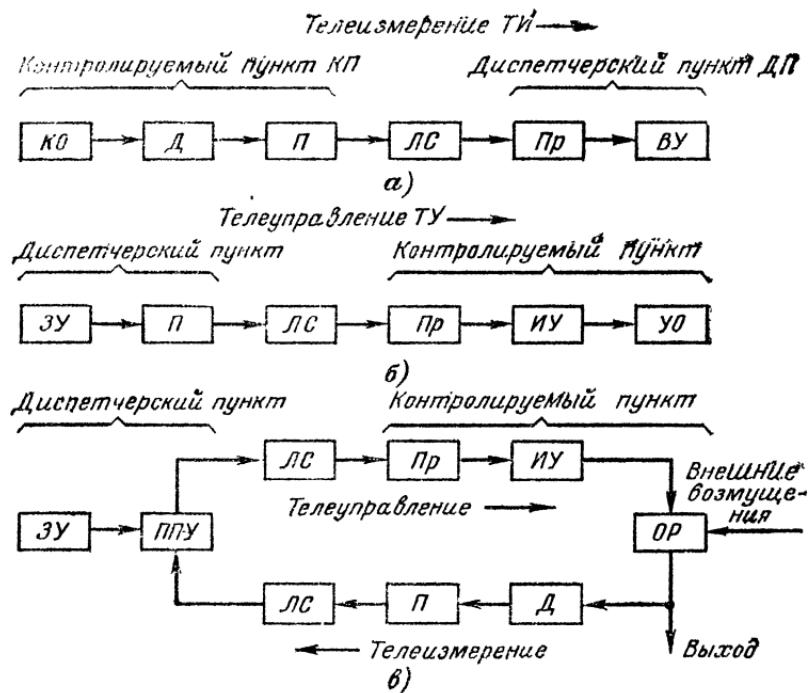


Рис. 1-2. Структурные схемы систем телемеханики.

a — телемизерения; *b* — разомкнутой системы телеуправления; *c* — замкнутой системы телеуправления (телефрегулирования).

На рис. 1-2, б показана структурная схема разомкнутой системы телеуправления, осуществляющей передачу сигналов на включение или отключение различных механизмов управляемого объекта. С помощью системы телеуправления можно также осуществить вызов объектов телеизмерения. В разомкнутой системе телеуправления управляемый объект УО находится, как правило, недалеко от диспетчера, поэтому диспетчер может визуально наблюдать за исполнением посланных сигналов. Примером может служить управление строительным краном не из кабины крановщика, а с земли с помощью небольшого переносного прибора с пультом управления и передатчиком системы телемеханики. В этом случае сигналы команд для управления рукоятками крана принимаются приемником, который устанавливается на кране.

Система телеуправления и телесигнализации в прошлом виде представляет собой объединение двух систем: разомкнутой *системы телеуправления* и *системы телесигнализации*. Она представляет собой комбинированную систему, в которой осуществляется подача командных сигналов с диспетчерского пункта (пункта управления) на управление механизмами объекта, а с контролируемого пункта (исполнительного пункта) приходит сигнализация об исполнении командного сигнала, т. е. поступает информация о включении и отключении того или иного механизма управляемого объекта. Система ТУ—ТС может применяться для самых различных целей, например для управления полетом самолета (ракеты) или работой генераторов на электростанции, расположенных далеко друг от друга.

Соединение *системы телеизмерения* (рис. 1-2, а) и *разомкнутой системы телеуправления* (рис. 1-2, б) создает *замкнутую систему телеуправления*, показанную на рис. 1-2, в. Эта система, которая иногда называется *системой телерегулирования*, может применяться, например, в том случае, если нужно увеличить объем жидкости в цистерне до определенного уровня. В этом случае диспетчер подает командный сигнал на включение необходимого насоса, нагнетающего жидкость в цистерну, и по данным телеизмерений проверяет уровень наполнения цистерны. При достижении необходимого уровня, проверяемого системой телеизмерения, диспетчер подает командный сигнал на отключение насоса. Примером замкнутой системы ТУ является система, с помощью которой осуществляется заправка топливом реактивных самолетов в воздухе.

1-2. ФУНКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Все устройства автоматики, телемеханики и вычислительной техники состоят из отдельных элементов.

Элемент — это конструктивно обособленная часть схемы или системы, выполняющая определенную функцию. Элементом может быть резистор, конденсатор, трансформатор, муфта и т. д. В общем виде элемент (рис. 1-3) представляет собой преобразователь, на вход которого подается сигнал x , а на выходе получается сигнал y . Элементы могут быть пассивными и активными. В пассивных элементах (рис. 1-3, а) отсутствует

вспомогательный источник энергии *ВИЭ*, в них сигнал y получается за счет сигнала x , а в активных элементах имеется вспомогательный источник энергии (рис. 1-3, б). В этих элементах входная величина только управляет передачей энергии от *ВИЭ* выходной величине. Если в пассивных элементах в результате потерь вы-

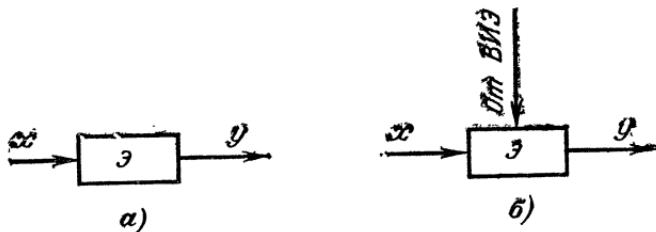


Рис. 1-3. Условное обозначение элемента \mathcal{Z} автоматики, телемеханики и вычислительной техники.

a — без ВИЭ; *b* — с ВИЭ.

ходной сигнал всегда меньше входного, то в активных элементах выходной сигнал может быть и больше входного сигнала, так как в данном элементе возможно усиление сигнала за счет *ВИЭ*.

Величины x и y могут быть как электрическими (ток, напряжение, сопротивление), так и неэлектрическими (давление, скорость, температура, перемещение и т. д.).

Элементы могут отличаться друг от друга физической природой, принципом действия, схемой включения, конструкцией, статической характеристикой и т. д.

По выполняемым функциям все эти элементы автоматики и телемеханики можно разделить на *датчики, усилители, стабилизаторы, реле, контакторы, распределители, магнитные пускатели, двигатели, муфты* и т. п.

1-3. ПОНЯТИЕ О ДАТЧИКАХ, УСИЛИТЕЛЯХ, СТАБИЛИЗАТОРАХ, ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В технике очень часто контроль, регулирование и передачу физических величин осуществляют при помощи электрических сигналов, так как они наиболее удобны для построения различных автоматических, телемеханических и вычислительных устройств. В этом случае неэлектрические величины (скорость, ускорение, линей-

ное и угловое перемещения, давление и разрежение, температура, световой поток и т. п.) преобразуются в электрические величины.

Под электрическими величинами понимаются сопротивление, индуктивность, емкость, ЭДС.

Датчик (первичный преобразователь информации) — это устройство, преобразующее контролируемую или регулируемую величину в такой вид сигнала, который более удобен для воздействия на последующие элементы автоматики, телемеханики и вычислительной техники.

Усилителем называют устройство, в котором происходит количественное преобразование (чаще всего усиление) входного сигнала. В данном устройстве входной и выходной сигналы имеют одинаковую физическую природу. Усиление входного сигнала в технике необходимо для того, чтобы можно было управлять последующими элементами автоматических, телемеханических и вычислительных устройств.

Работа многих современных радиотехнических, автоматических, телемеханических и вычислительных устройств в большой степени зависит от постоянства напряжения или тока питания. Большинство устройств питается от электросети, в которой по существующим нормам допускаются отклонения напряжения от номинального значения примерно на 5—10%. Изменение напряжения зависит от нагрузки, числа включенных потребителей и времени суток. Изменение напряжения электросети может отрицательно сказаться на работе вышеупомянутых устройств. Поэтому для получения стабильных напряжений между электросетью и устройством включаются стабилизаторы напряжения, а если требуется поддерживать неизменным значение тока в цепи, то применяются стабилизаторы тока. Эффект стабилизации в этих элементах получается за счет изменения параметров элементов, входящих в схему стабилизации.

К переключающим устройствам можно отнести реле, контакторы и магнитные пускатели.

Реле — это элемент, в котором плавное изменение входной величины преобразуется в скачкообразное изменение выходной.

Контактором (силовым реле) называется электромагнитное реле, которое имеет мощную контактную

систему. Разрываемая контактами мощность у контакторов равна нескольким киловаттам. Контакторы в основном применяются для коммутации рабочих цепей электродвигателей.

Магнитный пускатель представляет собой контактор со встроенными в него тепловыми реле для защиты электродвигателя от перегрузок. Он служит для дистанционного управления трехфазными асинхронными электродвигателями малой и средней мощности (от 2,5 до 75 кВт).

В качестве исполнительных элементов часто в автоматике, телемеханике и вычислительной технике применяются различные типы двигателей и электромагнитных муфт.

Двигатель — это устройство, в котором происходит преобразование энергии того или иного вида в механическое перемещение. Двигатели часто используются для перемещения радиолокационных антенн, отклонения рулей самолета.

Электромагнитные муфты представляют собой электромагниты различных конструкций, которые предназначены для включения и отключения механических, пневматических и гидравлических цепей. Эти муфты позволяют осуществлять сцепление и расцепление вращающихся валов, открывание и закрывание задвижек, клапанов, вентилей и т. п. [89]. Управление электромагнитной муфтой осуществляется с помощью сигнала управления, подаваемого на ее обмотку.

1.4. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ

Как было отмечено выше, всякий элемент автоматики, телемеханики и вычислительной техники представляет собой преобразователь, на вход которого поступает сигнал x , а на выходе получается сигнал y (см. рис. 1-3). Связь между значениями x и y определяется некоторой зависимостью:

$$y = f(x). \quad (1-1)$$

Свойства элементов определяются с помощью ряда общих характеристик, к которым относятся *коэффициент преобразования, чувствительность, коэффициент усиления, порог чувствительности и погрешность* [25].

Различают три вида коэффициента преобразования: *статический*, *динамический* и *относительный*.

Статический коэффициент преобразования (коэффициент передачи) $K_{\text{ст}}$ есть отношение выходного сигнала элемента y к его входному сигналу x :

$$K_{\text{ст}} = \frac{y}{x}. \quad (1-2)$$

Если входной и выходной сигналы имеют одинаковые физические величины, то статический коэффициент преобразования — величина безразмерная (например, коэффициент усиления в усилителях). Если входной и выходной сигналы имеют различные физические величины, то $K_{\text{ст}}$ будет иметь определенную размерность, например для электроизмерительного прибора это может быть миллиметр на ампер.

Динамический коэффициент преобразования $K_{\text{дин}}$ показывает, во сколько раз приращение выходного сигнала ($\Delta y; dy$) больше или меньше приращения входного сигнала ($\Delta x; dx$):

$$K_{\text{дин}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx}. \quad (1-3)$$

Коэффициенты $K_{\text{ст}}$ и $K_{\text{дин}}$ будут равны, если выходной сигнал y изменяется пропорционально входному сигналу x .

Относительный коэффициент преобразования $K_{\text{отн}}$ есть отношение относительного приращения выходного сигнала ($\Delta y/y; dy/y$) к относительному приращению входного сигнала ($\Delta x/x; dx/x$):

$$K_{\text{отн}} = \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{\Delta y/\Delta x}{y/x} \approx \frac{dy/dx}{y/x}. \quad (1-4)$$

Преобразовав выражение (1-4), можно дать другое определение относительного коэффициента преобразования $K_{\text{отн}}$ — как отношение динамического коэффициента преобразования к статическому коэффициенту преобразования:

$$K_{\text{отн}} = \frac{K_{\text{дин}}}{K_{\text{ст}}}. \quad (1-5)$$

Если выходной сигнал y изменяется пропорционально входному сигналу x , то относительный коэффициент преобразования равен единице, так как в этом случае коэффициенты $K_{\text{ст}}$ и $K_{\text{дин}}$ равны.

Рассмотренные коэффициенты преобразования могут применяться к любому элементу независимо от выполняемых им функций. Например, для датчиков коэффициент преобразования называется *чувствительностью*, а для усилителей данный коэффициент называется *коэффициентом усиления*.

Как правило, к датчикам предъявляется требование обеспечения максимальной чувствительности, а от усилителей требуется получение максимального коэффициента усиления. Противоположное требование предъявляется к стабилизаторам. Они должны обладать минимальной чувствительностью [25].

Порогом чувствительности называют наименьшее (по абсолютному значению) значение входного сигнала, которое вызывает изменение выходного сигнала. Порог чувствительности Ox_1 или Ox_2 (рис. 1-4) может возникать у элементов по различным причинам. В реле, электромагнитах, тахогенераторах, двигателях порог чувствительности возникает в результате трения, мертвого хода или гистерезиса¹.

Например, для двигателя-генератора ДГ-01ТА порогом чувствительности является напряжение трогания, которое при температуре $+100^{\circ}\text{C}$ равно 0,5 В, т. е. напряжение на выходе возникает только в том случае, если входное напряжение равно или больше 0,5 В. В зоне нечувствительности Δx выходной сигнал остается постоянным и равным нулю.

Погрешность — это изменение выходного сигнала, возникающее в результате изменения внутренних свойств элемента или изменения внешних условий его работы. Следует отметить, что в результате погрешности изменяется характеристика элемента (рис. 1-5). Различают следующие виды погрешностей: абсолютную, относительную и приведенную относительную.

Абсолютной погрешностью Δy называют разность между фактическим значением выходного сигнала y_1 и его расчетным значением y :

$$y_1 - y = \Delta y. \quad (1-6)$$

¹ Гистерезис (от греческого слова *hysteresis* — отставание, запаздывание) — это явление, которое состоит в том, что физическая величина, характеризующая состояние тела (например, намагниченность), неоднозначно зависит от физической величины, характеризующей внешние условия (например, магнитного поля) [14].

Относительной погрешностью в называют отношение абсолютной погрешности Δy к расчетному значению выходного сигнала y :

$$\epsilon = \frac{\Delta y}{y}. \quad (1-7)$$

Относительную погрешность можно выразить в процентах:

$$\epsilon = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100.$$

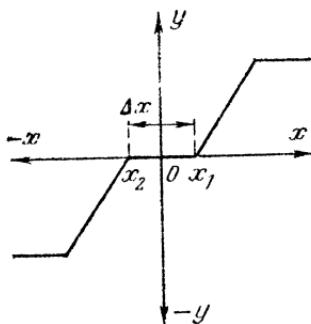


Рис. 1-4. Характеристика элемента, имеющего пороги чувствительности Ox_1 и Ox_2 и зону нечувствительности Δx .

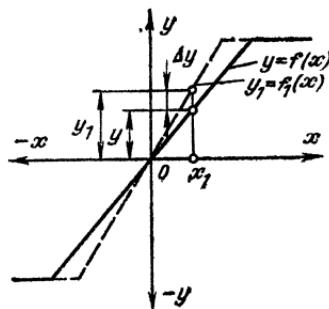


Рис. 1-5. Характеристика элемента.

$y=f(x)$ — до возникновения погрешности; $y_1=f_1(x)$ — после возникновения погрешности.

Приведенной относительной погрешностью ξ называют отношение абсолютной погрешности Δy к максимальному значению выходного сигнала y_{\max} , определяющему диапазон его изменения:

$$\xi = \frac{\Delta y}{y_{\max}}. \quad (1-8)$$

Приведенная относительная погрешность так же, как и относительная погрешность, может выражаться в процентах:

$$\xi = \frac{\Delta y}{y_{\max}} \cdot 100.$$

Если измерения осуществляются с помощью показывающего прибора, то за максимальное значение вы-

ходного сигнала y_{\max} принимается верхний диапазон шкалы этого прибора. Например, автоматический термометр с диапазоном измерения от 0 до 200°C показывает $t=40^{\circ}\text{C}$ и имеет абсолютную погрешность в этой точке, равной $\Delta y=2^{\circ}\text{C}$. Тогда относительная погрешность автоматического термометра

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100 = \frac{2}{40} \cdot 100 = 5\%,$$

а приведенная относительная погрешность

$$\xi = \frac{\Delta y}{y_{\max}} \cdot 100 = \frac{2}{200} \cdot 100 = 1\%.$$

Абсолютная погрешность имеет размерность, а относительная и приведенная относительная погрешности — величины безразмерные.

1-5. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ

Обратная связь образуется в том случае, когда часть выходного сигнала элемента подается на его вход. На рис. 1-6 показан основной элемент, который охвачен обратной связью. Основной элемент имеет коэффициент преобразования K . Обратная связь в схеме осуществле-

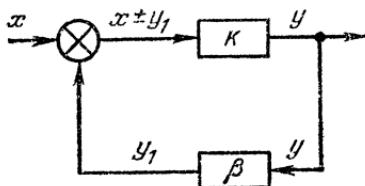


Рис. 1-6. Элемент, охваченный обратной связью.

на с помощью дополнительного элемента обратной связи, имеющего коэффициент преобразования β .

На вход элемента подается сигнал x , а на выходе элемента образуется сигнал y . Часть выходного сигнала y_1 подается на вход элемента. Если сигнал y_1 совпадает по фазе с входным сигналом x , то образуется *положительная обратная связь*, при этом на вход основного элемента поступает сигнал $x + y_1$. Если сигнал y_1 не совпадает по фазе с входным сигналом x , то образу-

ется *отрицательная обратная связь* и на вход основного элемента поступает сигнал $x - y_1$.

Обратная связь изменяет коэффициент преобразования K . Определим коэффициент преобразования основного элемента, охваченного положительной обратной связью.

$$K_{\text{п.о.с}} = \frac{y}{x}. \quad (1-9)$$

Коэффициент преобразования основного элемента, не охваченного обратной связью, можно выразить формулой:

$$K = \frac{y}{x + y_1}. \quad (1-10)$$

Коэффициент преобразования дополнительного элемента, создающего обратную связь,

$$\beta = \frac{y_1}{y}. \quad (1-11)$$

Найдем значения y_1 из формул (1-10) и (1-11), которые будут соответственно равны: $y_1 = y : K - x$ и $y_1 = \beta y$. Приравняем правые части $y : K - x = \beta y$ и найдем значение

$$x = \frac{y}{K} - \beta y = \frac{y(1 - \beta K)}{K}.$$

Подставив полученное выражение в формулу (1-9), получим:

$$K_{\text{п.о.с}} = \frac{K}{1 - \beta K}. \quad (1-12)$$

Аналогично можно вывести формулу коэффициента преобразования основного элемента, охваченного отрицательной обратной связью, которая будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{o.о.с}} = \frac{K}{1 + \beta K}. \quad (1-13)$$

Объединенную формулу можно записать в таком виде:

$$K_{\text{o.с}} = \frac{K}{1 \pm \beta K}, \quad (1-14)$$

где знак «+» относится к отрицательной обратной связи, а знак «—» — к положительной.

Положительная обратная связь увеличивает коэффициент преобразования, но уменьшает стабильность работы элемента.

Отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент преобразования, но увеличивает стабильность работы элемента.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ДАТЧИКИ

2-1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ И ИХ ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В общем виде датчик D (рис. 2-1) можно представить в виде чувствительного элемента ЧЭ и преобразователя Пр. Чувствительный элемент в системах автоматики и телемеханики выполняет функции «органов чувств». Он предназначен для преобразования контролируемой величины x в такой вид сигнала x_1 , который удобен для измерения. В преобразователе, как правило, происходит преобразование неэлектрического сигнала x_1 в электрический сигнал y . Например, давление x в электроконтактном манометре сначала преобразуется с помощью

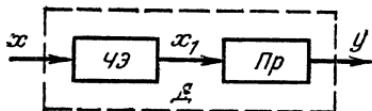


Рис. 2-1. Структура датчика.

чувствительного элемента в механическое перемещение стрелки x_1 , а затем уже в преобразователе — в изменение сопротивления y .

На вход датчика могут поступать как электрические, так и неэлектрические сигналы. С выхода датчика обычно получают электрические сигналы. Это вызвано тем, что электрический сигнал проще усиливать и передавать на различные расстояния.

Общими характеристиками датчиков являются: *статическая характеристика; инерционность; динамическая (дифференциальная) чувствительность; порог чувствительности; погрешность; мощность; момент или усилие, требуемые от источника входного сигнала; выходная мощность и выходное сопротивление датчика.*

Рассмотрим некоторые из общих характеристик датчиков.

Статическая характеристика показывает зависимость выходной величины y от входной величины x , т. е. $y = f(x)$ (x — контролируемый или регулируемый параметр, действующий на датчик; y — параметр, полученный после преобразования).

Инерционность характеризуется отставанием изменений выходной величины y от изменений входной величины x . Она приводит к погрешностям при измерении входной величины x и поэтому является нежелательной.

Динамическая (дифференциальная) *чувствительность* датчика S или динамический коэффициент преобразования датчика $K_{\text{дин}}$ (см. § 1-4) показывает, во сколько раз приращение выходной величины ($\Delta y, dy$) больше приращения входной величины ($\Delta x, dx$):

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx} .$$

Желательно, чтобы динамическая чувствительность датчика S была как можно более высокой. [Она определяется положением «рабочей точки» на характеристике датчика $y = f(x)$].

Понятие о пороге чувствительности и погрешности дано в § 1-4.

Перечисленные характеристики датчиков могут определяться как расчетным, так и экспериментальным путем.

2-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

В настоящее время наибольшее распространение в автоматике и телемеханике получили электрические датчики, которые можно разделить на две большие группы: *параметрические* и *генераторные* (или датчики ЭДС).

Параметрические датчики служат для преобразования неэлектрического контролируемого или регулируемого параметра в параметры электрической цепи (R, L, C). Эти датчики получают электрическую энергию от вспомогательного источника энергии (см. § 1-2). Параметрические датчики делятся на *датчики активного сопротивления* (контактные, реостатные, потенциометри-

ческие, тензодатчики, терморезисторы) и *реактивные сопротивления* (индуктивные, емкостные).

Генераторные датчики предназначены для преобразования неэлектрического контролируемого или регулируемого параметра в ЭДС. Эти датчики не требуют постороннего источника энергии, так как сами являются источниками ЭДС. Генераторные датчики бывают *термоэлектрическими, пьезоэлектрическими и тахометрическими*.

К параметрическим и генераторным датчикам предъявляются следующие общие требования:

- 1) непрерывная и линейная зависимость выходной величины y от входной x ;
- 2) высокая динамическая (дифференциальная) чувствительность;
- 3) малая инерционность;
- 4) наименьшее влияние датчика на измеряемый или регулируемый параметр;
- 5) надежность в работе;
- 6) применимость к используемой измерительной аппаратуре и источникам питания;
- 7) наименьшая себестоимость;
- 8) минимальные масса и габариты.

При выборе датчика необходимо также учитывать особенности исследуемого процесса: периодичность и максимальную частоту воздействий, атмосферные условия (влажность и температуру воздуха), наличие вибраций в установке и т. д.

2-3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Параметрические датчики активного сопротивления широко применяются в автоматике, телемеханике и вычислительной технике.

Ниже будут рассмотрены некоторые типы указанных датчиков.

а) Контактные датчики

Контактным датчиком называется датчик, в котором механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих одной или несколькими электрическими цепями. При

замыкании контактов активное сопротивление между ними изменяется от бесконечности до небольшого значения, а при размыкании контактов оно изменяется в обратном направлении, т. е. от небольшого значения до бесконечности.

На рис. 2-2 изображен простейший контактный датчик, контакты которого замыкаются или размыкаются при перемещении щупа, осуществляющего контроль

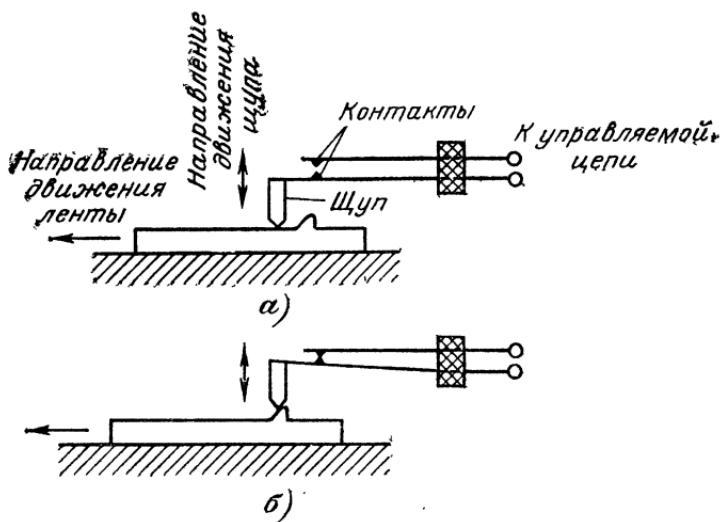


Рис. 2-2. Простейший контактный датчик.

a — контакты разомкнуты; *б* — контакты замкнуты.

толщины прокатываемой ленты. Особенностью измерения с помощью контактных датчиков является дискретность измерения, так как контакты замыкаются и размыкаются при определенном положении щупа.

Контакты являются самой важной частью датчика. Надежность и точность работы датчика в большой степени зависят от материала и качества изготовления контактов. Чем меньше мощность, разываемая контактами датчика, тем меньше происходит обогорание контактов и тем выше точность работы датчика. Материал для контактов выбирают, учитывая условия работы датчика, а именно: напряжение, подаваемое на контакты, мощность управляемой цепи, контактное давление и т. п. В качестве материала для контактов применяют сереб-

ро, вольфрам, золото, платину, сплавы платины с иридием. Контактные датчики широко применяются в машиностроительной промышленности при автоматическом контроле и сортировке по линейным размерам изделий. Они позволяют сигнализировать перемещение с точностью до 1—2 мкм. Контактные датчики могут включаться непосредственно в управляемую цепь или по схеме «сеточного контакта» [103].

К достоинствам этих датчиков относятся: простота конструкции и сравнительно высокая точность до 1—2 мкм, а к недостаткам — обгорание контактов (периодически приходится защищать контакты) и необходимость подрегулировки контактов.

б) Реостатные и потенциометрические датчики

Реостатные и потенциометрические датчики служат для преобразования углового или линейного перемещения в электрический сигнал.

Реостатный датчик, представляющий собой обычный реостат, применяется в автоматике, телемеханике и вычислительной технике редко, так как имеет значительную нелинейность характеристики.

Эти датчики выполнены в виде переменного сопротивления, подвижный контакт которого механически связан с преобразуемым элементом. Обычно они представляют собой проволочный реостат, ползунок которого перемещается под воздействием контролируемого или регулируемого параметра.

Конструктивно реостатные и потенциометрические датчики состоят из каркаса, намотанной на него проволоки и ползунка. Каркас датчиков изготавливается из текстолита, стеклотекстолита, пластмассы и алюминиевых сплавов, покрытых изоляционным лаком или оксидной пленкой. Каркасы, изготовленные из алюминиевых сплавов, более теплоустойчивы по сравнению с другими каркасами, что дает возможность повысить плотность тока в обмотке и в конечном итоге повысить чувствительность преобразователя. Каркасы могут выполняться в виде цилиндрической или плоской пластины, а также в виде кольца и сегмента. Проволока, которая наматывается на каркас, должна иметь большое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления. Для обмоток реостатных и потенциометрических

датчиков применяется константановая, манганиновая, никромовая, новоконстантановая и другая проволока. Для датчиков с малым контактным давлением применяется проволока из сплавов серебра, платины и золота.

Характеристика реостатных и потенциометрических датчиков является ступенчатой (кроме датчиков реохордного типа), так как непрерывному изменению контролируемого или регулируемого параметра соответствует

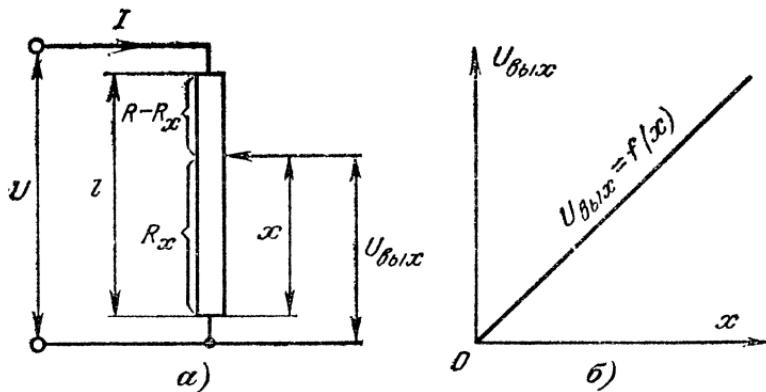


Рис. 2-3. Однотактный (нереверсивный) потенциометрический датчик.

a — схема включения; *б* — статическая характеристика в режиме холостого хода.

ступенчатое (дискретное) изменение сопротивления, равное значению сопротивления одного витка. Это обстоятельство приводит к погрешности измерения, которую можно уменьшить за счет уменьшения диаметра проволоки. Обычно применяется проволока небольшого диаметра (до сотых долей миллиметра). При создании датчиков стремятся к тому, чтобы было как можно больше витков датчика на единицу контролируемого или регулируемого параметра, что приводит к уменьшению ступенчатости характеристики и уменьшению погрешности измерения (как правило, не менее 100—200). Контактирующую с обмоткой часть ползунка часто изготавливают из серебра или сплава платины с серебром. Вместо ползунка в датчике может применяться щетка, которая состоит из нескольких проволочек, соединенных параллельно.

В технике чаще применяется *потенциометрический датчик*, который представляет собой реостат, включенный по схеме делителя напряжения (рис. 2-3, а).

Выходное напряжение потенциометрического датчика в режиме холостого хода, когда нагрузка не подключена, определяется по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = IR_x = U \frac{R_x}{R}, \quad (2-1)$$

где I — ток, который протекает по датчику;

R_x — сопротивление введенной части датчика;

U — напряжение питания датчика;

R — полное сопротивление датчика.

Предположим, что намотка датчика выполнена равномерно и сопротивление проволоки на единицу длины постоянно, тогда можно написать следующее выражение:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{x}{l},$$

где x — перемещение ползунка датчика;

l — длина обмотки датчика.

Подставив в формулу (2-1) вместо выражения R_x/R выражение x/l , получим:

$$U_{\text{вых}} = U \frac{x}{l} = Kx, \quad (2-2)$$

где $K = U/l$ — коэффициент передачи.

Из формулы (2-2) следует, что статическая характеристика потенциометрического датчика (рис. 2-3, б) при работе его в режиме холостого хода представляет собой линейную зависимость между выходным напряжением датчика $U_{\text{вых}}$ и перемещением его ползунка x . Рассмотренный датчик является *однотактным* (нереверсивным), так как дает возможность измерять перемещение ползунка x только одного знака.

В технике часто применяются потенциометрические датчики, реагирующие на знак перемещения ползунка. Такие датчики получили название *двуихтактных* или *реверсивных*. Для построения указанных датчиков необходимо сделать отвод от средней точки обмотки датчика. На рис. 2-4 приведены схема двухтактного потенциометрического датчика и его статическая характеристика. В режиме холостого хода чувствительность потенцио-

метрических датчиков имеет постоянное значение и равна:

$$S = \frac{U}{l}. \quad (2-3)$$

В автоматике, телемеханике и вычислительной технике потенциометрические датчики чаще всего применяют для измерения угла поворота различных механизмов и приборов. В этих датчиках напряжение постоянного и переменного тока, снимаемое с зажимов, пропорционально углу поворота ползунка потенциометра. Иногда в технике применяют потенциометрические датчики, с зажимов которых снимают напряжение, изменяющееся по синусному или логарифмическому закону в зависимости от угла поворота ползунка потенциометра.

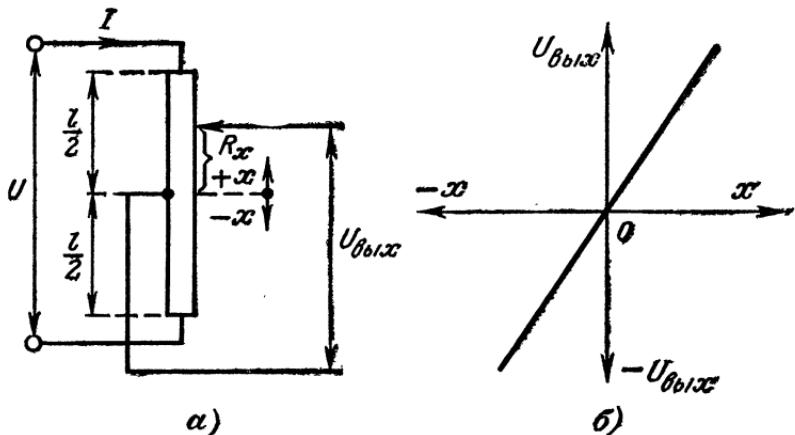


Рис. 2-4. Двухтактный (реверсивный) потенциометрический датчик.
а — схема включения; б — статическая характеристика в режиме холостого хода.

Такие потенциометрические датчики получили название *функциональных*.

К достоинствам реостатных и потенциометрических датчиков можно отнести: конструктивную простоту, малую массу и небольшие габариты, возможность питания постоянным и переменным током, простоту регулировки и высокую стабильность.

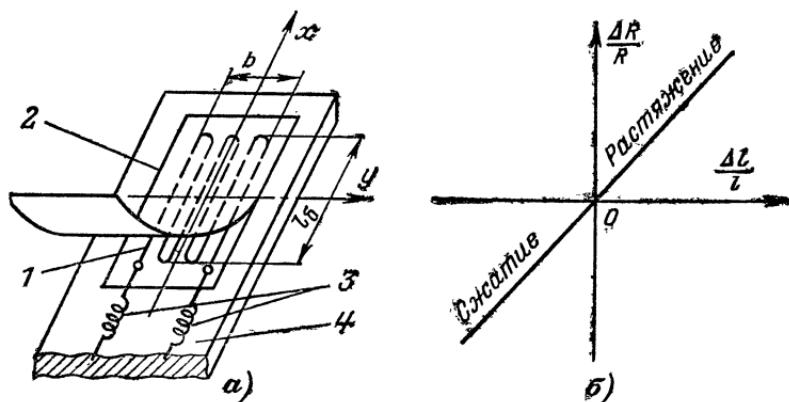
Основными недостатками реостатных и потенциометрических датчиков являются: наличие подвижного кон-

такта, снижающего надежность работы и срок службы датчика, невысокая чувствительность, нелинейность характеристики при низкоомной нагрузке и наличие ошибки от ступенчатости характеристики.

В заключение следует отметить, что значение реактивного сопротивления реостатных и потенциометрических датчиков невелико и его можно не учитывать при работе на частотах до нескольких десятков килогерц.

в) Тензодатчики

Тензодатчиком (тензорезистором) называется датчик специальной конструкции, предназначенный для измерения статических или динамических деформаций в деталях и преобразующий эти деформации в изменение ак-



клеивается на тонкую бумажную или пленочную основу 2. Сверху проволока также закрыта тонкой бумагой или пленкой. Для включения тензодатчика в схему к концам проволоки припаивают два медных проводника 3. Тензодатчик жестко закрепляется с помощью клея на испытуемую деталь 4.

При растяжении или сжатии детали в направлении расположения проволоки происходит растяжение или сжатие проволоки, что приводит к изменению длины l , площади поперечного сечения S и удельного сопротивления материала ρ проволоки. Например, если до растяжения электрическое сопротивление проволоки было равно $R = \rho l / S$, то при растяжении оно стало $R + \Delta R$. Обычно для изготовления проволочных тензодатчиков применяют константановую или никромовую проволоку, имеющую большое удельное сопротивление ρ и небольшой температурный коэффициент сопротивления, т. е. сопротивление этой проволоки мало зависит от температуры.

Основными характеристиками проволочных тензодатчиков являются: номинальное сопротивление R , длина решетки (база) l_b и коэффициент тензочувствительности K_t . Последний можно определить по формуле

$$K_t = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (2-4)$$

где Δl — абсолютное изменение длины проволоки;
 $\Delta l/l$ — относительное изменение длины проволоки;
 $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензодатчика.

Значение коэффициента тензочувствительности проволочного тензодатчика обычно равно 1,8—2,5 и в большой степени зависит от технологии изготовления датчика и материала его проволоки. Сопротивление проволочного тензодатчика лежит в пределах от 50 до 400 Ом. Номинальный рабочий ток, который можно подводить к такому датчику, равен 30 мА.

Иногда в лабораторных условиях применяются тензодатчики, не имеющие подложки, т. е. со свободным подвесом проволоки. Основным достоинством таких тензодатчиков является большая стабильность показаний при длительных измерениях, так как на результа-

ты измерения не влияет ползучесть клея, который в данном случае отсутствует.

Благодаря тому что проволочные тензодатчики имеют малые габариты (длина решетки равна 15—45 мм; ширина 7—10 мм) и малые массы, они могут размещаться в самых труднодоступных местах детали.

Основными достоинствами проволочных тензодатчиков являются: почти полное отсутствие их влияния на деформацию детали; линейность характеристики (рис. 2-5, б) и низкая стоимость.

Фольговые тензодатчики представляют собой дальнейшее развитие проволочных тензодатчиков. В них вместо решетки из проволоки применяется решетка из

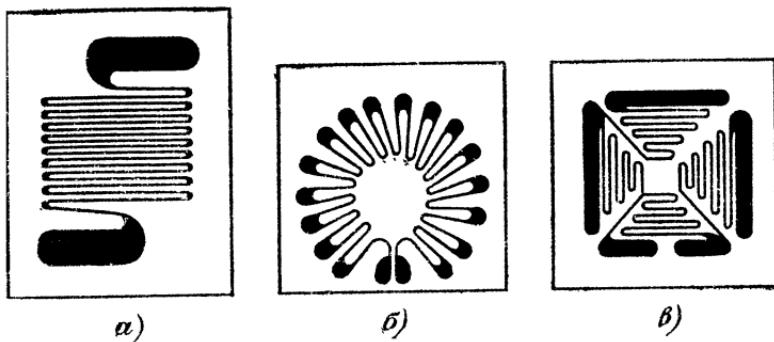


Рис. 2-6. Некоторые конструкции решеток фольговых тензодатчиков.

тонких полосок металлической фольги (толщиной несколько микрон), которая наклеивается на пленочную основу. Конструкции решеток фольговых тензодатчиков могут иметь различные конфигурации. Практически можно изготовить решетку любого рисунка. В технике чаще применяются следующие конструкции решеток: *прямая* — для измерения линейных деформаций (рис. 2-6, а); *розеточная* — для измерения крутящих моментов на круглых валах (рис. 2-6, б); *мембранные* — для измерения усилий, действующих на мембранны (рис. 2-6, в).

Фольговый тензодатчик имеет большую площадь со-прикосновения с деталью, чем проволочный, следова-тельно, его теплоотдача выше теплоотдачи последнего.

благодаря этому можно увеличить значение тока до 0,2 А, протекающего через фольговый тензодатчик. Сопротивление фольгового тензодатчика равно 50—200 Ом. Значение коэффициента тензочувствительности K_t у фольговых тензодатчиков такое же, как и проволочных ($K_t = 1,8 - 2,5$). Предел измерения относительных деформаций равен 0,3%, температурный диапазон работоспособности от -40 до $+70^\circ\text{C}$.

Полупроводниковые тензодатчики применяются в технике сравнительно недавно. Они имеют по сравнению с проволочными и фольговыми тензодатчиками ряд преимуществ: значение коэффициента тензочувствительности в 60 раз выше; малые размеры (длина решетки от 3 до 10 мм); большое значение выходного сигнала.

Основным отличием полупроводникового тензодатчика от проволочного является большое (до 50%) изменение сопротивления датчика при деформации, и высокая чувствительность к температуре (в 10—20 раз больше, чем у проволочных датчиков).

Для изготовления полупроводниковых тензодатчиков применяют германий, кремний, арсенид галлия и др. Чаще применяются германий и кремний.

Конструктивно полупроводниковый тензодатчик представляет собой пластину из германия или кремния, которая наклеена на бумагу. Пластина снабжена металлическими выводами, с помощью которых датчик подключается в схему. Номинальное сопротивление датчика обычно равно 40—1000 Ом. Температурный диапазон работоспособности датчика составляет от -160 до $+300^\circ\text{C}$, линейность изменения сопротивления сохраняется при относительных деформациях до $\pm 0,1\%$. Основными недостатками полупроводниковых тензодатчиков являются: малая гибкость, небольшая механическая прочность, нестабильность параметров, большой разброс характеристик однотипных датчиков и нелинейность характеристики.

г) Терморезисторы

Терморезистором называется устройство, содержащее проводник или полупроводник, электрическое сопротивление которого сильно меняется с изменением температуры окружающей среды. В технике широко применяются терморезисторы с теплочувствительным элементом

в виде проводника. Материалом для проводника используют медь, никель и платину. Такие терморезисторы получили название *термометров сопротивления*. Последние широко применяются в приборах для измерения температуры воздуха, воды и масла.

Термометр сопротивления (рис. 2-7) представляет собой тонкую медную, никелевую или платиновую проволоку 1, намотанную на слюдяной или керамический каркас 2, который затем для защиты от механических

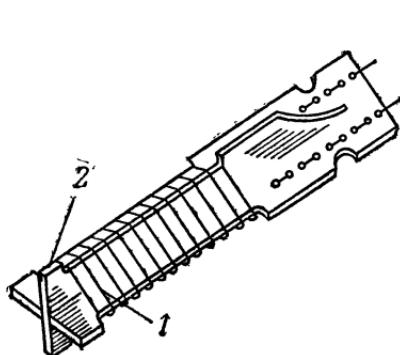


Рис. 2-7. Упрощенная конструкция термометра сопротивления.

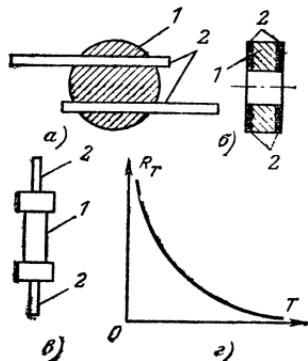


Рис. 2-8. Термисторы.

а — шариковая форма конструкции;
б — дисковая; в — трубчатая; г — характеристика.

повреждений помещают в металлический корпус. При изменении температуры окружающей среды изменяется сопротивление термометра:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)], \quad (2-5)$$

где R_t — сопротивление термометра при температуре t , Ом;

R_0 — начальное сопротивление термометра при температуре t_0 , Ом;

α — температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$;

t — температура в момент измерения, $^\circ\text{C}$;

t_0 — начальная температура термометра, $^\circ\text{C}$.

С помощью термометров сопротивления можно измерять температуру от -250 до $+550^\circ\text{C}$.

Платиновые термометры сопротивления могут также применяться для измерения скорости протекания газа,

состава газа и концентрации растворов. Это возможно потому, что сопротивление проводника зависит не только от температуры окружающей среды и нагрева проводника протекающим по нему током, но и от скорости протекания газа, плотности и его состава. Такой термометр сопротивления выполняется в виде тонкой платиновой проволоки диаметром от 0,02 до 0,06 мм и длиной от 5 до 50 мм, которая закрепляется концами в массивных держателях. Термометр сопротивления помещают в контролируемую среду, например в газовый поток, скорость которого меняется. Затем проволоку нагревают до температуры 150—400° С, пропуская через нее ток. В зависимости от скорости газового потока проволока будет охлаждаться более или менее интенсивно, т. е. будет изменяться температура проволоки, что приведет к изменению сопротивления термометра.

С помощью такого термометра сопротивления, имеющего обычно термоанемометром, скорость газового потока преобразуется в сопротивление. Основными достоинствами термометров сопротивления являются: стабильность, линейность характеристики и простота изготавления.

Основным недостатком рассмотренных термометров является их тепловая инерционность.

В автоматике также широко применяются терморезисторы с теплочувствительным элементом в виде полупроводника. Такие терморезисторы называются термисторами.

Термисторы изготавливаются из полупроводникового материала. В качестве материала используется смесь окислов нескольких металлов (никеля, титана, марганца, кобальта и др.), а также соединения металлов с углеродом, азотом и пр.

Термисторы имеют большой отрицательный коэффициент сопротивления. При увеличении температуры их сопротивление уменьшается, тогда как у проволочных термометров сопротивления, наоборот, сопротивление увеличивается.

Сопротивление термистора при температуре T можно определить по формуле

$$R_T = R_0 e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0} \right)}, \quad (2-6)$$

где R_0 — начальное сопротивление термистора при температуре T_0 , Ом;
 e — основание натурального логарифма;
 B — постоянная материала, К;
 T — температура в момент измерения, К;
 T_0 — начальная температура термистора, К.

Термистор конструктивно представляет собой шарик, диск или трубку 1 из полупроводникового материала с металлическими выводами 2 (рис. 2-8, а—в). Чтобы защитить термистор от действия влаги, его покрывают слоем лака, а иногда помещают в закрытый стеклянный баллон. Характеристика термистора представлена на рис. 2-8, г. Следует отметить, что сопротивление термистора уменьшается с ростом его температуры по закону экспоненты. При измерении температуры термисторы имеют ряд преимуществ перед металлическими термометрами сопротивления: высокое удельное электрическое сопротивление, благодаря чему термистор можно сделать очень маленьким; большое значение температурного коэффициента сопротивления полупроводника; высокая чувствительность.

К недостаткам следует отнести: нелинейность и нестабильность характеристики, разброс характеристик.

2-4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Параметрические датчики реактивного сопротивления питаются от источника переменного тока. К ним относятся *индуктивные* и *емкостные* датчики.

а) Индуктивные датчики

Индуктивные датчики основаны на изменении индуктивного сопротивления электромагнитного дросселя при перемещении одной из подвижных деталей его, обычно якоря. Они широко применяются для измерения малых угловых и линейных механических перемещений, деформаций, контроля размеров деталей, а также для управления следящими устройствами.

Индуктивный датчик представляет собой электромагнитный дроссель с переменным воздушным зазором δ , обмотка 1 которого включена последовательно с сопротивлением нагрузки Z_h (рис. 2-9, а). Магнитопровод 2

и якорь З обычно выполняют из магнитно-мягкого материала. При изменении воздушного зазора δ (входная величина) меняется индуктивность обмотки дросселя $L_{\text{др}}$, а также сопротивление его обмотки $Z_{\text{др}}$.

Индуктивность обмотки дросселя

$$L_{\text{др}} = \frac{\omega^2 S_{\text{в}} \mu_0}{2\delta}, \quad (2-7)$$

где ω — число витков обмотки дросселя;
 $S_{\text{в}}$ — площадь сечения воздушного зазора;
 μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;
 δ — длина воздушного зазора.

Полное сопротивление обмотки дросселя

$$Z_{\text{др}} = \sqrt{r_{\text{др}}^2 + \omega^2 L_{\text{др}}^2} = \sqrt{r_{\text{др}}^2 + \left(\frac{\omega^2 S_{\text{в}} \mu_0}{2\delta}\right)^2}, \quad (2-8)$$

где $r_{\text{др}}$ — активное сопротивление обмотки дросселя;
 ω — угловая частота источника переменного тока.

При включении в цепь активно-индуктивной нагрузки $Z_{\text{н}} = \sqrt{R_{\text{н}}^2 + \omega^2 L_{\text{н}}^2}$ падение напряжения на нагрузке (выходное напряжение) можно определить по формуле

$$U_{\text{н}} = I_{\text{н}} Z_{\text{н}} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{(R_{\text{н}} + r_{\text{др}})^2 + \omega^2 (L_{\text{н}} + L_{\text{др}})^2}} Z_{\text{н}}, \quad (2-9)$$

где $R_{\text{н}}$ — активное сопротивление нагрузки;
 $L_{\text{н}}$ — индуктивное сопротивление нагрузки.

Следует отметить, что при уменьшении длины зазора δ индуктивность обмотки дросселя $L_{\text{др}}$ согласно формуле (2-7) увеличивается, а это в свою очередь приводит к уменьшению падения напряжения на нагрузке $U_{\text{н}}$.

На рис. 2-9, б приведены идеальная статическая характеристика OA и реальная характеристика BC нереверсивного индуктивного датчика. Реальная статическая характеристика индуктивного датчика отличается от идеальной тем, что имеет некоторую нелинейность. Это вызвано тем, что при нулевом зазоре индуктивность обмотки дросселя $L_{\text{др}} \neq \infty$, поэтому падение напряжения на нагрузке согласно формуле (2-9) $U_{\text{н}} \neq 0$, а имеет какое-то определенное значение (напряжение холостого хода $U_{x.x}$). При большом зазоре реальная статическая

характеристика BC содержит участок насыщения, определяемый напряжением насыщения $U_{\text{нас}}$.

К достоинствам нереверсивного индуктивного датчика следует отнести: высокую чувствительность, надежность и долговечность, отсутствие контактных устройств, значительную величину выходной мощности (до сотен вольт-ампер), простоту конструкции и эксплуатации.

Основными недостатками рассмотренного датчика являются: наличие напряжения на выходе при нулевом

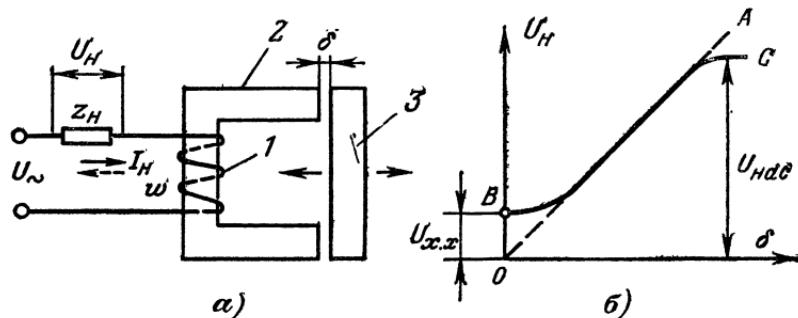


Рис. 2-9. Нереверсивный индуктивный датчик с переменным зазором.

a — схема включения; *б* — статические характеристики: OA — идеальная; BC — реальная.

воздушном зазоре $U_{x.x}$; нелинейность реальной статической характеристики; возникновение больших усилий между якорем и сердечником дросселя (до нескольких килограммов), которые необходимо преодолевать. От перечисленных недостатков в значительной степени свободны реверсивные датчики, которые имеют чувствительность в 2 раза большую, чем нереверсивные датчики.

Реверсивные датчики включаются или по дифференциальной (рис. 2-10, *a*), или по мостовой схеме (рис. 2-10, *б*) и состоят из двух нереверсивных датчиков, имеющих общий якорь 1. Усилие, действующее на якорь, равно разности сил притяжения со стороны сердечников 2. В среднем положении якоря при наличии полной симметрии реверсивного датчика результирующее усилие равно нулю, а в других положениях якоря оно небольшое.

Реальная статическая характеристика реверсивного датчика (кривая III) приведена на рис. 2-10, в. Она получается путем алгебраического суммирования ординат характеристик нереверсивных датчиков (кривые I и II). За начало отсчета перемещений берут среднее положение якоря, при котором схема будет уравновешена и падение напряжения на нагрузке $U_H = 0$. При небольших отклонениях якоря напряжение U_H возрастает практически линейно. При изменении знака перемещения

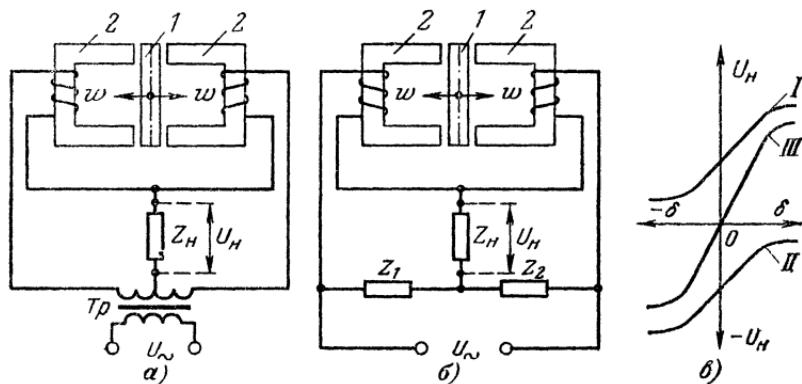


Рис. 2-10. Реверсивный индуктивный датчик с переменным зазором.
а — дифференциальная схема включения; б — мостовая схема включения; в — статические характеристики.

(переход якоря через среднее положение в противоположную сторону) фаза напряжения U_H меняется на 180° .

В настоящее время применяется большое количество индуктивных датчиков, отличающихся друг от друга по конструктивному и схемному исполнению. В автоматике наибольшее распространение получил *дифференциальный датчик*, включающийся с помощью разделительного трансформатора T_p (рис. 2-10, а).

К достоинствам рассмотренных реверсивных датчиков можно отнести: большую, чем у нереверсивных датчиков, линейность статической характеристики; меньшую зависимость характеристики от колебаний напряжения, температуры и т. п.

Основным недостатком реверсивных датчиков является сложность регулировки (балансировки) датчика.

Рассмотренные датчики применяются для входных перемещений от 0,001 до 1 мм. Для перемещений от 1 мм до 60 мм применяется датчик соленоидного типа, включающийся по мостовой схеме (рис. 2-11). В этом датчике изменение индуктивности обмотки L происходит за счет перемещения ферромагнитного сердечника 1 в катушке 2.

В автоматике (в гироскопических устройствах) применяется также трансформаторный индуктивный дат-

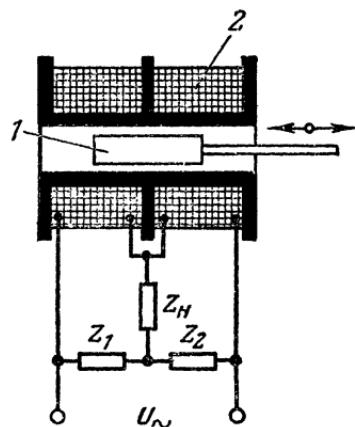


Рис. 2-11. Индуктивный датчик соленоидного типа.

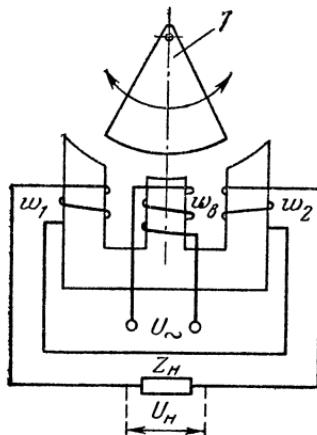


Рис. 2-12. Трансформаторный индуктивный датчик.

чик (рис. 2-12), принцип действия которого основан на изменении взаимной индуктивности потокосцепления и значения ЭДС в обмотках датчика при перемещении ферромагнитного сердечника 1. На обмотку возбуждения w_b , расположенную на среднем стержне, подается напряжение питания U_{\sim} , а с обмоток w_1 и w_2 , которые расположены на крайних стержнях и которые соединены между собой так, что наводимые в них ЭДС имеют противоположную фазу, снимается напряжение нагрузки U_H (выходное напряжение). При симметричном положении якоря 1 ЭДС в обмотках w_1 и w_2 равны между собой. В этом случае напряжение $U_H=0$. При смещении якоря 1 от симметричного положения в обмотках w_1 и w_2 создаются разные по значению ЭДС, в результате чего происходит изменение напряжения U_H . Фаза напряжения U_H (выходного напряжения) определяется

знаком отклонения якоря от его симметричного положения.

Трансформаторный индуктивный датчик имеет большое перемещение якоря и цепь нагрузки его электрически не связана с цепью питания, т. е. в этом датчике между ними существует только магнитная связь.

Рассмотренные индуктивные датчики применяются в основном на частотах 3000—5000 Гц. На высоких частотах они применяются редко, так как на этих частотах

резко возрастают потери в ферромагнитном материале на перемагничивание и растет реактивное сопротивление обмоток.

В автоматике также применяются *магнитоупругие датчики*, в основу работы которыхложен магнитоупругий эффект, т. е. изменение магнитной проницаемости μ ферромагнитных материалов под влиянием упругих ме-

Рис. 2-13. Простейшая схема магнитоупругого датчика.

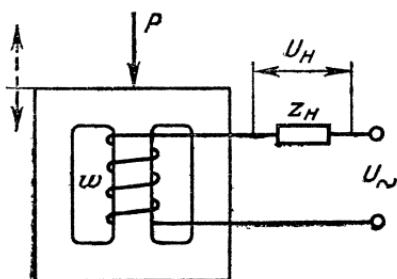
ханических деформаций, возникающих как под действием механических сил P , так и напряжений σ (рис. 2-13). Изменение магнитной проницаемости μ происходит в результате того, что под воздействием упругих механических деформаций изменяется ориентация кристаллов ферромагнитного материала, а это в свою очередь приводит к изменению энергии намагничивания.

Относительное изменение магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$ в результате действия магнитоупругого эффекта можно определить по следующей формуле:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{1}{\lambda_n} \mu_n \lambda_n \sigma, \quad (2-10)$$

где μ_n — начальная магнитная проницаемость;
 λ_n — начальная магнитострикция¹;
 σ — внешнее механическое напряжение.

¹ Явление магнитострикции (от слов магнит и strictio — сжатие, натягивание) заключается в том, что при намагничивании происходит изменение формы и размеров тела. Особенно это явление сильно проявляется в ферро- и ферримагнетиках (Fe, Ni, Co и др., ряде сплавов, ферритах).



Для изготовления магнитоупругих датчиков применяются материалы, имеющие явно выраженный магнитоупругий эффект. К таким материалам можно, например, отнести некоторые сорта пермаллоя, которые при удлинении на 0,1% увеличивают магнитную проницаемость на 20 %.

Механические нагрузки, прикладываемые к магнитоупругим датчикам, обычно равны 10—20 кгс/мм².

Следует отметить, что если магнитоупругие датчики питаются от сети переменного тока частотой от 50 Гц до 10 кГц, то их сердечники выполняются из листового ферромагнитного материала. Для магнитоупругих датчиков, работающих на частотах от 100 до 300 кГц, сердечники изготавливаются из феррита.

К достоинствам магнитоупругих датчиков можно отнести: высокую чувствительность; малые габариты, массу и простоту конструкции; высокую надежность, так как отсутствуют подвижные части. Так, чувствительность магнитоупругих датчиков, выполненных на пермаллоевых сердечниках, равна 200.

Основными недостатками магнитоупругих датчиков являются: нестабильность характеристики, высокая погрешность от температуры и гистерезиса. Например, погрешность от температуры составляет 1,5—2% на 10°С, а погрешность от гистерезиса при статических нагрузках — 4%.

б) Емкостные датчики

В общем случае *емкостный датчик* представляет собой конденсатор, в котором емкостное сопротивление изменяется при изменении измеряемой (регулируемой) нелектрической величины.

Известно, что емкость конденсатора зависит от следующих параметров: расстояния между пластинами (обкладками); площади пластин; диэлектрической постоянной среды между пластинами. Например, емкость плоского конденсатора определяется по формуле, пФ:

$$C = 0,088 \frac{\epsilon S}{d}, \quad (2-11)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, пФ/см (для воздуха $\epsilon = 1$);

S — активная площадь пластин (обкладок) конденсатора, см^2 ;
 d — расстояние между пластинами (обкладками), см.

В соответствии с формулой (2-11) можно построить емкостные датчики, в которых преобразование измеряемой (регулируемой) неэлектрической величины будет происходить за счет изменения d , S и ϵ .

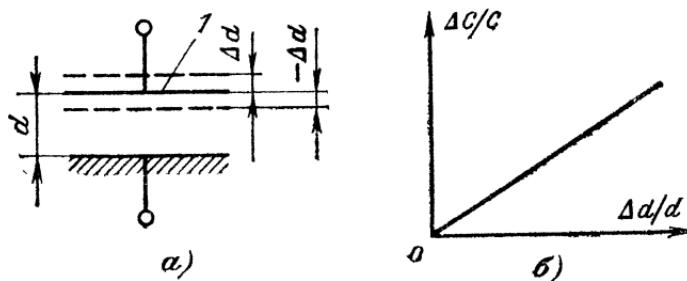


Рис. 2-14. Емкостный датчик с переменным расстоянием между пластинами.

a — конструкция; *б* — статическая характеристика.

На рис. 2-14, *а* показан емкостный датчик, в котором измеряемая (регулируемая) величина вызывает изменение расстояния между пластинами d . При перемещении подвижной пластины 1 вверх значение d увеличивается, что приводит к уменьшению емкости датчика. Если подвижная пластина 1 перемещается вниз, то емкость датчика увеличивается. Статическая характеристика датчика (рис. 2-14, *б*) показывает зависимость между относительным изменением расстояния между пластинами $\Delta d/d$ и относительным изменением емкости $\Delta C/C$.

Для увеличения емкости применяются многоступенчатые емкостные датчики, которые выполняются из нескольких рассмотренных датчиков, расположенных один под другим и имеющих подвижные пластины, причем подвижные пластины датчика укреплены на общей оси. Емкость таких датчиков в зависимости от конструкции равна от нескольких десятков до нескольких сотен пикофарад.

Рассмотренные датчики позволяют измерять малые перемещения (до десятых долей микрона).

Емкостный датчик с переменной активной площадью пластин показан на рис. 2-15, а. Он представляет собой обычный воздушный конденсатор переменной емкости, в котором при повороте подвижной пластины 1 по отношению к неподвижной пластине 2 изменяется активная площадь пластин конденсатора, что приводит к изменению его емкости. Для увеличения чувствительности такого датчика применяются также многопластинчатые емкостные датчики.

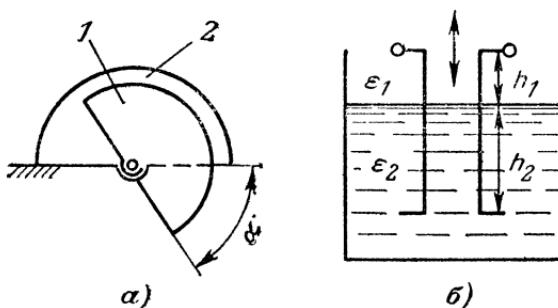


Рис. 2-15. Емкостный датчик.

а — с переменной активной площадью пластин; б — с переменной относительной диэлектрической проницаемостью.

Емкостные датчики с переменной активной площадью пластин часто применяются для измерения линейного и углового перемещения.

На рис. 2-15, б изображен емкостный датчик, в котором относительные диэлектрические проницаемости сред между пластинами ϵ_1 и ϵ_2 изменяются. Такой емкостный датчик применяется для измерения уровня жидкости.

Основными достоинствами емкостных датчиков являются: высокая чувствительность, отсутствие подвижных трущихся деталей; простота конструкции, малые размеры и масса; малый собственный момент; малая инерционность.

К недостаткам емкостных датчиков следует отнести: большое внутреннее сопротивление, влияние на работу датчика паразитных емкостей (требуется экранировка); необходимость усиления снимаемого сигнала; потребность источника напряжения высокой частоты; сильное влияние изменения температуры и влажности окружающей среды; для достижения максимальной чувствитель-

ности монтаж следует производить очень короткими проводами, а это не всегда удобно.

Емкостные датчики широко применяются в автоматике для контроля линейных и угловых перемещений, расстояний между деталями, состава физических смесей, температуры, уровня жидкостей, давления, влажности диэлектрических материалов и т. п.

2-5. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

К генераторным датчикам относятся термоэлектрические, пьезоэлектрические и тахометрические датчики.

а) Термоэлектрические датчики

К числу термоэлектрических датчиков генераторного типа можно отнести термопары, в которых изменение температуры преобразуется в термоэлектродвижущую силу (термо-ЭДС) E .

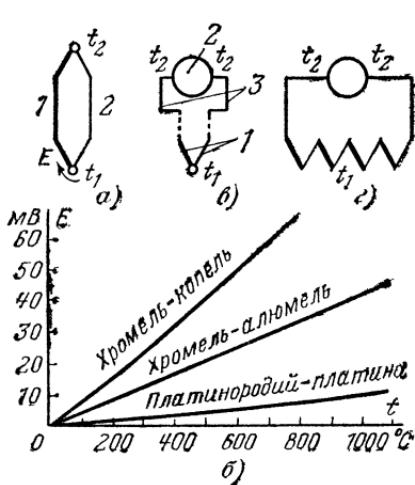


Рис. 2-16. Термопары.

а — термоэлектрическая цепь; б — характеристики термопар; в — схема включения термопары; г — последовательное включение термопар.

В основу работы термопар положено явление термоэлектрического эффекта, открытого в 1756 г. русским академиком Ф. У. Эпинусом. Это явление заключается в том, что если соединить концы двух разнородных по материалу проводников 1 и 2 (рис. 2-16, а) и места соединений поместить в среды с различными температурами t_1 и t_2 , то в цепи термопары появляется термо-ЭДС, которая будет тем больше, чем большее разность температур концов термопары $t_1 - t_2$.

Конец термопары, имеющий температуру t_1 , называется рабочим концом (горячим спаем), а конец термопары, находящийся при постоянной температуре t_2 , называется свободным концом (холодным спаем).

Проводники 1 и 2, с помощью которых образуется термопара, называются *термоэлектродами*. Термоэлектроды обычно изготавливаются из чистых металлов (платина, золото, никель, медь, железо, вольфрам, молибден), сплавов (константан, никром, платинородий, чугун, алюминий, копель, хромель) и полупроводниковых материалов (уголь, карборунд). Термоэлектроды бывают терноположительными и термоотрицательными. Терноположительный электрод — это такой термоэлектрод, на котором при соединении его с химически чистой платиной при $t_1 > t_2$ образуется положительный потенциал по отношению к платине. Термоотрицательный электрод — это термоэлектрод, на котором при тех же условиях образуется отрицательный потенциал по отношению к платине. Например, при соединении железа с платиной при температуре рабочего конца $t_1 = 100^\circ\text{C}$ и свободного конца $t_2 = 0^\circ\text{C}$ железо имеет по отношению к платине положительный потенциал, равный $E_{ж.п} = +1,75 \text{ мВ}$. При соединении копеля с платиной при $t_1 = 100^\circ\text{C}$ и $t_2 = 0^\circ\text{C}$ на копеле образуется по отношению к платине отрицательный потенциал $E_{п.к.} = -4,0 \text{ мВ}$.

Для повышения термо-ЭДС берут и соединяют положительные и отрицательные термоэлектроды. Так, при соединении железа и копеля при $t_1 = 100^\circ\text{C}$ и $t_2 = 0^\circ\text{C}$ потенциал железа по отношению к копелю определяется по формуле:

$$E_{ж.к.} = E_{ж.п} - E_{к.ж} = +1,75 - (-4,0) = +5,75 \text{ мВ.}$$

Термоэлектроды термопары соединяют между собой пайкой или сваркой.

Если термопару используют в качестве датчика, то ее сначала градируют, т. е. определяют зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего конца t_1 при температуре свободного конца $t_2 = 0^\circ\text{C}$ (температура таяния льда).

Предположим, что при измерении температура t_2 не равна температуре, при которой происходила градировка термопары, тогда истинное значение термо-ЭДС $E_{ист}$ необходимо определять с учетом поправки на температуру свободного конца:

$$E_{ист} = E_{изм} + E_2, \quad (2-12)$$

где $E_{изм}$ — измеренная термо-ЭДС при $t_2 \neq 0^\circ\text{C}$;

E_2 — поправка на температуру свободного конца.

При точном определении температуры по величине термо-ЭДС необходимо пользоваться стандартными градуировочными таблицами. В табл. 2-1 приведены характеристики некоторых термопар при температуре свободных концов 0° С.

Т а б л и ц а 2-1

Материал термоэлектродов	Условное обозначение градуировки	Максимальная рабочая температура при длительном применении, °С	Термо-ЭДС при максимальной рабочей температуре, мВ
Платинородий — платина	ПП-1	1300	13,13
Хромель — алюмель	ХА	1000	41,32
Нихром — никель	—	1000	36,70
Хромель — копель	ХК	600	49,02
Железо — копель	ЖК	600	37,40
Медь — копель	МК	400	23,13
Медь — константан	—	350	17,10

Примечание. В наименовании термопар первым указан положительный термоэлектрод.

На рис. 2-16, б приведены характеристики трех термопар, которые представляют собой почти линейную зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего конца.

Следует отметить, что любая термопара обладает следующими основными свойствами:

- 1) если не изменять температуру рабочего t_1 и свободного t_2 концов, то абсолютное значение термо-ЭДС остается постоянным при нагревании любой точки проводника термопары;
- 2) значение термо-ЭДС не изменится, если в разрыв термопары включить третий проводник, оба конца которого имеют одинаковую температуру.

Термопара 1 может включаться как непосредственно в цепь измерительного прибора 2 (рис. 2-16, в), так и по компенсационной схеме. Принцип компенсации основан на уравновешивании термо-ЭДС термопары равным и противоположным по знаку напряжением. Этот принцип широко применяется в потенциометрах.

В технике часто измерительный прибор 2 расположен на значительном расстоянии от термопары 1. В этих случаях соединение измерительного прибора с термопарой осуществляется с помощью компенсационных проводов 3 (рис. 2-16, в). Если термопара изготовлена из дешевого материала (никель, медь, копель, алюмель и

др.), то и компенсационные провода изготавливаются из того же материала.

Если термопара изготовлена из дорогих материалов (платина, золото, платинородий, вольфрам, молибден), то компенсационные провода изготавливаются из дешевых материалов, но имеющих в паре ту же термо-ЭДС, как и основные материалы. Основными достоинствами металлических термопар являются: простота и дешевизна, большое разнообразие конструктивных форм исполнения.

К недостаткам металлических термопар можно отнести:

наличие паразитных термо-ЭДС (за счет примесей в металлах);

тепловую инерционность (постоянная времени термопар колеблется от нескольких минут до десятых долей секунды).

В настоящее время промышленностью выпускаются термопары, изготовленные из полупроводникового материала, которые имеют термо-ЭДС, равную 1 мВ/°C, т. е. в десятки раз большую, чем металлические термопары.

Основными недостатками полупроводниковых термопар являются: сравнительно небольшой диапазон измерения температур (от +200 до +400°C); малая прочность.

Термопары как металлические, так и полупроводниковые выполняются различных размеров и конфигураций. Термопары больших размеров, как правило, устанавливаются в промышленных печах, а миниатюрные термопары — в вакууме. Для длительного измерения высоких температур (около 2000°C) применяются вольфрамоиридиевые и вольфрамомолибденовые термопары.

В автоматике для измерения температур обычно используют не одиночные термопары, а несколько термопар (рис. 2-16, г), соединенных последовательно. Такое соединение термопар позволяет повысить значение термо-ЭДС и выходную мощность термоэлектрического датчика.

6) Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрический эффект бывает прямым и обратным.

Прямой пьезоэфект заключается в том, что некоторые материалы имеют способность образовывать на гранях своих поверхностей при воздействии на них механических нагрузок электрические заряды.

Обратный пьезоэфект состоит в том, что если к этим материалам прикладывать электрическое поле, то они будут механически деформироваться.

Количественно пьезоэффект можно оценить пьезоэлектрическим модулем d , который устанавливает про-

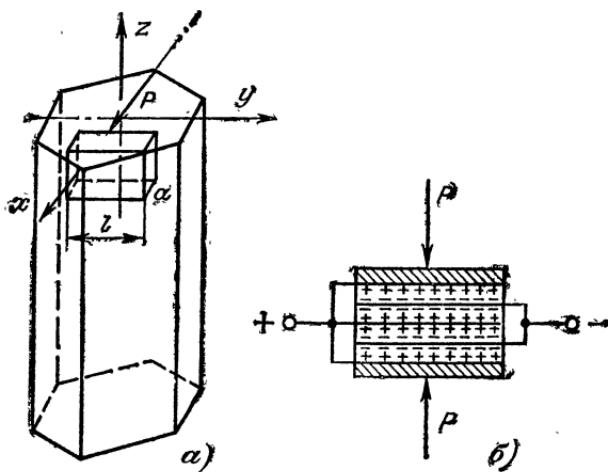


Рис. 2-17. Пьезоэлектрический датчик.

a — вырез пластины из монокристалла кварца; *б* — схема многоэлементного датчика.

порциональность между значениями возникающего заряда Q и приложенной силы P :

$$Q = dP. \quad (2-13)$$

К важнейшим природным материалам, которые обладают пьезоэлектрическим эффектом, можно отнести кварц и турмалин. В качестве материала для датчиков чаще применяется кварц, так как он имеет высокие пьезоэлектрические и изоляционные свойства, малую температурную зависимость и очень высокое сопротивление. Из монокристалла кварца вырезаются шайбы, диски или пластины таким образом, чтобы наибольшая плоскость была перпендикулярна кристаллографической оси x (рис. 2-17, *a*), которая называется электрической или

пьезоэлектрической осью. При воздействии на пластину силы P по оси x на ее гранях возникает заряд, который зависит только от приложенной силы P и не зависит от геометрических размеров пластины:

$$Q_{\text{пр}} = dP_x. \quad (2-14)$$

В этом случае возникает так называемый продольный пьезоэффект.

Поперечный пьезоэффект можно получить, если пластину сжимать силами P по механической оси y . Тогда на тех же гранях возникает заряд, но противоположно-го знака. Значение этого заряда можно найти по формуле

$$Q_{\text{п}} = -d \frac{l}{a} P_y, \quad (2-15)$$

где l — длина пластины;

a — ширина пластины (рис. 2-17, а).

Из формулы (2-15) следует, что $Q_{\text{п}}$ при поперечном пьезоэффекте зависит от отношения l/a . Изменяя данное отношение в определенных пределах, можно изменять чувствительность преобразователя.

При воздействии на пластину силы P по оптической оси z на ее гранях не возникает заряда.

Пьезоэлектрические датчики конструктивно, как правило, представляют собой набор нескольких шайб, дисков или пластин, которые механически соединяются последовательно, а электрически — параллельно (рис. 2-17, б). Суммарный заряд в этом случае определяется по формуле:

$$Q_{\Sigma} = nQ, \quad (2-16)$$

где n — число шайб, дисков или пластин;

Q — заряд, возникающий на одной шайбе, пластине или на одном диске.

При использовании пьезоэлектрических датчиков обычно измеряют не заряд, а напряжение на емкости, образуемой обкладками шайбы, диска или пластины.

Это напряжение находится по формуле

$$U = \frac{Q_{\Sigma}}{C_d} = \frac{nQ_{\text{пр}}}{C_d} = \frac{ndP_x}{C_d}, \quad (2-17)$$

где C_d — собственная емкость пьезоэлектрического датчика.

Для пьезоэлектрических датчиков, кроме природных материалов кварца и турмалина, применяются в технике также искусственные кристаллы: сегнетовая соль (КНТ), дигидрофосфат калия (КДР), дигидрофосфат аммония (АДР) и др. Пластины из искусственных кристаллов вырезаются под некоторым углом к полярным осям (обычно под углом 45°).

Сегнетовая соль имеет высокий пьезоэлектрический модуль d , который в 70 раз больше пьезоэлектрического модуля кварца, но она имеет очень низкую механическую прочность, а также большую зависимость характеристик от температуры и влажности.

В настоящее время в технике широко применяются сегнетоэлектрики в виде пьезокерамик титаната бария и его композиций, титаната свинца и др. Эти сегнетоэлектрики по сравнению с кварцем имеют больший пьезоэлектрический модуль и более высокую механическую прочность. Они изготавливаются любой формы и размеров.

Основным достоинством всех пьезоэлектрических датчиков является их безынерционность, а основным недостатком — малая выходная мощность. Поэтому для усиления выходной мощности пьезоэлектрических датчиков применяются усилители. Так как эти датчики имеют большое выходное (внутреннее) сопротивление, поэтому они включаются на вход усилителей, имеющих входное сопротивление около 10^8 — 10^{14} Ом. Пьезоэлектрический датчик и усилитель соединяются между собой с помощью экранированного кабеля. Пьезоэлектрические датчики очень часто применяются для измерения быстропротекающих процессов. Эти датчики могут, например, измерять давление газов в двигателях внутреннего сгорания и в стволах артиллерийских орудий, а также регистрировать удары метеорных частиц с массами в 10^{-9} г при средней скорости 40 км/ч на искусственных спутниках земли.

в) Тахометрические датчики

К тахометрическим датчикам можно отнести тахогенераторы, которые представляют собой маломощные электрические машины, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал. Тахогенераторы предназначены для получения напряжения, пропорцио-

нального частоте вращения, и применяются в качестве электрических датчиков угловой скорости. В зависимости от вида выходного напряжения и конструкции они делятся на тахогенераторы постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока конструктивно представляют собой электрогенераторы постоянного тока и выполняются с возбуждением от постоянных маг-

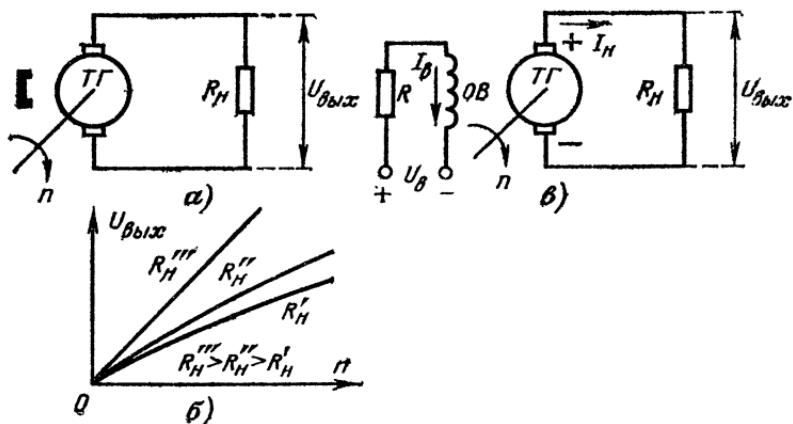


Рис. 2-18. Тахогенераторы постоянного тока.

α — схема тахогенератора с возбуждением от постоянных магнитов; *β* — выходные характеристики; *δ* — схема тахогенератора с независимым электромагнитным возбуждением.

ников или электромагнитов. На рис. 2-18, *α* приведена схема тахогенератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. При вращении якоря тахогенератора с частотой n с его щеток снимается ЭДС, значение которой определяется по формуле

$$E = k_e \Phi n, \quad (2-18)$$

где $k_e = \frac{pw}{2\pi a} \cdot 10^{-8}$ — коэффициент, зависящий от конструкции и схемы якоря (p — число пар полюсов; w — число витков обмотки якоря; $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря);

Φ — магнитный поток.

Для данного типа тахогенератора магнитный поток Φ является величиной постоянной, так как он создается

постоянными магнитами. Поэтому ЭДС зависит только от частоты вращения якоря тахогенератора n . Выходные характеристики рассмотренного тахогенератора для различных значений нагрузок R_n приведены на рис. 2-18, б. Из этого рисунка следует, что с увеличением частоты вращения тахогенератора до определенного момента его выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ растет пропорционально и только при большой частоте линейность характеристики нарушается, причем чем больше сопротивление нагрузки R_n , тем больше крутизна характеристики и тем больше ее линейность.

В автоматике применяются также тахогенераторы постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением. В таких тахогенераторах магнитный поток возбуждения Φ_b создается специальной обмоткой возбуждения OB (рис. 2-18, в), которая располагается на полюсах статора. В этом случае магнитный поток равен:

$$\Phi_b = k_\Phi I_b, \quad (2-19)$$

где k_Φ — коэффициент пропорциональности;

I_b — ток в обмотке возбуждения.

Для тахогенераторов с независимым электромагнитным возбуждением ЭДС можно найти следующим образом, для этого в формуле (2-18) вместо Φ подставить Φ_b :

$$E = k_e \Phi_b n. \quad (2-20)$$

Из выражения (2-20) следует, что ЭДС тахогенератора зависит не только от частоты вращения якоря n , но и от магнитного потока обмотки возбуждения Φ_b , т. е. тока в обмотке возбуждения I_b [см. формулу (2-19)]. При изменении направления вращения якоря меняется полярность выходного сигнала. Приведенные выше формулы для определения ЭДС тахогенератора справедливы только при работе его на холостом ходу.

При работе тахогенератора с нагрузкой R_n его выходное напряжение, снимаемое со щеток якоря, равно:

$$U_{\text{вых}} = E - I_n R_a, \quad (2-21)$$

где $I_n = \frac{E}{R_n + R_a}$ — ток нагрузки;

R_a — сопротивление цепи якоря, которое состоит из сопротивления самой якорной обмотки и сопротивления переходного контакта между коллектором и щетками.

Выходная характеристика тахогенератора с независимым электромагнитным возбуждением напоминает выходную характеристику тахогенератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 2-18, б).

При частоте вращения якоря тахогенератора, близкой к нулю, возникает так называемая зона нечувствительности, в пределах которой выходное напряжение равно нулю.

Конструкции тахогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов проще, чем конструкции тахогенераторов с независимым электромагнитным возбуждением, потому что отсутствует дополнительный источник питания.

Главное требование, предъявляемое к тахогенераторам, — это точность преобразования механического вращения в электрическое напряжение.

Основные причины погрешностей тахогенераторов постоянного тока:

1) в тахогенераторах с возбуждением от постоянных магнитов — изменение потока магнита за счет старения или вследствие влияния температуры;

2) в тахогенераторах с независимым электромагнитным возбуждением — изменение сопротивления обмотки возбуждения (тока возбуждения) при изменении температуры. Для уменьшения влияния температуры в цепь обмотки возбуждения (выполняется из медного провода) включается дополнительное сопротивление R (рис. 2-18, в), не зависящее от температуры;

3) в тахогенераторах обоих типов — зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки R_h или тока нагрузки I_h как вследствие падения напряжения в обмотке его якоря и щеточных контактов, так и вследствие реакции якоря¹.

¹ Реакция якоря — это явление, заключающееся в том, что ток нагрузки I_h (см. рис. 2-18, в), протекая по обмотке якоря, создает врачающийся магнитный поток, который наводит противо-ЭДС в обмотке возбуждения ОВ. Вследствие этого ток возбуждения I_b уменьшается, что приводит к уменьшению магнитного потока возбуждения Φ_b тахогенератора, в результате чего напряжение $U_{\text{вых}}$ также уменьшается.

Это особенно сильно сказывается при небольшом сопротивлении нагрузки.

Основным недостатком тахогенераторов постоянного тока является наличие коллектора и щеток, имеющих нестабильное переходное контактное сопротивление. Это приводит к некоторой нестабильности выход-

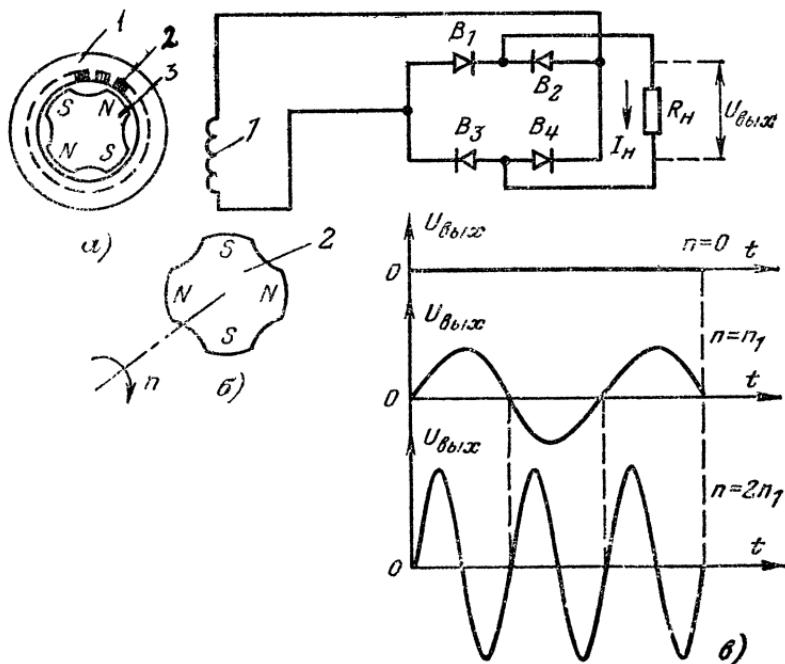


Рис. 2-19. Синхронный тахогенератор.

а — упрощенная конструкция; *б* — схема включения (*1* — обмотка статора, *2* — ротор); *в* — зависимость выходного напряжения от частоты вращения ротора.

ного напряжения тахогенераторов и к появлению зоны нечувствительности при частотах вращения якоря, близких к нулю.

В настоящее время наша промышленность выпускает тахогенераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов марок ТГП-1А, ТГП-3, ТГП-3А и с независимым электромагнитным возбуждением марок ТГ-1, ТГ-2, ТД-101, ТД-102 и ТД-103.

Тахогенераторы переменного тока можно разделить на два вида: *синхронные* и *асинхронные*. Основными

преимуществами тахогенераторов переменного тока по сравнению с тахогенераторами постоянного тока являются: отсутствие коллектора и щеток; синусоидальная форма выходной ЭДС; большая надежность; стабильность характеристик.

Упрощенная конструкция *синхронного тахогенератора* приведена на рис. 2-19, а. Тахогенератор синхронного типа состоит из неподвижного статора 1, в пазах которого размещена обмотка 2, и ротора 3 в виде постоянного магнита с несколькими полюсами (в данном случае четырьмя). При вращении ротора в обмотке статора наводится переменная ЭДС, имеющая синусоидальную форму, причем амплитуда и частота ЭДС пропорциональны частоте вращения ротора.

Действующее значение этой ЭДС можно найти по формуле

$$E = 4k_f k_\omega f \omega \Phi = 4,44 k_\omega \frac{pn}{60} \omega \Phi, \quad (2-22)$$

где k_f — коэффициент формы (для синусоидального тока $k_f=1,11$). Он позволяет судить о том, насколько несинусоидальный ток отличается от синусоидального;

k_ω — обмоточный коэффициент статорной обмотки;
 $f=pn/60$ — частота напряжения источника питания (p — число пар полюсов, n — частота вращения ротора);

ω — число витков статорной обмотки;

Φ — магнитный поток.

Схема включения синхронного тахогенератора показана на рис. 2-19, б. Для получения постоянной полярности выходного напряжения нагрузка R_B в схеме включена через выпрямители $B_1—B_4$.

На рис. 2-19, в показано, что при различных частотах вращения ротора ($n=0$; $n=n_1$; $n=2n_1$ и т. д.) изменяется не только амплитуда, но и частота выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

Синхронный тахогенератор на практике применяется редко, потому что имеет два основных недостатка:

1) при изменении частоты вращения ротора частота напряжения $U_{\text{вых}}$ изменяется, что затрудняет использование его в обычных схемах переменного тока;

2) фаза $U_{\text{вых}}$ не зависит от направления вращения ротора, т. е. он нечувствителен к изменению направления вращения.

Обычно синхронные тахогенераторы используются в качестве индикаторных тахометров, которые служат для непосредственного измерения частоты вращения различных механизмов. В этом случае нагрузкой синхронного тахогенератора является вольтметр, шкала которого отградуирована в числах оборотов в минуту.

Асинхронный тахогенератор не имеет указанных недостатков. Он широко применяется в автоматике и вычислительной технике. Конструкция его напоминает

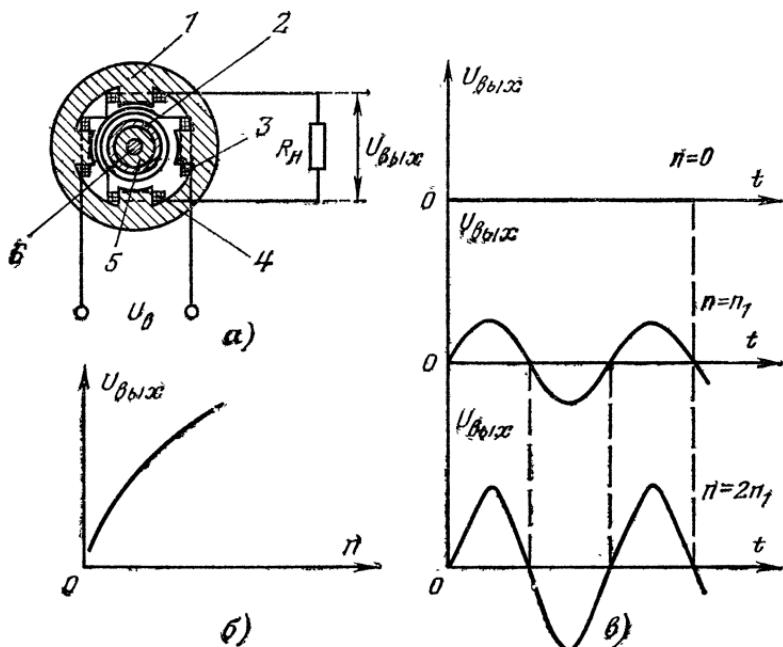


Рис. 2-20. Асинхронный тахогенератор.

a — конструкция и схема включения; *б* — статическая характеристика; *в* — к пояснению того, что частота выходного напряжения не изменяется от частоты вращения ротора.

конструкцию двухфазного асинхронного двигателя с тонкостенным ротором (рис. 2-20, *a*). На статоре 1 расположаются продольная и поперечная обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 90° . Одна из обмоток является обмоткой возбуждения 3, а другая — выходной (сигнальной) обмоткой 4. Ротор тахогенератора 2 укреплен на валу 6. Он представляет собой тонкостен-

ный алюминиевый стакан, врачающийся в зазоре между статором 1 и неподвижным цилиндрическим сердечником 5. К обмотке возбуждения 3 подводится постоянное по амплитуде и частоте напряжение U_b , а к выходной обмотке подключается нагрузка R_h , с которой снимается выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. При подаче на обмотку возбуждения напряжения переменного тока в тахогенераторе возникает пульсирующий магнитный поток возбуждения, который пересекает ротор в направлении, перпендикулярном оси выходной обмотки. Если ротор не вращается, то в выходной обмотке не наводится ЭДС переменного тока, так как оси обмоток 3 и 4 в этом случае взаимно перпендикулярны. При вращении ротора в нем, кроме ЭДС трансформации, наводимой пульсирующим магнитным потоком, возникает также ЭДС вращения за счет пересечения ротором магнитных линий потока возбуждения, т. е. в роторе наводится суммарная ЭДС. Эта ЭДС создает в роторе токи, вызывающие появление переменного магнитного потока, совпадающего с осью выходной обмотки и наводящего в ней ЭДС, значение которой пропорционально частоте вращения ротора n . Следует отметить, что фаза наводимой ЭДС зависит от направления вращения ротора. Наводимая в выходной обмотке асинхронного тахогенератора ЭДС определяется по формуле

$$E_{\text{вых}} = kU_b n, \quad (2-23)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

На рис. 2-20, б показана статическая характеристика асинхронного тахогенератора $U_{\text{вых}}=f(n)$, которая нелинейна. Нелинейность характеристики обусловлена реакцией цепи выходной обмотки и возрастает с повышением частоты вращения ротора.

Основными достоинствами асинхронного тахогенератора по сравнению с синхронным тахогенератором являются: независимость частоты выходного напряжения от частоты вращения ротора n (рис. 2-20, в) и чувствительность тахогенератора к изменению направления вращения ротора.

Главным недостатком асинхронного тахогенератора является изменение выходной ЭДС при изменении температуры. В основном это вызвано тем, что при работе тахогенератора происходит нагрев ротора, в результате

чего изменяется его сопротивление, которое во много раз больше сопротивления обмоток статора. Для уменьшения температурной погрешности асинхронных тахогенераторов большой точности роторы их часто выполняют из материалов с весьма малым температурным коэффициентом, например из марганцовистого алюминия, марганцовистой меди или фосфористой бронзы.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

УСИЛИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЯХ

а) Назначение, классификация и основные характеристики усилителей

В автоматике выходной сигнал датчика используется для приведения в действие исполнительного устройства автоматической системы. Однако очень часто мощность выходного сигнала датчика недостаточна, и ее поэтому необходимо усиливать. Эффект усиления по мощности осуществляется в усилителях за счет энергии вспомогательного источника.

В зависимости от вида вспомогательного источника энергии усилители можно разбить на следующие группы: *электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные*.

Усилители делятся на *однокаскадные и многокаскадные*, а также на усилители с обратными связями и без обратных связей. Применяются чаще всего электрические усилители, которые можно разделить на две большие подгруппы: усилители, не содержащие подвижных частей (электронные, полупроводниковые, тиристорные, магнитные), и усилители, содержащие подвижные части (электромашинные).

К основным характеристикам усилителей относятся: коэффициент усиления;

мощность, потребляемая от вспомогательного источника энергии;

выходная мощность;

коэффициент полезного действия (КПД);

быстродействие (значение постоянной времени);

входное и выходное сопротивления усилителя;

собственные шумы усилителя (появление выходной величины при входной величине, равной нулю).

Коэффициент усиления, например, для электрических усилителей показывает, во сколько раз мощность, ток или напряжение на выходе усилителя больше мощности, тока или напряжения на его входе. Различают коэффициенты усиления по мощности K_P , по току K_I и по напряжению K_U , которые соответственно равны:

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} ; K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} ; K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (3-1)$$

Мощность, потребляемая от вспомогательного источника энергии, выходная мощность и КПД определяют энергетические свойства усилителя.

Быстродействие усилителей оценивается по их динамическим характеристикам (временным или частотным). Усилители магнитные, электромашинные, гидравлические и пневматические имеют меньшее быстродействие, чем электронные и полупроводниковые усилители. Например, значение постоянной времени электронного усилителя равно 10^{-6} — 10^{-10} с, а пневматического усилителя — 1 — 10^{-1} с.

Входное и выходное сопротивления имеют место только для электрических усилителей. Эти сопротивления необходимо учитывать при согласовании усилителей с предыдущими и последующими элементами автоматической или телемеханической системы.

Полупроводниковые, магнитные и электромашинные усилители имеют меньшее значение входного сопротивления, чем электронные усилители.

Так, входное сопротивление электронного усилителя равно 10^6 — 10^{12} Ом, а входное сопротивление полупроводникового усилителя — 10^2 — 10^5 Ом.

Усилители с низким входным сопротивлением нельзя использовать, например, для усиления сигналов емкостных датчиков, фотоэлементов, имеющих большое выходное сопротивление.

6) Область применения различных усилителей

В автоматике применяются электронные усилители двух видов: усилители с непосредственной связью между каскадами (или усилители постоянного тока) и усилители переменного тока. Усилители постоянного тока приме-

няются, например, в следящих системах, когда сигнал ошибки представляет собой медленно изменяющееся напряжение.

При использовании усилителей постоянного тока (УПТ) следует помнить, что они имеют большой дрейф нуля (явление самопроизвольного изменения выходного напряжения усилителя с течением времени). Основными причинами дрейфа нуля являются: изменение напряжения питания усилителя и накала ламп; изменение эмиссии катодов ламп и изменение характеристик ламп с течением времени. Для уменьшения дрейфа нуля применяют модуляторы¹ и демодуляторы². Сигнал ошибки постоянного тока с помощью модулятора превращают в переменное напряжение, которое затем усиливается и демодулируется, т. е. усиленное переменное напряжение преобразуется в постоянное.

Усилители переменного тока по сравнению с УПТ имеют следующие преимущества: отсутствие дрейфа нуля, простота схемы, малая масса и возможность использования исполнительных устройств переменного тока.

Электронные усилители чаще применяются в следящих системах, так как перед другими видами усилителей они имеют ряд преимуществ: возможность получения больших коэффициентов усиления, большое быстродействие, усиление очень малых сигналов, отсутствие подвижных частей, высокая стабильность характеристик, возможность непосредственного согласования с другими видами усилителей, широкий диапазон усиливаемых частот.

К недостаткам электронных усилителей можно отнести небольшую механическую прочность, малую надежность, малый срок службы, низкий КПД.

Как правило, мощность электронных усилителей составляет от десятых долей ватта до нескольких десятков ватт.

В автоматике, например в следящих системах, все чаще стали применяться полупроводниковые усилители,

¹ Модулятор — это устройство, осуществляющее преобразование сигналов постоянного тока в сигналы переменного тока определенной частоты [87, 103].

² Демодулятор — это устройство, предназначенное для выделения тока низкой частоты из высокочастотного модулированного сигнала [15, 103].

имеющие следующие преимущества: высокую надежность и долговечность, вибро- и ударостойкость, малые размеры и массу, мгновенную готовность к работе, экономичность.

К недостаткам полупроводниковых усилителей относятся: большой разброс параметров, зависимость параметров и характеристик от температуры окружающей среды, малое входное и большое выходное сопротивление. Для построения полупроводниковых усилителей используются полупроводниковые триоды и тиристоры. Обычно полупроводниковые триоды и тиристоры изготавливаются из германия или кремния с соответствующими примесями. Полупроводниковые усилители выполняются мощностью от десятых долей ватта до нескольких десятков ватт.

Тиратронные усилители применяются в автоматических системах регулирования. Технические характеристики этих усилителей во многом совпадают с техническими характеристиками электронных усилителей. Основным преимуществом тиратронных усилителей по сравнению с электронными усилителями является большая выходная мощность, которая получается за счет большего анодного тока. Анодный ток для современных тиратронов колеблется от нескольких сотен миллиампер до нескольких сотен ампер. Увеличение анодного тока тиратрона возможно из-за наличия ионизированного газа в пространстве между анодом и катодом.

К недостаткам тиратронных усилителей относятся: большой разброс параметров и небольшая чувствительность, необходимость предварительного прогрева катода тиратрона до подачи питания на анод (время прогрева катода может составлять от 10 с до 40 мин). Для построения тиратронных усилителей применяются паро- или газонаполненные трех- или четырехэлектродные лампы.

В настоящее время широко применяются в автоматике комбинированные усилители, которые могут состоять из двух-трех или трех-четырех типов усилителей. Такие комбинации дают возможность использовать достоинства каждого типа усилителя. При выборе комбинированного усилителя необходимо учитывать следующие основные показатели: срок службы, надежность в работе, мгновенную готовность к работе, массу и габариты, выходную мощность для управления исполнительным дви-

гателем, чувствительность и коэффициент усиления усилителя, стоимость, потребляемую усилителем мощность.

Наибольшее распространение получили следующие комбинированные усилители: электронно-тиратронные, электронно-магнитные, полупроводниково-магнитные, магнитно-полупроводниковые, магнитно-электронно-магнитные и др.

Область применения магнитных, электромашинных, гидравлических и пневматических усилителей будет описана в последующих параграфах.

3-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Принцип действия магнитного усилителя основан на использовании явления насыщения ферромагнитных материалов в магнитном поле, т. е. нелинейности их характеристик намагничивания $B=f(H)$ (рис. 3-1, а).

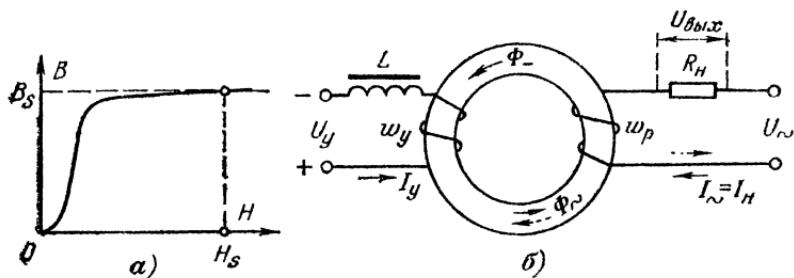


Рис. 3-1. Простейший дроссельный магнитный усилитель.

а — зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H ;
б — схема.

В простейшем виде магнитный усилитель представляет собой дроссель насыщения переменного тока¹, в цепь которого последовательно с рабочей обмоткой w_p включено сопротивление нагрузки R_H (рис. 3-1, б). Выходное напряжение $U_{вых}$ снимается с нагрузки R_H .

¹ Дроссель насыщения переменного тока представляет собой устройство, индуктивность которого может меняться в широких пределах за счет подмагничивания дросселя постоянным током.

Будем считать, что ток в рабочей цепи I_{\sim} является синусоидальным и его значение можно найти по формуле

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{R^2 + x_p^2}}, \quad (3-2)$$

где U_{\sim} — напряжение питания магнитного усилителя; R — полное активное сопротивление рабочей цепи; x_p — индуктивное сопротивление рабочей обмотки.

Полное активное сопротивление рабочей цепи R состоит из активного сопротивления нагрузки R_n и активного сопротивления рабочей обмотки R_p

$$R = R_n + R_p. \quad (3-3)$$

Индуктивное сопротивление рабочей обмотки x_p определяется по формуле

$$x_p = \omega L_p, \quad (3-4)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота питания рабочей цепи; L_p — индуктивность рабочей обмотки, определяемая по формуле:

$$L_p = \frac{\omega_p^2 S_c}{l_c} \mu_c; \quad (3-5)$$

здесь ω_p — число витков рабочей обмотки;
 S_c — площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника;
 l_c — длина средней магнитной линии сердечника;

μ_c — магнитная проницаемость сердечника.

Подставим в формулу (3-2) вместо x_p выражение ωL_p . Тогда формулу (3-2) можно записать в следующем виде:

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{R^2 + (\omega L_p)^2}}. \quad (3-6)$$

Из формулы (3-6) следует, что ток в рабочей цепи, или в нагрузке, $I_{\sim} = I_n$ зависит от индуктивности рабочей обмотки L_p , которая согласно формуле (3-5) пропорциональна μ_c ($L_p \propto \mu_c$). В свою очередь магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника μ_c зависит от магнитной индукции B и напряженности внешнего

магнитного поля H ($\mu_c = \Delta B / \Delta H$). При отсутствии управляющего напряжения U_y на входе дросельного магнитного усилителя напряженность постоянного магнитного поля $H = 0$. В этом случае магнитная проницаемость μ_c имеет большое значение. Следовательно, индуктивность L_p и индуктивное сопротивление рабочей обмотки x_p имеют также большие значения. В данном случае ток в рабочей цепи I_\sim имеет небольшое значение. Его обычно называют током холостого хода. При этом большая часть переменного напряжения U_\sim падает на рабочей обмотке w_p , а незначительная часть — на нагрузке R_h (рис. 3-1, б).

При подаче на вход усилителя управляющего напряжения U_y по цепи управления потечет ток управления I_y , в результате которого возникает напряженность постоянного магнитного поля H . Ферромагнитный сердечник усиливается. Следовательно, индуктивное сопротивление рабочей обмотки x_p также падает, в результате чего ток в рабочей цепи I_\sim увеличивается.

В этом случае большая часть переменного напряжения U_\sim падает уже на нагрузке R_h , а меньшая часть — на рабочей обмотке w_p .

Следует заметить, что

с помощью тока управления I_y можно регулировать ток в рабочей цепи, т. е. ток в нагрузке I_h .

Если обмотку управления w_y выполнить с числом витков, во много раз превышающим число витков рабочей обмотки w_p , то получим эффект усиления по току.

Принцип действия магнитного усилителя, изображенного на рис. 3-1, б, можно проиллюстрировать с помощью рис. 3-2. На этом рисунке приведены кривая намагничивания ферромагнитного сердечника и кривые изменения магнитной индукции. При отсутствии напря-

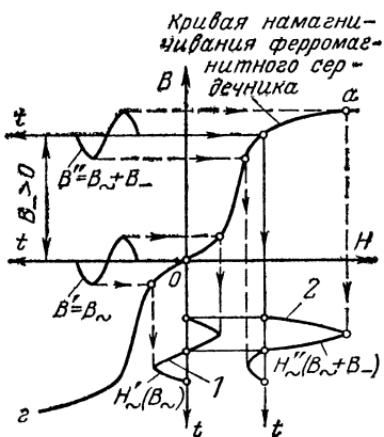


Рис. 3-2. Графическое объяснение принципа действия простейшего дросельного магнитного усилителя.

жения управления U_y постоянная составляющая $B_- = 0$. В этом случае $B' = B_\sim$ и напряженность H'_\sim будет изменяться по симметричной кривой 1, ход построения которой на рис. 3-2 показан стрелками. Кривая 1 напоминает синусоиду. Если теперь на обмотку управления w_y подать напряжение управления U_y , то по обмотке потечет ток управления I_y , создающий в ферромагнитном сердечнике постоянный магнитный поток Φ_- . Этот поток накладывается на переменный магнитный поток Φ_\sim создаваемый рабочей обмоткой w_p . В результате возникновения Φ_- появляется постоянная составляющая магнитной индукции, которая будет больше нуля ($B_- > 0$), т. е. происходит еще большее насыщение сердечника. В этом случае $B'' = B_\sim + B_-$ и напряженность H''_\sim изменяется уже по кривой 2, которая отлична от кривой 1. Искажение формы кривой 2 происходит в результате приближения рабочей точки кривой намагничивания к насыщению.

К основным свойствам магнитных усилителей можно отнести:

1) высокую надежность и большой срок службы. Это объясняется тем, что усилители являются статическими устройствами, так как они не имеют подвижных частей. Они, как правило, работают в широком диапазоне изменения температуры, давления и влажности. Усилители взрыво- и пожаробезопасны, потому что в них отсутствуют источники искрения;

2) готовность к работе после включения питания (не требуется разогрев);

3) высокий КПД;

4) большой порог чувствительности. Магнитные усилители могут усиливать слабые сигналы постоянного тока мощностью $10^{-19} - 10^{-17}$ Вт;

5) большую выходную мощность (она может достигать сотен тысяч киловатт);

6) большой коэффициент усиления по мощности (например, для одного каскада он может быть равен 10^6);

7) уменьшение габаритов и массы магнитного усилителя с повышением частоты (400 Гц и выше).

Магнитные усилители в автоматике используются в качестве дросселей насыщения или управляемой индуктивности, усилителей-преобразователей сигналов постоянного тока в переменный, магнитных модуляторов, усилителей мощности для управления двигателями пе-

ременного тока, бесконтактных магнитных реле, а также в качестве регуляторов напряжения, частоты и температуры.

Магнитные усилители в телемеханике применяются, например, для модуляции частоты в электронных генераторах частоты. В цифровых ЭВМ они используются как усилители импульсов.

Наиболее существенным недостатком магнитных усилителей по сравнению с электронными и полупроводниковыми усилителями является их большая инерционность, которая вызвана индуктивностью обмотки управления L_y . Инерционность в основном определяется отставанием во времени тока управления I_y от напряжения управления U_y .

В настоящее время разработано множество схем магнитных усилителей, некоторые из которых будут рассмотрены ниже.

3-3. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ [ОДНОТАКТНЫЕ] МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

а) Дроссельный магнитный усилитель на двух сердечниках

Рассмотренная выше простейшая схема дроссельного магнитного усилителя (ДМУ), выполненного на одном сердечнике (см. рис. 3-1, б), применяется редко, потому что имеет ряд недостатков:

1) в цепь управления включена большая индуктивность L для устранения протекания по цепи управления переменных токов, возникающих за счет наведения в этой цепи ЭДС самоиндукции. Эта ЭДС возникает в результате прохождения переменного тока по рабочей цепи. При включении индуктивности L повышается инерционность усилителя;

2) большие габариты и масса, так как габариты и масса индуктивности могут быть сравнимы с габаритами и массой магнитного усилителя;

3) сильно искаженная форма кривой тока в нагрузке.

Чтобы устранить перечисленные недостатки МУ, выполненного на одном сердечнике, можно применить схему МУ, выполненного на двух сердечниках.

На рис. 3-3, а приведена схема усилителя, выполненного на двух О-образных сердечниках. Рабочую обмотку w_p в этом случае разделяют на две части и каждую наматывают на свой сердечник, а обмотку управления w_y наматывают сразу на оба сердечника, которые предварительно накладывают один на другой. Рабочие обмотки могут соединяться либо последовательно, либо параллельно, но так, чтобы создаваемые ими напряженности переменного магнитного поля H_{\sim} были направлены встречно относительно обмотки управления. В этом случае действия двух переменных магнитных полей на обмотку управления будут взаимно компенсированы.

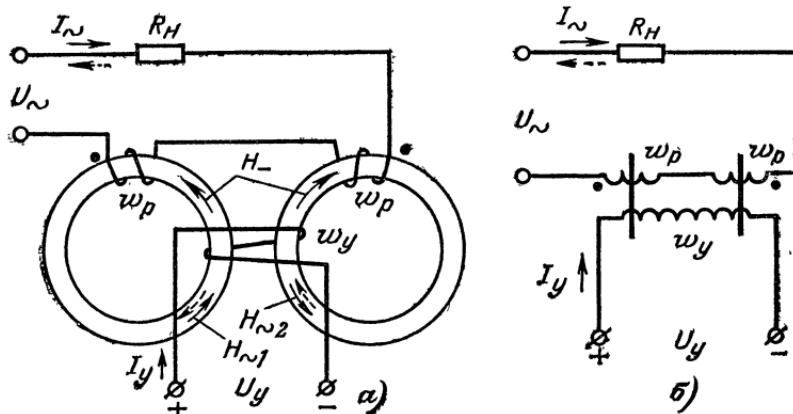


Рис. 3-3. Схема дроссельного магнитного усилителя на двух сердечниках.

а — не по ГОСТ 2.723-68; б — по ГОСТ 2.723-68.

роваться. Такое соединение обмоток приводит к тому, что в течение одного и того же полупериода напряжения переменного тока напряженности постоянного и переменного магнитных полей складываются в одном ($H_1 = H_- + H_{\sim 1}$) и вычитаются в другом сердечнике ($H_2 = H_- - H_{\sim 2}$). В течение следующего полупериода сердечники меняются ролями, т. е. $H_1 = H_- - H_{\sim 1}$; а $H_2 = H_- + H_{\sim 2}$.

Следовательно, в течение всего периода обе рабочие обмотки действуют на рабочую цепь совершенно одинаково. Поэтому форма кривой тока в рабочей цепи будет менее искажена, чем в схеме усилителя с одним сердечником.

Рабочие обмотки в схеме (рис. 3-3, а) включены последовательно и встречно относительно друг к другу. На этом рисунке стрелками условно показаны направления напряженностей, создаваемых обмотками в определенный момент времени.

На рис. 3-3, б приведена схема ДМУ на двух сердечниках, в которой усилитель изображен по ГОСТ 2.723-68.

6) Дроссельный магнитный усилитель с последовательно включенной нагрузкой

На рис. 3-3, а уже была приведена схема МУ, в которой нагрузка R_h включается последовательно с рабочими обмотками. Питание схемы осуществляется от источника, напряжение которого поддерживается неизменным.

Основной характеристикой МУ является статическая характеристика вход — выход. Она показывает зависимость переменного тока

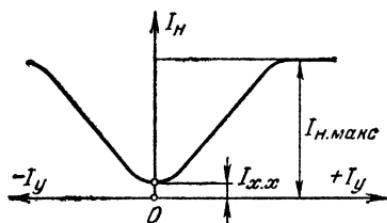


Рис. 3-4. Статическая характеристика нереверсивного магнитного усилителя при последовательном включении нагрузки.

в нагрузке от тока управления $I_h = f(I_y)$ (рис. 3-4). Статическая характеристика нереверсивного МУ является симметричной относительно оси ординат, потому что при изменении полярности сигнала управления ни значение, ни полярность (фаза) тока в нагрузке не меняются.

На статической характеристике МУ отметим две важные точки. Первая точка — это точка пересечения статической характеристики с осью ординат, которая определяет ток холостого хода усилителя $I_{x.x}$, т. е. ток при отсутствии напряжения управления U_y . Вторая точка лежит за перегибом кривой и соответствует максимальному значению тока в нагрузке $I_{h.\max}$.

Отношение максимального тока в нагрузке к току холостого хода называется коэффициентом кратности тока в нагрузке:

$$K_{kp} = \frac{I_{h.\max}}{I_{x.x}}. \quad (3-7)$$

В некоторых случаях его можно определить также отношением максимального и минимального токов в нагрузке:

$$K_{kp} = \frac{I_{h.\max}}{I_{h.\min}}. \quad (3-8)$$

Коэффициент кратности тока в нагрузке является одним из важнейших параметров МУ. Значение K_{kr} для дроссельных магнитных усилителей, сердечники которых выполнены из трансформаторной стали, как правило, колеблется в пределах от 5 до 40. Если же сердечники магнитных усилителей выполнены из сплавов высокой магнитной проницаемости (пермаллои), то значение K_{kr} лежит в пределах от 100 до 200, а иногда бывает даже больше.

Прежде чем перейти к остальным параметрам, которые характеризуют МУ, напишем основное уравнение идеального МУ. Это уравнение показывает равенство МДС рабочей и управляемой обмоток:

$$I_{\text{h}} w_p = I_y w_y. \quad (3-9)$$

Пользуясь формулой (3-9), можно найти коэффициент усиления МУ по току K_I . Он равен отношению приращения тока нагрузки ΔI_{h} к приращению тока управления ΔI_y или отношению числа витков обмотки управления w_y к числу витков рабочей обмотки w_p :

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{h}}}{\Delta I_y} = \frac{w_y}{w_p}. \quad (3-10)$$

Коэффициент усиления по напряжению K_U равен отношению приращения напряжения нагрузки ΔU_{h} к приращению напряжения управления ΔU_y :

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{h}}}{\Delta U_y} = \frac{\Delta I_{\text{h}} R_{\text{h}}}{\Delta I_y R_y} = K_I \frac{R_{\text{h}}}{R_y}. \quad (3-11)$$

Коэффициент усиления по мощности K_P равен отношению приращения мощности на выходе МУ ΔP_{h} к приращению мощности на его входе ΔP_y :

$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{h}}}{\Delta P_y} = \frac{\Delta I_{\text{h}} \Delta U_{\text{h}}}{\Delta I_y \Delta U_y} = K_I K_U = \frac{w_y^2}{w_p^2} \frac{R_{\text{h}}}{R_y}. \quad (3-12)$$

Из формулы (3-12) следует, что чем больше число витков обмотки управления w_y при заданном сопротивлении R_y этих обмоток, тем выше коэффициент усиления по мощности.

в) Дроссельный магнитный усилитель с параллельно включенной нагрузкой

На рис. 3-5, а приведена схема МУ, в которой нагрузка R_{h} подключена параллельно рабочим обмоткам w_p . В этой схеме питание рабочей цепи осуществляется уже не от источника напряжения, как было в схеме на рис. 3-3, а от источника тока. Источник тока получается путем включения большого постоянного резистора R_b последовательно с рабочими обмотками. Значение переменного тока I_{\sim} в схеме поддерживается неизменным ($I_{\sim} = \text{const}$).

Статическая характеристика $I_{\text{h}} = f(I_y)$ данного МУ (рис. 3-5, б) обратна статической характеристике МУ с последовательно включенной нагрузкой (см. рис. 3-4). Объяснить это можно тем, что с ростом напряжения управления ток в нагрузке I_{h} уменьшается, по-

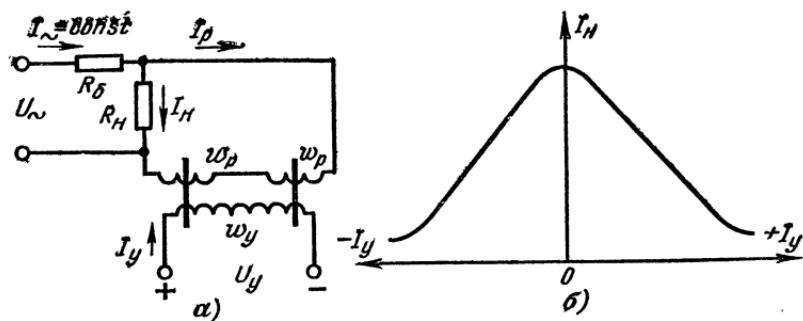


Рис. 3-5. Дросельный магнитный усилитель с параллельно включенной нагрузкой.
а — схема; б — статическая характеристика.

тому что большая часть тока I_{\sim} будет проходить через рабочие обмотки, сопротивление которых в данный момент значительно меньше, чем сопротивление нагрузки R_H . Таким образом, чем больше значение напряжения управления, тем меньше значение тока нагрузки.

Отметим, что питание МУ с параллельно включенной нагрузкой от источника тока экономически невыгодно, так как возникают большие потери на резисторе R_b , а это приводит к уменьшению КПД усилителя. Поэтому МУ с параллельно включенной нагрузкой применяются редко. В основном они применяются в схемах автоматики, для которых источником питания является трансформатор тока.

г) Дросельный магнитный усилитель с начальным смещением (подмагничиванием)

Начальное смещение в ДМУ вводится для того, чтобы увеличить коэффициент усиления для малых входных сигналов и вывода рабочей точки на линейный участок статической характеристики $I_B = f(I_y)$.

Для этого в нереверсивном МУ имеются не одна, а две подмагничивающие обмотки: обмотка управления w_y и обмотка смещения (обмотка начального подмагничивания) w_{cm} (рис. 3-6, а). К обмотке смещения подводится постоянное по значению и знаку напряжение смещения U_{cm} . В результате этого при отсутствии напряжения управления U_y ток в нагрузке уже не будет равен току холостого хода $I_{x.h}$, а будет иметь другое значение I_1 (рис. 3-6, б). Статическая характеристика МУ с начальным смещением (кривая 2) будет как бы передвинута вдоль оси абсцисс на значение тока смещения I_{cm} . При помощи постоянного тока смещения выбирается рабочая точка на статической характеристике МУ. При подаче напряжения управления U_y ток в нагрузке определяется уже суммой или разностью напряженностей полей, которые создаются обмотками w_y и w_{cm} . Например, при совпадении направления напряженности постоянного магнитного поля равна сумме $H'_- = H_{cm} + H_y$. В этом случае ток в нагрузке будет больше значения I_1 (рис. 3-6, б, точка А). При изменении полярности напряжения управ-

ления напряженности будут направлены встречно, т. е. их общая напряженность постоянного магнитного поля будет равна разности $H' = H_{\text{см}} - H_y$. Тогда ток в нагрузке будет меньше значения I_1 (рис. 3-6, б, точка Б). Следовательно, данный МУ реагирует на полярность напряжения управления (входного сигнала). Кроме того, введение начального смещения повышает коэффициент усиления для

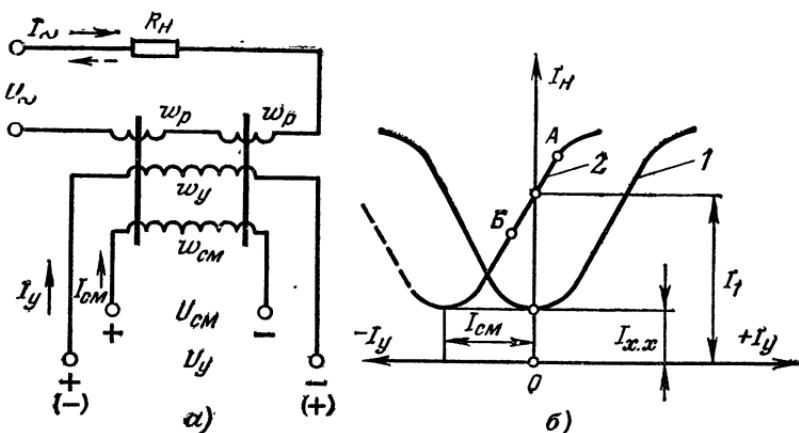


Рис. 3-6. Дроссельный магнитный усилитель с начальным смещением (подмагничиванием).

а — схема; б — статические характеристики (1 — без начального смещения; 2 — с начальным смещением).

малых значений тока управления I_y , так как этим значениям тока соответствует участок кривой с максимальной крутизной.

Магнитные усилители с начальным смещением в практике применяются редко, потому что при изменении полярности напряжения управления изменяется только абсолютное значение тока в нагрузке, а полярность его не меняется.

Чаще применяются такие МУ, в которых при изменении полярности напряжения управления изменяется не абсолютное значение тока в нагрузке, а его фаза, причем при отсутствии U_y напряжение на выходе усилителя равно нулю. Данные МУ называются реверсивными (двуихтактными).

3-4. РЕВЕРСИВНЫЙ (ДВУХТАКТНЫЙ) МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В реверсивных МУ данного вида при изменении полярности напряжения управления U_y изменяется фаза тока в нагрузке I_H на 180° . Это необходимо, например, при изменении вращения (реверсе) двухфазных двигателей.

Применяются три основных вида схем:

- 1) дифференциальная;
- 2) мостовая;
- 3) трансформаторная.

В качестве примера на рис. 3-7 приведен реверсивный МУ, выполненный по дифференциальной схеме. Он состоит из двух одинаковых нереверсивных ДМУ, которые питаются от трансформатора T_p . Вторичная обмот-

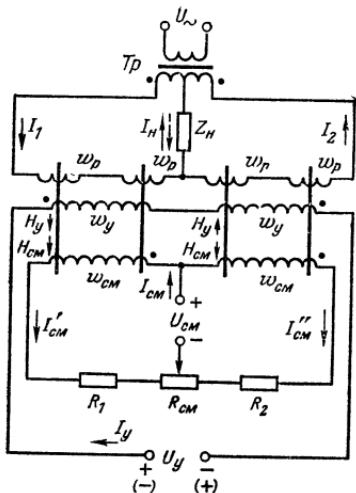


Рис. 3-7. Реверсивный магнитный усилитель, выполненный по дифференциальной схеме.

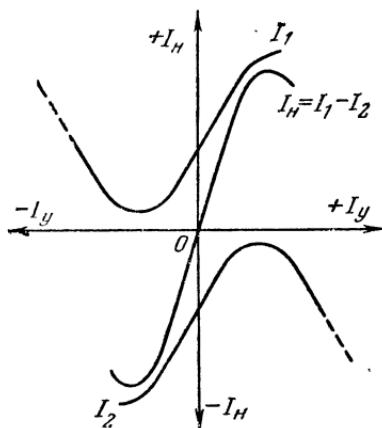


Рис. 3-8. Статическая характеристика реверсивного магнитного усилителя.

ка трансформатора состоит из двух обмоток, имеющих равное число витков. Нагрузка усилителя включена между средней точкой вторичных обмоток трансформатора и средней точкой рабочих обмоток двух нереверсивных МУ. Токи смещения $I'_{\text{см}}$ и $I''_{\text{см}}$, которые протекают по обмоткам смещения $w_{\text{см}}$, создают в нереверсивных МУ начальное смещение (подмагничивание). Обмотки смещения $w_{\text{см}}$ и управления w_y намотаны так, что при подаче напряжения управления U_y напряженности смещения $H_{\text{см}}$ и управления H_y складываются в одном усилителе и вычитаются в другом. При отсутствии напряжения управления ($U_y=0$) сердечники обоих нереверсивных МУ будут одинаково намагниченны за-

счет токов смещения. В этом случае ток в нагрузке I_n , который в общем случае определяется формулой $I_n = I_1 - I_2$, равен нулю, так как выходные токи усилителей I_1 и I_2 равны и направлены навстречу друг другу.

При наличии напряжения управления ($U_y \neq 0$) токи I_1 и I_2 изменяются различным образом. Например, при одной полярности напряжения управления ток I_1 увеличивается, а ток I_2 уменьшается. Если поменять полярность напряжения управления, то ток I_1 будет уменьшаться, а ток I_2 увеличиваться. Следовательно, фаза тока в нагрузке I_n при изменении полярности напряжения управления будет меняться и рассмотренный усилитель будет иметь реверсивную статическую характеристику (рис. 3-8).

3-5. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ВНЕШНЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Внешняя обратная связь в усилителе осуществляется с помощью специальной обмотки обратной связи $w_{o.c}$, на которую подается сигнал с выхода МУ. В этом усилителе насыщение сердечников осуществляется в большей части за счет магнитного поля обмотки обратной связи и в меньшей части за счет магнитного поля обмотки управления.

Внешняя обратная связь выполняется как по току, так и по напряжению.

а) Магнитный усилитель с обратной связью по току

Схема простого магнитного усилителя с обратной связью по току показана на рис. 3-9, а. Выпрямитель, выполненный на диодах $D_1 - D_4$, включен так, что ток обратной связи $I_{o.c}$ имеет одно и то же направление в любой полупериод напряжения источника питания U_\sim . Дополнительное насыщение сердечников МУ осуществляется за счет прохождения тока $I_{o.c}$ через обмотку обратной связи $w_{o.c}$.

Если действие тока $I_{o.c}$ усиливает действие напряжения управления U_y в обмотке управления w_y , т. е. магнитное поле обратной связи направлено согласно с магнитным полем, созданным обмоткой управления, то обратная связь называется положительной. Если же

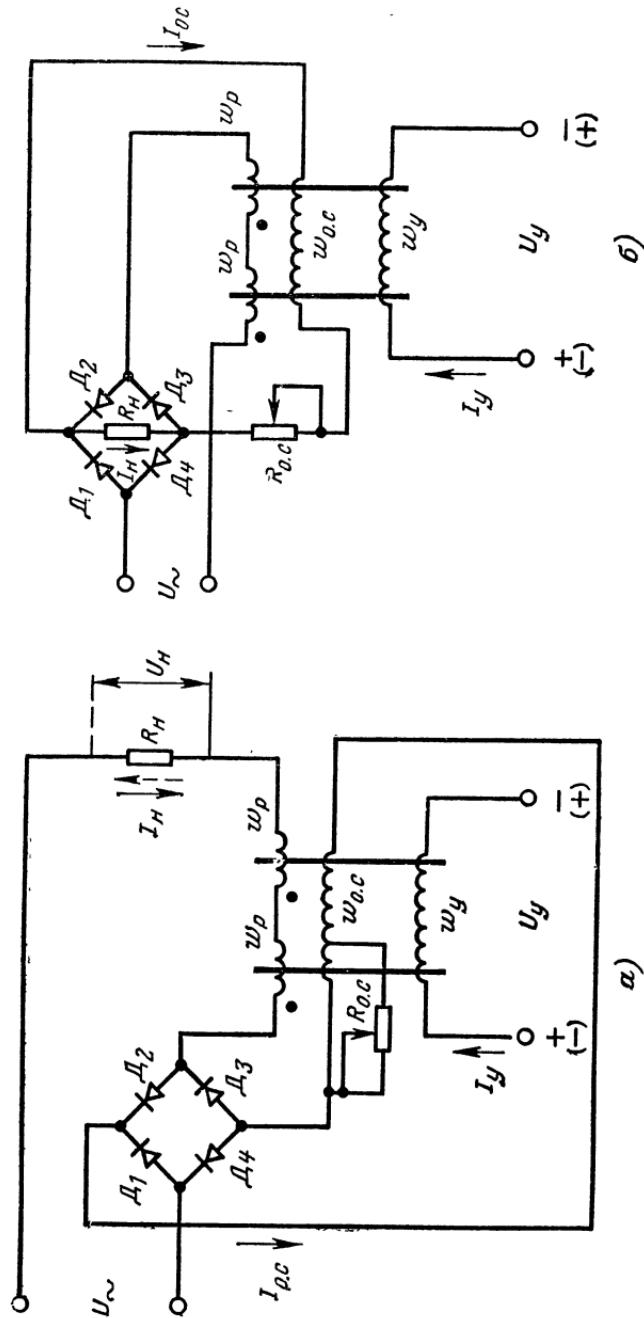


Рис. 3-9. Нереверсивный магнитный усилитель с внешней обратной связью.
а — по току; б — по напряжению.

действие тока $I_{o.c}$ ослабляет действие напряжения U_y в обмотке w_y , то обратная связь называется отрицательной. При одной полярности напряжения управления U_y будет положительная обратная связь, а при другой полярности U_y — отрицательная обратная связь.

В схеме предусмотрена регулировка коэффициента обратной связи с помощью переменного резистора $R_{o.c}$. Данный резистор шунтирует не всю обмотку $w_{o.c}$, а примерно 10—15% ее.

б) Магнитный усилитель с обратной связью по напряжению

На рис. 3-9, б изображена схема МУ с обратной связью по напряжению. Нагрузка R_h включена в одну из диагоналей моста, образованного с помощью диодов $D_1—D_4$. Напряжение с R_h поступает непосредственно на переменный резистор $R_{o.c}$, служащий для регулировки коэффициента обратной связи, и на обмотку $w_{o.c}$. Ток обратной связи $I_{o.c}$ в любой полупериод напряжения U_\sim имеет одно и то же направление (на рис. 3-9, б показано стрелкой).

в) Коэффициент обратной связи

Количественно обратная связь характеризуется коэффициентом обратной связи, который в общем случае можно определить по формуле

$$K_{o.c} = \frac{\Delta H_{o.c}}{\Delta H_{cp}} = \frac{\Delta I_{o.c} w_{o.c}}{l_-} : \frac{\Delta I_{cp} w_p}{l_\sim} = \frac{w_{o.c}}{w_p}, \quad (3-13)$$

где $\Delta H_{o.c} = \Delta I_{o.c} w_{o.c} / l_-$ — приращение напряженности магнитного поля обратной связи;

$\Delta H_{cp} = \Delta I_{cp} w_p / l_\sim$ — приращение среднего значения напряженности магнитного поля переменного тока;

l_- и l_\sim — длины средних магнитных линий для постоянного и переменного потоков (для большинства магнитных усилителей $l_- = l_\sim$);

$\Delta I_{o.c}$ — приращение тока в обмотке обратной связи;

ΔI_{cp} — приращение среднего значения тока в рабочих обмотках.

В формуле (3-13) принято $\Delta I_{o.c} = \Delta I_{cp}$.

г) Влияние обратной связи на коэффициент усиления магнитного усилителя

Основной закон магнитного усилителя с обратной связью можно записать в следующем виде:

$$I_{cp} w_p = I_y w_y \pm I_{o.c} w_{o.c}. \quad (3-14)$$

Знак плюс в формуле (3-14) соответствует положительной обратной связи, а знак минус — отрицательной обратной связи.

Чаще в магнитных усилителях применяется положительная обратная связь. Запишем формулу (3-14) с учетом этой связи:

$$I_{cp} w_p = I_y w_y + I_{o.c} w_{o.c}. \quad (3-15)$$

Будем считать, что $I_{o.c} = I_{cp}$. Тогда формулу (3-15) можно переписать в следующем виде:

$$I_{cp} w_p = I_y w_y + I_{cp} w_{o.c}. \quad (3-16)$$

Из формулы (3-16) найдем значение

$$I_{cp} = \frac{I_y w_y}{w_p - w_{o.c}}. \quad (3-17)$$

Теперь найдем коэффициент усиления по току

$$\begin{aligned} K_{I_{o.c}} &= \frac{I_{cp}}{I_y} = \frac{I_y w_y}{w_p - w_{o.c}} : I_y = \frac{w_y / w_p}{\frac{w_p}{w_p} - \frac{w_{o.c}}{w_p}} = \\ &= \frac{K_I}{1 - K_{o.c}}. \end{aligned} \quad (3-18)$$

Аналогичным путем найдем коэффициент усиления по напряжению:

$$K_{U_{o.c}} = \frac{U_{cp}}{U_y} = \frac{K_U}{1 - K_{o.c}}. \quad (3-19)$$

Коэффициент усиления по мощности $K_{P_{o.c}}$ можно найти путем перемножения коэффициентов $K_{I_{o.c}}$ и $K_{U_{o.c}}$ между собой:

$$K_{P_{o.c}} = K_{I_{o.c}} K_{U_{o.c}} = \frac{K_P}{(1 - K_{o.c})^2}. \quad (3-20)$$

Из выражений (3-18)–(3-20) следует, что при $K_{o.c} \rightarrow 1$ положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления до бесконечности (при идеаль-

ных ферромагнитных сердечниках и вентилях). Особен-
но быстро растет коэффициент усиления по мощности
 $K_{\text{п.о.с.}}$.

д) Статические характеристики магнитного усилителя с обратной связью

Если известна статическая характеристика МУ без об-
ратной связи и угол наклона линии положительной об-
ратной связи $\gamma = \arctg K_{\text{п.о.с.}}$, то можно графическим пу-
тем построить статическую характеристику МУ с обрат-
ной связью. На рис. 3-10 дано такое графическое

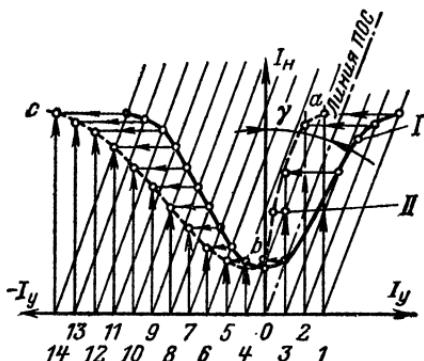


Рис. 3-10. Графическое построение статической характеристики нереверсивного магнитного усилителя с обратной связью.

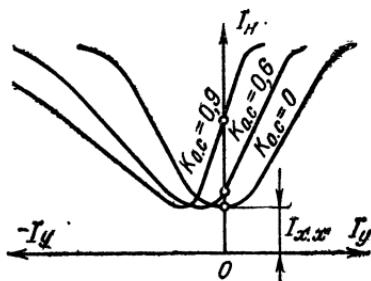


Рис. 3-11. Статические характеристики реального магнитного усилителя с обратной связью.

построение. Для этого из ряда точек на оси абсцисс (1, 2, 3,..., 14) проводят прямые, параллельные линии ПОС, до пересечения с характеристикой МУ без обратной связью (кривая I). Точки пересечения сносят на соответствующие вертикали. Полученные новые точки соединяют плавной кривой и получают статическую характеристику МУ с обратной связью (кривая II), которая является несимметричной относительно оси ординат. Так, участок ab соответствует положительной обратной связи, а участок bc отрицательной обратной связи. Следует отметить, что подобное построение дает хорошие результаты только до значения $K_{\text{п.о.с.}} = 0,8 \div 0,9$.

На рис. 3-11 приведены статические характеристики реального МУ с обратной связью. Из рисунка видно, что

с ростом коэффициента обратной связи $K_{o.c}$ статические характеристики усилителя смещаются влево и ток в нагрузке I_h при $U_y=0$ не равен току холостого хода $I_{x.h}$, а растет с увеличением $K_{o.c}$.

3-6. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ВНУТРЕННЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Внутренняя обратная связь в МУ может быть выполнена путем включения выпрямителя последовательно с рабочей обмоткой усилителя w_p . В МУ с внутренней обратной связью рабочая обмотка выполняет также и функции обмотки обратной связи.

На рис. 3-12 изображена схема простейшего МУ с внутренней обратной связью. При подаче на схему напряжения питания U_\sim по рабочей цепи потечет выпрямленный ток I_h , постоянная составляющая которого будет намагничивать сердечник.

Коэффициент обратной связи для усилителей с внутренней обратной связью можно определить по формуле

$$K_{o.c} = \frac{\Delta H_{o.c}}{\Delta H_{cp}} = 1. \quad (3-21)$$

Схема магнитного усилителя, выполненная на одном сердечнике, применяется редко. Чаще в практике применяется схема МУ с внутренней обратной связью на двух сердечниках.

На рис. 3-13, а приведена схема МУ с внутренней обратной связью с выходом на переменном токе. Рабочие обмотки w_p в усилителе включены параллельно. Схема работает следующим образом. В течение одного полупериода напряжения питания U_\sim ток I_h протекает через нагрузку R_h , выпрямитель B_2 и правую рабочую обмотку w_p . В течение другого полупериода напряжения питания ток I_h протекает через левую рабочую обмотку w_p , выпрямитель B_1 и нагрузку R_h . Направление тока в нагрузке I_h в течение каждого полупериода напряжения питания меняется. По рабочим обмоткам w_p протекает выпрямленный ток, который создает в них магнитный поток обратной связи. Если магнитный поток будет направлен согласно с магнитным потоком напряжения управления, то в схеме будет положительная обратная связь. При изменении полярности напряжения управле-

ния в схеме будет действовать отрицательная обратная связь.

Для регулировки $K_{o.c}$ параллельно рабочим обмоткам подключен переменный резистор $R_{o.c}$. Если значение $R_{o.c}$ уменьшается, то уменьшается коэффициент усиления МУ.

На рис. 3-13, б приведена схема МУ с внутренней обратной связью с выходом на постоянном токе. Нагрузка R_H включена в диагональ моста, образованного выпрямителями $B_1—B_4$ и рабочими обмотками w_p . Ток в нагрузке I_H в любой полупериод питающего напряжения U_\sim протекает в одном направлении. Магнитный поток обратной связи создается за счет выпрямленного тока.

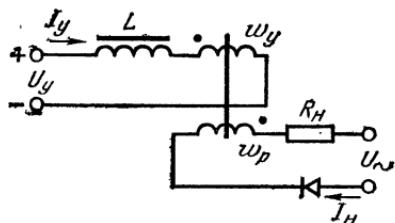


Рис. 3-12. Простейший магнитный усилитель с внутренней обратной связью.

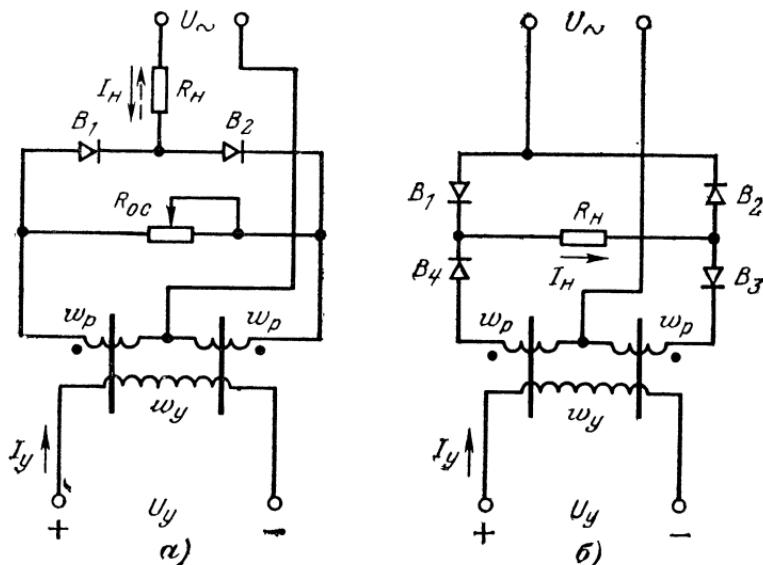


Рис. 3-13. Нереверсивные магнитные усилители с внутренней обратной связью.

а — с выходом на переменном токе; б — с выходом на постоянном токе.

3-7. РЕВЕРСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Данные усилители применяются в тех случаях, когда необходимо получить большие значения коэффициентов усиления и выходных мощностей. В настоящее время разработано большое количество схем реверсивных МУ с обратной связью, некоторые из них будут рассмотрены ниже.

а) Реверсивный магнитный усилитель с внешней обратной связью

На рис. 3-14, а изображена схема такого усилителя. В качестве нагрузки используются обмотки управления следующего каскада усилителя R_{h1} и R_{h2} . При отсутствии напряжения управления ($U_y=0$) выпрямленные токи I_{h1} и I_{h2} равны между собой. В этом случае условный ток в нагрузке I_h , который определяется по формуле $I_h = I_{h1} - I_{h2}$, равен нулю. Если токи I_{h1} и I_{h2} не равны между собой, то с помощью переменного резистора R_{cm} регулируются токи I'_{cm} и I''_{cm} до тех пор, пока токи I_{h1} и I_{h2} не будут равны. При подаче напряжения управления ($U_y \neq 0$) напряженности смещения H_{cm} и управления H_y в одном нереверсивном МУ складываются, а в другом нереверсивном усилителе — вычитаются. В этом случае ток в нагрузке I_{h1} левого нереверсивного усилителя возрастает, а ток в нагрузке I_{h2} правого нереверсивного усилителя уменьшается. Это приводит к появлению условного тока в нагрузке I_h . При перемене полярности напряжения управления ток в нагрузке I_{h1} левого усилителя уменьшается, а ток в нагрузке I_{h2} правого усилителя возрастает, в результате чего изменяется направление результирующего магнитного потока на 180° , а это в свою очередь приводит к изменению полярности условного тока в нагрузке I_h .

б) Реверсивный магнитный усилитель с внутренней обратной связью

Эти усилители, как правило, выполняются путем дифференциального включения выходов двух одинаковых нереверсивных МУ. На рис. 3-14, б приведена одна из типичных схем таких усилителей. Ток в нагрузке I_h равен разности токов I_1 и I_2 нереверсивных МУ.

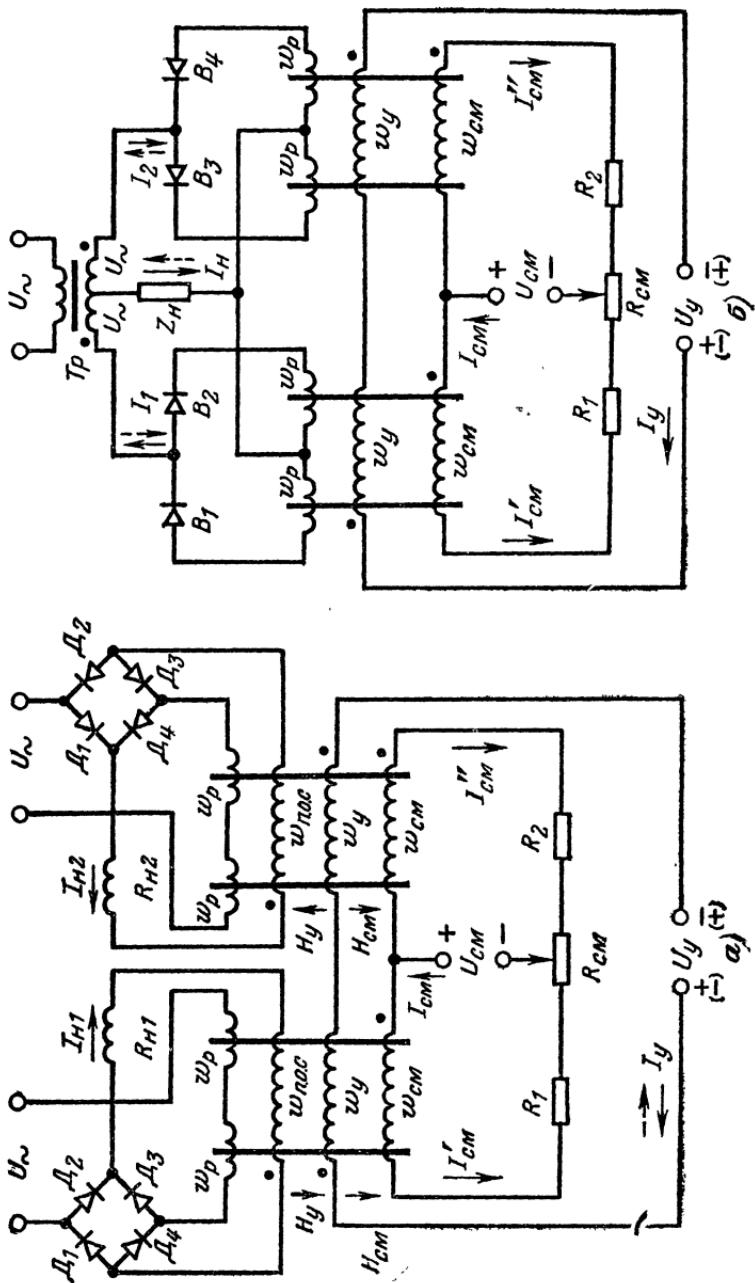


Рис. 3-14. Реверберационные магнитные усилители с обратной связью.
 a — с внешней; b — с внутренней.

3-8. МНОГОКАСКАДНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Они состоят из однокаскадных усилителей, которые соединяются между собой таким образом, что нагрузкой предыдущего каскада МУ является обмотка управления последующего каскада.

Если полярность входного сигнала $U_{\text{вх}}$ многокаскадного усилителя не должна изменяться и можно также допустить протекание по нагрузке тока холостого хода, то для построения такого усилителя применяются нереверсивные МУ.

Многокаскадные МУ чаще всего применяются в следящих системах, в которых обычно используются двух- и трехкаскадные МУ. Иногда применяются четырех- и пятикаскадные МУ.

По сравнению с однокаскадными МУ в многокаскадных можно повысить усиление, добротность и стабильность характеристик усилителя, а также уменьшить габариты и массу. В качестве примера на рис. 3-15 приведена схема трехкаскадного нереверсивного МУ.

Первые два каскада выполнены на магнитных усилителях с выходом на постоянном токе, а последний каскад — с выходом на переменном токе. В первых двух каскадах применяется внешняя обратная связь, а в последнем каскаде — внутренняя обратная связь. Развязывающие емкости C_1 и C_2 включены параллельно управляющим обмоткам MU_2 и MU_3 . Они предназначены, чтобы улучшать линейность характеристики усилителя и повышать выходную мощность предыдущего каскада, так как компенсируют индуктивность его нагрузки. При отсутствии этих емкостей напряжения четных гармоник, индуцируемые в обмотках управления w_y второго и третьего каскадов, будут выпрямляться выпрямителями предыдущих каскадов, что в свою очередь приведет к нарушению нормальной работы усилителя. В схеме рис. 3-15 во всех трех каскадах регулирование величины смещения осуществляется с помощью резисторов $R_1—R_3$.

Если полярность входного сигнала $U_{\text{вх}}$ многокаскадного усилителя изменяется, то для построения многокаскадного усилителя используются однокаскадные реверсивные МУ.

В заключение следует сказать, что дополнительные данные о многокаскадных МУ можно найти в [61, 82, 105].

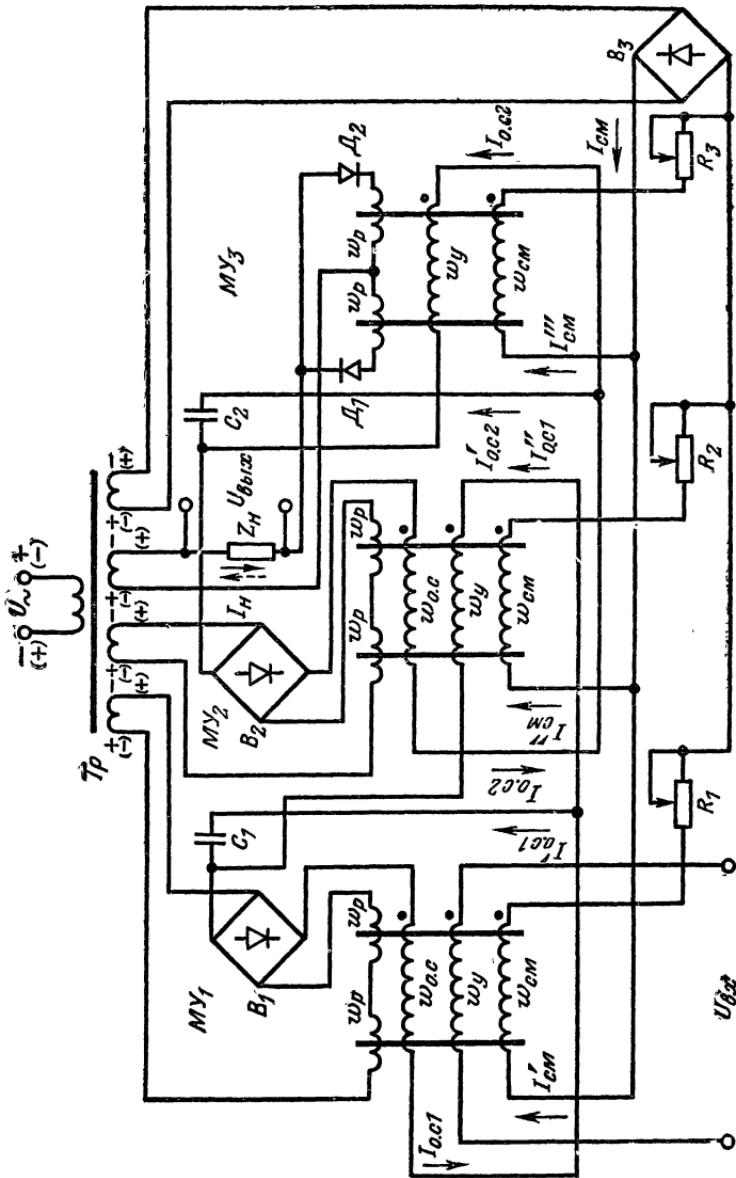


Рис. 3.15. Трехкаскадный нереверсивный магнитный усилитель.

3-9. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

а) Общие сведения и основные характеристики

Электромашинные усилители (ЭМУ) так же, как и МУ, позволяют с помощью малых мощностей управлять относительно большими мощностями. Примером простейшего ЭМУ является обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением, схема которого изображена на рис. 3-16, а. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ подается в цепь обмотки возбуждения, состоящей обычно из самой обмотки возбуждения OB и резистора $R_{\text{в}}$. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается с зажимов якоря генератора и подается на нагрузку $R_{\text{н}}$. В качестве нагрузки обычно используется цепь якоря исполнительного двигателя с независимым возбуждением.

Электромашинный усилитель получает энергию от постороннего источника. Таким источником является двигатель M , который вращает с постоянной частотой n якорь генератора.

Одним из основных параметров ЭМУ является коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{в}}} = \frac{U_{\text{вых}} I_{\text{н}}}{U_{\text{вх}} I_{\text{в}}}, \quad (3-22)$$

который показывает, во сколько раз мощность нагрузки $P_{\text{н}}$ больше мощности возбуждения $P_{\text{в}}$. Обычно K_P для генераторов постоянного тока лежит в пределах от 50 до 100, что является для ЭМУ недостаточным. Поэтому рассмотренный генератор постоянного тока почти не применяется в качестве ЭМУ, так как имеет низкий коэффициент усиления и, кроме того, имеет большую инерционность системы, которая обусловлена значительным значением индуктивности цепи возбуждения и особенностями конструкции магнитной системы генератора. Инерционность проявляется тем, что ток нагрузки $I_{\text{н}}$ начинает изменяться спустя некоторое время после изменения тока возбуждения $I_{\text{в}}$.

Зависимость выходного напряжения генератора от тока возбуждения показана на рис. 3-16, б. В начальной части характеристика линейна, а при больших значениях тока $I_{\text{в}}$, т. е. когда магнитная система генератора насыщена, линейность характеристики нарушается и она становится более пологой.

Характеристика имеет вид узкой петли, нижняя часть петли соответствует выходному напряжению $U_{\text{вых}}$ при нарастании тока возбуждения I_B , а верхняя часть петли соответствует $U_{\text{вых}}$ при уменьшении тока I_B .

В зависимости от системы возбуждения ЭМУ можно разделить на ЭМУ продольного поля и ЭМУ поперечно-

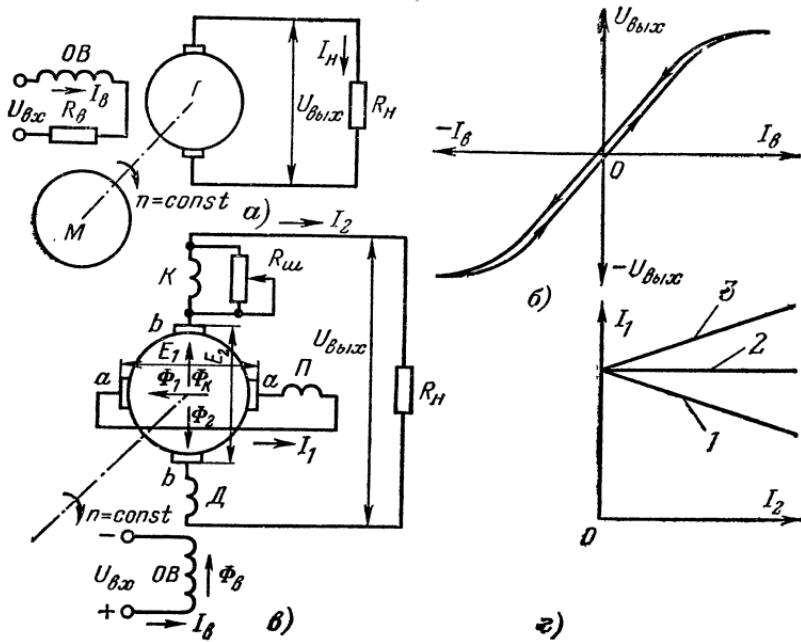


Рис. 3-16. Электромашинные усилители.

a — генератор постоянного тока с независимым возбуждением; *б* — характеристика генератора; *в* — с поперечным магнитным полем; *г* — режимы работы.

го поля. В первых основной поток возбуждения направлен по продольной оси машины (вдоль полюсов), а во вторых — по поперечной оси.

Для увеличения коэффициента усиления в ЭМУ можно применить две, а иногда и три ступени усиления.

К основным параметрам ЭМУ можно также отнести постоянную времени цепи возбуждения T_B , которая характеризует его быстродействие

$$T_B = \frac{L_B}{R'_B}, \quad (3-23)$$

где L_B — значение индуктивности обмотки возбуждения;
 $R'_B = r_B + R_B$ — активное сопротивление цепи возбуждения (r_B — активное сопротивление обмотки возбуждения).

Обычно постоянная времени выходной ступени ЭМУ равна от 0,02 до 0,2 с. Следует заметить, что с ростом коэффициента усиления K_P возрастает и постоянная времени T_B .

Для сравнения ЭМУ между собой вводят понятие коэффициента добротности

$$K_d = \frac{K_P}{T_B}. \quad (3-24)$$

б) Устройство, принцип действия и область применения ЭМУ с поперечным магнитным полем

Наибольшее распространение в автоматике, например в следящих системах, получил ЭМУ с поперечным магнитным полем, представляющий собой генератор постоянного тока с независимым возбуждением, у которого основное электромагнитное поле не продольное, а поперечное. Основное отличие ЭМУ с поперечным магнитным полем от ЭМУ с продольным магнитным полем заключается в том, что первый имеет дополнительную пару щеток, которые обычно замыкаются накоротко, и в нем используется поперечный поток реакции якоря. Электрическая и конструктивная схемы ЭМУ с поперечным магнитным полем приведены на рис. 3-16, в. На коллекторе генератора расположены два комплекта щеток: *aa* и *bb*. Щетки *aa*, выполняющие в генераторе роль основных щеток, замкнуты накоротко, а к щеткам *bb* присоединена нагрузка R_B . Иногда для улучшения коммутации в поперечную цепь включают обмотку подмагничивания P (рис. 3-16, в).

При подаче небольшого по величине входного напряжения $U_{\text{вх}}$ на обмотку возбуждения *OB* (ось обмотки совпадает с продольной осью генератора) в генераторе создается небольшой продольный магнитный поток возбуждения Φ_B , пронизывающий витки обмотки якоря, врачающегося с постоянной частотой n от асинхронного двигателя. В результате этого в поперечной цепи якоря индуцируется ЭДС E_1 , снимаемая щетками *aa*. Поперечная цепь якоря имеет малое сопротивление, поэтому по ней протекает значительный ток I_1 . Ток I_1 вызывает маг-

нитный поток Φ_1 , образуемый поперечной цепью обмотки якоря и совпадающий по направлению с поперечной осью генератора. Этот поток во много раз больше магнитного потока возбуждения Φ_b . Под действием магнитного потока Φ_1 в продольной цепи якоря индуцируется ЭДС E_2 , снимаемая щетками bb . Эта ЭДС вызывает появление тока I_2 , под действием которого в якоре создается продольный магнитный поток реакции якоря Φ_2 . Магнитный поток Φ_2 во много раз больше потока возбуждения Φ_b и эти потоки направлены навстречу друг другу. В результате этого магнитный поток Φ_2 размагничивает генератор, т. е. он создает как бы эффект внутренней отрицательной обратной связи. Если не принять никаких мер по уменьшению магнитного потока реакции якоря Φ_2 , то может наступить момент, когда ЭМУ полностью размагнитится и усиления не будет. Чтобы этого не случилось, на статоре ЭМУ располагают компенсационную обмотку K , которую включают в продольную цепь якоря последовательно с якорной обмоткой и нагрузкой R_n . Обмотка K выполняется из толстого провода. С помощью этой обмотки образуется магнитный поток Φ_k , компенсирующий магнитный поток Φ_2 . Для изменения значения потока Φ_k , т. е. степени компенсации потока Φ_2 , параллельно обмотке K включен переменный резистор (шунт) R_{sh} .

Степень компенсации ЭМУ характеризуется коэффициентом компенсации

$$K = \frac{F_k}{F_2}, \quad (3-25)$$

где $F_k = I_2 w_k$ — МДС компенсационной обмотки (w_k — число витков компенсационной обмотки);

$F_2 = I_2 w_p$ — МДС параллельной ветви обмотки якоря (w_p — число витков в параллельной ветви обмотки якоря).

Электромашинный усилитель может работать в одном из трех режимов:

1) $K=1$ ($F_k=F_2$) — усилитель работает в скомпенсированном режиме (рис. 3-16, g , прямая 2). В этом случае потоки Φ_k и Φ_2 равны между собой;

2) $K < 1$ ($F_k < F_2$) — усилитель работает в недокомпенсированном режиме (рис. 3-16, g , прямая 1). Поток $\Phi_k < \Phi_2$ и результирующий магнитный поток, равный разности Φ_k и Φ_2 , направлен встречно потоку Φ_b ;

3) $K > 1$ ($F_k > F_2$) — усилитель работает в перекомпенсированном режиме (рис. 3-16, г, прямая 3) и результирующий магнитный поток совпадает по направлению с потоком Φ_b .

Следует иметь в виду, что даже небольшой сдвиг попреречных щеток aa с нейтрали изменяет режим работы ЭМУ. В следящих системах, как правило, используют ЭМУ, которые работают в недокомпенсированном режиме. Это достигается небольшим сдвигом щеток aa с нейтрали по направлению вращения якоря на угол $1—3^\circ$. При этом несколько снижается коэффициент усиления ЭМУ, но обеспечивается устойчивая работа ЭМУ в следящей системе. Небольшой предварительный сдвиг щеток aa от нейтрали устраняет опасность того, что ЭМУ со временем окажется перекомпенсированным, а это в свою очередь может привести к самовозбуждению усилителя. Для улучшения коммутации в продольную цепь якоря (см. рис. 3-16, в) включена обмотка дополнительных полюсов D .

В ЭМУ с попреречным магнитным полем можно получить коэффициент усиления по мощности, равный $10^3—10^5$. Такой высокий коэффициент усиления по мощности получается в результате того, что ЭМУ с попреречным полем представляет собой двухкаскадный усилитель. Первый каскад включает обмотку возбуждения OB и короткозамкнутую цепь попреречных щеток aa , а второй каскад — короткозамкнутую цепь попреречных щеток aa и выходную цепь продольных щеток bb .

Общий коэффициент усиления по мощности равен:

$$K_p = K_{P_1} K_{P_2}, \quad (3-26)$$

где $K_{P_1} = \frac{U_1 I_1}{U_{\text{вх}} I_{\text{в}}}$ — коэффициент усиления по мощности первого каскада;

$K_{P_2} = \frac{U_{\text{вых}} I_2}{U_1 I_1}$ — коэффициент усиления по мощности второго каскада.

Электромашинные усилители широко применяются в автоматических системах регулирования. Наибольшее распространение получили ЭМУ с попреречным магнитным полем, так как имеют ряд достоинств: большой коэффициент усиления по мощности, широкие пределы изменения мощности, малая входная мощность, малые постоянные времени цепей (от сотых до десятых долей се-

кунды), достаточная надежность и необходимая долговечность. К недостаткам ЭМУ относятся: большие габариты и масса по сравнению с генераторами постоянного тока той же мощности, наличие остаточного напряжения за счет гистерезиса. Чаще всего они применяются в системах ЭМУ — двигатель, в которых электромашинный усилитель используется в качестве генератора, питающего исполнительный двигатель.

3-10. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

а) Основные сведения

Гидравлические усилители — это устройства, которые усиливают сигнал по мощности, служащий для управления регулируемыми дросселями, насосами, клапанами или гидродвигателями. Эти усилители осуществляют управление расходом жидкости за счет изменения площади щели. Изменяя площадь щели, можно получить желаемое соотношение между расходом жидкости, проходящей через щель, и перепадом давлений на ней. Расход жидкости через щель можно определить по формуле

$$Q = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (3-27)$$

где μ — коэффициент расхода;

F — поперечная площадь щели;

ΔP — перепад давлений на щели;

ρ — плотность жидкости.

Коэффициент расхода μ изменяется от размеров, конфигурации щели и характеристик жидкости.

Гидроусилители являются неотъемлемой частью систем гидроприводов. Они преобразуют и усиливают малые входные сигналы до значений, необходимых для управления мощными гидродвигателями.

Иногда для управления гидродвигателями применяют однокаскадные гидравлические усилители. В этих усилителях входной сигнал подается непосредственно на регулятор. В качестве регулятора могут быть использованы: струйная трубка, золотник и сопло-заслонка. Для управления более мощными гидродвигателями применяются двух-, трех- и более каскадные усилители.

В настоящем параграфе будут рассмотрены некоторые схемы гидравлических усилителей.

б) Струйные гидравлические усилители

В этих усилителях происходит преобразование давления жидкости в кинетическую энергию струи, а затем энергия струи обратно превращается в давление. Принцип работы струйных гидравлических усилителей основан на отклонении высокоскоростного потока жидкости от приемного сопла. Данные усилители можно разделить на две группы: усилители со стационарной струей (в струю вводится заслонка) и усилители с поворотной струей или усилители со струйной трубкой.

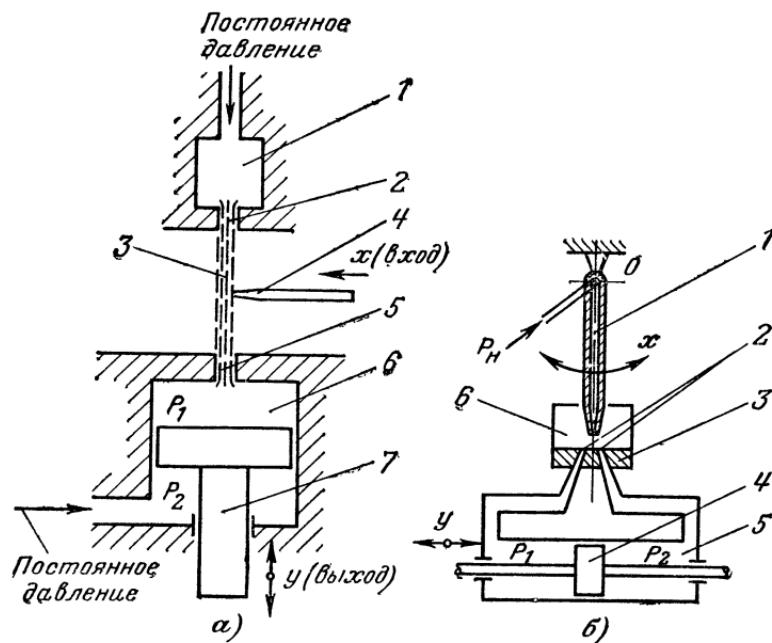


Рис. 3-17. Струйные гидравлические усилители.

а — со стационарной струей; *б* — с поворотной струей (со струйной трубкой).

На рис. 3-17, *а* приведен струйный гидравлический усилитель со стационарной струей. При вытекании жидкости из камеры 1 через выпускное сопло 2 образуется струя 3, которая направляется через воздушное пространство в приемное сопло 5. Между выпускным и приемным соплами на одинаковом расстоянии друг от друга

га помещается заслонка 4 с острыми кромками, выполняющая роль управляющего органа гидравлического усилителя. Если конец заслонки 4 не введен в поток жидкости, то поршень 7, расположенный в полости двигателя 6, не перемещается, так как давление P_1 равно давлению P_2 . Если конец заслонки 4 вводится в поток жидкости (на рис. 3-17, а показано стрелкой), то струя 3 отклоняется от приемного сопла 5 и поршень 7 начинает перемещаться вверх, так как давление P_1 становится меньше давления P_2 .

Следует помнить, что правильная работа гидравлического усилителя зависит от того, насколько ровно течет струя жидкости. Для того чтобы струя жидкости текла ровно, большое внимание при изготовлении усилителя уделяется поверхности и форме выпускного сопла 2. Обычно такие усилители работают при низком давлении.

Усилитель с поворотной струей или усилитель со струйной трубкой показан на рис. 3-17, б. Роль управляющего органа выполняет струйная трубка 1, которая может поворачиваться вокруг точки вращения O . Струйная трубка представляет собой трубку с коническим насадком на конце. Напротив насадка располагается плита 3, имеющая два приемных сопла 2. При повороте струйной трубы (перемещение трубы является входной величиной x) большая часть струи жидкости, попадая, например, в левое приемное сопло, увеличивает в нем давление и поршень 4 будет перемещаться в полости цилиндра 5 слева направо, так как давление P_1 в левой полости цилиндра больше, чем давление P_2 . В этом случае жидкость из правой полости цилиндра будет сливаться под колпачок 6 через правое приемное сопло.

Если струйную трубку перемещать в обратную сторону, то давление P_2 становится больше давления P_1 и поршень будет перемещаться в полости цилиндра справа налево. При равенстве давлений P_1 и P_2 поршень не перемещается.

Давление нагнетания P_n обычно не превышает $9,81 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ (10 кгс/см^2). Основное достоинство усилителя со струйной трубкой состоит в том, что он может работать даже и на слабоочищенных жидкостях.

К основным недостаткам усилителя со струйной трубкой следует отнести неполное использование мощности потока рабочей жидкости в результате потерь между на-

садком и приемными соплами 2 и небольшие значения давления питания. Струйные гидравлические усилители широко применяются в авиационных гидравлических приводах, а также в системах промышленной автоматики.

в) Золотниковые гидравлические усилители

На рис. 3-18, *a* приведена одна из схем золотниковых гидравлических усилителей, которые применяются для управления рулями самолета. Усилитель имеет поршень 4, который помещен в жестко закрепленный на корпусе самолета гидравлический цилиндр 3 и цилиндрический золотник 1 (в усилителе выполняет роль управляющего органа).

Если давления P_1 и P_2 в полостях равны, то золотник не перемещается, в этом случае он занимает положение, указанное на рис. 3-18, *a*. Если золотник сместить, например, вправо, то жидкость из полости нагнетания 2 золотника по каналу 5 поршня начнет перетекать в полость с давлением P_1 . В результате этого давление P_1 становится больше давления P_2 и поршень начинает перемещаться вправо, вытесняя жидкость по каналам 7 и 8 поршня из полости с давлением P_2 в сливную магистраль 6. Движение поршня продолжается до тех пор, пока он не займет среднего положения относительно золотника. Если золотник 1 сместить влево, то жидкость из полости нагнетания 2 золотника по каналу 7 поршня начнет перетекать в полость с давлением P_2 . В результате этого давление P_2 увеличивается и поршень 4 начинает перемещаться влево, вытесняя жидкость из полости с давлением P_1 по каналу 5 поршня в сливную магистраль 6. Следует отметить, что всякое смещение золотника 1 вызывает такое же смещение поршня 4. При смещении золотника 1 требуются небольшие усилия — от 2 до 100 Н, а поршень при этом преодолевает большие усилия, равные от 200 до 20 000 Н, т. е. усилие данного гидравлического усилителя равно 100—200.

г) Дроссельные гидравлические усилители типа сопло — заслонка

В качестве управляющего органа в дроссельных гидравлических усилителях используется сопло — заслонка, имеющая перед струйной трубкой основное преимущество — отсутствует ограничение давления нагнетания.

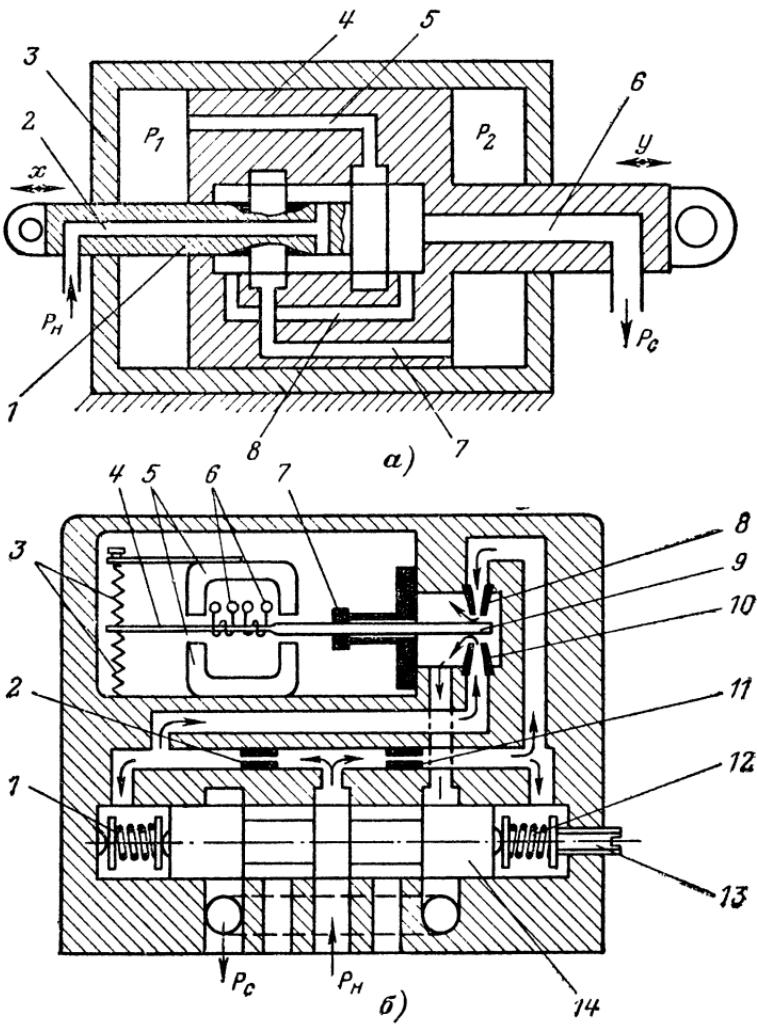


Рис. 3-18. Гидравлические усилители.

а — золотниковый; б — дроссельный.

Следует отметить, что значение давления нагнетания в гидравлических усилителях с симметричным расположением сопл ограничивается только значением непроизводительного расхода жидкости через переменные дроссели¹.

В настоящее время разработано большое количество дроссельных гидравлических усилителей с управляющим органом типа сопло — заслонка. В промышленных гидравлических системах, а также в авиационной технике чаще всего применяются двухщелевые дроссельные гидравлические усилители типа сопло — заслонка и реже одноЛщелевые.

На рис. 3-18, б приведена схема двухщелевого дроссельного гидравлического усилителя. Усилитель состоит из четырехщелевого золотника 14, устанавливаемого в среднее положение с помощью пружин 1 и 12. Регулировка положения золотника производится винтом 13. Заслонка 9 жестко связана с якорем 4 электромеханического преобразователя, состоящего также из магнитопроводов 5, обмоток 6 и пружин 3, с помощью которых якорь 4 удерживается в среднем положении при отсутствии сигнала, подаваемого на обмотки 6. Уплотнение 7 предохраняет электромеханический преобразователь от попадания масла, поступающего через сопла 8 и 10.

При отсутствии сигнала или при подаче одинаковых сигналов на обмотки 6 преобразователя якорь 4 находится в среднем положении, т. е. заслонка 9 находится на одинаковом расстоянии от сопл 8 и 10, представляющих собой вместе с заслонкой 9 переменные дроссели. В этом случае благодаря наличию постоянных дросселей 2 и 11 давление на торцах золотника 14 будет одинаковым и золотник не перемещается. Если подать различные по значению сигналы на обмотки 6, то за счет результирующей силы якорь 4 и заслонка 9 смещаются от нейтрального положения, например, вверх. В результате этого давление на правом торце золотника 14 будет больше, чем давление на левом торце золотника, потому что сопротивление дросселя 8 больше, чем сопротивление дросселя 10. Переход давлений на торцах золотника вызывает усилие, которое смещает золотник влево.

При переносе знака разности токов в обмотках преобразователя якорь и заслонка смещаются вниз и золотник смещается вправо. Следовательно, каждому смещению положения заслонки будет соответствовать определенное смещение золотника от нейтрального положения.

Максимальное перемещение золотника определяется жесткостью пружин 1 и 12, а также максимальным перепадом давления на его торцах.

Основными достоинствами двухщелевых дроссельных гидравлических усилителей являются эксплуатационная надежность и простота регулировки.

¹ Дроссели служат для регулирования расхода жидкости путем изменения значения проходного сечения щели. Они делятся на постоянные, регулируемые (вручную) и переменные. Примерами постоянных дросселей являются жиклер и капилляр, примерами регулируемых дросселей — конус — цилиндр и конус — конус, а примерами переменных дросселей являются сопло — заслонка и шарик — цилиндр. В электрических схемах аналогами дросселей являются резисторы.

Основным недостатком данного усилителя является небольшое быстродействие, так как наличие пружин уменьшает возможную скорость перемещения золотника. Поэтому в гидравлических системах, в которых требуется высокое быстродействие, вместо синхронизирующих пружин применяются обратные связи [102].

3-11. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

В пневматических усилителях рабочим телом является сжатый воздух и только иногда инертный газ. Воздух не требует трубопроводов для линии возврата, так как его можно выпускать в атмосферу. Пневматические усилители получили широкое распространение благодаря тому, что при изменении температуры физические свойства воздуха изменяются мало. Кроме того, воздух взрыво- и пожаробезопасен, а также не подвержен радиационным и магнитным воздействиям. Пневматические усилители просты в изготовлении, дешевы и надежно работают при высоких и низких температурах.

К основным недостаткам этих усилителей следует отнести запаздывание передачи сигнала и повышенные требования к осушке и очистке воздуха. Скорость передачи сигнала в пневматических усилителях почти равна скорости звука, в то время как электрический сигнал в электронных и полупроводниковых усилителях передается со скоростью, близкой к скорости света. Пневматические усилители применяются в полосе низких частот (до сотен, тысяч герц).

Пневматические усилители делятся на три класса: поршневые, мембранные и струйные.

а) Поршневые пневматические усилители

Поршневые пневматические усилители применяются в автоматике для больших выходных мощностей и перемещений. К этим усилителям можно отнести: поршневые усилители с управлением типа сопло — заслонка и от струйной трубы.

На рис. 3-19, а приведена схема поршневого пневматического усилителя с управлением типа сопло — заслонка [46]. При нейтральном положении заслонки 4 поршень 6 не передвигается, потому что давления в обеих полостях цилиндра 5 P_1 и P_2 равны (усилия, создаваемые соплами 3 и 7 на заслонку 4, одинаковы). При перемещении заслонки 4, например, вниз давление P_2 возра-

стает и поршень 6 передвигается вверх. Дроссели 1 и 2 являются дросселями постоянного сечения и выполняют роль пневматических сопротивлений.

Схема поршневого пневматического усилителя с управлением от струйной трубы изображена на рис. 3-19, б. Воздух под давлением нагнетания P_H поступает через струйную трубку 1 в приемные сопла 2 и 3. Если струйная трубка 1 расположена строго посередине сопл 2 и 3, то в полостях цилиндра 4 давления P_1 и P_2 равны

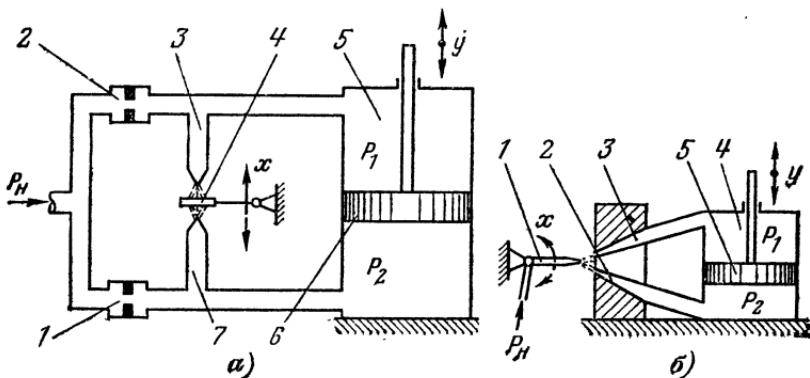


Рис. 3-19. Поршневые пневматические усилители.

а — с управлением типа сопло — заслонка; *б* — с управлением от струйной трубы.

между собой и поршень 5 не перемещается. При перемещении трубы 1, например, вверх большая часть струи будет проходить через приемное сопло 3 и меньшая часть струи — через приемное сопло 2. В этом случае давление P_1 возрастает, а давление P_2 уменьшается, поршень 5 перемещается вниз.

б) Мембранные пневматические усилители

Мембранные пневматические усилители применяются в автоматике для небольших выходных мощностей и перемещений. Они более просты по конструкции, в них применяется гибкая металлическая или резиновая мембрана.

На рис. 3-20 приведена схема трехмембранного пневматического усилителя. Если командный сигнал не подан ($P_{ком}=0$), то жесткий центр 7 под действием усилия пружины 8 и усилия, создаваемого входным давлением

$P_{вх}$ за счет разности эффективных площадей мембран 3 и 2, занимает крайнее верхнее положение.

Для нашего примера эффективную площадь, например, для мембранны 1 можно определить по формуле

$$S_{\text{эфф}1} = \frac{\pi}{12} (D_1^2 + d_1^2 + D_1 d_1),$$

где D_1 и d_1 — соответственно диаметры заделки и жесткого центра.

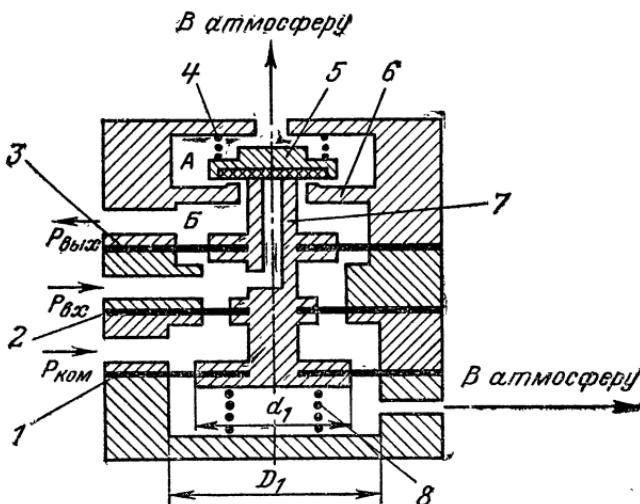


Рис. 3-20. Трехмембранный пневматический усилитель.

Из приведенного выражения видно, что с увеличением диаметра жесткого центра d_1 (при неизменном диаметре заделки D_1) значение $S_{\text{эфф}1}$ возрастает. При этом клапан 5 с эластичной накладкой, который плотно прижат к соплу жесткого центра пружиной 4, закрывает выход входному давлению $P_{вх}$. Выход усилителя в этот момент через камеры Б и А сообщен с атмосферой.

При подаче командного сигнала ($P_{ком} \neq 0$) жесткий центр 7 за счет разности эффективных площадей мембран 1 и 2 перемещается вниз. В этом случае клапан 5 под действием пружины 4 следует за жестким центром до тех пор, пока клапан 5 не сядет на неподвижное сопло 6. В этот момент прекращается связь выхода усилителя с атмосферой. При дальнейшем перемещении жесткого

центра 7 вниз сжатый воздух со входа усилителя через отверстие в жестком центре попадает в камеру *Б* и затем на выход усилителя.

После снятия или уменьшения давления $P_{\text{ком}}$ жесткий центр под действием пружины 8 перемещается вверх.

В автоматике применяются также мембранные усилители с игольчатым управлением и с управляемым устройством типа сопло — заслонка [46].

в) Струйные пневматические усилители

В настоящее время в технике широко применяются струйные пневматические усилители. Принцип действия этих усилителей так же, как и других струйных элементов, основан на использовании гидроаэродинамического эффекта, получаемого при взаимодействии струй между собой или при обтекании струями стенок элементов. В струйных усилителях мощная струя рабочей среды (воздуха или гелия), выходящая из неподвижного жестко закрепленного насадка, отклоняется от исходного

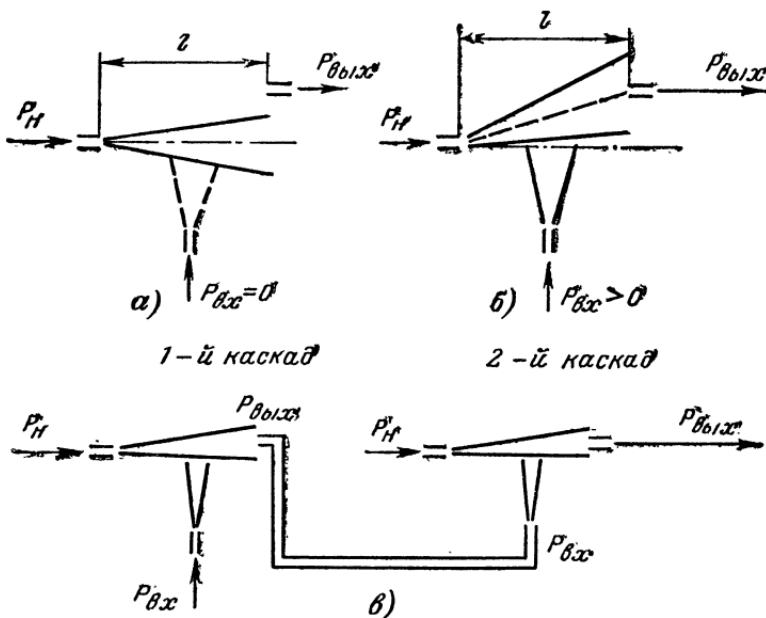


Рис. 3-21. Струйные пневматические усилители.

а — схема простейшего однокаскадного усилителя без входного давления;
б — с входным давлением; *в* — двухкаскадный.

положения менее мощной струей, направленной перпендикулярно первой.

На рис. 3-21 показаны схемы простейших струйных усилителей. Если давление входной струи рабочей среды равно нулю ($P_{вх}=0$), то положение струи, выходящей из канала нагнетания под давлением P_n , условно можно показать так, как изображено на рис. 3-21, а. В этом случае струя рабочей среды не отклоняется от исходного положения. При увеличении давления входной струи ($P_{вх}>0$) струя нагнетания под давлением P_n будет отклоняться от исходного положения (отвечающего значению $P_{вх}=0$) и давление выходной струи $P_{вых}$ будет возрастать (рис. 3-21, б).

Основным параметром струйного усилителя является коэффициент усиления по давлению

$$K_{дав} = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}.$$

Этот коэффициент зависит от расстояния l . Для увеличения коэффициента $K_{дав}$ в технике применяются двухкаскадные (рис. 3-21, в), а иногда и трехкаскадные струйные пневматические усилители. Габариты струйных усилителей колеблются от нескольких миллиметров до нескольких метров. Они могут работать в широком диапазоне выходных избыточных давлений — от 100 мм вод. ст. до 7 МПа (70 кгс/см²), при этом управляющие входные избыточные давления соответственно изменяются от 0,1 мм вод. ст. до 0,07 МПа (0,7 кгс/см²), т. е. последние в 100 раз меньше выходных избыточных давлений.

3-12. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пневматические и электропневматические преобразователи предназначены для преобразования различных физических величин (перемещения, усилия, тока, напряжения, угла поворота и т. д.) в стандартный пневматический выходной сигнал. Эффект преобразования чаще всего осуществляется элементом, который содержит переменный дроссель (см. § 3-10, г). Рассмотрим некоторые виды преобразователей.

На рис. 3-22, а приведена простейшая схема преобразователя типа сопло — заслонка, служащего для преобразования перемещения l в давление P_1 . Приведенный

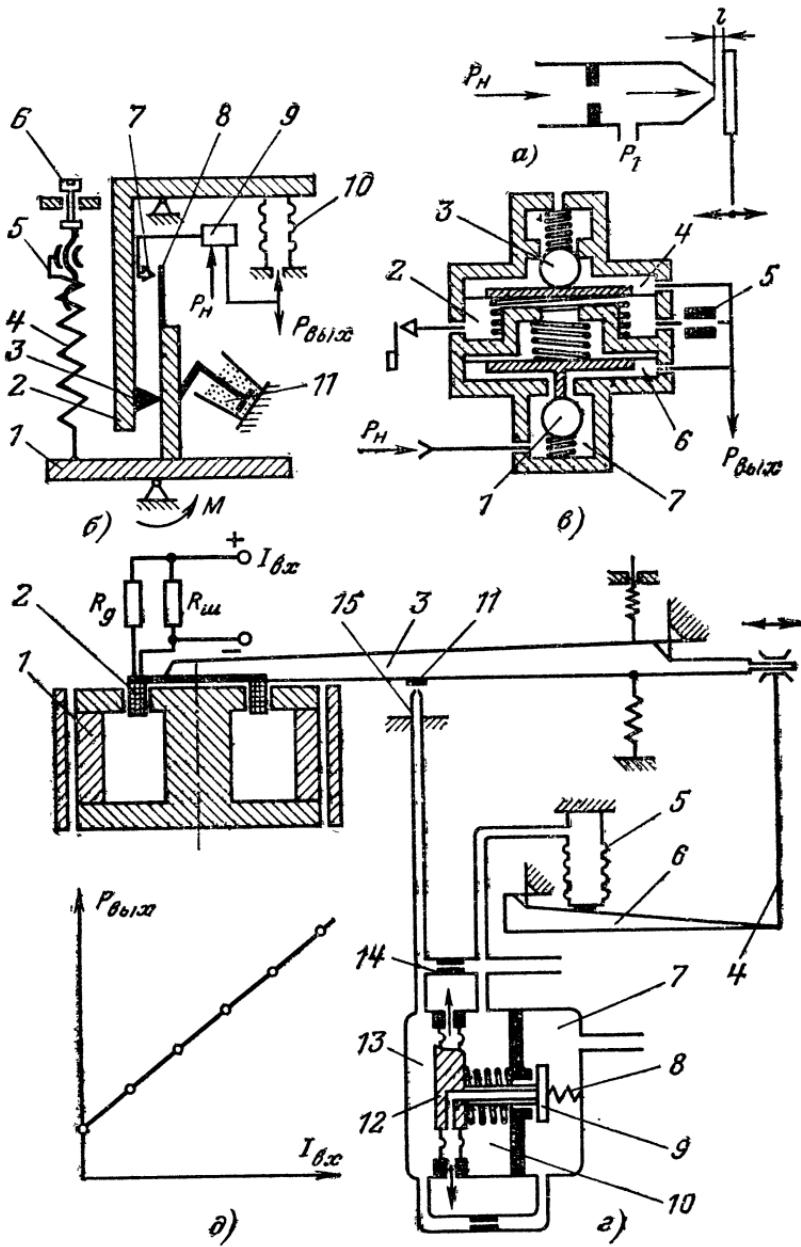


Рис. 3-22. Преобразователи.

а — пневматический типа сопло — заслонка без обратной связи; б — пневматический типа сопло — заслонка с обратной связью; в — пневмореле; г — электропневматический; д — характеристика.

преобразователь плохо работает при наличии колебаний давления воздуха нагнетания P_n , появлении люфтов и других причин, потому что не имеет обратной связи. От перечисленных недостатков свободен, например, пневмосиловой преобразователь типа П-П1, так как в нем применена обратная связь, осуществляемая с помощью сильфона¹. Указанный преобразователь чаще всего является основным блоком датчиков давления типов МАС-П1, МАС-П2, МАС-П3, МС-П19, НС-П3, ВС-П1, которые применяются в манометрах абсолютного давления, узко-предельных манометрах, сильфонных напорометрах и вакуумметрах. Датчик давления состоит из пневмосилового преобразователя и измерительного блока. Усилие, с которым измерительный блок воздействует на преобразователь, создает момент M (рис. 3-22, б). Этот момент вызывает незначительное перемещение рычажной системы передаточного механизма и связанной с рычагом 1 заслонки 8 относительно неподвижного сопла 7. Возникший в линии сопла сигнал управляет давлением, поступающим с пневмореле 9 в сильфон обратной связи 10. В преобразователе происходит непрерывное преобразование усилия, развиваемого чувствительным элементом, в стандартный пневматический выходной сигнал. Преобразователь состоит из следующих основных узлов: передаточного механизма, сильфона обратной связи, индикатора рассогласования и пневмореле.

Передаточный механизм состоит из Т-образного 1 и Г-образного 2 рычагов. Усилие передается от Т-образного рычага 1 к Г-образному рычагу 2 через подвижную опору 3. Он обеспечивает изменение передаточного отношения в 10 раз.

Сильфон обратной связи 10 одним концом жестко закреплен на колодке, а вторым концом присоединен к Г-образному рычагу 2.

Индикатор рассогласования выполнен по системе сопло—заслонка. Заслонка 8 закреплена на Т-образном рычаге 1 при помощи двух параллельных плоских пружин (на рис. 3-22, б крепление не показано). При нормальной работе заслонка 8 перемещается вместе с Т-образным рычагом 1 относительно неподвижного сопла 7.

¹ Сильфон представляет собой тонкостенную гофрированную трубку, изготавляемую обычно из бронзы с присадками или стали, и предназначен для преобразования давления или силы в перемещение.

При перегрузках заслонка 8 плотно закрывает отверстие сопла 7.

Пневмореле (рис. 3-22, в) крепится к плате передаточного механизма. Воздух под давлением нагнетания P_n поступает в камеру 7, откуда через клапан 1 поступает в камеры 6 и 4. Из этих камер воздух через дроссель 5 поступает в камеру 2 и в линию сопла. Камеры 4 и 6 разделены от камеры 2 мембранными из прорезиненного полотна. При повышении или понижении давления в камере 2 и в линии сопла открывается соответственно клапан 1 или 3, что в свою очередь приводит к повышению или понижению давления воздуха в камерах 4 и 6. Воздух под этим давлением поступает в сильфон обратной связи 10 (рис. 3-22, б) и является выходным сигналом датчика $P_{вых}$.

Для устранения автоколебаний в преобразователе имеется жидкостный демпфер 11 (рис. 3-22, б), в который налита кремнийорганическая жидкость марки ПМС. В преобразователе предусмотрен корректор нуля, предназначенный для установки требуемого значения выходного сигнала $P_{вых}$. Корректировка производится вращением винта 6. При этом колодка 5 перемещается и изменяет натяг пружины 4, один конец которой закреплен в колодке, а второй — на рычаге 1. Для подключения пневматических линий нагнетания и выходного сигнала на раме преобразователя имеются два штуцера.

Пневматические преобразователи могут также осуществлять линейное преобразование непрерывного сигнала постоянного тока в пневматический сигнал. На рис. 3-22, г в качестве примера приведена принципиальная схема электропневматического преобразователя ЭПП-63, служащего для преобразования непрерывного сигнала постоянного тока 0—5 мА в пневматический сигнал унифицированного диапазона 0,02—0,1 МПа (0,2—1 кгс/см²). Принцип действия преобразователя основан на преобразовании значения постоянного тока в пропорциональный ему момент (с помощью магнитоэлектрического механизма и рычажной системы) и измерении на рычажной системе (посредством сильфона отрицательной обратной связи) алгебраической суммы трех моментов сил: момента, пропорционального току; суммарного момента усилий упругих элементов (главным образом установочных пружин) и момента реакции струи воздуха, выходящего из сопла. Преобразователь

состоит из двух функционально различных блоков: электромеханического преобразователя и пневматического усилителя. Назначение первого блока — линейное преобразование постоянного тока в момент, назначение второго — усиление мощности и давления сжатого воздуха. Связывающими звенями блоков являются переменный дроссель сопло — заслонка 15 и 11, задающий определенное давление на входе усилителя в зависимости от положения рычажной системы, и сильфон отрицательной обратной связи 5, компенсирующий усилия, приложенные к рычажной системе, и препятствующий ее перемещению. При установленном режиме постоянный ток, проходя по катушке 2 (укреплена на основном рычаге 3), создает усилие, с помощью которого происходит втягивание катушки в зазор постоянного магнита 1. Это усилие уравновешивается на рычажной системе при определенном положении сильфона обратной связи 5.

При увеличении тока происходит увеличение усилия втягивания катушки, что приводит к нарушению равновесия рычажной системы. При этом рычаги 3 и 6, соединенные гибкой тягой 4, поворачиваются вокруг шарниров, уменьшая зазор между соплом 15 и заслонкой 11. В этом случае сопротивление дросселя сопло—заслонка увеличивается и происходит повышение давления в междроссельной камере 13, вследствие чего нарушается равновесие дифференциальной мембранны 12 и шток, жестко связанный с мембраной, больше открывает тарельчатый клапан 9, что приводит к более интенсивному расходу воздуха через клапан, т. е. к повышению давления в камере выхода 10 и в сильфоне обратной связи 5. Повышение давления в сильфоне пропорционально увеличению его усилия, которое приложено к малому рычагу 6 и направлено против движения рычажной системы, вызванного усилением тока в катушке. Равновесие рычажной системы восстановится при вполне определенном заданном основной характеристикой преобразователя соотношении между выходным давлением $P_{\text{вых}}$ и входным током $I_{\text{вх}}$ (рис. 3-22, д).

При уменьшении тока рычаги 3 и 6 под действием нескомпенсированного усилия сильфона 5 поворачиваются в противоположном направлении, увеличивая зазор между соплом 15 и заслонкой 11 и уменьшая давление в междроссельной камере 13. Мембрана 12 прогибается внутрь междроссельной камеры 13, клапан 9 под

действием сжатого воздуха в камере питания 7 и пружины 8 закрывается, и воздух из камеры выхода 10 через клапан в штоке и внутреннюю полость мембранны начиняет сбрасываться в атмосферу.

Сброс прекращается с восстановлением равновесия на рычажной системе.

Применение в преобразователе дифференциальной мембранны 12 (вместо обычной двухслойной) и дросселя положительной обратной связи 14 дает возможность увеличить минимальный зазор между соплом 15 и заслонкой 11 до 18—22 мкм, а также сократить ход заслонки до 5—8 мкм, что в свою очередь приводит к повышению чувствительности, быстродействия, виброустойчивости, надежности и уменьшению нелинейности характеристики преобразователя.

В преобразователе применена термокомпенсация, которая состоит из медного шунта $R_{ш}$ и дополнительного манганинового сопротивления R_d .

Рассмотренный электропневматический преобразователь применяется в пневматических системах регулирования и контроля производственных процессов, например в АУС.

3-13. СТАБИЛИЗАТОРЫ

а) Основные сведения о стабилизаторах

Некоторые понятия о стабилизаторах напряжения и тока были приведены в § 1-3.

По принципу действия стабилизаторы делятся на две группы:

параметрические стабилизаторы, работающие не по замкнутому циклу;

компенсационные стабилизаторы, работающие по замкнутому циклу.

Параметрические стабилизаторы проще и дешевле, но точность их стабилизации невысокая. Они основаны на использовании активных или реактивных нелинейных сопротивлений. В качестве активных нелинейных сопротивлений применяются: терморезисторы, стабиловольты, стабилитроны, бареттеры. Нелинейную индуктивность с насыщенным ферромагнитным сердечником и нелинейный конденсатор также можно использовать в качестве нелинейных реактивных сопротивлений.

Компенсационные стабилизаторы отличаются высокой точностью, но они сложнее и дороже. Они представляют собой автоматические системы регулирования, работающие по принципу отклонения (см. гл. 7).

По виду исполнительного элемента стабилизаторы можно разделить на четыре вида: электронные, полупроводниковые, ферромагнитные и феррорезонансные. По способу включения исполнительного элемента стабилизаторы бывают: последовательные, параллельные и последовательно-параллельные (смешанные). По мощности стабилизаторы делятся на три типа: маломощные (до 50 Вт), средней мощности (до 2 кВт) и большой мощности (свыше 2 кВт).

б) Способы осуществления стабилизации

Существуют два способа осуществления стабилизации: стабилизация тока и стабилизация напряжения.

Стабилизацию тока можно осуществить с помощью простой схемы (рис. 3-23, а), состоящей из последовательно соединенных активных сопротивлений: нелинейного R и линейного R_H . В качестве нелинейного сопротивления возьмем барреттер, представляющий собой стек-

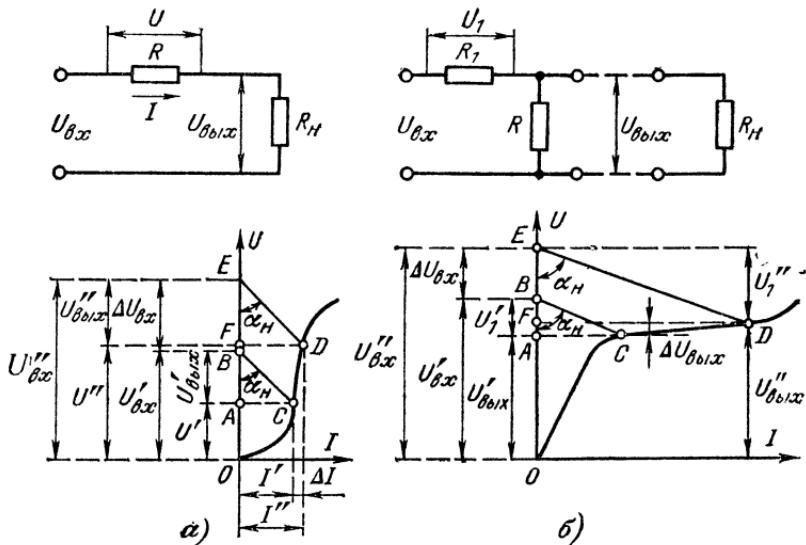


Рис. 3-23. Способы осуществления стабилизации тока (а) и напряжения (б).

лянный баллон, заполненный водородом, в котором помещена железная или вольфрамовая нить. При подаче напряжения сети $U_{\text{вх}}$ по нити потечет ток I , в результате которого нить нагревается и ее сопротивление увеличивается. Размеры нити и давление в баллоне подобраны так, чтобы увеличение сопротивления нити при нагреве было прямо пропорционально увеличению напряжения, приложенного к зажимам бареттера, т. е. чтобы ток в цепи оставался постоянным.

Для определения рабочих точек на вольт-амперной характеристике (ВАХ) сделаем следующее построение: по оси ординат отложим отрезок OB , равный напряжению сети $U'_{\text{вх}}$. Из точки B под углом α_n , определяемым из соотношения $\text{ctg} \alpha_n = R_n$, проведем прямую, которая пересекает ВАХ в точке C . По этой точке находим отрезки OA и AB , а также ток I' . Отрезок AB равен падению напряжения на нагрузке $R_n (I'R_n = U'_{\text{вых}})$, а отрезок OA — падению напряжения на бареттере R ($I'R = U'$). Предположим, что напряжение сети увеличилось на $\Delta U_{\text{вх}}$ и стало $U''_{\text{вх}}$. Аналогично нахождению точке C находим новую рабочую точку D на ВАХ. Из точки D опускаем перпендикуляр и находим новое значение I'' . Из рисунка видно, что большому изменению напряжения сети $\Delta U_{\text{вх}}$ соответствует небольшое изменение тока ΔI , следовательно, на участке CD ВАХ наблюдается эффект стабилизации тока. В этом случае падение напряжения на нагрузке R_n равно $U''_{\text{вых}}$, а падение напряжения на бареттере равно U'' . Следует отметить, что при изменении сопротивления нагрузки R_n в определенных пределах эффект стабилизации тока не изменится на участке CD .

Стабилизацию напряжения можно проиллюстрировать с помощью схемы простейшего стабилизатора напряжения (рис. 3-23, б), состоящего из последовательно соединенных активных элементов: линейного R_1 и нелинейного R . В качестве нелинейного сопротивления возьмем терморезистор, изготовленный из смеси различных полупроводниковых материалов, сопротивление которого уменьшается при нагреве (см. § 2-3). Для определения рабочих точек на ВАХ проведем построения, аналогичные описанным выше. Очевидно, что значительному изменению напряжения сети $\Delta U_{\text{вх}}$ соответствует незначительное изменение напряжения на терморезисторе $\Delta U_{\text{вых}}$, т. е. на участке CD ВАХ наблюдается эффект стабилизации напряжения.

3-14. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

Параметрические стабилизаторы делятся на стабилизаторы тока и напряжения.

а) Параметрические стабилизаторы тока

В параметрических стабилизаторах используются активные или реактивные нелинейные сопротивления, у которых сопротивление растет с ростом тока. Включение нелинейного сопротивления в цепь нагрузки обеспечивает уменьшение колебаний тока в ней при изменении напряжения сети или сопротивления нагрузки. На рис. 3-23, а приведена простейшая схема параметрического стабилизатора тока, в которой в качестве активного нелинейного элемента используется барреттер, применяемый чаще всего для стабилизации тока накала электронных ламп.

Реактивный нелинейный элемент, например, в виде индуктивности с ферромагнитным сердечником обычно применяется в магнитных параметрических стабилизаторах.

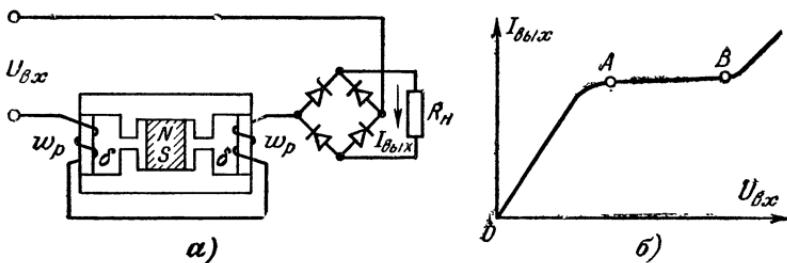


Рис. 3-24. Магнитный параметрический стабилизатор тока.

а — схема; б — характеристика.

торах тока. Схема стабилизатора приведена на рис. 3-24, а. В этом стабилизаторе имеются воздушные зазоры δ , предназначенные для обеспечения необходимого постоянства МДС на концах постоянного магнита при изменении переменного магнитного потока в магнитопроводе в результате изменения напряжения на рабочих обмотках. Конструкция магнитопровода стабилизатора выполнена таким образом, что большая часть полного магнитного потока постоянного магнита замыкается через воздушные зазоры. Поэтому непостоянство той ча-

сти потока постоянного магнита, которая замыкается через крайние стержни, мало сказывается на полном потоке в постоянном магните, а следовательно, и на МДС на его концах.

На рис. 3-24, б показана зависимость выходного тока $I_{\text{вых}}$ от входного напряжения стабилизатора $U_{\text{вх}}$. На участке AB характеристики происходит стабилизация тока.

Магнитные параметрические стабилизаторы тока выполняются мощностью до 50 В·А. Они применяются, например, в автоматических регуляторах, и выполняют роль источников эталонного тока, служащих для питания задающей обмотки магнитного усилителя. Параметрические стабилизаторы тока могут также выполняться на электронных лампах и транзисторах [79].

б) Параметрические стабилизаторы напряжения

В этих стабилизаторах так же, как и в параметрических стабилизаторах тока, используются активные и реактивные нелинейные элементы. На рис. 3-23, б приведена схема параметрического стабилизатора напряжения, в которой в качестве активного нелинейного элемента применен терморезистор. Другая схема параметрического стабилизатора напряжения показана на рис. 3-25, а, в ней основным элементом стабилизатора является газоразрядный стабилитрон. Простейший газоразрядный стабилитрон состоит из анода и холодного катода, помещенных в стеклянный баллон, наполненный инертным газом. Вольт-амперная характеристика газоразрядного стабилитрона приведена на рис. 3-25, б. На характеристике показаны следующие величины: напряжение зажигания U_z , напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$, минимальный ток $I_{\text{мин}}$, необходимый для зажигания стабилитрона, и максимальный ток $I_{\text{макс}}$, который всегда должен быть больше тока нагрузки. Напряжение на нагрузку снимается с зажимов стабилитрона. В цепь стабилизатора обязательно включают балластный ограничительный резистор R_b (рис. 3-25, а), значение которого подбирают так, чтобы при работе стабилитрона в рабочей области падение напряжения на его зажимах, а следовательно, и на нагрузке мало зависело от значения тока через него. Процессы, происходящие в газоразрядном стабилитроне, можно описать следующим

образом. При подаче напряжения на электроды (анод и катод) газ в баллоне ионизируется, т. е. молекулы газа разделяются на электроны и положительные ионы, за счет которых и появляется ток через стабилитрон. Процесс этот развивается лавинообразно, но резистор R_b ограничивает ток через стабилитрон. Электрический разряд в газе начинается только в том случае, если напряжение между электродами в момент включения стабилитрона превышает рабочее напряжение стабилизации $U_{ст}$. После того как тлеющий разряд установится, напряжение на электродах стабилитрона скачком уменьшается до значения $U_{ст}$.

Чаще всего в автоматике вместо газоразрядного стабилитрона в параметрических стабилизаторах напряжения применяются полупроводниковые стабилитроны.

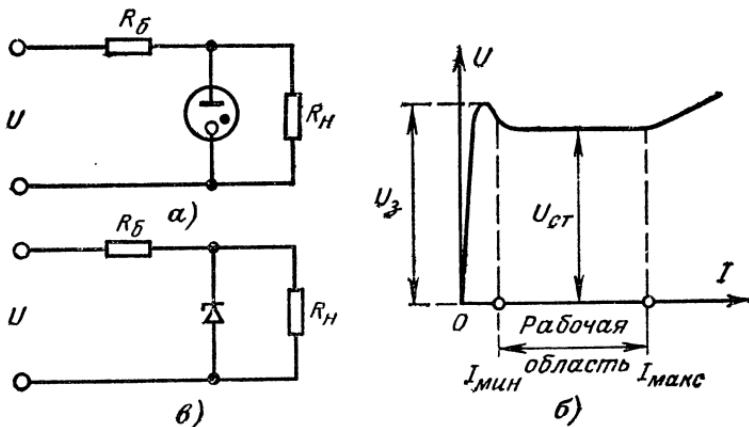


Рис. 3-25. Параметрический стабилизатор напряжения.
а — схема газоразрядного; б — ВАХ газоразрядного; в — схема полупроводникового.

Простейшая схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на полупроводниковом стабилитроне, приведена на рис. 3-25, в. Стабилитрон подключен в обратном направлении через балластный ограничительный резистор R_b к входному напряжению U , которое по значению больше пробивного напряжения стабилитрона. Параллельно стабилитрону подключена нагрузка R_h . При изменении входного напряжения U в определенных пределах меняется ток через стабилитрон,

а падение напряжения на нагрузке R_H (выходное напряжение) остается приблизительно постоянным, т. е. осуществляется стабилизация по напряжению.

Рассмотрим несколько схем параметрических стабилизаторов напряжения, в которых основными элементами являются реактивные нелинейные сопротивления. Такие стабилизаторы применяются только в цепях переменного тока. Они имеют более высокий КПД, чем стабилизаторы на активных нелинейных элементах. Параметрические стабилизаторы напряжения выполняются

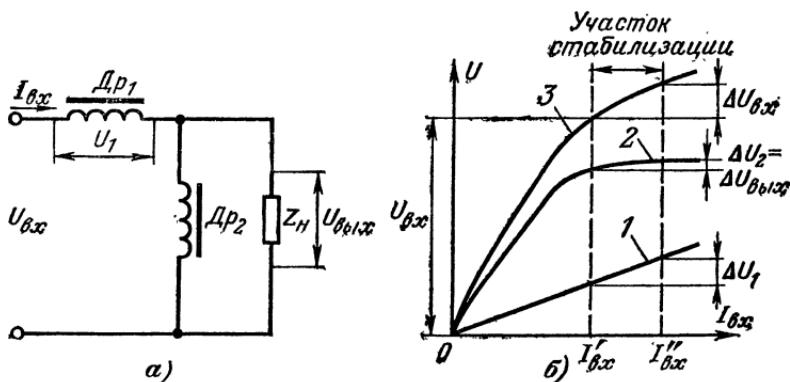


Рис. 3-26. Простейший ферромагнитный стабилизатор напряжения.
а — схема; б — ВАХ.

двух типов: ферромагнитные (электромагнитные) и феррорезонансные.

Простейшая схема ферромагнитного стабилизатора приведена на рис. 3-26, а. Она выполнена на двух дросселях Dr_1 и Dr_2 . Магнитопровод первого дросселя не насыщен, а второго дросселя насыщен¹. Обмотки дросселей включены последовательно между собой. Вольт-амперная характеристика дросселя Dr_1 (рис. 3-26, б, прямая 1) является линейной функцией, а ВАХ дросселя Dr_2 (кривая 2) и всей цепи (кривая 3) представ-

¹ Дроссель насыщен — это такое состояние дросселя, в котором магнитная индукция B его сердечника равна индукции насыщения B_s (см. рис. 3-1). Такое состояние дросселя может быть при напряженности магнитного поля H , равной напряженности насыщения H_s . При дальнейшем увеличении внешнего магнитного поля (напряженность $H > H_s$) индукция B_s в сердечнике дросселя не изменяется.

ляют собой нелинейные функции. Предположим, что входное напряжение $U_{\text{вх}}$ увеличилось на $\Delta U_{\text{вх}}$. Тогда напряжение на зажимах обмотки Dp_1 увеличится на ΔU_1 , а напряжение на зажимах обмотки Dp_2 — на ΔU_2 , которое можно найти по формуле

$$\Delta U_2 = \Delta U_{\text{вх}} - \Delta U_1.$$

Это напряжение равно напряжению $\Delta U_{\text{вых}}$, которое во много раз меньше $\Delta U_{\text{вх}}$. Таким образом, на участке $I'_{\text{вх}} - I''_{\text{вх}}$ будет наблюдаться стабилизация выходного на-

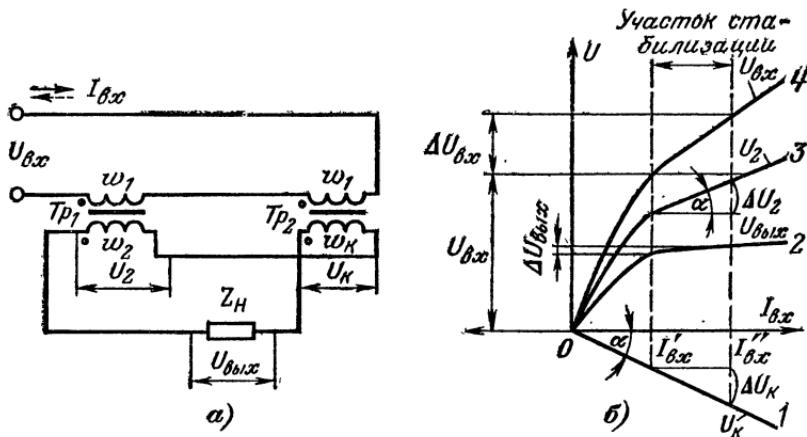


Рис. 3-27. Ферромагнитный стабилизатор напряжения.
а — схема; б — ВАХ.

пряжения $U_{\text{вых}}$. Рассмотренная схема стабилизатора применяется редко.

Наибольшее распространение в практике получила схема, изображенная на рис. 3-27, а. Схема выполнена на двух трансформаторах Tp_1 и Tp_2 . Магнитопровод первого трансформатора насыщен, а магнитопровод второго не насыщен. Первичные обмотки w_1 трансформаторов включены согласно, а вторичные обмотки w_2 и w_k — встречечно. Наличие насыщенного трансформатора Tp_1 вместо дросселя дает возможность получить любую величину выходного стабилизированного напряжения $U_{\text{вых}}$. Параметры схемы выбирают так, чтобы наклон характеристики U_k (рис. 3-27, б, прямая 1), который зависит от числа витков вторичной (компенсационной) обмотки w_k , на участке стабилизации $I'_{\text{вх}} - I''_{\text{вх}}$ был при-

мерно равен углу наклона характеристики U_2 (кривая 3). Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ (кривая 4) увеличилось на $\Delta U_{\text{вх}}$, то напряжение на вторичной обмотке w_2 трансформатора Tp_1 увеличится на ΔU_2 , а на вторичной обмотке w_k трансформатора Tp_2 — на ΔU_k . Напряжение на выходе $U_{\text{вых}}$ (кривая 2) изменится только на $\Delta U_{\text{вых}}$, которое намного меньше значения $\Delta U_{\text{вх}}$.

Ферромагнитные стабилизаторы напряжения имеют следующие недостатки:

- 1) форма кривой выходного стабилизированного напряжения $U_{\text{вых}}$ имеет несинусоидальную форму;
- 2) напряжение $U_{\text{вых}}$ в сильной степени зависит от характера нагрузки;
- 3) низкий КПД (40—60%).

Эти стабилизаторы, как правило, применяются на малые мощности (до 10 В·А). На мощности свыше 10 В·А выгоднее применять феррорезонансные стабилизаторы напряжения.

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения (типов ТСН-170, СНФ-200, СН-200, ФР-220, УСН-350 и др.) широко применяются в промышленности. Выходные напряжения этих стабилизаторов изменяются не более чем на $\pm 2 \div 5\%$ номинальных значений при колебаниях напряжения в электрических сетях на 25—30 %. В основу работы этих стабилизаторов положены явления резонанса токов и напряжений. В практике чаще применяются феррорезонансные стабилизаторы напряжения с резонансом токов. Это обусловлено тем, что КПД данных стабилизаторов составляет 80—85 % и работа их мало зависит от характера нагрузки.

Прежде чем рассмотреть процессы, происходящие в стабилизаторе, рассмотрим ВАХ контура без потерь (рис. 3-28, б) для схемы рис. 3-28, а. Ток I_C показан прямой 1, расположенной во втором квадранте. Для удобства построения ВАХ всего контура перенесем прямую 1 в первый квадрант и обозначим ее прямой 3 ($-I_C$), которая будет иметь зеркальное отображение линии I_C . Ток I_L на рис. 3-28, б показан кривой 2. Кривая 5 представляет собой результирующую ВАХ для идеального контура LC . Эта кривая строится путем разности соответствующих абсцисс прямой 3 и кривой 2. Точка А соответствует резонансу тока, т. е. такому режиму работы схемы (рис. 3-28, а), при котором реактивная составляющая первой гармоники тока I_L равна току I_C . В резуль-

тате этого явления нелинейность характеристики дросселя с индуктивностью L и конденсатора C будет иметь более резкий характер, чем нелинейность характеристики самого дросселя (рис. 3-28, б, кривые 5 и 2). В идеальном LC -контуре потери отсутствуют. Здесь в момент резонанса тока (точка A) ток $I=0$. Другая же картина наблюдается в реальном контуре. В нем всегда имеются

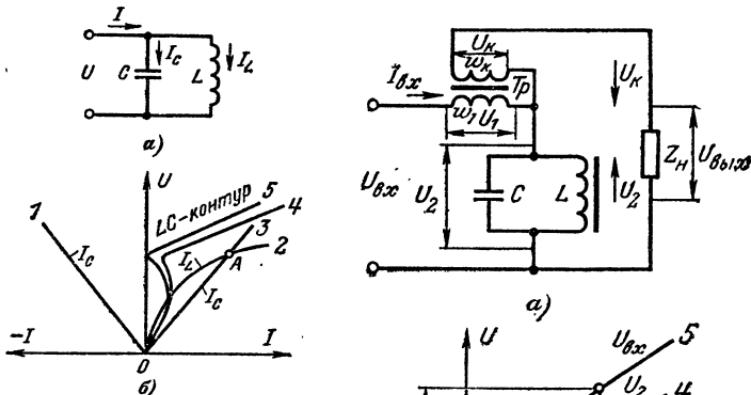
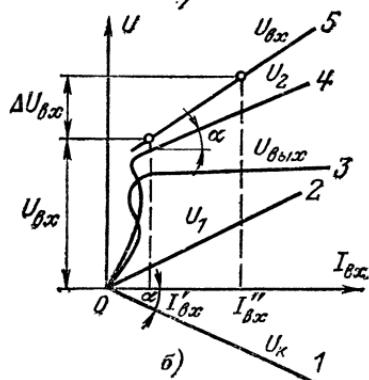


Рис. 3-28. LC -контур без потерь (идеальный).
а — схема; б — ВАХ.

Рис. 3-29. Феррорезонансный стабилизатор напряжения с резонансом токов.
а — схема; б — ВАХ.



потери, в результате которых ток I в момент резонанса тока не равен нулю. Вольт-амперная характеристика реального контура изображена кривой 4.

На рис. 3-29, а приведена схема феррорезонансного стабилизатора напряжения с резонансом токов. Схема состоит из ненасыщенного трансформатора Tr и феррорезонансного LC -контура, состоящего из дросселя L , магнитопровод которого при работе насыщается, и емкости C . Стабилизация в этой схеме осуществляется за точкой резонанса тока (см. точку A на рис. 3-28, б). Первичная обмотка w_1 трансформатора включена последовательно с контуром. Вторичная (компенсацион-

ная) обмотка w_k трансформатора включена так, что ее напряжение U_k направлено навстречу напряжению U_2 , снимаемому с LC -контура. Выходное стабилизированное напряжение равно: $U_{\text{вых}} = U_2 - U_k$.

На рис. 3-29, б показаны ВАХ феррорезонансного стабилизатора напряжения с резонансом токов. Наклон характеристики напряжения U_1 (прямая 2), снимаемого с первичной обмотки ненасыщенного трансформатора Tp , определяется числом витков обмотки w_1 при заданных параметрах сердечника этого трансформатора. Наклон характеристики напряжения U_k (прямая 1) зависит от соотношения чисел витков компенсационной w_k и первичной w_1 обмоток трансформатора. Если наклон α характеристики напряжения U_k на участке стабилизации $I'_{\text{вх}} - I''_{\text{вх}}$ выбрать равным наклону характеристики напряжения U_2 (кривая 4), то выходное стабилизированное напряжение $U_{\text{вых}}$ (кривая 3) на этом участке не зависит от изменения напряжения $U_{\text{вх}}$ (прямая 5).

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения с резонансом тока применяются на мощности 100—10000 В·А. Габариты их значительно меньше, чем у ферромагнитных стабилизаторов.

Основным недостатком феррорезонансных стабилизаторов напряжения является их сильная зависимость выходного стабилизированного напряжения $U_{\text{вых}}$ от частоты напряжения питания. Например, при изменении частоты напряжения питания на 1% $U_{\text{вых}}$ изменяется на 1—3%, что приводит к ухудшению работы стабилизатора. Выходное стабилизированное напряжение этих стабилизаторов так же, как и $U_{\text{вых}}$ ферромагнитных стабилизаторов напряжения, является несинусоидальным. Это обусловлено главным образом наличием третьей и пятой гармоник, для подавления которых ставят фильтры. Значение выходного стабилизированного напряжения зависит также от $\cos \phi$ нагрузки. Для устранения указанных недостатков в практике применяют стабилизаторы со сложными резонансными цепями, часть из которых настроена на подавление определенных гармоник выходного стабилизированного напряжения.

3-15. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

В технике чаще всего применяются компенсационные стабилизаторы напряжения, принцип работы которых заключается в том, что выходное напряжение непрерыв-

но сравнивается с заданным эталонным напряжением и разностное напряжение воздействует на нелинейный исполнительный элемент стабилизатора, в результате чего происходит компенсация изменений выходного напряжения.

На рис. 3-30 приведена схема стабилизатора напряжения, широко применяемая в промышленности. В качестве нелинейного исполнительного элемента в схеме используется угольный столб $УС$, представляющий собой набор шайб диаметром в несколько сантиметров и

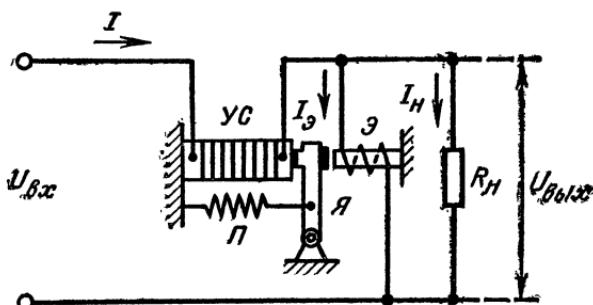


Рис. 3-30. Компенсационный стабилизатор напряжения с угольным столбом.

толщиной в доли сантиметра, которые обычно помещают в фарфоровую трубку. Сопротивление угольного столба зависит от сжимающего его давления (чем больше давление, тем меньше сопротивление). Сопротивление столба в зависимости от давления может меняться от нескольких килоом до десятых долей ома. Угольный столб $УС$, сжатый якорем $Я$ с помощью пружины $П$, включается последовательно в цепь питания стабилизатора. Обмотка электромагнита $Э$ включена параллельно нагрузке $R_{наг}$. Если входное напряжение $U_{вх}$ увеличивается, то ток $I_{вх}$, проходящий через обмотку электромагнита, также увеличивается. При этом электромеханическое усилие электромагнита увеличивается и электромагнит сильнее притягивает якорь, ослабляя давление его на угольный столб. Сопротивление столба увеличивается и избыток входного напряжения гасится в виде падения напряжения на возросшем сопротивлении столба, в результате чего выходное напряжение $U_{вых}$ восстанавливает приблизительно свое прежнее значение.

При уменьшении входного напряжения $U_{\text{вх}}$ электромеханическое усилие электромагнита уменьшается, так как уменьшается ток I_a . В результате этого за счет усилия пружины столб сжимается сильнее, сопротивление его уменьшается, падение напряжения на столбе снижается и выходное напряжение восстанавливает свое первоначальное значение. Точность поддержания выходного напряжения стабилизатора зависит от свойств угольного столба и равна 1—2% при изменении входного напряжения стабилизатора на 10—15%. Инерционность стабилизатора в зависимости от мощности его составляет 0,1—1 с. Недостатками стабилизатора напряжения с угольным столбом являются большая инерционность и сложность его конструкции.

Следует отметить, что менее инерционными являются стабилизаторы напряжения с электронными лампами и транзисторами [1, 79].

3-16. ПОНЯТИЕ О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРАХ

Гидравлические и пневматические стабилизаторы (стабилизирующие клапаны)¹ служат для поддержания на выходе постоянного давления жидкости (воздуха) при изменении их входного давления.

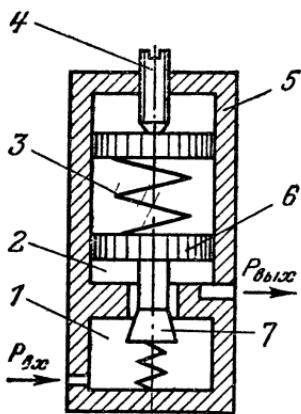


Рис. 3-31. Стабилизатор давления.

На рис. 3-31 представлена одна из схем стабилизатора давления. Выходная величина $P_{\text{вых}}$ меняется в меньших пределах, чем входная $P_{\text{вх}}$, которая должна быть всегда больше $P_{\text{вых}}$. Принцип работы стабилизатора давления можно описать следующим образом. Жидкость (воздух) под давлением $P_{\text{вх}}$ от магистрали поступает в полость 1. Из этой полости через зазор между корпусом 5 и клапаном 7 (жестко соединен с поршнем 6) жид-

¹ Колосов С. П., Калмыков И. В. и Нефедова В. И. Элементы автоматики. М., «Машиностроение», 1970.

кость (воздух) поступает в полость 2, а затем жидкость (воздух) под давлением $P_{\text{вых}}$ подается к гидравлическому или пневматическому усилителю, а иногда к исполнительному двигателю. Если давление на входе $P_{\text{вх}}$ увеличивается, то клапан 7 вместе с поршнем 6 перемещается вверх и зазор между корпусом и клапаном уменьшается. В результате этого поступление жидкости (воздуха) в полость 2 уменьшается или совсем прекращается. Выходное давление $P_{\text{вых}}$ при этом немного изменяется. При понижении входного давления $P_{\text{вх}}$ пружина 3 перемещает поршень 6 вниз и зазор между корпусом 5 и клапаном 7 увеличивается. Регулировочным винтом 4 можно изменить натяжение пружины 3, т. е. установить стабилизатор давления на требуемое значение стабилизированного выходного давления $P_{\text{вых}}$.

Кроме стабилизаторов давления, в гидравлических и пневматических магистралях применяют стабилизаторы расхода, но последние используют реже.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ РЕЛЕ

Реле, контакторы и магнитные пускатели, как было отмечено в § 1-3, можно отнести к переключающим устройствам. В этом параграфе мы рассмотрим только электрические реле, которые являются наиболее распространенными элементами автоматики, телемеханики и вычислительной техники. Имеются также и неэлектрические реле: гидравлические, пневматические, химические и др.

Электрическое контактное реле (рис. 4-1, а) в общем случае является промежуточным элементом, который приводит в действие одну или несколько управляемых электрических цепей при воздействии на обмотку его определенных электрических сигналов, подаваемых от управляющей цепи.

Характеристика реле показана на рис. 4-1, б. При увеличении входной величины x от 0 до x_c выходная величина y остается постоянной и равной y_0 .

В момент $x = x_c$ выходная величина скачком изменяется от значения $y_{\text{от}}$ до значения y_c , т. е. происходит срабатывание реле. Если и дальше увеличивать входную величину, то выходная величина остается постоянной и равной y_c или меняется незначительно. При уменьшении входной величины до значения $x_{\text{от}}$ выходная величина остается постоянной и равной y_c . При дальнейшем уменьшении входной величины в момент $x = x_{\text{от}}$ происходит отпускание реле, выходная величина при этом уменьшается скачком и становится равной $y_{\text{от}}$.

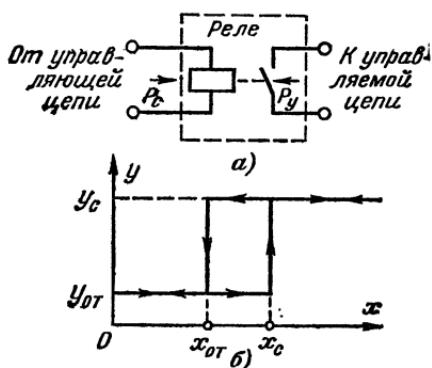


Рис. 4-1. Электрическое реле.
а — включение в схему; б — характеристика.

$y_{\text{от}}$. Величина отпускания $x_{\text{от}}$ реле меньше величины срабатывания x_c .

Основными параметрами, характеризующими работу реле в каком-нибудь устройстве, являются:

1) мощность срабатывания P_c — мощность, которая подводится к обмотке реле от управляющей цепи для его надежного срабатывания;

2) мощность в управляемой цепи P_y — максимальная мощность в управляемой цепи, при которой реле еще работает надежно;

3) время срабатывания t_c — интервал времени от момента подачи управляющего сигнала на обмотку реле до момента воздействия контактов реле на управляемую цепь;

4) надежность реле.

При проектировании устройств, в которых применяются реле, последние выбирают с учетом перечисленных параметров.

Немаловажное значение при выборе реле имеют его габариты и масса.

Электрическое контактное реле состоит из преобразователя электрического сигнала в перемещение и одной или нескольких групп контактов. Преобразователь служит для перемещения контактов, которые в свою оче-

редь замыкаются или размыкаются при подаче на вход преобразователя определенного по значению сигнала. Контакты включаются в электрическую управляемую (исполнительную) цепь.

По принципу действия используемого преобразователя электрические контактные реле можно разделить на реле: **электромагнитные** (постоянного и переменного тока), **магнитоэлектрические**, **электродинамические**, **индукционные**, **электротепловые**, **фотоэлектронные**, **электронные** и **тиратронные**.

4-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Эти реле делятся на *нейтральные* и *поляризованные*.

Нейтральное реле является наиболее распространенным типом реле. Оно одинаково реагирует на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке.

Поляризованное реле реагирует различным образом в зависимости от направления постоянного тока, протекающего по обмотке реле.

Электромагнитное нейтральное реле состоит из не-подвижного сердечника с обмоткой и подвижного якоря. В настоящее время в технике применяются электромагнитные реле различных конструктивных форм, но наиболее распространенными являются реле с поворотным или втяжным якорем.

На рис. 4-2, а приведена конструкция *электромагнитного реле с поворотным якорем*. Реле состоит из магнитопровода 1, возвратной пружины 2, якоря 3, латунного штифта 4, верхнего и нижнего штифтов 5 и 6, верхнего и нижнего упоров 7 и 9, верхней и нижней контактных пластин 8 и 10, контактной системы 11, сердечника 12, катушки 13 и винта крепления сердечника 14.

При пропускании по катушке 13 постоянного тока стальной якорь 3 притягивается к сердечнику 12. При отсутствии постоянного тока якорь 3 возвращается в исходное положение с помощью возвратной пружины 2. При наличии тока создается магнитный поток Φ , который проходит через сердечник 12, магнитопровод 1, якорь 3 и воздушный зазор δ между якорем и сердечником. За счет магнитного потока Φ создается электромеханическое усилие

$$F_{\text{эм}} \approx \frac{(0,4\pi Iw)^2 S}{8\pi} \frac{1}{\delta^2}, \quad (4-1)$$

где I — ток, протекающий по обмотке реле;
 w — число витков обмотки реле;
 S — площадь поперечного сечения магнитопровода;
 δ — значение воздушного зазора.

Из формулы (4-1) следует, что электромеханическое усилие $F_{\text{эм}}$, или сила притяжения, якоря пропорционально квадрату МДС (Iw)², не зависит от направления тока, протекающего по обмотке, и обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора δ^2 .

Якорь запрессован выступающий латунный штифт 4, который не позволяет якорю вплотную прилегать к сердечнику и тем самым предохраняет его от «залипания» вследствие возникающего гистерезиса при отключении тока.

Конструкция *электромагнитного реле с втяжным якорем* изображена на рис. 4-2, б. Реле состоит из контактов 1, корпуса 2, катушки 3, якоря 4, латунного штифта 5, крышки (сердечника) 6, контактной перемычки 7 и упоров 8. При пропускании тока по обмотке катушки, которая вставляется в цилиндрический корпус, за счет электромеханического усилия $F_{\text{эм}}$ якорь втягивается внутрь катушки, поднимая контактную перемычку и замыкая контакты. При снятии управляющего сигнала, т. е. отключении реле, якорь 4 под действием силы тяжести опускается на упоры 8 и размыкает контакты 1.

Во второй половине XX в. в промышленности стали применять *безъякорные реле*. Одним из представителей безъякорных реле является миниатюрное реле язычкового типа, конструкция которого приведена на рис. 4-2, в. Реле имеет незамкнутую магнитную систему. Внутри катушки 2 помещается герметизированная стеклянная ампула 3, наполненная инертным газом. Контактные язычки 1 выполнены из ферромагнитного материала, концы которых покрыты слоем родия или золота. При подаче управляющего сигнала на обмотку реле (на рис. 4-2, в не показано) возникает электромеханическое усилие $F_{\text{эм}}$ и контактные язычки притягиваются, замыкая управляемую цепь. Реле язычкового типа имеют преимущества по сравнению с электромагнитным реле с поворотным и втяжным якорем по надежности, быстродействию и габаритам. Срок службы реле составляет сотни миллионов срабатываний, частота срабатываний может достигать сотен герц. Контактные язычки реле могут коммутировать мощность до нескольких десятков ватт.

Время работы реле является одной из важнейших его характеристик. Рассмотрим процесс включения и отключения электромагнитного реле (рис. 4-2, г). При замыкании кнопки K в обмотке реле возникает переходный

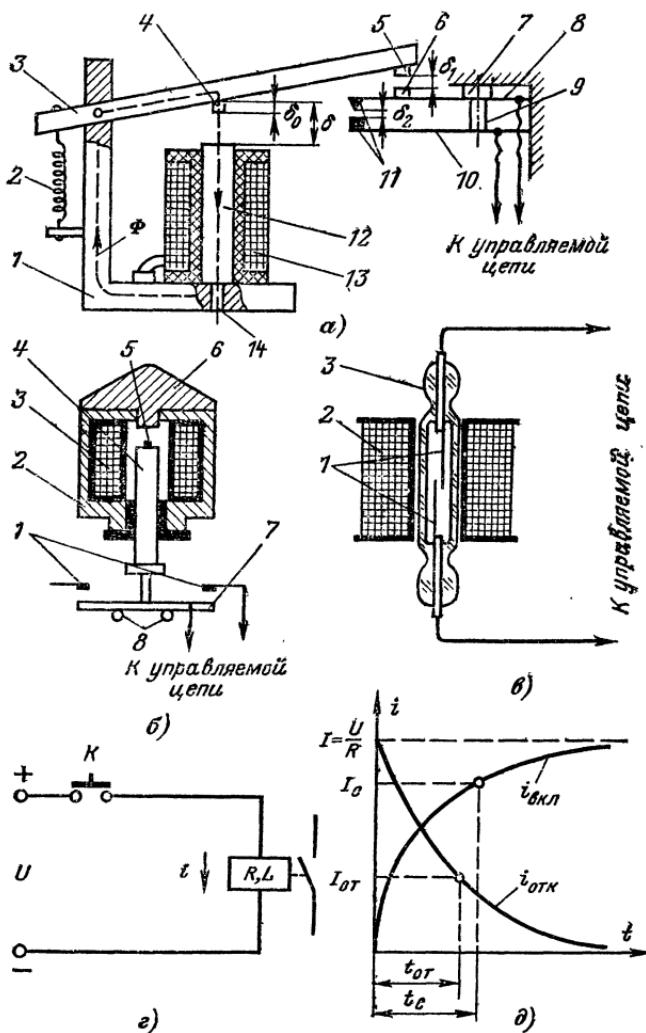


Рис. 4-2. Электромагнитное реле.

а — с поворотным якорем; б — с втяжным якорем; в — безъякорное; г — включение реле в электрическую цепь; д — графики нарастания i_{Vkl} и i_{otk} и временные параметры реле.

процесс, который может быть описан дифференциальным уравнением

$$U = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (4-2)$$

где U — напряжение источника питания;

R — активное сопротивление обмотки реле;

i — ток в обмотке реле;

L — индуктивность обмотки реле при отпущенном якоре;

di/dt — скорость изменения тока в обмотке реле.

Решим дифференциальное уравнение и получим закон нарастания тока (рис. 4-2, δ) при подаче на обмотку реле напряжения

$$i_{\text{вкл}} = I(1 - e^{-t/T}), \quad (4-3)$$

где $I = U/R$ — установившееся значение тока;

$T = L/R$ — постоянная времени цепи.

При отключении кнопки K ток в обмотке реле убывает по закону

$$i_{\text{отк}} = Ie^{-t/T}$$

и затем прерывается (рис. 4-2, δ).

Приведенные формулы приблизительно отображают картину нарастания и спада тока в обмотке, потому что эти формулы не учитывают изменения индуктивности обмотки реле L при изменении воздушного зазора δ .

Быстро действие реле характеризуется временами срабатывания t_c и отпускания $t_{\text{от}}$ реле (см. рис. 4-2, δ). Времена t_c и $t_{\text{от}}$ можно определить по формулам:

$$t_c = T \ln \frac{I}{I - I_c}; \quad (4-4)$$

$$t_{\text{от}} = T' \ln \frac{I}{I_{\text{от}}}, \quad (4-5)$$

где I_c — ток срабатывания реле, при котором якорь начинает перемещаться;

$I_{\text{от}}$ — ток отпускания реле, при котором якорь отходит от сердечника;

$T' = L'/R$ — постоянная времени при притянутом якоре (L' — индуктивность обмотки при притянутом якоре).

Следует отметить, что надежность работы электромагнитного реле в большой степени зависит от надежности контактов. Они должны без вибраций замыкать или размыкать электрические управляемые цепи, работать без подгорания, тем самым обеспечивая малое переходное сопротивление.

Надежность контактов зависит от материалов, которые применяются для их изготовления. Материалы, применяемые для изготовления контактов, должны обладать большой механической прочностью, высокой температурой плавления, электропроводностью и мало окисляться. Контакты малой мощности, которые должны иметь малое переходное сопротивление, выполняются из серебра, платины, платино-иридевого сплава, золота, сплавов серебра с золотом, никелем и другими металлами. Контакты большой мощности выполняются из вольфрама и его сплавов с серебром, а также из красной меди и графита. Эти контакты имеют большую механическую прочность и высокую температуру плавления.

По характеру соприкосновения поверхностей контакты делятся на три вида: *точечные* (соприкосновение контактов происходит в точке), *линейные* (соприкосновение контактов — по линии) и *плоскостные* (соприкосновение контактов — по плоскости). В маломощной автоматике чаще применяются точечные контакты, так как здесь не требуется больших давлений. Эти контакты обеспечивают автоматическое очищение пленки окислов на контактных поверхностях и равномерный износ при искрообразовании.

Поляризованное реле отличается от нейтрального электромагнитного реле тем, что имеет дополнительный постоянный магнит и направление перемещения якоря зависит от направления постоянного тока, протекающего по обмотке реле. Поляризованное реле имеет высокую чувствительность, большой коэффициент управления и малое время срабатывания.

На рис. 4-3, а приведена схема одного из вариантов конструкции поляризованного реле с поворотным якорем. Реле состоит из стального магнитопровода 1, обмоток 2 и 6, неподвижных контактов 3 и 5, якоря реле 4 и постоянного магнита 7. По магнитопроводу реле протекает магнитный поток Φ_0 , создаваемый постоянным магнитом 7, и основной магнитный поток Φ , образуемый в магнитопроводе намагничивающим током обмоток 2 и 6.

Поток Φ_0 , проходя через подвижный якорь 4, разветвляется на потоки Φ_1 и Φ_2 .

Перемещение якоря 4 в воздушном зазоре б ограничено контактами 3 и 5. На конце якоря расположен средний контакт, который в зависимости от полярности подаваемого управляющего напряжения на обмотки реле замыкается то с левым 3, то с правым контактом 5.

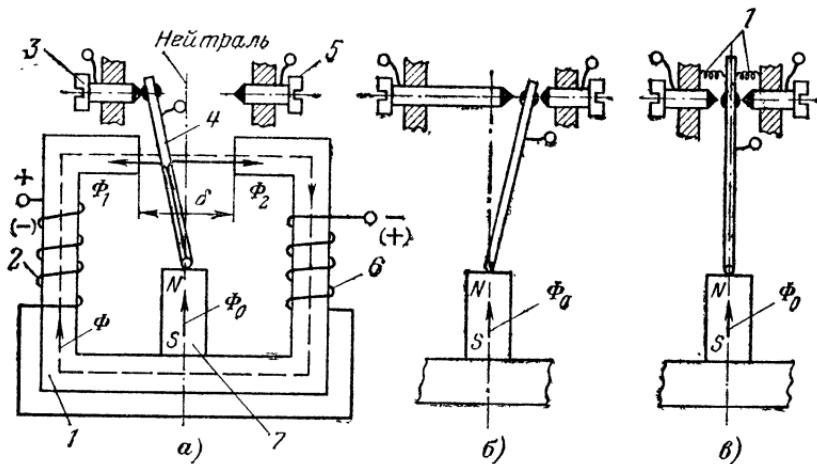


Рис. 4-3. Поляризованное реле.

a — с нейтральной настройкой контактов; *б* — с настройкой контактов «на преобладание»; *в* — с трехпозиционной настройкой контактов.

Принцип работы поляризованного реле основан на взаимодействии магнитных полюсов якоря реле 4, намагниченного постоянным магнитом 7, и электромагнита, состоящего из стального магнитопровода 1 и обмоток 2 и 6. Якорь 4 вверху имеет северный полюс *N*, а внизу — южный полюс *S*. Если подать напряжение на обмотки электромагнита такой полярности, как показано на рис. 4-3, *a* (без скобок), то левый полюс электромагнита станет южным *S*, а правый — северным *N*. В этом случае якорь 4 отклонится влево. При изменении полярности входного напряжения (рис. 4-3, *a*, в скобках) происходит изменение полярности полюсов электромагнита, левый полюс электромагнита станет северным *N*, а правый — южным *S* и якорь 4 отклонится вправо.

На рис. 4-3, *a* неподвижные контакты 3 и 5 расположены по обе стороны от нейтрали. При такой настройке

контактов (нейтральная настройка) якорь реле при отключении управляющего напряжения остается в прежнем положении. Для переключения якоря в новое положение необходимо подать управляющее напряжение другой полярности. Следует заметить, что, изменения расположение неподвижных контактов, можно получить и другие режимы работы реле.

На рис. 4-3, б приведен один из способов настройки контактов реле «на преобладание». На рисунке левый контакт выдвинут за нейтраль. В этом случае при отключении управляющего напряжения якорь притягивается к правому контакту.

Трехпозиционная настройка реле приведена на рис. 4-3, в. При отключении управляющего напряжения якорь удерживается в среднем положении с помощью специальных пружин 1.

Промышленность СССР выпускает серийно высокочувствительные малогабаритные поляризованные реле РП-4, РП-4М (с нейтральной настройкой), РП-5 (с трехпозиционной настройкой) и РП-7 (с настройкой «на преобладание»), а также поляризованные реле РПС-4, РПС-5, РПС-11 и др.

4-3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Реле переменного тока срабатывают при подаче на их обмотки переменного тока определенной частоты. Эти реле чаще всего применяются в тех случаях, когда основным источником энергии является сеть переменного тока.

Конструкция реле переменного тока напоминает конструкцию реле постоянного тока, только сердечник и якорь реле переменного тока изготавливаются из листовой электротехнической стали, чтобы уменьшить потери на гистерезис и вихревые токи.

Следует отметить, что реле переменного тока применяются в технике реже, чем реле постоянного тока, так как имеют меньшее электромеханическое усилие и менее чувствительны по сравнению с последними. Они сложнее и дороже, так как сердечник и якорь их набираются из отдельных листов; кроме того, необходимо применять специальные меры для устранения вибраций якоря, которые вызваны тем, что электромеханическое усилие проходит через нуль дважды за период питающего на-

пряжения. Вибрация якоря — нежелательное явление, потому что может привести к обгоранию контактов и разрыву управляемой цепи. Для уменьшения вибраций якоря в технике применяются специальные конструктивные меры, например применение утяжеленного якоря двухфазного реле и короткозамкнутого витка [44].

На рис. 4-4, а показана конструкция реле переменного тока с короткозамкнутым витком или реле с «раздвоенным» полюсом, которая чаще всего применяется

в устройствах автоматики. Один конец сердечника реле 1 расщеплен на две части, причем на одну часть надет короткозамкнутый виток 4 (один или несколько витков медной проволоки), выполняющий роль экрана. При подаче переменного питающего напряжения на обмотку 2 по сердечнику проходит переменный магнитный поток Φ , который у конца сердечника разветвляется. Часть магнитного потока Φ_1 проходит через неэкранированную половину конца сердечника, а другая часть магнитного потока Φ_2

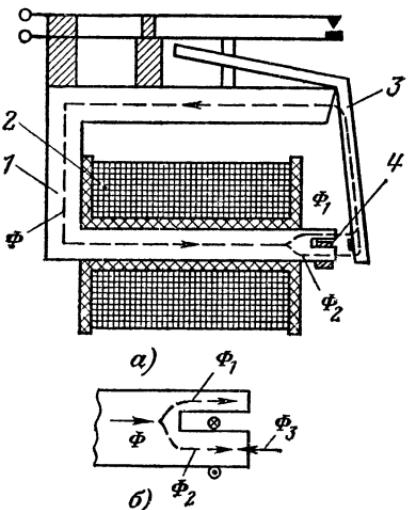


Рис. 4-4. Реле переменного тока с короткозамкнутым витком.

а — конструкция; *б* — направление магнитных потоков в расщепленной части сердечника.

проходит через экранированную половину конца сердечника. Магнитный поток Φ_2 наводит в короткозамкнутом витке ЭДС, создающую ток, который в свою очередь вызывает магнитный поток Φ_3 , направленный навстречу потоку Φ_2 (рис. 4-4, б). В результате потока Φ_3 поток Φ_2 отстает по фазе относительно потока Φ_1 на угол 60—80°. Поэтому суммарное электромеханическое усилие $F_{\text{эм}}$ при подаче на обмотку питающего напряжения никогда не равно нулю, так как оба потока (Φ_1 и Φ_2) проходят через нуль в разные моменты времени, т. е. когда один из потоков, например Φ_1 , проходит через нуль, дру-

гой Φ_2 имеет определенное значение и удерживает якорь 3 в притянутом положении.

В настоящее время промышленность страны выпускает много типов реле переменного тока, основными из которых являются: промежуточные электромагнитные реле переменного тока типов РП-1, РП-2, РП-25, РП-26, РП-311, РП-321, РП-341, ПЭ-1, ПЭ-4 и электромагнитные реле управления переменного тока типов РЭ-2100, РЭ-2100Т, РЭ-5000, РЭВ-2100 и др.

4-4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ДРУГИХ ВИДАХ РЕЛЕ

Рассмотренные выше электромагнитные реле постоянного и переменного тока чаще всего применяются в автоматике и телемеханике. Кроме того, в технике применяются также и другие типы реле, например *магнитоэлектрические, индукционные, электротепловые*. По устройству и принципу действия перечисленные реле напоминают одноименные электроизмерительные приборы.

а) Магнитоэлектрические реле

Магнитоэлектрическое реле получило широкое применение во многих сложных устройствах в качестве промежуточного звена между чувствительным элементом и управляемой цепью, так как оно является наиболее чувствительным по сравнению с другими электромеханическими реле. Например, мощность срабатывания P_c этих реле может составлять всего 10^{-10} Вт (у электромагнитных поляризованных реле минимум P_c составляет 10^{-6} Вт) при коэффициенте управления $P_{\text{пр}}/P_c = 10^4 \div 10^9$ (где $P_{\text{пр}}$ — предельная мощность, разываемая контактами).

Магнитоэлектрические реле являются реле замедленного действия. Время срабатывания их составляет от сотых долей секунды до 0,2 с. Эти реле по быстродействию уступают даже нейтральным электромагнитным реле.

По принципу действия и конструкции магнитоэлектрическое реле напоминает магнитоэлектрический измерительный прибор. Отличием является то, что вместо стрелки оно имеет небольшой рычаг с укрепленным на его конце контактом. Данное реле (рис. 4-5, а) состоит из постоянного магнита 1, между полюсными наконеч-

никами которого размещается цилиндрический сердечник 4. На последний надета легкая алюминиевая рамка 5 с обмоткой. При отсутствии управляющего напряжения рамка 5 за счет спиральных пружин (на рис. 4-5, а не показаны), выполняемых из оловянисто-цинковой бронзы и создающих уравновешивающий момент, занимает такое положение, что ее плоскость направлена по линии полюсов постоянного магнита 1. При подаче на

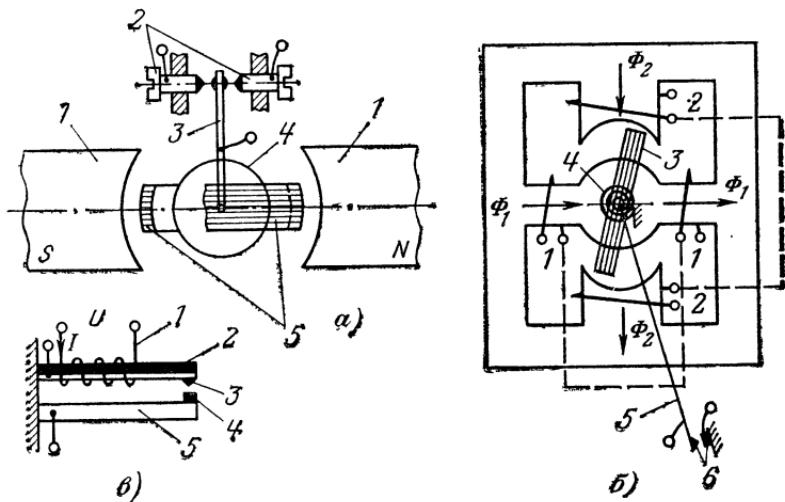


Рис. 4-5. Другие типы реле.

а — магнитоэлектрическое; б — индукционное; в — электротепловое.

спиральные пружины управляющего напряжения по обмотке рамки 5 потечет ток, образующий магнитный поток. Последний в свою очередь взаимодействует с магнитным потоком постоянного магнита 1. За счет этих двух потоков образуется врачающий момент, поворачивающий вокруг оси рамку в ту или иную сторону в зависимости от полярности управляющего напряжения. Вместе с рамкой поворачивается рычаг 3 и его контакт замыкается с левым или правым неподвижным контактом 2.

Магнитоэлектрические реле обычно применяются в схемах с медленно изменяющимся сигналом, потому что они не выдерживают ударную нагрузку на контакты. Подвижная часть этих реле плавно следует за измене-

нием управляющего сигнала. Это вызвано тем, что управляющий сигнал изменяется намного медленнее, чем происходит протекание переходных процессов в обмотке реле. В тот момент, когда управляющий сигнал достигает своего критического значения, контакты реле плавно замыкаются и время срабатывания t_c практически равно нулю, что является большим достоинством данных реле.

Магнитоэлектрические реле чаще всего применяются в авиационной автоматике и с успехом вытесняют электромагнитные поляризованные реле там, где инерционность не является решающим фактором.

б) Индукционные реле

Принцип работы индукционных реле напоминает принцип работы однотипных измерительных приборов и основан на взаимодействии индуцированного в проводнике переменного тока с переменным магнитным потоком.

Индукционные реле обычно широко применяются в устройствах релейной защиты. Объясняется это тем, что в них несложно изменять тяговые и временные характеристики, а также удобно настраивать их на необходимый режим. Индукционные реле могут использоваться как реле тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления.

Индукционное реле состоит из двух основных частей — статора и ротора. Статор имеет одну или две обмотки переменного тока. При прохождении переменного тока по обмотке или обмоткам статора создаются магнитные потоки, которые в свою очередь индуцируют переменные токи в роторе. Взаимодействие последних с магнитным полем статора создает необходимое электромеханическое усилие.

По конструкции ротора индукционные реле делятся на три группы: с ротором в виде короткозамкнутой рамки, диска и цилиндра [105].

На рис. 4-5, б показана одна из схем индукционных реле — схема реле с короткозамкнутой рамкой. Реле имеет два входа — обмотки 1 и 2. Первая обмотка служит для создания тока в короткозамкнутой рамке, а вторая обмотка — для создания магнитного потока Φ_2 в воздушном пространстве, где размещена рамка. Ток в рамку подводится не непосредственно, а путем трансформации из обмотки 1. Магнитный поток Φ_1 индуцирует ЭДС в короткозамкнутой рамке 3. При взаимодействии тока с магнитным полем, которое образуется обмоткой 2, возникает электромеханическое усилие, действующее на рамку. Указанное усилие преодолевает упругость противодействующей спиральной пружины 4 и поворачивает рамку, а вместе с ней и ось 5 до тех пор, пока не замкнутся контакты 6.

Индукционные реле имеют сравнительно небольшую чувствительность. Мощность срабатывания P_c их лежит в пределах от 0,5 до 15 В·А. Время срабатывания t_c этих реле обычно составляет не менее десятков миллисекунд.

в) Электротепловые реле

В основу работы *электротеплового реле* положено явление расширения твердого тела, жидкости или газа при нагревании их электрическим током.

Простейшим примером теплового реле является плавкая вставка, которая применяется в электрических цепях переменного тока для защиты их от перегрева.

Самым распространенным из тепловых реле является тепловое реле с биметаллическим чувствительным элементом или биметаллическое тепловое реле (рис. 4-5, а). Такое реле состоит из биметаллической пластины 2, выполненной из двух разнородных слоев металлов, которые имеют различные температурные коэффициенты линейного расширения.

При подаче напряжения U на обмотку реле 1 по ней потечет ток I , с помощью которого обмотка нагревается. В результате этого температура пластины 2 изменяется и она изгибаются, например, вниз, т. е. в сторону металла с меньшим температурным коэффициентом линейного расширения. В этом случае контакт 3 замыкается с контактом 4, расположенным на пластине 5.

Биметаллические тепловые реле чаще всего применяются и как реле защиты, и как реле времени. В качестве реле защиты они служат для защиты электрических двигателей, трансформаторов и других электрических устройств от перегрева, который вызван их перегрузкой.

Так как биметаллические тепловые реле обладают тепловой инерцией, их можно также использовать как реле времени с выдержкой времени от нескольких секунд до нескольких минут. Установка выдержки времени осуществляется с помощью изменения расстояния между контактами. Мощность срабатывания этих реле составляет, как правило, от нескольких ватт и выше. Точность их невелика и зависит от тока I (рис. 4-5, а), но биметаллические реле времени очень просты по конструкции, надежны и имеют небольшие габариты.

4-5. КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

Как было отмечено выше (см. § 1-3), контактором (сильовым реле) называется электромагнитное реле, которое имеет мощную контактную систему, служащую для коммутации рабочих цепей электродвигателей. Контакты этой системы обычно называются главными контактами. Контакторы позволяют включать электрическую цепь до 1500 раз в час.

В зависимости от рода тока, подаваемого в главную цепь, контакторы делятся на два вида: *контакторы постоянного и переменного тока*. Кроме этого деления контакторы бывают одно- и многополюсными.

Контакторы постоянного тока служат для коммутации цепей постоянного тока. Они имеют обмотку, на ко-

торую обычно подается постоянный ток напряжением 110 или 200 В. Контакторы постоянного тока потребляют мощность 20—30 Вт. Они имеют один или два главных контакта, а также до пяти блок-контактов, служащих для коммутации вспомогательных цепей, например, для сигнализации, самоудержания и т. д. Как главные контакты, так и блок-контакты бывают замыкающими и размыкающими. Главные контакты, как правило, снабжаются дугогасящими устройствами.

Контакторы переменного тока служат для коммутации цепей переменного тока. Они имеют обмотку, на которую подается переменный ток промышленной частоты напряжением до 500 В. Число главных контактов обычно равно от 1 до 5. Помимо главных контактов контакторы переменного тока имеют также маломощные блок-контакты, которые предназначены для самоблокировки, коммутации дополнительных цепей и т. д.

На рис. 4-6 приведен трехполюсный контактор переменного тока, предназначенный для управления трехфазным двигателем 10.

При замыкании кнопочного выключателя *Пуск* на обмотку 7 электромагнита поступает напряжение от сети переменного тока. В результате этого в обмотке 7 появляется ток. За счет электромеханического усилия якорь 8 притягивается к сердечнику 6 и изолированный квадратный валик 3 поворачивается в подшипниках (на рис. 4-6 подшипники не показаны). При этом рабочие подвижные контакты 9 и неподвижные контакты 5 контактора замыкаются и двигатель 10 начинает вращаться. Вместе с валиком 3 поворачивается мостик 2, размыкая нижние блок-контакты 1 и замыкая верхние блок-контакты 4. В этом случае кнопочный выключатель *Пуск* может быть отпущен, так как он блокируется замкнутыми блок-контактами 4 и напряжение от сети переменного тока будет уже поступать на обмотку 7 через них, минуя кнопочный выключатель *Пуск*. При нажатии кнопочного выключателя *Стоп* напряжение на обмотку 7 не поступает, якорь 8 за счет пружины отходит от сердечника 6, валик 3 и мостик 2 возвращаются в исходное положение и рабочие контакты 5 и 9 размыкаются. В катушке 7 рассмотренного контактора магнитный поток периодически проходит через нуль, в результате чего возникают вибрации и гудение контактора.

Для устранения этих явлений на торец сердечника 6 так

же, как и в реле переменного тока (см. § 4-3), надевают короткозамкнутый виток.

Магнитные пускатели (см. § 1-3) представляют собой контакторы, которые служат для дистанционного управления трехфазными асинхронными двигателями. Пускатели можно разделить на два вида: нереверсивные и реверсивные. Для защиты двигателей от перегрева в магнитных пускателях используются тепловые реле,

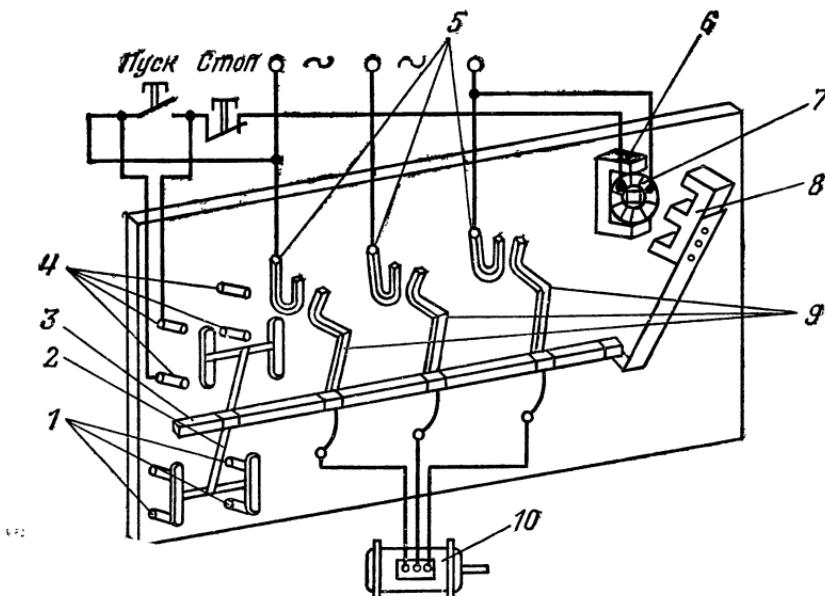


Рис. 4-6. Трехполюсный контактор переменного тока.

допускающие протекание кратковременных пусковых токов в двигателях, но размыкающие цепь питания двигателей при длительных перегрузках. Для защиты двигателей от токов короткого замыкания применяются плавкие предохранители.

На рис. 4-7 приведена схема реверсивного магнитного пускателя, которая часто применяется для реверсирования двигателя. В этом случае пускатель содержит два контактора. Один контактор предназначен для включения двигателя и вращения его, например, по часовой стрелке, а второй служит для включения двигателя и вращения его против часовой стрелки.

Схема состоит из двух частей: силовой и управляющей. К силовой части можно отнести: двигатель 1, два тепловых реле 1РТ и 2РТ, две группы рабочих контактов (1РК1, 1РК2, 1РК3 — контакты первого контактора и 2РК1, 2РК2, 2РК3 — контакты второго контактора) и плавкие предохранители 2. Управляющая часть включает в себя: обмотку K1 первого контактора и обмотку K2 второго контактора; контакты контакторов K1 и

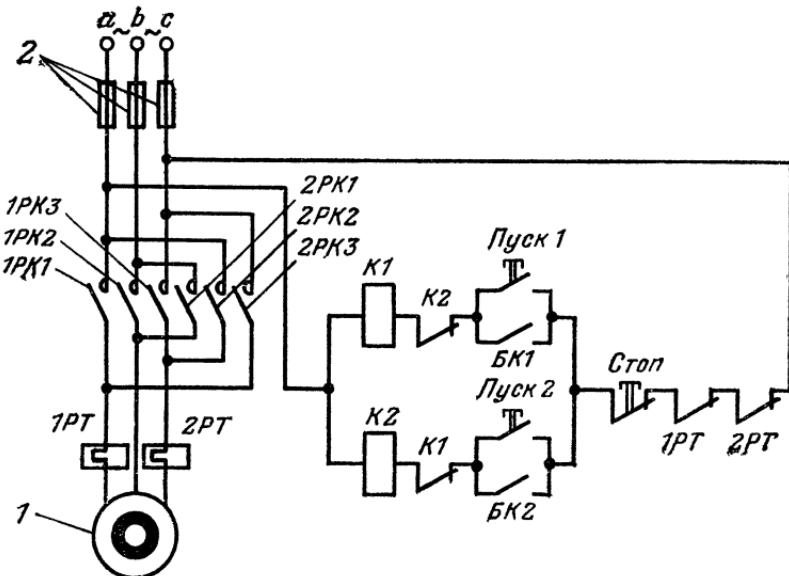


Рис. 4-7. Реверсивный магнитный пускател.

K2; кнопочные выключатели Пуск 1 и Пуск 2; блок-контакты контакторов БК1 и БК2; кнопочный выключатель Стоп, а также контакты 1РТ и 2РТ тепловых реле.

Управляющая часть при пуске двигателя работает следующим образом. При подаче напряжения от сети и нажатии кнопочного выключателя Пуск 1 по цепи (фаза *a* — предохранитель — обмотка контактора K1 — замкнутый контакт K2 контактора K2 — кнопочный выключатель Пуск 1 — кнопочный выключатель Стоп — замкнутые контакты 1РТ и 2РТ двух тепловых реле — предохранитель — фаза *c*) потечет ток. Контактор K1 срабатывает и его рабочие контакты 1РК1, 1РК2 и 1РК3

замыкаются, но контакт $K1$ размыкается, в результате чего двигатель 1 подключается к сети и начинает вращаться по часовой стрелке. При замыкании блок-контакта $BK1$ кнопочный выключатель *Пуск 1* может быть отпущен, так как он блокируется этим блок-контактом. Остановка двигателя осуществляется путем нажатия кнопочного выключателя *Стоп*. При этом ток в цепи, указанной выше, исчезает, якорь контактора $K1$ отпадает, размыкая рабочие контакты $1PK1$, $1PK2$, $1PK3$, блок-контакт $BK1$ и замыкая контакт $K1$. Пуск двигателя в обратную сторону производится путем нажатия кнопочного выключателя *Пуск 2*. В этом случае двигатель подключается к сети с помощью рабочих контактов $2PK1$, $2PK2$, $2PK3$ контактора $K2$. Блокировка кнопочного выключателя *Пуск 2* происходит за счет замыкания блок-контакта $BK2$ контактора $K2$.

В схему включены контакты $K1$ и $K2$, которые предназначены для исключения одновременного включения контакторов $K1$ и $K2$. Если бы это произошло, то возникло бы короткое замыкание в сети переменного тока. В схему также включены контакты тепловых реле $1PT$ и $2PT$.

При нормальной нагрузке на двигатель эти контакты замкнуты. При перегрузке двигателя тепловые реле срабатывают, размыкая свои контакты $1PT$ и $2PT$, которые в свою очередь прерывают подачу напряжения от сети на обмотку контактора $K1$ или $K2$, в результате чего рабочие контакты того или иного контактора размыкаются и двигатель останавливается.

4-6. ЭЛЕКТРОННЫЕ И ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ

а) Электронные реле

Электронным реле называется устройство, которое состоит из электромагнитного реле и электронной лампы, служащей для усиления сигнала управления. Основным достоинством электронных реле является их высокая чувствительность (минимальный ток, при котором реле срабатывает). Наличие усиления дает возможность значительно снизить мощность срабатывания реле P_c , которая может достигать 10^{-8} — 10^{-12} Вт.

Основными недостатками электронных реле являются: небольшое быстродействие (определяется временем

срабатывания электромагнитного реле); большой расход мощности на нагрев катодов ламп; наличие источника высокого анодного напряжения; ограниченный срок службы электронной лампы.

На рис. 4-8, а приведена схема электронного реле постоянного тока. Работа схемы происходит следующим образом. При отсутствии входного напряжения $U_{вх}$ (сигнала управления) лампа L заперта отрицательным

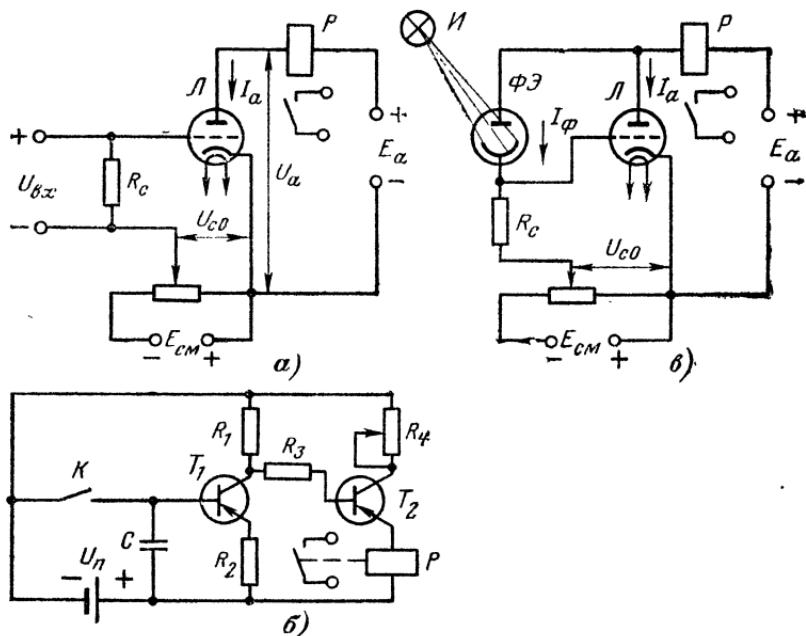


Рис. 4-8. Электронное и фотоэлектронное реле.

a — на электронных лампах; *б* — на транзисторах; *в* — фотоэлектронное реле прямого действия.

смещением U_{c0} . Через обмотку реле P протекает анодный ток I_a , значение которого недостаточно для срабатывания реле. Контакты реле при этом разомкнуты. При подаче на резистор R_c положительного по отношению к катоду входного напряжения (полярность $U_{вх}$ указана на рис. 4-8, а) происходит уменьшение отрицательного напряжения на сетке лампы. Анодный ток I_a увеличивается и становится больше тока срабатывания реле. Последнее срабатывает и контакты реле замыкаются.

В настоящее время вместо электронных ламп часто применяют транзисторы.

В качестве примера на рис. 4-8, б приведена простейшая схема конденсаторного реле на транзисторах. При замыкании ключа K конденсатор C заряжается до напряжения источника питания $U_{\text{п}}$. В тот момент, когда напряжение на конденсаторе C станет почти равным напряжению $U_{\text{п}}$, транзисторы T_1 и T_2 полностью открываются и через обмотку реле P (включена в эмиттерную цепь T_2) потечет эмиттерный ток, значение которого достаточно для срабатывания реле. Контакты реле при этом замыкаются. С помощью переменного резистора R_4 можно регулировать ток срабатывания реле.

При размыкании ключа K конденсатор C разряжается, транзисторы T_1 и T_2 закрываются и спустя некоторое время контакты реле размыкаются.

б) Фотоэлектронные реле

Фотоэлектронное реле представляет собой комбинацию фотоэлемента, предназначенного для преобразования световой энергии в электрическую энергию, и усилительной электронной лампы, в анодную цепь которой включена обмотка электромагнитного реле.

В зависимости от схемы включения фотоэлемента фотоэлектронные реле бывают: прямого действия (срабатывают на освещение) и обратного действия (срабатывают на затемнение).

На рис. 4-8, в приведена схема фотоэлектронного реле прямого действия. При затемненном фотоэлементе $\Phi\mathcal{E}$ сопротивление его велико и ток фотоэлемента I_{Φ} почти равен нулю. В этом случае потенциал сетки лампы L отрицателен, так как на сетку подается постоянное отрицательное напряжение смещения, получаемое от источника смещения $E_{\text{см}}$. Лампа L заперта, ток I_a в анодной цепи лампы меньше тока срабатывания реле, контакты последнего разомкнуты. Настройка реле осуществляется с помощью потенциометра и установкой такого напряжения U_{c0} , при котором реле P еще не срабатывает.

При подаче от излучателя I световой энергии на фотоэлемент $\Phi\mathcal{E}$ сопротивление последнего уменьшается, появляется ток I_{Φ} , потенциал сетки лампы при этом повышается. Лампа отпирается, ток I_a становится больше

тока срабатывания реле и контакты его замыкаются, подключая управляемую цепь.

Схему фотоэлектронного реле обратного действия можно получить, если в схеме поменять местами фотоэлемент $\Phi\mathcal{E}$ и резистор R_c . В этом случае контакты реле замкнутся при затемненном фотоэлементе и разомкнутся при освещении его.

4-7. РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ

В автоматике, телемеханике, вычислительной технике и связи часто необходимо последовательно подключать управляемые (исполнительные) цепи. Для выполнения указанной задачи применяются *электромеханические, релейные и электронные распределители*.

Электромеханические распределители могут приводиться в движение электромагнитами постоянного тока или электродвигателями. В технике наибольшее распространение получили распределители, которые приводятся в движение электромагнитами постоянного тока. Такие распределители в литературе чаще всего называются *шаговымиискателями* с электромагнитным приводом. Шаговый искатель так же, как и реле, является устройством дискретного действия. Он содержит щетки (подвижные контакты), которые под действием управляющего сигнала, подаваемого на обмотку электромагнита, осуществляют последовательное переключение управляемых цепей. У каждого шагового искателя имеются также и неподвижные контакты, которые располагаются по дуге окружности в несколько контактных рядов, образуя при этом контактные поля, причем каждый контактный ряд имеет свою щетку. Контактные поля выполняются не на полную окружность, а на половину (180°) или треть (120°) окружности. Число контактов на одном поле бывает от 11 до 50, а число контактных рядов от 2 до 8. Скорость переключения щеток составляет от 1 до нескольких десятков шагов в секунду. Она ограничена инерционностью электромагнита. Рекомендуемая скорость движения щеток — 10—11 шагов в секунду. Мощность, потребляемая электромагнитом, равна 50—70 Вт.

По принципу действия шаговые искатели делятся на два вида: *прямого действия и обратного*. В качестве примера на рис. 4-9 показана упрощенная конструкция

шагового искателя обратного действия, принцип работы которого заключается в следующем. Перемещение щетки 4 по неподвижным контактам 3 осуществляется за счет возвратной пружины 9, обладающей достаточной упругостью для создания усилия, которое необходимо для передвижения щетки. При поступлении управляющего сигнала на обмотку электромагнита 2 якорь 1, преодолевая действие возвратной пружины 9, притягивается и собачка 7 скользит по зубцам храпового колеса 5, не входя с ним в зацепление. При этом в пружине 9 запасается энергия. При снятии управляющего сигнала пружина 9, перемещая собачку 7, поворачивает благодаря упору 8 храповое колесо 5 на один зубец и щетка 4 переходит на следующий неподвижный контакт 3, переключая последующую управляемую цепь.

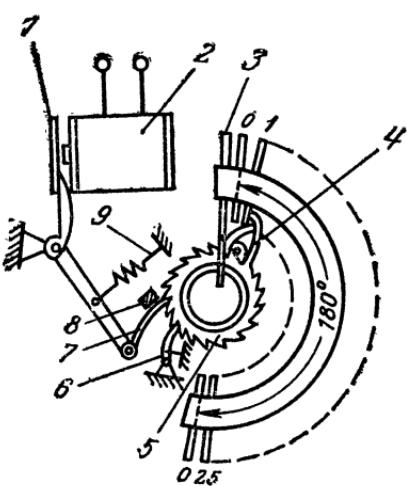


Рис. 4-9. Шаговый искатель обратного действия.

щущую управляемую цепь. В момент притяжения якоря храповое колесо 5 и щетка 4 удерживаются стопорной собачкой 6.

Если в шаговом искателе обратного действия переключение управляемой цепи происходит в начале паузы (после снятия управляющего сигнала), то в шаговом искателе прямого действия переключение управляемой цепи осуществляется в начале подачи управляющего сигнала, т. е. щетка 4 передвигается в тот момент, когда якорь 1 притягивается к сердечнику электромагнита.

В настоящее время наша промышленность выпускает следующие типы шаговых искателей¹: ШИ-11, ШИ-17,

¹ Цифры, которые входят в условный шифр шагового искателя, обозначают: в числителе дроби — количество неподвижных контактов в каждом контактном ряду, в знаменателе — количество контактных рядов.

ШИ-25/4, ШИ-25/8, ШИ-50/2, ШИ-50/4, ШИВ-25/4, ШИВ-25/8, ШИВ-50/2, ШИВ-50/4 (буква В означает виброустойчивый) и др.

Релейные распределители строятся на контактных переключателях и реле.

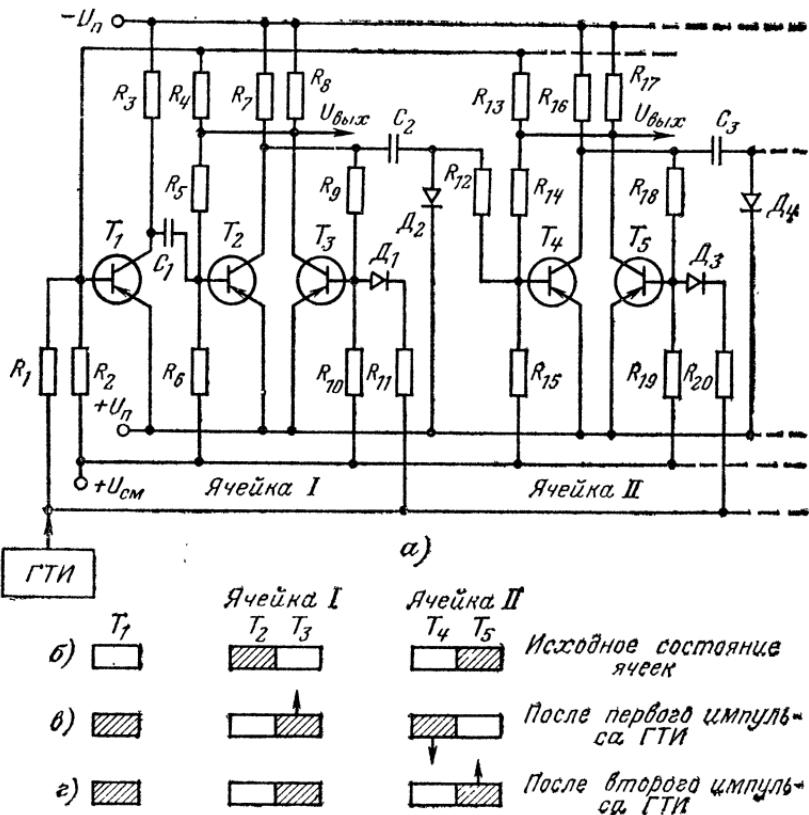


Рис. 4-10. Электронный распределитель.
а — схема; б—г — иллюстрация работы распределителя.

В настоящее время наибольшее распространение получили **электронные распределители**.

В качестве примера на рис. 4-10, а приведена простейшая схема распределителя, выполненная на транзисторах [94].

В исходном состоянии распределителя (рис. 4-10, б) транзисторы T_1 , T_3 и T_4 закрыты, а транзисторы T_2 и T_5

открыты (на рис. 4-10, б открытый транзистор условно показан в виде заштрихованного прямоугольника).

Переключение распределителя осуществляется следующим образом. Первый импульс отрицательной полярности, поступающий от генератора тактовых импульсов ГТИ, откроет только транзистор T_3 , а транзистор T_2 закроет. При этом конденсатор C_2 начнет заряжаться по цепи: «+» питания $+U_{\text{п}}$, переход эмиттер — база транзистора T_4 , резистор R_{12} , конденсатор C_2 , резистор R_7 и «—» питания — $-U_{\text{п}}$. За счет возникающего на базе транзистора T_4 отрицательного потенциала последний открывается, а транзистор T_5 закрывается. В этом случае конденсатор C_3 разряжается (в исходном состоянии ячеек он был заряжен) по цепи: диод D_4 , переход эмиттер — коллектор транзистора T_4 , резистор R_{16} и «—» питания — $-U_{\text{п}}$ и ячейка II готова к работе (рис. 4-10, в). Второй импульс, поступающий от генератора ГТИ, откроет транзистор T_5 и переключит ячейку II (на рис. 4-10, г условно показано стрелкой), в результате чего через конденсатор C_3 подготовится ячейка III (на рис. 4-10, а не показана) и т. д. Выходные импульсы $U_{\text{вых}}$ снимаются с правых транзисторов (T_3 и T_5) ячеек I и II.

Назначение транзистора T_1 состоит в том, чтобы подготовить ячейку I распределителя к работе в начале цикла, т. е. он выполняет роль блока запуска. Транзистор T_1 в течение цикла находится в открытом состоянии. Это осуществляется следующим образом: с генератора ГТИ на базу транзистора T_1 поступают отрицательные импульсы, а в промежутках между этими импульсами на базу транзистора T_1 подается отрицательный потенциал поочередно с правых транзисторов (T_3 и T_5) ячеек I и II при их подготовке. Например, при подготовке ячейки II (транзистор T_5 закрыт, см. рис. 4-10, в) отрицательный потенциал передается по цепи: коллектор T_5 , резистор R_{13} и база транзистора T_1 .

После переключения ячейки II отрицательный потенциал с правых транзисторов (T_3 и T_5) ячеек I и II перестанет поступать (все правые транзисторы T_3 и T_5 открыты, см. рис. 4-10, г) на базу транзистора T_1 и он закроется положительным смещением $+U_{\text{см}}$. При этом конденсатор C_1 начнет заряжаться через транзистор T_2 , так как после закрытия транзистора T_1 левая обкладка конденсатора C_1 окажется под отрицательным потенциалом, который мгновенно передается на базу транзис-

тора T_2 и последний открывается, в результате чего транзистор T_3 закроется и ячейка I распределителя готова к работе (рис. 4-10, б).

В заключение отметим, что более подробно распределители описаны в [94 и 103].

4-8. БЕСКОНТАКТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Бесконтактные переключающие устройства представляют собой бесконтактные электронные, транзисторные, магнитные и тиристорные реле. Перечисленные реле в литературе обычно называют триггерами, т. е. устройствами, обладающими двумя устойчивыми состояниями.

а) Бесконтактные электронные реле

Одна из электрических схем бесконтактного электронного реле приведена на рис. 4-11, а. Реле выполнено на двойном триоде с косвенным накалом. Схема выполнена так, что одна половина лампы L_1 закрыта, а другая половина лампы L_2 открыта. Предположим, что в схеме созданы такие условия, при которых обе половины лампы открыты и через них протекают одинаковые анодные токи I_{a1} и I_{a2} . По какой-то причине, например, произошло незначительное уменьшение анодного напряжения $U_{a2} L_2$. Тогда положительный потенциал на сетке L_1 уменьшается и она немного закрывается. При этом анодный ток I_{a1} уменьшается, падение напряжения на резисторе R_{a1} также уменьшается, что приведет к увеличению анодного напряжения $U_{a1} L_1$. В связи с увеличением U_{a1} положительный потенциал на сетке L_2 возрастает, анодный ток I_{a2} еще больше увеличивается, а анодное напряжение U_{a2} в свою очередь еще больше уменьшается. В этом случае L_1 закроется еще больше, ток I_{a1} достигнет минимального значения, а ток I_{a2} — соответственно максимального значения. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ для данного случая находится по формуле

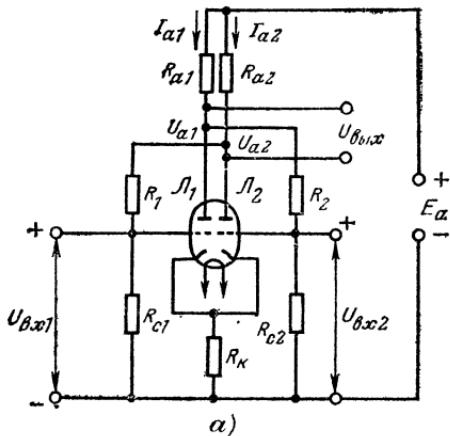
$$U_{\text{вых}} = U_{a1} - U_{a2}.$$

При подаче на вход L_1 напряжения $U_{\text{вх1}}$, полярность которого показана на рис. 4-11, а, потенциал на сетке L_1 увеличивается и при определенном значении $U_{\text{вх1}}$ L_1 открывается, а L_2 соответственно закрывается.

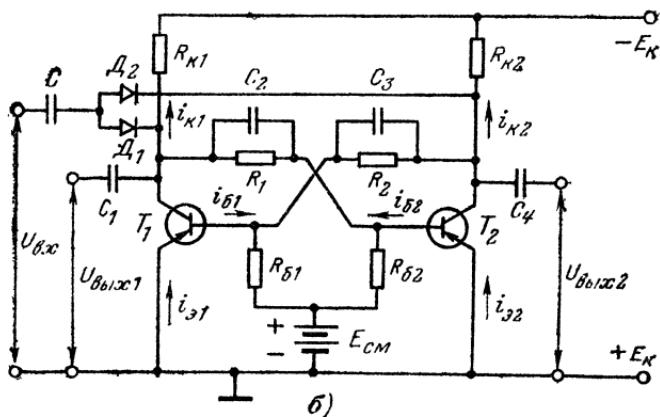
При этом выходное напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = U_{a2} - U_{a1}.$$

При снятии входного напряжения $U_{\text{вх1}}$ схема останется в том же положении, которое она занимала при подаче входного напряжения, т. е. когда половина лампы L_1 была открыта, а L_2 закрыта. Для перевода схемы в



a)



b)

Рис. 4-11. Бесконтактные переключающие устройства.
а — бесконтактное электронное реле; б — бесконтактное транзисторное реле.

другое состояние необходимо на сетку L_1 подать отрицательный потенциал или на вход L_2 подать напряжение $U_{\text{вх2}}$ такой полярности, чтобы потенциал на ее сетке был положительным. В этом случае L_1 закрывается, а L_2

открывается. Следует отметить, что выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ при переходе схемы из одного состояния в другое изменяется скачком.

Время срабатывания бесконтактных электронных реле равно нескольким микросекундам при мощности срабатывания в несколько микроватт. Для уменьшения времени срабатывания реле резисторы R_1 и R_2 шунтируют конденсаторами.

б) Бесконтактные транзисторные реле

В качестве бесконтактного транзисторного реле в автоматике и вычислительной технике чаще всего применяется симметричный транзисторный триггер. На рис. 4-11, б приведена одна из схем такого триггера. Схема триггера имеет два устойчивых состояния и по своим основным характеристикам, а также по принципу действия аналогична схеме на рис. 4-11, а, выполненной на электронных лампах. Если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ не подается, то при включении источника питания E_{k} триггер займет одно из устойчивых состояний, т. е. один транзистор, например T_1 , будет открыт, а другой транзистор T_2 будет закрыт. В этом случае потенциал (относительно земли) на коллекторе транзистора T_1 выше, чем потенциал на коллекторе транзистора T_2 , который почти равен $-E_{\text{k}}$. Для того чтобы перебросить схему в другое устойчивое состояние, необходимо к базе транзистора T_1 приложить положительный потенциал. Это приводит к запиранию транзистора T_1 и отпиранию транзистора T_2 , причем данный процесс протекает лавинообразно. В схеме триггера для создания напряжения смещения (запирания) используется отдельный источник питания $E_{\text{см}}$. Напряжение этого источника мало и выбирается из неравенства

$$E_{\text{см}} < (0,2 \div 0,3) E_{\text{k}}.$$

При выборе значения $E_{\text{см}}$ необходимо помнить, чтобы запирание транзисторов было не очень глубоким, так как это сказывается на длительности фронтов импульсов.

Конденсаторы C_2 и C_3 ускоряют процесс переброса триггера из одного устойчивого состояния в другое. После переброса триггера роль ускоряющих конденсаторов становится вредной, так как они повышают инерцион-

ность триггера в последующих стадиях работы. В связи с этим значения емкостей конденсаторов C_2 и C_3 выбираются минимально необходимыми для надежного срабатывания триггера.

В технике применяются два способа запуска триггеров: раздельный и совмещенный (счетный). При раздельном запуске на базу одного из транзисторов T_1 или T_2 через конденсатор поступают импульсы переменной полярности, каждый из которых опрокидывает триггер в противоположное состояние. Если в триггере применяются транзисторы типа $p-n-p$, то запуск триггера производится положительными импульсами. Если же триггер выполнен на транзисторах типа $n-p-n$, запуск его осуществляется импульсами отрицательной полярности.

Наиболее часто в технике применяется схема триггера, приведенная на рис. 4-11, б. Она имеет совмещенный (счетный) вход, так как каждый из импульсов входного напряжения $U_{вх}$ подается через конденсатор C в одну и ту же точку, т. е. на диоды D_1 и D_2 , причем каждый поступающий импульс перебрасывает триггер в противоположное состояние. При этом на одном из выходов транзисторов, например T_1 (выходное напряжение снижается с коллектора T_1 через разделительный конденсатор C_1) появляется то высокий потенциал, то низкий, а на выходе транзистора T_2 соответственно — низкий потенциал или высокий.

В заключение отметим, что основным недостатком бесконтактных транзисторных реле является зависимость работы последних от колебаний температуры окружающей среды. Особенно сильно это сказывается в реле, выполненных на германиевых транзисторах.

в) Бесконтактные магнитные реле

Любой магнитный усилитель с положительной обратной связью может работать в режиме бесконтактного магнитного реле (БМР), если в нем применить сильную положительную обратную связь. Практически это можно осуществить, если взять число витков обмотки обратной связи $w_{o.c}$ больше числа витков рабочей обмотки w_p . Тогда коэффициент обратной связи $K_{o.c}$ [см. формулу (3-13)] будет больше единицы и линия положительной обратной связи пройдет под углом¹ $\alpha > 45^\circ$, т. е. ниже статической характеристики реального магнитного усилителя без обратной связи.

¹ Отсчет угла осуществляется от оси ординат.

На рис. 4-12 показана статическая характеристика¹ БМР, которая имеет S-образную форму.

Участок bc имеет отрицательный наклон, на котором невозможна устойчивая работа магнитного усилителя. Усилитель на этом участке переходит в релейный режим. Данное свойство было положено в основу построения и работы БМР.

Предположим, что на обмотку управления w_y (см. рис. 3-9, а) напряжение управления U_y не подается, тогда ток управления $I_y=0$. В этом случае ток в нагрузке будет иметь максимальное значение $I_{H\text{ макс}}$ (рис. 4-12, точка a). Затем на обмотку w_y подадим отрицательное напряжение U_y такое, чтобы ток I_y по абсолютному

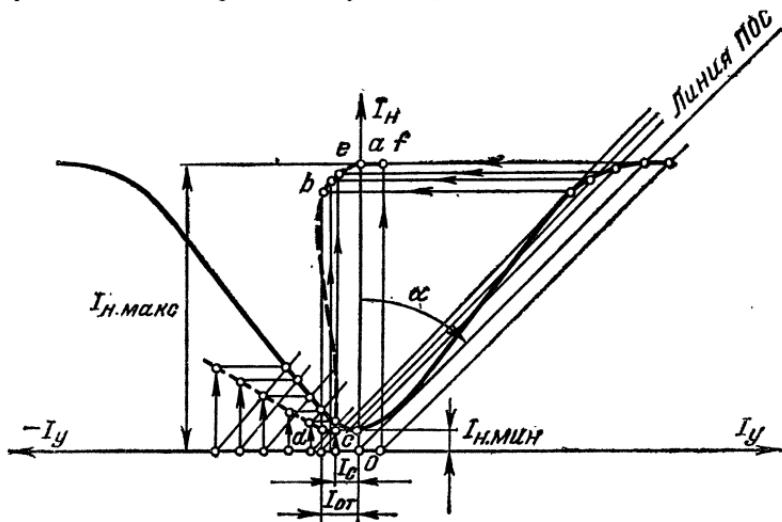


Рис. 4-12. Статическая характеристика БМР.

значению был меньше тока отпускания² $I_{\text{от}}$. Это приведет к незначительному уменьшению тока в нагрузке (участок ab). Если и дальше увеличивать абсолютное значение напряжения управления, то при $|I_y| \geq |I_{\text{от}}|$ ток в нагрузке скачком уменьшается до своего минимального значения $I_{H\text{ мин}}$ (точка d). Если уменьшать абсолютное значение тока I_y до нуля, то до точки c ток в нагрузке будет постепенно уменьшаться. При $|I_y| \leq |I_c|$ * происходит скачкообразное изменение тока в нагрузке (участок ce). При дальнейшем увеличении

¹ Порядок построения статической характеристики БМР такой же, как и порядок построения статической характеристики магнитного усилителя с обратной связью при $K_{o.c} < 1$ (см. § 3-5).

² Током отпускания $I_{\text{от}}$ называется такое значение тока управления I_y , при котором ток в нагрузке I_H уменьшается скачком до минимального значения.

* Током срабатывания I_c называется такое значение тока управления, при котором ток в нагрузке увеличивается скачком почти до максимального значения.

тока управления происходит незначительное увеличение тока в нагрузке (участок *eaf*).

Рассмотренное БМР является нереверсивным, так как при изменении полярности напряжения управления на 180° полярность тока в нагрузке не изменяется. Если вместо нереверсивных магнитных усилителей применить реверсивные магнитные усилители, то при коэффициенте положительной обратной связи $K_{\text{п.о.с}} > 1$ можно получить *реверсивное бесконтактное магнитное реле*. В этом реле при переносе полярности напряжения управления на 180° полярность тока в нагрузке также изменяется на 180° .

Бесконтактные магнитные реле по сравнению с контактными реле имеют следующие преимущества: высокая надежность (отсутствуют подвижные части и контакты), механическая прочность, высокая чувствительность (мощность срабатывания P_c может составлять всего лишь 10^{-9} — 10^{-10} Вт), большой коэффициент управления по мощности (10^5 — 10^7), значения токов срабатывания I_c и отпуска $I_{\text{от}}$ не зависят от положения БМР в пространстве.

К недостаткам БМР следует отнести: низкий КПД (около 50—60%), наличие только одной управляемой цепи или одного «контакта», неполный разрыв управляемой цепи при «выключенном» реле (наличие тока холостого хода) и большие габариты по сравнению с электромагнитным реле той же мощности при частоте питания 50 Гц.

Применяются БМР не только в автоматике (например, в системах контроля и сигнализации), но также и в телемеханике. Построение БМР можно осуществить по различным схемам, выбор которых зависит от предъявляемых требований и условий работы.

г) Тиристорные реле

По сравнению с электромагнитными реле тиристорные реле имеют следующие преимущества: малые масса и габариты, большую долговечность, высокое быстродействие, устойчивость к механическим перегрузкам и бесшумность в работе.

Тиристорное реле представляет собой полупроводниковое переключающее устройство, выполненное на основе тиристора.

Тиристор (рис. 4-13, а) представляет собой полупроводниковый прибор, имеющий четырехслойную *p-n-p-n* или *n-p-n-p*-структурку, статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого показана на рис. 4-13, б. Основным элементом тиристора является кремниевая пластина, на которую методами диффузии и вплавления наносятся слои микронной толщины. Всего на кремниевую пластину наносят четыре слоя, образующие три перехода P_1 — P_3 . Тиристор имеет три электрода: эмиттер \mathcal{E} (анод), коллектор K (катод) и базу B (сетку).

При подаче напряжения $E_{\text{п}}$ на эмиттер и коллектор два крайних *p-n*-перехода будут включены в прямом направлении, а центральный *p-n*-переход — в обратном. Если напряжение $E_{\text{п}}$ небольшое, то через тиристор протекает небольшой ток, который определяется сопротивлением центрального *p-n*-перехода. При увеличении $E_{\text{п}}$ ток I_a через тиристор увеличивается незначительно и характеристика тиристора соответствует участку I (рис. 4-13, б). Данное увеличение тока происходит до тех пор, пока напряжение на тиристоре не будет равно напряжению переключения $U_{\text{пер}}$, при котором происходит отпирание тиристора и ток увеличивается скачком (участок 2 ВАХ).

После того как откроется тиристор, его сопротивление становится несбольшим и падение напряжения на нем будет равно U (участок 3 ВАХ).

Вывод базы B (рис. 4-13, а) применяется для подачи управляющего (входного) сигнала U_y . В результате наличия управляющего тока I_y происходит уменьшение напряжения переключения, которое равно $U_{\text{пер}}$ (рис. 4-13, б).

Следует отметить, что после включения тиристора он остается в проводящем состоянии и при снятии управляющего (входного) сигнала U_y . Запирание тиристора осуществляется за счет уменьшения тока, проходящего через тиристор, т. е. за счет изменения напряжения питания E_n .

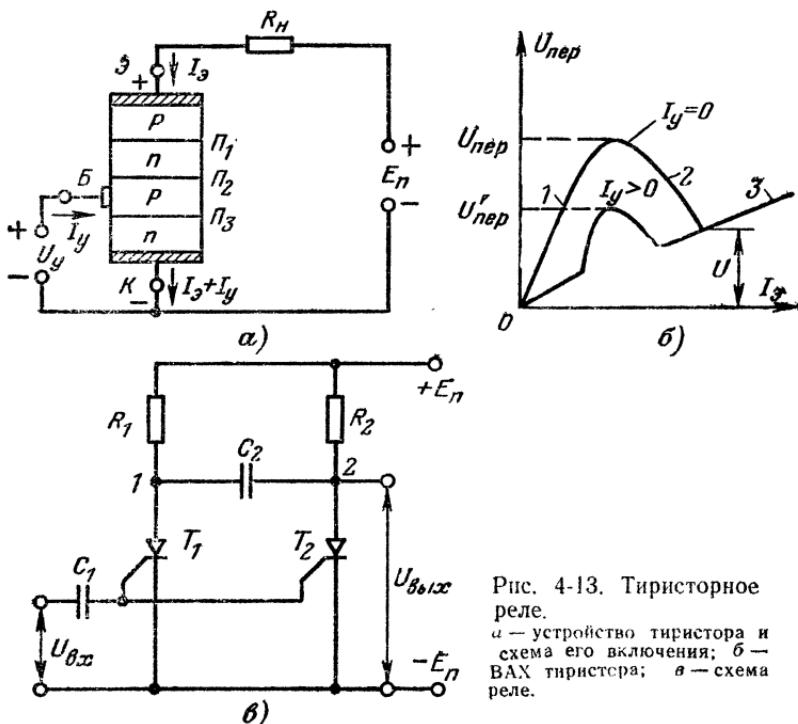


Рис. 4-13. Тиристорное реле.

а — устройство тиристора и схема его включения; *б* — ВАХ тиристора; *в* — схема реле.

На основе тиристоров построено и строится большое количество схем реле, одна из которых приведена на рис. 4-13, в. На указанном рисунке изображена схема тиристорного реле, представляющая собой триггер, выполненный на двух тиристорах T_1 и T_2 . Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ одновременно подается через конденсатор C_1 на обе базы тиристоров. В схеме используется один источник постоянного напряжения E_n . Асимметрия в схеме достигается выбором неодинаковых резисторов R_1 и R_2 . Предположим, что $R_2 < R_1$, тогда потенциал точки 2 выше потенциала точки 1. При подаче на вход первого положительного импульса тиристор T_2 открывается, а тиристор T_1 закрывается. В этом случае потенциал точки 2 скачком уменьшается

и становится меньше потенциала точки 1, в результате чего происходит заряд конденсатора C_2 . При поступлении второго положительного импульса состояние тиристора T_1 изменится, т. е. он перейдет в открытое состояние, а тиристор T_2 — в закрытое состояние. При этом произойдет перезаряд конденсатора C_2 , так как потенциал точки 1 скачком уменьшается и становится меньше потенциала точки 2. При подаче третьего положительного импульса тиристоры меняются ролями, т. е. тиристор T_2 открывается, а тиристор T_1 закрывается.

4-9. ФЕРРИТ-ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Феррит-транзисторный элемент (ФТЭ) состоит из элемента памяти и транзистора. В качестве элемента памяти используется магнитный сердечник с прямоугольной петлей гистерезиса,

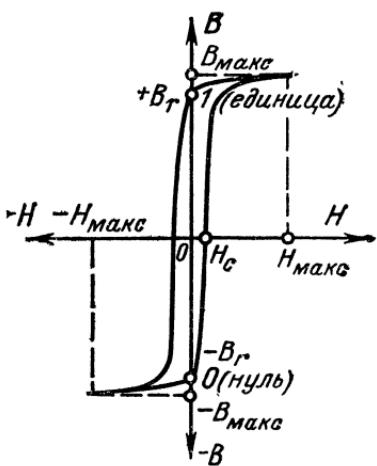


Рис. 4-14. Характеристика магнитного сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса.

схема обладает большим усилением по мощности. Они могут выполняться как без обратной связи, так и с обратной связью.

а) Феррит-транзисторный элемент без обратной связи

На рис. 4-15, а показана схема ФТЭ без обратной связи, нагрузкой в схеме служат входные (записывающие) обмотки $w_{\text{вх}}$ нескольких (n) сердечников.

который имеет два состояния: положительную $+B_r$ (соответствует единице) и отрицательную остаточную индукцию $-B_r$ (соответствует нулю) (рис. 4-14). Назначение транзистора — усиливать сигнал и разделять цепи, предотвращая возможность обратного воздействия. Следует также отметить, что входное сопротивление транзистора хорошо согласуется с низким выходным сопротивлением обмотки феррита. Включение транзистора обычно осуществляют по схеме с общим эмиттером, так как такая

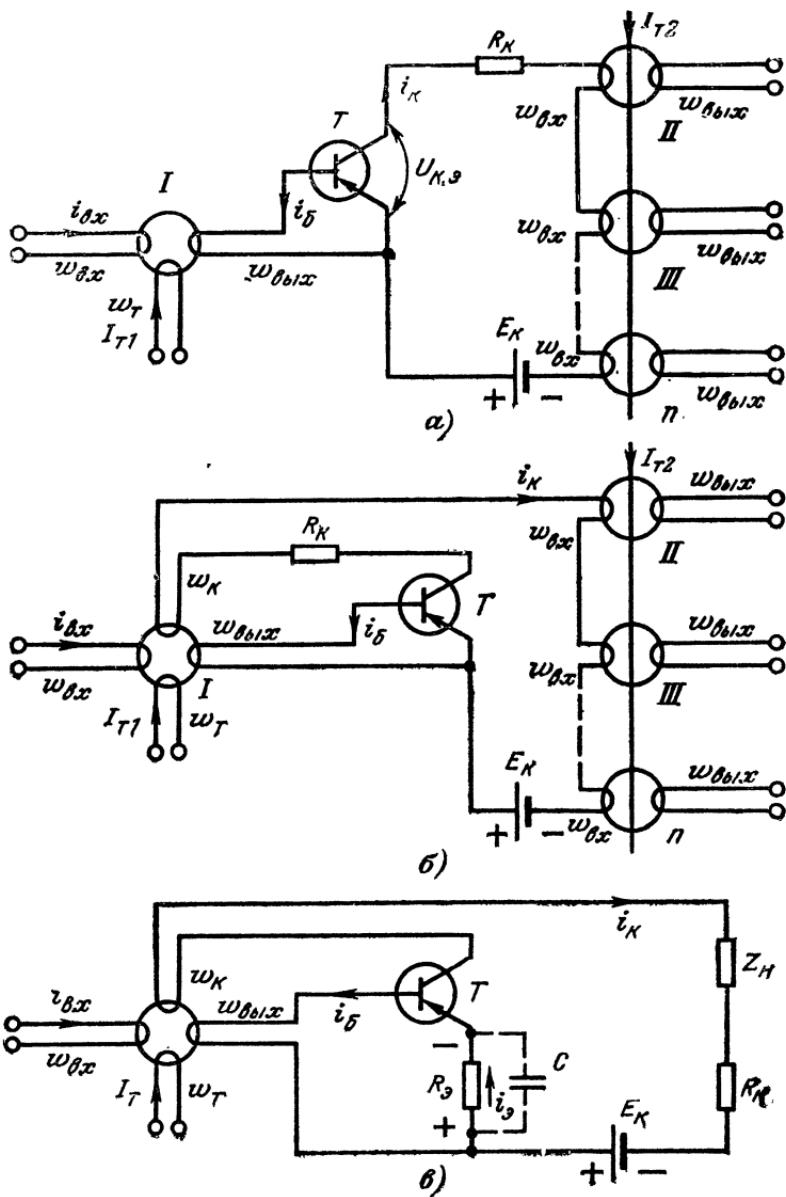


Рис. 4-15. Феррит-транзисторный элемент.

а — без обратной связи; б — с положительной обратной связью; в — с отрицательной обратной связью.

Предположим, что во всех сердечниках записаны нули. Тогда при подаче во входную обмотку $w_{\text{вх}}$ сердечника I импульса тока $i_{\text{вх}}$ в последнем записывается единица. При этом в выходной обмотке $w_{\text{вых}}$ наводится ЭДС, которая приложена к эмиттерному переходу транзистора в запирающем направлении (минус на эмиттере). Таким образом, потенциал базы будет выше потенциала эмиттера и транзистор запирается, тем самым предотвращая ложную передачу информации.

При считывании единицы в тактовую обмотку w_t сердечника I подается импульс тока I_{t1} , который создает отрицательную напряженность. При этом индукция указанного сердечника изменяется от $+B_r$ до $-B_{\max}$ (см. рис. 4-14).

В выходной обмотке $w_{\text{вых}}$ сердечника I наводится ЭДС, которая приложена к эмиттерному переходу в прямом направлении. Потенциал базы в этот момент будет ниже потенциала эмиттера, транзистор открывается и переходит в область насыщения. Падение напряжения коллектор — эмиттер $U_{\text{к.э}}$ уменьшается до долей вольта, и почти все напряжение E_k прикладывается к входным обмоткам $w_{\text{вх}}$ сердечников II , III , ..., n , в которых записываются единицы.

После окончания импульса тока I_{t1} индукция первого сердечника меняется от $-B_{\max}$ до $-B_r$, в результате чего в выходной обмотке этого сердечника наводится ЭДС, приложенная к транзистору в запирающем направлении.

Если в сердечнике I записан нуль ($-B_r$), то при подаче импульса тока I_{t1} индукция изменяется от $-B_r$ до $-B_{\max}$ (см. рис. 4-14) и в выходной обмотке этого сердечника наводится ЭДС помехи, которая направлена так же, как и ЭДС при считывании единицы, но она значительно меньше по значению.

Благодаря этой ЭДС транзистор переходит из области отсечки в активную область и коллекторный ток возрастает.

Следует отметить, что параметры схемы выбираются так, чтобы ток коллектора i_k создавал такую напряженность, которая была бы меньше коэрцитивной силы H_c , т. е. чтобы воспринимающие сердечники II , III , ..., n оставались в состоянии нуль.

При подаче импульса тока I_{t2} происходит считывание единиц с воспринимающих сердечников.

б) Феррит-транзисторный элемент с положительной обратной связью

На рис. 4-15, б приведена схема ФТЭ с положительной обратной связью в цепи коллектора. Процесс записи в данной схеме ничем не отличается от процесса записи в ФТЭ без обратной связи, но процесс считывания отличается. Этот процесс начинается с подачи импульса тока I_{t1} в тактовую обмотку w_t . Коллекторный ток i_k транзистора T , который появляется в первый момент перемагничивания сердечника, протекая по коллекторной обмотке w_k , создает дополнительную напряженность, совпадающую по направлению с напряженностью тактовой обмотки w_t , в результате чего скорость перемагничивания сердечника I увеличивается, а вместе с ней увеличивается ЭДС выходной обмотки $w_{\text{вых}}$ данного сердечника и коллекторный ток i_k , что приводит к быстрому перемагничиванию сердечника и переводу транзистора T в область насыщения. После окончания перемагничивания сердечника I ЭДС выходной обмотки и базовый ток i_b транзистора уменьшаются до нуля. Начинается процесс рассасывания неосновных носителей, после окончания которого коллекторный ток i_k прекращается. При этом состояние сердечника I изменяется от $-B_{\max}$ до $-B_r$ (рис. 4-14) и в выходной обмотке указанного сердечника $w_{\text{вых}}$ наводится небольшая ЭДС, которая полностью запирает транзистор.

В заключение следует отметить, что тактовый импульс I_{t1} осуществляет лишь начальное, небольшое перемагничивание сердечника, после которого коллекторный ток i_k растет лавинообразно и завершает перемагничивание сердечника. В результате этого мощность тактового импульса значительно меньше, чем мощность тактового импульса для ФТЭ без обратной связи. Кроме того, положительная обратная связь увеличивает быстродействие ФТЭ, сокращая время насыщения транзистора, но время вывода транзистора из насыщения не изменяет.

в) Феррит-транзисторный элемент с отрицательной обратной связью

Указанный элемент (рис. 4-15, в) применяется для ускорения вывода транзистора T из области насыщения. Отрицательная обратная связь осуществляется с помощью

резистора R_a , на котором падает напряжение при прохождении через него тока i_a . Изменяя значение R_a , можно регулировать глубину отрицательной обратной связи (ООС). Для ФТЭ с ООС, работающих на высоких частотах, обычно выбирают такое значение R_a , которое обеспечивает минимальное время переключения транзистора.

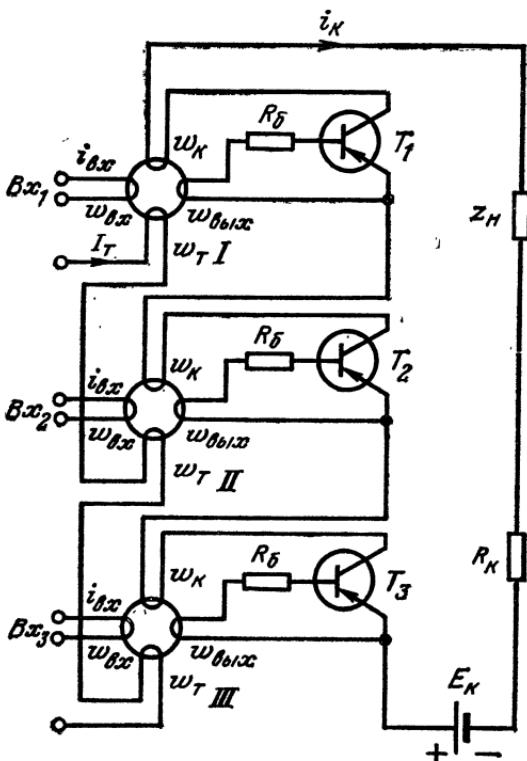


Рис. 4-16. Элемент И на ФТЭ.

Отметим, что при шунтировании резистора R_a конденсатором C (на рис. 4-15, в показано пунктиром) результаты получаются лучше. При этом в первый момент после подачи импульса тока I_t на тактовую обмотку w_t происходит шунтирование R_a емкостью C , которая как бы отключает ООС, а за счет положительной обратной связи транзистор быстро достигает режима насыщения. После того как ЭДС обмотки $w_{\text{вых}}$ упадет до нуля, емкость заряжается и, имея полярность запирающего напряжения, ускоряет вывод транзистора из насыщения.

г) Применение феррит-транзисторных элементов

В качестве примера на рис. 4-16 приведена схема элемента I^1 , выполненная на ФТЭ для трех входов. Работа схемы осуществляется в два такта. Если в первом такте записывающие импульсы поступают на все три входа Bx_1 , Bx_2 и Bx_3 , то во втором такте считывания при подаче импульса тока I_t на тактовые отмечки w_t происходит срабатывание всех трех ФТЭ. При этом транзисторы T_1 , T_2 и T_3 открываются и через нагрузку Z_b протекает ток i_k . При отсутствии записывающего импульса хотя бы на одном из входов схемы ФТЭ, соответствующий этому входу, при такте считывания не срабатывает, так как транзистор данного элемента останется запертым и через нагрузку Z_b ток i_k протекать не будет.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА (ЭЛЕМЕНТЫ)

5-1. НАЗНАЧЕНИЕ, ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Исполнительные устройства (см. § 1-2) предназначены для непосредственного воздействия на управляемый объект или его органы управления.

Исполнительные устройства, применяемые в системах автоматических, очень разнообразны. По физической природе они делятся на электрические, гидравлические, пневматические, механические и комбинированные.

По конструкции различают электродвигательные, электронные, электромагнитные, поршневые, мембранные и комбинированные исполнительные устройства.

Управление исполнительными устройствами осуществляется, как правило, через усилители мощности. Помимо того, непосредственно к исполнительному устройству может подводиться энергия от дополнительного источника.

Исполнительные устройства должны удовлетворять следующим требованиям:

1) мощность их должна превосходить мощность, необходимую для приведения в движение объекта управления или его органов во всех режимах работы;

2) статические характеристики исполнительных уст-

¹ Элемент I реализует логическую операцию умножения (конъюнкцию). Сигнал на выходе элемента I возникает только в том случае, если на все его входы поданы сигналы.

ройств должны быть по возможности линейными и иметь минимальные зоны нечувствительности¹;

3) как наиболее мощные функциональные звенья автоматических систем регулирования должны обладать достаточным быстродействием;

4) регулирование выходной величины должно быть по возможности простым и экономичным;

5) должны иметь малую мощность управления.

В качестве исполнительных устройств в системах автоматики в основном применяются мощные электромагнитные реле, электромагниты, электродвигатели постоянного тока, двухфазные электродвигатели переменного тока, электромагнитные муфты, мембранные и поршневые, гидравлические и пневматические двигатели и др. Некоторые из этих исполнительных устройств будут рассмотрены в данной главе.

5-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Исполнительные устройства, преобразующие энергию электрического тока в механическую энергию с целью воздействия на объект управления или его органы, называются электрическими исполнительными устройствами.

Электрические исполнительные устройства делятся на *электромагнитные* и *электродвигательные*. К электромагнитным исполнительным устройствам относятся реле, контакторы, электромагниты, электромагнитные вентили и клапаны, электромагнитные муфты, к электродвигательным — двигатели постоянного тока, переменного тока и шаговые (импульсные).

Электромагнитные исполнительные устройства, основным элементом которых является электромагнитный привод, как правило, используются для поступательного перемещения органов управления, а электрические двигатели — для поворотного.

5-3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

Исполнительные устройства с электромагнитным приводом представляет собой совокупность электромагнита и перемещаемой им механической нагрузки (заслонки,

¹ Зоной нечувствительности называется зона, в пределах которой изменение управляющего сигнала не вызывает перемещение управляемого объекта или его органов.

задвижки, клапана, вентиля и т. д.). Они делятся на две группы.

В устройствах первой группы электромагнит рассчитан на длительное пропускание рабочего тока. Такие устройства состоят из электромагнита, который при срабатывании втягивает шток органа управления и возвратной пружины. Отпускание происходит под действием возвратной пружины при отключении электромагнита.

В устройствах второй группы магнит не рассчитан на длительное пропускание рабочего тока. В этом случае кроме основного электромагнита имеется вспомогательный электромагнит, с помощью которого осуществляется управление основным электромагнитом.

Такая конструкция позволяет резко уменьшить габариты электромагнитов, так как они работают в кратковременном режиме и, следовательно, плотность тока может быть резко увеличена. Таким образом, для создания одной и той же МДС у катушки, работающей в кратковременном режиме, число витков значительно меньше, чем у катушки, работающей в длительном режиме.

Электромагниты могут быть подразделены:

1) по роду тока — на электромагниты постоянного и переменного тока. Электромагниты постоянного тока применяются для быстрого перемещения подвижных элементов станков, грузозахватных приспособлений, размыкания тормозов механизмов и т. д. Они предназначаются для кратковременной работы и способны развивать значительные усилия. Электромагниты переменного тока, как правило, развивают меньшие мощности, поэтому они используются в маломощных цепях;

2) по способу действия — на удерживающие и притягивающие. К удерживающим магнитам относятся, например, электромагнитные плиты плоскошлифовальных станков, служащие для магнитного закрепления обрабатываемых деталей. Притягивающие электромагниты служат для сообщения определенного движения подвижным частям;

3) по значению хода якоря — на длинноходовые и короткоходовые. У длинноходовых магнитов ход якоря достигает 150 мм, а у короткоходовых — 2—4,5 мм;

4) по характеру движения якоря — на электромагниты с поступательным движением якоря и с поворотным якорем;

5) по способу включения — на электромагниты с параллельным и последовательным включением обмотки в питаяющую сеть.

Конструкции электромагнитов весьма разнообразны, но всегда основными частями электромагнита являются неподвижный стальной магнитопровод с расположенной на нем обмоткой и подвижный якорь. При подключении катушки электромагнита к источнику питания возникает магнитный поток, который создает электромагнитное усилие, вызывающее притяжение или поворот якоря.

В качестве электромагнитов с плавным перемещением подвижной части обычно применяются электромагниты с поворотным якорем. Эти электромагниты по своему устройству и принципу действия близки к электромагнитным реле (см. § 4-2) и в данном параграфе не рассматриваются.

В заключение следует отметить, что электромагниты широко применяются в электропневматических и электрогидравлических исполнительных устройствах, в которых электромагнит перемещает распределительный золотник, подключая ту или иную полость рабочего цилиндра к источнику высокого давления, либо открывает вспомогательные клапаны с той же целью.

5-4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Принцип действия и основные уравнения

Электрические двигатели постоянного тока широко применяются в автоматических системах регулирования в качестве исполнительных устройств.

На рис. 5-1, а приведена конструкция электродвигателя постоянного тока, состоящая из следующих основных деталей и узлов: станины 1, полюсов 2 и 9, обмотки возбуждения 3, якоря 4 с коллектором 5 и щетками 6, корпуса 8 с подшипниками 7 и 10, в которых вращается вал якоря 11.

Принцип работы электродвигателя состоит в следующем (рис. 5-1, б). К обмотке якоря через щетки 2 и коллектор (на рисунке не показан) подводится напряжение постоянного тока U , под действием которого в секциях обмотки 1 протекает электрический ток I . В результате взаимодействия электрического тока с магнит-

ным потоком Φ , создаваемым электромагнитными полюсами N и S статора, возникает вращающий момент

$$M = k_m I \Phi, \quad (5-1)$$

где k_m — постоянный конструктивный коэффициент электродвигателя.

Изменение направления вращения якоря производится изменением направления тока в якоре или в обмотке

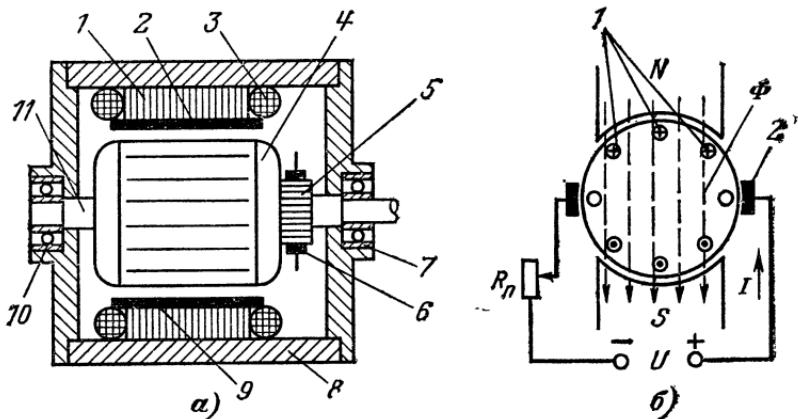


Рис. 5-1. Электродвигатель постоянного тока.

a — конструкция; *б* — к пояснению принципу действия электродвигателя.

возбуждения (рис. 5-1, б). Следует отметить, что одновременное изменение направления тока в якоре и в обмотке возбуждения не приводит к реверсированию двигателя.

Уравнение для цепи якорной обмотки электродвигателя постоянного тока имеет вид:

$$U = E + IR, \quad (5-2)$$

где E — противо-ЭДС;

R — сопротивление цепи якорной обмотки.

Противо-ЭДС зависит от конструкции двигателя и равна:

$$E = k_e n \Phi, \quad (5-3)$$

где k_e — величина, постоянная для данного двигателя; n — частота вращения якоря.

Сопротивление цепи якорной обмотки

$$R = R_{\text{я}} + R_{\text{п}} + R_{\text{щ}},$$

где $R_{\text{я}}$ — сопротивление самой обмотки якоря;

$R_{\text{п}}$ — сопротивление пускового реостата (рис. 5-1, б);

$R_{\text{щ}}$ — сопротивление щеток.

Рабочие свойства двигателей постоянного тока в значительной мере определяются способом возбуждения в них магнитного поля. Различают следующие способы электромагнитного возбуждения двигателей постоянного тока: независимое возбуждение, самовозбуждение (параллельное, последовательное и смешанное) и возбуждение с помощью постоянных магнитов.

В автоматических системах регулирования наибольшее распространение получили двигатели с независимым возбуждением, которые будут рассмотрены ниже.

б) Статические характеристики электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением

Свойства электрических двигателей в установившемся режиме ($n=\text{const}$) определяются их статическими характеристиками: скоростной и механической.

Скоростной характеристикой называется зависимость частоты вращения электродвигателя от тока якоря: $n=f(I)$.

Уравнение скоростной характеристики получим из выражения (5-2), подставив в него значение противоЭДС из выражения (5-3) и решив его относительно частоты вращения n :

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R}{k_e \Phi} I. \quad (5-4)$$

Первое слагаемое в уравнении (5-4) означает частоту вращения двигателя на холостом ходу:

$$n_0 = \frac{U}{k_e \Phi}.$$

Во втором слагаемом величина $R/k_e \Phi = D$ — постоянная, так как состоит из постоянных параметров. Учитывая эти соотношения, уравнение скоростной характеристики можно написать в следующем виде:

$$n = n_0 - DI. \quad (5-5)$$

Эта зависимость соответствует уравнению прямой линии с угловым коэффициентом D , который представляет собой тангенс угла наклона прямой AB к оси тока I (рис. 5-2, а). Угол α определяется значением $\operatorname{arctg} D$.

Точка A на скоростной характеристике соответствует идеальному холостому ходу, при котором $I=0$, $U=E$ [см. уравнение (5-2)]. При этом частота вращения якоря рав-

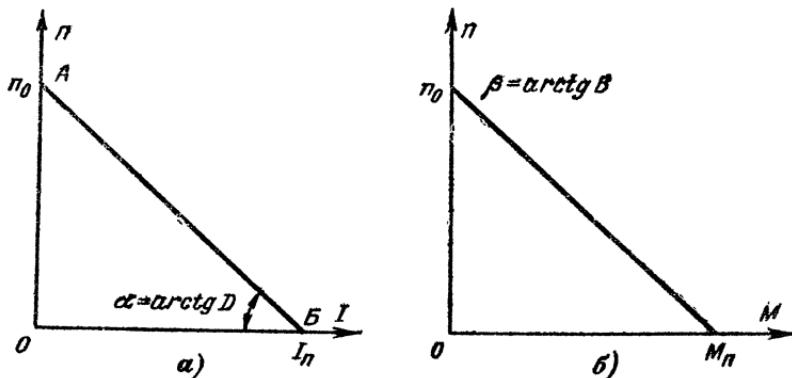


Рис. 5-2. Статические характеристики электродвигателя постоянного тока.

a — скоростная; *б* — механические.

на частоте вращения холостого хода n_0 . Точка B соответствует началу пуска. В этом случае $n=0$, а следовательно, $E=0$ [см. выражение (5-3)]. Тогда уравнение (5-2) принимает вид $U=IR$. Из последнего выражения можно найти начальный пусковой ток в якоре, который равен $I_n=U/R$.

При пуске двигателя пусковой ток достигает большого значения, что приводит к чрезмерному нагреву обмоток якоря и возникновению кругового огня по коллектору. Кроме того, возникает очень большой момент на валу двигателя, эквивалентный удару, который может вызвать поломку исполнительного устройства.

Для ограничения пускового тока в цепи якоря предусмотрен реостат R_n (рис. 5-1, б), сопротивление которого в момент пуска полностью введено. По мере разгона двигателя сопротивление реостата постепенно уменьшается до нуля и сопротивление якорной цепи

$$R = R_n + R_{\text{д}}.$$

Сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$ подбирается из условия ограничения пускового тока $I_{\text{п}}$ допустимым значением (примерно $(2 \div 3)$ $I_{\text{ном}}$, где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток якоря).

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его частоты вращения от развиваемого на валу момента вращения: $n=f(M)$. Определяя I из выражения (5-1) и подставляя его значение в выражение (5-4), получаем уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - M \frac{R}{k_e k_m \Phi^2}. \quad (5-6)$$

Первое слагаемое в полученном уравнении означает частоту вращения холостого хода n_0 , второе слагаемое характеризует изменение частоты вращения, обусловленное моментом нагрузки. Выражение (5-6) является уравнением прямой линии с угловым коэффициентом

$$B = \frac{R}{k_e k_m \Phi^2},$$

который представляет собой тангенс угла наклона прямой к оси момента M (рис. 5-2, б).

Механическая характеристика может быть более жесткой или более мягкой. Жесткость характеристики определяется значением $B' = dM/dn$ и называется *степенью жесткости*.

Двигатели исполнительных устройств должны иметь механические характеристики с как можно большими значениями степени жесткости (рис. 5-2, б), что позволяет получить большее значение пускового момента¹ $M_{\text{п}}$ и меньшее время разгона двигателя².

в) Регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением

Регулирование частоты вращения электродвигателя связано с изменением его механической характеристики. В силу этого рассмотрение разных способов регулирова-

¹ Пусковым моментом называется возникающий при пуске момент на валу двигателя, приводящий во вращение якорь двигателя из неподвижного состояния.

² Время разгона двигателя — это время, в течение которого частота вращения двигателя нарастает от нуля до установившегося значения.

ния частоты вращения удобнее производить на основе анализа соответствующих механических характеристик.

Из уравнения (5-4) следует, что возможны три основных способа регулирования частоты вращения:

изменением сопротивления цепи якоря R путем введения добавочного сопротивления R_d ;

изменением магнитного потока возбуждения Φ ;

изменением напряжения U , подводимого к якорю электродвигателя.

Схема регулирования частоты вращения электродвигателя первым способом приведена на рис. 5-3, а. Регулирование частоты вращения электродвигателя с помощью изменения сопротивления R_d возможно только в сторону ее понижения от основной, определяемой при $R_{d1}=0$. При этом частота вращения холостого хода n_0 остается постоянной, а коэффициент B наклона характеристики

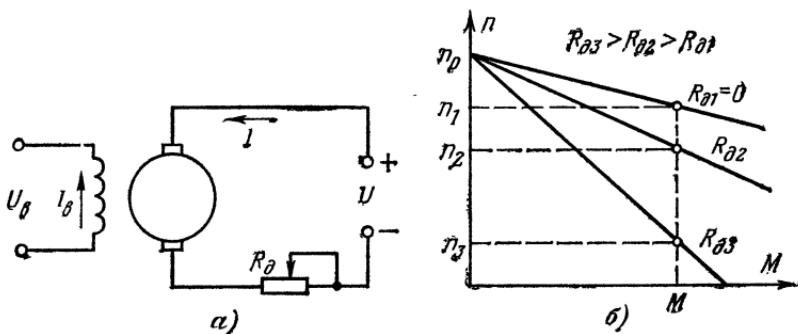


Рис. 5-3. Регулирование скорости электродвигателя изменением сопротивления R_d .

а — схема; б — механические характеристики.

историки увеличивается с увеличением значения R_d . Каждому значению сопротивления R_d при постоянном momente нагрузки M соответствует определенное значение частоты вращения n (рис. 5-3, б). Следует отметить, что при увеличении R_d жесткость характеристик $n=f(M)$ уменьшается. Рассмотренный способ является экономически невыгодным, так как мощность, затрачиваемая в резисторе R_d , теряется.

Регулирование частоты вращения электродвигателя путем изменения потока возбуждения Φ (рис. 5-4, а) является весьма экономичным. В этом случае напряже-

ние U на якоре в процессе регулирования остается постоянным. Механические характеристики (рис. 5-4, б) являются прямыми и пересекают оси момента и частоты вращения под разными углами, значения которых зависят от значений потока возбуждения Φ . При уменьшении Φ частота вращения холостого хода n_0 возрастает, а

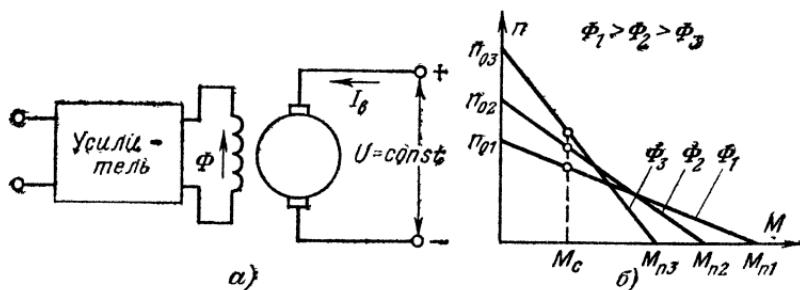


Рис. 5-4. Регулирование скорости электродвигателя изменением потока Φ .

a — схема; *б* — механические характеристики.

пусковой момент $M_{\text{п}}$ уменьшается. Наклон механической характеристики увеличивается, жесткость характеристики снижается. Данный способ регулирования частоты вращения используется в следящих системах мощностью от нескольких ватт до нескольких десятков ватт, где управление может быть осуществлено от электронного, полупроводникового или магнитного усилителя.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением подводимого к якорю напряжения позволяет иметь не только широкую, экономичную и плавную регулировку частоты вращения, но и безреостатный пуск двигателя. Указанный способ наиболее часто применяют на практике. При этом способе питание якоря может осуществляться от генераторов, различного вида преобразователей, электромашинных и магнитных усилителей и других источников.

В качестве примера на рис. 5-5, *а* показана схема регулирования частоты вращения электродвигателя с помощью генератора. В этой схеме приводной электродвигатель *1* приводит во вращение якорь генератора постоянного тока *2*, к зажимам которого подсоединен двигатель постоянного тока *3*, воздействующий на объект управления *4*. Потенциометр *R* служит для регулирова-

ния тока возбуждения генератора I_{B1} . Изменение последнего, а следовательно, магнитного потока Φ_B приводит к изменению напряжения U , снимаемого с генератора 2 для питания якоря двигателя 3 с независимым возбуждением. При изменении напряжения U меняется частота вращения якоря двигателя 3.

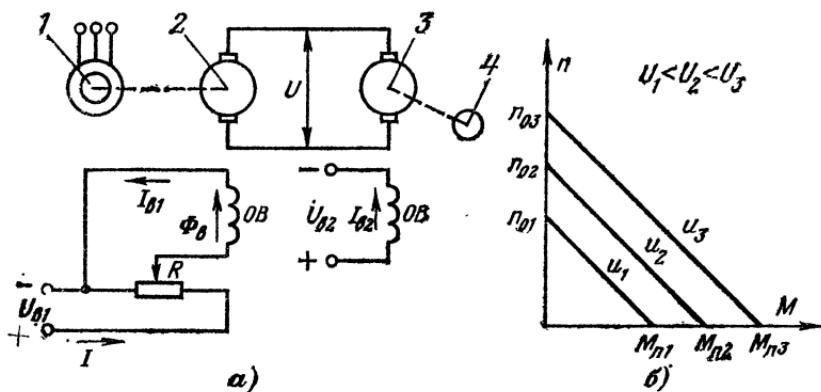


Рис. 5-5. Регулирование скорости электродвигателя изменением напряжения U , подводимого к якорю электродвигателя.
а — схема; б — механические характеристики.

Механические характеристики (рис. 5-5, б) для фиксированных значений напряжения U , подводимого к якорю двигателя, представляют собой семейство параллельных прямых, так как коэффициент наклона характеристики B не зависит от напряжения U [см. выражение (5-6)].

г) Электромеханическая постоянная времени электродвигателя

Важнейшим параметром, характеризующим быстродействие исполнительного электродвигателя, является *электромеханическая постоянная времени*. Под ней следует понимать время, в течение которого частота вращения якоря двигателя достигла бы установленвшегося значения, если бы в процессе разгона якорь ускорялся под влиянием определенного неизменного врачающего момента. Поэтому значение электромеханической постоянной времени электродвигателя получается разным в зависимости

от условий ее определения, а именно исходят ли из номинального или пускового вращающего момента двигателя.

Значение электромеханической постоянной времени T_m чаще всего определяют по пусковому моменту двигателя:

$$T_m = J\omega \frac{10^{-2}}{M_p}, \quad (5-7)$$

где J — момент инерции якоря, кг·см²; M_p — пусковой момент двигателя, Н·см; ω — установившаяся угловая скорость якоря, рад/с.

Значение этой постоянной в двигателях мощностью до 20—30 Вт лежит в пределах 0,02—0,04 с. В двигателях мощностью от 30 Вт до нескольких киловатт электромеханическая постоянная достигает 0,2 с, что делает электродвигатель наиболее инерционным элементом автоматических систем регулирования. Для повышения быстродействия исполнительного двигателя в системах автоматики якорь его выполняют малоинерционным, используя конструкции полого бескаркасного якоря.

5-5. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В автоматических системах регулирования в качестве исполнительных устройств широко применяются двухфазные асинхронные двигатели переменного тока.

Двухфазные асинхронные двигатели по конструктивному исполнению подвижной части подразделяются на двигатели с короткозамкнутым ротором, с полым немагнитным ротором и с полым ферромагнитным ротором.

У двигателей первого типа ротор выполнен в виде «беличьей клетки», образованной несколькими продольными проводниками, замкнутыми накоротко в торцевой части поперечными кольцами.

У двигателей второго типа ротор выполняется в виде тонкостенного полого стакана. Применение полого ротора существенно уменьшает инерционность двигателя и момент трения на валу.

У двигателей третьего типа полый ротор выполняется из ферромагнитного материала, поэтому инерционность двигателя повышается.

В качестве примера на рис. 5-6, а приведена конструкция электродвигателя с полым немагнитным ротором. Ротор 2, выполненный из немагнитного материала, закреплен на валу 5 двигателя. В полости ротора расположены внутренний статор 1, служащий для увеличения магнитной проницаемости на пути замыкания магнитного потока. При отсутствии внутреннего статора значительно увеличивается путь магнитного потока в воздуш-

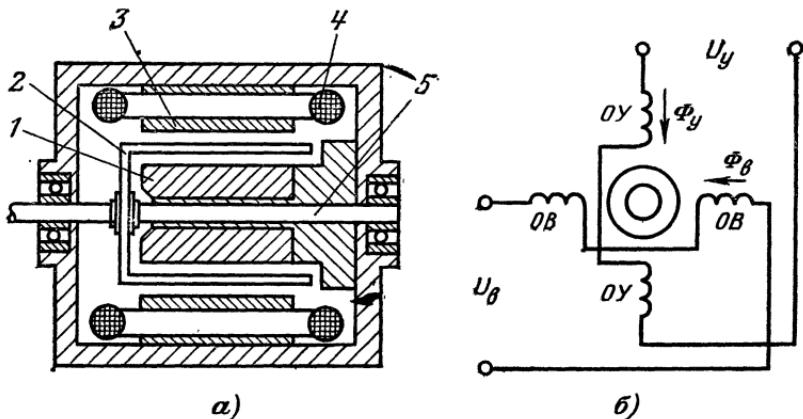


Рис. 5-6. Двухфазный асинхронный двигатель переменного тока с полым немагнитным ротором.

а — конструкция; *б* — схема.

ном пространстве полости ротора, что приводит к уменьшению магнитного потока и КПД двигателя¹. Применение внутреннего статора позволяет уменьшить общий воздушный зазор между цилиндром ротора и внешним и внутренним статорами до 0,6—1,0 мм. Это обуславливает увеличение КПД двигателя и относительное уменьшение габаритов. В двухфазных асинхронных электродвигателях часто статор с обмотками располагают внутри ротора двигателя. В пазы внешнего статора 3 закладываются две обмотки 4 таким образом, чтобы магнитные оси их были взаимно перпендикулярны (рис. 5-6, б). Одна из обмоток статора является возбуждающей *OB* и подключается к источнику питания переменного тока с напряжением постоянной амплитуды U_b . Вторая обмотка

¹ КПД двигателя — это отношение отдаваемой им полезной мощности к подводимой к нему мощности.

ка является управляющей OY и обычно питается напряжением переменного тока U_y той же частоты, что и возбуждающая обмотка OB , но сдвинутым по фазе относительно напряжения U_b на 90° .

Принцип действия двухфазного асинхронного двигателя основан на явлении вращающегося магнитного поля, которое возникает при подаче на обмотки статора OB и OY напряжений постоянной амплитуды, но сдвинутых по фазе на 90° .

Частота вращения магнитного поля (синхронная частота) постоянна и определяется выражением

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (5-8)$$

где f — частота питающего напряжения; p — число пар полюсов обмотки статора.

В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с вихревыми токами, наводимыми в стенках ротора этим же вращающимся магнитным полем, в электродвигателе создается вращающий момент, увеличивающий ротор в сторону вращения магнитного поля. Так как токи ротора являются следствием пересечения его вращающимся полем, то электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя может создаваться только при условии, когда ротор его вращается несколько медленнее вращающегося поля. При этом вращение ротора тем медленнее, чем больше механическая нагрузка на валу двигателя. Во время холостого хода двигателя, когда его вращающий момент преодолевает лишь незначительный тормозящий момент от механических потерь на трение в подшипниках и ротора о воздух, ротор вращается почти синхронно с вращающимся полем и токи в стенках ротора незначительны. В случае механической нагрузки на валу двигателя ротор отстает от вращающегося поля больше, чем при холостом ходе. При этом условии токи в стенках ротора возрастают и их взаимодействие с вращающимся полем обеспечит необходимый вращающийся момент двигателя.

Свойства двухфазных асинхронных двигателей в установленном режиме ($n = \text{const}$) определяются их статическими характеристиками: механической и регулировочной.

Механической характеристикой называется зависимость вращающего момента M от частоты вращения n

ротора при постоянных напряжениях возбуждения U_B и управления U_y .

Двухфазные асинхронные двигатели, применяемые в качестве исполнительных устройств, имеют механические характеристики, показанные на рис. 5-7, а. Они отсекают на оси ординат отрезки, пропорциональные пусковому моменту M_{n1} , а на оси абсцисс — отрезки, пропорциональные частоте вращения холостого хода n_0 . При

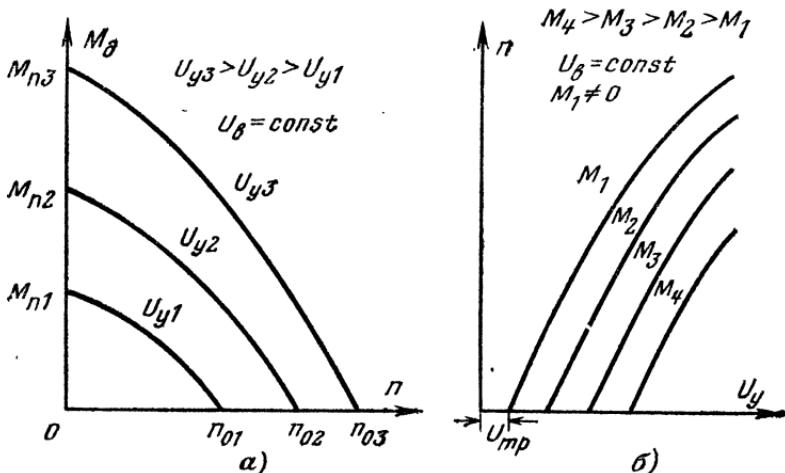


Рис. 5-7. Статические характеристики двухфазного асинхронного двигателя.

а — механические характеристики; б — регулировочные характеристики.

изменении частоты вращения ротора от $n=0$ до $n=n_0$ вращающий момент на валу двигателя уменьшается. Это достигается путем увеличения активного сопротивления ротора и делает характеристики более линейными.

Особенностью механических характеристик (рис. 5-7, а) является то, что их пусковой момент (M_{n1} , M_{n2} , M_{n3}) равен максимальному моменту, полученному при скорости $n=0$.

Регулировочной характеристикой называется зависимость частоты вращения ротора n от управляемого напряжения U_y при постоянном значении момента нагрузки на валу. Она устанавливает связь между входной U_y и выходной n величинами двигателя. Регулировочные характеристики асинхронного двигателя приведены на

рис. 5-7, б. Значение управляющего напряжения, при котором ротор двигателя начинает вращаться, называется напряжением трогания двигателя $U_{\text{тр}}$. Оно зависит от значения момента нагрузки на валу. При увеличении момента нагрузки $U_{\text{тр}}$ возрастает. От $U_y=0$ до $U_y=U_{\text{тр}}$ находится зона нечувствительности. Исполнительные двигатели должны иметь минимальные зоны нечувствительности, так как при этом уменьшаются погрешности автоматических систем регулирования.

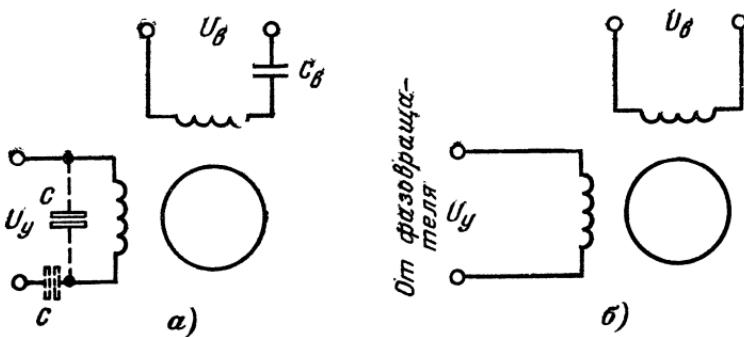


Рис. 5-8. Схемы управления двухфазных асинхронных двигателей.
а — амплитудное; б — фазовое.

Управление двухфазными асинхронными двигателями осуществляется двумя способами: изменением амплитуды напряжения на обмотке управления U_y или изменением угла сдвига фаз между напряжениями возбуждения U_B и управления U_y . Первый способ регулирования частоты вращения называется *амплитудным*, второй — *фазовым*. Применяемые в системах автоматики двухфазные асинхронные двигатели управляются в подавляющем большинстве случаев первым способом. Амплитудное управление показано на рис. 5-8, а. Необходимый фазовый сдвиг между напряжениями U_B и U_y осуществляется подбором емкости конденсатора C_B в цепи возбуждения двигателя. Для компенсации индуктивного сопротивления в цепь обмотки управления включается последовательно или параллельно конденсатор C (на рис. 5-8, а показано пунктиром).

По схеме на рис. 5-8, б осуществляется фазовое управление электродвигателем. Амплитуды напряжений U_B и U_y постоянны. Сдвиг фаз между U_B и U_y осущест-

вляется фазовращателем, который выполняет роль устройства управления.

В заключение следует отметить, что существенным недостатком двухфазных асинхронных двигателей является низкий КПД, который лежит в пределах от 15 до 30%. По этой причине мощность таких двигателей не превышает 10—20 Вт.

5-6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ

а) Основные сведения

Как было указано в гл. 1, в некоторых автоматических системах управления в качестве исполнительных устройств применяются электромагнитные муфты. Последние, являясь промежуточными элементами между приводным двигателем и ведомым валом и обладая переменным скольжением, позволяют регулировать частоту вращения выходного вала системы (см. рис. 1-6). Значение скольжения зависит от управляющего напряжения, поступающего на вход электромагнитной муфты с предыдущего элемента системы. Следует отметить, что энергия, затрачиваемая в цепи управления муфты, незначительна по сравнению с энергией, передаваемой ведомому валу от двигателя.

В зависимости от способа создания переменного скольжения электромагнитные муфты можно разделить на два основных типа: *муфты трения* и *муфты скольжения*.

У муфт первого типа вращающий момент на выходном валу создается путем трения, а у муфт второго типа вращающий момент возникает в результате взаимодействия токов, возникающих в якоре, с вращающимся магнитным потоком индуктора.

В свою очередь муфты трения бывают двух видов: *муфты сухого трения* и *муфты вязкого трения*.

б) Электромагнитные муфты сухого трения (фрикционные)

Муфта сухого трения представляет собой устройство, которое связывает ведомый вал с валом приводного двигателя за счет поджатия электромагнитом фрикционного элемента. При выключении электромагнита ведомый вал и вал приводного двигателя разобщаются. На рис. 5-9 в качестве примера представлена схема реверсивной

муфты сухого трения. Шестерни 2 и 3 вращаются с постоянной скоростью от приводного электродвигателя 1. Управление осуществляется при помощи электромагнитов 6 и 13, на обмотки 5 и 12 которых поступают сигналы от управляющего устройства (на рисунке не показано). При включении электромагнита 13 (как показано на рисунке) его якорь 11 поджимает фрикционный диск 15 к торцу шестерни 2. Шестерня 10 жестко связана с якорем 11 электромагнита и фрикционным диском 15, поэтому вращение ведущего вала 16 приводного двигателя 1 через шестерню 2, фрикционный диск 15 и

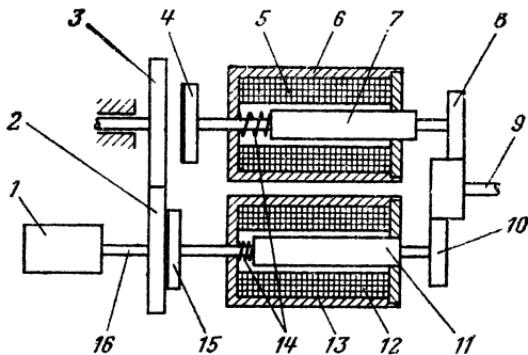


Рис. 5-9. Реверсивная муфта сухого трения.

шестерню 10 передается к выходному (ведомому) валу 9. При отключении электромагнита 13 диск 15 отводится от шестерни 2 пружиной 14. Для вращения ведомого вала 9 в обратную сторону необходимо подать управляющий сигнал на обмотку 5 электромагнита 6. Под действием магнитного потока, создаваемого обмоткой 5, якорь 7 втягивается и фрикционный диск 4 поджимается к торцу шестерни 3. В этом случае вращение шестерни 3 через фрикционный диск 4 и шестерню 8 передается на выходной вал 9, который будет вращаться в обратную сторону. Фрикционные диски 4 и 15 изготавливаются из стали, чугуна, бронзы, пластмассы, фибры и других материалов.

Достоинством электромагнитных муфт сухого трения является малая мощность управления, а основным недостатком — неплавный характер изменения частоты вращения ведомого вала.

в) Муфты вязкого трения

Принцип действия муфт вязкого трения (иначе называемых *порошковыми* или *магнитно-эмulsionными*) основан на эффекте сцепления двух поверхностей, разделенных зазором с ферромагнитным наполнителем, который изменяет свою вязкость под действием магнитного поля. Если ферромагнитный наполнитель поместить в магнитное поле, то сцепление между частицами увеличивается и они слипаются относительной подвижности. Наполнитель, помещенный

между поверхностями ведущей и ведомой частей муфты, может осуществлять между ними связь при создании магнитного поля путем пропускания электрического тока через обмотку электромагнита, расположенного соответствующим образом.

Ферромагнитный наполнитель представляет собой смесь ферромагнитного материала и смазывающей среды и обычно называется ферромагнитной супензией. Последние могут быть выполнены на твердой и жидкой основе. В качестве ферромагнитного материала, который является основным элементом супензии, применяется карбонильное железо с размерами частиц от 0,5 до 50 мкм. Супензии на твердой основе выполняют в виде смеси порошка карбонильного железа с тальком, графитом, окисью цинка. Для супензий на жидкой основе применяется жидкость, имеющая малую вязкость и химически стойкая относительно железа (керосин, машинное масло, хлористый бензол, специальные масла). Упрощенная схема порошковой муфты изображена на рис. 5-10. Ведущая 2 и ведомая 4 части представляют собой стальные диски, насаженные на ведущий и ведомый валы. Управляющая обмотка 3

уложена в корпусе 1. Промежуток между ведущим 2 и ведомым 4 дисками заполнен ферромагнитной массой 6. Для предотвращения вытекания ферромагнитной массы муфта имеет уплотнения 5 и 7. При отсутствии тока в обмотке управления 3 передаваемый момент от ведущего вала к ведомому очень мал и определяется вязким трением ферромагнитной массы. При протекании тока по обмотке управления возникает магнитное поле. В результате этого частицы железа намагничиваются и появляются силы сцепления между частицами и поверхностями дисков 2 и 4. В этом случае от ведущего вала к ведомому передается значительный момент. Изменением тока в обмотке 3 можно управлять силами сцепления, а следовательно, можно регулировать частоту вращения ведомого вала. Существует много разновидностей конструкций порошковых муфт, и все они, как правило, имеют плавную зависимость передаваемого момента от тока в управляющей обмотке. Это свойство делает удобным применение таких муфт в автоматических системах регулирования.

Основными достоинствами порошковых муфт являются: малая потребляемая мощность сигнала управления, хорошие динамические свойства, проявляющиеся при большом значении максимального ускорения ведомого вала, отсутствие толчков при плавном изменении управляющего сигнала.

К основным недостаткам можно отнести возможность оседания ферромагнитных частиц и значительная масса, приходящаяся на единицу мощности.

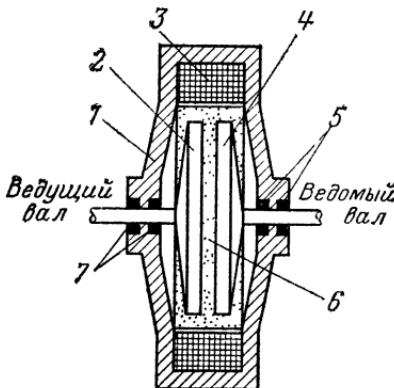


Рис. 5-10. Порошковая муфта дискового типа.

г) Муфты скольжения

В муфтах скольжения так же, как и в муфтах трения, магнитное поле создается постоянным током. Однако по принципу действия эти муфты ближе всего к асинхронным двигателям. Схема муфты скольжения приведена на рис. 5-11. Муфта скольжения представляет собой две несвязанные между собой механически вращающиеся части — индуктор 2 и якорь 4. Индуктор 2 закрепляется на ведущем валу 1 приводного двигателя и выполняется в виде системы полюсов, на которых расположена обмотка 3. Она питается от источника постоянного тока через контактные кольца 6. Якорь 4 муфты

может быть выполнен в виде короткозамкнутой обмотки («беличьего колеса»), полого стакана или в форме массивного ротора. При вращении индуктора 2 его магнитное поле пересекает якорь 4 и индуцирует в нем токи, взаимодействие которых с магнитным полем индуктора создает вращающий момент, передаваемый на ведомый вал 5. Таким образом, за счет магнитной связи ведущая часть (индуктор) муфты увлекает за собой ведомую (якорь). Частота вращения ведомой части муфты обычно меньше, чем частота вращения магнитного поля. Если скорости якоря и индуктора равны, то вращающий момент, передаваемый муфтой от ведущего вала 1 к ведомому 5, равен нулю.

От асинхронного двигателя, а также от муфт трения муфты скольжения выгодно отличаются тем, что их вращающие моменты и частота вращения легко поддаются регулированию путем изменения тока возбуждения индуктора.

5-7. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛИ УСТРОЙСТВА

Гидравлические исполнительные устройства (гидравлические двигатели) преобразуют энергию давления жидкости в механическую энергию перемещения или вращения.

В зависимости от вида управляющего элемента различают гидравлические исполнительные устройства с дроссельным и объемным регулированием.

Гидравлические исполнительные устройства с дроссельным регулированием работают при постоянном давлении рабочей жидкости и управляются от специального устройства — переменного дросселя. В качестве дроссе-

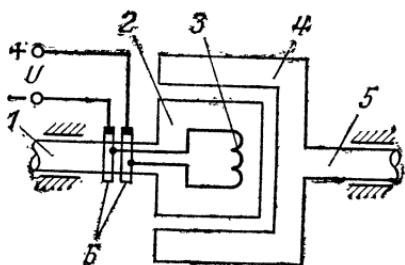


Рис. 5-11. Схема муфты скольжения.

Рис. 5-11. Схема муфты скольжения.

От асинхронного двигателя, а также от муфт трения муфты скольжения выгодно отличаются тем, что их вращающие моменты и частота вращения легко поддаются регулированию путем изменения тока возбуждения индуктора.

5-7. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛИ УСТРОЙСТВА

Гидравлические исполнительные устройства (гидравлические двигатели) преобразуют энергию давления жидкости в механическую энергию перемещения или вращения.

В зависимости от вида управляющего элемента различают гидравлические исполнительные устройства с дроссельным и объемным регулированием.

Гидравлические исполнительные устройства с дроссельным регулированием работают при постоянном давлении рабочей жидкости и управляются от специального устройства — переменного дросселя. В качестве дроссе-

лей обычно используются золотники, усилители типа со-пло—заслонка и струйные трубы, которые рассмотрены в гл. 3.

Гидравлические исполнительные устройства с объемным регулированием управляются за счет изменения производительности насоса, подающего рабочую жидкость в гидравлический двигатель с вращательным движением. В качестве рабочей жидкости применяются нефтяные масла, синтетические жидкости, спирто-глицериновая смесь и др.

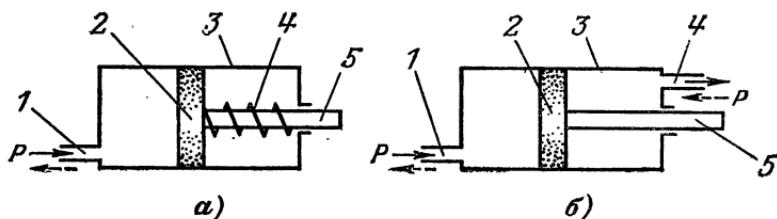


Рис. 5-12. Схемы поршневых двигателей.

a — простого действия; *б* — двойного действия.

По виду движения выходного вала гидродвигатели делятся на гидродвигатели возвратно-поступательного движения (поршневые двигатели) и гидродвигатели вращательного движения или гидромоторы (применяются в гидравлических исполнительных устройствах с объемным регулированием).

Основные конструктивные схемы поршневых двигателей показаны на рис. 5-12. В поршневом двигателе простого действия (рис. 5-12, *а*) движение поршня 2 вправо производится усилием давления P рабочей жидкости, подводимой в полость силового цилиндра 3 через штуцер 1. Движение поршня влево осуществляется за счет усилия пружины 4. При этом жидкость из полости силового цилиндра 3 отводится через штуцер 1. Шток 5 с одной стороны жестко связан с поршнем 2, а с другой стороны — с объектом управления или с его органами.

В гидроцилиндре двойного действия (рис. 5-12, *б*) движение поршня 2 в ту или другую сторону осуществляется усилием давления P рабочей жидкости. При подаче жидкости в полость силового цилиндра 3 через штуцер 1 поршень 2 со штоком 5 перемещается вправо и через штуцер 4 осуществляется слив жидкости (на рисунке показано сплошными стрелками). Для перемещения поршня 2 влево жидкость подается через штуцер 4, а слив ее осуществляется через штуцер 1 (на рисунке показано пунктирными стрелками).

В приведенных конструкциях поршневых двигателей ход поршня обычно не превышает 3500 мм.

В поршневых двигателях поступательное движение поршня 2 может быть преобразовано во вращательное движение вала 7 с помощью шатунно-кривошипного механизма, состоящего из тяг 4 и 5 (рис. 5-13). В этом случае, как правило, используются поршневые двигатели двойного действия. Принцип работы такого поршневого двигателя состоит в следующем. При подаче жидкости в полость силового цилиндра 3 через штуцер 1 поршень 2 перемещается вправо, например, на расстояние l . В этом случае поршень 2 и тяги 4 и 5 шатунно-кривошипного механизма занимают положение,

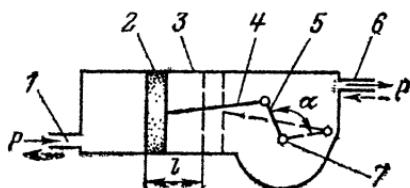


Рис. 5-13. Схема поршневого двигателя с шатунно-кривошипным механизмом.

показанное на рис. 5-13 пунктиром. Вал 7 поворачивается на угол α . Через штуцер 6 происходит слив жидкости. При подаче жидкости через штуцер 6 поршень 2 перемещается влево и через тяги 4 и 5 шатунно-кривошипного механизма осуществляет вращение вала 7.

Основными достоинствами гидравлических двигателей является то, что они допускают значительные кратковременные перегрузки (до 5—7-кратных), характеризуются большими выходными моментами или усилиями при малых габаритах и могут обеспечить угловые ускорения выше 20 000 рад/с².

К существенным недостаткам можно отнести большую массу, значительную мощность управления, а также трудности ликвидации повреждений. Поэтому гидравлические исполнительные устройства чаще всего применяются в системах, где необходимо кратковременно развивать значительные усилия и моменты.

5-8. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Указанные исполнительные устройства строятся по той же схеме, что и гидравлические. Отличия пневматических устройств от гидравлических обусловлены различиями в свойствах газа и рабочей жидкости. Сжимаемость газа оказывает значительное влияние на быстродействие системы, особенно при значительной нагрузке или при значительных ускорениях.

Пневматические исполнительные устройства работают на сжатом воздухе, газе низкого давления 1—1,5 МПа, а также на горячем газе высокого давления 15—20 МПа. В качестве последнего могут быть использованы отработанные газы реактивного двигателя или специального газогенератора.

Пневматические исполнительные устройства по конструкции делятся на поршневые и мембранные.

Поршневые пневматические исполнительные устройства так же, как и гидравлические, имеют силовой цилиндр с поршнем и дроссельное устройство. По конструкции и принципу действия они аналогичны поршневым пневматическим усилителям, рассмотренным в § 3-15.

Мембранные пневматические исполнительные устройства могут быть одностороннего и двойного действия. В устройствах одностороннего действия движение мембраны в одном направлении производится усилием возрастающего давления газа, а в противоположном — усилием пружины. В устройствах двойного действия движение мембраны в обе стороны осуществляется усилием возрастающего давления газа.

В качестве примера на рис. 5-14 приведена схема мембранного исполнительного устройства одностороннего действия. Оно состоит из корпуса 1, верхней крышки 2, которая плотно прижимает к корпусу эластичную мембрану 3, изготовленную из прочной прорезиненной ткани или других материалов. Под мембраной 3 расположен металлический диск 4, опирающийся на направляющий стакан 6. Последний с диском 4 к мемbrane 3 поджимается пружиной 9. К центру стакана 6 прикреплена тяга 8, на другом конце которой жестко закреплен регулирующий клапан 10.

Работа мембранных исполнительных устройств заключается в следующем. Под воздействием давления воздуха P , подаваемого через патрубок 5, происходит прогиб мембраны 3, который передается через тягу 8 на регулирующий

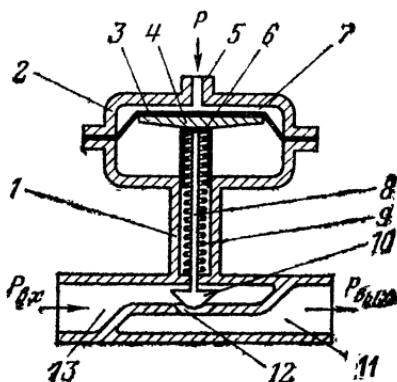


Рис. 5-14. Схема пневматического мембранного исполнительного устройства одностороннего действия.

клапан 10, закрывающий отверстие 12. В этом случае газ (жидкость), имеющий давление $P_{вх}$, из полости 13 не поступает в полость 11. При понижении давления воздуха P в полости 7 над мембранный пружина 9 через направляющий стакан 6 и диск 4 прижимает мембрану 3 к верхней крышке 2. При этом тяга 8 и регулирующий клапан 10 перемещаются вверх и открывается отверстие 12. Таким образом, в одном направлении тяга 8 движется под действием возрастающего давления воздуха P , а в противоположном — под действием пружины 9.

Основным недостатком мембранных пневматических исполнительных устройств является малое перемещение тяги, ограничиваемое прогибом мембранны. Максимальное перемещение мембранны может достигать 40 мм.

Пневматические исполнительные устройства отличаются простотой и прочностью конструкции и при массовом изготовлении дешевле электрических.

Часть вторая

СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

ГЛАВА ШЕСТАЯ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И СИГНАЛИЗАЦИИ

6-1. НАЗНАЧЕНИЕ, ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

Прежде чем рассматривать указанные системы, дадим понятие автоматического контроля. Под ним понимается область автоматики, охватывающая методы и средства, которые облегчают или освобождают человека от наблюдения за ходом производственного процесса или состоянием контролируемого объекта.

Автоматические системы контроля предназначены в основном для объективной количественной оценки физико-химических свойств твердых тел, жидкостей и газов; проверки качества обработки или изготовления изделий; количественной оценки размеров изделий после обработки или в процессе обработки; проверки качества сборных и других работ; контроля технического состояния автоматических систем управления, вычислительных устройств и радиоэлектронной аппаратуры. Практически осуществление любой из перечисленных функций автоматического контроля начинается с измерения, т. е. с установления объективной количественной оценки параметра, характеризующего контролируемый процесс.

Любая автоматическая система контроля (см. рис. 1-1, а) состоит из ряда элементов, каждый из которых выполняет определенную задачу.

На рис. 6-1 приведена классификация автоматического контроля.

По способу воздействия на контролируемый объект автоматический контроль бывает: *пассивный* и *активный*. *Пассивный контроль* — это контроль параметров после окончания производственного процесса и сравнение их с эталонными заданными значениями. Основной особен-

ностью пассивного контроля является то, что он не оказывает непосредственного воздействия на ход производственного процесса. В данном контроле при отклонениях параметров от заданных значений не осуществляется автоматическая корректировка их по ходу производствен-

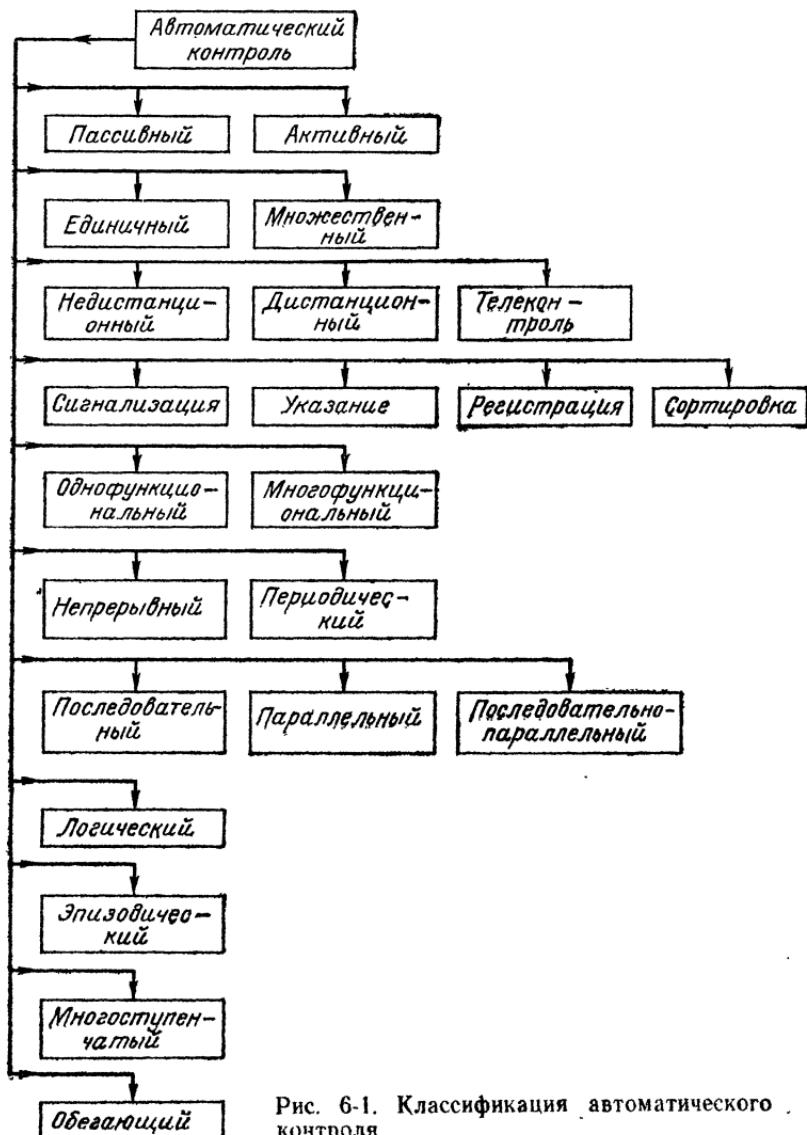


Рис. 6-1. Классификация автоматического
контроля.

ного процесса. Это является основным недостатком пассивного контроля.

Активный контроль — это контроль параметров по ходу производственного процесса с целью воздействия на него в том случае, если контролируемые параметры вышли из заданного допуска. В указанном контроле автоматически происходит корректировка производственного процесса (например, подналадка машины или остановка машины при наличии неисправностей в ней). Особенностью активного контроля является то, что в нем имеются связи между операциями контроля и управления режимами работы машин, механизмов и автоматических линий.

По числу контролируемых параметров автоматический контроль делится на *единичный* и *множественный*. Система, которая служит для контроля только одного параметра, относится к системам *автоматического единичного* или *одномерного контроля*, а система, предназначенная для одновременного контроля нескольких параметров, относится к *автоматическим системам множественного* или *многомерного контроля*. При *множественном контроле* обычно полученные результаты контроля группируют на диспетчерском пункте для того, чтобы получить сразу общую картину о ходе производственно-го процесса. Такие *системы множественного контроля* чаще называются *автоматическими системами централизованного контроля*, которые будут рассмотрены ниже.

По территориальному признаку автоматический кон-троль подразделяется на *недистанционный*, *дистанционный* и *телеcontrol*. При *недистанционном* (местном) автоматическом контроле контроль параметров осуществляется недалеко от контролируемого объекта, а при *дистанционном* автоматическом контроле расстояние между контролируемым объектом и пунктом контроля колеблется от нескольких десятков метров до нескольких километров. *Телеcontrol* применяется в том случае, если контроль параметров осуществляется на значи-тельном расстоянии от контролируемого объекта. При этом контроле указанное расстояние лежит в пределах от нескольких километров до миллионов.

По выполняемым заключительным функциям различают *системы автоматической сигнализации, указания, регистрации и сортировки*. *Автоматическая сигнализа-ция* — это автоматический контроль критических или ха-

рактерных значений контролируемых параметров. Автоматические системы указания ведут измерение того или иного контролируемого параметра с указанием его абсолютного значения воспроизводящим элементом системы. К автоматическим системам регистрации относятся такие системы, которые осуществляют запись значений контролируемых параметров. Автоматические системы сортировки предназначены для сортировки изделий в зависимости от значения контролируемого параметра.

По числу заключительных функций автоматические системы контроля делятся на одно- и многофункциональные. Однофункциональные системы — это такие системы, выполняющие только функции сигнализации, или указания, или регистрации. Под многофункциональными системами понимаются такие системы, которые осуществляют одновременно несколько функций (например, сортировку и сигнализацию или же сортировку, сигнализацию и регистрацию).

По характеру контроля во времени бывают автоматические системы непрерывного и периодического контроля.

Кроме того, различают также последовательный, параллельный и последовательно-параллельный контроль; логический контроль, при котором периодичность и длительность подчиняются определенному алгоритму функционирования; эпизодический контроль; многоступенчатый контроль и обегающий контроль с периодическим подключением различных источников информации.

Следует заметить, что применение того или иного автоматического контроля, а также выбор системы контроля зависят от ряда факторов, например от способа управления производственными процессами, требуемой точности контроля, экономического эффекта и надежности автоматических систем контроля и т. д.

В настоящее время разработано и применяется в технике большое разнообразие методов и схем автоматического контроля. В качестве примера рассмотрим только две схемы автоматического контроля.

На рис. 6-2 приведена схема автомата для измерения высоты деталей с целью их отбраковки. Деталь 2 находится на ленте 1 транспортера. При движении ленты 1 деталь 2 проходит под щупом 3, который управляет подвижным контактом 5 контактного датчика. В момент измерения щуп 3 соприкасается с измеряемой деталью 2.

Если размер последней имеет отклонение от допустимого значения, то подвижный контакт 5 замыкается с одним из неподвижных контактов 4 или 6. Зазор между неподвижными контактами 4 и 6 соответствует размеру детали 2 с допустимыми отклонениями. Если размер детали соответствует допустимым отклонениям, то подвижный контакт 5 не замыкается ни с одним из неподвижных контактов. При этом за счет источника смещения E_c лампа L закрыта. Реле 7 и 8 не срабатывают, так как по их обмоткам протекают очень малые токи. При замыкании контакта 5 с одним из неподвижных контактов 4 или 6 на одну из сеток двойного триода L от контактного датчика поступает положительный сигнал, который повышает потенциал на сетке и одновременно из реле 7 или 8 срабатывает, включая исполнительный механизм, сбрасывающий с ленты 1 транспортера проверяемую деталь 2 влево или вправо в зависимости от знака отклонения. Применение электронной лампы повышает чувствительность схемы, потому что в этом случае можно зазоры между подвижным контактом 5 и неподвижным контактами 4 и 6 уменьшить до нескольких микрон.

Рассмотренная схема автомата относится к пассивному, единичному, недистанционному, многофункциональному (сортировка, сигнализация, регистрация) и периодическому автоматическому контролю.

Следует отметить, что для контроля линейных размеров деталей в технике применяют также и бесконтактные системы, которые имеют по сравнению с контактными системами большую надежность и большой срок службы.

На рис. 6-3, а показана схема дистанционного термометра сопротивления. Она состоит из моста, образован-

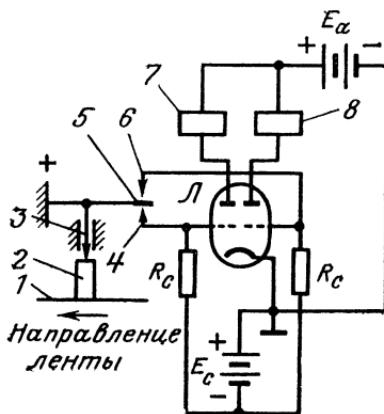


Рис. 6-2. Схема автомата для измерения высоты деталей.

ного из манганиновых резисторов R_1 , R_2 , R_3 и терморезистора R_t , а также магнитоэлектрического логометра L . Резисторы R_1 , R_2 и R_3 , как правило, устанавливаются в одном корпусе с логометром, а терморезистор R_t помещается обычно на некотором расстоянии от мостовой схемы и логометра. Он устанавливается в контролируемой среде. Логометр имеет две рамки, одна из которых подключается в измерительную диагональ моста $a-b$, а другая — к источнику питания U , т. е. в диагональ $c-d$.

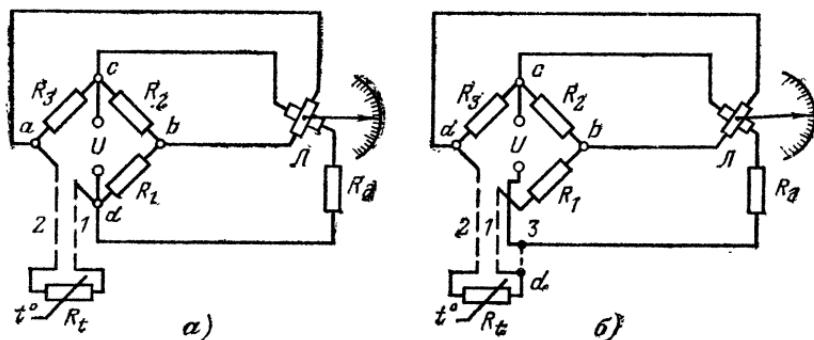


Рис. 6-3. Схема дистанционного термометра сопротивления.
а — без температурной компенсации; б — с температурной компенсацией.

При изменении температуры контролируемой среды происходит изменение сопротивления R_t , в результате чего ток в рамке, включенной в измерительную диагональ моста $a-b$, изменяется. При этом поворачивается подвижная система логометра на угол, пропорциональный изменению температуры среды. В схеме погрешность, которая возникает за счет изменения питающего напряжения, почти сведена к нулю. Это достигается тем, что в схеме применен логометр, который измеряет отношение токов в его рамках. Поэтому указанное отношение при колебаниях напряжения питания остается постоянным.

В рассмотренной схеме основной погрешностью является температурная погрешность, возникающая за счет изменения сопротивления соединительных проводов в результате колебаний температуры окружающей среды. Для уменьшения указанной погрешности применяют схему, показанную на рис. 6-3, б. В схеме терморезистор

R_t соединяется с остальной частью схемы с помощью трех проводов 1—3. При этом сопротивление провода 1 суммируется с сопротивлением плеча R_1 , а сопротивление провода 2 — с сопротивлением плеча R_t . Следовательно, соединительные провода 1 и 2 будут включены в смежные плечи моста. Поэтому при изменении сопротивлений проводов 1 и 2 под действием температуры окружающей среды ток в измерительной диагонали $a-b$ моста почти не изменяется.

Рассмотренные схемы относятся к пассивному, единичному, дистанционному, многофункциональному (регистрация, сигнализация) и непрерывному автоматическому контролю.

6-2. НЕБАЛАНСНЫЕ И БАЛАНСНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

а) Небалансная автоматическая система измерения

Небалансная (некомпенсационная, неуравновешенная) система относится к системам прямого метода измерения. Данная система основана на непосредственном (без уравновешивания) измерении выходного параметра датчика и имеет разомкнутую цепь воздействий. Структурная схема небалансной системы приведена на рис. 6-4, а.

Контролируемый параметр $KП$ воспринимается датчиком D , на выходе которого получают, как правило, электрическую величину, пропорциональную контролируемому параметру. Далее эта величина поступает на преобразующее устройство $ПУ$, где происходит усиление, и только после этого подается на воспроизводящее устройство $ВУ$, в котором происходит измерение контролируемого параметра.

Небалансные системы просты по своей конструкции, но они обладают погрешностями, которые возникают в результате внешних воздействий (изменение напряжения, температуры), а также внутренних факторов, возникающих в результате изменения параметров элементов, входящих в систему. В небалансных системах, в которых в качестве воспроизводящего устройства применяется логометр, погрешность, вызванная за счет изменения напряжения питания, почти сводится к нулю (см. § 6-1). Для получения высокой точности небалансные

системы изготавляются без преобразующего устройства, но такие системы имеют малую выходную мощность.

В качестве примера *небалансной измерительной системы* рассмотрим принципиальную схему радиационного пирометра, показанную на рис. 6-4, б. Излучение, испускаемое раскаленным телом 1, с помощью объектива 2 концентрируется на рабочем конце термопары 3, которая помещена в стеклянную колбу, наполненную нейтральным газом (обычно аргоном). Для наводки пирометра на раскаленное тело служит окуляр 4. Датчиком

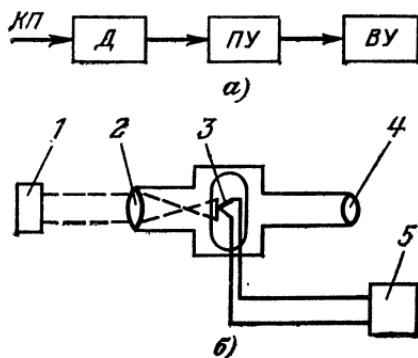


Рис. 6-4. Небалансная измерительная система.

а — структурная схема; б — принципиальная схема радиационного пирометра.

в схеме является термопара 3, преобразующая температуру раскаленного тела в напряжение. Чувствительность термопары зависит от материала, из которого она изготавливается (см. гл. 2). К свободному концу термопары присоединяется указывающий или регистрирующий милливольтметр 5, шкала указанного прибора отградуирована в градусах температуры. При нагревании рабочего конца термопары лучами раскаленного тела в цепи термопары образуется термо-ЭДС, значение которой зависит от разности рабочего и свободного концов термопары. Температура свободного конца термопары в процессе измерения поддерживается постоянной и выбирается обычно такой, при которой происходила градуировка термопары. Если же температура свободного конца термопары не равна градуировочной, то в показания милливольтметра 5 вводится поправка.

Основными достоинствами радиационного пирометра являются простота его конструкции и возможность измерения температуры в различных точках объекта, причем измерения могут осуществляться на некотором расстоянии от него. Вместе с тем он обладает погрешностями, которые вызываются искажениями во всем тракте преобразования контролируемого параметра (поглощение лучей в промежуточной среде и в оптике, температурные изменения окружающей среды, влияющие на сопротивление соединительных проводов и т. д.). Следует отметить, что такого вида погрешности свойственны всем небалансным измерительным системам.

К небалансным измерительным системам можно также отнести схему дистанционного термометра сопротивления с логометром (см. рис. 6-3).

б) Балансная автоматическая система измерения

Балансная (компенсационная, уравновешенная) система применяется для повышения точности и увеличения выходной мощности. Балансные системы можно разделить на *системы непрерывного балансирования* и *системы периодического балансирования*.

На рис. 6-5, а приведена структурная схема *системы с непрерывным балансированием*. Она представляет собой замкнутую цепь воздействий. Контролируемый параметр *КП* поступает на датчик *Д*, с выхода последнего сигнал подается на сравнивающее устройство *СУ* (нуль-орган), в котором происходит сравнение контролируемого параметра с эталонным параметром *ЭП*, поступающим с выхода балансирующего устройства *БУ*. При неравенстве указанных параметров на выходе сравнивающего устройства *СУ* возникает сигнал, равный разности контролируемого и эталонного параметров. Этот сигнал сначала воздействует на преобразующее устройство *ПУ*, а затем на воспроизводящее устройство *ВУ*. Если разность сигналов равна нулю, то вся система находится в покое. При изменении контролируемого параметра *КП* на выходе *СУ* возникает разность сигналов, которая воздействует на преобразующее, балансирующее и воспроизводящее устройства до тех пор, пока значения *КП* и *ЭП* не станут равными между собой.

Система непрерывного балансирования является автоматической системой регулирования (см. рис. 1-1, в),

в которой роль задания выполняет выходной параметр датчика, а роль регулируемого параметра выполняют показания воспроизводящего устройства. Системы непрерывного балансирования можно разделить на *статические* (ошибка зависит от внешних факторов) и *астатические* (ошибка не зависит от внешних факторов).

Статические системы непрерывного балансирования проще, чем астатические системы, и чаще представляют собой усилители с отрицательной обратной связью.

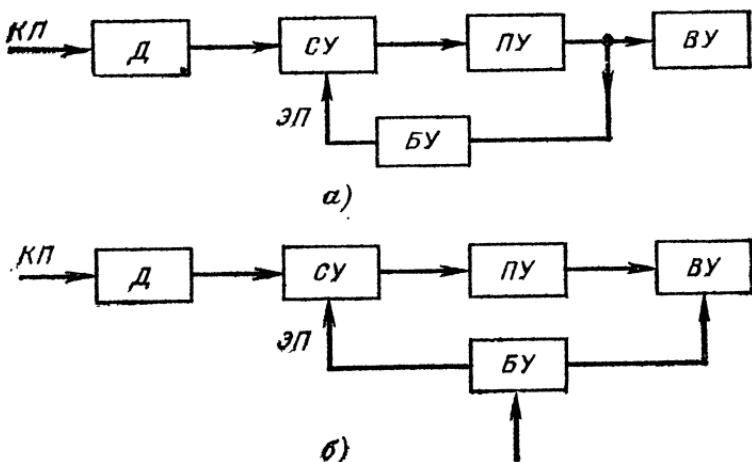


Рис. 6-5. Структурные схемы балансных систем автоматического измерения.

а — непрерывного балансирования; *б* — периодического балансирования.

Примерами систем непрерывного балансирования являются автоматические потенциометры и мосты, которые будут рассмотрены ниже.

Структурная схема *системы периодического балансирования* приведена на рис. 6-5, *б* [25]. В системе периодического балансирования так же, как и в системе непрерывного балансирования, осуществляется сравнение контролируемого параметра с эталонным, но эта система не является автоматической системой регулирования, так как она не имеет замкнутой цепи воздействий. Этalonный параметр ЭП имеет ту же физическую природу, что и контролируемый параметр КП, но он непрерывно изменяется во времени. В результате равенство между КП и ЭП носит периодический характер. В качестве ба-

лансирующего устройства $БУ$ используется генератор, с выхода которого на сравнивающее устройство $СУ$ поступает периодически изменяющийся $ЭП$. Значение $ЭП$ изменяется циклически от нуля до максимально возможного значения $КП$, а затем снова до нуля, т. е. $БУ$ как бы обследует весь диапазон изменения контролируемого параметра. В тот момент, когда последний равен $ЭП$, происходит срабатывание $СУ$ и оно через преобразующее устройство $ПУ$ посылает импульс в воспроизводящее устройство $ВУ$. На последнее в свою очередь от $БУ$ поступает также периодически изменяющее воздействие, которое в точности повторяет эталонный параметр, но может от него отличаться физической природой (например, $ЭП$ является электрической величиной, а воздействие — механической величиной). Система периодического балансирования дает возможность использовать ее для поочередного измерения многих контролируемых параметров. В этой системе отсутствует переходный процесс и связанное с ним запаздывание показаний при изменении контролируемого параметра, но в системе периодического балансирования может быть запаздывание на величину периода вследствие периодичности измерения.

Следует отметить, что балансная автоматическая система измерения является более сложной по сравнению с небалансной системой, но в первой исключаются многие погрешности, которые возникают в результате внешних и внутренних воздействий.

6-3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ И МОСТЫ

Автоматические показывающие и самопишущие потенциометры и мосты служат для измерения с высокой точностью и одно- или многоточечной записи электрических и неэлектрических величин, преобразованных в электрические, а также для контроля производственных процессов, проведения научно-исследовательских работ и т. д. Указанные приборы построены на принципе автоматического измерения контролируемого параметра компенсационным методом. Структурная схема этих приборов изображена на рис. 6-6. Она состоит из следующих основных блоков и узлов: следящей системы $СС$, показывающего и пишущего устройства $ППУ$ и механизма перемещения диаграммы $МПД$. Если контролируемый пара-

метр является неэлектрической величиной (например, температура), то в состав прибора входит датчик D , который предназначен для преобразования неэлектрической величины в электрическую (ЭДС или напряжение).

Рассмотрим коротко основные блоки и узлы.

Следующая система служит для обеспечения автоматизации процесса измерения. Она состоит из измерительной схемы $ИС$ с уравновешивающим (компенсационным)

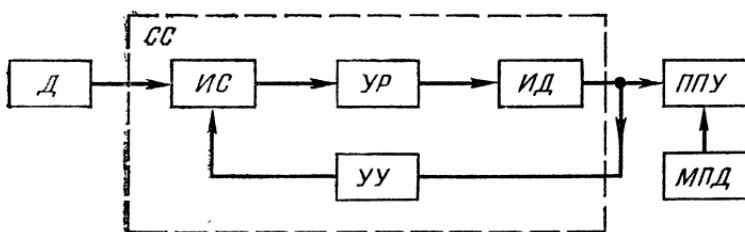


Рис. 6-6. Структурная схема автоматических показывающих и самопишущих потенциометров и мостов.

устройством $УУ$, усилителя рассогласования $УР$ и исполнительного двигателя $ИД$ с редуктором. В $ИС$ происходит сравнение контролируемого параметра, поступающего от D , с компенсирующим параметром, поступающим от $УУ$. Разность указанных параметров усиливается $УР$ и подается на исполнительный асинхронный двигатель, который изменяет выходный сигнал $УУ$ в направлении уравновешивания $ИС$. Одновременно $ИД$ осуществляет перемещение показывающего и пишущего устройства прибора. Запись показаний у автоматических потенциометров и мостов осуществляется на диаграммную ленту с шириной поля записи 250 мм (например, автоматические потенциометры и мосты типов КСП4 и КСМ4) или 275 мм (электронные потенциометры и мосты типов ЭПП и ЭМП).

а) Автоматический потенциометр КСП4

Автоматическим потенциометром называется балансное устройство, которое предназначено для автоматического измерения и записи ЭДС (напряжения).

На рис. 6-7 приведена принципиальная электрическая схема автоматического одноточечного потенциометра

КСП4. Компенсационная измерительная схема (ИС) выполнена в виде моста, который состоит из следующих элементов: реохорда R_p , уравновешивающего измерительную схему; резистора $R_{ш}$, шунтирующего реохорд; резисторов R_h и R_b , определяющих нижний и верхний пределы измерения; резисторов r_h и r_b , выполняющих роль подгеночных резисторов и являющихся частью резисторов R_h и R_b ; резистора R_a , служащего для ограничения тока в измерительной схеме; резистора R_0 , предназначенного для ограничения тока в цепи источника питания; переменного резистора R_0' , необходимого для установки рабочего тока в измерительной схеме; резистора R_m (выполнен из медной проволоки), предназначенного для автоматической компенсации влияния изменения температуры свободных концов термопары; резистора R_c , применяемого для проверки тока в схеме.

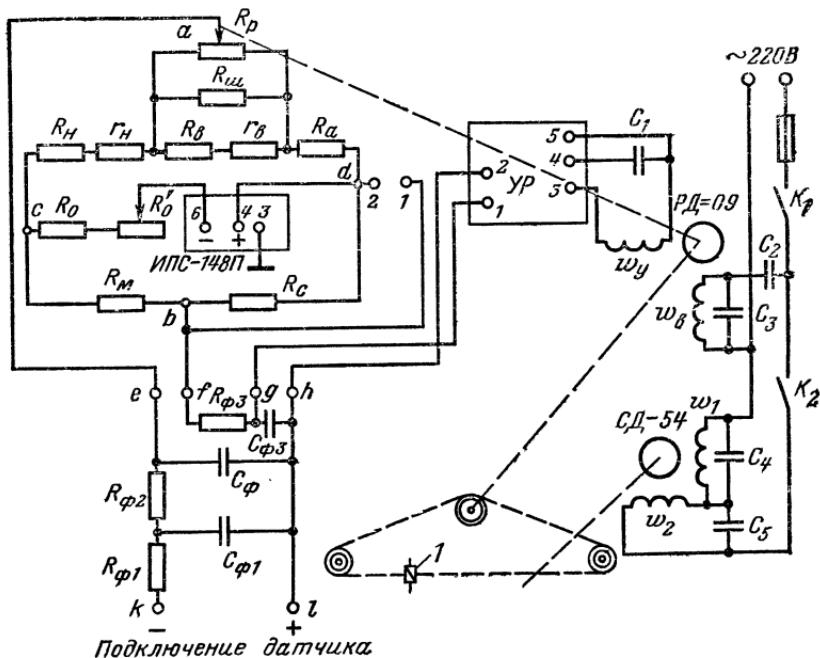


Рис. 6-7. Принципиальная электрическая схема автоматического одноточечного потенциометра КСП4.

чения тока в измерительной схеме; резистора R_0 , предназначенного для ограничения тока в цепи источника питания; переменного резистора R_0' , необходимого для установки значения рабочего тока в измерительной схеме; резистора R_m (выполнен из медной проволоки), предназначенного для автоматической компенсации влияния изменения температуры свободных концов термопары; резистора R_c , применяемого для проверки тока в схеме.

Реохорд R_p является одним из основных элементов измерительной схемы. Он состоит из спиральной непрерывной или секционированной проволоки, которая наматывается на цилиндрическую медную, покрытую изоляционным лаком шину, токосъемного движка и основания. Токосъемный движок реохорда скользит по поверхности реохордной проволоки, с которой снята изоляция в местах перемещения движка. Реохордная проволока, токосъемный движок, катушки сопротивления и токоподводы размещаются на основании. Токосъемный движок реохорда через определенную механическую передачу связан с уравновешивающим асинхронным реверсивным двигателем типа РД-09.

Если КСП4 применяется для измерения температуры, то в качестве датчика Δ могут применяться термопары и телескопы радиационных пирометров, которые развивают ЭДС или электрическое напряжение. Датчик присоединяется к выходным зажимам прибора k , l и через RC -фильтры к точкам e , f , g , h компенсационной измерительной схемы.

Усилитель рассогласования УР предназначен для усиления напряжения сигнала рассогласования, поступающего на зажимы 1 , 2 усилителя с зажимов g , h ИС, до значения, достаточного для приведения в движение двигателя РД-09 с редуктором и кинематической схемы прибора, обеспечивающей измерение и запись контролируемого параметра. В автоматических потенциометрах и мостах типа КС встроены ламповые усилители типа УЭД или полупроводниковые усилители типа УПД. Все усилители состоят из четырех основных блоков: входного блока, усилителя напряжения, усилителя мощности (выходного блока) и источника питания.

Входной блок является важнейшим элементом усилителя, так как от его качества выполнения зависят основные характеристики усилителя, например помехоустойчивость, чувствительность и т. д. Если на вход усилителя подается напряжение постоянного тока, то входной блок с помощью вибропреобразователя типа ВПМ-2 преобразует это напряжение в напряжение переменного тока частотой 50 Гц, которое усиливается усилителем напряжения. Последний, как правило, имеет от двух до четырех унифицированных каскадов усиления по напряжению, которые работают с автоматическим смещением.

Оконечные каскады усилителя имеют отрицательную обратную связь.

Усилитель мощности предназначен для получения выходной мощности усилителя, необходимой для управления реверсивным асинхронным двигателем. Питание усилителей осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

Исполнительный двигатель *ИД* (см. рис. 6-6) служит для перемещения уравновешивающего устройства *УУ*, которое изменяет значение компенсирующего сигнала, а также для перемещения показывающего и записывающего устройства. В автоматических потенциометрах и мостах в качестве исполнительных двигателей применяются асинхронные двухфазные электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором типа РД-09.

Двигатель РД-09 имеет две статорные обмотки: управления w_y и возбуждения w_b , геометрические оси которых в пространстве сдвинуты относительно друг друга на 90° .

Электрическое напряжение на обмотку управления w_y подается от усилителя рассогласования *УР* (рис. 6-7).

Питание обмотки возбуждения w_b двигателя РД-09 осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В через предохранитель, выключатель K_1 и фазосдвигающие конденсаторы C_2 и C_3 . Принцип работы асинхронного двухфазного двигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором описан в гл. 5.

Синхронный двигатель СД-54 предназначен для перемещения диаграммы прибора и переключателей (в многоточечных приборах). Частота вращения синхронного двигателя в отличие от реверсивного асинхронного двигателя постоянна при неизменной частоте напряжения питания.

Двигатель СД-54 имеет две одинаковые обмотки w_1 и w_2 , которые через конденсаторы C_4 и C_5 питаются от сети переменного тока напряжением 220 В.

Питание измерительной схемы осуществляется от стабилизированного источника ИПС-148П (или ИПС-52), который включен в диагональ *cd*. С диагонали *ab* снимается сигнал рассогласования. Источник питается переменным напряжением 6,3 В с частотой 50 Гц. На выходе ИПС-148П получается стабилизированное постоянное напряжение 5 В при токе 5 мА и сопротивлении $1000 \pm$

± 1 Ом. Для того чтобы показания потенциометра КСП4 были достоверными, необходимо проверить в ИС (рис. 6-7) рабочий ток. Для этого к зажимам 1, 2 панели внешнего подключения нормального элемента необходимо подключить образцовый потенциометр класса I или II. Если рабочий ток в схеме установлен правильно, то показания образцового потенциометра будут в пределах 1,019 В $\pm 0,3$ мВ. В противном случае с помощью переменного резистора R_0 устанавливается рабочий ток в ИС.

В потенциометрах КСП4 с целью уменьшения электрических помех на вход прибора включают многозвездные Г- и Т-образные фильтры. Г-образный фильтр (рис. 6-7) включают в приборах КСП4, если время прохождения каретки всей шкалы лежит в пределах от 2,5 до 10 с, а Т-образный фильтр, если указанное время равно 1 с.

Работа автоматического потенциометра КСП4 происходит следующим образом. При изменении контролируемого параметра, например температуры, ЭДС термопары (на рис. 6-7 термопара не показана) изменяется и получаемый сигнал рассогласования с измерительной схемы поступает на вход усилителя рассогласования УР (зажимы 1 и 2). После усиления сигнал рассогласования подается на обмотку управления $ш_y$ реверсивного асинхронного двигателя РД-09, который начинает вращаться и перемещать движок реохорда R_p в ту или иную сторону до наступления равновесия в ИС. При этом движение выходного вала двигателя РД-09 передается через кинематическую передачу каретке 1, перемещающейся прямолинейно. На каретке укрепляются стрелка, перо и движок реохорда R_p . В момент равновесия ИС двигатель РД-09 останавливается и стрелка занимает то положение, которое соответствует значению контролируемого параметра.

В технике широко применяются и многоточечные автоматические потенциометры КСП4. В этих потенциометрах в ИС предусмотрен многоточечный переключатель, назначение которого поочередно автоматически подключать к ИС присоединенные к прибору термопары или другие датчики. Переключение щеток переключателя с одной неподвижной ламели на другую и перемещение их по двум токосъемным кольцам осуществляется синхронным двигателем СД-54 через соответствующую передачу. Для повышения надежности щетки переключателя выполнены

из сплава золото — серебро — медь, а ламели — из вольфрамо-палладиевого сплава. Переключатель датчиков может выполнять на 3-, 6- или 12-точечное переключение. После наступления равновесия в ИС печатающий механизм каретки отпечатывает на диаграммной ленте точку с порядковым номером подключенного для измерения датчика. Спустя некоторое время после включения многоточечного потенциометра на диаграммной ленте образуется ряд точек, имеющих одинаковые номера и показывающих изменение контролируемых параметров во времени.

б) Автоматический уравновешенный мост КСМ4

Автоматическим уравновешенным мостом называется балансное устройство, которое предназначено для автоматического измерения и записи значения сопротивления. Если автоматический мост применяется для измерения и записи температуры, то в качестве датчика используются термометры сопротивления (см. § 2-3), которые устанавливаются непосредственно в месте замера температуры. В этом случае задача измерения температуры сводится к измерению электрического сопротивления термометра. Следует заметить, что автоматический мост имеет очень много общего с автоматическим потенциометром. Основным отличием первого от последнего является отличие измерительной схемы.

На рис. 6-8 показана принципиальная электрическая схема автоматического одноточечного уравновешенного моста КСМ4. Измерительная схема ИС автоматического моста выполнена так же, как и измерительная схема автоматического потенциометра в виде мостовой схемы. В одну диагональ мостовой схемы *cd* подается напряжение питания переменного тока 6,3 В, а с другой диагонали *ab* снимается переменное напряжение сигнала рассогласования, которое усиливается с помощью УР. Измерительная схема состоит из следующих основных элементов: резисторов реохорда R_p и $R_{ш}$, резисторов R_n и r_n , определяющих пределы измерения прибора; резисторов R_g и r_g , которые определяют начало предела измерения; резистора R_b , служащего для ограничения тока в плецах ИС; резисторов R_l , предназначенных для подгонки сопротивления соединительных проводов линии к некоторому необходимому значению; термометра сопротивле-

ния R_t , выполняющего роль датчика, и резисторов R_1 — R_3 , являющихся плечами моста.

Для автоматического моста используется тот же усилитель, что и для автоматического потенциометра, но УР для первого не имеет вибропреобразователя, так как сигнал рассогласования является переменным.

Термометр сопротивления R_t для уменьшения температурных погрешностей включается в ИС по трехпроводной схеме, работа которой описана в § 6-1.

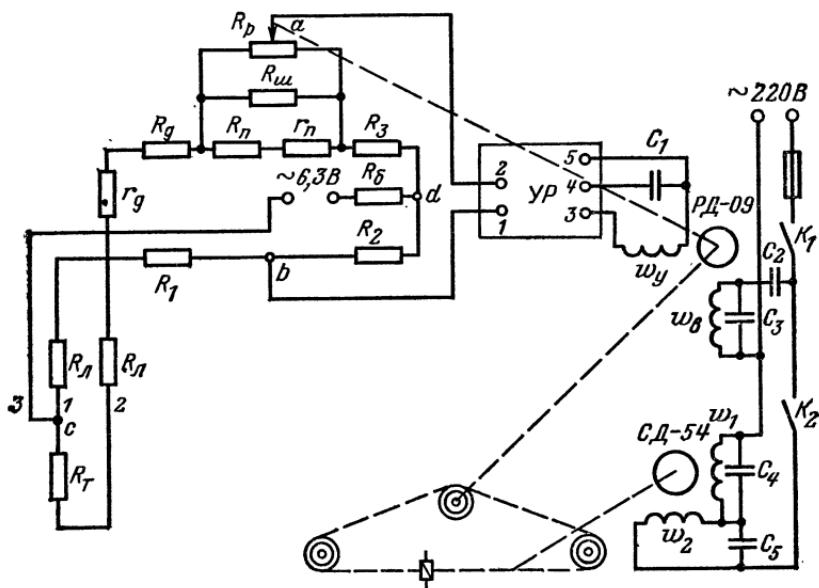


Рис. 6-8. Принципиальная электрическая схема автоматического одноточечного уравновешенного моста КСМ4.

Автоматический одноточечный мост КСМ4 работает следующим образом. При изменении контролируемой температуры происходит изменение сопротивления термометра R_t , в результате чего нарушается равновесие ИС. В этом случае на вход УР подается переменный сигнал рассогласования, который усиливается как по напряжению, так и по мощности. Далее работа автоматического моста происходит так же, как и работа автоматического одноточечного потенциометра.

Следует отметить, что в технике применяются также и многоточечные уравновешенные мосты КСМ4. В этих

мостах в ИС включается многоточечный переключатель, который поочередно автоматически подключает к ИС присоединенные к мосту термометры сопротивления. Переключатель обычно выполняется на 3-, 6- или 12-точечное переключение.

В автоматических многоточечных потенциометрах и мостах типа КС механизм многоточечной записи рассчитан на постоянный цикл печатания, что упрощает конструкцию печатающего механизма. Цикл печати равен 4, 9 и 12 с, а это соответствует прохождению указателем всей шкалы прибора за 1, 2,5 и 10 с.

Основная погрешность показаний КСП4 и КСМ4 на всех отметках шкалы не выше $\pm 0,25\%$, а основная погрешность записи при температуре окружающего воздуха $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности 60% не превышает $\pm 0,5\%$.

6-4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ЦИФРОВЫМ ОТСЧЕТОМ

а) Общие сведения

В современных *автоматических измерительных системах* (АИС) воспроизведение показаний осуществляется в дискретном (цифровом) виде. В этом случае приборы, служащие для измерения параметров, снабжаются или цифровым механизмом, или оптическим индикаторным устройством, которое указывает значение измеряемого параметра в цифровом виде. Полученная информация затем печатается на ленте или бумажном бланке и поступает к оператору или в цифровую ЭВМ.

В основе действия АИС с цифровым отсчетом лежит преобразование непрерывно измеряемой величины в дискретную. Для этого весь диапазон измеряемого параметра (от x_{\min} до x_{\max}) разбивается на равные интервалы Δx (рис. 6-9) и вместо действительных значений измеряемого параметра берутся ближайшие к ним дискретные значения, которые отличаются друг от друга на значение Δx , называемое шагом квантования. Процесс перехода от непрерывного измерения параметра к дискретному называется квантованием по уровню. Шаг квантования обычно выбирается в пределах допускаемой погрешности измерения.

На рис. 6-9 показаны исходная функция (кривая 1) и квантованная функция (ступенчатая кривая 2), а также моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}$, в которые цифровым механизмом или оптическим индикаторным устройством выдаются значения измеряемого параметра, и время преобразования $T_n = t_1 - 0 = t_2 - t_1 = \dots = t_{n+1} - t_n$.

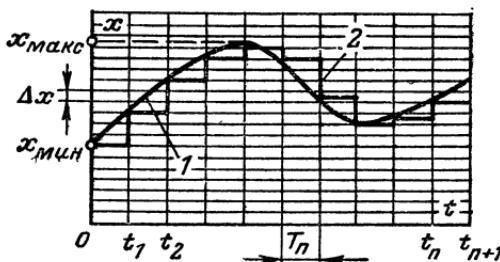


Рис. 6-9. Преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную.

Дискретная форма информации имеет следующие преимущества: является более помехоустойчивой, легко передается на любые расстояния и уменьшает число субъективных ошибок при измерении.

В АИС с цифровым отсчетом основным элементом является преобразователь, служащий для преобразования непрерывной величины измеряемого параметра в дискретную.

Ниже рассматриваются некоторые виды преобразователей.

б) Преобразователи непрерывных величин в дискретные

В настоящее время применяется большое количество преобразователей, которые можно разделить на три основные группы:

1) преобразователи пространственных перемещений в цифровой код;

2) преобразователи электрических величин (напряжений, токов и сопротивлений в цифровой код;

3) преобразователи интервалов времени в цифровой код.

Преобразователи первой группы часто используются для линейных и угловых перемещений. В качестве примера на рис. 6-10 приведен преобразователь в виде кодирующего диска, который устанавливается на оси измерительного механизма. Диск разбивается на концентрические окружности, число которых соответствует числу разрядов кода. На указанные окружности наносят изображение кода в виде проводящих и непроводящих участков, прозрачных и непрозрачных участков и т. д. На один разряд кода требуется одна дорожка символов и одно считывающее устройство. При повороте диска, например, на угол α считывающее устройство, которое является неподвижным, фиксирует код. Последний соответствует углу поворота диска, т. е. значению измеряемого параметра.

Для считывания кода применяются контактные и фотоэлектрические считывающие устройства. В контактных считывающих устройствах считывание производится с помощью неподвижных щеток. При этом, если щетка находится на проводящем участке, передается 1 (единица), а если на непроводящем, то 0 (ноль).

При применении фотоэлектрических считывающих устройств считывание осуществляется следующим образом. Кодирующий диск просвечивается источником света, расположенным по одну его сторону, а с другой стороны диска располагают неподвижные фоточувствительные элементы (фоторезисторы или фотодиоды), которые освещаются через прозрачные участки диска. При каждом положении кодирующего диска будут освещаться только те фоточувствительные элементы, которые соответствуют единицам кода. Комбинация единиц и нулей представляет собой закодированную величину измеряемого параметра.

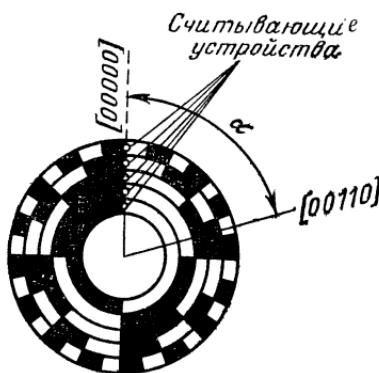


Рис. 6-10. Кодирующий диск.

В промышленности часто применяются также преобразователи пространственных перемещений, у которых угловая величина преобразуется в угол сдвига фаз с помощью фазовращателя (сельсины, врачающиеся трансформаторы).

Преобразователи второй группы широко используются в науке и технике. В этих преобразователях преобразование электрической величины в цифровой код можно осуществить различными способами.

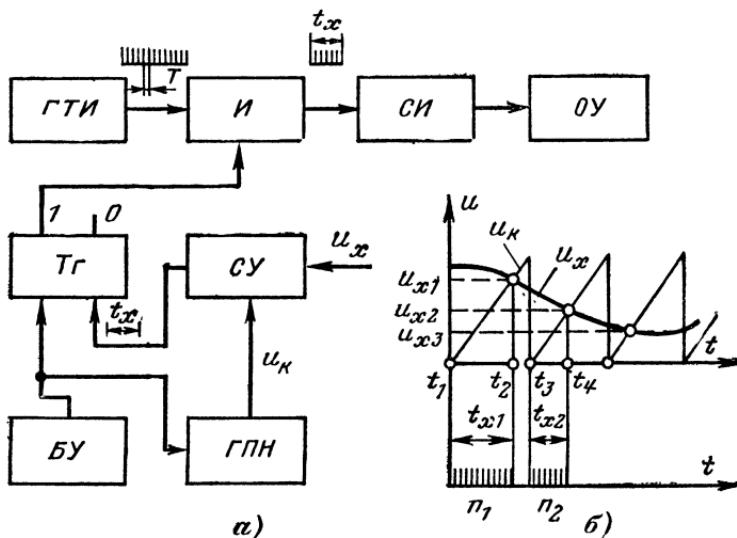


Рис. 6-11. Преобразование напряжения методом временного кодирования.

a — структурная схема; *б* — временные диаграммы.

В качестве примера на рис. 6-11, *a* приведена структурная схема преобразования напряжения методом временного кодирования, сущность которого заключается в том, что сначала измеряемое напряжение u_x преобразуется во временной интервал t_x , пропорциональный значению u_x , а затем t_x преобразуется в цифровой код.

Генератор тактовых импульсов *ГТИ* вырабатывает ряд последовательных импульсов, имеющих одинаковый период T . Указанные тактовые импульсы постоянно поступают на один из входов элемента *И*, на другой вход которой периодически поступают импульсы, имеющие длительность t_x (рис. 6-11, *б*). Блок управления *БУ* в

момент времени t_1 осуществляет перевод счетчика импульсов *СИ* в нуль (на рисунке не показано), запуск генератора пилообразного напряжения *ГПН*, вырабатывающего кодируемое напряжение u_k , и перевод триггера *T₂* в положение 1. При этом с выхода элемента *И* на вход счетчика *СИ* поступают тактовые импульсы.

В сравнивающем устройстве *СУ* происходит сравнение напряжения u_k с измеряемым напряжением u_x . В момент равенства этих напряжений, например в момент t_2 (рис. 6-11, б), на выходе *СУ* появляется импульс, который возвращает триггер *T₂* в положение 0. В этом случае подача импульсов с выхода элемента *И* на вход счетчика *СИ* прекращается. Число тактовых импульсов ($n_1, n_2\dots$), зафиксированное в счетчике *СИ*, соответствует в определенном масштабе интервалу времени t_x , т. е. равно значению кодируемого напряжения u_x , показания которого в цифровом виде фиксируются на отсчетном устройстве *ОУ*. В момент времени t_3 схема возвращается в исходное состояние и на этом заканчивается один цикл кодирования.

Точность второй группы преобразователей зависит от линейности пилообразного напряжения, чувствительности *СУ* и стабильности *ГТИ*.

В преобразователях третьей группы преобразование интервалов времени в цифровой код можно осуществить, например, по схеме, показанной на рис. 6-12. Основными элементами схемы являются: генератор тактовых импульсов *ГТИ*, элемент *И*, счетчик импульсов *СИ*, отсчетное устройство *ОУ*, триггер *T₂* и блок управления *БУ*.

Триггер *T₂*, на который поступают импульсы начала *А* и конца *Б* измеряемого интервала времени t_{AB} , управляет элементом *И*. В момент поступления импульса *А* на один из входов триггера *T₂* на выходе последнего возникает сигнал такой полярности, который открывает элемент *И*. В результате импульсы, имеющие период T , от *ГТИ* через элемент *И* поступают на вход счетчика *СИ*. В момент поступления импульса *Б* на второй вход триггера *T₂* на выходе последнего возникает сигнал такой полярности, который закрывает элемент *И*, и подача тактовых импульсов на вход счетчика *СИ* прекращается. Следовательно, элемент *И* будет открыт в течение времени t_{AB} (рис. 6-12). Число импульсов, определяемое по отсчетному устройству *ОУ*, выражает в извест-

ном масштабе интервал времени t_{AB} . Установка тригера Tg в исходное состояние и сброс показаний счетчика $СИ$ осуществляется блоком $БУ$.

Погрешность измерения t_{AB} зависит от стабильности $ГТИ$, от задержки срабатывания элемента $И$ и погрешности квантования, которая составляет ± 1 импульс. По-

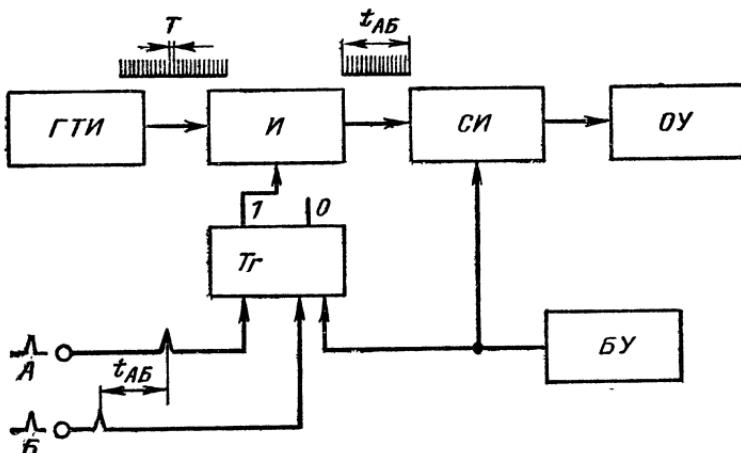


Рис. 6-12. Структурная схема преобразования интервалов времени в цифровой код.

грешность квантования вызвана тем, что импульсы начала и конца измеряемого интервала времени t_{AB} располагаются произвольно по отношению к импульсам $ГТИ$.

в) Цифровые индикаторы (указатели)

Следует отметить, что основным достоинством цифровых индикаторов является отсутствие субъективных ошибок.

В автоматических измерительных системах используются разнообразные индикаторы. Ввиду больших габаритов, большой инерционности и сложности конструкции механические, оптико-механические и электромеханические индикаторы не получили широкого распространения в АИС. В этих системах чаще всего применяются ламповые электролюминесцентные и газоразрядные цифровые индикаторы, которые рассматриваются ниже.

На рис. 6-13 приведены ламповые цифровые индикаторы для индикации одного десятичного разряда. В указанных индикаторах для индикации используются неоновые и лампы накаливания. Цифра или знак в этих индикаторах могут получаться, например, группой горящих ламп, выбираемой с помощью дешифратора. На-

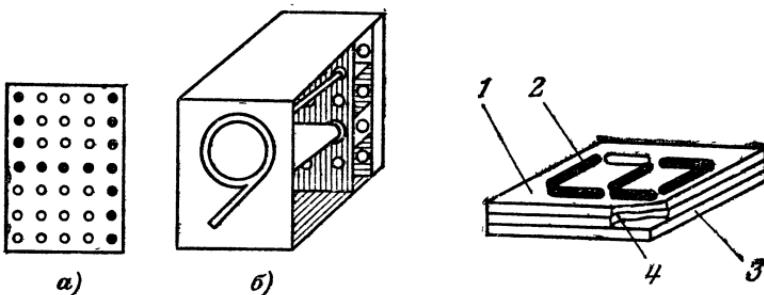


Рис. 6-13. Ламповые цифровые индикаторы.

а — декада из мозаичной сетки; *б* — проекционный цифровой индикатор.

Рис. 6-14. Электролюминесцентный цифровой индикатор.

значение последнего состоит в том, что с помощью его выбираются из общего количества ламп только те лампы, которые используются для образования той или иной цифры или знака (на рис. 6-13, *а* показана цифра 4). К ламповым цифровым индикаторам можно также отнести и проекционный цифровой индикатор (рис. 6-13, *б*), проекционное устройство которого для каждой декады состоит из набора 10—12 миниатюрных ламп накаливания. Луч света от включенной лампы, пройдя через оптическую систему линз и свою диафрагму, в которой вырезаны соответствующие знаки, имеет сечение одного из этих знаков. Затем указанное сечение проектируется на матовый экран в виде цифры или знака (например на рис. 6-13, *б* показана цифра 9).

Ламповые цифровые индикаторы имеют большой срок службы, который определяется сроком службы ламп. Для этих индикаторов, выполненных на лампах накаливания, при максимальной скорости индикации до 15—20 знаков/с он составляет 15 000 ч, а выполненных на неоновых лампах — соответственно 10^6 знаков/с и 50 000 ч.

На рис. 6-14 приведена одна из конструкций **электролюминесцентных цифровых индикаторов**. Она состоит из стеклянной подложки 3, на которую наносится прозрачный электрод 4, слоя люминофора 1 и второго непрозрачного электрода 2, состоящего из семи сегментов, которые образуют контуры цифр от 0 до 9. Электрод 2 может также выполняться из 8, 9 и 14 сегментов. Свечение люминофора зависит от напряжения и частоты источника; оно тем ярче, чем выше последние. Люминофор дает свечение белого, голубого, красного, желтого, зеленого и оранжевого цветов.

Электролюминесцентные цифровые индикаторы являются наиболее перспективными индикаторами. Они имеют большое быстродействие, малые размеры, яркое изображение цифр и незначительную потребляемую мощность.

Основным недостатком указанных индикаторов является сложность схем коммутации при переходе двоичного кода в десятичный.

К *газоразрядным цифровым индикаторам* относятся газоразрядные лампы с холодным катодом (TX-4Б, TX-5Б, TX-13Б и др.), декатроны (ОГ-3, А-102, А-103 и др.) и индикаторные лампы.

В настоящее время применяются также индикаторы на жидких кристаллах. Жидкие кристаллы—это состояние сложных органических молекул, в которых обнаруживаются свойства, промежуточные между свойствами кристалла и жидкости. Жидкокристаллическое состояние существует в определенном температурном интервале — от -40 до $+150^{\circ}\text{C}$.

Под действием электрического поля, изменения температуры и механических усилий жидкые кристаллы изменяют коэффициент пропускания света.

Основным достоинством индикаторов, выполненных на жидких кристаллах, является малая потребляемая мощность. Это позволило, например, создать наручные электронные часы с цифровым отсчетом, которые работают без смены источника питания более двух лет.

6-5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ

Автоматические системы сигнализации, являясь простейшими видами автоматических систем контроля, служат для передачи оператору сведений о ходе производствен-

ных процессов при помощи световых или звуковых сигналов.

Различают три вида автоматической сигнализации: контрольная, предупредительная и аварийная.

Контрольная сигнализация предназначена для извещения оператора о включении или отключении механизмов и устройств, о положении органов управления,

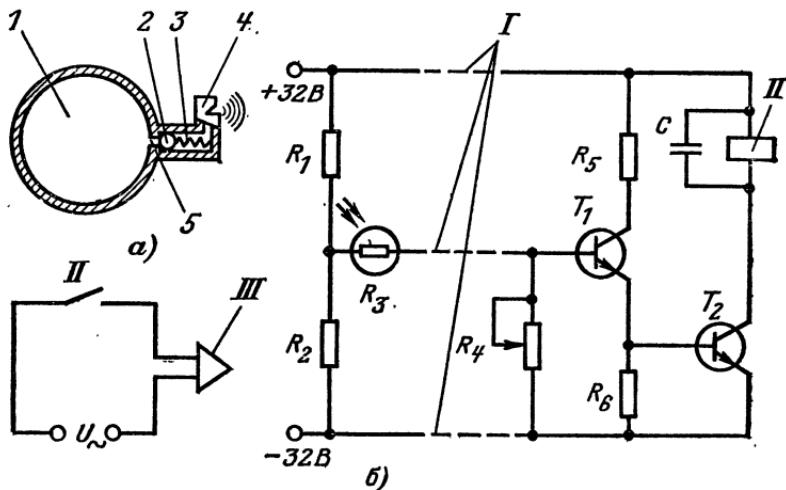


Рис. 6-15. Автоматическая сигнализация.

а — недистанционная; б — дистанционная.

об изменениях в системе и т. д. Обычно для этой сигнализации применяют лампы зеленого, синего и лунно-белого цвета.

Предупредительная сигнализация предназначена для автоматического извещения о возникновении нарушений режимов работы систем, машин, процессов, которые могут привести к тяжелым последствиям. Для привлечения внимания оператора предупредительная сигнализация выполняется с помощью ламп красного цвета или сирен, звонков и т. д.

Аварийная сигнализация предназначена для автоматического оповещения оператора о наличии или опасности возникновения пожара, о нежелательном прекращении производственного процесса и других явлениях, которые могут привести к аварии или катастрофе.

Кроме того, в зависимости от характера передачи сигнала с чувствительного элемента к воспроизведяющему автоматические системы сигнализации делятся на *недистанционные, дистанционные и телемеханические*.

Недистанционная (местная) автоматическая сигнализация — это такая сигнализация, которая осуществляется в непосредственной близости от контролируемого объекта.

В качестве простейшего примера на рис. 6-15, а приведена схема недистанционной сигнализации давлений. Чувствительный элемент, состоящий из клапана 2, выполненного в виде шарика, и пружины 3 вместе с воспроизведяющим элементом 4 встроены в сигнализатор. Предположим, что давление газов в камере 1 повысилось и стало выше критического. Тогда давление газов преодолевает усилие пружины 3, клапан 2 открывает отверстие 5 и газы, проходя через указанное отверстие, устремляются через свисток 4 наружу, сигнализируя о том, что давление газов в камере 1 стало выше критического. Основной особенностью недистанционных автоматических систем сигнализации является то, что они просты по конструкции и надежны.

Под *дистанционной автоматической системой сигнализации* понимается такая система оповещения, у которой чувствительный элемент удален от воспроизведяющего элемента. В этих системах передача сигналов от первого элемента к последнему осуществляется по линиям связи.

Примером дистанционной автоматической системы сигнализации является схема противопожарной сигнализации с фоторезистором, показанная на рис. 6-15, б.

Приведенная схема используется на складах, где может быть самовозгорание легковоспламеняющихся веществ. В качестве чувствительного элемента применяется фоторезистор R_3 , включенный между делителем напряжения R_1, R_2 , базой транзистора T_1 и переменным резистором R_4 .

Если фоторезистор R_3 не освещен, то сопротивление его велико и транзисторы T_1 и T_2 закрыты. При появлении вспышки света на охраняемом участке свет воздействует на фоторезистор R_3 , сопротивление последнего резко уменьшается и транзисторы T_1 и T_2 открываются. При этом срабатывает электромагнитное реле II , включенное в цепь коллектора транзистора T_2 , и своим кон-

тактом замыкает цепь сирены III, выполняющей роль воспроизводящего элемента. Фоторезистор R_3 и делитель напряжения R_1, R_2 подключены к двухкаскадному усилителю, выполненному на основе транзисторов T_1 и T_2 с помощью линии связи I.

Дистанционные автоматические системы сигнализации широко применяются в науке и технике.

К телемеханическим автоматическим системам сигнализации можно отнести систему телесигнализации, назначение которой было дано в § 1-1. Указанная система применяется вместе с системой телеуправления (гл. 10). При телесигнализации так же, как и при телеуправлении, используются аналогичные методы передачи сигналов. Часто одни и те же блоки используются как для телеуправления, так и для телесигнализации.

6-6. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНТРОЛЯ

а) Назначение и функции

Для решения задач автоматизации контроля различных производственных процессов было разработано и применяется большое количество различных автоматических систем централизованного контроля (АСЦК), которые появились примерно в начале 60-х годов. Они являются самыми современными и самыми сложными из технических средств контрольно-измерительных приборов и устройств автоматики, за исключением цифровых ЭВМ. Эти системы предназначены для оперативного контроля, с помощью которого оператор судит о состоянии технологического процесса при управлении им. Если раньше АСЦК выполняли роль советчика, то сейчас развитие указанных систем идет по линии расширения их вычислительных функций, т. е. они переходят в класс управляющих систем.

Автоматические системы централизованного контроля выполняют следующие основные функции:

1) последовательно измеряют все контролируемые параметры в производственном процессе и при отклонении указанных параметров от заранее установленных оповещают оператора об этом;

2) непрерывно или периодически регистрируют на

общем бланке в цифровой форме значения всех контролируемых параметров и отклонений их;

3) осуществляют выборочное измерение любого параметра по команде оператора.

В состав современных АСЦК входит вычислительное устройство, предназначенное для суммирования замеренных величин, их интегрирования за определенный промежуток времени, вычисления средних значений и выполнения других математических операций.

б) Структурная схема

Структура АСЦК зависит от выполняемых функций системы. По этому признаку в указанной системе можно выделить укрупненные функциональные узлы, а именно узлы обнаружения отклонений, вычисления, регистрации и измерения.

Основной особенностью АСЦК является многократное использование одних и тех же узлов для однородной обработки контролируемых параметров. Сигналы контролируемых параметров после преобразования выводятся на контрольные точки, которые поочередно подключаются к общим устройствам обработки.

Автоматические системы централизованного контроля строятся по различным структурным схемам, одна из которых приведена ниже.

На рис. 6-16 приведена обобщенная структурная схема АСЦК с аналоговым сравнением. Сигналы контролируемых параметров от датчиков $D_1—D_n$ поступают на входы блоков изменения масштаба $BM_1—BM_n$, в которых происходит унификация и линеаризация указанных сигналов. Унификация заключается в том, что контролируемые параметры приводятся к шкале с заданной начальной и конечной точками. После переключения P_1 унифицированные сигналы поступают или на блок сравнения BC , в котором происходит сравнение этих сигналов с эталонными сигналами, поступаемыми от эталонного блока $\mathcal{E}B$, или на аналого-цифровой преобразователь $AЦП$ и далее на блок цифровой индикации и регистрации $БЦИР$. С выхода блока BC сигнал отклонения поступает на блок выработки решения BVR , в котором, как правило, осуществляется запоминание, логическая обработка поступившего сигнала или его преобразование по определенной программе. С BVR сигналы поступают

в блок выходных устройств $БВУ$, распределяющий при помощи переключателя P_2 сигналы в устройства сигнализации, регистрации и регулирования. На рис. 6-16 показано только устройство сигнализации $УС$, представляющее собой набор сигнальных лампочек. На каждый контролируемый параметр предусмотрены две лампочки. Если значение контролируемого параметра выше

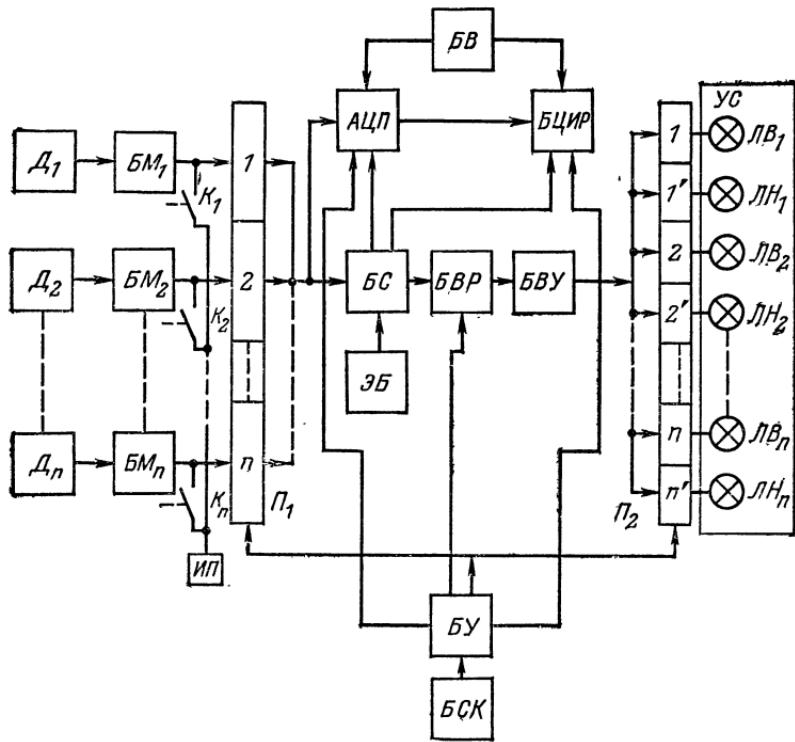


Рис. 6-16. Обобщенная структурная схема АСЦК с аналоговым сравнением.

нормы, то загораются лампочки $ЛВ_1—ЛВ_n$, а если ниже нормы, то лампочки $ЛН_1—ЛН_n$.

Блок управления $БУ$ координирует работу всей системы. Он задает определенный тakt переключения P_1 и P_2 , которые должны работать строго синхронно, и контролирует выполнение всех операций программы.

Блок самоконтроля $БСК$ дает возможность периодически или по команде осуществлять контроль работы системы в целом.

Блок *БЦИР* печатает время отклонения контролируемого параметра, номер его и числовое значение этого параметра.

Для периодической регистрации всех контролируемых параметров, которая обычно происходит через 1—2 ч, служит блок времени *БВ*.

В системе предусмотрен также и выборочный контроль любого параметра технологического процесса с помощью измерительного прибора *ИП*, подключаемого к соответствующему датчику kontaktами $K_1—K_n$ индивидуального реле.

в) Типы и устройство машин централизованного контроля

В настоящее время для выполнения функций централизованного контроля производственных процессов применяются следующие типы машин централизованного контроля (МЦК): «Марс-200Р», «Зенит-3», «Днепр», ИВ-500 и др.

Наиболее современной по сравнению с перечисленными МЦК является машина типа ИВ-500. Она предназначена для контроля и управления технологическими процессами в химической, энергетической и других отраслях промышленности. Машина ИВ-500 выполняет следующие функции: измерение и контроль по вызову или по определенной программе всех контролируемых параметров; математическую обработку данных контроля и выдачу результатов этой обработки в вычислительную машину; периодическую цифровую регистрацию всех контролируемых параметров; цифровую регистрацию отклонения параметров от заданных пределов; вычисление ряда коэффициентов и технико-экономических показателей, используемых оператором для управления процессом; позиционное регулирование любого параметра; графическую запись значений любых контролируемых параметров, а также автоматический контроль и сигнализацию неисправностей системы.

На рис. 6-17 приведена упрощенная схема машины ИВ-500. Она работает по принципу обегающего контроля и измерения. Преобразователи $Pr_1—Pr_{40}$ подключаются с помощью коммутирующего устройства *КУ* поочередно к блоку нормализации *БН*. Машина имеет 12 коммутирующих устройств $KU_1—KU_{12}$, к каждому из которых также подсоединяются через клавишные переключатели $P_1—P_{12}$ по два многошкальных показывающих прибора *ППМ*, представляющие собой автоматические потенциометры, снабженные механизмом автоматической смены шкал, что позволяет осуществлять измерение контролируемых параметров по вызову оператора независимо от работы остальных блоков и устройств машины. В *БН* осуществляется линеаризация и приведение сигналов преобразователей $Pr_1—Pr_{40}$ к нормализованным сигналам 0—10 и 0—5 мА постоянного тока, которые с выхода *БН* подаются на блок преобразования и сравнения *БПС*. В последнем нормализованные сигналы преобразуются в цифровой код и сравниваются с уставками допустимых значений, поступающих на *БПС* в виде цифрово-

го кода синхронно с сигналом преобразователя с блока формирования уставок БФУ . Из БЛС информация подается на цифровые регистрирующие устройства ЦРУ_1 и ЦРУ_2 , перфоратор ПФ (см. гл. 9) и информационный экран ИЭ . Регистрирующие устройства ЦРУ_1 и ЦРУ_2 представляют собой электрические пишущие машины, одна из которых на специальной карте периодически печатает значения всех контролируемых параметров с указанием времени

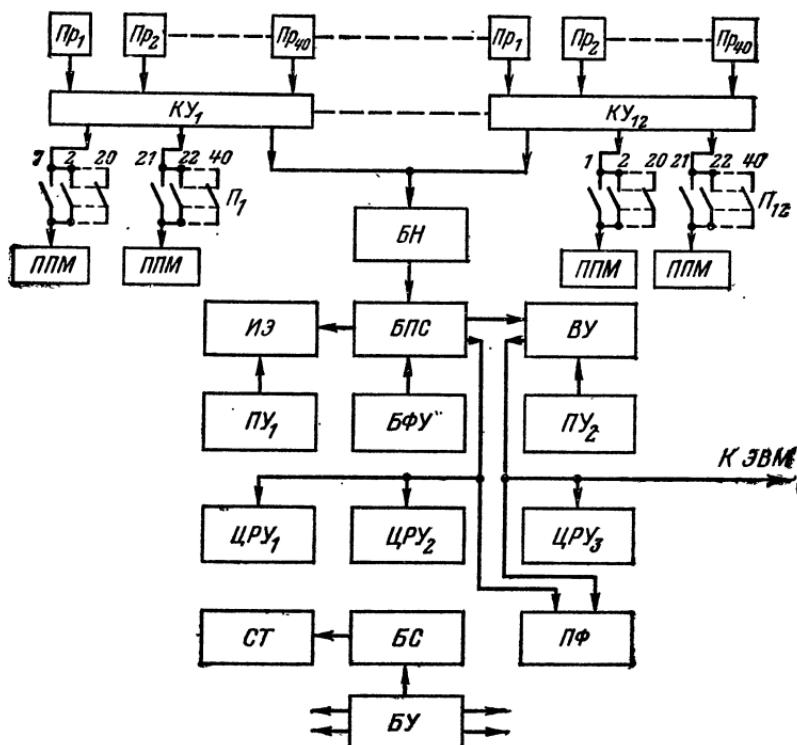


Рис. 6-17. Упрощенная схема машины ИВ-500.

начала печатания и номера точки, а вторая печатает значения контролируемых параметров, которые вышли за пределы допустимых значений, с указанием номера точки и времечки отклонения от нормы и возврата в норму. В перфораторе ПФ информация в виде цифрового кода записывается на перфоленту (см. гл. 9). На информационном экране ИЭ , управление которым осуществляется оператором с пульта управления ПУ_1 , располагаются световые и цифровые индикаторы. Если контролируемый параметр выходит за пределы допустимого значения, то появляется световой мигающий сигнал, сопровождаемый прерывистым звуковым сигналом (при предупредительной сигнализации) или непрерывным звуковым сигналом (при аварийной сигнализации). Оператор при помощи

клавищных переключателей P_1 — P_{12} может осуществить вызов и получить на ИЭ в цифровом виде текущее значение любого контролируемого параметра, адрес точки контроля и время, а также значение уставки.

Информация в виде цифрового кода с БЛС поступает также в вычислительное устройство ВУ, служащее для вычисления технико-экономических показателей производственного процесса, используемых для оперативного управления им. С ВУ, управление которым осуществляется с пульта управления ПУ₂, информация передается в регистрирующее устройство ЦРУ₃, подобное ЦРУ₁ и ЦРУ₂, а также в цифровую ЭВМ и перфоратор ПФ.

Блок управления БУ предназначен для программного синхронного управления всеми устройствами машины. На рис. 6-17 показано управление только блоком сигнализации БС, который служит для управления сигнализацией и выдачей информации на сигнальное табло СТ с сохранением в течение цикла обегания принятых команд от БУ.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

7-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

а) Величины (параметры), характеризующие регулируемый процесс

Любой производственный процесс характеризуется определенными физическими величинами (параметрами), которые в указанном процессе поддерживаются постоянными или изменяются по тому или иному закону. К физическим величинам производственного процесса можно отнести температуру, уровень жидкости, давление, напряжение, скорость изменения какой-либо величины, расход вещества, частоту вращения и др. Физическая величина, которая поддерживается постоянной или изменяется по определенному закону, называется *регулируемой величиной* или *регулируемым параметром*. При проведении производственного процесса постоянно или периодически осуществляют измерение текущего значения регулируемого параметра и сравнивают его с заданным значением. Если имеется отклонение регулируемого параметра от его заданного значения, то производственный процесс вводится такое воздействие, называемое *управляющим* или *регулирующим*, которое уменьшит или совсем ликвидирует это отклонение.

Величины, вызывающие отклонение регулируемого параметра от его заданного значения и нарушающие

равновесие, называются *возмущающими воздействиями*. При этом возникает переходный процесс, представляющий собой любое неустановившееся состояние автоматической системы регулирования (АСР), во время которого изменяется значение регулируемого параметра.

Автоматические системы регулирования широкое практическое применение получили в XX в. В настоящее время нельзя качественно управлять производственными процессами без применения АСР.

В § 1-1 дано назначение АСР и приведена ее структурная схема. Основным элементом указанной схемы является объект регулирования, представляющий собой машину-орудие, машину-двигатель или их совокупность, у которого одна или несколько физических величин подлежат автоматическому регулированию.

б) Понятие о замкнутых и разомкнутых системах

Понятия замкнутой и разомкнутой систем даны в § 1-1.

Примером замкнутой системы является система на рис. 1-1, в. В этой системе изменение возмущающих воздействий в меньшей степени оказывается на объекте регулирования, чем в разомкнутой.

Примером разомкнутой системы может служить автоматическая система на рис. 1-1, б.

в) Внешние воздействия и их виды

Изменение режима работы АСР может происходить за счет внешних воздействий, причем вид этих воздействий может быть очень разнообразным. При анализе и синтезе динамических процессов в АСР в качестве внешних воздействий рассматриваются такие типовые функции, которые математически легко можно описать. В качестве указанных функций применяются: *единичный скачок* (рис. 7-1, а); *единичный импульс* (рис. 7-1, б); *гармоническое (синусоидальное) воздействие* (рис. 7-1, в) и *воздействие, непрерывно возрастающее с постоянной скоростью* (линейно) (рис. 7-1, г).

Единичный скачок внешнего воздействия представляет собой функцию времени, которая отличается скачкообразным изменением в момент времени $t=0$ и сохраняет свое постоянное значение при $t>0$. Внешнее

воздействие такого рода очень часто применяют при оценке качества процессов регулирования.

Единичный импульс внешнего воздействия представляет собой скачкообразно изменяющуюся функцию времени с бесконечно малой длительностью скачка ($t \rightarrow 0$). Воздействие такого рода в основном применяется при исследовании следящих систем дискретного действия.

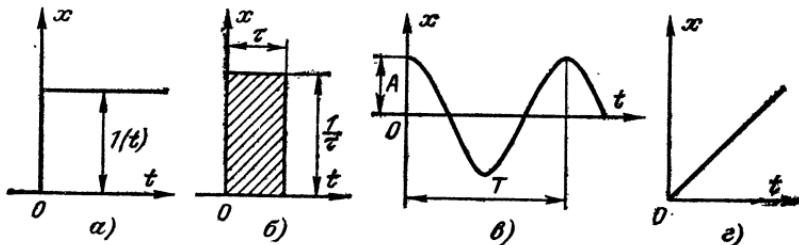


Рис. 7-1. Типовые внешние воздействия.

а — единичный скачок; б — единичный импульс; в — гармонический сигнал;
г — непрерывно возрастающий сигнал.

Гармоническое воздействие получило наибольшее распространение при применении частотных методов исследования АСР.

7-2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АСР. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

На рис. 7-2 показана обобщенная структурная схема АСР. Автоматическая система регулирования состоит из автоматического регулятора *AP*, осуществляющего автоматическое регулирование, и объекта регулирования *ОР* с регулирующим органом *РО*.

В состав автоматического регулятора *AP* входят следующие основные устройства: задающее, измерительное, сравнивающее, преобразующее и исполнительное.

Сравнивающее устройство *СУ* сравнивает предписанное для данного момента значение $x(t)$ регулируемого параметра, подаваемого с задающего устройства *ЗУ* (см. § 1-1), и действительное значение регулируемого параметра $y(t)$, подаваемого с измерительного устройства *ИзУ*. На выходе сравнивающего устройства *СУ* вырабатывается сигнал рассогласования (ошибки)

$$z(t) = x(t) - y(t),$$

который поступает в преобразующее устройство *ПУ*. В этом устройстве сигнал рассогласования $Z(t)$ преобразуется (усиливается) и на выходе *ПУ* появляется сигнал, который поступает на вход исполнительного устройства *ИУ*. В *ИУ* вырабатывается управляющее воздействие, которое воздействует на регулирующий орган *РО* объекта регулирования *ОР* (изменяя, например, поток энергии, подводимый к последнему).

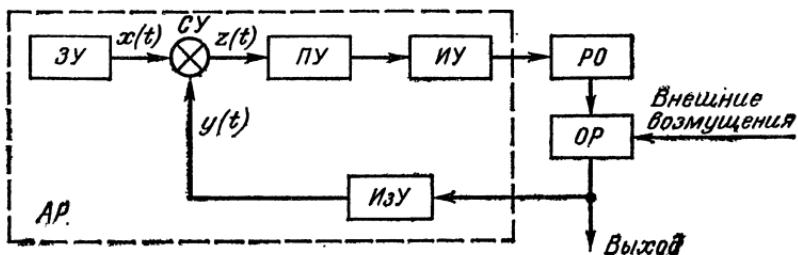


Рис. 7-2. Обобщенная структурная схема АСР.

Для улучшения динамических свойств и повышения точности работы системы в автоматический регулятор могут включаться стабилизирующие, корректирующие и другие устройства.

7-3. ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

а) Регулирование по отклонению

В АСР, работающих по отклонению, сначала происходит измерение значения величины, которая подлежит регулированию в данном объекте, затем это значение сравнивается с заданным, и если есть расхождение, то на объект регулирования подается воздействие, приводящее к выравниванию значения регулируемого параметра. Указанный принцип иногда называется компенсационным принципом Ползунова—Уатта. Он является основным для большинства современных автоматических регуляторов.

В качестве примера на рис. 7-3, а приведена принципиальная электрическая схема системы, предназначеннной для автоматического поддержания напряжения генератора постоянного тока на заданном уровне. Система работает следующим образом. При изменении сопротивления нагрузки R_h происходит изменение напряжения генера-

тора U_g . В результате изменяется электромеханическое усилие F_3 электромагнита, состоящего из якоря 1, катушки 2 и уравновешивающей пружины 4, которая создает усилие F_{pr} . Якорь 1 перемещается вверх или вниз и с помощью рычагов 3 воздействует на движок реостата R , который в свою очередь изменяет сопротивление в цепи обмотки возбуждения генератора OB . Таким образом,

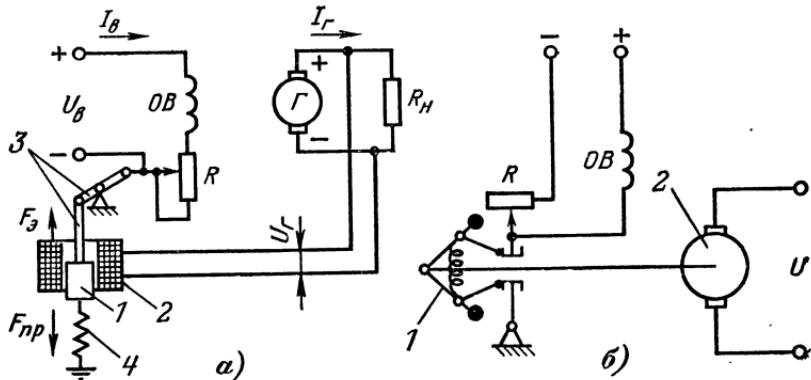


Рис. 7-3. Принципы регулирования.

a — по отклонению; *б* — по возмущению.

происходит автоматическое изменение тока I_B в цепи обмотки возбуждения, а это приводит к восстановлению напряжения генератора U_g (регулируемого параметра).

Объектом регулирования в рассмотренной системе является генератор Γ , а автоматическим регулятором служат электромагнит с уравновешивающей пружиной, система рычагов 3 и реостат R . Роль чувствительного, управляемого и преобразующего элементов выполняет электромагнит. Пружина 4 является задатчиком и эталонным элементом, а движок реостата R выполняет роль регулирующего органа.

Принцип регулирования по отклонению дает возможность получить более точное по сравнению с другими принципами регулирования.

б) Регулирование по возмущению

В АСР, работающих *по возмущению*, измерение регулируемого параметра не производится, а ведется «борьба» с нежелательным внешним воздействием путем замера

одной из причин, которые вызвали отклонение регулируемого параметра от заданного значения. В основу работы указанных систем положен принцип Понселе — Чиколева.

При этом принципе сначала выясняют, какое возмущающее воздействие является основным, а затем устанавливают, как необходимо менять значение регулируемого параметра при изменении данного возмущающего воздействия для того, чтобы значение его поддерживалось постоянным.

На рис. 7-3, б показана АСР напряжения генератора. В этой схеме заранее считают, что основным возмущающим воздействием является изменение частоты вращения, поэтому «борьбу» ведут только с этим внешним воздействием. Для этого в цепь обмотки возбуждения *OB* генератора 2 включают реостат *R*, сопротивление которого изменяется с помощью центробежного механизма 1 автоматически в соответствии с изменением частоты вращения генератора. В результате напряжение *U* на зажимах генератора остается постоянным.

в) Комбинированное регулирование

Для создания высококачественных АСР, как правило, применяют *комбинированное регулирование*, используя в нем регулирование по отклонению и возмущению. Одновременно это дает возможность повысить точность и быстродействие систем [106].

7-4. КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В настоящее время находит применение большое разнообразие автоматических регуляторов, которые можно классифицировать по различным признакам¹.

В зависимости от требуемых значений регулируемого параметра различают регуляторы:

стабилизирующие — поддерживающие постоянным регулируемый параметр;

программные — обеспечивающие заданное изменение регулируемого параметра во времени (задающее устройство этого регулятора называется программным);

¹ Майзель М. М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами. М., «Высшая школа», 1972.

следящие — обеспечивающие закономерное изменение регулируемого параметра в зависимости от неизвестной заранее переменной величины (или нескольких величин).

Если регулятор и регулирующий орган используют энергию, которая поступает только от измерительного устройства *ИзУ* (см. § 7-2), то *регулятор будет прямого действия*. Если же какое-нибудь устройство регулятора или регулирующий орган используют энергию внешнего источника, то *регулятор будет непрямого действия*.

По виду используемой вспомогательной энергии регуляторы непрямого действия делятся на: *электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные*.

По характеру воздействия одних устройств на другие регуляторы бывают *непрерывного и прерывного (дискретного) действия*.

По установившемуся значению регулируемого параметра (после окончания переходного процесса) *регуляторы бывают статические и астатические*.

По числу фиксированных положений (позиций) различают *двух-, трех- и многопозиционные регуляторы*. Например, у двухпозиционного регулятора две возможные позиции регулирующего органа: «включено — выключено».

По скорости перемещения регулирующего органа различают регуляторы:

с мгновенным практически перемещением — *позиционные регуляторы релейного действия*;

с постоянной скоростью перемещения, не зависящей от абсолютного значения рассогласования (лишь направление перемещения зависит от знака рассогласования), — *регуляторы релейного действия*;

с переменной скоростью, зависящей от знака и величины рассогласования [часто и от его интеграла или (и) от производной];

с вибрационным (скользящим) режимом у регуляторов релейного действия — *вибрационные регуляторы*.

Если регулирование процесса осуществляется лишь по одному параметру, то оно называется *одномерным*. Если же у процесса имеется два и более регулируемых параметров, то регулирование называется *многомерным*.

По области своего применения регуляторы делятся на *индивидуальные, специализированные и универсальные*.

В заключении настоящего параграфа отметим, что некоторые АСР, в которых применяется тот или иной тип регулятора, будут рассмотрены ниже.

7-5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ

В этой системе используется стабилизирующий автоматический регулятор (см. § 7-4). В качестве примера *автоматической системы стабилизации* можно рассмотреть автоматическую систему поддержания температуры на заданном уровне (рис. 7-4, а).

Предположим, что необходимо поддерживать постоянную температуру в объекте O , например в электрической печи.

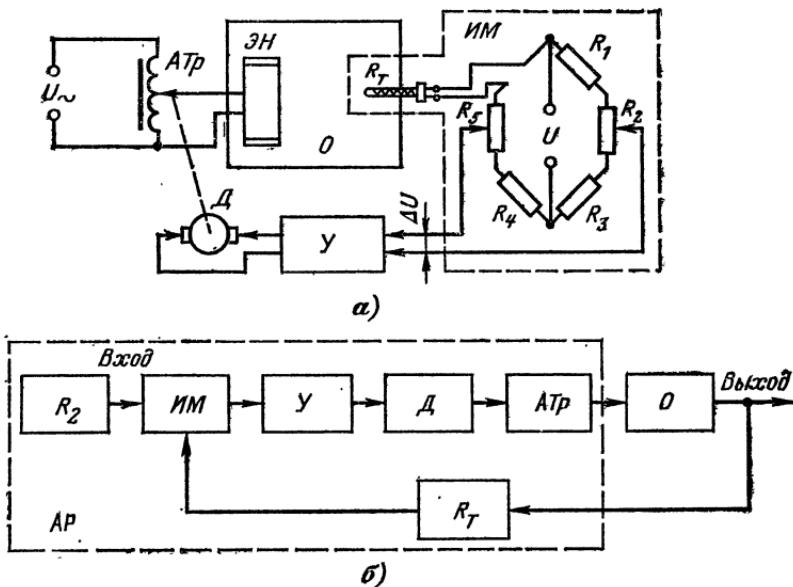


Рис. 7-4. Автоматическая система стабилизации.
а — принципиальная электрическая схема; б — структурная схема.

ской печи. В том случае, когда температура в объекте равна заданной, напряжение разбаланса ΔU , поступающее с измерительного моста IM (на рис. 7-4, а показан пунктиром), равно нулю и система находится в равновесии. При изменении температуры в объекте, например, за счет изменения напряжения сети U_{\sim} ток, проходящий

через электронагреватель $\mathcal{E}H$, изменяется, а следовательно, изменяется сопротивление термометра сопротивления R_t и равновесие моста IM нарушается. На вход электронного усилителя U поступает напряжение разбаланса моста ΔU , фаза которого зависит от знака отклонения температуры объекта от заданной. Напряжение ΔU усиливается и поступает на электродвигатель D , который начинает вращаться в ту или иную сторону в зависимости от фазы напряжения ΔU . Вал двигателя перемещает движок автотрансформатора ATr до тех пор, пока температура в объекте не станет равна заданной. При установившемся режиме и отсутствии возмущающих воздействий система находится в равновесии. С помощью движка реостата R_2 устанавливается заданное значение температуры в объекте.

Структурная схема этой системы показана на рис. 7-4, б. При сравнении этой схемы со структурной схемой АСР на рис. 7-2 можно отметить следующее: роль за дающего устройства выполняет переменный резистор R_2 , сравнивающим устройством является измерительный мост IM , роль преобразующего устройства выполняет усилитель U , электродвигатель D , автотрансформатор ATr и электронагреватель $\mathcal{E}H$ выполняют функции исполнительного устройства, в качестве измерительного устройства используется термометр сопротивления R_t , регулирующим органом является движок автотрансформатора.

К автоматическим системам стабилизации относится также система, показанная на рис. 7-3, а.

7-6. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Примером *автоматической системы программного регулирования* может служить система регулирования температуры печи для термической обработки деталей, приведенная на рис. 7-5.

В этой системе применяется программный автоматический регулятор (см. § 7-4).

Настройка регулятора в этой системе снабжается специальным программным элементом, представляющим собой рельефную диаграммную ленту l и часовой механизм II , который перемещает ленту слева направо. С помощью программного элемента происходит автоматическое изменение настройки системы по желаемому закону.

По рельефной диаграммной ленте 1 катится ролик 2, механически связанный с помощью тяги 3 с рычагом 4, который вращается вокруг оси. Подвижный контакт 5 механически связан со стрелкой автоматического потенциометра 6, показывающего фактическую температуру в печи 7. Измерение температуры в печи осуществляется при помощи термопары 8. Если есть разница между заданной и фактической температурами, то контакт 5 будет касаться одного из неподвижных контактов рычага 4

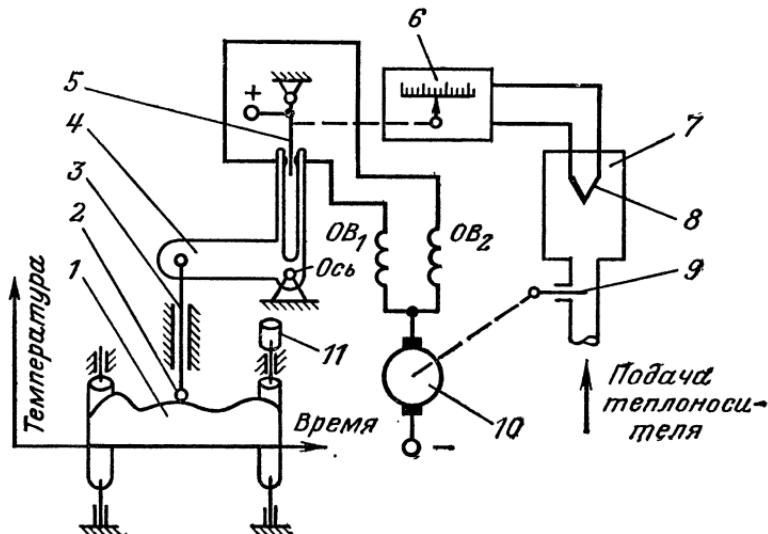


Рис. 7-5. Автоматическая система программного регулирования температуры в печи.

и на одну из обмоток возбуждения (OB_1 или OB_2) электродвигателя 10 будет подаваться питание. При этом электродвигатель начнет вращаться, перемещая заслонку 9, которая механически связана с его валом. Заслонка закрывает или открывает доступ теплоносителя в печь 7, в результате чего происходит изменение температуры в печи. При равенстве фактической и заданной температур подвижный контакт 5 не касается контактов рычага 4 и электродвигатель 10 останавливается.

В рассмотренной схеме объектом регулирования является печь 7, роль измерительного устройства выполняет термопара 8; функцию сравнивающего устройства — автоматический потенциометр 6; подвижный контакт

5 — преобразующее устройство; заслонка 9 — регулирующий орган; электродвигатель 10 с механизмом, преобразующим вращение в перемещение заслонки 9, выполняет функцию исполнительного устройства; часовой механизм 11, лента 1, ролик 2, тяга 3 и рычаг 4 представляют собой программное (задающее) устройство.

Следует заметить, что если убрать часовой механизм 11 и ленту 1 и зафиксировать рычаг 4 в определенном положении, то получим автоматическую систему стабилизации.

7-7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО И НЕПРЯМОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В автоматической системе прямого регулирования применяется регулятор прямого действия (см. § 7-4). Примером этой системы может служить система, предназначенная для автоматического поддержания напряжения генератора постоянного тока на заданном уровне (см. рис. 7-3, а).

На рис. 7-6 приведен пример использования системы непрямого регулирования для автоматического поддержания напряжения генератора постоянного тока на заданном уровне. В схеме применен исполнительный двигатель постоянного тока D , вал которого механически связан с движком реостата R .

При отклонении напряжения генератора U_g от заданного значения за счет любых возмущающих воздействий происходит нарушение равновесия. Якорь 1 электромагнита 2 начинает перемещаться вверх или вниз и с помощью рычагов 3 воздействует на движок потенциометра P , перемещая его вниз или вверх. В результате этого к обмотке яко-

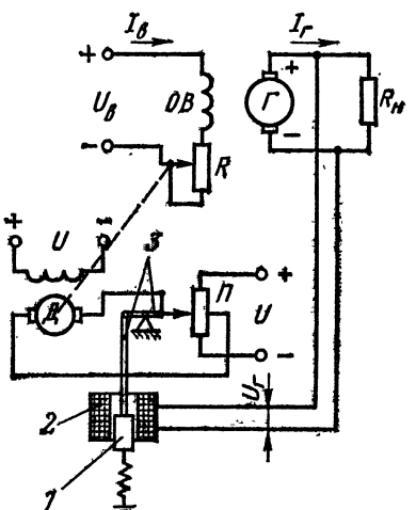


Рис. 7-6. Автоматическая система непрямого регулирования.

ря исполнительного двигателя D будет подводиться напряжение определенного значения и полярности, снимаемое со средней точки и движка потенциометра P . Вал двигателя D начнет вращаться в ту или иную сторону и перемещать ползунок реостата R до тех пор, пока на выходе генератора G напряжение U_g не станет равным заданному значению, т. е. до момента наступления равновесия.

7-8. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО И ПРЕРЫВНОГО (ДИСКРЕТНОГО) ДЕЙСТВИЯ

а) АСР непрерывного действия

В АСР *непрерывного действия* непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует непрерывное изменение электрических и механических величин во всех элементах системы, т. е. в ней осуществляется постоянная, непрерывная и функциональная связь между элементами системы. В этой системе происходит воздействие одного элемента системы на другой таким образом, что в процессе регулирования структура всех связей в системе остается неизменной и сигналы на выходе каждого элемента являются непрерывными функциями воздействия и времени.

К АСР непрерывного действия можно отнести: автоматическую систему стабилизации (см. § 7-5), автоматическую систему программного регулирования (см. § 7-6), системы прямого и непрямого регулирования (см. § 7-7).

б) АСР прерывного (дискретного) действия

Автоматические системы регулирования прерывного (дискретного) действия — это такие системы, в которых непрерывному изменению регулируемого параметра соответствует прерывистое изменение воздействий хотя бы в одном элементе системы.

Системы прерывного действия делятся на релейные и импульсные.

Релейными системами называются такие системы, в которых среди основных элементов цепи регулирования имеется один или несколько релейных элементов. В качестве релейного элемента часто используется реле.

На рис. 7-7 приведена релейная АСР, предназначенная для поддержания постоянной температуры объекта (в тепловом двигателе), который охлаждается воздухом. Мост, состоящий из термометра сопротивления R_t и резисторов R_1-R_3 , настраивают с помощью движка R_1 так, чтобы при заданной температуре, которую необходимо поддерживать неизменной, ток в диагонали моста отсутствовал. При изменении температуры (регулируемого параметра) сопротивление термометра сопротивления R_t

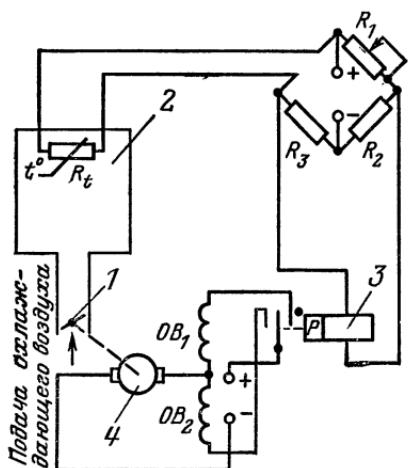


Рис. 7-7. Релейная АСР.

(чувствительного элемента) изменяется, происходит нарушение равновесия моста и по обмотке поляризованного реле 3 потечет ток. Средний контакт реле 3 в зависимости от знака отклонения регулируемого параметра замыкается с левым или правым контактом, подключая якорную обмотку электродвигателя 4 к напряжению постоянного тока через одну OB_1 или другую OB_2 обмотку возбуждения. Вал двигателя

4 механически связан со шторкой 1, с помощью которой осуществляется регулирование подачи охлаждающего воздуха в объект 2 (объект регулирования).

Импульсными системами называются такие системы, в которых среди основных элементов цепи регулирования имеется один или несколько импульсных элементов. Импульсный элемент осуществляет преобразование непрерывного входного воздействия в кратковременные импульсы с определенным периодом их чередования. В качестве примера импульсной системы на рис. 7-8, а приведена АСР, предназначенная для поддержания постоянной температуры объекта, например в тепловом двигателе. При изменении температуры в тепловом двигателе 2 сопротивление термометра сопротивления R_t изменяется, происходит нарушение равновесия моста,

состоящего из резисторов R_1 — R_3 и R_t . В этом случае по высокочувствительному гальванометру 3, включенному в диагональ моста, потечет ток. Гальванометр 3 выполняет роль датчика электромеханического импульсного преобразователя 4, схема которого приведена на рис. 7-8, б. Носик стрелки 8 движется вправо и влево свободно (на рис. 7-8, б показано стрелками), не касаясь обмотки потенциометра 10. Над носиком стрелки 8 помещена «падающая дужка» 7, опирающаяся на эксцен-

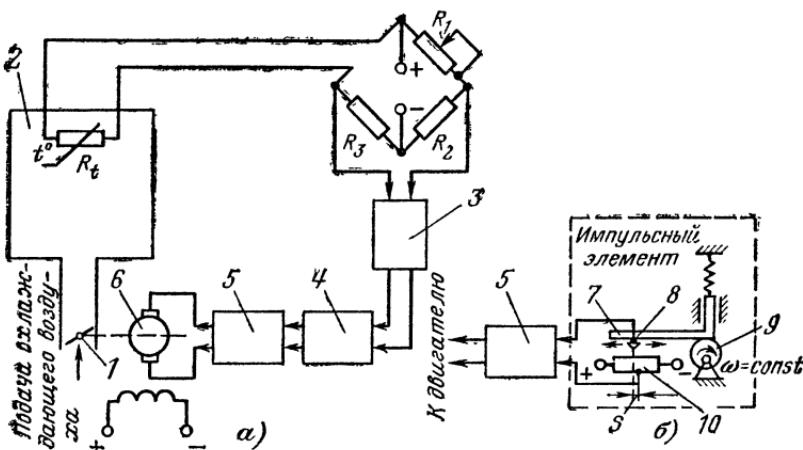


Рис. 7-8. Импульсная АСР.

а — функциональная схема системы; б — функциональная схема электромеханического импульсного преобразователя.

трик 9, который вращается с постоянной частотой ω . «Падающая дужка» 7 перемещается вверх и вниз с помощью эксцентрика 9 и совершает колебания с заранее заданной частотой. Когда «падающая дужка» перемещается вниз, она на короткое время прижимает носик стрелки гальванометра к обмотке потенциометра 10 и на двигатель через усилитель 5 подается напряжение питания. В течение остальной части периода колебаний «падающей дужки» стрелка гальванометра свободна. Таким образом, при непрерывном перемещении носика стрелки гальванометра напряжение на якорь двигателя 6 через усилитель 5 подается с потенциометра 10 в виде коротких импульсов, амплитуда которых изменяется в зависимости от величины разбаланса моста. Длитель-

ность импульсов, равная времени соприкосновения носика стрелки к обмотке потенциометра, постоянна и не зависит от значения отклонения S носика стрелки гальванометра от среднего положения потенциометра. Следует отметить, что период чередования импульсов задается системе принудительно извне и определяется значением угловой скорости ω эксцентрика:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{const.}$$

Вращение эксцентрика в системе осуществляется независимым от данной системы приводом. Вал двигателя б механически связан со шторкой 1, с помощью которой осуществляется регулирование подачи охлаждающего воздуха в тепловой двигатель 2.

7-9. СТАТИЧЕСКИЕ И АСТАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

а) Статическая система

В статической АСР применяется статический регулятор, в котором имеется монотонная связь между воспринимаемым им установившимся постоянным значением регулируемого параметра и положением регулирующего органа. В статическом регуляторе значение регулируемого параметра в установившемся режиме зависит от внешних возмущений (нагрузок), например в регуляторе Ползунова каждому положению поплавка (уровню) соответствует одно вполне определенное положение клапана. Статический регулятор не может обеспечить постоянства предписанного значения регулируемого параметра при переменной нагрузке объекта. Он создает абсолютную статическую (остаточную) ошибку регулирования (отклонение регулируемого параметра от заданного значения при наличии внешнего возмущения). Однако (будет показано ниже) при работе статического регулятора эта ошибка меньше, чем возможные отклонения при отсутствии регулятора. После исчезновения внешнего возмущения (изменения нагрузки относительно номинального значения), вызвавшего отклонение регулируемого параметра от заданного значения, статический регулятор обязательно возвращает этот параметр к исходному, номинальному значению. Изменение регулируемого параметра, которое вызывает у статического регулятора перемещение регулирующего органа из од-

ного предельного положения в другое, является важнейшей характеристикой статического регулятора и называется его *неравномерностью*. Отношение этой неравномерности к номинальному значению регулируемого параметра называется *степенью неравномерности* (или *коэффициентом статизма*, или просто *статизмом*) регулятора [58].

К статической АСР можно отнести систему регулирования напряжения генератора (см. рис. 7-3). При отсутствии статического регулятора в диапазоне изменения тока генератора I_r (нагрузки) от нуля до максимального значения напряжение на выходе генератора U_r (регулируемый параметр) изменяется (рис. 7-9, линия 1):

$$\Delta U'_r = U_{x.x} - U_{\min.o}, \quad (7-1)$$

где $U_{x.x}$ — напряжение при холостом ходе;
 $U_{\min.o}$ — минимальное напряжение при максимальной нагрузке (при отключенном статическом регуляторе).

После включения регулятора напряжение U_r при изменении тока генератора I_r от нуля до максимального значения также изменяется, но уже меньше (рис. 7-9, линия 2):

$$\Delta U''_r = U_{x.x} - U_{\min.v}, \quad (7-2)$$

$U_{\min.v}$ — минимальное напряжение при максимальной нагрузке, когда статический регулятор включен.

Абсолютную статическую ошибку регулирования для нашего примера при наличии некоторого возмущения, соответствующего, например, току I_1 (рис. 7-9), можно найти по формуле:

$$\Delta U_r = U_{x.x} - U_1, \quad (7-3)$$

где U_1 — напряжение генератора при токе I_1 .

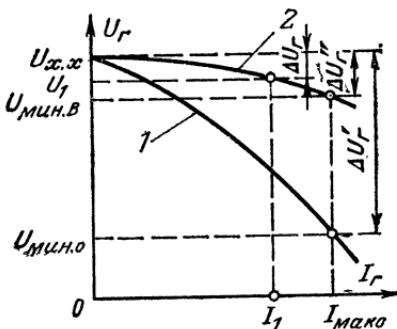


Рис. 7-9. Статическое и астатическое регулирование.

Статизм для разомкнутой системы (регулятор отключен)

$$S_o = \frac{\Delta U'_r}{U_{x,x}}, \quad (7-4)$$

а статизм для замкнутой системы (р^егулятор включен) соответственно равен:

$$S_b = \frac{\Delta U''_r}{U_{x,x}}. \quad (7-5)$$

Так как $\Delta U'_r > \Delta U''_r$ (рис. 7-9), следовательно, $S_o > S_b$, т. е. статизм для разомкнутой системы больше, чем статизм для замкнутой системы.

Заметим, что в статической АСР:

1) каждому значению регулируемого параметра (U_r) соответствует только одно положение регулирующего органа (движка реостата R , см. рис. 7-3);

2) равновесие ее может быть достигнуто при различных значениях регулируемого параметра.

В большинстве случаев статическая зависимость регулируемого параметра от возмущающих воздействий является нежелательной, так как создается абсолютная статическая ошибка регулирования. Поэтому стремятся ее значительно уменьшить или вообще исключить. Для этого можно увеличить коэффициент передачи системы [106], применить принцип регулирования по возмущению (см. § 7-3) или использовать астатическую систему.

б) Астатическая система

В астатической АСР применяется астатический регулятор, в котором отсутствует непосредственная постоянная связь между установившимися постоянными значениями регулируемых параметров и положениями регулирующего органа. Равновесие в этом регуляторе наступает в том случае, когда действительное значение регулируемого параметра равно заданному. При любом отклонении действительного значения регулируемого параметра от заданного регулирующий орган придет в действие и остановится лишь тогда, когда это отклонение исчезнет, т. е. когда регулируемый параметр достигнет заданного значения [58].

В этом регуляторе значение регулируемого параметра не зависит от изменения внешнего возмущающего воздействия на объект регулирования.

К астатической АСР можно отнести систему регулирования напряжения генератора (см. рис. 7-6). Исполнительный двигатель D остановится тогда, когда напряжение, которое подводится к его якорю, будет равно нулю. Это будет только в том случае, когда якорь I займет свое заданное положение, которое определяется предписаным значением регулируемого параметра. Таким образом, статическая ошибка в установившемся режиме будет равна нулю и зависимость U_g от тока I_g (характеристика астатического регулирования) представляет собой прямую линию, которая параллельна оси абсцисс (см. рис. 7-9).

Статизм в астатической АСР также равен нулю.

Астатическая автоматическая система регулирования обладает следующими свойствами:

1) регулирующий орган в конце процесса регулирования может иметь любое рабочее положение при одном и том же значении регулируемого параметра;

2) равновесие системы может быть только при единственном значении регулируемого параметра, равном заданному.

7-10. САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ (АДАПТИВНЫЕ) АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Эти системы имеют способность приспосабливаться к изменяющимся внешним условиям и перестраиваться таким образом, чтобы компенсировать указанные изменения, продолжая обеспечивать необходимую точность регулирования. Самонастраивающиеся АСР делятся на экстремальные и автоматические системы обучения.

а) Экстремальные системы

В экстремальных системах регулятор автоматически поддерживает экстремальное (минимальное или максимальное) значение регулируемого параметра, соответствующее оптимальным условиям протекания регулируемого процесса, например максимальную производительность, минимальный расход топлива, максимальный

КПД и т. д. Экстремальная система работает в режиме постоянного поиска, который состоит в том, что система изменяет управляющее входное воздействие на определенное значение и анализирует полученное значение регулируемого параметра. По результатам анализа система, если это необходимо, опять изменяет управляющее входное воздействие на некоторое значение и снова анализирует полученное значение регулируемого параметра. Процесс поиска продолжается до тех пор, пока система не найдет оптимальные условия протекания регулируемого процесса.

Экстремальные системы чаще всего применяются тогда, когда объект регулирования или система имеет характеристику с явно выраженным экстремумом, который в зависимости от внешних возмущающих воздействий смещается [38].

Примерами экстремальных систем, имеющих характеристики с явно выраженным максимумом или минимумом, являются система автоматической настройки на оптимальный режим резания металлорежущего станка; система автоматического поддержания температуры в печи, отвечающая наилучшим условиям ее работы; система автоматического управления движущегося корабля на наиболее глубоком месте реки и т. д.

Экстремальные системы широко применяются в технике. Они могут быть построены по различным схемам, например системы с прямым использованием сигнала по производной, системы с запоминанием экстремума, системы с непрерывным поисковым сигналом, системы шагового типа [38]. Общим для всех перечисленных систем является элемент, измеряющий величину, экстремальное значение которой необходимо поддерживать в системе.

В качестве примера на рис. 7-10, а приведена функциональная схема экстремальной системы регулирования колебательного контура [106]. Контур LC настраивается путем изменения емкости переменного конденсатора C . Задача настройки заключается в том, чтобы установить такое значение емкости, например C_1 (рис. 7-10, б), при котором резонансная частота контура совпадает с частотой подаваемого на контур напряжения U_1 . При совпадении указанных частот на выходе контура будет максимальное напряжение U_{\max} (рис. 7-10, б). Обычно причиной ухода от резонансной частоты настрой-

ки контура является изменение частоты подаваемого на контур напряжения U_1 или изменение параметров контура (например, в результате изменения температуры окружающей среды).

Экстремальный регулятор ЭР состоит из усилителя $У$, вычислительного устройства ВУ и исполнительного двигателя ИД, вал которого поворачивает ротор переменного конденсатора С. Роль ВУ состоит в том, что

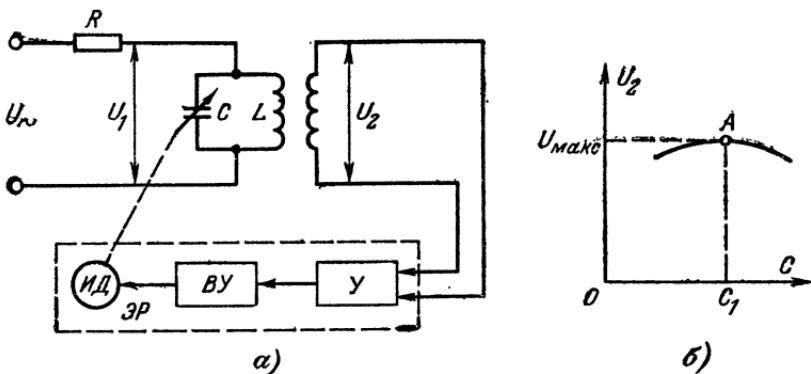


Рис. 7-10. Экстремальная система регулирования колебательного контура.

а — функциональная схема; *б* — экстремальная характеристика.

оно автоматически выполняет ту же логическую операцию, которую выполняет оператор при ручной настройке контура. После включения в работу системы ВУ определяет направление, в котором необходимо изменять емкость, для того чтобы напряжение на контуре увеличивалось, т. е. ВУ определяет направление движения в сторону экстремума (рис. 7-10, б, точка А). Для этого вал ИД сначала вращается в одном направлении, а затем при необходимости — в другом. Вращение вала ИД в найденном направлении продолжается до тех пор, пока напряжение U_2 не начинает уменьшаться после прохождения экстремума. В этот момент ВУ изменяет направление вращения вала ИД. Это необходимо, чтобы вернуть напряжение U_2 в точку экстремума. В установившемся режиме вал ИД периодически реверсируется, создавая небольшие колебания напряжения U_2 относительно экстремума, т. е. он все время контролирует местоположение экстремума.

б) Автоматические системы обучения

Эти системы делятся на *самообучающиеся и обучаемые*.

Современная техника дает возможность создать такие системы, которые могут не только видоизменять свои характеристики, но и самоулучшать их в процессе работы, т. е. могут обучаться. Они являются наиболее современным типом самонастраивающихся систем.

Самообучающейся системой называется такая система, в которой самообучение при отыскании оптимального режима работы объекта регулирования все время автоматически совершенствуется по мере накопления в системе опыта регулирования. Самообучающаяся система, постепенно совершенствуясь, находит неизвестный при конструировании способ функционирования, который является наиболее оптимальным. В этой системе отсутствует обучающее устройство, а процесс обучения осуществляется на основании анализа результатов регулирования и улучшения их в нужном направлении:

Самообучающаяся система представляет собой высший класс АСР, который стоит по своим принципиальным возможностям на уровне живых существ. Эти системы пока находятся еще на самом начальном этапе, и развитие их идет в направлении копирования простейших образцов живой природы [106].

Обучаемой системой называется такая система, в которой для нормального функционирования в процессе работы накапливается опыт, а обучающее воздействие системы получает извне или со стороны человека-оператора; или со стороны автоматического обучающего устройства, не входящего в состав этой системы. В состав обучаемой системы входит управляющая машина; следящая за работой человека, который ведет управление. После запоминания большого количества ситуаций управление производственным процессом передается машине, работающей в соответствии с приобретенным опытом. К обучаемым системам можно также отнести классифицирующие системы, служащие для распознавания различных печатных знаков и звуков, а также для технической и медицинской диагностики. Обучение классифицирующей системы состоит в том, чтобы научить ее преобразовывать заданным образом входные ситуации в соответствующие выходные реакции, которые первоначально не связаны между собой. Если в процессе обу-

чения система, получив на входе какую-либо конкретную ситуацию, выдала правильную выходную реакцию, то она получает сигнал «поощрения» и полученное значение запоминает. При неправильной реакции сигнал «поощрения» со стороны человека-оператора или автоматического обучающего устройства не поступает и полученные значения не запоминаются. Постепенно путем перебора всех возможных входных ситуаций и реакций на выходе система запоминает правильные значения. После этого система может принять управление на себя.

7-11. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В теории автоматического регулирования решаются две задачи:

- 1) исследование имеющейся АСР и определение, в какой степени система удовлетворяет предъявленным к ней требованиям (*анализ системы*);
- 2) проектирование системы по заданным требованиям (*синтез системы*).

Следует заметить, что наиболее полно разработаны методы анализа линейных АСР, переходные процессы которых описываются линейными дифференциальными уравнениями различных порядков. Эти методы дают возможность выяснить не только характер (апериодический, колебательный и т. д.), но и количественно оценить переходные процессы.

При синтезе АСР разбивают на две части: на неизменяемую часть системы, в состав которой входят объект регулирования и часть элементов автоматического регулятора, и на изменяемую часть, в которую входят остальные элементы автоматического регулятора, параметры которых меняются.

7-12. УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ

а) Основные понятия об устойчивости

В реальных условиях АСР не может все время оставаться в установившемся режиме, потому что на нее все время действуют внешние возмущения, которые стремятся изменить значение регулируемого параметра. По-

этому автоматический регулятор в свою очередь также стремится привести значение регулируемого параметра к заданному. В результате наличия инерционных масс и емкостей переход автоматического регулятора, т. е. всей системы в целом, осуществляется не мгновенно, а спустя некоторое время. Таким образом, в системе возникают переходные процессы, которые зависят от ее параметров.

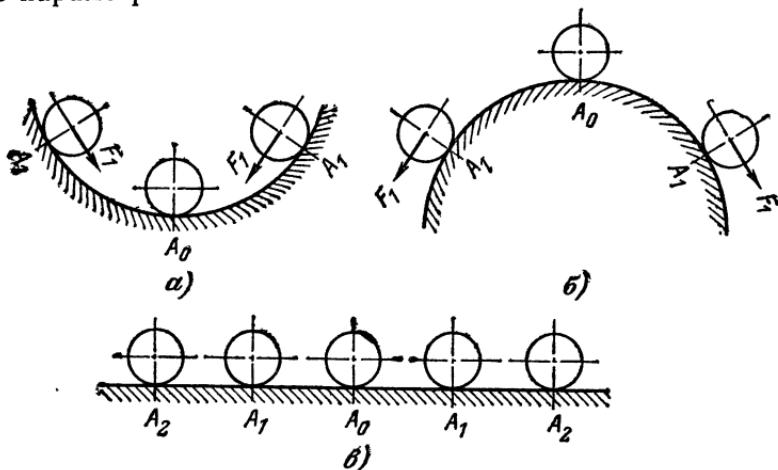


Рис. 7-11. К пояснению равновесного состояния.
а — устойчивое; б — неустойчивое; в — безразличное.

Следует заметить, что исследование установившегося режима дает возможность решить вопрос о пригодности АСР для проведения какого-либо процесса с заданной точностью. Однако для практического использования этого недостаточно. Система должна быть также устойчивой по отношению к внешним возмущениям.

Пригодность любой АСР в первую очередь определяется *устойчивостью и приемлемым качеством процесса регулирования*.

Устойчивостью называется способность системы возвращаться к заданному установившемуся состоянию после приложения или снятия внешнего возмущения.

Известно, что каждый из установившихся режимов работы АСР представляет собой равновесное состояние. Для решения вопроса, устойчиво ли равновесие какой-либо статической системы, необходимо изучить поведе-

ние этой системы при небольших отклонениях от положения равновесия. Различают три вида равновесных состояний: *устойчивое, неустойчивое и безразличное*.

На рис. 7-11, а приведен пример устойчивого равновесного состояния. При любом малом отклонении шарика от исходного положения A_0 влево или вправо в положение A_1 появляется сила F_1 , которая стремится вернуть шарик в исходное положение.

Пример неустойчивого равновесного состояния приведен на рис. 7-11, б. Предположим, что шарик лежит на возвышении. После отклонения его от равновесного состояния A_0 шарик не вернется в исходное положение, так как возникающая сила F_1 стремится еще больше отклонить его от положения равновесия.

На рис. 7-11, в приведен пример безразличного равновесного состояния. Предположим, что шарик находится на плоскости. После отклонения его от равновесного состояния A_0 шарик займет одно из новых равновесных состояний (A_1, A_2, \dots, A_n). В этом случае шарик может иметь бесчисленное множество равновесных состояний.

Рассмотренные выше понятия равновесных состояний можно распространить и на АСР.

В АСР применяются автоматические регуляторы, которые обладают устойчивыми установившимися режимами работы. Установившийся режим работы АСР является устойчивым, если система, будучи выведенная из состояния равновесия, после снятия возмущения вновь возвращается в устойчивое равновесное состояние. Установившиеся режимы необходимо рассматривать при постоянной нагрузке и настройке.

6) Виды переходных процессов

В общем случае значение регулируемого параметра в неустановившемся режиме в каждый момент времени

$$y = y_{\text{уст}} + y_{\text{пер}}, \quad (7-6)$$

где $y_{\text{уст}}$ — установившееся значение регулируемого параметра;

$y_{\text{пер}}$ — переходная составляющая изменения регулируемого параметра, изменяющаяся по времени в течение переходного процесса.

При переходе системы из одного установившегося режима работы в другой она может оказаться либо *устой-*

чивой, либо *неустойчивой*. Чтобы определить это, необходимо произвести исследование динамики процесса регулирования, т. е. определить закон измерения регулируемого параметра в функции времени при воздействии на АСР возмущающих факторов. Если $y_{\text{пер}}$ стремится к нулю хотя бы и за неограниченно большой отрезок времени, то АСР будет устойчивой. Если с течением времени $y_{\text{пер}}$ не стремится к нулю, то АСР будет неустойчивой.

Рассмотрим несколько примеров переходных процессов.

Пример 7-1. Автоматическая система регулирования переходит из одного установившегося состояния в другое (рис. 7-12, а).

Регулируемый параметр y монотонно приближается к новому установившемуся значению $y_{\text{уст2}}$. В течение переходного процесса $y_{\text{пер}} \rightarrow 0$, т. е. происходит уменьшение ординаты $y_{\text{пер}}$. В этом случае переходный процесс имеет затухающий характер, а сама АСР является устойчивой.

Пример 7-2. Предположим, что в АСР начался переходный процесс в момент $t=t_1$ (рис. 7-12, б). Переходный процесс имеет расходящийся характер, потому что с течением времени $y_{\text{пер}}$ не стремится к нулю, а возрастает монотонно и АСР в переходном процессе неустойчива. Монотонные переходные процессы в двух рассмотренных примерах называются также априоридическими переходными процессами.

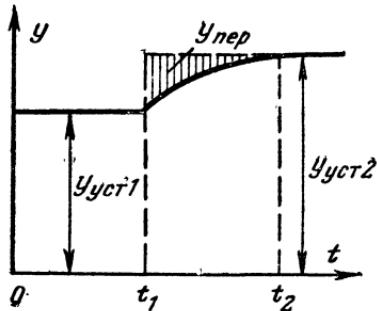
Пример 7-3. Переходный процесс протекает, как показано на рис. 7-12, в. Система, совершив несколько колебаний около нового установившегося значения регулируемого параметра $y_{\text{уст2}}$, приходит к установившемуся режиму работы. В этом случае $y_{\text{пер}}$ изменяется как по абсолютному значению, так и по знаку. Автоматическая система регулирования является устойчивой, потому что с течением времени $y_{\text{пер}} \rightarrow 0$.

Пример 7-4. Предположим, что АСР совершает незатухающие колебания около нового установившегося значения регулируемого параметра $y_{\text{уст2}}$ (рис. 7-12, г). Система является нейтрально устойчивой или находящейся на границе устойчивости.

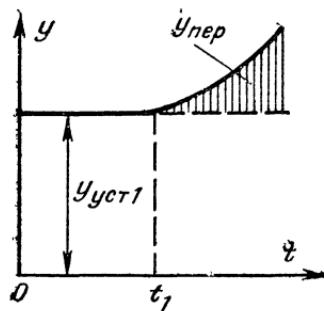
Пример 7-5. Предположим, что АСР, выведенная из установившегося режима, совершает расходящиеся колебательные движения около нового значения регулируемого параметра $y_{\text{уст2}}$ (рис. 7-12, д). При этом амплитуда $y_{\text{пер}}$ все время возрастает. Система неустойчива, так как $y_{\text{пер}}$ не стремится к нулю. Переходные процессы на рис. 7-12, в—д являются колебательными.

в) Качество процесса регулирования

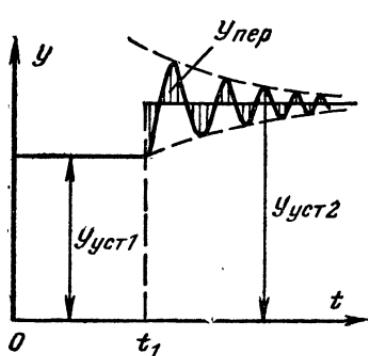
Устойчивость или неустойчивость характеризует только факт наличия или отсутствия затухания переходного процесса в АСР. Устойчивость АСР является основным, но недостаточным условием, потому что не всякую устойчивую АСР можно применить на практике. Так, затухание переходного процесса в АСР может происходить



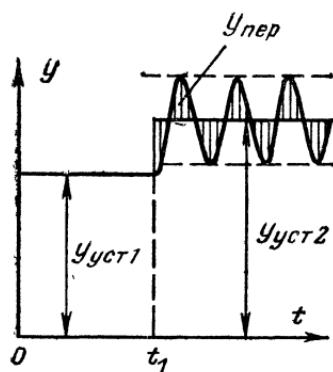
а)



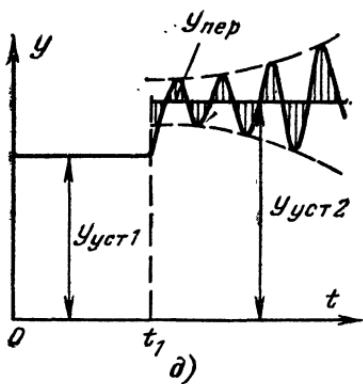
б)



в)



г)



д)

Рис. 7-12. Виды переходных процессов.

быстро или медленно, с большими или малыми отклонениями регулируемого параметра от заданного значения; кроме того, переходный процесс может быть апериодическим или колебательным. Для исследования АСР введено понятие *качества процесса регулирования*.

Первой стороной качества процесса регулирования является степень поддержания регулируемого параметра, когда на АСР не воздействуют внешние возмущающие факторы.

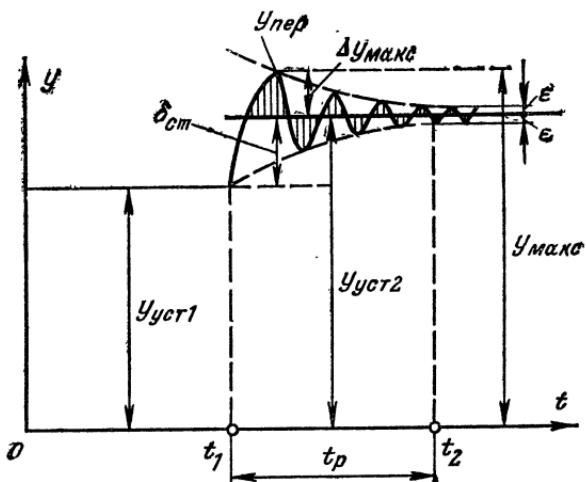


Рис. 7-13. Показатели качества процесса регулирования.

Второй стороной качества процесса регулирования является вид переходных процессов, которые возникают при воздействии внешних возмущающих факторов.

Качество процесса регулирования характеризуют следующие основные показатели:

1. *Статическая ошибка* $\delta_{\text{ст}}$ — отклонение регулируемого параметра от заданного значения после окончания переходного процесса. Значение статической ошибки можно найти из графика, который иллюстрирует процесс регулирования при воздействии на АСР единичного воздействия (рис. 7-13). При этом система переходит из одного установившегося состояния $y_{\text{уст}1}$ в другое $y_{\text{уст}2}$. Статическая ошибка

$$\delta_{\text{ст}} = y_{\text{уст}2} - y_{\text{уст}1}. \quad (7-7)$$

2. Перерегулирование (выброс) — максимальное отклонение регулируемого параметра от установившегося значения

$$\Delta y_{\max} = y_{\max} - y_{\text{уст2}}. \quad (7-8)$$

Обычно перерегулирование выражается в процентах, и значение его для современных АСР колеблется от 2 до 10%.

3. Время регулирования t_p — продолжительность переходного процесса. Переходный процесс теоретически считается законченным, если $y_{\text{пер}}(t)$ становится меньше $\epsilon = 3 \div 5\%$ нового установившегося значения регулируемого параметра $y_{\text{уст2}}$.

Время регулирования t_p характеризует быстродействие АСР, которое зависит от вида, числа и характера включения элементов.

4. Число колебаний регулируемого параметра в течение времени переходного процесса t_p .

7-13. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К АСР

При проектировании АСР необходимо учитывать большой комплекс технических требований, которые можно объединить в несколько основных групп.

К первой группе относятся требования, связанные со статическими и динамическими свойствами АСР. Особое место в этой группе занимают точностные характеристики, определяющие ошибки, которые возникают в системе при различных режимах. Это вызвано тем, что заранее не известны законы изменения во времени входных и возмущающих воздействий. Поэтому на практике исследуют поведение системы при воздействии на нее типовых входных и возмущающих воздействий (см. § 7-1). При этом используют некоторые вспомогательные оценки или критерии, например оценку запаса устойчивости, который определяется по близости системы к границе устойчивости, или оценку быстродействия, которое определяется по быстроте протекания переходного процесса.

Ко второй группе можно отнести те требования, которые связаны с характером эксплуатации АСР, например условия обслуживания системы, возможность ремонта или периодичность проверок.

К третьей группе относятся требования, связанные с надежностью работы системы и ее устойчивостью к влиянию климатических, механических и других воздействий, например безотказность работы, ресурс, интервал рабочих температур, вибростойкость и вибропрочность.

К четвертой группе можно отнести требования, которые связаны с технологичностью изготовления системы, например использование освоенных или унифицированных элементов и узлов, простота сборочных и регулировочных операций.

К пятой группе относятся требования, определяющие допустимую массу и потребляемую мощность системы, а также ее габариты.

К шестой группе можно отнести требования, которые связаны с общей ситуацией, имеющей место при проектировании системы, например патентная чистота, имеющиеся научные, конструкторские и производственные заделы.

В заключение следует отметить, что проектирование современной АСР является сложной научной и технической задачей.

7-14. ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ И ИХ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

а) Основные сведения о динамических звеньях

При исследовании устойчивости и качества АСР все элементы систем разбиваются не по функциональному или конструктивному признаку, а по динамическим свойствам элементов. Это дает возможность разные элементы, имеющие различные принципы действия и конструктивные оформления, описывать одинаковыми дифференциальными уравнениями. Элементы, которые рассматриваются с точки зрения их динамических свойств, называются элементарными (типовыми) динамическими звеньями. Любая АСР может быть разбита на элементарные звенья, переходные процессы которых

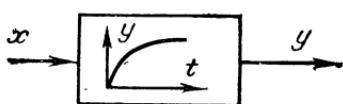


Рис. 7-14. Условное изображение элементарного (типового) динамического звена.

описываются линейными дифференциальными уравнениями не выше второго порядка. Все реальные элементы автоматических систем регулирования можно разбить в основном на пять групп элементарных динамических звеньев: *безынерционные, интегрирующие, инерционные, колебательные и дифференцирующие*.

На рис. 7-14 дается условное изображение элементарного динамического звена (в дальнейшем будем называть просто звено), когда внутри условного изображения звена вписывается вид переходного процесса.

б) Составление дифференциального уравнения и его операторная форма записи

Операторная форма записи дает возможность операции дифференцирования и интегрирования заменять более простыми алгебраическими операциями над некоторым оператором p . Оператор p заменяет операцию дифференцирования по времени, т. е. d/dt . В результате можно решить дифференциальные уравнения алгебраически, т. е. не используя сложную операцию интегрирования. Необходимо отметить, что при решении дифференциальных уравнений операторным методом осуществляется переход от данных функций (оригиналов) к их изображениям. Указанный переход и обратный, т. е. переход от изображений к оригиналам, осуществляется с помощью формулы Лапласа — Карсона

$$x(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} x(t) dt, \quad (7-9)$$

где e — основание натурального логарифма; $x(t)$ — исходная функция времени.

По формуле (7-9) можно найти изображения многих функций.

Отметим, что на практике переход от оригиналов к изображениям и обратно производится по таблицам изображений типовых функций, вычисленных по формуле (7-9). Например, оригиналу A соответствует изображение A или оригиналу $\frac{1}{a}(1-e^{-at})$ соответствует изображение $\frac{1}{p+a}$ [55].

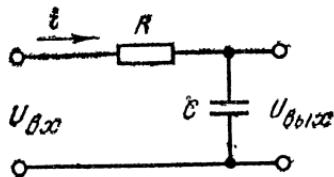


Рис. 7-15. Активно-емкостный контур.

аналитическое выражение выходной величины, т. е. напряжение на конденсаторе $U_{\text{вых}} = U_C$.

На основании второго закона Кирхгофа для активно-емкостного контура

$$Ri + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}},$$

где

$$i = C \frac{dU_{\text{вых}}}{dt}$$

— ток, протекающий в контуре.

Подставив значение тока i в уравнение контура, получим дифференциальное уравнение

$$RC \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}, \quad (7-10)$$

где $RC = T$ — постоянная времени, которая характеризует инерционность элемента.

Дифференциальное уравнение (7-10) составлено при нулевых начальных условиях, т. е. при $t=0$ первая производная выходного напряжения $dU_{\text{вых}}/dt=0$.

Уравнение (7-10) является дифференциальным уравнением первого порядка с правой частью. В данном дифференциальном уравнении не только выходная величина пропорциональна входной, но также и ее производная $dU_{\text{вых}}/dt$.

Запишем полученное дифференциальное уравнение в операторной форме, заменив знак дифференцирования d/dt на оператор p

$$RCU_{\text{вых}} p + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}. \quad (7-11)$$

Найдем изображение выходной величины

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{RCp+1}.$$

Разделим числитель и знаменатель полученного выражения на RC :

$$U_{\text{вых}} = \frac{\frac{U_{\text{вх}}}{RC}}{p + \frac{1}{RC}} = U_{\text{вх}} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{RC}\right)} \frac{1}{RC}.$$

Пример 7-6. Поясним операторную форму записи дифференциального уравнения на простейшем примере. На рис. 7-15 изображен активно-емкостный контур, состоящий из резистора R с сопротивлением 20 кОм и конденсатора C емкостью 5 мкФ. На вход контура подается постоянное напряжение $U_{\text{вх}}=27$ В.

Наша задача — с помощью операторного метода найти ана-

Подставляя значения величин, получаем:

$$RC = T = 2 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-1}; \quad \frac{1}{RC} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-1}} = 10 = a.$$

Тогда

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{1}{p + a} a.$$

Переходим с помощью соответствующей таблицы [55] от изображения $1/(p+a)$ к его оригиналу $\frac{1}{a} (1 - e^{-at})$.

Следовательно, выходное напряжение или напряжение на конденсаторе будет изменяться по следующему закону:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} a \frac{1}{a} (1 - e^{-at}) = 27 (1 - e^{-10t}).$$

в) Понятие о передаточной функции звена

Передаточной функцией звена называется отношение изображения функции сигнала на выходе звена $Y(p)$ к изображению функции возмущающего воздействия на входе того же звена $X(p)$ при нулевых начальных условиях

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (7-12)$$

Например, если звено описывается дифференциальным уравнением

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx$$

или в операторной форме

$$(Tp + 1) Y(p) = kX(p),$$

то передаточная функция звена будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Передаточные функции служат для анализа свойств звеньев, а также АСР в целом.

г) Безинерционные звенья

Безинерционным звеном называется такое звено, в котором выходная величина y пропорциональна входной x , т. е. выходная величина воспроизводит без искажений и

запаздываний входную величину:

$$y = kx, \quad (7-13)$$

где k — коэффициент преобразования или коэффициент передачи звена.

Переходный процесс в таком звене отсутствует. В этом звене скачкообразное изменение входной величины мгновенно передается на выход звена.

Передаточная функция безынерционного звена

$$W(p) = k. \quad (7-14)$$

Примерами безынерционных звеньев являются механический редуктор, потенциометр, механические пружины, электронная усилительная лампа, полупроводниковый триод, сельсины, трансформатор, жесткий рычаг и др.

д) Интегрирующее звено

Интегрирующим называется такое звено, в котором выходная величина y' пропорциональна интегралу по времени от входной величины x

$$y = k \int x dt, \quad (7-15)$$

где k — коэффициент усиления интегрирующего звена.

Можно также дать и другое определение. *Интегрирующим* называется такое звено, у которого скорость изменения выходной величины пропорциональна входной величине и которое описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dy}{dt} = kx. \quad (7-16)$$

Интегрирующее звено иногда называют *астатическим*.

Чтобы найти передаточную функцию интегрирующего звена, необходимо дифференциальное уравнение (7-16) записать в операторной форме, заменив при этом d/dt на p .

Тогда уравнение (7-16) в операторной форме будет иметь следующий вид:

$$pY(p) = kX(p),$$

откуда находим передаточную функцию звена

$$W(p) = \frac{k}{p}. \quad (7-17)$$

К интегрирующим звеньям можно отнести электрический двигатель постоянного тока с независимым возбуждением при условии, что электромеханическая и электромагнитная постоянные времени относительно малы и ими можно пренебречь (входной величиной является напряжение якоря, а выходной — угол поворота вала электродвигателя); конденсатор, заряжаемый током (входной величиной является ток, а выходной — напряжение на конденсаторе); поршневой гидравлический исполнительный двигатель при пренебрежении массой и силами трения (входной величиной является скорость подачи жидкости в цилиндр, а выходной — перемещение поршня); идеальный дроссель с нулевым активным со-противлением (входной величиной является напряжение, а выходной — ток) и др.

е) Инерционное (апериодическое) звено первого порядка

Это такое звено в котором при скачкообразном изменении входной величины x выходная величина y по экспоненциальному закону стремится к новому установившемуся значению. Данное звено имеет свойство накапливать энергию и описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами:

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (7-18)$$

где T и k — постоянные коэффициенты, которые зависят от принципа действия элемента и его конструкции.

Заменив d/dt на p , запишем дифференциальное уравнение (7-18) в операторной форме

$$TpY(p) + Y(p) = kX(p),$$

откуда передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (7-19)$$

Примерами инерционных звеньев первого порядка являются генератор постоянного тока с независимым воз-

буждением (входной величиной служит напряжение возбуждения, а выходной — напряжение якоря генератора); термопара (входная величина — температура окружающей среды, а выходная величина — термо-ЭДС); пассивные четырехполюсники, которые состоят из индуктивности и емкости (LC -контур) или из сопротивления и емкости (RC -контур); электрические двигатели (входная величина — ток якоря, а выходная величина — угловая скорость) и др.

ж) Инерционное (апериодическое) звено второго порядка

Уравнение динамики для этого звена можно записать в следующем виде:

$$T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\sigma T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (7-20)$$

где T — постоянная времени;
 σ — коэффициент затухания;
 k — коэффициент передачи.

В зависимости от значения коэффициента затухания, который принимает значения $0 \geq \sigma > 1$ или $0 \geq \sigma < 1$, выходное значение y может изменяться по экспоненте ($\sigma > 1$), совершать незатухающие колебания ($\sigma = 0$), затухающие колебания ($\sigma < 1$) и возрастающие колебания ($\sigma < 0$) [19].

Запишем дифференциальное уравнение (7-20) в операторной форме при нулевых начальных условиях:

$$(T^2 p^2 + 2\sigma T p + 1) Y(p) = kX(p),$$

откуда передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\sigma T p + 1}. \quad (7-21)$$

Апериодическим звеном второго порядка называется такое звено, у которого корни характеристического уравнения являются вещественными отрицательными (равными или неравными). У этого звена коэффициент затухания $\sigma > 1$. Оно может быть разложено на два апериодических звена первого порядка, соединенных последовательно.

з) Колебательное звено

Передаточная функция колебательного звена так же, как апериодического звена второго порядка, выражается формулой (7-21), но в этой формуле $\sigma < 1$.

У колебательного звена корни характеристического уравнения являются комплексно-сопряженными.

Колебательное звено — звено, в котором при подаче на вход возмущающего воздействия в виде единичного скачка (см. рис. 7-1, а) выходная величина стремится к новому установившемуся значению, совершая при этом затухающие или незатухающие колебания. Это звено представляет собой как бы соединение двух элементов, которые способны запасать энергию и взаимно обмениваться ею.

К колебательным звеньям относятся механические устройства, обладающие массой, упругостью и вязким трением (например, центробежный механизм, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, способный накапливать кинетическую энергию в якоре и электромагнитную энергию в магнитной цепи) и электрические колебательные *RLC*-контуры.

и) Дифференцирующее звено

Дифференцирующее звено — звено, в котором выходная величина y пропорциональна скорости изменения входной величины x , т. е. выходная величина пропорциональна производной от входной величины.

Различают два вида дифференцирующих звеньев: идеальное и реальное. Дифференциальное уравнение для идеального дифференцирующего звена записывается в виде

$$y = k \frac{dx}{dt}, \quad (7-22)$$

где dx/dt — скорость изменения входной величины.

Запишем уравнение (7-22) в операторной форме при нулевых начальных условиях

$$Y(p) = kpX(p). \quad (7-23)$$

Из уравнения (7-23) найдем передаточную функцию идеального дифференцирующего звена

$$W(p) = kp. \quad (7-24)$$

Примером такого звена могла бы служить *CR*-цепочка, если бы в ней сопротивление $R=0$ и выходное напряжение снималось бы с этого сопротивления: Идеальное дифференцирующее звено практически осуществить невозможно, поэтому в технике применяются реальные дифференцирующие звенья. Последние обладают инерционностью и в них имеются потери энергии. Дифференциальное уравнение для реального дифференцирующего звена можно записать так:

$$T \frac{dy}{dt} + y = kT \frac{dx}{dt}, \quad (7-25)$$

где T и k — постоянные коэффициенты.

Заменив в уравнении (7-25) d/dt на p , получим уравнение в операторной форме при нулевых начальных условиях

$$(Tp + 1) Y(p) = kTpX(p),$$

откуда передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{kTp}{Tp + 1}. \quad (7-26)$$

Примерами реальных дифференцирующих звеньев могут служить трансформатор; *CR*-контур, где выходной величиной является напряжение, снимаемое с сопротивления R ; цепь с активным сопротивлением и индуктивностью, где выходной величиной является напряжение, снимаемое с индуктивности L .

7-15. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ И ЗВЕНЬЕВ

Свойства АСР зависят от свойств элементов, которые входят в систему, а также от способов соединения их между собой. В свою очередь свойства элементов определяются их *статическими* и *динамическими характеристиками*.

а) Статические характеристики

Статической характеристикой элемента независимо от его конструкции, назначения и принципа действия называется зависимость между выходной y и входной x вели-

чинами в различных установившихся состояниях элемента. Эту зависимость можно записать в следующем виде:

$$y = f(x).$$

Статическую характеристику обычно выполняют графически в плоскости координат x и y . Ее можно получить экспериментально или аналитически. Она дает возможность определить изменение выходного сигнала элемента в результате изменения на то или иное значение входного сигнала при переходе элемента из одного равновесного состояния в другое.

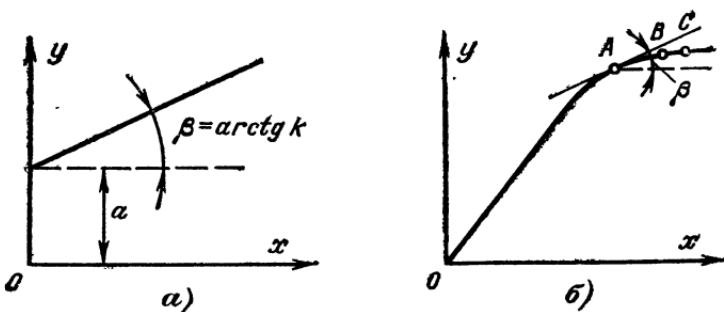


Рис. 7-16. Статические характеристики элементов.

a — линейного; *б* — нелинейного.

По виду рабочего участка статических характеристик все элементы делятся на *линейные* и *нелинейные*.

Линейным элементом называется такой элемент, статическая характеристика которого описывается линейным уравнением:

$$y = a + kx, \quad (7-27)$$

где a — постоянная величина, имеющая размерность y ;

k — коэффициент передачи, имеющий размерность y/x .

Значение k определяет наклон статической характеристики линейного элемента. Для этой характеристики значение k есть величина постоянная. Статическая характеристика линейного элемента приведена на рис. 7-16, *а*. Если значение a в уравнении (7-27) равно нулю, то статическая характеристика такого элемента проходит через начало координат. Примером линейного элемента является потенциометр (при $R_h = \infty$). Входной величи-

ной потенциометра служит механическое перемещение движка потенциометра, а выходной — электрическое напряжение.

Нелинейным элементом называется такой элемент, статическая характеристика которого описывается нелинейным уравнением

$$y = f(x). \quad (7-28)$$

Статическая характеристика нелинейного элемента показана на рис. 7-16, б. Примером нелинейного элемента является генератор постоянного тока. Входной величиной генератора служит ток возбуждения, а выходной — напряжение, снимаемое с зажимов генератора.

Заметим, что большинство реальных элементов являются нелинейными. Поэтому расчет АСР является очень сложным, так как многие реальные элементы описываются нелинейными уравнениями. Принимая во внимание, что в АСР отклонения выходных величин элементов от заданных значений небольшие, можно нелинейные статические характеристики элементов считать линейными, если их линеаризовать в окрестностях какой-то точки, например точки *A* на рис. 7-16, б, соответствующей установленному режиму. Для этого к кривой в точке *A* проведем касательную, которая является статической характеристикой системы в окрестности точки *A*. Такие же построения можно осуществить для точек *B* и *C*.

б) Динамические характеристики

Кроме статических свойств элементов, которые оцениваются статическими характеристиками, необходимо знать также и динамические свойства элементов, которые характеризуются динамическими характеристиками элементов. В § 7-14 было отмечено, что элемент, который рассматривается с точки зрения его динамических свойств, называется звеном. Динамическую характеристику звена можно определить с помощью уравнения $y = f(x, t)$. Динамической характеристикой звена называется зависимость между выходной и входной величинами в функции от времени, которая описывается дифференциальным уравнением. Аналитически динамические свойства звеньев выражаются дифференциальными уравнениями, а графически — кривыми переходных процессов.

В теории автоматического регулирования для определения динамических свойств звеньев в качестве входного сигнала применяют типовые функции, которые легко описываются математически (см. § 7-1). Чаще всего применяется функция в виде единичного скачка. Реально в природе такого скачка не существует, а могут быть только быстрые изменения, происходящие за короткие отрезки времени, которыми можно пренебречь.

Динамические характеристики звеньев имеют две основные разновидности. Первой разновидностью является **временная (переходная) характеристика**, а другой — **частотная характеристика**.

Временная (переходная) характеристика звена представляет собой график изменения во времени выходной величины звена, вызванного подачей на его вход единичного скачка [106].

Частотная характеристика описывает установившиеся вынужденные колебания на выходе звена, которые вызваны гармоническим воздействием на входе. Рассмотрим такой режим.

Подадим на вход звена гармоническое воздействие, изменяющееся по синусоидальному закону

$$x = A_1 \sin \omega t,$$

где A_1 — амплитуда;

ω — угловая частота этого воздействия.

По окончании переходного процесса на выходе звена будут существовать гармонические колебания с той же частотой, что и входные колебания, но будут отличаться по амплитуде и фазе. В установившемся режиме выходная величина звена

$$y = A_2 \sin (\omega t + \varphi),$$

где A_2 — амплитуда выходных установившихся колебаний;

φ — фазовый сдвиг между входными и выходными колебаниями (рис. 7-17).

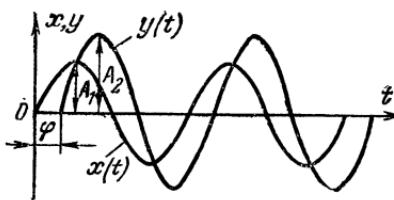


Рис. 7-17. График гармонических колебаний входной и выходной величин.

При фиксированной амплитуде входных колебаний амплитуда и фаза установившихся колебаний на выходе звена зависят от частоты входных колебаний [106].

Запишем входную и выходную величины звена в комплексной показательной форме:

$$x = A_1 e^{j\omega t};$$

$$y = A_2 e^{j(\omega t + \varphi)},$$

где $j = \sqrt{-1}$.

Разделив выходную величину звена на входную, получим выражение частотной функции

$$W(j\omega) = \frac{A_2 e^{j(\omega t + \varphi)}}{A_1 e^{j\omega t}} = \frac{A_2 e^{j\omega t} e^{j\varphi}}{A_1 e^{j\omega t}} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7-29)$$

где $A(\omega) = A_2/A_1$ — модуль (отношение амплитуд выходного и входного колебаний) частотной функции $W(j\omega)$;

e — основание натурального логарифма;

$\varphi(\omega)$ — аргумент (разность фаз выходного и входного колебаний).

Модуль A и аргумент φ зависят от угловой частоты ω .

В общем случае частотная функция получается из передаточной функции путем замены оператора p на $j\omega$. По выражению (7-29) чаще всего строится амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) звена, определяемая как отношение выходной величины звена $A_2 e^{j(\omega t + \varphi)}$ к входной величине $A_1 e^{j\omega t}$, выраженных в комплексной форме. Эта характеристика звена не зависит от времени и показывает зависимость изменения амплитуды колебаний выходной величины и аргумента от частоты (при постоянной амплитуде колебаний на входе звена).

Кроме АФХ, которая является совмещенной характеристикой, различают амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) звена показывает зависимость модуля A от частоты подаваемых на вход колебаний: $A = f(\omega)$. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) звена показывает зависимость аргумента φ от частоты подаваемых на вход колебаний: $\varphi = f(\omega)$. Указанные характеристики дают возможность судить о динамических свойствах звеньев АСР.

Отметим, что динамические свойства звеньев АСР можно характеризовать временными (переходными) или частотными характеристиками.

При построении частотных характеристик вместо натуральных значений модуля A и частоты применяют их логарифмы, сохраняя натуральные значения только для аргумента.

Основное преимущество асимптотических логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ) заключается в том, что точные характеристики заменяются приближенными асимптотами, которые составляются из прямолинейных отрезков, в результате чего асимптотическая ЛЧХ строится проще, чем истинная ЛЧХ.

Логарифмические характеристики применяются для приближенных расчетов. При построении логарифмических характеристик пользуются понятиями «октава» и «декада». Каждой октаве соответствует увеличение частоты ω в 2 раза, а каждой декаде — в 10 раз. Октава равна примерно 0,3 декады, так как $\lg 2 \approx 0,3$, а $\lg 10 = 1$. В начале координат на оси абсцисс можно помещать любое значение частоты. Это зависит от того, в каком диапазоне частот необходимо строить частотную характеристику.

Различают логарифмическую амплитудно-частотную (ЛАЧХ) и логарифмическую фазо-частотную (ЛФЧХ) характеристики. При построении ЛАЧХ по оси абсцисс откладывают значения логарифмов частоты $\lg \omega$, а по оси ординат откладывается модуль частотной функции $W(j\omega)$ в децибелах, т. е. $L = 20 \lg A$. Увеличение $20 \lg A$ на каждые 20 дБ соответствует изменению усиления (ослабления) амплитуды в 10 раз, а на 1 дБ — в 1,12 раза. Если модуль $A > 1$, то происходит усиление амплитуды, а если $A < 1$, то происходит ослабление. При построении ЛФЧХ по оси абсцисс откладывают значения логарифмов частоты, а по оси ординат — натуральные значения аргумента в градусах.

Рассмотрим порядок построения временной и частотных характеристик для одного типового звена, например для инерционного (апериодического) звена первого порядка.

Временную или характеристику переходного процесса указанного звена можно получить следующим образом. Для этого подадим на вход звена единичный скачок $x(t) = 1(t)$ (см. рис. 7-1).

Тогда выходная величина

$$y = kx \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

будет иметь вид, показанный на рис. 7-18, а. Эта характеристика представляет собой экспоненту, направление которой зависит от направления возмущающего воздействия. Постоянная времени T может быть определена по временной характеристике. В этом случае из точки O проводят касательную OA к временной характеристике. Тогда время T равно отрезку, который отсекает касательная на прямой, параллельной оси абсцисс, проведенной на уровне $y_{\text{уст}}$. Постоянная времени T рассматриваемого звена определяет динамические свойства его. Чем она меньше, тем быстрее протекает переходный процесс, и наоборот. При $t=T$ значение выходной величины составляет 0,63 нового установившегося значения (0,63 $y_{\text{уст}}$).

Прежде чем построить частотные характеристики инерционного звена первого порядка, необходимо найти частотную функцию, которая получается, если в формуле (7-19) заменить p на $j\omega$. Тогда частотная функция рассматриваемого звена будет иметь вид:

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1}. \quad (7-30)$$

Умножим числитель и знаменатель (7-30) на сопряженную со знаменателем комплексную величину $(1 - Tj\omega)$

$$W(j\omega) = \frac{k}{(Tj\omega + 1)} \frac{(1 - Tj\omega)}{(1 - Tj\omega)} = \frac{k(1 - Tj\omega)}{(1 + T^2\omega^2)},$$

где $j^2 = -1$.

Отделив действительную и мнимые части, получим:

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{kT\omega}{1 + T^2\omega^2}, \quad (7-31)$$

где

$$R(\omega) = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} \text{ и } S(\omega) = - \frac{kT\omega}{1 + T^2\omega^2}$$

— соответственно действительная и мнимая части частотной функции инерционного звена первого порядка.

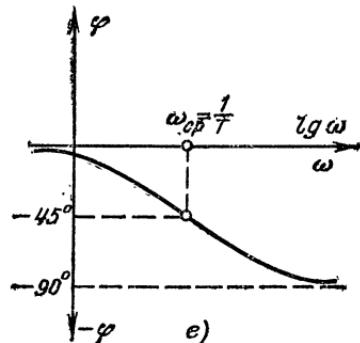
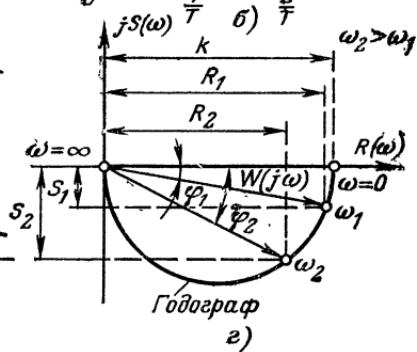
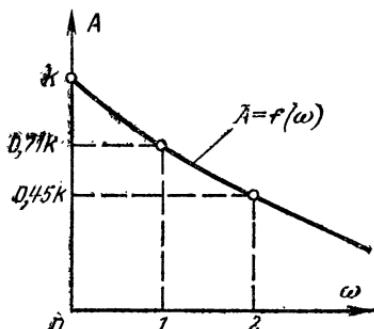
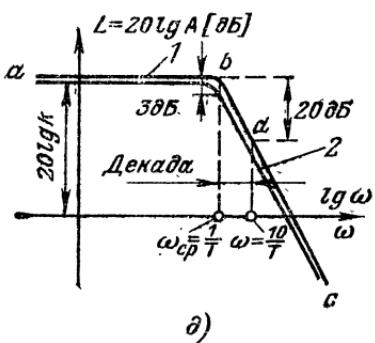
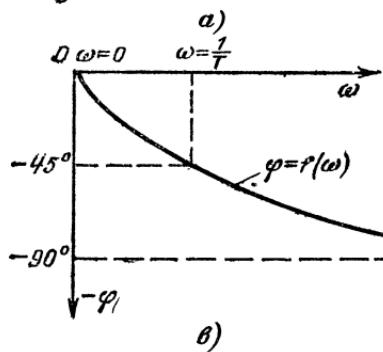
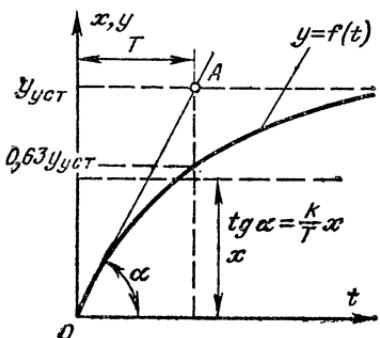


Рис. 7-18. Характеристики инерционного (апериодического) звена первого порядка.

a — временная; *б* — амплитудно-частотная; *в* — фазо-частотная; *г* — амплитудно-фазовая; *д* — логарифмическая амплитудно-частотная; *е* — логарифмическая фазо-частотная.

Модуль вектора OB (рис. 7-19)

$$A = \sqrt{R^2 + S^2} = \\ = \sqrt{\left(\frac{k}{1 + T^2 \omega^2}\right)^2 + \left(-\frac{kT\omega}{1 + T^2 \omega^2}\right)^2} = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}. \quad (7-32)$$

На рис. 7-18, б показана АЧХ, которая построена по выражению (7-32). Для построения этой характеристики необходимо вычислить значения A при различных значениях ω . Так, при $\omega=0$ модуль A равен k ; при $\omega=-1/T; 2/T$ и ∞ модуль A равен соответственно: $0,71 k$; $0,45 k$ и 0 .

Подставив в формулу $\varphi = \operatorname{arctg} S/R$ значения R и S , получим выражение для определения аргумента инерционного звена первого порядка:

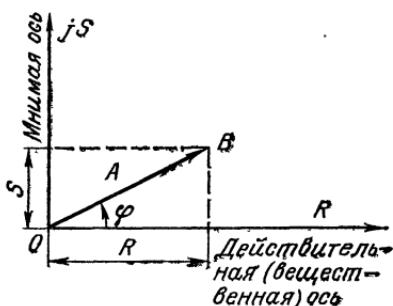


Рис. 7-19. Изображение частотной передаточной функции на комплексной плоскости.

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{-\frac{kT\omega}{1 + T^2 \omega^2}}{\frac{k}{1 + T^2 \omega^2}} \right) = \\ = -\operatorname{arctg} \omega T. \quad (7-33)$$

По формуле (7-33) можно построить ФЧХ (рис. 7-18, в). Если в выражение частотной функции (7-29) подставить

значения модуля A и аргумента φ из формул (7-32) и (7-33), то получим уравнение, по которому можно построить АФХ рассматриваемого звена (рис. 7-18, г), т. е.

$$W(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}} e^{-j \operatorname{arctg} \omega T}.$$

Характеристика располагается в четвертом квадранте и представляет собой полуокружность. При $\omega=0$ $W(j\omega)=k$, а при $\omega=\infty W(j\omega)=0$. Кривая, которая является геометрическим местом точек концов вектора $W(j\omega)$, соответствующих различным значениям ω от 0 до ∞ , называется годографом. Последний показывает кар-

тину изменения вектора $W(j\omega)$ при изменении частоты колебаний ω .

По АФХ можно определить: модуль $A = \sqrt{R^2 + S^2}$ и аргумент $\varphi = \operatorname{arctg} (S/R)$.

Логарифмическая АЧХ (рис. 7-18, δ) строится следующим образом. Сначала находятся ее асимптоты, т.е. прямые, к которым она стремится при $\omega \rightarrow 0$ и при $\omega \rightarrow \infty$.

1. При $\omega \rightarrow 0$ имеем:

$$20 \lg A = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}} = 20 \lg k -$$

$$- 20 \lg \sqrt{1 + T^2 \omega^2} = 20 \lg k - 20 \lg 1 = 20 \lg k.$$

Первая асимптота представляет собой прямую ab , которая параллельна оси частот, так как $20 \lg k$ не зависит от ω .

2. При $\omega \rightarrow \infty$ получим:

$$20 \lg A = 20 \lg k - 20 \lg T\omega = -\infty.$$

Вторая асимптота также представляет собой прямую bc , наклон которой измеряется в децибелах на декаду.

Сопряжение горизонтальной прямой ab и наклонной bc производится в точке, соответствующей частоте $\omega_{\text{ср}} = 1/T$, которая называется *сопрягающей частотой* или *частотой среза*. Возьмем на оси абсцисс расстояние, равное одной декаде, т.е. если раньше, например, частота $\omega_{\text{ср}}$ была равна $1/T$, то теперь она равна $10/T$ (рис. 7-18, δ). Из точки, соответствующей $\omega = 10/T$, проведем перпендикуляр до пересечения с прямой bc и вычислим изменение ординаты на расстоянии одной декады:

$$(20 \lg A)_a - (20 \lg A)_b = \left(20 \lg k - 20 \lg T \frac{10}{T} \right) - \\ - 20 \lg k = -20 \lg 10 = -20 \text{ дБ.}$$

Следовательно, наклон асимптоты bc равен -20 дБ/дек . Ломаная линия abc является асимптотической ЛАЧХ (линия 1). Она отличается от истинной ЛАЧХ (линия 2). Наибольшее отклонение ее будет в точке b и равно приблизительно 3 дБ.

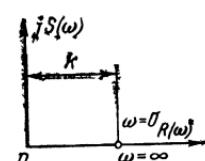
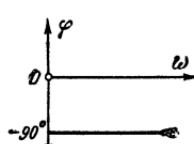
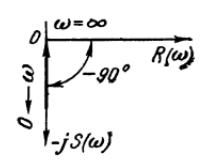
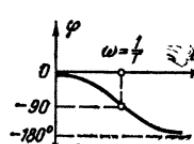
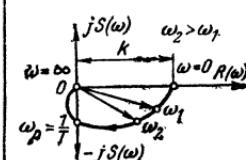
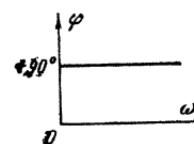
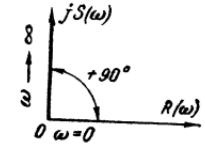
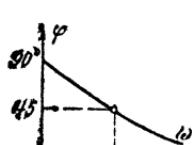
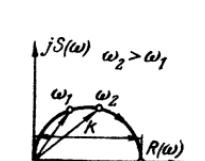
Логарифмическая ФЧХ рассматриваемого звена приведена на рис. 7-18, e .

Характеристики других типовых звеньев приведены в табл. 7-1.

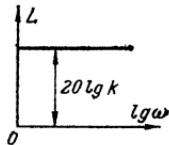
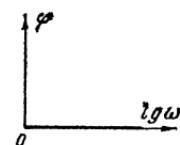
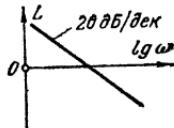
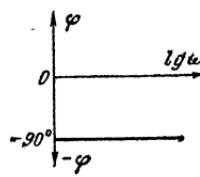
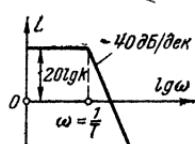
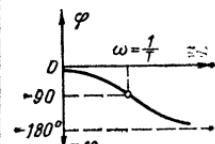
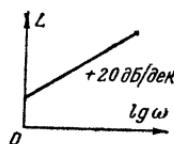
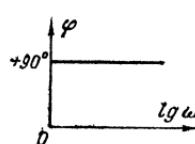
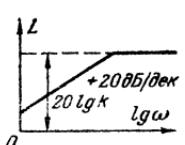
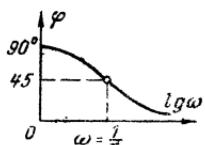
Таблица 7-1

№ п.п.	Тип звена	Временная (переходная) характеристика $y=f(t)$ [при $x(t)=1(t)$]	Амплитудно-частотная характеристика $A=f(\omega)$
1	Безынерционное		
2	Интегрирующее		
3	Инерционное звено второго порядка (колебательное)		
4	Идеальное дифференцирующее (импульсное звено первого порядка)		
5	Реальное дифференцирующее (изодромное)		

Продолжение табл. 7-1

№ п.п.	Тип звена	Фазо-частотная ха- рак- теристика $\varphi=f(\omega)$	Амплитудно-фазовая характеристика
1	Безынерционное		
2	Интегрирующее		
3	Инерционное зве- но второго по- рядка (колеба- тельный)		
4	Идеальное диффе- ренцирующее (импульсное звено первого порядка)		
5	Реальное диффе- ренцирующее (изодромное)		

Продолжение табл. 7-1

№ п.п.	Тип звена	Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика	Логарифмическая фазо-частотная характеристика
1	Безынерционное		
2	Интегрирующее		
3	Инерционное звено второго порядка (колебательное)		
4	Идеальное дифференцирующее (импульсное звено первого порядка)		
5	Реальное дифференцирующее (изодромное)		

7-16. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АСР, СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ

а) Функциональная схема АСР

Функциональной схемой АСР называется такая схема, которая отражает состав звеньев (их число и вид), характер связей между ними, динамические свойства, системы и служит для исследования этих свойств. С помощью функциональной схемы удается уточнить внутреннюю структуру АСР и найти место включения дополнительных связей, которые улучшают качество динамических процессов, происходящих в системе. Типовое динамическое звено на функциональной схеме обозначается условно в виде прямоугольника с указанием передаточной функции внутри него.

Функциональная схема строится на основании структурной схемы (см. § 7-2). При построении функциональной схемы необходимо сначала установить: каким звеньям соответствует каждый элемент структурной схемы и как нужно соединить звенья между собой.

В качестве примера составим функциональную схему для АСР напряжения генератора постоянного тока, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 7-20, а.

Генератор постоянного тока Γ приводится во вращение асинхронным двигателем (на рис. 7-20, а асинхронный двигатель не показан). Нагрузкой генератора служит электрический двигатель D .

Перед тем как составить функциональную схему для указанной схемы, необходимо составить структурную схему (рис. 7-20, б). В схеме объектом регулирования OP является генератор постоянного тока Γ , измерительным устройством $ИзУ$ — электромагнит 2 и возвратная пружина 4 , регулирующим органом PO — реостат 1 . Настройка автоматического регулятора осуществляется с помощью реостата 3 . Внешние возмущения могут создаваться за счет изменения момента нагрузки на валу двигателя D , частоты вращения генератора Γ и т. д.

Рассмотрим в отдельности каждый элемент структурной схемы (рис. 7-20, б) и разобьем элементы на типовые динамические звенья.

1. *Объект регулирования* (генератор постоянного тока). Входной величиной генератора Γ является ток I_b в цепи обмотки возбуждения OB_2 , а выходной — напряже-

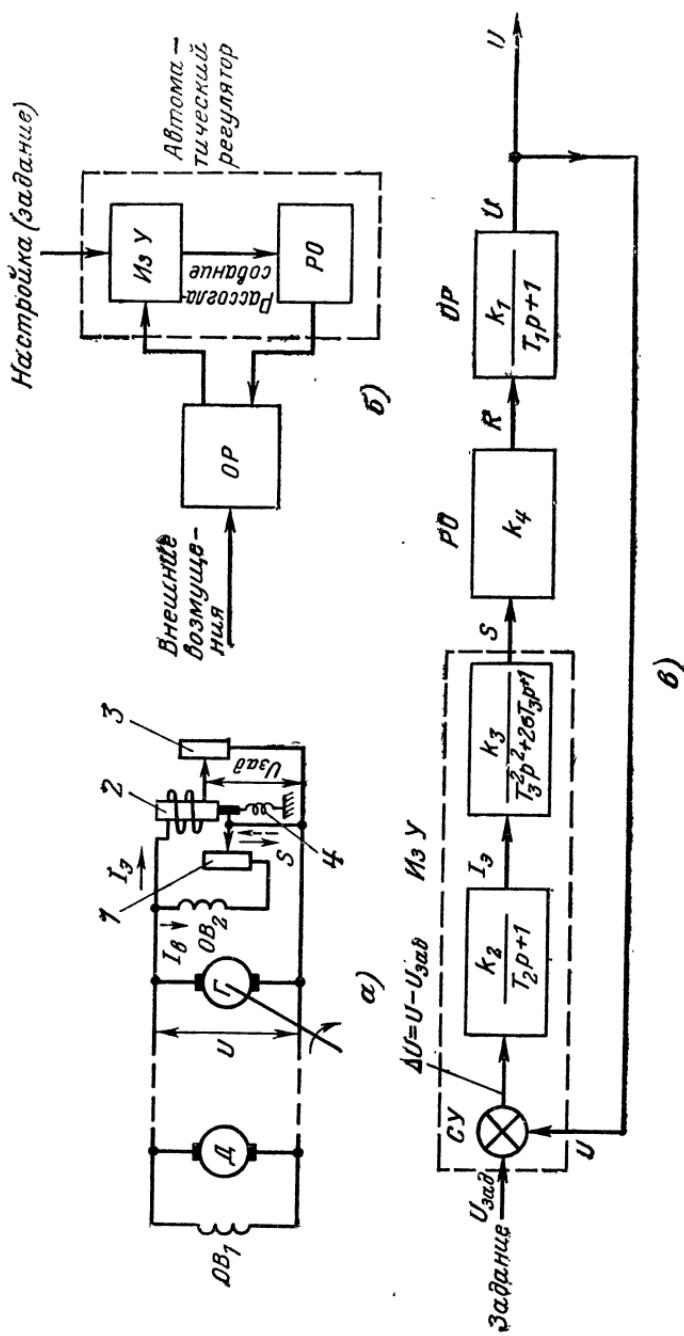


Рис. 7-20. АСР напряжения генератора постоянного тока.
а — электрическая принципиальная схема; *б* — структурная схема; *в* — функциональная схема.

ние U , снимаемое с зажимов генератора (рис. 7-20, а). Генератор постоянного тока для данной схемы представляет собой апериодическое звено, передаточную функцию которого можно записать в следующем виде:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}.$$

2. Измерительное устройство (электромагнит с возвратной пружиной). Разбиваем измерительное устройство на две части: электрическую и механическую. Электрическая часть состоит из обмотки электромагнита 2 и реостата настройки 3. Входной величиной ее является напряжение генератора U , а выходной — ток I_a , проходящий по цепи обмотки электромагнита 2. Электрическая часть так же, как и генератор, представляет собой апериодическое звено, имеющее передаточную функцию

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}.$$

Механическая часть состоит из якоря электромагнита 2, скрепленного с движком реостата 1 и пружиной 4. Входной величиной ее является ток I_a , а выходной — перемещение движка S реостата 1. Механическая часть представляет собой колебательное звено и имеет следующую передаточную функцию:

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + 2\sigma T_3 p + 1}.$$

3. Регулирующий орган (реостат 1). Входной величиной этого элемента является перемещение S движка реостата 1, а выходной — сопротивление реостата, изменяющее ток возбуждения I_b . Реостат 1 представляет собой безынерционное звено с передаточной функцией

$$W_4(p) = k_4.$$

Зная структурную схему и передаточные функции, входящих в нее динамических звеньев, функциональную схему системы можно представить в виде схемы на рис. 7-20, в.

б) Соединение звеньев

Различают последовательное, параллельное и встречнопараллельное соединение звеньев.

При последовательном соединении звеньев выходная величина каждого предыдущего звена является входной величиной для следующего звена (рис. 7-21, а). Передаточная функция последовательно соединенных звеньев

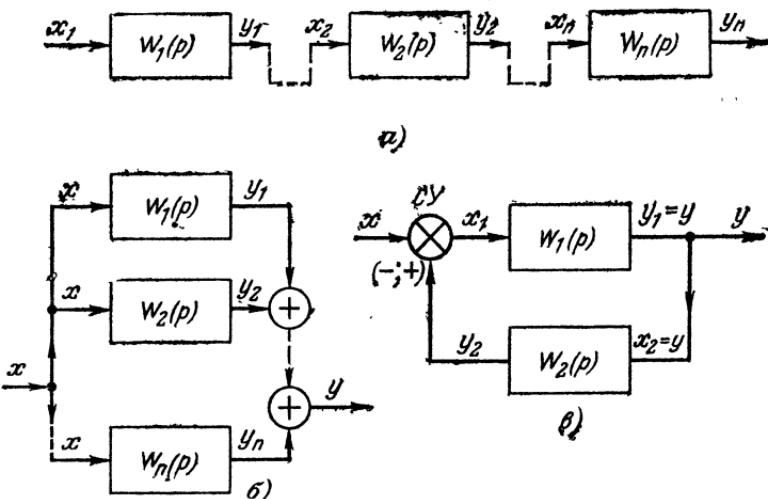


Рис. 7-21. Соединение звеньев.

а — последовательное; б — параллельное; в — встречно-параллельное.

равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W_1(p) W_2(p) \cdots W_n(p). \quad (7-34)$$

Параллельное соединение звеньев — соединение, при котором входная величина является общей для всех звеньев (рис. 7-21, б). Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \cdots + W_n(p). \quad (7-35)$$

Встречно-параллельное соединение звеньев — соединение, в состав которого входит положительная или отрицательная обратная связь (рис. 7-21, в). Передаточную функцию для такого соединения звеньев определяют по формуле:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) W_2(p)}, \quad (7-36)$$

где знак «—» соответствует положительной обратной связи, а знак «+» отрицательной обратной связи.

7-17. ТИПОВЫЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Автоматические регуляторы по своим динамическим свойствам делятся на *линейные* и *нелинейные*.

Наибольшее распространение в промышленности получили линейные автоматические регуляторы, в которых используются следующие основные законы регулирования:

по отклонению — управляющее воздействие пропорционально мгновенному значению отклонения (пропорциональные регуляторы);

по интегралу — управляющее воздействие пропорционально значению интеграла отклонения по времени (интегральные регуляторы);

по отклонению и интегралу — управляющее воздействие пропорционально значению не только отклонения, но и его интеграла по времени (пропорционально-интегральные регуляторы);

по отклонению, интегралу и производным — управляющее воздействие пропорционально значению отклонения, его интеграла и производных по времени (пропорционально-интегральные дифференцирующие регуляторы).

Автоматические регуляторы, которые работают по одному из этих законов, сокращенно обозначаются П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторами [58].

П-регуляторы действуют на регулирующий орган пропорционально отклонению регулируемого параметра от заданного значения:

$$y = k_p x,$$

где k_p — коэффициент передачи регулятора.

Передаточную функцию П-регулятора можно записать в следующем виде:

$$W(p) = k_p. \quad (7-37)$$

В динамическом отношении эти регуляторы аналогичны безынерционному звену (см. § 7-14).

И-регуляторы воздействуют на регулирующий орган пропорционально интегралу от отклонения регулируемого параметра

$$y = \frac{k_p}{T} \int x dt.$$

Передаточная функция этого регулятора имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_p}{Tp}, \quad (7-38)$$

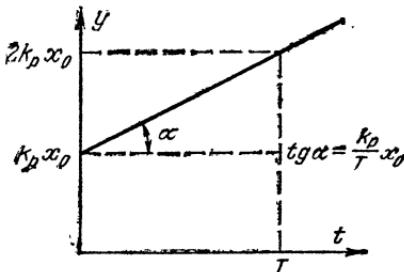


Рис. 7-22. Закон регулирования ПИ-регулятора.

где T — постоянная времени (постоянная интегрирования регулятора) [58].

Это — время, в течение которого первоначальное значение выходной величины регулятора, равное $k_p x_0$, удваивается в результате действия одной только его интегральной части (рис. 7-22).

ПИ-регуляторы воздействуют на регулирующий орган пропорционально отклонению и интегралу от отклонения регулируемого параметра

$$y = k_p \left(x + \frac{1}{T} \int x dt \right).$$

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p) = k_p \frac{Tp + 1}{Tp}. \quad (7-39)$$

В динамическом отношении этот регулятор эквивалентен П-регулятору с коэффициентом передачи k_p и И-регулятору с коэффициентом передачи k_p/T , соединенным параллельно.

В ПИ-регуляторе при отклонении регулируемого параметра от заданного значения мгновенно срабатывает

пропорциональная (статическая) часть регулятора, а затем воздействие на объект регулирования постепенно увеличивается под действием интегральной части регулятора, называемой астатической.

ПИД-регуляторы воздействуют на регулирующий орган пропорционально отклонению, интегралу этого отклонения и скорости изменения регулируемого параметра:

$$y = k_p \left(x + \frac{1}{T} \int x dt + T_1 \frac{dx}{dt} \right),$$

где T_1 — постоянная времени, которая определяет степень влияния производной dx/dt (скорости изменения регулируемого параметра) на закон регулирования [19].

Передаточная функция этого регулятора имеет вид:

$$W(p) = k_p \frac{T_1 T p^2 + T p + 1}{T p}. \quad (7-40)$$

7.18. ОСНОВЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ АСР

а) Устойчивость в «малом» и «большом»

Устойчивость АСР является важнейшим показателем процесса регулирования. Для того чтобы определить, устойчива ли АСР, необходимо изучить поведение этой системы при малых отклонениях от положения равновесия.

Устойчивостью в «малом» называют устойчивость системы при бесконечно малых отклонениях. Если линейная АСР устойчива в «малом», то она обязательно устойчива в «большом». Русский ученый А. М. Ляпунов дал математическое определение и ввел понятие об устойчивости АСР в «малом» с помощью линеаризованного уравнения. Система называется устойчивой в «малом», если она возвращается в состояние равновесия при ограниченных значениях возмущающих воздействий. Система называется устойчивой в «большом», если она возвращается в состояние равновесия при любом значении возмущающего воздействия.

б) Критерии устойчивости

Прежде чем перейти к критериям устойчивости, покажем порядок составления характеристического уравнения. Из курса высшей математики известно, что линейное диф-

дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами без правой части

$$y^{(n)} + p_1 y^{(n-1)} + p_2 y^{(n-2)} + \cdots + p_n y = 0 \quad (7-41)$$

решается с помощью характеристического уравнения

$$r^n + p_1 r^{n-1} + p_2 r^{n-2} + \cdots + p_n = 0. \quad (7-42)$$

Пример 7-7. Найти решение дифференциального уравнения

$$8y'' + 2y' - 3y = 0, \quad (7-43)$$

где $y' = dy/dt$; $y'' = d^2y/dt^2$.

Будем искать решение вида $y = e^{rt}$.

Составим характеристическое уравнение

$$8r^2 + 2r - 3 = 0. \quad (7-44)$$

Найдем корни характеристического уравнения:

$$r_1 = 1/2; \quad r_2 = -3/4.$$

Общее решение уравнения (7-44) будет иметь следующий вид:

$$y = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} = C_1 e^{\frac{1}{2}t} + C_2 e^{-\frac{3}{4}t},$$

C_1 и C_2 — постоянные интегрирования.

Анализ устойчивости АСР сводится к чисто алгебраической задаче, т. е. к определению знака корней характеристического уравнения. Следует заметить, что просто решаются только уравнения не выше второго порядка, а уравнения выше второго порядка решаются аналитически сложно, причем уравнения более высоких порядков вообще не имеют аналитического решения и решаются лишь приближенно. Для облегчения исследования устойчивости можно и не решать характеристические уравнения, но при этом необходимо применить косвенные методы определения знаков корней, которые получили название критерии устойчивости. Последние делятся на две группы: *алгебраические* (Вышнеградского, Рауса, Гурвица) и *частотные* (Михайлова, Найквиста, метод логарифмических частотных характеристик, метод переходной функции).

Алгебраические критерии в основном применяются для исследования АСР, которые описываются уравнениями не выше четвертого порядка. *Частотные критерии*, имея большую наглядность, чаще всего применяются для тех случаев, когда требуется установить влияние какого-либо параметра на устойчивость АСР, а также для систем, которые описываются дифференциальными уравнениями выше четвертого порядка.

Все критерии устойчивости дают возможность установить следующее: отрицательны ли вещественные части всех корней характеристического уравнения или нет, причем применение того или иного критерия зависит от конкретных условий.

В качестве примера алгебраического критерия устойчивости рассмотрим критерий, предложенный в 1876 г. русским ученым И. А. Вышнеградским. Этот критерий разработан для анализа АСР, имеющих дифференциальное уравнение третьего порядка.

Предположим, что дано характеристическое уравнение третьего порядка

$$a_3 r^3 + a_2 r^2 + a_1 r + a_0 = 0.$$

1. Разделим все члены уравнения на a_0 :

$$\frac{a_3}{a_0} r^3 + \frac{a_2}{a_0} r^2 + \frac{a_1}{a_0} r + 1 = 0. \quad (7-45)$$

2. Введем новую переменную

$$q = r \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_0}} = \frac{r}{\omega},$$

где

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}}.$$

3. Подставив в формулу (7-45) вместо r значение $q\omega$ и сделав преобразования, запишем уравнение (7-45) в форме Вышнеградского

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0,$$

где

$$A = \frac{a_2 \omega^2}{a_0}; \quad B = \frac{a_1 \omega}{a_0}$$

— параметры Вышнеградского.

4. Построим плоскость с параметрами A и B и нанесем границу устойчивости (рис. 7-23, а). Уравнение границы устойчивости можно записать так: $AB=1$ (при $A>0$ и $B>0$). Граница устойчивости, которая представляет собой равнобокую гиперболу, строится по точкам. Например, если $A=0,5$, то $B=AB/A=1/0,5=2$ и т. д. Равнобокая гипербола, для которой A и B являются асимптотами, делит плоскость на две части: I — неустойчивая часть, II — устойчивая. Приведенный график часто называется диаграммой Вышнеградского.

Критерий устойчивости Вышнеградского можно сформулировать следующим образом: АСР, описываемая дифференциальным уравнением третьего порядка, явля-

ется устойчивой, если параметры A и B положительны и произведение их AB больше единицы: $A > 0$; $B > 0$ и $AB > 1$.

При исследовании устойчивости АСР высокого порядка часто применяют частотный критерий, предложенный А. В. Михайловым в 1938 г. Этот критерий так же,

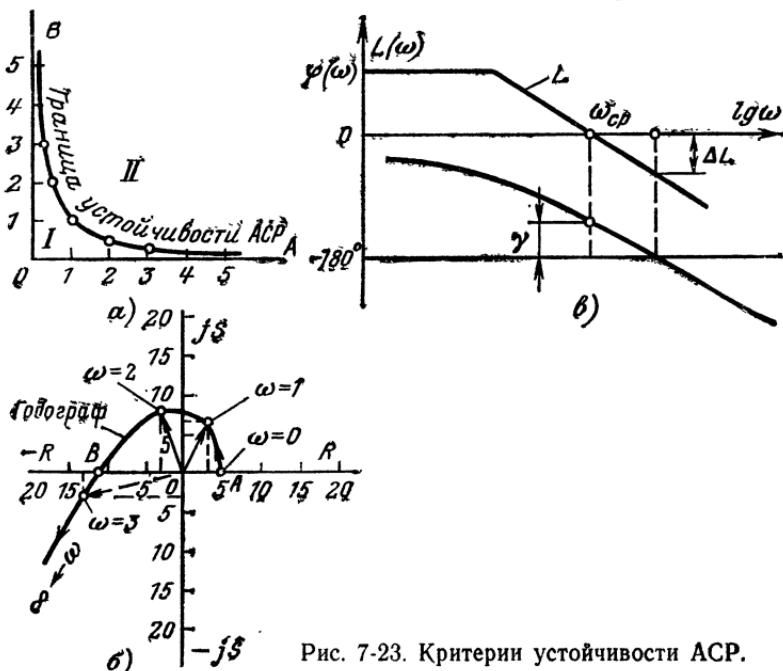


Рис. 7-23. Критерии устойчивости АСР.

как и критерий Вышнеградского, основан на использовании характеристического уравнения системы.

Пример 7-8. Для простоты возьмем характеристическое уравнение третьего порядка:

$$r^3 + 2r^2 + 8r + 5 = 0.$$

1. Заменим r на $j\omega$

$$(j\omega)^3 + 2(j\omega)^2 + 8j\omega + 5 = 0.$$

2. Сделав преобразования, получим:

$$(5 - 2\omega^2) + j(8\omega - \omega^3) = 0.$$

3. Выделим действительную и мнимую части:

$$R(\omega) = 5 - 2\omega^2; S(\omega) = 8\omega - \omega^3.$$

4. Составим таблицу (табл. 7-2) для $R(\omega)$ и $S(\omega)$ при различных значениях ω (от 0 до $+\infty$).

Таблица 7-2

ω	0	1	2	3	4	и т. д.
$R(\omega)$	5	3	-3	-13	-27	
$S(\omega)$	0	7	8	-3	-32	

5. По табл. 7-2 в масштабе строим точки на комплексной плоскости и соединяем их плавной кривой. В результате этого получим график изменения вектора годографа (рис. 7-23, б).

Отметим, что АСР является устойчивой, если:

- 1) вектор годографа при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ начинает свое движение из точки положительной вещественной полуоси ($+R$);
- 2) вектор вращается только против часовой стрелки;
- 3) нигде вектор не обращается в нуль;
- 4) вектор проходит последовательно n квадрантов комплексной плоскости, т. е. поворачивается на угол $n\pi/2$, где n — наибольшая степень характеристического уравнения.

Если хотя бы одно из этих условий не соблюдается, то АСР является неустойчивой или нейтрально устойчивой. Для нашего примера АСР является устойчивой, потому что соблюдаются все четыре условия.

Для суждения о степени близости АСР к границе устойчивости обычно пользуются запасами устойчивости.

Запасом устойчивости по фазе называется значение γ , на которое должно возрасти запаздывание по фазе на частоте среза ω_{cr} в АСР, чтобы система оказалась на границе устойчивости (рис. 7-23, в).

Запасом устойчивости по амплитуде называется значение ΔL допустимого подъема ЛАЧХ, при котором АСР окажется на границе устойчивости.

При проектировании АСР рекомендуется выбирать $\gamma \geq 30^\circ$, а $\Delta L \geq 6$ дБ [106].

7-19. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

a) Общие сведения

При проектировании АСР может оказаться, что ее динамические свойства не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Так, система может быть устойчивой, но ее

качественные показатели не удовлетворяют заданным требованиям (большое время регулирования, большой выброс и т. д.). В этом случае систему необходимо скорректировать, например ввести корректирующие устройства.

Прежде чем более подробно рассмотреть корректирующие устройства, дадим понятия *структурно-устойчивой* и *структурно-неустойчивой систем*. *Структурно-устойчивая* — это такая система, которую можно сделать устойчивой путем изменения основных ее параметров (коэффициента усиления, постоянных времени и т. д.) без изменения структурной схемы. *Структурно-неустойчивой системой* называют такую систему, которую нельзя сделать устойчивой путем изменения основных ее параметров, а можно сделать устойчивой только за счет изменения структурной схемы.

Корректирующие устройства по способу включения в АСР бывают *параллельные* и *последовательные*.

б) Параллельные корректирующие устройства

Они включаются параллельно одному или нескольким звеньям АСР и представляют собой местные обратные связи, к которым относятся жесткие и гибкие обратные связи.

Рассмотрим некоторые примеры влияния обратной связи на динамические свойства АСР при различных способах ее включения.

Пример 7-9. Жесткая обратная связь (безынерционная) охватывает апериодическое звено (инерционное звено первого порядка). В этом случае обратная связь осуществляется путем подачи на вход звена воздействия, пропорционального только выходной величине этого звена.

Запишем для указанного примера, согласно формуле (7-36) эквивалентную передаточную функцию для отрицательной обратной связи двух включенных встречно-параллельно звеньев (рис. 7-24, а): апериодического звена с передаточной функцией $k/(Tp+1)$ и звена, представляющего собой жесткую обратную связь с передаточной функцией β :

$$W_{\text{ЭКВ}}(p) = \frac{\frac{k}{Tp+1}}{1 + \frac{k}{Tp+1} \beta}. \quad (7-46)$$

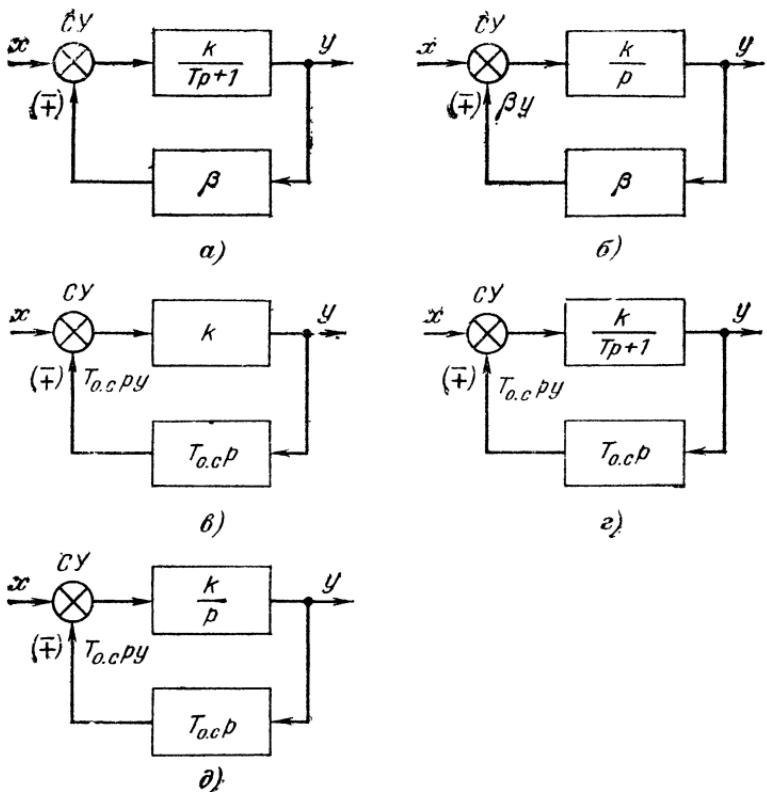


Рис. 7-24. Параллельные корректирующие устройства.

Жесткая обратная связь охватывает: а — апериодическое звено; б — интегрирующее звено; гибкая обратная связь охватывает: в — безынерционное звено; г — апериодическое звено; д — интегрирующее звено.

Умножив числитель и знаменатель выражения (7-46) на $Tp+1$ и сделав преобразования, получим:

$$W_{\text{ЭКВ}}(p) = \frac{k}{Tp + 1 + k\beta}. \quad (7-47)$$

Разделив числитель и знаменатель на $1+k\beta$, получим:

$$W_{\text{ЭКВ}}(p) = \frac{k_{\text{ЭКВ}}}{T_{\text{ЭКВ}} p + 1}, \quad (7-48)$$

где

$$k_{\text{ЭКВ}} = \frac{k}{1 + k\beta}; \quad T_{\text{ЭКВ}} = \frac{T}{1 + k\beta}.$$

На основании выражения (7-48) можно отметить, что эквивалентное звено получается также апериодическим, но при этом ме-

няется коэффициент усиления $k_{\text{экв}}$ и постоянная времени $T_{\text{экв}}$. При наличии отрицательной обратной связи происходит уменьшение коэффициента усиления ($k_{\text{экв}} < k$) и увеличение быстродействия, так как $T_{\text{экв}} < T$. Аналогично рассуждая, можно записать эквивалентную функцию для апериодического звена, охваченного положительной обратной связью:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k}{Tp + 1 - k\beta}. \quad (7-49)$$

Разделив числитель и знаменатель на $1 - k\beta$, получим:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k_{\text{экв}}}{T_{\text{экв}} + 1}, \quad (7-50)$$

где

$$k_{\text{экв}} = \frac{k}{1 - k\beta}; \quad T_{\text{экв}} = \frac{T}{1 - k\beta}.$$

При наличии положительной обратной связи происходит увеличение коэффициента усиления ($K_{\text{экв}} > K$) и уменьшение быстродействия, так как ($T_{\text{экв}} > T$).

Пример 7-10. Жесткая обратная связь охватывает интегрирующее звено. Запишем согласно формуле (7-36) эквивалентную передаточную функцию для отрицательной обратной связи двух включенных встречно-параллельно звеньев (рис. 7-24, б): интегрирующего звена с передаточной функцией k/p и звена, представляющего собой жесткую обратную связь с передаточной функцией β :

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{\frac{k}{p}}{1 + \frac{k}{p}\beta}. \quad (7-51)$$

Умножив числитель и знаменатель выражения (7-51) на p и сделав преобразования, получим:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k}{p + k\beta} \quad (7-52)$$

Разделив числитель и знаменатель на $k\beta$, получим:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{\frac{k_{\text{экв}}}{T_{\text{экв}} p + 1}}, \quad (7-53)$$

где

$$k_{\text{экв}} = \frac{1}{\beta}; \quad T_{\text{экв}} = \frac{1}{k\beta}.$$

В результате охвата интегрирующего звена жесткой отрицательной обратной связью происходит изменение структурной схемы, так как эквивалентное звено представляет собой апериодическое звено, которое является устойчивым.

Аналогично рассуждая, можно записать эквивалентную функцию для интегрирующего звена, охваченного положительной обратной связью:

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k_{\text{экв}}}{T_{\text{экв}} p - 1}. \quad (7-54)$$

При охвате интегрирующего звена жесткой положительной обратной связью эквивалентное звено является неустойчивым.

Отметим, что введение в АСР жесткой отрицательной обратной связи, охватывающей апериодическое или интегрирующее звено, повышает устойчивость системы и даже превращает неустойчивую систему в устойчивую, но при этом понижается коэффициент усиления системы, т. е. снижается точность в установившемся режиме. Жесткая отрицательная обратная связь действует на систему как в переходном, так и в установившихся режимах.

Пример 7-11. Гибкая обратная связь¹ охватывает безынерционное звено (рис. 7-24, *в*).

Запишем согласно формуле (7-36) и $W_{\text{o.c}}(p) = T_{\text{o.c}}p$ передаточную функцию эквивалентного звена

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k}{1 \mp kT_{\text{o.c}}p} = \frac{k}{1 \mp T_{\text{экв}}p}, \quad (7-55)$$

где $T_{\text{экв}} = kT_{\text{o.c}}$ — эквивалентная постоянная времени.

Анализируя выражение (7-55), можно сказать, что при охвате безынерционного звена идеальной гибкой обратной связью получается эквивалентное апериодическое звено, т. е. происходит изменение структурной схемы.

Пример 7-12. Гибкая обратная связь охватывает апериодическое звено (рис. 7-24, *г*).

Запишем согласно формуле (7-36) и $W_{\text{o.c}}(p) = T_{\text{o.c}}p$ передаточную функцию эквивалентного звена

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k}{1 + (T \mp kT_{\text{o.c}})p} = \frac{k}{1 + T_{\text{экв}}p}, \quad (7-56)$$

где $T_{\text{экв}} = T \mp kT_{\text{o.c}}$ — эквивалентная постоянная времени.

При идеальной гибкой обратной связи изменяется постоянная времени звена, что способствует стабилизации АСР, а коэффициент усиления звена при этой связи не изменяется. При положительной обратной связи, если $T < kT_{\text{o.c}}$, получается неустойчивое звено, а если $T = kT_{\text{o.c}}$, то имеем безынерционное звено (§ 7-14).

Пример 7-13. Гибкая обратная связь охватывает интегрирующее звено (рис. 7-24, *д*).

Запишем согласно формуле (7-36) и $W_{\text{o.c}}(p) = T_{\text{o.c}}p$ передаточную функцию эквивалентного звена

$$W_{\text{экв}}(p) = \frac{k}{p(1 \mp kT_{\text{o.c}})} = \frac{k}{pT_{\text{экв}}}, \quad (7-57)$$

¹ Гибкая обратная связь — это такая связь, при которой происходит только дифференцирование сигнала входной переменной. В простейшем случае звено идеальной гибкой обратной связи, передаточная функция которого $W_{\text{o.c}} = T_{\text{o.c}}p$, на структурной схеме можно представить в виде дифференцирующего идеального звена (см. § 7-14).

где $T_{\text{экв}} = 1 \mp kT_0$ — эквивалентная постоянная времени. Анализируя выражение (7-57), можно сказать, что при охвате интегрирующего звена идеальной гибкой обратной связью структура этого звена остается прежней, а изменяется только значение постоянной времени.

В заключение отметим, что применение гибкой обратной связи дает возможность изменять значения постоянных времени и структуру звена, но при этом коэффициент усиления не изменяется.

в) Последовательные корректирующие устройства

Последовательные корректирующие устройства — это устройства, которые включаются в главный контур последовательно с остальными звенями системы (рис. 7-25). Иногда в самом последовательном корректирую-

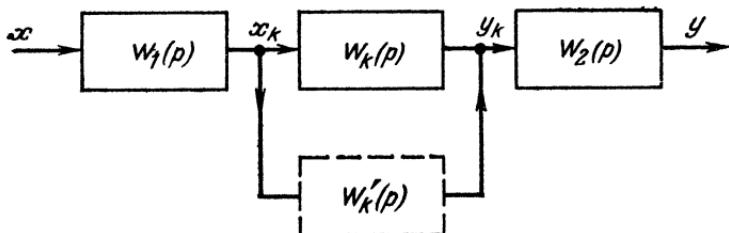


Рис. 7-25. Включение последовательного корректирующего устройства $W_k(p)$ в главный контур АСР.

щем устройстве включаются местные параллельные обратные связи (на рис. 7-25 такая связь показана пунктиром, т. е. звеном $W_k'(p)$).

В общем случае сигнал, который получается на выходе последовательного корректирующего устройства, можно записать в следующем виде:

$$y_k = k \left(x_k + \alpha_1 \frac{dx_k}{dt} + \alpha_2 \int_0^t x_k dt \right). \quad (7-58)$$

В частных случаях последовательное корректирующее устройство может вводить в АСР только производные или интегралы.

Последовательные корректирующие устройства могут составляться из различных по своей природе элементов — электрических, механических, пневматических, гидравлических и др. Наиболее часто они выполняются в ви-

де электрических контуров, содержащих R -, C - и L -элементы. Электрические последовательные корректирующие устройства, которые не содержат источников ЭДС (генераторов, усилителей), часто называются пассивными корректирующими звенями (например, интегрирующее, дифференцирующее и интегро-дифференцирующее звенья) [54].

7-20. УВЕЛИЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ

При решении задачи увеличения устойчивости проектируемой АСР сначала необходимо попытаться изменить ее параметры (например, коэффициенты передачи некоторых звеньев системы, постоянные времени) так, чтобы выполнить требования качества процесса регулирования. Если не удается решить указанную задачу в рамках имеющейся АСР, то необходимо изменить структуру системы. Это можно сделать с помощью корректирующих устройств.

Улучшение качества процесса регулирования заключается в увеличении быстродействия АСР, т. е. в уменьшении времени регулирования t_p (см. § 7-12) и в уменьшении статической ошибки системы $\delta_{ст}$. Очень часто получение необходимого быстродействия осуществляется при проектировании АСР путем выбора соответствующих элементов цепи регулирования (усилителей, исполнительных элементов и т. д.). Иногда для увеличения быстродействия АСР используют корректирующие устройства.

В заключение отметим, что задача получения АСР требуемых качественных показателей: статической ошибки $\delta_{ст}$, запаса устойчивости и быстродействия — является единой. Указанные параметры нельзя рассматривать в отдельности друг от друга. Практически решить эту задачу очень сложно, поэтому в некоторых случаях требуемое решение находят путем рассмотрения многих вариантов и выбором одного из них наиболее оптимального.

Пример 7-14. Данна АСР, состоящая из апериодического звена $W_1(p) = k_1/(Tp+1)$ и интегрирующего звена $W_2 = k_2/p$, которые включены последовательно.

Передаточная функция нескорректированной системы

$$W_{nc}(p) = \frac{k_1}{Tp+1} \cdot \frac{k_2}{p} = \frac{k}{(Tp+1)p}, \quad (7-59)$$

где $k = k_1 k_2 = 100$ — коэффициент усиления нескорректированной системы;

$T = 0,1$ с — постоянная времени апериодического звена.

Необходимо скорректировать АСР так, чтобы частота среза была равна 50 1/c , запас по фазе 42° и коэффициент усиления скорректированной системы остался без изменения.

Для построения логарифмической АЧХ сначала найдем частотную функцию $W_{\text{nc}}(j\omega)$, пользуясь уравнением (7-59) и заменяя оператор p на $j\omega$:

$$W_{\text{nc}}(j\omega) = \frac{k}{(Tj\omega + 1)j\omega}, \quad (7-60)$$

Из уравнения (7-60) находим модуль A частотной функции $W_{\text{nc}}(j\omega)$:

$$A = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1} \omega}. \quad (7-61)$$

На рис. 7-26, а приведена логарифмическая АЧХ заданной системы L_{nc} . Эта характеристика построена по уравнению

$$L_{\text{nc}}(\omega) = 20 \lg A = 20 \lg k - 20 \lg \omega - 20 \lg \sqrt{T^2\omega^2 + 1}. \quad (7-62)$$

Логарифмическая АЧХ строится следующим образом. Сначала находятся ее асимптоты. Первая асимптота проходит через начальную ординату, которую вычисляем, например, для частоты $\omega = 0,1$:

$$L_{\text{nc}}(\omega) = 20 \lg 100 - 20 \lg 0,1 - 20 \lg \sqrt{(0,1)^2 \cdot (0,1)^2 + 1} = 60 \text{ дБ}.$$

Отложим по оси ординат точку, равную 60 дБ, и через эту точку проведем первую асимптоту, имеющую наклон -20 дБ/дек . Сопряжение первой асимптоты со второй осуществляется в точке, соответствующей частоте $\omega = 1/T = 10 \text{ 1/c}$. Поскольку все множители знаменателя уравнения (7-59) имеют первый порядок, поэтому увеличение наклона после перехода через сопряженную частоту $\omega = 10 \text{ 1/c}$ равно -20 дБ/дек . Вторая асимптота будет иметь наклон -40 дБ/дек .

Логарифмическая ФЧХ данной системы Φ_{nc} приведена на рис. 7-26, б. Эта характеристика строится по уравнению

$$\Phi_{\text{nc}}(\omega) = -90^\circ - \operatorname{arctg} T\omega. \quad (7-63)$$

Заданная система состоит из трех звеньев: усилительного с коэффициентом усиления $k = 100$, интегрирующего $1/p$ и апериодического $1/(0,1p+1)$.

Логарифмическая ФЧХ усилительного звена совпадает с бьючастот, ЛФЧХ интегрирующего звена не зависит от частоты и представляет собой прямую линию, проходящую параллельно оси абсцисс на расстоянии -90° ; ЛФЧХ апериодического звена строится по уравнению

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} T\omega = -\operatorname{arctg} 0,1\omega.$$

Через точку $\omega = 10 \text{ 1/c}$ проводим прямую, параллельную оси φ , которая является нулевой осью для ЛФЧХ апериодического

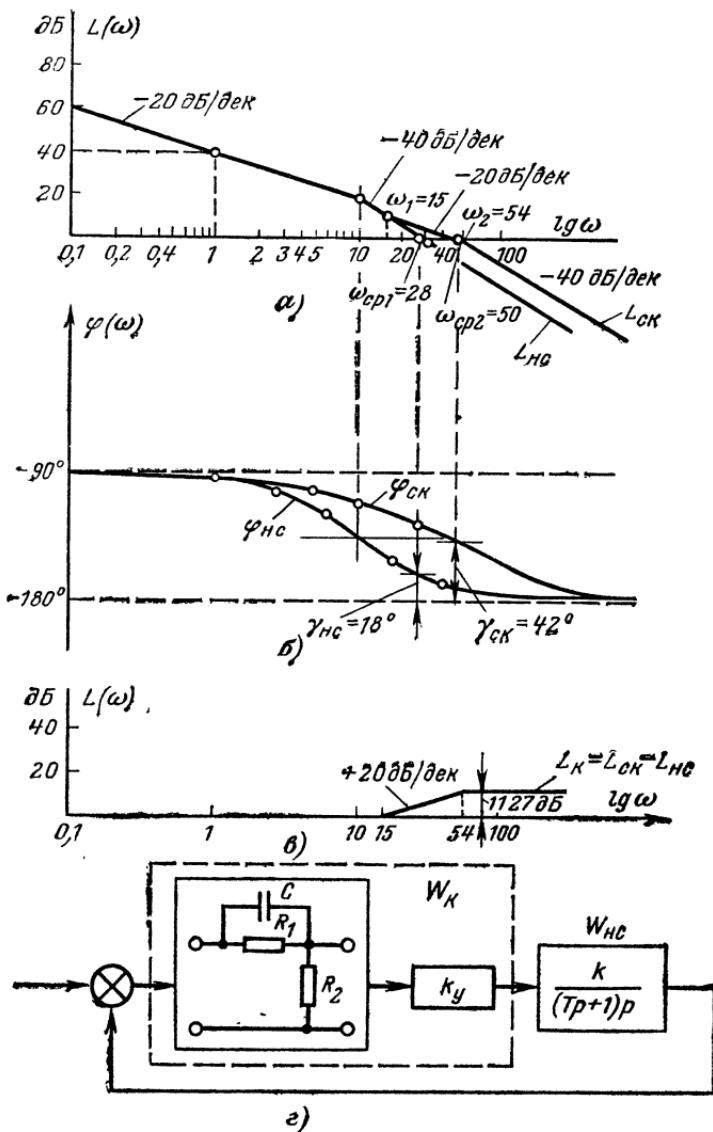


Рис. 7-26. Коррекция АСР с помощью последовательного корректирующего устройства.

a — логарифмические АЧХ; *б* — логарифмические ФЧХ; *в* — логарифмическая АЧХ корректирующего устройства; *г* — схема подключения корректирующего устройства.

звена. Относительно этой оси строим левую ветвь по следующим точкам:

- при $\lg \omega = 0$ дек $\varphi = 45^\circ$;
- при $\lg \omega = 0,25$ дек $\varphi \approx -29^\circ$;
- при $\lg \omega = 0,6$ дек $\varphi \approx -14^\circ$;
- при $\lg \omega = 1,0$ дек $\varphi \approx -6^\circ$;
- при $\lg \omega = 2,0$ дек $\varphi \approx -0,5^\circ$.

Первая ветвь проводится из условия симметрии.

Рассматривая ЛАЧХ и ЛФЧХ, замечаем, что при частоте среза $\omega_{cp1} = 28$ 1/с в системе имеется запас устойчивости по фазе $\gamma_{nc} = 18^\circ$, который является недостаточным. Для получения необходимого запаса устойчивости по фазе $\gamma_{ck} = 42^\circ$ вводим в систему последовательное корректирующее устройство, состоящее из дифференцирующего контура и последовательно с ним соединенного усилителя (рис. 7-26, г). Передаточная функция этого устройства

$$W_k(p) = \frac{k_y(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1},$$

где k_y — коэффициент усиления усилителя;

$$T_1 = R_1 C; \quad T_2 = \frac{R_1 C R_2}{R_1 + R_2}.$$

Желаемую ЛАЧХ $L_{ck}(\omega)$ проводим так, чтобы она в области низких частот ($\omega < \omega_1$) совпадала с ЛАЧХ нескорректированной системы $L_{nc}(\omega)$, в области средних частот $\omega_1 < \omega < \omega_2$ имела наклон -20 дБ/дек и проходила через частоту среза, равную $\omega_{cp2} = 50$ 1/с, а в области высоких частот ($\omega > \omega_2$) располагалась параллельно $L_{nc}(\omega)$.

Сопрягающие частоты излома характеристики $L_{ck}(\omega)$ (рис. 7-26, а) определяются следующим образом: $\omega_1 = 15$ 1/с — непосредственно из построения $L_{ck}(\omega)$, а ω_2 — из выражения для ЛФЧХ скорректированной системы при частоте среза $\omega_{cp2} = 50$ 1/с:

$$\begin{aligned} \varphi_{ck}(\omega) = 42^\circ - 180^\circ = -90^\circ - \arctg \omega_{cp2} T + \\ + \arctg \omega_{cp2} T_1 - \arctg \omega_{cp2} T_2. \end{aligned}$$

Подставляя известные величины, получаем:

$$\begin{aligned} \varphi_{ck}(\omega) = -138^\circ = -90^\circ - \arctg 50 \cdot 0,1 + \\ + \arctg 50 \cdot 0,066 - \arctg 50 \frac{1}{\omega_2}, \end{aligned}$$

где $T_1 = 1/\omega_1 = 1/15 = 0,066$ с.

Из приведенного уравнения находим $\omega_2 = 54$ 1/с.

Остальные параметры корректирующего устройства определяются следующим образом:

$$T_2 = \frac{1}{\omega_2} \approx 0,018 \text{ с}; \quad k_y = \frac{T_1}{T_2} = 3,66; \quad 20 \lg 3,66 = 11,27 \text{ дБ.}$$

Логарифмическая АЧХ корректирующего устройства $L_k(\omega)$ показана на рис. 7-26, в.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ И СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Системы дистанционной передачи, или системы синхронной передачи, часто применяются в электромеханических устройствах автоматики для передачи на значительные расстояния линейных и угловых перемещений, а также для передачи вращения. В этих системах механическое перемещение с помощью датчика преобразуется в электрический сигнал, который поступает по проводам (линиям связи) на приемник. Последний в свою очередь преобразует электрический сигнал снова в механическое перемещение, пропорциональное первоначальному (исходному) механическому перемещению.

Очень часто система дистанционной передачи предназначена для обеспечения электрическими средствами с необходимой точностью синхронного перемещения двух или нескольких осей, механически не связанных между собой.

Любая система дистанционной передачи состоит из трех основных частей: *датчика*, выполняющего роль *задающего* или *ведущего* устройства; *линии связи*, по которой передаются электрические сигналы, и *приемника*, выполняющего роль *приемного* или *ведомого* устройства.

Системы дистанционной передачи применяются для различных целей. Они могут применяться для измерения на расстоянии различных величин (например, осуществлять показания уровня воды в шлюзе на пульте диспетчера); для передачи команд на расстояние (например, обслуживание пропуска судов через шлюзы); для контроля за протеканием какого-либо процесса и т. д.

В автоматике наибольшее применение получили *системы дистанционной передачи угла*, которые классифицируются:

по роду питающей энергии — на системы постоянного тока и переменного тока;

по характеру движения — на системы плавного и шагового действия.

8-2. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ УГЛА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Системы, в которых в качестве датчика применяется потенциометр (делитель напряжения), называются *потенциометрическими*. В этих системах роль датчика выполняют линейные или круговые потенциометры, а роль приемника — магнитоэлектрические гальванометры или логометры. В связи с тем, что потенциометрические системы широко применяются в автоматике, мы будем рассматривать только эти системы, которые делятся на две основные группы: *передачи небалансного типа* и *самобалансирующиеся передачи*.

а) Система дистанционной передачи угла плавного действия на постоянном токе небалансного типа

На рис. 8-1, а приведена простейшая схема дистанционной передачи небалансного типа. Роль датчика D в схеме выполняет кольцевой потенциометр, к двум диаметральным точкам которого подводится напряжение постоянного тока. С осью задающего устройства связаны три контактные щетки, которые скользят по потенциометру. Указанные щетки имеют смещение относительно друг друга на 120° . Щетки с приемником P связаны с помощью трех проводов, образующих линию связи LC , через которую осуществляется питание приемника. Роль приемника P выполняет устройство, состоящее из трех одинаковых катушек, расположенных под углом 120° относительно друг друга, и вращающегося постоянного магнита. Отсчет показаний осуществляется с помощью стрелки, расположенной на оси магнита.

Предположим, что подвижная система датчика повернулась на какой-то угол, тогда щетки переходят с одних точек потенциометра на другие, имеющие новые значения потенциалов. В результате этого происходит перераспределение токов в обмотках приемника, что в свою очередь приводит к изменению их МДС. В этом случае магнитный поток, который создается обмотками приемника и направлен по его диаметру, поворачивается на угол, почти равный углу поворота оси датчика. В связи с тем, что постоянный магнит приемника вращается свободно, он устанавливается вдоль оси потока приемника, повторяя при этом движение оси датчика. В том случае,

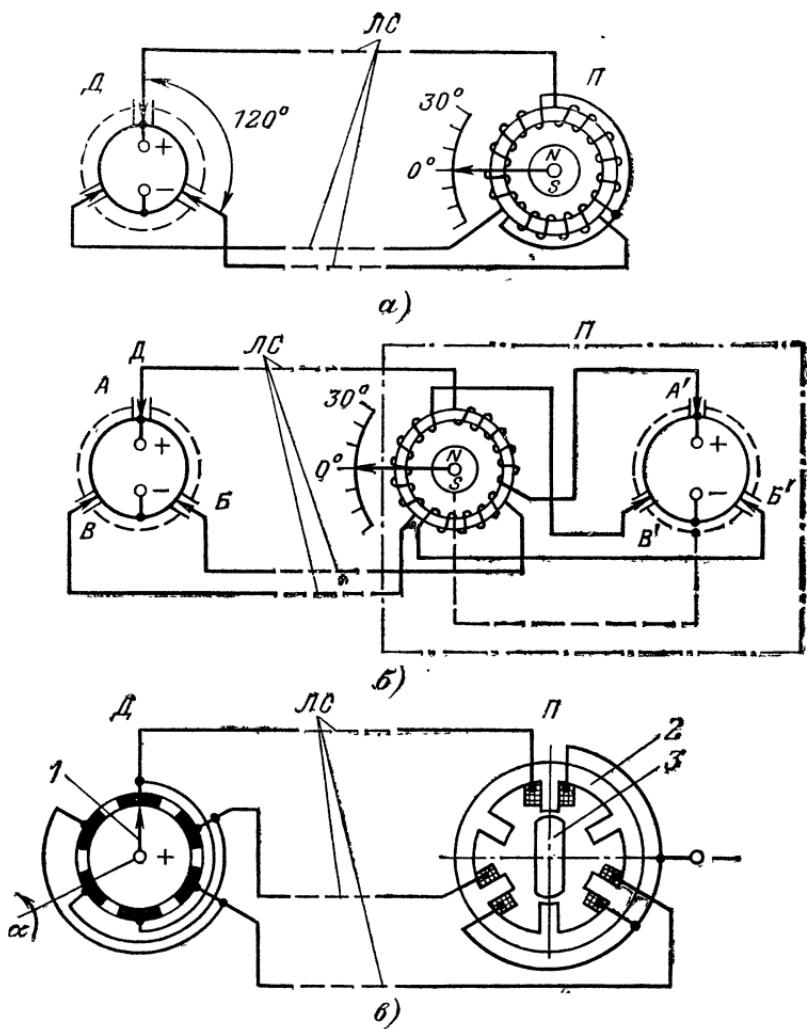


Рис. 8-1. Системы дистанционной передачи угля на постоянном токе.

а — плавного действия небалансного типа; б — плавного действия самобалансирующаяся; в — шагового действия.

когда ось приемника преодолевает некоторый момент сопротивления, например, от сил трения, постоянный магнит приемника устанавливается не точно по оси потока, а с некоторым отклонением (ошибкой), которое тем больше, чем больше момент сопротивления и чем меньше по-

ток, создаваемый катушками приемника. Рассмотренная система в основном применяется при малых моментах сопротивления, т. е. когда на оси приемника находится только легкая стрелка.

б) Самобалансирующаяся система дистанционной передачи угла плавного действия

На рис. 8-1, б приведена *самобалансирующаяся система*. Приемник P данной системы состоит из трех катушек и потенциометра со щеточной системой. Катушки приемника включены в разрыв между датчиком D и потенциометром. Питание подводится не только к датчику, но и к приемнику. Ось приемника, кроме стрелки и постоянного магнита, несет еще и щеточную систему. Если датчик согласован с приемником, то щетки попарно (A и A' , B и B' или C и C') имеют одинаковые потенциалы. В этом случае токи, которые протекают по линии связи LC и по катушкам приемника, равны нулю. При рассогласовании датчика и приемника между собой потенциалы парных щеток отличаются. При этом по линии связи LC и по катушкам приемника потекут уравнительные токи, которые, взаимодействуя с постоянным магнитом, создают врачающий момент. В результате этого момента происходит поворот оси приемника на необходимый угол, т. е. до достижения согласования между датчиком и приемником.

Рассмотренная система будет иметь равномерную шкалу, если потенциометры датчика и приемника идентичны между собой.

в) Система дистанционной передачи угла шагового действия

Эта система получила свое название от шагового (импульсного) двигателя и применяется для систем на постоянном токе, в которых требуется дискретная передача угла.

На рис. 8-1, в приведена простейшая схема такой системы. Роль датчика D в системе выполняет шестипозиционный переключатель, который с помощью линии связи LC соединяется с приемником P . Роль последнего выполняет шаговый двигатель, состоящий из статора 2 с шестью полюсами, на которых расположены обмотки,

соединенные в три секции, и ротора 3, изготовленного из магнитомягкой электротехнической стали. При перемещении щетки 1 переключателя на угол α происходит поочередно подключение обмоток пар полюсов двигателя к источнику напряжения питания. При этом возбуждается соответствующая пара диаметрально расположенных полюсов, ротор перемещается и устанавливается вдоль магнитного потока статора. Ротор двигателя при каждом переключении датчика имеет минимальное перемещение (импульсный поворот) на 60° , т.е. в пределах одного оборота датчика система имеет шесть фиксированных положений (шагов).

Основные недостатки рассмотренной системы: неплавность хода выходной оси и возможность возникновения ошибки, равной 180° , так как ротор может устремиться вдоль магнитного потока статора в любом из двух противоположных положений.

8-3. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ УГЛА НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

а) Основные сведения

В технике широко применяются системы *дистанционной передачи угла на переменном токе, выполненные на сельсинах*.

Сельсины в общем виде представляют собой индукционные электрические микромашины [99], которые предназначены для передачи на расстояние угловых перемещений двух или нескольких валов, не связанных механически между собой.

При электрическом соединении двух сельсинов между собой у них появляется способность к самосинхронизации.

По выполняемым функциям в системах передачи угла сельсины делятся на: *сельсины-датчики, сельсины-приемники и дифференциальные сельсины*. Сельсин-датчик (СД) служит для передачи заданных угловых перемещений. Ротор СД приводится в движение вручную или от привода, который воспроизводит требуемое угловое перемещение. Сельсин-приемник (СП) служит для воспроизведения заданного сельсином-датчиком углового перемещения. Ротор СП свободно вращается и устанав-

ливается в положение, которое соответствует положению ротора СД. Дифференциальный сельсин-датчик (ДСД) и дифференциальный сельсин-приемник (ДСП) служат для алгебраического суммирования угловых перемещений двух механических не связанных между собой валов.

Сельсины-датчики и сельсины-приемники делятся на две группы: *однофазные* и *трехфазные*. У *однофазных сельсинов* питание статорных обмоток (обмоток возбуждения) осуществляется от однофазной сети. Обмотки роторов (обмотки синхронизации) очень часто выполняются по типу трехфазных обмоток, т. е. из трех сдвинутых на 120° отдельных обмоток, которые в свою очередь соединяются в звезду. Очень редко применяются сельсины, обмотка ротора которых выполнена в виде одноосной обмотки. *Трехфазные сельсины* по конструкции не отличаются от конструкции обычных асинхронных двигателей, которые имеют как на статоре, так и на роторе трехфазные обмотки. Эти сельсины в основном применяются при больших мощностях в так называемых системах «электрического вала», которые необходимы, например, для строгого синхронного вращения двух валов двигателей, расположенных на значительном расстоянии друг от друга (портальные краны, механизмы для разводки мостов и т. д.).

Следует отметить, что в АСР применяют два типа передач на сельсинах: *индукционную* (работа сельсинов в индикаторном режиме) и *трансформаторную* (работа сельсинов в трансформаторном режиме).

6) Индукционная передача

На рис. 8-2, а приведена схема включения двух однофазных сельсинов, работающих в индикаторном режиме. Статорные обмотки сельсина-датчика СД и сельсина-приемника СП включены в общую сеть питания, а обмотки роторов СД и СП соединены между собой с помощью линии связи ЛС. В этой схеме от СД работает только один СП, но в практике применяются также схемы, в которых от СД могут работать несколько СП.

При подаче напряжения питания U_n на статорные обмотки по ним потечет однофазный переменный ток, который создает в каждом сельсине пульсирующий магнитный поток Φ_b (поток возбуждения), индуцирующий ЭДС в обмотках роторов сельсинов. Значение каждой из

этих ЭДС зависит от пространственного положения обмоток ротора по отношению к обмоткам статора. Если роторы СД и СП согласованы, т. е. их одноименные обмотки роторов расположены одинаково по отношению к потоку возбуждения (оси статорной обмотки), то в них наводятся равные ЭДС, которые направлены навстречу друг другу, т. е. в этом случае токи в обмотках ротора не

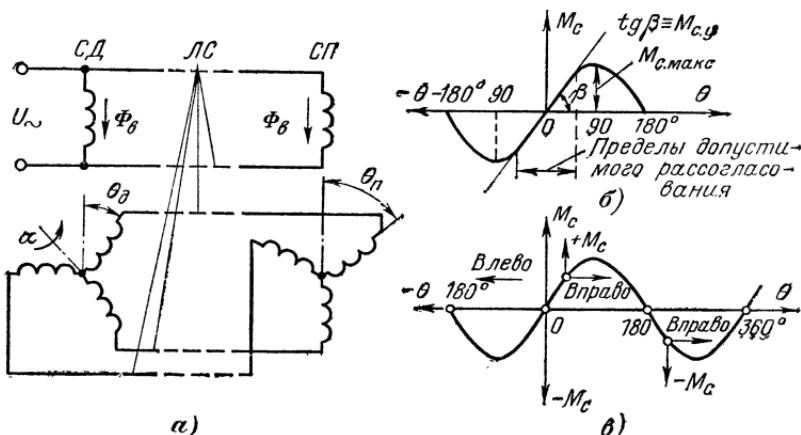


Рис. 8-2. Система индукционной передачи, выполненная на однофазных сельсинах.

а — схема включения; *б* — статическая характеристика синхронизирующего момента; *в* — определение устойчивого и неустойчивого нулей.

протекают. Если ротор СД повернуть на некоторый угол α относительно ротора СП, то ЭДС в одноименных обмотках роторов станут различными по значению, потому что роторы СД и СП будут занимать относительно осей статорных обмоток разные положения. Это приводит к возникновению в обмотках роторов СД и СП токов, взаимодействие которых с магнитным потоком каждого сельсина создает электромагнитные врачающие моменты, стремящиеся установить роторы СД и СП в согласованное положение. Вращающиеся моменты СД и СП имеют противоположное направление.

Положение ротора СД фиксировано и меняется только от значения передаваемого угла, ротор же СП свободно перемещается и под действием возникающего в нем электромагнитного момента поворачивается на угол поворота ротора СД.

Следует заметить, что если угловые перемещения передавать поворотом ротора СП, но при этом ротор СД освободить для отработки передаваемых перемещений, то СД и СП изменяют свои функции на обратные.

Электромагнитный момент, который приводит систему в согласованное положение, называется *синхронизирующим*:

$$M_c = M_{c,\max} \sin \theta, \quad (8-1)$$

где $M_{c,\max}$ — максимальный синхронизирующий (опрокидывающий) момент;

θ — угол рассогласования, определяемый по формуле:

$$\theta = \theta_d - \theta_n; \quad (8-2)$$

здесь θ_d — угол поворота ротора датчика;

θ_n — угол поворота ротора приемника.

Момент M_c зависит от угла рассогласования θ .

Зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования сельсинов $M_c = f(\theta)$ показана на рис. 8-2, б. Она представляет собой статическую характеристику синхронизирующего момента и соответствует моменту на роторе СП при неподвижном роторе СД. Из статической характеристики синхронизирующего момента можно определить: *удельный синхронизирующий момент* $M_{c,y}$, т. е. крутизну статической характеристики в ее начальной части:

$$\left(\frac{dM_c}{d\theta} \right)_{\theta=0} = M_{c,y},$$

и максимальный синхронизирующий момент $M_{c,\max}$, который соответствует моменту при $\theta = 90^\circ$. При дальнейшем увеличении угла рассогласования θ значение синхронизирующего момента M_c уменьшается.

При $\theta = 0$ синхронизирующий момент равен нулю. При отклонении ротора сельсина вправо от положения $\theta = 0$ (при рассогласовании передачи) в сельсине возникает синхронизирующий момент (направление которого показано на рис. 8-2, в стрелкой, совпадающей с положительным отсчетом момента), стремящийся вернуть сельсин в первоначальное устойчивое положение. Следовательно, при $\theta = 0$ сельсин имеет устойчивый нуль. При $\theta = 180^\circ$ синхронизирующий момент также равен нулю. При отклонении ротора сельсина вправо от положения

$\theta = 180^\circ$ ротор сельсина под действием изменившего направление синхронизирующего момента (синус в третьей четверти отрицателен) стремится увеличить угол рассогласования и занять новое устойчивое положение при $\theta = 360^\circ$. Следовательно, при $\theta = 180^\circ$ сельсин имеет неустойчивый нуль, потому что точно рассогласовать сельсины на угол 180° практически невозможно. Если $\theta > 180^\circ$, то ротор сельсина будет стремиться к ложному нулю, сдвинутому на 360° относительно истинного нуля.

Отметим, что в пределах одного оборота ротор сельсина СП имеет только одно устойчивое положение, соответствующее $\theta = 0$.

При работе дистанционной индикаторной передачи возникает погрешность в результате нагрузки на валу СП, которая создается силой трения в подшипниках и давлением щеток на кольцах его ротора. В результате этого СП следует за СД с некоторым углом рассогласования, характеризующего погрешность индикаторной передачи. При постоянном моменте нагрузки на валу СП его погрешность зависит от значения удельного синхронизирующего момента $M_{c,y}$, и чем больше его значение, тем меньше погрешность СП. Иногда требуется СД располагать на значительном расстоянии от СП, при этом сопротивление проводов линии связи, которые соединяют обмотки сельсинов, достигает большого значения. В этом случае сопротивление роторных цепей сельсинов увеличивается, что приводит к снижению токов в обмотках роторов, а следовательно, и к снижению значения синхронизирующего и удельного моментов СП, т. е. к возрастанию погрешности. Наличие неодинаковых сопротивлений проводов линии связи также приводит к уменьшению синхронизирующего и удельного моментов. Для уменьшения погрешности стремятся, чтобы разница в значениях сопротивлений проводов линий связи не превышала 5 %. Для уменьшения погрешностей повышают значение синхронизирующего момента за счет небольшого повышения напряжения на зажимах статорных обмоток сельсинов, но при этом не должно быть перегрева обмоток. Кроме того, для уменьшения погрешности добиваются того, чтобы напряжения на статорных обмотках сельсинов были одинаковыми. Особенно это важно тогда, когда СД и СП находятся на большом расстоянии друг от друга и падение напряжения в линиях связи велико. В этом случае в роторной цепи сельсинов

появляется ток, потому что ЭДС в одноименных фазах роторных обмоток не равны. За счет указанного тока создается момент, вызывающий дополнительную погрешность в передаче. Для устранения погрешности в цепь статорной обмотки одного из сельсинов, который находится ближе к источнику питания, включается компенсационное сопротивление.

Следует помнить, что напряжение на статорных обмотках сельсинов во время их работы не должно снижаться значительно, потому что это приводит к уменьшению синхронизирующего момента сельсинов, т. е. к увеличению погрешности.

В заключение отметим, что кроме эксплуатационных погрешностей, отмеченных выше, существуют еще производственные погрешности самих сельсинов, которые являются следствием неточностей, допущенных при изготовлении сельсинов (например, в результате неуравновешенности ротора, неодинакового количества витков в фазах обмотки и т. д.). Поэтому все СД и СП делятся на три класса точности. В табл. 8-1 приведены значения максимальной погрешности сельсинов в градусах для каждого класса точности.

Таблица 8-1

Сельсин	Максимальная погрешность сельсинов в градусах		
	Классы точности		
	1	2	3
СД	До $\pm 0,25$	$\pm 0,25 - \pm 0,5$	$\pm 0,5 - \pm 1,0$
СП	До $\pm 0,75$	$\pm 0,75 - \pm 1,5$	$\pm 1,5 - \pm 2,5$

в) Дистанционная индикаторная передача угла с дифференциальным сельсином

Иногда требуется, чтобы индикаторная передача отрабатывала угол, равный сумме или разности двух задаваемых углов. В этом случае в качестве одного из элементов передачи используется дифференциальный сельсин, который по конструкции аналогичен трехфазному асинхронному двигателю и имеет на статоре и роторе по три расположенные обмотки, сдвинутые между собой на 120° . По числу витков, расположению катушек и параметрам обмотки статора и ротора выполняются одинаково.

Дифференциальные сельсины в индикаторных передачах используются как приемники, работающие от двух датчиков, и как вторые датчики.

На рис. 8-3, а приведена индикаторная передача, имеющая два сельсина-датчика $СД_1$ и $СД_2$, роторные обмотки которых присоединены к обмоткам статора и ротора дифференциального сельсина-приемника $ДСП$. На валу $ДСП$ располагается стрелка, с помощью которой снимаются показания.

Если повернуть ротор сельсина $СД_1$ на угол α , а ротор сельсина $СД_2$ на угол β , то в их обмотках и обмотках $ДСП$ появляют-

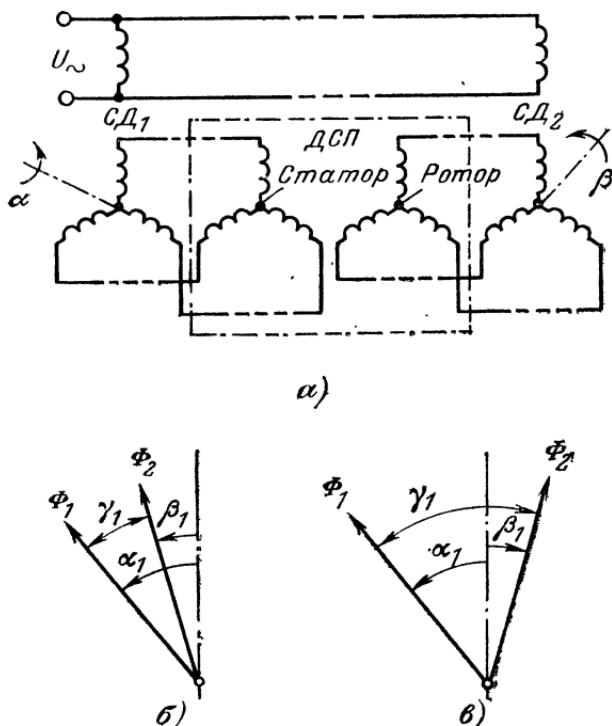


Рис. 8-3. Дистанционная индикаторная передача угла с дифференциальным сельсина.

а — принципиальная электрическая схема; б — вычитание углов; в — суммирование углов.

ся токи, пропорциональные соответствующим индуцированным ЭДС. Токи, протекая по обмоткам статора и ротора $ДСП$, создают в нем два результирующих магнитных потока: поток статора и поток ротора, которые поворачиваются на углы, соответствующие углам поворота роторов $СД_1$ и $СД_2$.

Повернем ротор $СД_1$ по часовой стрелке на угол α_1 , тогда результирующий магнитный поток Φ_1 статора $ДСП$ повернется против часовой стрелки также на угол α_1 . При повороте ротора $СД_2$ по часовой стрелке на угол β_1 результирующий магнитный поток

Φ_2 ротора *ДСП* повернется против часовой стрелки на угол β_1 . При взаимодействии магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 между собой создается врачающий момент, который стремится повернуть ротор *ДСП* до тех пор, пока оба потока не совпадут по направлению. При этом ротор *ДСП* повернется на угол $\gamma_1 = \alpha_1 - \beta_1$, т. е. на угол, равный алгебраической разности углов α_1 и β_1 (рис. 8-3, б).

Теперь повернем ротор сельсина *СД₁* по часовой стрелке на угол α_1 , а ротор сельсина *СД₂* против часовой стрелки на угол β_1 , тогда для совпадения магнитных потоков статора и ротора *ДСП* его ротор должен повернуться на угол $\gamma_1 = \alpha_1 + \beta_1$. В этом случае ротор *ДСП* повернется на угол, равный алгебраической сумме углов α_1 и β_1 (рис. 8-3, в).

г) Трансформаторная передача

Схема соединения роторных обмоток *СД* и *СП* при трансформаторной передаче остается прежней, но однофазная обмотка *СП* не подключается к сети переменного

тока, а является выходной обмоткой, с которой снимается электрический сигнал (рис. 8-4). В *СП* действует только результирующий магнитный поток роторных обмоток, причем направление этого потока определяется положением ротора *СД*.

Следует отметить, что в зависимости от взаимного расположения магнитного потока и статорной обмотки *СП* в последней, кото-

Рис. 8-4. Схема трансформаторной передачи.

рая выполняет роль вторичной обмотки *СП* выполняет роль первичной обмотки), индуцируется ЭДС, используемая в качестве сигнала рассогласования. В том случае, когда ось статорной обмотки *СП* расположена перпендикулярно направлению результирующего потока, ЭДС в этой обмотке индуцироваться не будет. Такое положение считается согласованным.

При повороте ротора *СД*, например, на угол θ_d результирующий магнитный поток в *СП* также повернется и в статорной обмотке последнего возникает напряжение рассогласования, которое зависит только от угла рассо-

гласования $\theta = \theta_d - \theta_p$ и не зависит от угловых положений роторов, т. е.

$$E = E_{\max} \sin \theta, \quad (8-3)$$

где E_{\max} — ЭДС при рассогласовании на 90° .

8-4. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМАХ

а) Принцип построения

В *следящих системах* выходная величина следит за изменениями входной величины, т. е. воспроизводит эти изменения, причем закон изменения входной величины во времени может быть и произвольным [87].

Следящие системы являются одной из разновидностей АСР. Они представляют собой ветвь АСР, которая выполняет управление положением объекта. Следящие системы широко применяются, например, при автоматическом управлении станками, управлении высотой и курсом самолета с помощью автопилота, слежении за космическими кораблями, дистанционном управлении положением клапанов и т. д.

Все следящие системы строятся на основе принципа отклонения или принципа комбинированного регулирования (см. гл. 7).

На рис. 8-5, а приведена схема следящей системы, построенная по принципу отклонения. В этой системе выходная величина $y(t)$ объекта регулирования OP изменяется по заданному на входе системы закону $x(t)$ под влиянием управляющего воздействия $x_1(t)$, вырабатываемого управляющим устройством $УУ$ в функции рассогласования $z(t)$, т. е. разности между заданным $x(t)$ и фактическим $y(t)$ значениями величины: $z(t) = x(t) - y(t)$.

Приведенная система дает возможность осуществить любой закон изменения регулируемой величины, который не зависит от характера приложенного к OP внешнего воздействия.

Схема следящей системы, построенной по принципу комбинированного регулирования (рис. 8-5, б), отличается от рассмотренной схемы вторым управляющим устройством $УУ_1$, которое вводит на OP через сравнивающее устройство $CУ_1$ заданное на входе воздействие $x(t)$.

В этой системе управляющее воздействие $x_3(t)$, которое поступает на вход OP , складывается из двух составляющих: $x_1(t)$, зависящей от сигнала рассогласования $z(t)$, и $x_2(t)$, зависящей от заданного воздействия $x(t)$.

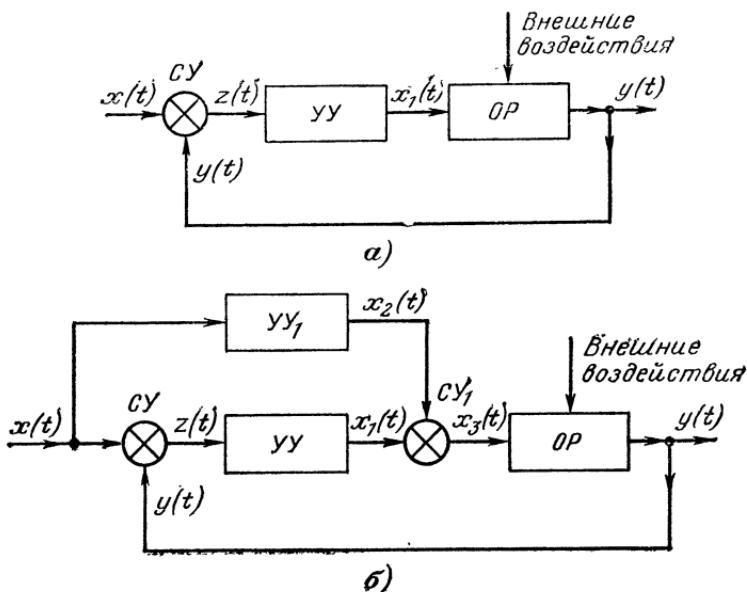


Рис. 8-5. Принципы построения следящих систем.

a — по отклонению; *б* — по принципу комбинированного регулирования.

Устройство $УУ_1$ является дополнительной связью в системе и служит для улучшения качественных показателей системы.

В заключение отметим, что для построения следящих систем основным принципом является принцип отклонения.

б) Структурная схема

Для лучшего понимания основных функций главных элементов и их взаимодействия в следящей системе лучше ее представить в виде структурной схемы (рис. 8-6).

Исполнительный двигатель $ИД$, координата которого $y(t)$ изменяется по заданному закону $x(t)$, жестко соединен с объектом регулирования OP , представляющим

собой нагрузку для ИД. Задающее устройство ЗУ вырабатывает закон изменения $x(t)$. Измерительное устройство ИзУ выполняет в схеме роль датчика, в котором происходит измерение значения $y(t)$ и преобразование его в величину $y_1(t)$, удобную для передачи на расстояние. В сравнивающем устройстве СУ₁ осуществляется

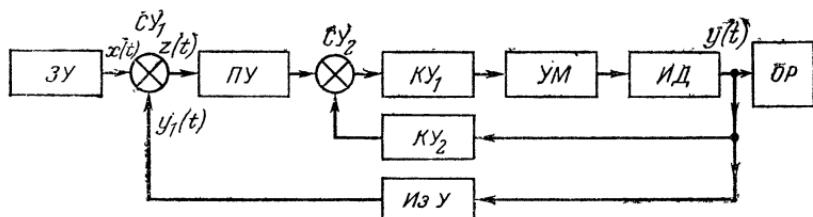


Рис. 8-6. Структурная схема следящей системы.

вычитание из $x(t)$ сигнала $y_1(t)$, т. е. образование сигнала рассогласования $z(t)$. Как правило, сигнал $z(t)$ с помощью предварительного усилителя ПУ усиливается как по напряжению, так и по мощности. В схему включены последовательное корректирующее устройство КУ₁ и параллельное корректирующее устройство КУ₂, образующее отрицательную обратную связь. Корректирующие устройства в схеме обеспечивают требуемую точность и быстродействие следящей системы. В контур системы включен усилитель мощности УМ, предназначенный для усиления сигнала по мощности до такого значения, чтобы при необходимости привести в действие ИД, который в свою очередь приводит в действие ОР.

в) Основные параметры следящих систем

Одним из основных параметров следящей системы является *точность слежения выходного вала за изменениями входного вала*, которая определяется углом рассогласования, т. е. ошибкой слежения. Последняя находится как сумма *статической* и *динамической ошибки*:

$$\theta = \theta_{\text{ст}} + \theta_{\text{дин.}} \quad (8-4)$$

Статической ошибкой называется минимальное расхождение, при котором вал исполнительного двигателя следящей системы начинает трогаться. Ошибка $\theta_{\text{ст}}$ связана с напряжением трогания двигателя $U_{\text{трог}}$

следующим соотношением:

$$\theta_{ct} Sk = U_{trig}, \quad (8-5)$$

где S — крутизна характеристики измерительного элемента (чувствительность датчика к углу рассогласования);

k — коэффициент усиления усилителя мощности.

Из формулы (8-5) можно найти статическую ошибку системы

$$\theta_{ct} = \frac{U_{trig}}{Sk}. \quad (8-6)$$

При слежении в динамическом режиме, т. е. когда положение входного вала непрерывно меняется, в следящей системе появляется **динамическая ошибка**, которая в общем случае равна:

$$\theta_{dyn} = \theta_y + \theta_n, \quad (8-7)$$

где θ_y и θ_n — динамические ошибки соответственно в установленвшемся и переходном (неустановившемся) режимах [89].

Точность слежения в следящих системах характеризуется **добротностью системы** D [89], которая равна отношению установленвшейся частоты вращения Ω_y к динамической ошибке в установленвшемся режиме θ_y :

$$D = \frac{\Omega_y}{\theta_y}. \quad (8-8)$$

К основным параметрам системы можно также отнести:

максимально допустимый момент нагрузки, который зависит от врачающего момента исполнительного двигателя или его мощности;

быстродействие системы, зависящее от максимальной установленвшейся частоты вращения исполнительного двигателя и передаточного отношения редуктора;

устойчивость системы и характер движения управляемой оси, который зависит при выбранном двигателе от момента инерции J и успокоения системы.

г) Основные устройства следящих систем

К основным устройствам следящих систем относятся **измерительные, преобразовательные, усилительные, исполнительные и корректирующие устройства**.

Измерительные устройства подробно были рассмотрены в гл. 2.

Преобразовательные устройства в следящих системах предназначены для преобразования постоянного тока в электрические сигналы переменного тока и наоборот. Эти преобразования осуществляются с помощью модуляторов и демодуляторов, которые могут быть электромеханическими, электромагнитными, электронными и полупроводниковыми [25, 103].

Усилительные, исполнительные и корректирующие устройства были описаны соответственно в гл. 3, 5 и 7.

8-5. ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛА РАССОГЛАСОВАНИЯ

а) Общие сведения

В практике часто применяются следящие системы, у которых регулируемым параметром является угловое перемещение объекта регулирования. В этих системах задающий вал называется входным, а вал объекта регулирования, который повторяет движение входного вала, называется выходным. Измерение угловых положений входного и выходного валов, а также угловое рассогласование между валами, как правило, выполняется с помощью потенциометров или сельсинов, которые преобразуют угловые перемещения в сигналы напряжения.

Следует помнить, что от качества измерителя угла рассогласования зависит чувствительность и точность слежения следящей системы. Он должен иметь высокую надежность и обеспечивать с необходимой точностью непрерывное определение значения и знака рассогласования путем сравнения положений входного и выходного валов следящей системы.

б) Электрическая следящая система на потенциометрах

На рис. 8-7, а показана потенциометрическая мостовая схема дистанционного измерения угла рассогласования. Схема состоит из задающего 1 и измеряющего 4 потенциометров, к которым подается напряжение питания U . Движок задающего потенциометра 1 механически связан с входным валом системы, а движок измеряющего потенциометра 4 — с ее выходным валом и редуктором 3, служащим для уменьшения числа оборотов, передаваемого от исполнительного двигателя 2 к движку потенциометра 4. Потенциометры 1 и 4 включены по

мостовой схеме, к одной диагонали моста подается напряжение питания U , а с другой диагонали моста снижается напряжение сигнала ошибки (рассогласования) U_θ , поступающее на вход усилителя 6. После усиления напряжение U_θ подается на обмотку управления исполнительного двигателя 2, который через редуктор 3 вращает вал объекта регулирования 5. Если имеется рассогласование, то двигатель 2 поворачивает вал объекта 5 до момента уравновешивания потенциометрического моста, т. е. до устранения рассогласования.

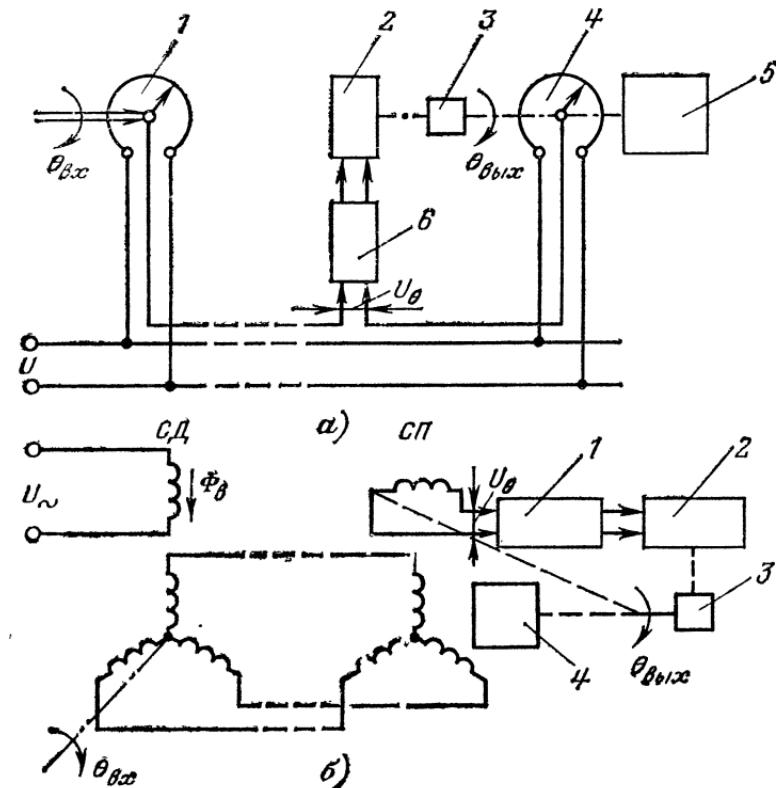


Рис. 8-7. Электрическая следящая система.

a — на потенциометрах; *b* — на сельсинах.

нительного двигателя 2, который через редуктор 3 вращает вал объекта регулирования 5. Если имеется рассогласование, то двигатель 2 поворачивает вал объекта 5 до момента уравновешивания потенциометрического моста, т. е. до устранения рассогласования.

Напряжение сигнала ошибки можно найти по формуле

$$U_\theta = k\theta = k(\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{вых}}), \quad (8-9)$$

где $k = U/\varphi_{\text{п}}$ — чувствительность потенциометра;
 U — напряжение питания;
 $\varphi_{\text{п}}$ — полный угол намотки потенциометра;
 $\theta_{\text{вх}}$ и $\theta_{\text{вых}}$ — угол поворота входного и выходного валов соответственно.

в) Электрическая следящая система на сельсинах

На рис. 8-7, б приведена схема дистанционного измерения угла рассогласования с помощью сельсинов. Сельсин-приемник $СП$ в схеме работает в трансформаторном режиме (см. § 8-3, г).

Предположим, что положения $СД$ и $СП$ согласованы между собой. Тогда напряжение сигнала ошибки U_{θ} равно нулю и система находится в покое. При повороте входного вала на угол $\theta_{\text{вх}}$ между $СД$ и $СП$ возникает рассогласование. В этом случае на вход усилителя 1 поступает напряжение U_{θ} , фаза которого зависит от знака рассогласования. При достаточном значении напряжения сигнала ошибки U_{θ} исполнительный двигатель 2 начнет вращаться, поворачивая при этом редуктор 3 . Вместе с редуктором 3 поворачиваются выходной вал объекта регулирования 4 на угол $\theta_{\text{вых}}$ и ротор $СП$, который механически связан с выходным валом системы.

При увеличении рассогласования напряжение U_{θ} возрастает и при $\theta = 90^\circ$ достигает своего максимального значения. При дальнейшем увеличении рассогласования напряжение U_{θ} уменьшается и при $\theta = 180^\circ$ становится равным нулю. При изменении θ от 180 до 360° фаза напряжения U_{θ} меняется на 180° .

8-6. КОПИРОВАЛЬНО-СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

Копировально-следящие системы применяются для воспроизведения ступенчатых и фасонных поверхностей, которые геометрически подобны поверхности копира (шаблона) при обработке деталей на фрезерных, шлифовальных и токарных станках. Траектория перемещения инструмента (фрезы, шлифовального круга, сверла) по отношению к заготовке определяется формой копира, по кривой которого скользит щуп датчика, управляющего измерительным приводом. В копировально-следящей системе щуп датчика следит за положением режущего инструмента, а система устраняет отклонение щупа от

заданного значения, т. е. сводит рассогласование к нулю.

Следящие системы копировальных устройств основаны на различных принципах действия и имеют различное конструктивное оформление. Они могут быть электромеханическими, гидравлическими, электрогидравлическими и пневмогидравлическими.

На рис. 8-8 в качестве примера показана схема движения заготовки (обрабатываемого изделия) в копировально-фрезерном полуавтомате.

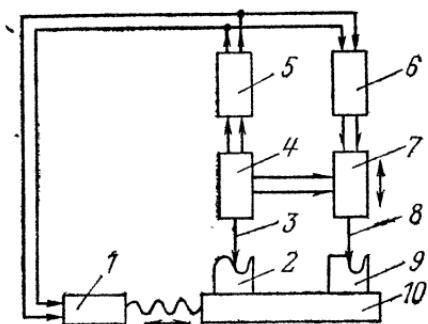


Рис. 8-8. Схема движения заготовки в копировально-фрезерном полуавтомате.

лярных плоскостях, причем движение заготовки 9 и копира 2 осуществляется непрерывно в горизонтальном направлении при помощи электродвигателя 1 и узла задающей подачи 10. В результате этого образуется сигнал рассогласования, который определяет скорость и направление следящей подачи. Следящей подачей называется движение фрезы 8, которая воспроизводит движение копировального пальца 3. Следящая подача осуществляется по вертикали с помощью электродвигателя 6.

Поясним коротко принцип работы копировально-следящей системы.

Измерение рассогласования фактической траектории фрезы 8 относительно заготовки 9 и траектории, заданной копиром 2, производится копировальным прибором (датчиком) 4, корпус которого механически связан с одним из рабочих органов 7 фрезерного станка. При наличии рассогласования датчик копировального прибо-

рополуавтомата. На одной из стоек фрезерного станка закрепляют заготовку 9, а на другой — копир 2 (шаблон). По копиру 2 перемещается копировальный палец 3, а по заготовке 9 — фреза 8, которая повторяет движение пальца 3.

В процессе обработки заготовка 9 вместе с копиром 2 и фрезой 8 перемещаются в двух взаимно перпендику-

лярных плоскостях, причем движение заготовки 9 и копира 2 осуществляется непрерывно в горизонтальном направлении при помощи электродвигателя 1 и узла задающей подачи 10. В результате этого образуется сигнал рассогласования, который определяет скорость и направление следящей подачи. Следящей подачей называется движение фрезы 8, которая воспроизводит движение копировального пальца 3. Следящая подача осуществляется по вертикали с помощью электродвигателя 6.

ра 4 формирует сигнал, пропорциональный этому рассогласованию. Указанный сигнал через усилительно-преобразующее устройство 5 воздействует на электродвигатель следящей подачи 6 таким образом, чтобы скорость рабочего органа 7 была пропорциональна значению сигнала, а направление перемещения этого органа соответствовало уменьшению рассогласования.

Скорость следящей подачи зависит от значения рассогласования между положениями фрезы и копира, а также от кривизны профиля копира.

8-7. СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Применение в технике быстродействующих цифровых ЭВМ дало возможность применить вместо копировальных полуавтоматов для обработки деталей сложной конфигурации, требующих изготовления с высокой точностью копира, станки, управляемые с помощью перфокарт, перфолент, кинолент, магнитных лент и магнитных барабанов.

Применяемые в машиностроении сложные поверхности и кривые можно описать известными уравнениями и аппроксимировать по участкам. Это дает возможность запрограммировать процесс определения координат точек кривой и поверхности на ЭВМ. Ввиду того что число точек, которыми задается положение рабочего инструмента при высокой точности обработки изделий, получается очень большим, на ЭВМ вычисляют не все точки, а только некоторое небольшое число опорных точек. Этими точками обычно являются точки сопряжения кривых. Полученные данные выдаются в виде первичной программы для последующей обработки, но уже на более простые ЭВМ.

Управление станками может осуществляться двумя способами. При первом способе с помощью простых ЭВМ обрабатывают первичную программу в местном вычислительном центре и записывают координаты всех точек кривых и поверхностей, например, на магнитную ленту. При этом у станка располагается только управляющее устройство, которое считывает данные с ленты и преобразует их в перемещение инструмента. При втором способе первичная программа обрабатывается с помощью интерполятора, входящего в состав управляющего устройства, расположенного у станка. При этом

управление станком осуществляется непосредственно от первичной программы.

Первый способ является более надежным по сравнению со вторым, так как условия работы цифровой ЭВМ непосредственно у станка намного тяжелее, чем в местных вычислительных центрах.

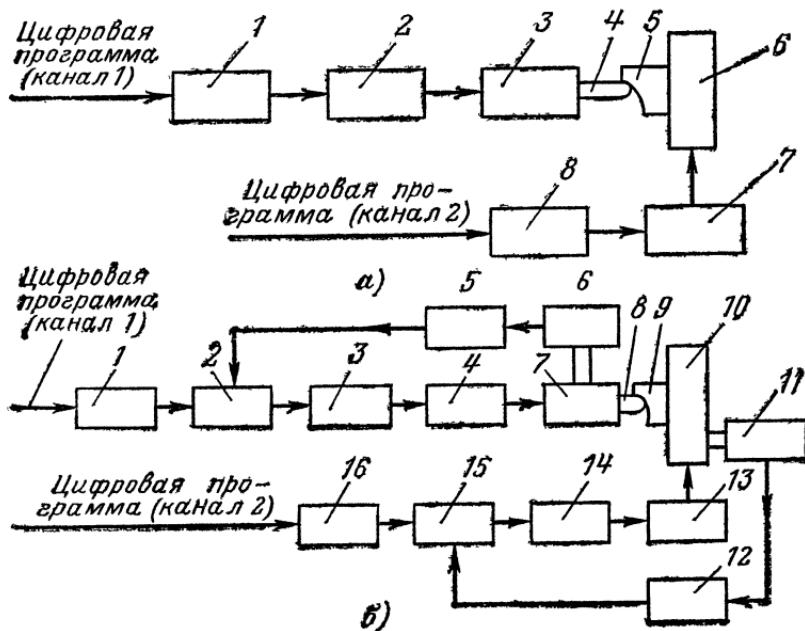


Рис. 8-9. Системы программного управления.

a — разомкнутая; *b* — замкнутая.

По принципу управления станками системы программного управления делятся на две группы: с *разомкнутой цепью* и с *замкнутой цепью воздействий*.

В *разомкнутых системах программного управления* (рис. 8-9, *a*) движение в процессе управления не контролируется и не сопоставляется со значением, заданным программой. Система включает в себя следующие узлы:читывающие устройства 1 и 8, исполнительные устройства 2 и 7, рабочий орган 3, фрезу 4, заготовку 5 и узел задающей подачи 6.

Считывающие устройства 1 и 8 осуществляют считывание программных сигналов и преобразование их в

электрические импульсы, которые поступают на исполнительные устройства 2 и 7. В качестве исполнительного устройства применяется шаговый электродвигатель, выходной вал которого поворачивается на определенный угол при подаче на управляющую обмотку электродвигателя электрического импульса.

Исполнительные устройства 2 и 7 вместе с рабочим органом 3 осуществляют:

перемещение фрезы 4 на определенные расстояния и с определенными скоростями;

возвращение ее в исходное положение;

перемещение узла задающей подачи 6;

включение и выключение подачи охлаждающей жидкости и включение сигнализации после окончания обработки заготовки 5.

Точность движения фрезы в системе обеспечивается шаговым электродвигателем.

Разомкнутые системы в своем составе не имеют сложных устройств для точного измерения отрабатываемых перемещений, в результате чего они проще замкнутых систем. Все эти системы являются системами дискретного действия.

В замкнутых системах программного управления (рис. 8-9, б) контроль реализации программы по перемещению рабочего органа осуществляется при помощи обратной связи. Обратная связь дает возможность обнаруживать отклонения фактической программы от расчетной и вносить необходимые корректиры в работу системы. Эта система включает в себя следующие узлы: считающие устройства 1 и 16; устройства сравнения 2 и 15; дешифраторы 3 и 14; исполнительные устройства 4 и 13; рабочий орган 7; датчики обратной связи 6 и 11; усилители 5 и 12; фрезу 8; заготовку 9 и узел задающей подачи 10.

Устройства сравнения 2 и 15 служат для сравнения входной информации и информации, получаемой от датчиков обратной связи 6 и 11. В качестве устройства сравнения можно применить реверсивный счетчик, который определяет разность между числом импульсов, поступающих с цифровой программы и с датчика обратной связи. Полученная разность преобразуется, например, дешифратором 3 в пропорциональное ей напряжение и поступает на исполнительное устройство 4, роль которого выполняет электродвигатель подачи.

Управление каналами 1 и 2 происходит независимо друг от друга.

Системы программного управления широко применяются для управления металлорежущими станками. Эти системы имеют высокую эффективность, так как изменение программы не вызывает значительной перестройки и переналадки их.

8-8. ПРОГРАММОНОСИТЕЛИ И СЧИТЫВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В § 8-7 было отмечено, что запись программы в системах программного управления может производиться на программоноситель отдельно от станка, т. е. в местном вычислительном центре. В качестве *программоносителей* чаще всего используют *перфокарты* и *перфоленты*, служащие для ввода исходной информации в ЭВМ и для вывода результатов решения задач из машины (§ 9-15). Перфорация данных, которые вводятся в ЭВМ, выполняется вручную оператором с помощью перфоратора, а при выводе данных из машины перфорация осуществляется автоматически. В качестве программоносителей применяются также киноленты, магнитные ленты и барабаны [25, 29, 89].

Магнитная лента очень удобна для записи сложных процессов и позволяет быстро воспроизводить записанную информацию.

Для считывания кода, кроме контактных и фотоэлектрических считающих устройств (см. § 6-4, б), применяются магнитные головки. Считывание в этом случае осуществляется следующим образом. Лента с магнитной записью протягивается с определенной скоростью под магнитной головкой, в обмотке которой индуктируется ЭДС. В зависимости от намагниченности участка меняется полярность импульса этой ЭДС (0 или 1). Полученные импульсы усиливаются и подаются на исполнительные устройства.

8-9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД

а) Некоторые сведения о гидравлическом приводе

Гидравлический привод служит для приведения в движение различных устройств и механизмов. Он широко применяется при автоматизации технологических про-

цессов. Гидравлический привод чаще всего применяется для осуществления поступательных перемещений с преодолением больших усилий. Иногда он применяется и для вращательных движений.

Гидравлический привод состоит из гидропередачи (насоса и гидродвигателя), основной и вспомогательной гидромагистралей, системы управления и вспомогательных устройств (клапанов, дросселей, гидроаккумуляторов).

Движение выходного вала или штока гидродвигателя происходит за счет расхода жидкости, управление которым осуществляется двумя способами. При первом способе меняется производительность насоса, а при втором способе изменяются характеристики дроссельного или струйного устройства [102]. Скорость перемещения выходного вала или штока гидродвигателя изменяется незначительно при изменении нагрузки, причем максимальное усилие гидравлического привода можно отрегулировать на любое заданное значение. В связи с тем, что при перегрузках гидравлический привод останавливается, можно перемещать звенья привода до жестких упоров без дополнительных предохранительных устройств.

К основным недостаткам гидравлического привода следует отнести: повышенную стоимость деталей и узлов привода вследствие высокой точности их изготовления (для обеспечения герметичности); загрязнение автомата и рабочего места при неисправности уплотнений; необходимость применения специальных дорогостоящих материалов при изготовлении наиболее ответственных деталей привода; рабочие жидкости не должны иметь механических и химических примесей.

б) Устройство и действие гидравлического следящего привода

На рис. 8-10 в качестве примера приведена простейшая схема гидравлического следящего привода однокоординатного копировально-фрезерного станка [102].

Копировально-фрезерный станок имеет следующие основные части: стол 1, перемещающийся в горизонтальном направлении; фрезу 3, закрепленную на каретке 4, последняя перемещается только в вертикальном направлении; станину 13 и гидравлический следящий привод,

который представляет собой следящую систему с четырехщелевым цилиндрическим золотником 15. Корпус золотника 15 жестко связан с кареткой 4. На нижнем конце плунжера золотника 15 закреплен щуп 16, который под действием пружины 10 всегда опирается на копир (шаблон) 17. Масло из бака 8 с помощью насоса 9, который вращается электродвигателем 7, через фильтр 14 поступает в полость нагнетания золотника 15. Давление, нагнетания в полости определяется с помощью переливного клапана 12. Гидроцилиндр 6 закреплен на станине 13, а его выходной шток 5 жестко связан с кареткой 4. С помощью рукоятки 11 можно вручную управлять кареткой 4. Золотник 15 к остальным элементам гидропривода подключается с помощью гибких шлангов, причем его рабочие полости соединены с рабочими полостями гидроцилиндра 6 так, что каретка 4 всегда следует

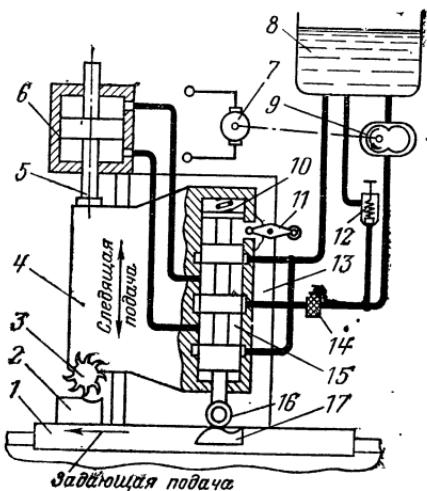


Рис. 8-10. Схема гидравлического следящего привода однокоординатного копировально-фрезерного станка.

за положением плунжера золотника. Копир 17 и заготовка 2 закрепляются на столе 1 на определенном расстоянии, зависящем от расстояния между фрезой 3 и щупом 16.

Работа схемы заключается в следующем. Щуп 16 подводят к началу копира 17, а фрезу 3 подводят к началу заготовки 2. После этого стол 1 станка начинает перемещаться в горизонтальном направлении и вместе с ним будут перемещаться закрепленные на столе копир 17 и заготовка 2. Щуп 16 при этом катится по поверхности копира 17, а фреза 3 повторяет все перемещения щупа. Так как заготовка 2 движется с той же скоростью, что и копир 17, поэтому на поверхности заготовки фреза 3 повторяет все изгибы копира.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

9-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время успех дальнейшего развития материально-технического уровня страны невозможен без широкого внедрения в народное хозяйство вычислительных устройств. Сфера их применения охватила все области науки, техники, управления и планирования производства. Из всей совокупности вычислительных устройств наиболее сложными и совершенными являются вычислительные машины. Они представляют собой комплекс различных элементов, выполняющих автоматически математические и логические действия, и выдают сигналы, являющиеся результатами действий.

Вычислительные машины позволяют не только облегчить и ускорить решение намеченного круга вопросов, но поставить и решить новые задачи, ранее просто недоступные человеку.

Например, при проектировании Байкало-Амурской магистрали вычислительная машина рассчитала оптимальный профиль полотна железной дороги всего за несколько дней. Без вычислительных машин подобный расчет всех возможных вариантов и выбор лучшего из них потребовал бы нескольких лет труда огромного количества вычислителей и чертежников.

Вычислительные устройства можно классифицировать по следующим признакам (рис. 9-1):

- по принципу действия,
- по конструктивному признаку,
- по назначению,
- по способу управления,
- по классу решаемых задач.

По принципу действия различают вычислительные устройства *непрерывного действия* (аналоговые), *дискретного действия* (цифровые) и *комбинированные*. В аналоговых вычислительных устройствах математические величины изображаются в виде непрерывных значений каких-либо физических величин (длин, углов, напряжений и т. д.). Точность вычислений ограничивается качеством изготовления отдельных узлов и при-

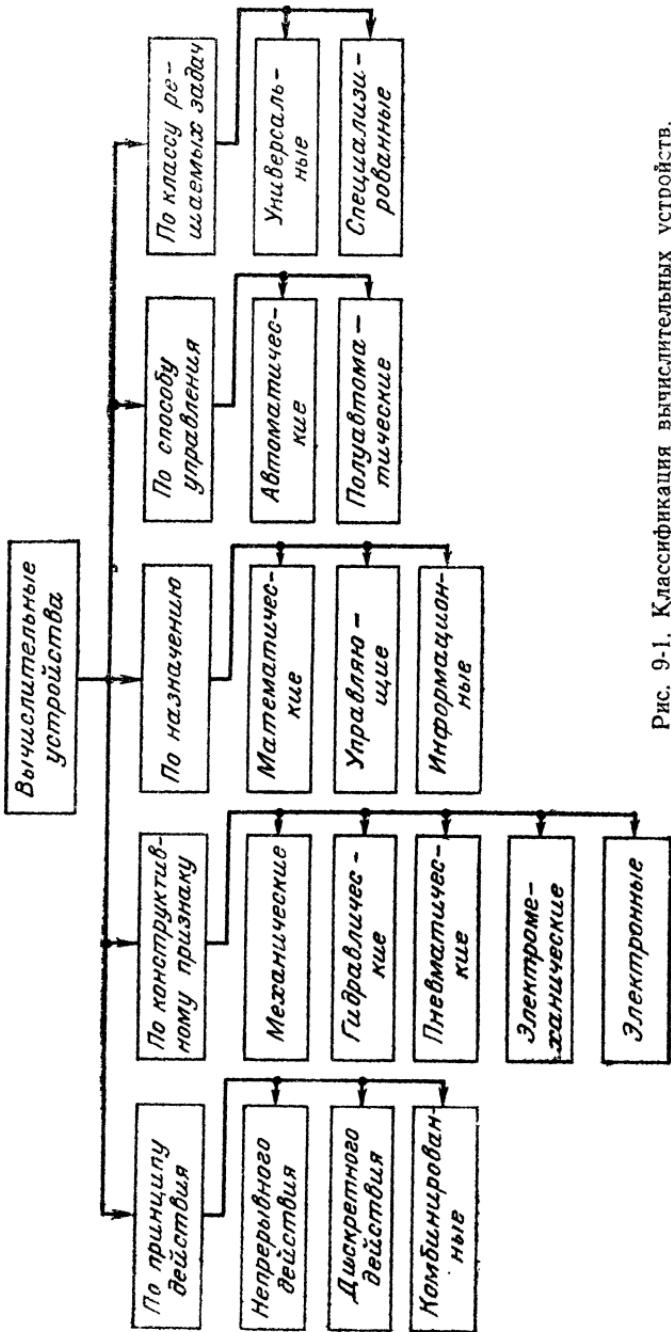


Рис. 9-1. Классификация вычислительных устройств.

нятыми допусками и доходит до трех-четырехзначных цифр результата. Примерами аналоговых вычислительных устройств являются логарифмическая линейка, электронные машины ЭИ-11, ЭМУ-10, МН-14 и др.

В цифровых вычислительных устройствах математические величины представляются в виде последовательности цифр. Изображению каждой цифры соответствует физическая величина, изменяющаяся дискретно. Цифровые вычислительные устройства могут решать задачи принципиально с любой точностью. Увеличение точности вычислений достигается увеличением числа разрядов представления чисел, что приводит только к увеличению количества используемых элементов. Примерами цифровых вычислительных устройств являются счеты, арифометр, электронные машины «Наири», «МИР», «Минск-22», ЕС-1030 и др.

Комбинированные вычислительные устройства представляют собой сочетание аналоговых и цифровых устройств, обмен информацией между которыми осуществляется через специальные преобразователи. В комбинированных вычислительных устройствах типичным является такое разделение функций, когда аналоговое вычислительное устройство используется для воспроизведения быстропротекающих процессов, а цифровые — для тех вычислений, где требуется повышенная точность. Таким образом комбинированные вычислительные устройства сочетают в себе достоинства первых двух групп вычислительных устройств — быстродействие и высокую точность, которые нельзя получить при использовании одной из этих групп.

По конструктивному признаку вычислительные устройства делятся на механические, гидравлические, пневматические, электромеханические и электронные. Механические, гидравлические и пневматические устройства громоздки, обладают большой инерционностью, сложны в изготовлении, имеют ограниченную точность и значительную стоимость.

Электромеханические вычислительные устройства имеют более высокую точность по сравнению с механическими, гидравлическими и пневматическими, однако инерционность их сравнительно велика.

Электронные вычислительные устройства практически безынерционны, точность их может быть выше электромеханических, а надежность несколько ниже. Электро-

тронные вычислительные устройства, в частности электронные вычислительные машины (ЭВМ), в процессе развития вычислительной техники отличались конструктивно-технологическим исполнением и логической организацией. Это дало возможность выделить несколько поколений ЭВМ.

К первому поколению относятся ламповые вычислительные машины 50-х годов (1955—1960 гг.), которые строились на электронных вакуумных лампах и обычных радиодеталях: резисторах, конденсаторах, трансформаторах. Примером ламповых вычислительных машин первого поколения являются ЭВМ «Минск-1», «Урал-1», БЭСМ-2 и др. Они имели большие габариты, невысокую надежность и потребляли большую мощность.

В вычислительных машинах второго поколения (1960—1965 гг.) транзисторы полностью заменили электронные лампы. Важным достижением явилось также применение печатного монтажа и миниатюрных радиодеталей. Это позволило создать более сложные ЭВМ, обладающие большими вычислительными возможностями, высокой надежностью и производительностью. Примерами ЭВМ второго поколения являются «Минск-2», «Раздан-3», «Наира», «Днепр-1», БЭСМ-6 и др.

В машинах третьего поколения (1965—1970 гг.) большинство транзисторов и деталей заменяются интегральными схемами, каждая из которых представляет собой отдельный неразборный прибор. Такой прибор, в корпусе по размерам примерно равный транзистору, содержит несколько десятков элементов, соответствующих обычным транзисторам, резисторам и конденсаторам, соединенным между собой в один законченный функциональный блок, который соответствует сложной транзисторной схеме. При этом значительно уменьшается количество разъемных компонентов в машине и увеличивается ее надежность. Применение интегральных схем привело к коренным изменениям методов компоновки и монтажа вычислительных машин. Увеличивается плотность монтажа, применяется многослойный печатный монтаж. Общее число слоев может превышать 10. Примером вычислительных машин третьего поколения являются ЭВМ единой системы (ЕС ЭВМ), которые были созданы социалистическими странами-членами СЭВ и представляют собой комплекс стационарных типовых универсальных программно совместимых вычислительных машин. В состав ЕС ЭВМ входят модели различной производительности, предназначенные для решения широкого круга научно-технических, информационно-логических и экономических задач.

Четвертое поколение будет поколением ЭВМ на интегральных схемах, используемых большую степень интеграции.

По назначению вычислительные устройства делятся на математические, управляющие и информационные. Такое разделение начало производиться в ЭВМ второго поколения, что является их характерной особенностью.

Математические вычислительные устройства используются для производства сложных расчетов при решении различных задач во всех областях науки и техники.

Применение последних приводит к значительному сокращению времени вычислений и уменьшает вероятность получения ошибок в расчетах. Примерами математических вычислительных устройств являются аналоговые вычислительные машины КГУ, МН-11, МПТ-9, цифровые вычислительные машины МИР, «Раздан-2», «Наири», БЭСМ-6.

Управляющие вычислительные устройства могут работать как в замкнутых цепях автоматического управления, так и в разомкнутых. Они широко используются в автоматических и автоматизированных системах управления, различие которых состоит в том, что автоматические системы могут работать без участия человека, в то время как в автоматизированных системах человек и коллективы людей составляют органическое звено системы. Эти устройства по входным, выходным и внутренним значениям параметров системы воздействуют на процесс управления таким образом, чтобы он протекал оптимально.

Примерами управляющих вычислительных устройств являются цифровые вычислительные машины «Днепр-1», ВНИИЭМ-3 и др.

Информационные вычислительные устройства предназначены для запоминания, обработки и оценки по заданным критериям большого количества данных. Они позволяют в любой момент времени выдавать необходимые сведения, выделяя главное из всей имеющейся информации. Применяются для решения планово-экономических задач, учета, статистики и т. д.

По способу управления вычислительные устройства подразделяются на *автоматические* и *полуавтоматические*. В автоматических вычислительных устройствах вычислительный процесс выполняется автоматически, без участия человека, по сигналам, предписывающим те или иные действия. В полуавтоматических вычислительных устройствах процесс вычислений требует участия человека, например, при переходе от одного этапа вычислений к другому. Несмотря на это, последние широко используются в различных областях народного хозяйства.

По классу решаемых задач вычислительные устройства делятся на *универсальные* и *специализированные*. Универсальные вычислительные устройства предназначены для решения широкого круга задач из самых раз-

личных областей науки и техники. Примерами универсальных вычислительных устройств являются ЕСЭВМ, а также вычислительные машины «Киев», МИР, «Проминь-М», ЛМУ-1, МН-М, МПТ-9 и др.

Специализированные вычислительные устройства предназначены для решения вполне определенных задач. Как правило, они имеют жестко фиксированную или мало изменяемую программу работы. При конструировании таких устройств учитываются и используются специфические особенности решения задачи для упрощения конструкции, увеличения быстродействия и снижения стоимости. Примерами специализированных вычислительных устройств могут служить машины «Автомашинист» (для автоматического вождения электровозов и тепловозов), «Ангара» (для автоматического управления сбором бревен в лесхозах и складах) и др.

В данной главе рассматриваются принципы действия и основные блоки аналоговых и цифровых вычислительных машин, а также некоторые электромеханические и электронные устройства, с помощью которых можно осуществить те или иные математические действия.

9-2. АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

а) Принципы моделирования

Под моделированием понимают построение модели (копии) какого-либо явления или объекта, которая по своим свойствам в той или иной мере воспроизводит свойства этого явления или объекта. В модели возникают процессы, аналогичные тем, которые имеют место в оригинале. Эти процессы можно наблюдать, регистрировать, проверять их соответствие результатам теоретического анализа, изучать.

Различают следующие основные виды моделирования: *физическое* и *математическое*.

При физическом моделировании физика явлений в подлежащем изучению объекте и его модели одинакова и процессы, протекающие в модели и объекте, описываются одинаковыми математическими и логическими зависимостями. Примером физического моделирования является испытание летательных аппаратов в аэродинамических трубах с целью выявления их аэrodинами-

ческих свойств. При этом искусственно создаются реальные физические условия полета без поднятия объектов в воздух. Основным достоинством физического моделирования является возможность наглядного наблюдения протекающих в модели процессов, а существенным недостатком — необходимость создания новой модели при исследовании каждого нового процесса.

При математическом моделировании физика явлений, протекающих в модели и в объекте, носит различный характер, а математические и логические зависимости модели и объекта одинаковы. Основное преимущество математического моделирования заключается в возможности исследования явлений природы, трудно поддающихся изучению на хорошо известных явлениях. Достоинства данного метода моделирования позволили ему занять преимущественное положение при проведении научных исследований. Математическое моделирование рассмотрим на следующем примере.

Допустим, требуется смоделировать механический процесс, описываемый уравнением

$$F = m \frac{dv}{dt}, \quad (9-1)$$

где F — сила, действующая на предмет в направлении его движения;

m — масса предмета;

dv/dt — первая производная от скорости движения предмета.

Идентичным этому уравнению по форме написания является уравнение для тока i в электрической цепи (рис. 9-2), состоящей из конденсатора C , подсоединеного к источнику постоянного напряжения E , ключом K :

$$i = C \frac{dU}{dt}, \quad (9-2)$$

где dU/dt — первая производная от напряжения на конденсаторе C .

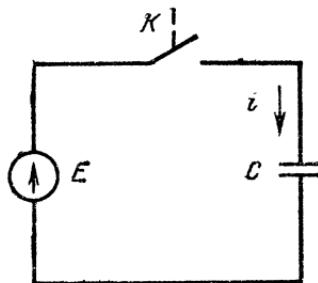


Рис. 9-2. К определению тока, протекающего через емкость в переходном режиме.

Рассматриваемые процессы различны по своей физической природе, но так как описывающие их уравнения (9-1) и (9-2) идентичны, исследование механического процесса можно проводить, воспользовавшись вышеупомянутой электрической схемой (рис. 9-2). Однако нельзя проводить простое сравнение аналогичных по форме написания уравнений (9-1) и (9-2). Действительно, сравнивать механическое усилие F и ток i , массу m и емкость конденсатора C , скорость перемещения v и напряжение U не имеет никакого смысла. Вопрос связи между величинами механического процесса и электрической цепи (модели) решается введением масштабных коэффициентов K_F , K_m , K_v , K_t , которые представляют собой отношение механических величин к соответствующим электрическим величинам модели:

$$K_F = \frac{F}{i}; \quad K_m = \frac{m}{C}; \quad K_v = \frac{v}{U}; \quad K_t = \frac{t_m}{t_s}. \quad (9-3)$$

В последнем равенстве (9-3) через t_m и t_s обозначены времена протекания механических и электрических процессов.

Введение масштабных коэффициентов позволяет связать величины оригинала и модели:

$$F = K_F i; \quad m = K_m C; \quad v = K_v U; \quad t_m = K_t t_s. \quad (9-4)$$

Подставив в исходное уравнение (9-1) значения величин из соотношения (9-4) и сделав преобразования, для тока i получим:

$$i = \frac{K_m K_v}{K_F K_t} C \frac{dU}{dt_s}. \quad (9-5)$$

Данное уравнение хотя и выражено в электрических величинах, но описывает механический процесс. Этот процесс будет подобен электрическому, когда уравнения (9-2) и (9-5) тождественны, а тождественны они будут в том случае, если член, составленный из масштабных коэффициентов в уравнении (9-5), положим равным единице:

$$\frac{K_m K_v}{K_F K_t} = 1, \quad (9-6)$$

Соотношение (9-6) положено в основу подбора и подсчета масштабных коэффициентов и называется индикатором подобия.

В рассмотренном примере используется система аналогий между явлениями различной физической природы. Такой метод построения моделей называется *моделированием на основе прямой аналогии*.

Другой вид математического моделирования — *моделирование на основе непрямой аналогии* заключается в построении модели из отдельных счетно-решающих устройств и непрерывном проведении элементарных математических операций, таких как сложение, вычитание, умножение, деление, интегрирование. От моделей, выполненных на основе прямой аналогии, они отличаются отсутствием прямой физической аналогии между величинами, получаемыми в результате выполнения отдельных математических операций, и величинами, характеризующими изучаемое явление. Модели непрямой аналогии более универсальны. Модели прямой аналогии строятся для специализированных применений.

б) Принцип действия, основные блоки аналоговых вычислительных машин и их функции

Аналоговые вычислительные машины (АВМ) предназначены для исследования процессов и явлений в динамических системах, описываемых математическими уравнениями. Использование АВМ основано на существовании математических моделей, которые представляют собой математическую запись соотношений или связей между характеристиками объекта и моделируемыми параметрами. Эти соотношения могут быть выражены линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями, системами линейных алгебраических уравнений, системами дифференциальных уравнений в частных производных и т. д. По ним реализуется модель исследуемой системы. Наибольшее распространение получили АВМ для воспроизведения процессов, выраженных обыкновенными дифференциальными уравнениями. Решение дифференциальных уравнений и их систем аналитическим путем не всегда возможно. Поэтому решение их на АВМ приобретает большое практическое значение.

Процесс решения задачи с помощью АВМ складывается из следующих этапов: подготовки задания, преобразования уравнений исходной математической модели в машинные уравнения, составления структурной схемы

модели, набора составленной схемы на АВМ, получения решения и составления отчета.

Рассмотрим функциональную схему решения линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$A_2 x'' + A_1 x' + A_0 x = Y, \quad (9-7)$$

где A_2, A_1, A_0 — постоянные числа больше нуля;
 Y — функция времени $f(t)$.

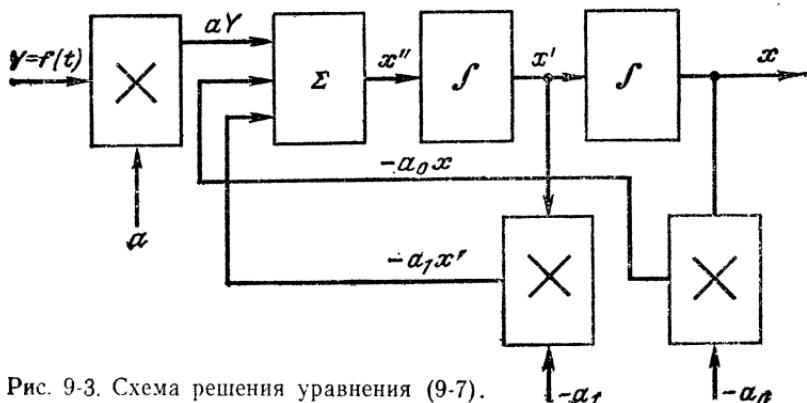


Рис. 9-3. Схема решения уравнения (9-7).

Разрешим уравнение (9-7) относительно второй производной:

$$x'' = aY - a_0 x - a_1 x', \quad (9-8)$$

где

$$a = \frac{1}{A_2}; \quad a_0 = \frac{A_0}{A_2}; \quad a_1 = \frac{A_1}{A_2}.$$

Из соотношения (9-8) следует, что вторая производная равна алгебраической сумме остальных членов уравнения. Считая, что вторую производную x'' мы имеем, проинтегрируем ее дважды для нахождения производной нулевого порядка, т. е. искомой функции x . Члены суммы соотношения (9-8) получим, помножив производную x на коэффициент $-a_1$, нулевую производную x на коэффициент $-a_0$, а функцию времени Y на a . Суммируя члены $-a_1 x'$ и $-a_0 x$ с членом aY и интегри-

рый результат суммирования, получаем окончательную схему решения задачи (рис. 9-3). В этой схеме связи между блоками отражены без детализации, необходимой для практической постановки задачи. Как видно из рис. 9-3, значения неизвестной x получены путем выполнения элементарных математических операций, таких как сложение, умножение, интегрирование. Таким образом, АВМ должна содержать набор решающих элементов для выполнения различных математических операций. Соединяя эти элементы между собой соответ-



Рис. 9-4. Обобщенная схема АВМ:

ствующим образом, можно превращать АВМ в динамическую систему, математическая модель которой в точности соответствует математической модели исследуемого объекта.

Упрощенная схема АВМ приведена на рис. 9-4. В общем случае АВМ состоит из следующих основных устройств: *решающего устройства, устройства ввода, устройства управления и контроля, регистрирующего устройства*.

Решающее устройство обеспечивает решение математических уравнений или зависимостей и состоит из элементарных решающих элементов, каждый из которых служит для выполнения одной определенной математической операции (сложения, вычитания, умножения, деления, интегрирования и т. д.). Конструкция решающих элементов определяется физической природой используемых сигналов. В настоящее время преимущественное распространение получили электромеханические и электронные решающие устройства благодаря их меньшей стоимости, простоте изготовления и эксплуатации при обеспечении требуемой точности выполнения операций. Основными типовыми решающими элемента-

ми, условные обозначения которых приведены на рис. 9-5, являются:

- 1) интегратор, выполняющий операцию интегрирования переменной величины x по времени t и одновременно операцию умножения на постоянный коэффициент $-k$ (рис. 9-5, а); в этом же элементе предусмотрено задание начального значения y_0 выходной величины y ;
- 2) сумматор, в котором происходит сложение переменных величин x_1 и x_2 и одновременно умножение их на постоянный коэффициент $-k$ (рис. 9-5, б);
- 3) множительный элемент, выполняющий операцию умножения переменной величины x на постоянный или переменный коэффициент a (рис. 9-5, в);
- 4) функциональный элемент, обеспечивающий воспроизведение заданной функциональной зависимости $y=\Phi(x)$ произвольного аргумента x (рис. 9-5, г);
- 5) множительный элемент, выполняющий операцию перемножения входных величин x_1 и x_2 (рис. 9-5, д).

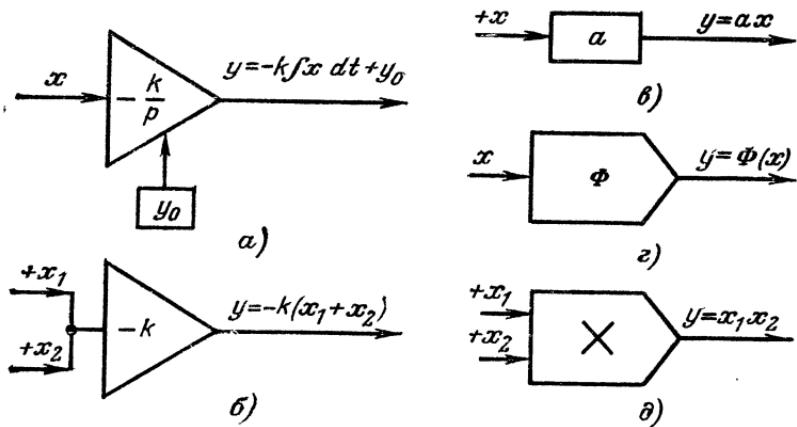


Рис. 9-5. Условное обозначение типовых решающих элементов.

а — интегратор; *б* — сумматор; *в* — множительный элемент на постоянный коэффициент; *г* — функциональный элемент; *д* — множительный элемент двух входных величин.

став решающих элементов определяется назначением машины. В специализированных АВМ обычно предусматривается определенное количество тех или других элементов. В универсальных АВМ состав решающих элементов должен обеспечивать выполнение всех встречающихся в практике математических операций, так как

заранее неизвестны задачи, которые будут поставлены для решения.

Устройство ввода обеспечивает ввод исходных данных в машину, который осуществляется с помощью следующих операций: соединение решающих элементов между собой в соответствии с заданной системой уравнений; установка коэффициентов передачи суммирующих и интегрирующих решающих элементов; настройка блоков задания функциональных зависимостей и переменных коэффициентов; задание начальных значений переменных.

Операции ввода данных, как правило, выполняются вручную. Соединение решающих элементов между собой осуществляется гибкими проводами.

Устройство управления и контроля осуществляет управление всеми узлами машины и обеспечивает визуально наблюдение за решением на экране электронно-лучевого индикатора. В большинстве АВМ все элементы системы управления машиной сосредоточены на пульте управления. Процесс решения начинается по сигналу «Пуск» с пульта управления. Автоматическое управление всеми режимами АВМ осуществляется с помощью специальной схемы, которая включает решающие элементы и вырабатывает тактовые импульсы для синхронизации блока переменных коэффициентов и отметчика времени. Устройство управления обеспечивает также возможность прекращения процесса решения (останов) для промежуточной фиксации результата и возвращение всех блоков и элементов в исходное состояние (сброс).

Регистрирующее устройство предназначено для регистрации результатов решения. В качестве регистрирующих устройств используются измерительные приборы: цифровые и стрелочные вольтметры постоянного тока, электронные осциллографы, двухкоординатные регистрирующие приборы и самописцы.

9-3. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Потенциометрические счетно-решающие элементы предназначены для выполнения различных математических действий и воспроизведения заданных функциональных зависимостей. Основными элементами потенциометрических счетно-решающих схем являются потенциометры. Конструкция и принцип действия потенциометров рас-

смотрены в § 2-3. По принципу действия — это делители напряжения электромеханического типа. Для выполнения математических операций сложения, вычитания, умножения и деления используются линейные потенциометры, у которых снимаемое напряжение пропорционально перемещению ползунка.

В качестве примера рассмотрим потенциометрическую схему (рис. 9-6), при помощи которой можно производить операции умножения и деления. В плечи моста

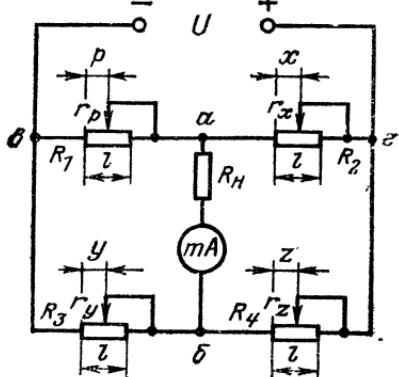


Рис. 9-6. Потенциометрическая мостовая схема умножения и деления.

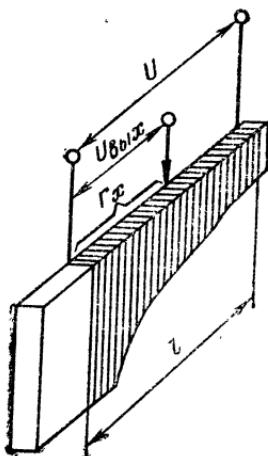


Рис. 9-7. Нелинейный функциональный потенциометр.

включены потенциометры $R_1—R_4$. Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения U , которое подводится в диагональ моста к точкам v и g . В другую диагональ (точки a и b) включается сопротивление нагрузки R_H и миллиамперметр для индикации момента равновесия. Независимые переменные x , y , z и выходная величина ρ определяются значениями перемещений ползунков потенциометров.

Схема работает следующим образом. После установки заданных значений независимых переменных x , y и z производится отработка выходной величины ρ путем перемещения ползунка потенциометра R_1 и изменения сопротивления r_p до значения, при котором ток в диагонали ab становится равным нулю. Потенцио-

метры включены по схеме реостата, поэтому данная схема называется *реостатной*.

Известно, что для мостовой схемы равновесие (ток в диагонали *ab* равен нулю) выполняется при условии

$$\frac{r_p}{r_y} = \frac{r_x}{r_z}, \quad (9-9)$$

где r_p , r_x , r_y , r_z — сопротивления введенных частей потенциометров R_1 , R_2 , R_3 и R_4 .

Из выражения (9-9) находим:

$$r_p = \frac{r_x r_y}{r_z}. \quad (9-10)$$

Сопротивления r_p , r_x , r_y и r_z пропорциональны величинам перемещений ползунков p , x , y , z и равны:

$$r_p = \frac{R_1}{l} p; \quad r_x = \frac{R_2}{l} x; \quad r_y = \frac{R_3}{l} y; \quad r_z = \frac{R_4}{l} z, \quad (9-11)$$

где R_1 , R_2 , R_3 и R_4 — полные сопротивления потенциометров.

Обозначив

$$R_1/l = k_1; \quad R_2/l = k_2; \quad R_3/l = k_3; \quad R_4/l = k_4$$

и подставив соотношения (9-11) в выражение (9-10), получим:

$$p = \frac{k_2 k_3}{k_1 k_4} \frac{xy}{z}. \quad (9-12)$$

Таким образом, выходная величина p при $z=\text{const}$ пропорциональна произведению входных величин x и y , а при $y=\text{const}$ пропорциональна частному от деления величин x и z .

Решение задачи на мостовой схеме можно автоматизировать. Для этого необходимо сигнал рассогласования, возникающий в диагонали моста *ab*, подать на вход следящей системы, управляющей перемещением ползунка отрабатывающего потенциометра R_1 .

Кроме выполнения математических действий в вычислительной технике часто возникает задача преобразования одних величин в другие в соответствии с заданной функциональной зависимостью. Для получения последней применяют нелинейные функциональные потенциометры, в которых напряжение, снимаемое с выхода, воспроизводит заданную функцию при перемещении ползунка. Получение заданной зависимости дости-

гается правильным распределением сопротивления по длине каркаса потенциометра. Каркас такого потенциометра с одной стороны выполняется прямолинейным, а с другой — в виде определенного нелинейного профиля (рис. 9-7). На этот каркас постоянным шагом наматывается проволока с большим удельным сопротивлением. К концам потенциометра подводится постоянное напряжение U , а заданная функциональная зависимость в виде напряжения $U_{\text{вых}}$ снимается с его ползунка. При равномерном перемещении ползунка изменение выходного напряжения будет определяться изменением введенного сопротивления r_x потенциометра, которое в свою очередь определяется профилем каркаса. Таким образом, выбирая нужный профиль, можно воспроизвести любую заданную функциональную зависимость.

9-4. СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Вращающийся или поворотный трансформатор (ВТ) является индукционной машиной и ис-

пользуется в некоторых электромеханических счетно-решающих устройствах для получения напряжений переменного тока, пропорциональных тригонометрическим функциям угла поворота или углу α , а также для решения тригонометрических задач.

Вращающийся трансформатор по конструкции подобен асинхронному двигателю с неявно выраженным полюсами (рис. 9-8, а). Статор 1 и ротор 2 набраны из листовой электротехнической стали и имеют пазы, в которые уложены об-

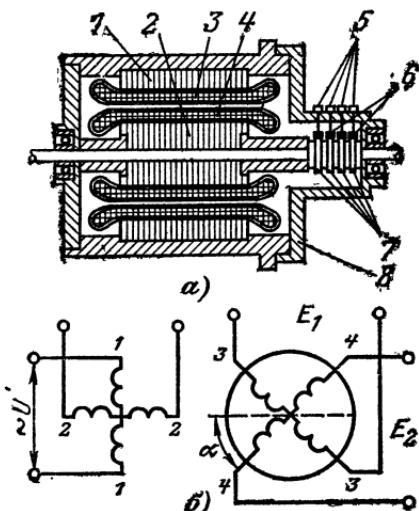


Рис. 9-8. Вращающийся трансформатор.

а — конструкция; *б* — пространственное размещение обмоток.

мотки 3 и 4: две на статоре и две на роторе. Обмотки статора и ротора расположены под углом 90°. Магнитные оси этих обмоток взаимно перпендикулярны. Пространственное размещение обмоток показано на рис. 9-8, б, где 1-1 — обмотка возбуждения; 2-2 — квадратурная обмотка; 3-3 и 4-4 — синусная и косинусная обмотки. Концы статорных обмоток подсоединенны к неподвижным зажимам на корпусе ВТ (на рис. 9-8, а не показаны), а концы роторных — выведены на контактные кольца 7, к которым прижимаются щетки 6, соединенные с зажимами 5 на корпусе 8 вращающегося трансформатора. Обмотки статора называются первичными, обмотки ротора — вторичными. Обмотка возбуждения питается от сети переменного тока. Схема включения других обмоток определяет вид зависимости, воспроизводимой с помощью ВТ.

По принципу действия ВТ является трансформатором и отличается от обычного трансформатора тем, что вторичные обмотки могут поворачиваться относительно первичных на произвольный угол α . Текущий по обмотке возбуждения переменный ток создает в статоре магнитный поток, который, пересекая обмотки ротора, наводит в них переменные ЭДС E_1 и E_2 . Огибающие этих ЭДС пропорциональны синусу и косинусу угла поворота α ротора:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_m \sin \alpha; \\ E_2 &= E_m \cos \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (9-13)$$

где E_m — максимальное значение ЭДС в обмотке ротора.

Максимальная ЭДС E_m наводится в обмотке ротора при совпадении ее магнитной оси с магнитной осью обмотки возбуждения.

При подключении к роторным обмоткам внешних нагрузочных сопротивлений цепи обмоток замыкаются и в них под действием ЭДС E_1 и E_2 будут протекать токи i_1 и i_2 . Эти токи создают продольный и поперечный магнитные потоки. Продольный магнитный поток направлен против основного потока, создаваемого обмоткой возбуждения, и будет уравновешен возросшими МДС этих обмоток. Поперечный магнитный поток приводит к искаложению синусоидального и косинусоидального характера огибающих ЭДС E_1 и E_2 .

Для компенсации поперечного магнитного потока на статоре помещается квадратурная короткозамкнутая

обмотка 2-2 (рис. 9-8, б) (под углом 90° электрических к основной обмотке). Эта обмотка создает магнитный поток, направление которого противоположно поперечному магнитному потоку и компенсирует его. В результате погрешность ВТ значительно уменьшается. Компенсацию погрешностей выходных напряжений ВТ, вызванных поперечным магнитным потоком, называют "симметрированием обмоток ВТ".

В схемах счетно-решающих элементов используются *синусно-косинусные* (СКВТ), *линейные* (ЛВТ), *построительные* (ПВТ) и *масштабные* (МВТ) вращающиеся трансформаторы.

Синусно-косинусные ВТ применяются для преобразования координат из полярной системы в прямоугольную.

Линейный ВТ по принципу действия является синусным ВТ. Синусная зависимость остается линейной с точностью до 1% в пределах изменения угла α от 0 до 14°. Соответствующим включением обмоток ВТ можно расширить эти пределы от 0 до 60°.

Построительные ВТ применяются для преобразования прямоугольных координат в полярные.

Масштабные ВТ используются для согласования масштабов в каскадных схемах с ВТ. У них, так же как и у ЛВТ, выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора α . Согласование масштабов производится установкой требуемого коэффициента трансформации путем поворота ротора на соответствующий угол α . В таком положении ротор ВТ застопоривается.

В качестве примера рассмотрим схему суммирования на ВТ (рис. 9-9).

Операцию суммирования можно осуществить при последовательном соединении ВТ. В этом случае в зависимости от фазы слагаемых напряжений будет осуществляться операция сложения или вычитания. Входные величины x и y , представляющие собой углы поворота роторов LVT_1 и LVT_2 , преобразуются в пропорциональные электрические напряжения

$$U_1 = Ux; U_2 = Uy,$$

где U — напряжение возбуждения.

При сложении напряжений U_1 и U_2 необходимо обеспечить равенство их электрических масштабов. Согласование масштабов производится масштабными вращаю-

щимися трансформаторами MBT_1 и MBT_2 . Суммарное напряжение

$$U_3 = U(k_1 x + k_2 y), \quad (9-14)$$

где k_1 и k_2 — масштабы слагаемых величин.

Напряжение U_3 пропорционально значению напряжения возбуждения U . Для того чтобы исключить влияние напряжения возбуждения U на угол поворота вала двигателя z , применяют следующую систему отработки z ,

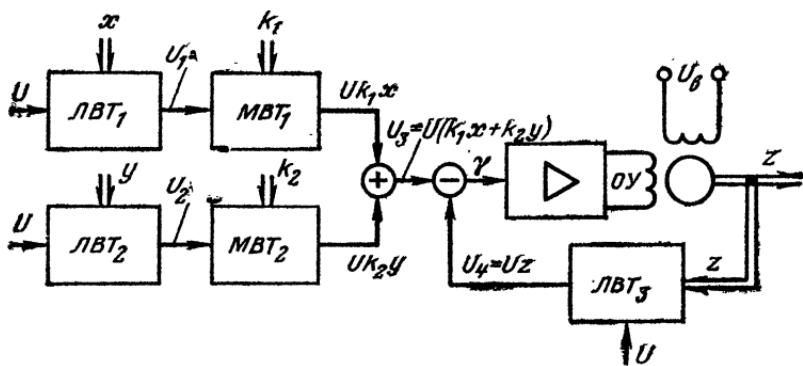


Рис. 9-9. Схема суммирования на ЛВТ.

состоящую из усилителя, электрического двигателя и $ЛВТ_3$, включенного в цепь отрицательной обратной связи.

Работа следящей системы заключается в следующем. Суммарное напряжение U_3 сравнивается с напряжением $U_4 = Uz$, снимаемым с выхода $ЛВТ_3$. При неравенстве этих напряжений на входе усилителя возникает сигнал ошибки

$$\gamma = U(k_1 x + k_2 y) - Uz.$$

Усиленный по напряжению и по мощности сигнал ошибки поступает на управляющую обмотку OY двигателя, который поворачивает ротор $ЛВТ_3$ на такой угол z , при котором напряжение отработки U_4 не станет равным суммарному напряжению U_3 . При

$$U(k_1 x + k_2 y) = Uz \quad (9-15)$$

сигнал ошибки $\gamma = 0$ и система находится в равновесии. В этом случае угол поворота вала двигателя z , а следо-

вательно, ротора LVT_3 будет пропорционален сумме слагаемых величин x и y :

$$z = k_1 x + k_2 y \quad (9-16)$$

и не зависит от напряжения возбуждения U .

9-5. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕШАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

а) Общие сведения и основные соотношения

Для выполнения математических операций в электронных аналоговых вычислительных устройствах наибольшее распространение получили операционные усилители постоянного тока (ОУПТ). Схема включения и ус-

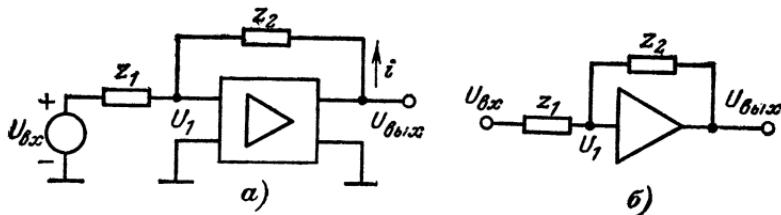


Рис. 9-10. Операционный усилитель.

ловное обозначение ОУПТ показаны на рис. 9-10, а и б. Нужно различать ОУПТ и УПТ, так как они имеют принципиально различные электрические характеристики. Операционный усилитель постоянного тока представляет собой комплексную схему, состоящую из УПТ и внешних элементов, подключенных на его вход и в цепь обратной связи.

Основными параметрами ОУПТ, определяющими точность выполнения математических операций, являются погрешность коэффициента передачи, дрейф нулевого уровня, характеризующийся максимальным значением напряжения на выходе усилителя за единицу времени при закороченном входе, и максимальное выходное напряжение.

Для уменьшения погрешности коэффициент передачи ОУПТ выбирается большим, примерно 10^5 — 10^6 .

Малые значения дрейфа нулевого уровня обеспечиваются выбором схем и источников питания усилителей.

Максимальные значения выходных напряжений, при которых выполняется линейная зависимость от входных напряжений, обычно составляют ± 100 В.

Определим коэффициент передачи K_0 операционного усилителя. Известно, что

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (9-17)$$

где $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ — напряжения на выходе и на входе.

Следует отметить, что выходное напряжение ОУПТ всегда имеет знак, обратный знаку входного напряжения, так как УПТ, входящий в состав ОУПТ, имеет нечетное число каскадов.

Ток, протекающий через сопротивления z_1 и z_2 ,

$$i = \frac{U_{\text{вых}} - U_1}{z_2} = \frac{U_1 - U_{\text{вх}}}{z_1},$$

где U_1 — напряжение на базе входного транзистора (управляющей сетке) УПТ, откуда

$$U_{\text{вых}} - U_1 = \frac{z_2}{z_1} (U_1 - U_{\text{вх}}). \quad (9-18)$$

Учитывая, что $U_{\text{вых}} = -kU_1$, где k — коэффициент усиления УПТ, получаем:

$$U_{\text{вых}} = - \frac{z_2}{z_1} \frac{U_{\text{вх}}}{1 + \frac{1 + z_2/z_1}{k}}. \quad (9-19)$$

Из выражения (9-19) находим коэффициент передачи операционного усилителя

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = - \frac{z_2}{z_1} \frac{1}{1 + \frac{1 + z_2/z_1}{k}}. \quad (9-20)$$

Коэффициент усиления УПТ выбирается достаточно большим $k \gg 1$, поэтому величиной $(1 + z_2/z_1)/k$ в выражении (9-20) можно пренебречь по сравнению с единицей, и тогда

$$K_0 = - \frac{z_2}{z_1}. \quad (9-21)$$

Таким образом, коэффициент передачи операционного усилителя определяется только соотношением сопротивлений z_2/z_1 и не зависит от параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов.

Записав выражение (9-21) в операторной форме, получим передаточную функцию операционного усилителя.

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)}. \quad (9-22)$$

б) Типовые решающие схемы с операционными усилителями постоянного тока

Разнообразие математических операций, выполняемых операционным усилителем, определяется характером сопротивлений на входе УПТ и в цепи его обратной связи. Для нахождения сопротивления, выраженного в операторной форме, воспользуемся табл. 9-1, в соответствии с которой будем определять передаточные функции ОУПТ.

Т а б л и ц а 9-1

Вид сопротивления	В оригинале	В комплексной форме	В операторной форме
Активное	R	R	R
Индуктивное	ωL	$j\omega L$	pL
Емкостное	$\frac{1}{\omega C}$	$\frac{1}{j\omega C}$	$\frac{1}{pC}$

На рис. 9-11, *a* усилитель имеет несколько входов, на каждый из которых поданы входные напряжения $U_{\text{вх}1}$, $U_{\text{вх}2}$, $U_{\text{вх}3}$, ..., $U_{\text{вх}n}$. Ток, протекающий через резистор R , равен сумме токов, протекающих через резисторы R_1 , R_2 , R_3 , ..., R_n :

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n.$$

Следовательно,

$$\frac{U_{\text{вых}} - U_1}{R} = \frac{U_1 - U_{\text{вх}1}}{R_1} + \frac{U_1 - U_{\text{вх}2}}{R_2} + \dots + \frac{U_1 - U_{\text{вх}n}}{R_n}. \quad (9-23)$$

Подставив значение $U_1 = -U_{\text{вых}}/k$ в выражение (9-23), получим:

$$\begin{aligned} \frac{U_{\text{вых}} + \frac{U_{\text{вых}}}{k}}{R} &= -\frac{\frac{U_{\text{вых}}}{k} - U_{\text{вх}1}}{R_1} + -\frac{\frac{U_{\text{вых}}}{k} - U_{\text{вх}2}}{R_2} + \dots \\ &\dots + -\frac{\frac{U_{\text{вых}}}{k} - U_{\text{вх}n}}{R_n}. \end{aligned}$$

Перенося члены, содержащие $U_{\text{вых}}$, влево, а все остальные вправо и вынося $U_{\text{вых}}/R$, получаем:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{R} \left(1 + \frac{1}{k} + \frac{R}{kR_1} + \frac{R}{kR_2} + \dots + \frac{R}{kR_n} \right) = - \left(\frac{U_{\text{вх1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх2}}}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вхn}}}{R_n} \right).$$

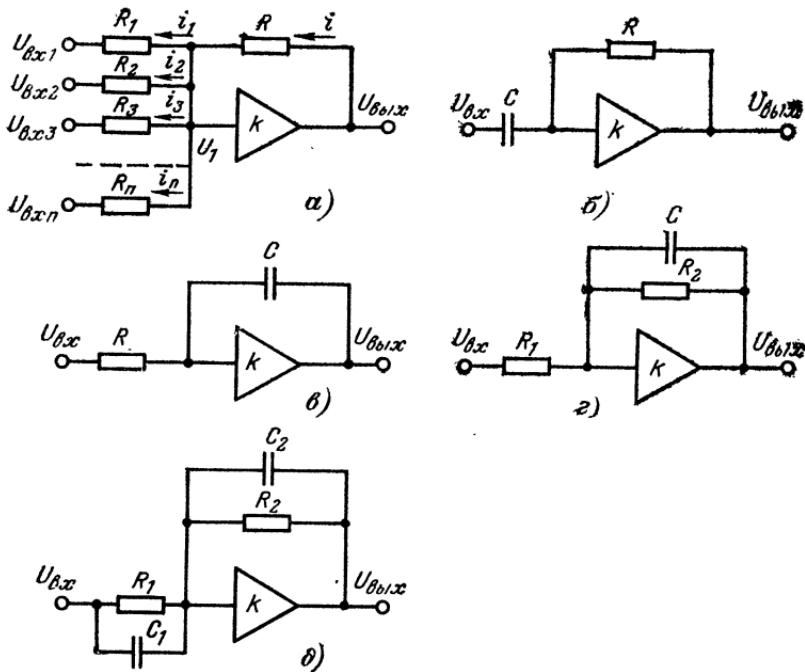


Рис. 9-11. Разновидности операционных усилителей.

а — сумматор; *б* — дифференцирующий усилитель; *в* — интегрирующий усилитель; *г* — инверционный усилитель; *ә* — форсирующий усилитель.

Так как $k \geq 10^5$, а отношения $R/R_1, R/R_2, \dots, R/R_n \leq 10$, то

$$1 + \frac{1}{k} + \frac{R}{kR_1} + \frac{R}{kR_2} + \dots + \frac{R}{kR_n} \approx 1.$$

Окончательно получаем:

$$U_{\text{вых}} = k_1 U_{\text{вх1}} + k_2 U_{\text{вх2}} + \dots + k_n U_{\text{вхn}}, \quad (9-24)$$

где

$$k_1 = -\frac{R}{R_1}; \quad k_2 = -\frac{R}{R_2}; \quad \dots; \quad k_n = -\frac{R}{R_n}.$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально сумме членов вида kx . Такие усилители называются сумматорами.

При действии на входе усилителя одного входного напряжения $U_{\text{вх}1}$ напряжение на выходе

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R}{R_t} U_{\text{вх}1},$$

т. е. выходное напряжение ОУПТ точно повторяет входное, но в измененном масштабе. Передаточная функция его имеет вид:

$$W(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = -\frac{R}{R_1} = K_0. \quad (9.25)$$

Усилители такого типа называются масштабными. Если в масштабном усилителе $R=R_1$, то $K_0=-1$ и $U_{\text{вых}}=-U_{\text{вх}}$. Такой усилитель называется инвертором, он используется для умножения на -1 , а при моделировании для инвертирования сигнала.

Если во входной цепи УПТ стоит конденсатор C , а в цепи обратной связи — резистор R (рис. 9-11, б), то такой усилитель называется дифференцирующим. Его передаточная функция

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} = -\frac{R}{1/pC} = -RCp = K_0 p, \quad (9.26)$$

где $K_0=RC$.

Поэтому выходное напряжение (см. гл. 7)

$$U_{\text{вых}} = K_0 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}.$$

Дифференцирующий усилитель используется в АВМ для выполнения операции дифференцирования и как модель дифференцирующих звеньев автоматических систем.

Для выполнения операции интегрирования в цепь обратной связи УПТ включают емкость C , а во входную цепь резистор R (рис. 9-11, в). Такой усилитель называется интегратором. Определим его передаточную функцию

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} = -\frac{pC}{R} = -\frac{1}{RC} \frac{1}{p} = \frac{K_0}{p}, \quad (9.27)$$

где $K_0=-1/RC$.

Отсюда

$$U_{\text{вых}} = K_0 \int_0^t U_{\text{вх}} dt.$$

Интегратор применяется в АВМ для выполнения операции интегрирования и как модель интегрирующих звеньев.

Если на входе включен резистор R_1 , а в цепи обратной связи параллельная цепочка из конденсатора C и резистора R_2 (рис. 9-11, ε), то получается *инерционный усилитель*.

Определим сопротивление в цепи обратной связи в операторной форме

$$z_2(p) = \frac{\frac{1}{pC} R_2}{\frac{1}{pC} + R_2} = \frac{R_2}{1 + pCR_2} = \frac{R_2}{1 + pT},$$

где $T = CR_2$.

Передаточная функция инерционного усилителя

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} = -\frac{\frac{R_2}{1 + pT}}{\frac{R_1}{1 + pT}} = \frac{-R_2}{R_1} = \frac{K_0}{1 + pT}, \quad (9-28)$$

где $K_0 = -R_2/R_1$.

Инерционный усилитель используется в АВМ как модель инерционных звеньев автоматических систем.

Схема *форсирующего усилителя* показана на рис. 9-11, δ . В этой схеме на входе и в цепи обратной связи стоят цепочки, состоящие из параллельно включенных резистора и конденсатора. Сопротивление на входе в операторной форме

$$z_1(p) = \frac{R_1}{1 + pT_1},$$

где $T_1 = R_1 C_1$.

Сопротивление в цепи обратной связи

$$z_2(p) = \frac{R_2}{1 + pT_2},$$

где $T_2 = R_2 C_2$.

Определим передаточную функцию форссирующего усилителя

$$W(p) = -\frac{z_2(p)}{z_1(p)} = -\frac{R_3}{R_1} \frac{1+pT_1}{1+pT_2} = K_0 \frac{1+pT_1}{1+pT_2}, \quad (9-29)$$

где $K_0 = -R_2/R_1$.

Форссирующий усилитель применяется как модель форссирующих звеньев автоматических систем, а также как корректирующее устройство при коррекции автоматических систем регулирования.

Из изложенного выше можно сделать вывод о том, что в зависимости от характера сопротивлений входной цепи и цепи обратной связи ОУПТ может выполнять различные математические операции.

9-6. ЭЛЕКТРОННЫЕ МНОЖИТЕЛЬНО-ДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В отличие от электромеханических в электронных множительно-делительных устройствах (МДУ) входные величины и результат заданы в виде изменяющихся напряжений. Полное отсутствие механических перемещений значительно повышают их быстродействие и надежность.

В данном параграфе рассматриваются МДУ, у которых операции умножения и деления осуществляются в результате выполнения ряда других математических операций.

Имеется много соотношений, с помощью которых можно осуществить операцию перемножения двух непрерывно изменяющихся величин. Однако наиболее употребительным является следующее:

$$z = xy = \frac{1}{4} [(x+y)^2 - (x-y)^2]. \quad (9-30)$$

Реализация операции умножения по формуле (9-30) сводится к выполнению операций алгебраического сложения, возведения в квадрат и деления. Алгебраическое сложение можно осуществить на суммирующем операционном усилителе (см. § 9-5), а для возведения в квадрат использовать функциональный диодный преобразователь, реализующий квадратичную параболу. Структурная схема такого множительного устройства приведена на рис. 9-12. Как видно из схемы, входное напряжение U_x подается на операционные усилители Y_1 и Y_3 , а напряжение U_y на операционные усилители Y_1 и Y_2 .

Операционные усилители Y_1 и Y_3 производят суммирование входных напряжений, причем в усилителе Y_1 производится операция сложения, а в усилителе Y_3 — операция вычитания. Это достигается подачей на вход усилителя Y_3 величины — U_y с выхода усилителя Y_2 , который

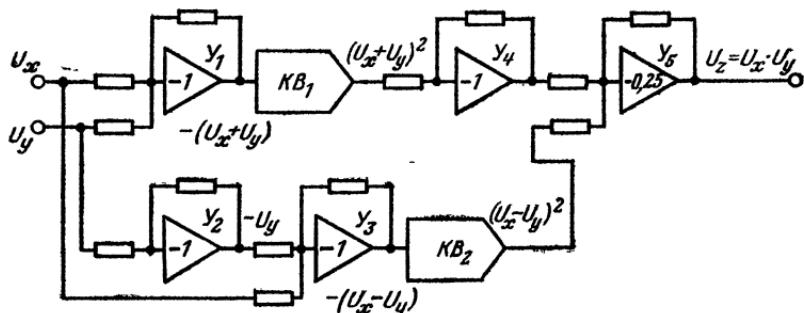


Рис. 9-12. Схема множительного устройства.

используется для перемены знака. Сумма $U_x + U_y$ подается на первый квадратор KB_1 , а разность $U_x - U_y$ — на второй квадратор KB_2 . Квадраты суммы и разности входных величин суммируются и одновременно умножаются на постоянный коэффициент — 0,25 на операционном усилителе Y_5 . Выходное напряжение U_z , снимаемое с выхода Y_5 , пропорционально произведению входных величин U_x и U_y .

Операция деления обычно выполняется двумя методами: путем умножения входной величины на величину, обратную делителю, или путем включения множительного устройства в цепь обратной связи усилителя с большим коэффициентом усиления.

Последний способ используется чаще, так как требует меньшего количества аппаратуры.

Для выполнения операции деления вторым способом используется схема, приведенная на рис. 9-13. На входы множительного устройства подаются напряжение

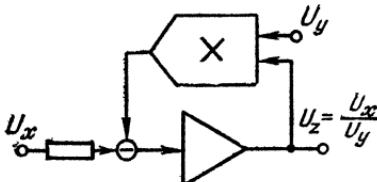


Рис. 9-13. Схема делительного устройства с обратной связью.

U_y и напряжение с выхода усилителя U_z . Выходное напряжение множительного устройства, пропорциональное произведению входных величин U_y и U_z , сравнивается с напряжением U_x .

Разность этих величин

$$\Delta = U_x - U_y U_z. \quad (9-31)$$

усиливается. При достаточно большом коэффициенте усиления можно считать, что $\Delta=0$ и тогда из выражения (9-31) получим:

$$U_z = U_x / U_y,$$

т. е. выходное напряжение U_z усилителя пропорционально частному от деления U_x и U_y .

В заключение следует отметить, что АВМ находят широкое применение во всех областях науки и техники.

В качестве примера можно привести систему управления мартеновской плавкой «Процесс-1» [8], которая предназначена для управления в режиме «Советчик сталевара» заключительным периодом мартеновской плавки — процессом доводки. Процесс доводки сводится к удалению примесей, содержащихся в расплавленном металле, и дополнительному нагреву металла. Управление процессом осуществляется путем изменения интенсивности подачи в печь присадок, руды, извести, боксита, а также путем изменения расходов топлива и кислорода. Задача заключается в отключении подачи присадок руды в определенный момент времени, когда выходные параметры процесса (концентрация углерода в металле и температура металла) достигают заданных значений. Определение этого момента времени производится на динамической модели процесса доводки, который описывается системой четырех нелинейных дифференциальных уравнений. Динамическая модель набирается на четырех аналоговых машинах типа ЛМУ-1 и четырех блоках нелинейностей типа НБН-1.

Данная система внедрена на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате и позволяет сократить время доводок на 15—20 мин, а также улучшить качество выплавляемой стали.

9.7. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЦИФРОВОЙ ЭВМ

Цифровые ЭВМ являются основным видом вычислительных устройств дискретного действия.

Решение любой задачи в цифровой ЭВМ осуществляется автоматически путем последовательного выполнения ряда арифметических и логических действий, аналогичных тем, которые производит человек при выполнении расчетов с помощью карандаша и бумаги. При этом расчетчик придерживается определенного порядка вычислений: записывает данные, производит арифметич-

ские действия, запоминает промежуточные результаты и т. д. Для выполнения подобных операций в машине имеются следующие основные устройства (рис. 9-14): арифметическое устройство (АУ), запоминающее устройство (ЗУ), устройство ввода-вывода (УВВ) и устройство управления (УУ).

В АУ происходит выполнение арифметических и логических операций над числами и командами. Оно содержит набор операционных блоков для суммирования двух чисел, умножения, деления, передачи, временного запоминания чисел и т. д., количества которых определяется назначением машины и используемыми в ней элементами.

Запоминающее устройство предназначено для хранения, записи и выдачи исходных данных, команд и результатов промежуточных вычислений. Оно в большинстве случаев состоит из оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и внешнего запоминающего устройства (ВЗУ). Оперативное запоминающее устройство непосредственно связано с АУ и служит для обеспечения приема и выдачи чисел со скоростью работы АУ. Оно выполняется на ферромагнитных или других элементах, обеспечивающих высокую скорость приема и выдачи информации. Емкость его сравнительно невелика. Внешнее запоминающее устройство обладает большой емкостью, но малым быстродействием. В нем хранится большое количество данных, которые непосредственно не участвуют в вычислениях, а служат резервом для ОЗУ. С ОЗУ оно связано через АУ и выполняется на магнитных лентах, барабанах и дисках.

Устройство ввода-вывода обеспечивает передачу в цифровую ЭВМ исходных данных и программы вычислений, а также прием, преобразование и вывод в удобной для оператора форме результатов вычислений. Оно содержит значительное количество блоков, которые разделяются на блоки ввода и блоки вывода информации.

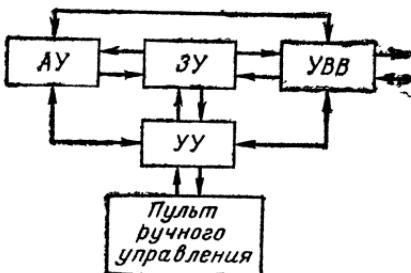


Рис. 9-14. Структурная схема цифровой ЭВМ.

Эти блоки в основном являются электромеханическими и имеют низкую скорость работы. Набор блоков ввода-вывода зависит от выполняемых машиной функций и определяется в каждом конкретном случае отдельно.

Устройство управления предназначено для автоматического управления всеми устройствами машины в соответствии с заданными командами программы. Программа представляет собой совокупность команд, обеспечивающих выполнение требуемой последовательности арифметических и логических операций. Любую задачу, которую нужно решить на ЭВМ, необходимо предварительно запрограммировать, т. е. представить в виде последовательности команд. Все команды программы перед вводом их в машину кодируются числами. При этом одна часть таких чисел-команд определяет вид операции, которая должна быть выполнена над числами, и называется *кодом операции*. Другая часть является адресной частью и указывает номера ячеек в ЗУ, в которых хранятся числа исходной информации или куда должен быть занесен результат операции.

Перед решением задачи исходные данные и программа через УВВ переписываются в ОЗУ. После этого решение задачи производится автоматически. Процесс вычислений начинается после окончания ввода информации. По сигналам УУ исходные числа из ОЗУ пересыпаются в АУ, затем над ними выполняется операция команды. Результат операции посыпается обратно в ОЗУ или остается в АУ, если он необходим для выполнения следующей команды.

В состав УУ входит пульт ручного управления, предназначенный для пуска и остановки машины. При помощи этого пульта оператор может вмешаться в процесс решения задачи.

9-8. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ЭВМ

а) Системы счисления

Под системой счисления понимается способ представления чисел посредством символов, называемых цифрами. Существуют различные системы счисления, от особенностей которых зависят наглядность представления числа и сложность выполнения арифметических операций.

Большими преимуществами в наглядности представления чисел и в простоте выполнения арифметических операций обладают позиционные системы счисления. Примером позиционной системы счисления является распространенная в практике счета десятичная система.

В позиционной системе счисления значимость одной и той же цифры зависит от того, какое положение она занимает в последовательности других цифр. Например, в десятичной системе счисления в числе 666 первая слева шестерка означает количество сотен, содержащихся в числе, вторая — количество десятков и третья — количество единиц. Помимо десятичной системы существуют другие позиционные системы счисления. Некоторые из них нашли применение в вычислительной технике.

Количество различных цифр, применяемых в системе счисления, называется ее основанием. В десятичной системе счисления используются десять цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и поэтому эта система имеет основанием число десять. Любое другое число может быть представлено суммой различных степеней десяти, умноженных на коэффициенты, изображающие число в виде сокращенной записи — последовательности соответствующих цифр. В этой последовательности запятая отделяет целую часть числа от дробной. Позиции цифр, отсчитываемые от запятой, называются разрядами. Значение каждого разряда больше соседнего справа разряда в число раз, равное основанию системы.

С учетом сказанного запись 2475,35 в десятичной системе счисления означает:

$$2 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^2 + 7 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0 + 3 \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2}.$$

В дальнейшем для обозначения используемой системы счисления будем заключать число в скобки и в индексе указывать основание системы.

В настоящее время основной системой счисления, применяемой в цифровых ЭВМ, является двоичная система. В этой системе используются только две цифры 0 и 1, поэтому ее основанием является число два. Любое другое число может быть представлено соответствующей последовательностью двоичных цифр. Рассмотрим, например, запись $(10110,11)_2$. Эта запись соответствует сумме степеней числа 2, взятых с указанными в ней коэффициентами:

$$(10110,11)_2 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2}.$$

Как следует из приведенного разложения, двоичное число $(10110,11)_2$ соответствует десятичному числу $(22,75)_{10}$.

Широкое использование двоичной системы счисления в цифровых ЭВМ обусловлено рядом преимуществ, обеспечивающих простоту реализации арифметического и запоминающего устройств, а также простоту выполнения арифметических и логических операций. Для представления в машине разряда двоичного числа может быть использован любой простой элемент, имеющий всего два устойчивых состояния. Одно из устойчивых состояний принимается за изображение 0, а другое за изображение 1. Такими элементами являются реле, триггерные схемы и др.

Для перевода целого числа из десятичной системы счисления в двоичную его нужно последовательно делить на основание 2. Деление осуществляется до тех пор, пока не получится частное 1 или 0.

Число в двоичной системе записывается в виде остатков деления, начиная с последнего частного, которое дает старшую цифру двоичного числа, например:

$$\begin{array}{r} 22 | \quad 2 \\ -22 \quad \quad | \quad 2 \\ \hline 0 \quad 10 \quad | \quad 2 \\ \quad \quad 5 \quad | \quad 2 \\ \quad \quad \quad 4 \quad | \quad 2 \\ \quad \quad \quad \quad 2 \quad | \quad 2 \\ \quad \quad \quad \quad \quad 1 \quad | \quad 0 \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad 0 \end{array}$$

$$(22)_{10} = (101 \cdot 10)_2.$$

Правила перевода дробных чисел из десятичной системы в двоичную изложены в [43] и здесь не рассматриваются.

Арифметические действия над двоичными числами выполняются в соответствии с приведенными ниже выражениями.

Сложение	Вычитание	Умножение
$0 + 0 = 0;$	$0 - 0 = 0;$	$0 \times 0 = 0;$
$0 + 1 = 1;$	$1 - 0 = 1;$	$0 \times 1 = 0;$
$1 + 0 = 1;$	$1 - 1 = 0;$	$1 \times 0 = 0;$
$1 + 1 = 10$	$10 - 1 = 1$	$1 \times 1 = 1$

Кроме двоичной системы в цифровой ЭВМ получили распространение и другие системы счисления. При прог-

раммировании используется восьмеричная система счисления, а для ввода исходных данных и вывода результатов вычислений — двоично-десятичная система.

Эти системы счисления являются вспомогательными.

В восьмеричной системе счисления основанием является число восемь. Любое другое число представляется суммой различных степеней восьмерки, умноженных на коэффициенты, изображающие число в виде сокращенной записи. Например, десятичное число $(26)_{10}$ в восьмеричной системе представляется суммой слагаемых:

$$(26)_{10} = 3 \cdot 8^1 + 2 \cdot 8^0 = (32)_8.$$

Десятичному числу $(26)_{10}$ соответствует число $(32)_8$ в восьмеричной системе счисления.

Для перевода числа из восьмеричной системы счисления в двоичную достаточно заменить отдельно каждую цифру восьмеричного числа соответствующим трехразрядным двоичным числом, например:

$$(32)_8 = 011 \ 010 = (011010)_2;$$

3 2

$$(27)_8 = 010 \ 111 = (010111)_2.$$

2 7

Как видно из примеров, одному разряду восьмеричного числа соответствует три разряда двоичной системы. Данная система удобна тем, что восьмеричная запись какого-либо числа в 3 раза короче его двоичной записи, а перевод чисел из одной системы в другую может выполняться чисто механическим путем. Поэтому ее используют при составлении программ для кодирования адресов и команд. После составления программа переводится в двоичную систему и затем вводится в машину.

Двоично-десятичная система используется как промежуточная между десятичной и двоичной системами счисления.

Числа в этой системе записываются следующим образом. Каждая десятичная цифра от 0 до 9 изображается отдельно четырехразрядным двоичным числом, например:

$$84 = 1000 \ 0100;$$

8 4

$$95 = 1001 \ 0101.$$

9 5

Перед вводом исходных данных десятичные числа специальными устройствами преобразуются в двоично-десятичные и в таком виде поступают в машину. Затем сама машина переводит двоично-десятичные числа в двоичные по специальной программе. После окончания вычислений машина автоматически переводит результат из двоичной в двоично-десятичную систему и с помощью электронных устройств выдает окончательный результат в десятичной системе.

б) Формы представления чисел в цифровой ЭВМ

В цифровой ЭВМ применяются две формы представления чисел: естественная или с фиксированной запятой и полулогарифмическая или с плавающей запятой. В зависимости от этого бывают *машины с фиксированной запятой и с плавающей запятой*. Запятая в машине кодом не изображается. Узлы каждой ЭВМ рассчитаны на определенное количество разрядов чисел. Совокупность таких разрядов, используемых в ЭВМ, называется *разрядной сеткой*. Числа и команды распределяются в разрядной сетке определенным образом.

При представлении чисел с фиксированной запятой положение запятой жестко закреплено в определенном месте относительно их разрядов и число разделяется на целую и дробную части. Для кодирования знака числа используется знаковый разряд, который располагается перед старшим разрядом записываемого числа. Нуль в знаковом разряде соответствует плюсу, а единица — минусу. Запятая обычно фиксируется сразу после знакового разряда, т. е. числа в разрядной сетке записываются только в виде правильных дробей. Поэтому при программировании задачи величины, участвующие в вычислениях, берут с соответствующими масштабными коэффициентами. Схематически разрядная сетка в цифровой ЭВМ с фиксированной запятой представлена на рис. 9-15.а.

Использование естественной формы записи чисел позволяет упростить схему машины, повысить ее быстродействие, но создает некоторые трудности при программировании и ограничивает диапазон представления чисел.

При представлении двоичного числа в форме с плавающей запятой оно изображается в виде

$$x = 2^p m; \quad |m| < 1,$$

где x — двоичное число; p — порядок; m — мантисса.

Мантисса обычно является правильной дробью и изображает число путем набора его значащих цифр. Порядок, как и мантисса, также представляется в двоичной системе. Он показывает положение запятой в числе x и может быть положительным или отрицательным. Знак порядка определяет направление смещения запятой по отношению к старшему разряду мантиссы. При отрица-



Рис. 9-15. Разрядная сетка ЭВМ.

а — в машине с фиксированной запятой; *б* — в машине с плавающей запятой.

тельном знаке запятая смещается влево, при положительном — вправо. Например, двоичные числа 1101,11 и 0,001101 в форме с плавающей запятой представляются следующим образом:

$$1101,11 = 2^{00100} \cdot (0,110111);$$

здесь 0,110111 — мантисса; +00100 — порядок;

$$0,001101 = 2^{-00010} (0,110100);$$

здесь 0,110100 — мантисса; -00010 — порядок.

Для изображения знаков в машинах с плавающей запятой отводятся два разряда: один для знака мантиссы, другой для знака порядка.

Схематическое изображение разрядной сетки цифровой ЭВМ с плавающей запятой показано на рис. 9-15, б. Следует отметить, что в данном примере было рассмотрено представление нормализованных чисел, у которых мантисса m удовлетворяет неравенству

$$1 > |m| \geq 1/2.$$

Неравенство показывает, что в старшем разряде мантиссы стоит единица.

Нормализованным числом может быть представлена любая величина с наибольшей возможной точностью при фиксированном количестве разрядов мантиссы.

Использование полулогарифмической формы записи чисел позволяет значительно расширить диапазон их представления.

в) Коды чисел

Для изображения чисел в цифровой ЭВМ применяются следующие коды: *прямой, обратный и дополнительный*. Отрицательные числа изображаются с помощью обратного и дополнительного кодов, позволяющих заменить операцию вычитания сложением и значительно упростить арифметическое устройство.

Прямой код совпадает с записью самого числа в принятой двоичной системе счисления с учетом знака. Например, число $-0,11101$ в прямом коде запишется $1,11101$.

Обратный код отрицательного числа формируется путем замены цифр в числовых разрядах прямого кода единиц нулями и нулей единицами. Значение знакового разряда будет равно единице. Например, обратный код отрицательного числа $-0,11101$ будет соответствовать $1,00010$.

Перевод чисел из обратного кода в прямой производится по такому же правилу. Обратный код положительного числа равен этому числу. Дополнительный код здесь не рассматривается.

Использование специальных кодов в ЭВМ позволяет все четыре арифметические действия свести к сложению. При этом умножение представляет собой последовательное сложение, а деление — последовательное вычитание, которое также сводится к сложению.

Обратные коды чисел складываются так же, как и прямые коды, поразрядно. При алгебраическом сложении двух двоичных чисел с использованием обратного кода положительные слагаемые представляются в прямом коде, а отрицательные — в обратном и производится арифметическое суммирование этих кодов, причем знаковые разряды складываются как разряды целых единиц. Рассмотрим пример операции сложения двух чисел

с использованием обратного кода:

$$\begin{array}{r} x_{\text{пр}} = +0,11001; \quad x_{\text{обр}} = 0,11001 \\ y_{\text{пр}} = -0,01100; \quad y_{\text{обр}} = 1,10011 \\ \hline & 10,01100 \\ & | \rightarrow 1 \\ \hline (x+y)_{\text{пр}} = 0,01101 \end{array}$$

Как видно из примера, при сложении кодов единица старшего разряда вышла влево. В этом случае для получения правильного значения суммы кодов единиц, вышедшую за знаковый разряд, прибавляют к младшему разряду. Эта операция называется циклическим переносом. Так как в знаковом разряде суммы стоит 0, то это число положительное и выражено в прямом коде. Если в знаковом разряде при сложении получается 1, то полученное число отрицательное и выражено в обратном коде.

9-9. ЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

При проектировании цифровой ЭВМ, а также при программировании задач широко используется аппарат математической логики, называемой *алгеброй логики*.

В основе решения логических задач лежит несколько элементарных логических операций, с помощью которых можно выражать все остальные логические связи.

Алгебра логики оперирует с такими понятиями, как *суждения, утверждения, высказывания*. Под высказыванием понимают всякое предложение, в отношении которого имеет смысл утверждение о его истинности или ложности. Например, 7 — нечетное число, трава зеленая и т. д. Одновременно истинных и ложных или не истинных и не ложных высказываний не существует. Отдельные высказывания обозначаются прописными буквами латинского алфавита *A, B, C...* и могут иметь только два значения: либо истинное, либо ложное, которые условно принято изображать: истинное 1, ложное 0. Запись *A=1* означает, что высказывание *A* истинно. Запись *A=0* означает, что высказывание *A* ложно. В силу изложенного высказывание является двоичной переменной и соответствует цифрам в двоичной системе счисления. Это позволяет описывать функциональные связи схем и блоков,

входящих в состав ЭВМ, и осуществлять их анализ и синтез.

Ниже приводятся основные элементарные логические операции.

Логическое отрицание (операция НЕ, инверсия). Пусть имеется некоторое высказывание A . Его отрицанием будет другое высказывание, которое обозначается символом \bar{A} и читается: не A .

Смысл отрицания заключается в следующем. Если высказывание A истинно, т. е. $A=1$, то \bar{A} должно и, следовательно, $\bar{A}=0$. Если же высказывание A ложно, т. е. $A=0$, то \bar{A} истинно и, следовательно, $\bar{A}=1$.

Значение отрицания по значению основного высказывания устанавливается таблицей

$$\bar{0} = 1$$

$$\bar{1} = 0.$$

Логическое умножение (операция И, конъюнкция) двух высказываний A и B обозначается символом $A \wedge B$. Знак логической связи имеет смысл союза «и». Читается A и B .

Результатом логического умножения двух высказываний A и B является другое высказывание, которое истинно в случае истинности образующих его высказываний $A=1$, $B=1$, т. е. $A \wedge B=1$. Во всех других случаях это высказывание ложно. Значение конъюнкции по значениям составляющих ее высказываний устанавливается таблицей:

$$0 \wedge 0 = 0$$

$$0 \wedge 1 = 0$$

$$1 \wedge 0 = 0$$

$$1 \wedge 1 = 1$$

Логическое сложение (операция ИЛИ, дизъюнкция) двух высказываний A и B обозначается символом $A \vee B$. Знак логической связи имеет смысл союза «или»; читается A или B . Результатом логического сложения двух высказываний A и B является другое высказывание, которое истинно при истинности хотя бы одного из образующих его высказываний. Например, $A=1$, $B=0$, тогда $A \vee B=1$. Значение дизъюнкции по значениям составля-

ющим ее высказываний устанавливается таблицей:

$$0 \vee 0 = 0$$

$$0 \vee 1 = 1$$

$$1 \vee 0 = 1$$

$$1 \vee 1 = 1$$

Следует отметить, что операции логического умножения и сложения справедливы для любого числа высказываний, т. е.

$$A \wedge B \wedge C \wedge D \dots;$$

$$A \vee B \vee C \vee D \dots$$

Рассмотренные выше логические высказывания позволяют представить любую логическую связь с помощью операций логического отрицания, сложения и умножения.

При решении задач анализа и синтеза ЭВМ возникает необходимость преобразования логических выражений, которые производятся с помощью ряда правил. Ниже приводятся основные правила преобразования логических выражений:

$$A \wedge B = B \wedge A; \quad A \vee B = B \vee A;$$

$$A \wedge \bar{A} = A \wedge 0 = 0;$$

$$A \vee \bar{A} = A \vee 1 = 1;$$

$$A \wedge A = A \vee A = A \wedge 1 = A \vee 0 = A;$$

$$(A \wedge B) \wedge C = A \wedge (B \wedge C) = A \wedge B \wedge C;$$

$$(A \vee B) \vee C = A \vee (B \vee C) = A \vee B \vee C;$$

$$(A \wedge B) \vee C = (A \vee C) \wedge (B \vee C);$$

$$(A \vee B) \wedge C = (A \wedge C) \vee (B \wedge C);$$

$$\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}; \quad \overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}.$$

При подстановке в эти выражения значений 0 и 1 для всех переменных можно убедиться в справедливости рассмотренных формул.

9-10. ФИЗИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЧИСЕЛ В ЦИФРОВОЙ ЭВМ

Числа и команды в цифровой ЭВМ представляются набором двух цифр, которые физически реализуются двумя различными сигналами: один соответствует изобра-

жению единицы, другой — изображению нуля. В зависимости от вида этих сигналов различают три способа представления двоичных цифр в ЭВМ: потенциальный, импульсный и динамический.

При потенциальном способе двоичные цифры изображаются различными уровнями напряжения. Обычно еди-

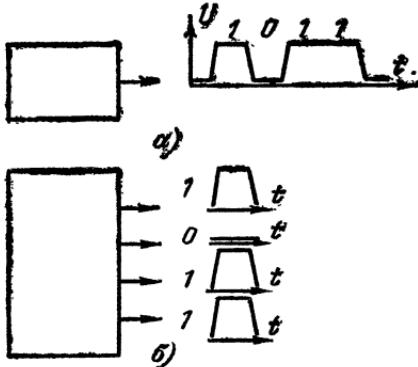
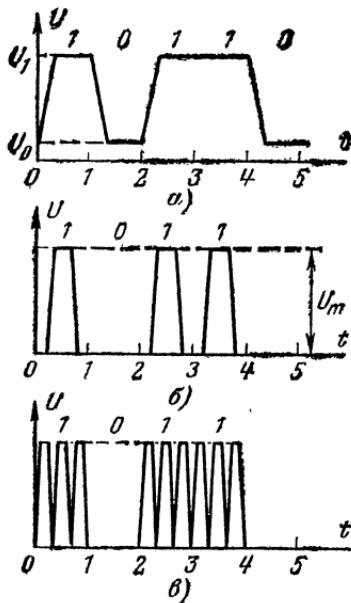


Рис. 9-17. Коды передачи чисел в ЭВМ.

a — последовательный; *b* — параллельный.

Рис. 9-16. Способы представления цифр в ЭВМ.

a — потенциальный; *b* — импульсный; *c* — динамический.

нице соответствует высокий уровень напряжения U_1 (рис. 9-16, *a*), а нулю — низкий U_0 . Соответствующий уровень напряжения сохраняется в течение всего времени представления данной цифры.

При импульсном способе двоичные цифры изображаются импульсами определенной длительности. Наличие импульса в определенный момент времени соответствует единице (рис. 9-16, *b*), отсутствие — нулю. В некоторых машинах единица и нуль изображаются импульсами различной полярности.

При динамическом способе единице соответствует наличие серии импульсов или синусоидальных колебаний, заполняющих весь период представления, нулю — ее отсутствие (рис. 9-16, *c*).

Числа, закодированные с помощью электрических сигналов, вводятся в машину последовательно или параллельно.

При последовательном вводе двоичное число передается по одной электрической цепи последовательно разряд за разрядом (рис. 9-17, а). В этом случае на передачу затрачивается сравнительно много времени, которое определяется количеством разрядов в числе.

При параллельном вводе все разряды числа передаются одновременно, причем каждый из них поступает по своей электрической цепи (рис. 9-17, б). Время передачи числа при таком способе равно времени передачи одного разряда, однако при этом требуется столько электрических цепей, сколько разрядов в передаваемом числе.

В зависимости от применяемого кода цифровые устройства делятся на устройства последовательного и параллельного действия.

9-11. ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ЭВМ

Преобразование цифровой информации в ЭВМ производится с помощью отдельных элементов. В зависимости от выполняемых ими функций последние делятся на *логические, цифровые и вспомогательные*.

Логические элементы применяются, как правило, для построения логических и цифровых схем ЭВМ. Ниже рассматриваются некоторые схемы основных логических элементов.

На рис. 9-18, а приведены схема и условное изображение логического элемента на полупроводниковом транзисторе, выполняющего операцию отрицания. При отсутствии напряжения на входе, что соответствует нулю, транзистор T закрыт напряжением смещения, подаваемым на его базу от источника $+E_b$, и его внутреннее сопротивление велико. С выхода снимается потенциал, равный $-E_k$, который соответствует единице. При подаче на вход схемы отрицательного напряжения, соответствующего единице, транзистор T открывается. Внутреннее сопротивление открытого транзистора значительно меньше сопротивления R_k , поэтому на выходе схемы в этом случае будет потенциал, приблизительно равный нулю. Таким образом данная схема выполняет логическую операцию отрицания $A = \bar{A}$.

Схема и условное изображение логического элемента, выполняющего операцию логического сложения, приведены на рис. 9-18, б. Здесь входные переменные закодированы так, что единице соответствует положительный электрический сигнал высокого уровня напряжения, а нулю — электрический сигнал низкого уровня, приблизительно равный нулю. При подаче на любой из входов A , B , C единичного сигнала через диод и резистор R потечет ток i , который создает положительное падение напряжения на резисторе R . На выходе появляется положительный сигнал высокого уровня, что эквивалентно появлению единицы. Только при подаче одновременно на все входы A , B , C нулевых сигналов на выходе схемы будет сигнал низкого уровня, соответствующий нулю. Таким образом выполняется операция логического сложения $A \vee B \vee C$.

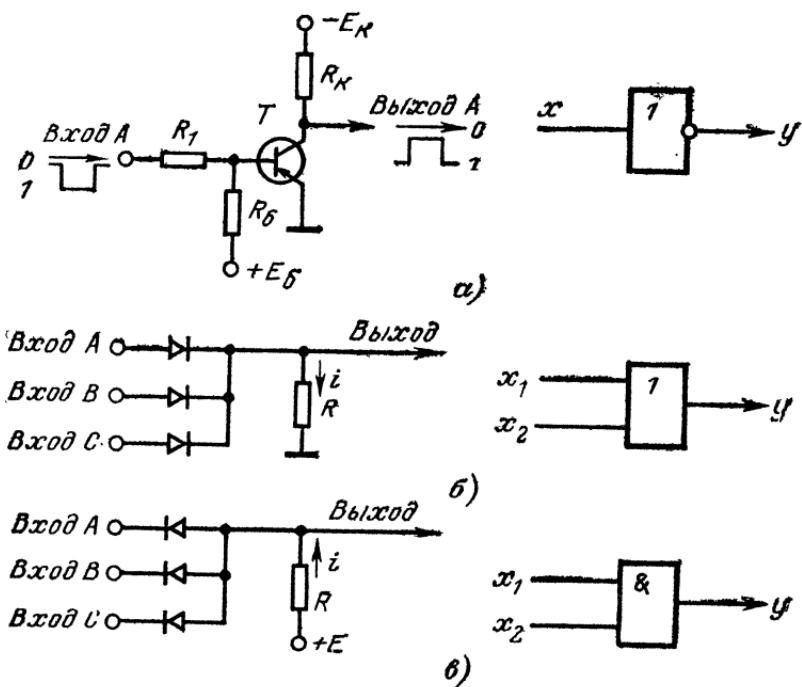


Рис. 9-18. Схемы и условные обозначения логических элементов.
а — элемент НЕ; б — элемент ИЛИ; в — элемент И.

проявления на резисторе R . На выходе появляется положительный сигнал высокого уровня, что эквивалентно появлению единицы. Только при подаче одновременно на все входы A , B , C нулевых сигналов на выходе схемы будет сигнал низкого уровня, соответствующий нулю. Таким образом выполняется операция логического сложения $A \vee B \vee C$.

В схеме логического элемента (рис. 9-18, в), выполняющего операцию логического умножения, направление включения диодов изменено на обратное. Если хотя бы на один из входов A , B , C подан сигнал низкого уровня, то через этот диод и резистор R от источника $+E$ протекает ток i , создающий падение напряжения на резисторе \tilde{R} . В результате с выхода схемы будет сниматься напряжение, близкое к нулю. Только в случае подачи на все входы A , B , C положительных напряжений, соответствую-

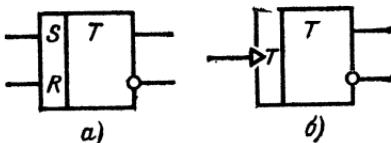


Рис. 9-19. Условные изображения статических триггеров.

a — с прямыми входами; *b* — со счетным входом.

ющими единице, диоды будут заперты, ток протекать не будет и на выходе схемы будет напряжение высокого уровня, соответствующее единице. Таким образом выполняется операция логического умножения $A \wedge B \wedge C$.

К цифровым элементам относятся широко применяемые в ЭВМ триггеры. Триггер используется в схемах ЭВМ как запоминающая ячейка.

Триггеры делятся на *статические* и *динамические*. Принципиальная схема и работа статического триггера рассмотрена в § 4-8. В статическом триггере двоичные цифры на выходе представляются потенциалами высокого и низкого уровня. Триггер, условное изображение которого приведено на рис. 9-19, а, имеет два входа и два выхода: S -вход служит для записи единицы; R -вход — для записи нуля. На рис. 9-19, б приведено условное изображение триггера со счетным входом.

Динамические триггеры в отличие от статических, как правило, имеют один выход. Установка динамического триггера в то или иное состояние производится, как и в статическом, управляющими сигналами, действующими на соответствующий вход. Числа на выходе представляются динамическим способом. Единице соответствует наличие последовательности импульсов, нулю — ее отсутствие. Нормальная работа обеспечивается подачей в схему синхронизирующих импульсов от генератора импульсов.

Принципиальные схемы и работа динамического триггера здесь не рассматриваются и изложены в [58].

Вспомогательные элементы предназначены для формирования, усиления и задержки импульсных сигналов, а также для восстановления уровней потенциалов до их номинального значения. К вспомогательным элементам относятся блокинг-генераторы, мультивибраторы, эмиттерные (катодные) повторители и др.

9-12. ТИПОВЫЕ УЗЛЫ ЦИФРОВЫХ ЭВМ

В цифровых ЭВМ при выполнении различных арифметических и логических операций иногда возникает необходимость произвести подсчет количества импульсов, хранить код числа в течение некоторого промежутка времени, сдвинуть этот код вправо или влево, выбрать заданные комбинации кодов. Эти операции выполняются специальными устройствами: *счетчиками, регистрами, дешифраторами*. Ниже приводятся несколько упрощенных схем этих узлов.

а) Счетчики

Счетчиком называют устройство, предназначенное для подсчета числа входных сигналов. На рис. 9-20, *а* приведена упрощенная схема четырехразрядного двоичного суммирующего счетчика, который состоит из четырех статических триггеров. Единичные выходы каждого триггера подсоединенны через дифференцирующие цепочки ДЦ к счетному входу каждого последующего триггера. Импульсы, подлежащие счету, подаются на счетный вход $x_{\text{сч}}$ триггера T_1 . Записанное в счетчике число снимается с единичных выходов триггеров $Q_1—Q_4$ в параллельном коде. Временные диаграммы, поясняющие работу счетчика, приведены на рис. 9-20, *б*.

Начальное состояние триггеров счетчика нулевое. При подаче на вход $x_{\text{сч}}$ счетчика первого импульса триггер T_1 переходит в состояние 1. При этом на его входе Q_1 получается положительный перепад напряжения. В результате дифференцирования этого перепада появляется положительный импульс, который не переводит второй триггер T_2 в состояние 1, так как применяемые триггеры переводятся из одного устойчивого состояния в другое только отрицательным импульсами. Второй импульс, подаваемый на вход T_1 , переводит его в состояние 0 и на выходе дифференцирующей цепочки ДЦ формируется

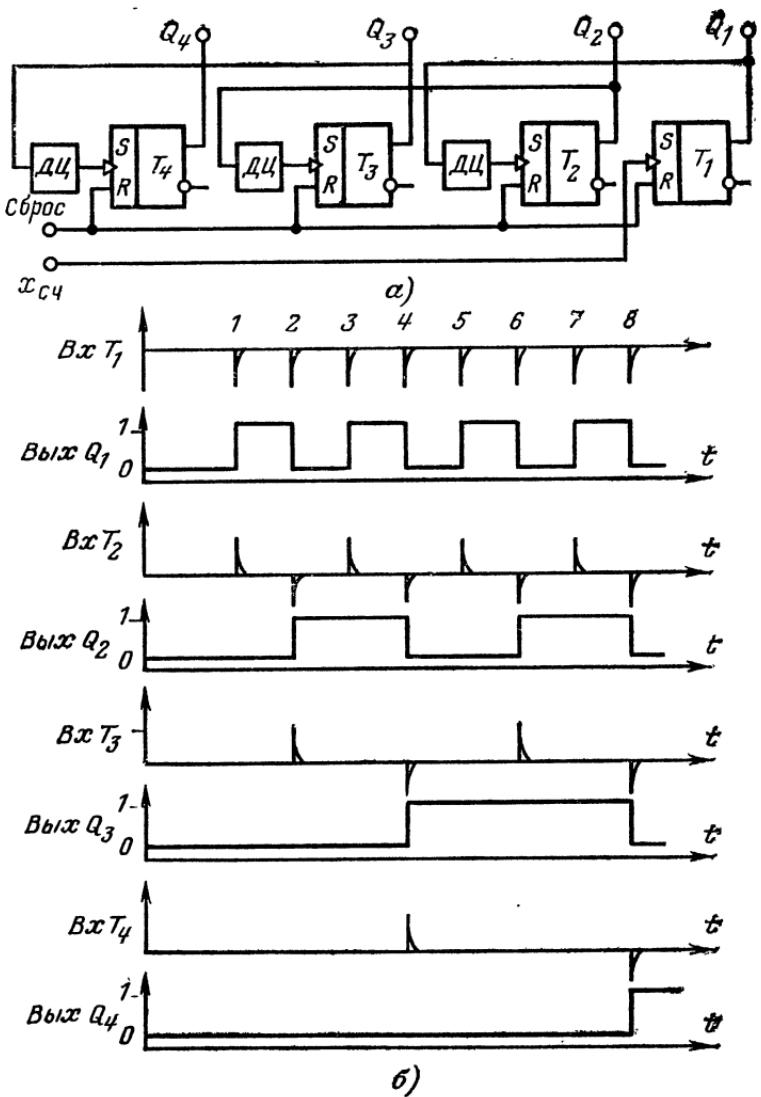


Рис. 9-20. Четырехразрядный двоичный суммирующий счетчик.
а — схема; б — временная диаграмма.

импульс отрицательной полярности. Этот импульс переводит триггер T_2 в состояние 1. Таким образом, отрицательный импульс переноса в ячейку старшего разряда двоичного счетчика появляется тогда, когда триггер ячейки

младшего разряда переходит из состояния 1 в состояние 0. Это соответствует правилу сложения двоичных чисел $1+1$, дает нуль в данном разряде и единицу переноса в старший разряд.

Из рис. 9-20, б видно, что триггер T_1 переходит из одного состояния в другое с приходом каждого импульса, подлежащего счету, триггер T_2 — через каждые два импульса, триггер T_3 — через четыре и т. д. Таким образом в рассмотренном примере коэффициент пересчета равен 2^n , т. е. пропорционален степени двойки.

В исходное нулевое состояние триггеры счетчика устанавливаются импульсом сброса, подаваемым на нулевые R -входы триггеров. Следует отметить, что практические схемы таких счетчиков содержат клапаны, разрывающие цепи переноса под воздействием импульсов сброса. При отсутствии этих клапанов триггеры счетчика не могут быть приведены в исходные состояния 0 одним импульсом сброса, так как возникающие при этом импульсы переноса будут переводить последующие триггеры счетчика в состояние 1.

По аналогичной схеме строятся вычитающие счетчики. В отличие от суммирующих импульс переноса в старший разряд формируется при переходе младшего разряда из состояния 0 в состояние 1.

б) Регистры

Регистры представляют собой устройства, предназначенные для запоминания и хранения цифровых кодов, а также для выполнения над ними некоторых логических операций. Регистры в большинстве случаев выполняются на триггерах, количество которых соответствует числу разрядов в цифровом коде. Операцию передачи цифрового кода в регистр и из регистра можно осуществлять последовательно и параллельно. На рис. 9-21, а приведена схема четырехразрядного регистра параллельного действия на статических триггерах. В исходное нулевое состояние триггеры регистра устанавливаются импульсом сброса, подаваемым на нулевые входы. Запись числа производится одновременной подачей на единичные входы 1—4 кода числа. Триггеры, на входы которых подается код единицы, переводятся в состояния 1, остальные триггеры останутся в состояниях 0. Записанное в регистре число считывается с единичных выходов.

Для запоминания числа и сдвига его на один или несколько разрядов вправо или влево используют схемы сдвигающего регистра (рис. 9-21, б). Регистры этого типа часто применяются в качестве преобразователей последовательного кода в параллельный и обратно. При записи числа в сдвигающий регистр цифровой код пода-

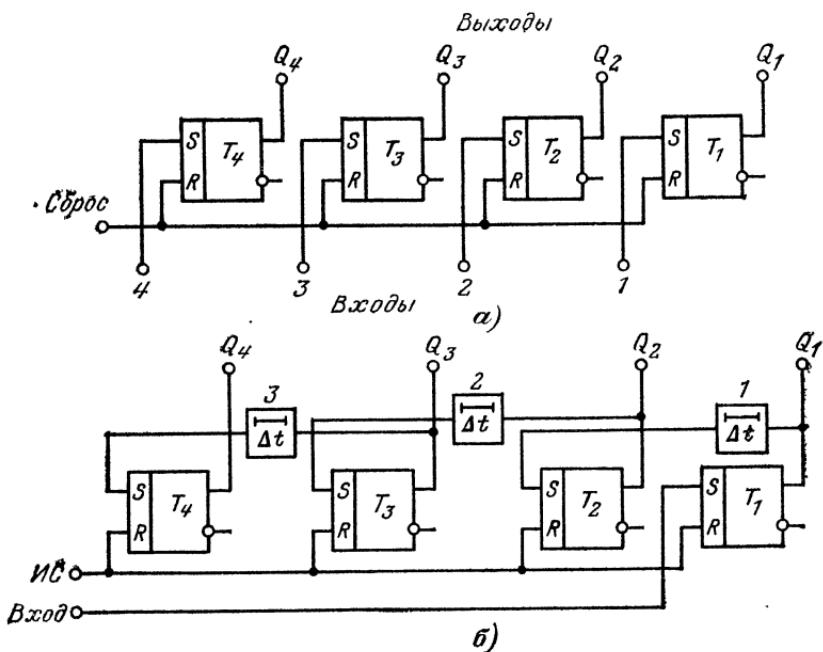


Рис. 9-21. Схемы регистров.

а — четырехразрядного регистра параллельного действия; б — сдвигающего регистра.

ется на единичный вход триггера T_1 , начиная со старшего разряда. Импульсы сдвига $ИС$ поступают на нулевые входы триггеров. Работу триггера рассмотрим на примере записи числа 1011. С приходом первого импульса, соответствующего 1 старшего разряда, триггер T_1 переводится в состояние 1. При действии импульса сдвига $ИС$ триггеры переводятся в состояния 0. Возникший на выходе триггера T_1 импульс переноса через элемент задержки 1 поступает на вход триггера T_2 и переводит его в состояние 1. Следует отметить, что элементы задержки 1—3 необходимы для того, чтобы возникающие импульсы

переноса подавались на единичные S -входы последующих триггеров после импульсов сдвига и установления триггеров в устойчивое состояние. Время задержки выбирается больше длительности импульсов сдвига. Следующий разряд числа 0. Входной импульс отсутствует, поэтому триггер T_1 останется в состоянии 0. При подаче очередного импульса сдвига единица из триггера T_2 сдвигается в триггер T_3 аналогично вышеописанному. С приходом третьего разряда числа триггер T_1 устанавливается в состояние 1 и т. д. Путем последовательной подачи кодов чисел и импульсов сдвига число записывается в регистр. Считывание чисел может осуществляться параллельным кодом с единичных выходов триггеров $Q_1—Q_4$ и последовательным кодом с единичного выхода Q_4 путем последовательной подачи серии импульсов сдвига.

в) Дешифраторы

Дешифратором называется устройство с несколькими входами и выходами, преобразующее код, подаваемый на входы, в сигнал на одном из выходов.

В общем случае дешифратор, имеющий n входов, имеет 2^n выходов, так как n -разрядный код входного числа может принимать 2^n различных значений и каждому из этих значений должен соответствовать сигнал на одном из выходов дешифратора.

Дешифраторы часто применяют в устройствах управления, когда необходимо код операции преобразовать в управляющий сигнал.

В качестве примера рассмотрим работу диодного дешифратора на четыре выхода (рис. 9-22). Основными элементами схемы являются двухразрядный триггерный регистр и диодная матрица. Схема имеет два входа A и B и четыре выхода $P_1—P_4$. Работа схемы описывается следующими уравнениями:

$$P_1 = AB; \quad P_2 = A\bar{B}; \quad P_3 = \bar{A}B; \quad P_4 = \bar{A}\bar{B}.$$

Допустим, $A=1$ и $B=1$, тогда оба триггера T_1 и T_2 находятся в единичном положении и с их единичных выходов снимаются высокие потенциалы. В этом случае диоды D_1 , D_2 , D_5 и D_6 заперты, а остальные открыты. Если хотя бы один из диодов, подсоединеных к какой-либо выходной шине, открыт, то потенциал этой шины низок, так как практически все напряжение от источника E па-

дает на одном из резисторов $R_1—R_4$, сопротивления которых значительно больше сопротивления открытого диода. Поэтому высокий потенциал, соответствующий коду 1, возникает на выходе P_1 , поскольку диоды D_1 и D_5 , связанные с этим выходом заперты.

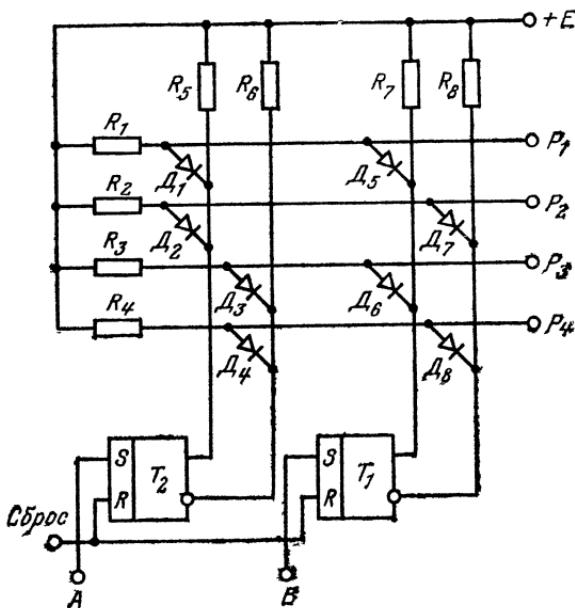


Рис. 9-22. Схема диодного дешифратора на четыре выхода.

Таким же образом можно убедиться, что высокий потенциал на выходе P_2 возникает при комбинации выходных сигналов $A=1$ и $B=0$, а на выходе P_3 при $A=0$ и $B=1$ и т. д.

9-13. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Как было отмечено в § 9-7, арифметические устройства предназначены для проведения основных арифметических и логических операций над числами. Основу арифметического устройства составляют *сумматоры* и *устройства умножения*, количество которых зависит от назначения машины и используемых в ней элементов. Ниже рассматриваются несколько схем этих устройств.

а) Сумматоры

Сумматором называется схема, выполняющая арифметическое суммирование кодов числа. В арифметических устройствах применяются сумматоры двух типов: *комбинационные* и *накапливающие*.

В комбинационном сумматоре сумма появляется одновременно с вводом слагаемых (если не учитывать переходные процессы) и является результатом комбинаций

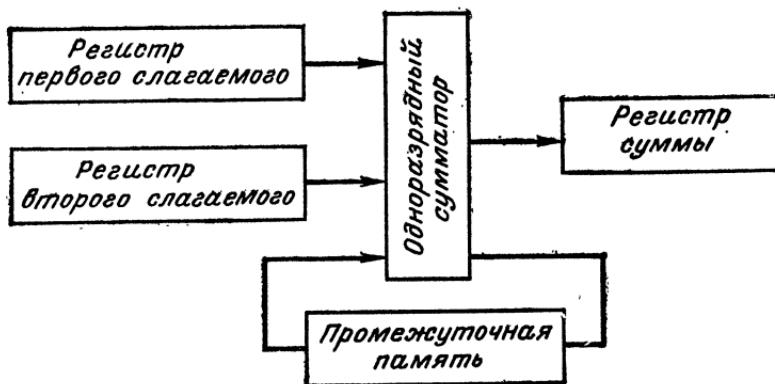


Рис. 9-23. Упрощенная схема сумматора последовательного действия.

входных величин. При снятии хотя бы одного слагаемого значение суммы исчезает, т. е. данный сумматор не обладает памятью.

В накапливающий сумматор числа подаются не одновременно и значение суммы определяется результатом сложения введенных в разное время слагаемых. Значение суммы сохраняется после исчезновения слагаемых, а стирание ее производится специальным сигналом.

И те, и другие выполняются из одноразрядных сумматоров или полусумматоров. В общем случае одноразрядный сумматор представляет собой элемент, имеющий три входа и два выхода. На входы поступают цифровые коды двух слагаемых и числа переноса из предыдущего разряда, а на выходах получается цифровой код суммы и числа переноса в следующий разряд.

Сумматоры могут быть *последовательного* и *параллельного действия*. В сумматоре последовательного действия (рис. 9-23) сложение двух чисел осуществляется с

помощью одноразрядного сумматора и промежуточной памяти. Слагаемые поступают в одноразрядный сумматор в последовательном коде, начиная с младшего разряда. Сложение осуществляется поразрядно. Единица переноса, если она возникает, запоминается промежуточной памятью, которая выдает ее в момент прихода следующего разряда слагаемых. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут получены значения цифр всех разрядов суммы.

В сумматоре параллельного действия все цифры слагаемых подаются на сумматор одновременно. Поразрядное сложение производится с помощью одноразрядных сумматоров, количество которых равно числу разрядов разрядной сетки машины.

Сумматоры последовательного действия имеют малое быстродействие, однако количество входящих в него элементов значительно меньше, чем у сумматора параллельного действия. Наиболее распространенными являются накапливающие сумматоры параллельного действия.

б) Множительные устройства

Умножение в ЭВМ производится путем образования и суммирования частных произведений, каждое из которых равно множимому или нулю.

Принцип работы множительного устройства рассмотрим на примере схемы умножения накапливающего типа с параллельным вводом частных произведений (рис. 9-24). Схема множительного устройства состоит из трех сдвигающих регистров: регистра *A*, в котором находится множимое, регистра *C*, в котором находится множитель, регистра *B*, в котором накапливаются частные произведения, и накапливающего сумматора.

Перед началом умножения множимое заводится в регистр *A*, а множитель — в регистр *C*. Сумматор и регистр *B* приводятся в исходное нулевое состояние.

При поступлении на схему множительного устройства импульсов сдвига цифровой код множителя последовательно разряд за разрядом, начиная с младшего, подается на элементы логического умножения И. Если в очередном разряде множителя стоит 1 то элементы И пропустят значение множимого из регистра *A* в накапливающий сумматор, где оно суммируется с содержимым регистра *B*. В регистре *B* хранится сумма частных произ-

ведений до окончания умножения. Если в данном разряде множителя стоит 0, прибавление множимого не производится. В первом такте умножения регистр *B* находится в нулевом состоянии и суммирование сводится к переносу множимого из регистра *A* в сумматор, а затем в регистр *B*. Сдвиг суммы частных произведений в реги-

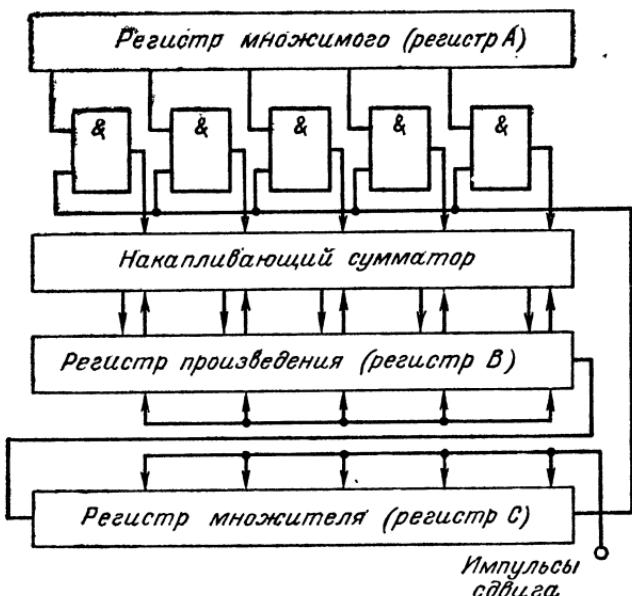


Рис. 9-24. Упрощенная схема множительного устройства.

стре *B* происходит одновременно со сдвигом в регистре *C* множителя в сторону младших разрядов, т. е. вправо, что равносильно сдвигу частных произведений влево.

Произведение двух *n*-разрядных чисел должно иметь $2n$ разрядов. Для уменьшения оборудования младшие разряды произведения размещаются на освободившихся местах в регистре *C* множителя. После выполнения необходимого количества тактов произведение размещается в регистрах *B* и *C*.

9-14. УСТРОЙСТВА ВВОДА И ВЫВОДА ИНФОРМАЦИИ

Устройства ввода и вывода информации являются промежуточными звенями, посредством которых происходит общение между человеком и вычислительной маши-

ной. Устройства ввода предназначены для введения в машину данных и программы вычислений. Устройства вывода служат для вывода из ЭВМ результатов вычислений.

Известные в настоящее время устройства ввода информации можно разделить на две группы: *неавтоматические* и *автоматические*. Неавтоматические устройства ввода представляют собой пульты управления вычислительных машин, пишущие машинки, телетайпы, бухгалтерские и другие клавишиные машины. Особенностью этих устройств является наличие клавиатуры, с которой человек манипулирует в процессе ввода. Неавтоматические устройства позволяют вводить информацию со сравнительно низкой скоростью, не более 20 знаков/с. Однако они еще широко применяются в современных ЭВМ.

В группу автоматических устройств ввода входят устройства для считывания информации с промежуточного носителя, читающие автоматы, устройства распознавания речи. К устройствам ввода с промежуточного носителя информации относятся устройства считывания информации с перфокарт или перфолент.

Почти все современные вычислительные машины имеют устройства ввода с перфолентой или перфокартами или оба вида устройств. Перфолента представляет собой плотную бумажную ленту, на которой в виде пробивок находятся цифры двоичного алфавита. Наличие отверстий соответствует 1, а их отсутствие — 0. В зависимости от ширины ленты на ней имеются от пяти до восьми кодовых дорожек для записи информации. Информация записывается строками, расположенными поперек ленты. Помимо кодовых отверстий в каждой строке пробивается круглое отверстие меньшего диаметра, используемое для создания синхронизирующих импульсов. Основным способом изображения данных является использование кодов. В настоящее время в устройствах ввода-вывода информации получили распространение два вида кодов: второй международный телеграфный код 2М и коды, оговоренные ГОСТ 10859-64.

Примеры представления информации на ленте для некоторых символов указанных кодов приведены на рис. 9-25, а и б.

Другим видом носителя информации является перфокарта. Перфокарты изготавливаются из специальной бумаги толщиной 0,18 мм. В настоящее время используются

два типа карт: 45-колонные, в которых пробиваются круглые отверстия, и 80-колонные с прямоугольными пробивками. В обоих типах перфокарт пробивка соответствует единице двоичного алфавита. Наиболее широко используются 80-колонные перфокарты. В такой перфокарте имеется 80 колонок и 12 горизонтальных строк (позиций). Информацию на перфокарте располагают по-

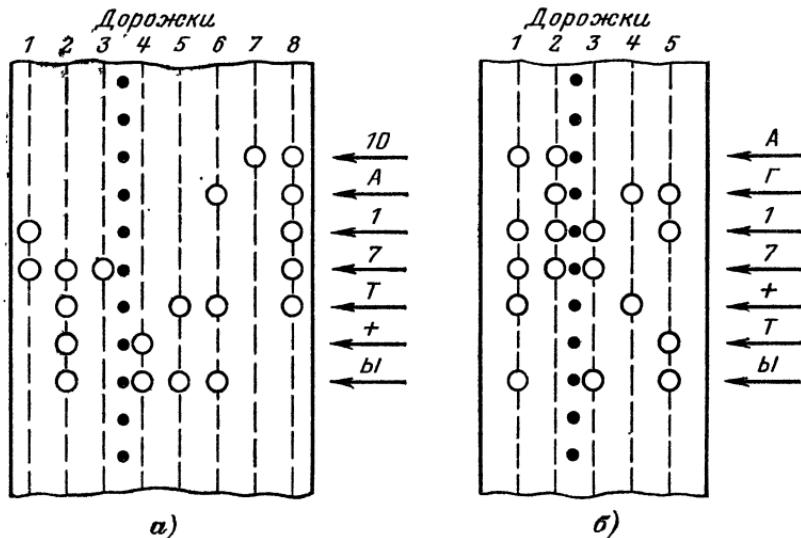


Рис. 9-25. Представление информации на перфоленте.
а — для кодов ГОСТ 10859-64; б — для кодов 2М.

колонно. На один символ, как правило, отводится вся колонка. Комбинируя пробивки в 12 позициях колонки, можно записать тот или иной символ (рис. 9-26). На 80-колонной перфокарте можно записать 80 символов.

Ввод информации с перфоносителей осуществляется с помощью считывающего устройства. Обычно используют два метода считываания: контактный и бесконтактный. При использовании первого метода производится прощупывание отверстий контактными щетками. Щетки, попадая в отверстие, замыкают электрическую цепь и вызывают появление сигнала. Бесконтактный метод считывания может использовать фотоэлектрический, пневматический или емкостный метод. При фотоэлектрическом

способе луч света, проходя через отверстие в перфоносителе, попадает на фоторезистор, фотодиод или фототранзистор и вызывает появление электрического сигнала в цепи, куда включен фотоприемник. Пневматическое считывание основано на восприятии воздушного потока через отверстие, а емкостное — на изменении емкости в случае наличия или отсутствия отверстия.

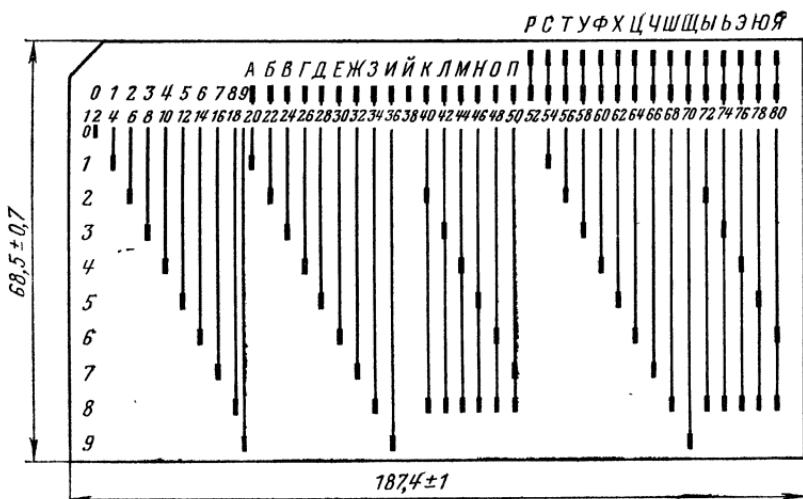


Рис. 9-26. Кодирование алфавитно-цифровой информации на 80-колонной перфокарте.

Наиболее широкое распространение получил фотоэлектрический способ считывания информации. Так, в ЕС ЦВМ скорость считывания с перфоленты при этом способе равна 1500 знаков/с. А при считывании с перфокарт скорость считывания достигает 300 карт/мин при вводе карт широкой стороной и 100 карт/мин при вводе карт узкой стороной.

Устройства вывода информации можно разделить на две группы. В первую группу входят устройства вывода на промежуточный носитель информации. Такими являются перфораторы для перфокарт и перфолент, а также устройства вывода информации на магнитные ленты. В современных устройствах вывода информации на бумажную ленту достигается достаточно высокая скорость перфорации — от 10 до 300 строк/с. Карточные перфораторы работают со скоростью от 60 до 300 карт/мин.

Во вторую группу входят знакопечатающие устройства: электрифицированные пишущие машинки, телетайпы и др., а также устройства вывода на экраны электронно-лучевых индикаторов (экранные пульты). Последние обладают наибольшими возможностями и применяются там, где требуется осуществлять оперативный обмен информацией между ЭВМ и человеком-оператором. Обычно экранные пульты снабжаются клавиатурой и световым пером. С их помощью оператор может вводить в ЭВМ любые данные, запрашивать из оперативного запоминающего устройства требуемую информацию, исправлять ее и т. д. Это в значительной степени облегчает и ускоряет обмен информацией между человеком и машиной.

9.15. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Возможности ЭВМ в значительной степени определяются характеристиками их запоминающих устройств (ЗУ). Такими характеристиками являются информационная емкость и быстродействие.

Под информационной емкостью понимают максимально возможное количество чисел и команд, которые одновременно могут храниться в ЗУ. Обычно она выражается количеством двоичных единиц информации — бит или байтов¹.

Быстродействие ЗУ определяется временем обращения, т. е. временем полного цикла, затрачиваемым на считывание и запись одного машинного слова (числа) в ЗУ.

Информационная емкость и быстродействие — противоречивые технические характеристики ЗУ. Сохранить высокое быстродействие при значительном увеличении информационной емкости невозможно. Поэтому в ЭВМ используют несколько ЗУ с различными характеристиками: оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) и др.

Оперативное запоминающее устройство непосредственно связано с арифметическим устройством и в процессе вычислений из него производится считывание и запись информации. Оно образуется из большого числа ячеек, каждая из которых предназначается для хране-

¹ Бит — единица информации, состоящая из одного двоичного разряда; байт — единица информации, состоящая из восьми двоичных разрядов или восьми бит.

ния одного машинного слова (числа) и состоит из запоминающих элементов. Оперативное запоминающее устройство отличается большим быстродействием, но имеет сравнительно небольшую емкость. Так, в ЭВМ ЕС-1020 емкость ОЗУ составляет 64—256 кбайт (килобайт), а время обращения 2 мкс.

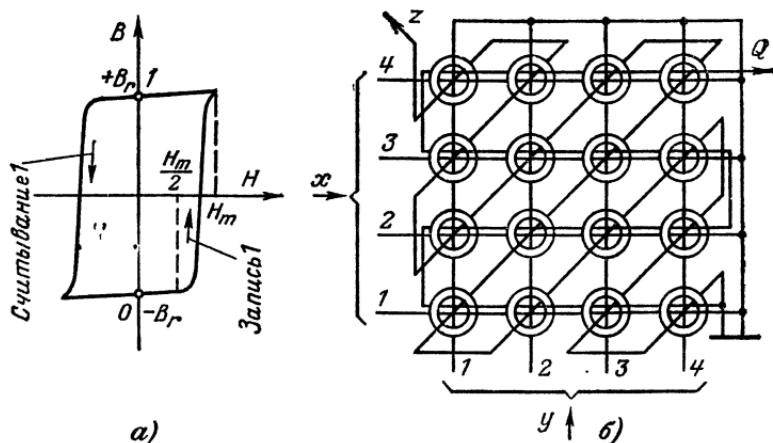


Рис. 9-27. Матрица ЗУ типа ЗД.

a — петля гистерезиса магнитного сердечника; *б* — схема матрицы.

Внешнее запоминающее устройство предназначено для хранения большого объема информации, поэтому емкость их велика, но работают они с довольно малой скоростью. Например, емкость ВЗУ ЕС-1020 составляет 1 млн. байт, а скорость обмена равна 100 000 байт/с.

В зависимости от принципа действия и характера хранения информации в настоящее время используется много различных видов ЗУ, например ЗУ на перфолентах и перфокартах, ЗУ на электромеханических и электронных реле, ЗУ на линиях задержки, ЗУ на электронно-лучевых трубках, ЗУ на ферромагнитных сердечниках.

В качестве примера рассмотрим ЗУ на ферромагнитных сердечниках типа ЗД.

В ЗУ типа ЗД (рис. 9-27, б) запоминающие элементы — кольцевые ферритовые сердечники, объединяются в так называемую *матрицу*. Последняя представляет собой решетку, образованную взаимно перпендикулярными проводами (шинами), на пересечении которых поме-

щены кольцевые ферритовые сердечники. Каждый феррит предназначен для запоминания одного разряда соответствующего числа. За единицу принято состояние положительной остаточной магнитной индукции $+B_r$, а за нуль — состояние отрицательной остаточной индукции $-B_r$ (рис. 9-27, а).

Для запоминания одного разряда m чисел требуется m запоминающих элементов. Разрядность числа определяется количеством матриц, которые располагаются одна над другой, образуя матричный куб.

Каждый феррит прошит шинами x_i , y_i , z и Q . Шины x_i и y_i называются *адресными* и служат для записи и считывания информации. Шина z , проходящая в диагональном направлении, предназначена для чтения и выдачи информации, которая выдается в параллельном коде. Шина Q служит для запрета записи единицы.

Цикл работы ЗУ состоит из следующих друг за другом тактов считывания и записи.

Считывание информации производится в соответствии с принципом совпадения токов путем подачи токов возбуждения i_x и i_y по адресным проводам x_i и y_i , на пересечении которых находится избранный сердечник. Перемагничивание ферритового сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса из одного состояния в другое производится полем определенной напряженности. Если магнитное состояние соответствует единице (рис. 9-27, а), то для его перемагничивания необходимо создать магнитное поле напряженностью H_m . Амплитуда импульсов тока выбирается равной половине тока перемагничивания $i_x = i_y = I_m/2$, поэтому полный ток I_m , способный перемагнитить сердечник, будет протекать только в избранном сердечнике, находящемся на пересечении адресных проводов. Считывание единицы сопровождается перемагничиванием сердечника и полным изменением индукции $\Delta B \approx |2B_r|$.

На выходной обмотке z в этом случае индуцируется ЭДС большой амплитуды. В случае считывания нуля изменение индукции будет значительно меньшим и ЭДС на выходной обмотке будет меньшей амплитуды. Таким образом, двоичные цифры различаются по амплитуде выходных ЭДС.

В результате считывания информации из выбранных сердечников они оказываются в состоянии намагнченности — B_r , соответствующей нулю. Для того, чтобы счи-

танская с них информация не была потеряна, производится ее запись. С этой целью для записи единицы по тем же шинам x_i и y_i посыпаются совпадающие по времени токи записи $i_x = i_y = -I_m/2$, имеющие полярность, противоположную токам чтения. При этом все выбранные сердечники переходят в состояние намагниченности $+B_r$, соответствующей единице. Запись нуля происходит при действии трех токов: $i_x = i_y = -I_m/2$ в координатных шинах x_i и y_y и $i_z = I_m/2$ вшине запрета записи единицы $-Q$, имеющего полярность, противоположную токам i_x и i_y .

Так как напряженность, создаваемая током i_z , отрицательна, то результирующая напряженность, созданная всеми токами i_x , i_y и i_z , не изменяет нулевого состояния сердечника.

Запись новой информации производится после стирания в выбранной ячейке старой информации.

9-16. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

а) Понятие о программировании

Решению задач на ЭВМ предшествует подготовительная работа, в результате которой весь процесс вычислений представляется в виде *алгоритма*. Эта подготовительная работа называется *программированием*. Алгоритм представляет собой совокупность операций и показывает последовательность выполнения отдельных этапов при решении задачи. Он реализуется путем выполнения следующих одна за другой в определенной последовательности команд, которые составляют *программу работы машины*. Таким образом программа — это точное описание вычислительного процесса в ЭВМ, указывающее, какие операции, в какой последовательности и над какими величинами должны быть выполнены в машине, чтобы получить искомый результат. Программа кодируется в цифровую форму и помещается в ЗУ. Каждая команда программы обеспечивает выработку в ЭВМ электронных сигналов, требуемых для выполнения определенного действия машины над заданными числами. Структура команды может быть представлена в следующем виде:

$$Sa_1a_2 \dots a_n,$$

где S — наименование (код) операции;
 a_1, a_2, \dots, a_n — адреса чисел, над которыми производится
данная операция.

Количество адресов в команде определяет характер и условия выполнения операций. Различают следующие основные формы команд: четырех-, трех-, двух- и одноадресные. Структура трех и одноадресной команд показана на рис. 9-28. Четырех- и трехадресное построения команды являются с точки зрения программирования (составления программ решения задачи) наиболее гибкими.

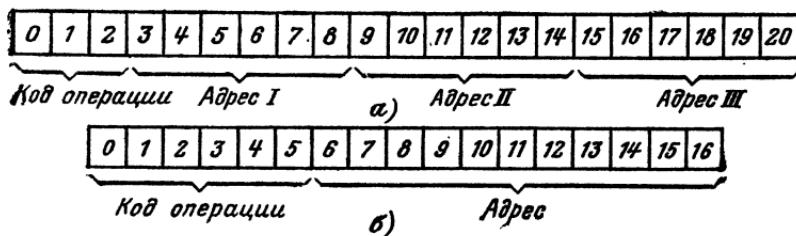


Рис. 9-28, Структура команд в ЦВМ.

а — трехадресная команда; *б* — одноадресная команда.

Однако в последнее время чаще применяются двух- и одноадресная системы команд. Это связано с тем, что зачастую четырех- и трехадресные команды используются неэффективно, так как результат операции может быть промежуточным и засылка его в память не обязательна. С другой стороны, даже одноадресное представление команды обеспечивает решение любых задач.

Одноадресная команда содержит код операции и один адрес, поэтому при выполнении арифметического действия требуются специальные посыльные операции для выбора числа из ячейки ЗУ и записи результата выполнения операции в ЗУ. Однако уменьшение количества адресов приводит к уменьшению количества разрядов в разрядной сетке ЭВМ и упрощает конструкцию машины.

В зависимости от конструкции ЭВМ могут иметь принудительный или естественный порядок выполнения команд. В ЭВМ с принудительным порядком выполнения команд адрес следующей команды записывается в очередной команде. При естественном порядке последовательность выполнения команд определяется порядком их

расположения в ЗУ, поэтому адрес следующей команды образуется на счетчике путем добавления к нему единицы.

Во многих случаях ход вычислительного процесса зависит от результатов промежуточных вычислений, поэтому в программе предусматривают возможные варианты вычислительного процесса, т. е. программа разветвляется. В машинах с естественным порядком следования команд для выполнения требуемого варианта вычислительного процесса предусматриваются команды перехода с явным указанием в них адреса следующей команды.

В заключение следует отметить, что команды не содержат чисел, а содержат лишь адреса, где эти числа расположены. Поэтому одна и та же программа может многократно использоваться для решения данной задачи при различных исходных данных.

б) Устройства управления

Устройство управления обеспечивает взаимодействие между отдельными узлами и устройствами ЭВМ так, чтобы процесс вычислений осуществлялся автоматически по заданной программе. Оно тесно связано со структурой машины, поэтому в отрыве от конкретной машины его рассматривать невозможно. В данном параграфе приводится упрощенная схема некоторой условной одноадресной машины и коротко рассматриваются функции, выполняемые устройством управления.

В состав устройства управления (рис. 9-29) входят следующие блоки: блок тактовых импульсов *БТИ*, блок управления операциями *БУО*, блок выработки адресов команд *БВАК*, блок выборки адреса числа *БВАЧ* и блок расшифровки кодов операций *БРКО*.

Блок тактовых импульсов вырабатывает синхронизирующие импульсы, называемые началом такта, которые поступают во все устройства машины и обеспечивают синхронность их работы. Импульсы начала такта начинают вырабатываться при нажатии на кнопку *Пуск* на пульте управления, который на рис. 9-29 не показан. Для прекращения выработки этих импульсов в программе предусмотрена команда *Останов*, которую можно подать с пульта управления нажатием кнопки.

Блок управления операциями вырабатывает следующие управляющие сигналы:

чтение команды из ЗУ;

чтение числа из ЗУ;

запись числа в ЗУ;

прибавление единицы на счетчик адресов команд.

Эти сигналы обеспечивают автоматическое выполнение команды и формируются из задержанных импульсов начала такта.

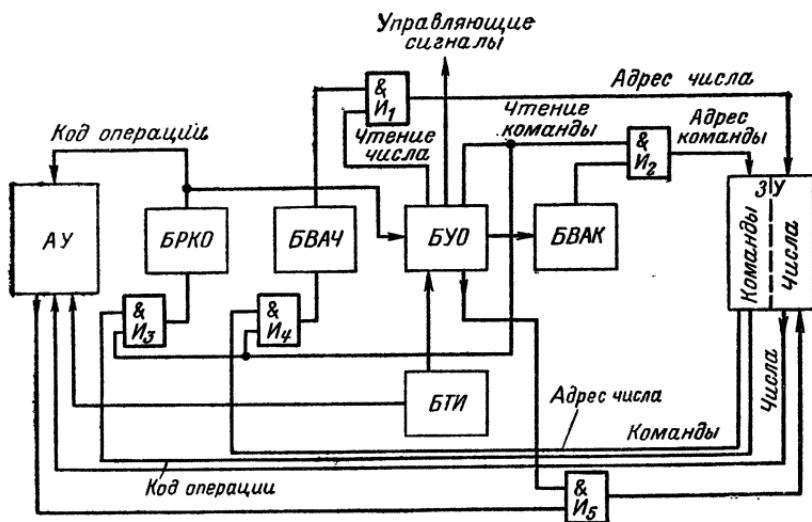


Рис. 9-29. Схема устройства управления.

Блок выработки адресов команд формирует адрес очередной команды. Основной частью блока является счетчик адресов команд. Адрес очередной команды получается на счетчике путем прибавления единицы, поступающей из *БУО*. Выдача тех или иных сигналов из блока определяется кодом текущей операции.

Блок выработки адреса числа принимает адрес числа, над которым необходимо произвести операцию. По этому адресу в ЗУ выдается управляющий сигнал и число из данной ячейки поступает в арифметическое устройство *АУ*.

Блок расшифровки кодов операций принимает код операции и вырабатывает управляющие сигналы, на-

страивающие АУ и другие устройства на выполнение операции.

Рассмотрим работу схемы при автоматическом выполнении программы. Очередной импульс начала такта из БТИ поступает в БУО, в котором формируются управляющие сигналы. В счетчике адресов команд записан адрес очередной команды, которую должна выполнить машина.

Пусть, например, адрес этой команды $k+1$. Управляющий сигнал *Чтение команды* открывает элемент I_2 и сигнал *Адрес команды* $k+1$ поступает в ЗУ. Из ячейки ЗУ с номером $k+1$ будет считана команда. Допустим, что она гласит: число из ячейки ЗУ с номером 1010 сложить с числом, находящимся в регистре АУ. Эта команда записана в ЗУ, например, в виде числа 011010, причем в этом числе 01 означает код операции сложения, а 1010 адрес числа, которое необходимо суммировать с содержанием регистра АУ. В рассматриваемой машине принят параллельный код, поэтому код операции 01 и адрес числа 1010 поступают по различным проводам к элементам I_3 и I_4 . Управляющий сигнал *Чтение команды* открывает элементы I_3 и I_4 и сигнал *Код операции* поступает в БРКО, а сигнал *Адрес числа* в БВАЧ. Если операция арифметическая, как в данном случае, то сигнал *Код операции* из БРКО поступает в АУ и подготавливает его к приему второго слагаемого. Если операция не арифметическая, то *Код операции* из БРКО поступает в БУО, где будут вырабатываться управляющие сигналы, соответствующие данной операции. Управляющий сигнал *Чтение числа* вырабатывается позже сигнала *Чтение команды*. К этому моменту в БВАЧ уже подготовлен сигнал *Адрес числа*. Управляющий сигнал *Чтение числа* открывает элемент I_1 и в ЗУ поступает сигнал *Адрес числа* 1010. Число, считанное по этому адресу, из ЗУ поступает в АУ и суммируется там с числом, записанным в регистре.

Затем из БУО после сигнала *Запись числа* в счетчик адресов команд прибавляется единица и в следующем такте из ЗУ будет выбираться команда с очередным номером $k+2$.

Результат операции записывается в ЗУ через элемент I_5 по специальной команде посылки числа из АУ и ЗУ. Элемент I_5 открывается сигналом *Запись*, поступающим из БУО.

9-17. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Качественный скачок в развитии систем управления был обусловлен применением в них средств вычислительной техники. В автоматических системах управления ЭВМ используются, как правило, в качестве устройств переработки информации. Они накапливают информацию об

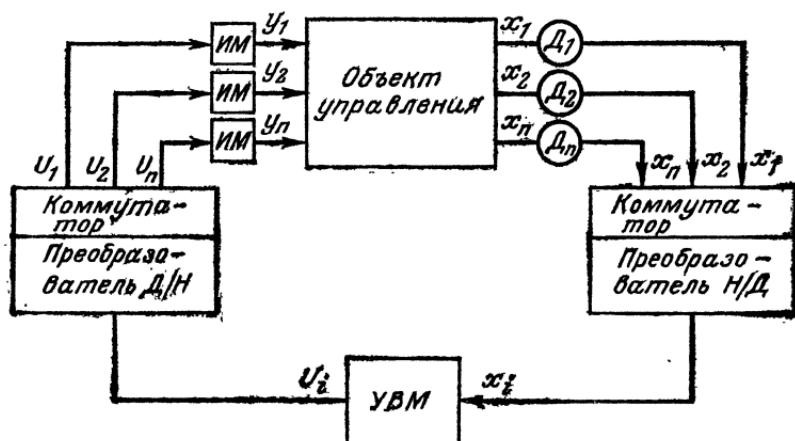


Рис. 9-30. Структура УВМ.

управляемом процессе в виде совокупности измеряемых параметров, сведений о состоянии оборудования и др. и перерабатывают эту информацию с целью выработки управляющих воздействий. Практика внедрения средств вычислительной техники в сферу управления производством показала нецелесообразность использования для этой цели универсальных цифровых ЭВМ, предназначенные для выполнения научных и инженерных расчетов, из-за их низкой экономической эффективности. Поэтому в середине 50-х годов стали появляться машины специально предназначенные для применения в системах управления. Они получили название управляющих вычислительных машин (УВМ).

Упрощенная схема системы автоматического управления с УВМ приведена на рис. 9-30.

Система работает следующим образом. Датчики $D_1, D_2 \dots D_n$ вырабатывают сигналы, пропорциональные теку-

щим значениям параметров $x_1, x_2 \dots x_n$, характеризующих процесс управления. Эти сигналы, как правило, представляют собой напряжение или ток и являются непрерывно изменяющимися величинами. Между тем УВМ оперирует с цифровыми данными. Поэтому величины $x_1, x_2 \dots x_n$ предварительно преобразуются в цифровые коды с помощью преобразователя непрерывных величин в дискретные *Преобразователь Н/Д* и затем поступает в УВМ. Принцип действия таких преобразователей был рассмотрен в гл. 6. Управляющая вычислительная машина обрабатывает эту информацию и определяет значения управляющих воздействий $U_1, U_2 \dots U_n$, которые преобразуются из цифровой формы в непрерывно изменяющиеся сигналы в *Преобразователе Д/Н*. Эти сигналы подводятся к исполнительным механизмам *ИМ*, которые воздействуют на регулируемые параметры $y_1, y_2 \dots y_n$ таким образом, чтобы управляемый процесс протекал оптимально. Коммутаторы поочередно подключают *Преобразователь Н/Д* к датчикам, а *Преобразователь Д/Н* к нужной цепи управляющего воздействия.

В настоящее время ЭВМ используются практически во всех видах систем управления производственными и технологическими процессами. Имеются в виду различные промышленные установки и агрегаты: доменные, мартеновские и обжиговые печи, химические и атомные реакторы, энергетические блоки (котел — турбина — генератор), прокатные станы и др. С помощью УВМ формируются управляющие воздействия, обеспечивающие ведение оптимального режима работы агрегатов, осуществляется управление их пусками и остановками, производится расчет и регистрация технологических и экономических показателей.

Например, в автоматизированной системе управления «Старт», предназначенный для управления обогатительной фабрикой, в качестве УВМ используется расширенный комплект управляющей вычислительной машины ВНИИЭМ-3. Система может работать в двух режимах: «Управление» и «Совет». В режиме «Управление» диспетчер выполняет функции контроля за исправностью работы системы. Управляющая машина осуществляет текущий контроль за состоянием оборудования и регистрирует значения параметров производственного процесса, определяет отклонения этих параметров от заданных норм, рассчитывает значения управляющих воздействий, обеспечивающих ведение оптимального производственного процесса. В УВМ используется двоичная система счисления. Длина слова (числа и команды) составляет 3 байта. Форма представления чисел — с фиксированной запятой. Возможна работа с

плавающей запятой со словами переменной длины. Структура команд одноадресная. Емкость ОЗУ составляет 12 288 байт. Скорость вывода информации в случае печати на телетайп РТА-50-2М равна 7 знаков/с. Данная система внедрена на Зыряновской горнообогатительной фабрике и дает 800 тыс. руб. экономии в год.

В системах оперативного управления УВМ решают диспетчерские задачи по распределению материальных потоков и нагрузок между основными технологическими агрегатами, по распределению вспомогательных механизмов и погрузочно-разгрузочных средств, по корректировке сменных и суточных заданий производства, по учету производственной продукции, материальных затрат и др.

Примером указанных систем является система «Импульс», предназначенная для управления участком сталь — прокат металлургического предприятия. В состав системы входит УВМ, выполненная на базе ЭВМ «Раздан-2». Информация о транспортной ситуации на участке при помощи датчиков поступает в УВМ, которая осуществляет прогнозирование ситуации на 6—7 ч вперед для различных вариантов управляющих воздействий, распределяет локомотивы между составами и управляет транспортировкой составов с изложницами.

Кроме обычных устройств вычислительной техники, входящих в комплект УВМ, имеются периферийные пульты, табло и датчики. Информация от них также вводится в УВМ. Управляющая вычислительная машина рассчитана на обработку данных о 150 составах с изложницами. Форма представления чисел — с фиксированной запятой. Длина слова (числа и команды) составляет 38 бит. Структура команд двухадресная. Емкость ОЗУ равна 2048 слов. Емкость долговременного ЗУ составляет 8192 слов. Система внедрена на Магнитогорском металлургическом комбинате.

В системах организационно-административного управления ЭВМ решают задачи календарного планирования производства, производят учет материальных средств, начисление заработной платы и др.

В системе управления телевизионным заводом «Львов» используется универсальная цифровая ЭВМ «Минск-22», доукомплектованная блоком дополнительных команд. Она выполняет следующие задачи управления производством: рассчитывает величины партий деталей и периодичность их запуска в производство, рассчитывает и корректирует календарные планы-графики работы цехов серийного производства, рассчитывает ритмы работы сборочных и поточных линий и т. д. В ЭВМ «Минск-22» используется двоичная система счисления. Форма представления чисел — с плавающей и фиксированной запятой. Длина слова составляет 37 бит. Среднее быстродействие машины равно 5—6 тыс. операций/с. Емкость ОЗУ равна 8192 слова. Внешнее ЗУ — накопитель на магнитной ленте. Емкость его составляет 1,6 млн. слов. Ввод

информации производится с перфокарт и перфолент. Скорость считывания информации: с перфокарт 300 перфокарт/мин, с перфоленты 100 строк/с. Вывод информации осуществляется путем печати, а также с помощью перфокарт. Скорость печати и перфорации составляет 20 строк/с. Скорость вывода с перфокарт — 100 перфокарт/мин. В качестве устройства вывода информации используется также световое табло-индикатор, представляющее собой поле из 256 люминесцентных индикаторов, на каждом из которых может быть высвечена любая десятичная цифра.

Данная система внедрена на Львовском телевизионном заводе в 1967 г. Экономический эффект от внедрения системы составляет 200 тыс. руб. в год.

Управляющие машины, так же как и универсальные ЭВМ выпуска конца 50-х — начало 60-х годов, имели жесткую структуру и фиксированные характеристики. Такая конструкция цифровых управляющих ЭВМ оказалась недостаточно гибкой и мало приспособленной к изменяющимся потребностям того или иного объекта, так как в процессе эксплуатации объекта управления одни задачи получают дальнейшее развитие, а значимость других задач уменьшается. В этих условиях УВМ с фиксированной структурой перестает соответствовать изменившимся условиям. Выход из затруднительного положения был найден в переходе от машины с жесткой структурой к наборам отдельных унифицированных функциональных блоков. К таким блокам относятся, например, вычислительные, запоминающие и печатающие устройства и др. Из этих блоков может быть скомпонована вычислительная система произвольной структуры. При необходимости в такой системе отдельные устройства могут быть заменены или дополнены другими. При переходе к агрегатному принципу исчезают ставшие уже привычными УВМ. Управляющая система компонуется из набора унифицированных устройств без проведения в каждом случае исследовательских или опытно-конструкторских работ. Агрегатный принцип построения вычислительных систем получил широкое признание. В нашей стране создана отечественная агрегатная система средств вычислительной техники (АСВТ). На базе АСВТ можно организовать: информационные и управляющие вычислительные системы для отдельных технологических объектов, автоматизированные системы управления для отдельных цехов, промышленных предприятий, электростанций и энергосистем, автоматизированные системы массового обслуживания, вычислительные центры предприятий, хозяйств и служб.

На базе АСВТ создана автоматизированная система резервирования и продажи билетов на авиатранспорте «Сирена-1», предназначенная для обслуживания пассажиров, вылетающих из аэропортов Московского авиаузла и следующих через Московский авиаузел. Система обеспечивает продажу авиабилетов, резервирование мест, изготовление билетов в соответствии с ранее принятыми заказами, накапливает статистические данные по пассажирским перевозкам и т. д.

В заключение следует отметить, что электронная вычислительная техника приобретает ныне такое значение, что степень ее применения становится одним из первостепенных экономических показателей.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

10-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Как было отмечено в § 1-1, отличительной особенностью телемеханических систем от систем автоматики является наличие в них устройств для передачи информации на значительные расстояния, т. е. в телемеханической системе объекты управления расположены на больших расстояниях от диспетчерского пункта и связываются с ним с помощью телемеханических устройств, которые представляют собой передатчики, линии связи и приемники. Передатчики предназначены для преобразования информации в удобные для передачи по линии связи сигналы. В приемнике эти сигналы преобразуются в вид, удобный для дальнейшего использования.

В системах телемеханики осуществляется обмен информацией между объектами управления и человеком на диспетчерском пункте или между отдельными автоматами. Поэтому в телемеханических системах предъявляются повышенные требования к достоверности передачи информации, которая может искажаться из-за воздействия помех. Потеря информации приводит к неправильному функционированию отдельных элементов и всей системы в целом. Кроме того, в телемеханических системах изыскиваются лучшие способы использования линий связи. Это вызвано большим количеством информации, передаваемым самим объектам или от объектов управления.

Системы телемеханики в зависимости от выполняемых ими функций делятся на системы телеизмерений (ТИ), служащие для контроля измеряемых параметров, системы телесигнализации (ТС), системы телеуправления (ТУ), обеспечивающие передачу на расстояние сигналов управления, и системы телерегулирования, в которых сигналы телеконтроля используются для автоматической коррекции телеуправления. Структурные схемы этих систем и их принцип действия рассмотрены в § 1-1.

Наряду с системами телемеханики, предназначенные для выполнения какой-либо одной из вышеуказанных функций, широко используются комплексные или комбинированные системы, выполняющие все перечисленные функции или различные их сочетания. Так, комбинированными системами являются системы телеуправления и телесигнализации (ТУ—ТС), в которых осуществляется передача команд от диспетчера на управляемый объект, а с него приходит сигнал об исполнении команды. Такие системы находят более широкое применение, чем системы, предназначенные для выполнения одной функции. Другим примером комплексной системы телемеханики является система телеуправления, телесигнализации и телеизмерения. Она обеспечивает полное управление отдельными участками или агрегатами и очень часто применяется на практике.

Следует отметить, что принцип действия и конструкция приведенных выше систем будут зависеть также и от того, как расположены объекты телемеханического контроля и управления. В зависимости от этого различают телемеханические системы с сосредоточенными и распределенными объектами. Примером телемеханической системы с сосредоточенными объектами является электрическая подстанция, где в одном помещении находится большое количество выключателей, включаемых и отключаемых с диспетчерского пункта. Характерным примером телемеханической системы с распределенными объектами являются насосные установки на нефтепромыслах, разбросанные на большой территории, управление которыми также осуществляется с диспетчерского пункта.

Телемеханические системы широко применяются в самых разнообразных отраслях народного хозяйства, например системы ТУ—ТС применяют на железнодорожном транспорте для диспетчерской централизации,

управления стрелками и сигналами на станциях, диспетчерского контроля движением поездов и т. д., в энергосистемах, в газовой и нефтяной промышленности, в коммунальном хозяйстве городов, на крупных металлургических комбинатах и предприятиях промышленности. Системы телерегулирования используются при исследованиях космоса, морских глубин и т. д.

Ниже рассматриваются некоторые виды телемеханических систем и их принципы действия.

10-2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И СТРУКТУРА ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При обычных методах электрических измерений электрических и неэлектрических величин дальность передачи полученных данных, как правило, весьма ограничена и составляет несколько десятков, а иногда сотен метров. Кроме того, обычные методы измерения не могут быть использованы для передачи данных с подвижных объектов (самолетов, ракет, спутников).

Системы телеметрии обеспечивают передачу полученной при измерении информации на значительные расстояния с различных объектов. Они позволяют получить достаточно высокую точность передачи и многократно использовать линию связи.

Сущность телеметрии заключается в предварительном преобразовании измеряемой физической величины в другую, вспомогательную величину, более удобную для передачи ее по линии связи. Эту вспомогательную величину называют сигналом. Таким образом передается не сама измеряемая величина, а эквивалентный ей сигнал, параметры которого выбираются так, чтобы полностью устраниТЬ или сделать незначительными погрешности, возникающие при изменении параметров линии связи. Структурная схема системы телеметрии приведена на рис. 10-1. Измеряемая величина x преобразуется с помощью датчика Δ в электрическую величину z , например в ток, напряжение, сопротивление, индуктивность

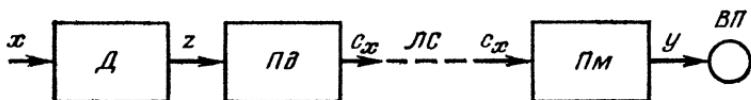


Рис. 10-1. Структурная схема системы телеметрии.

и т. д. В передатчике $Пд$ величина z преобразуется в сигнал c_x , который подается в линию связи $ЛС$. На приемной стороне принимаемый сигнал c_x преобразуется приемником $Пм$ в величину y , например в ток или напряжение, пропорциональные измеряемой величине x . Ток или напряжение измеряются выходным прибором $ВП$, который воспроизводит значение величины x .

Следует отметить, что в конкретных системах телеметрии возможно совмещение в одном узле нескольких функциональных элементов, например датчика и передатчика или приемника и выходного прибора и т. д.

Основной характеристикой систем телеметрии является точность. Точность характеризуется значением погрешности, которая показывает степень приближения показаний выходного прибора к действительному значению измеряемой величины.

Телеметрические системы могут быть классифицированы по различным признакам. Наиболее часто применяется классификация по методам передачи значения измеряемой величины по линии связи. В зависимости от этого системы телеметрии делятся на три основных вида: *системы интенсивности, импульсные и частотные системы*.

В системах интенсивности измеряемая величина преобразуется в ток или напряжение. Преобразователь измеряемой величины включен непосредственно в линию связи, т. е. преобразование тока или напряжения в сигнал, как указывалось выше, не производится. На приемной стороне выходной прибор также непосредственно включается в линию и измеряет ток или напряжение.

В импульсных и частотных системах измеряемая величина передается по линии связи с помощью серии импульсов или переменного тока. Информация об измеряемой величине наносится на эти сигналы при помощи различных видов модуляции.

Модуляцией называется процесс изменения параметра переносчика информации в соответствии с передаваемым сообщением.

10-3. СИСТЕМЫ ИНТЕНСИВНОСТИ

В системах интенсивности передача показаний обычно осуществляется постоянным током, значение которого не превышает 50 мА. Это исключает влияние изменения

индуктивности и емкости линии связи на показания выходного прибора и позволяет применять магнитоэлектрические миллиамперметры, обладающие большой точностью и равномерной шкалой.

Погрешность телеизмерения в системах интенсивности определяется изменением проводимости изоляции. Поэтому дальность передачи на воздушных линиях связи, проводимость изоляции которых сильно зависит от метеорологических условий, не превышает 10 км. При использовании кабельных линий связи, в которых утечка практически отсутствует, дальность передачи достигает 25 км.

Системы интенсивности делятся на *небалансные*, *балансные* и *логометрические*. Ниже рассматриваются некоторые схемы этих систем.

a) Небалансные системы

В зависимости от типа преобразователей с помощью которых получают ток, зависящий от значения измеряемой величины, различают несколько групп токовых небалансных систем.

В качестве примера рассмотрим схему небалансной токовой системы с реостатным преобразователем (рис. 10-2, а).

Схема состоит из датчика D , потенциометра R , балластного сопротивления R_b , двухпроводной линии связи $ЛС$ и выходного прибора $ВП$.

Потенциометр R подключен как делитель напряжения к вспомогательному источнику питания U_v и соединен с датчиком D .

Выходной прибор $ВП$ включен на приемном конце линии и представляет собой магнитоэлектрический гальванометр.

Работа схемы осуществляется следующим образом. При повороте подвижной части датчика на угол α последняя перемещает движок потенциометра R , меняя соотношение плеч делителя пропорционально этому углу:

$$\frac{r}{R} = k\alpha,$$

где r — сопротивление введенной части потенциометра;
 k — коэффициент пропорциональности.

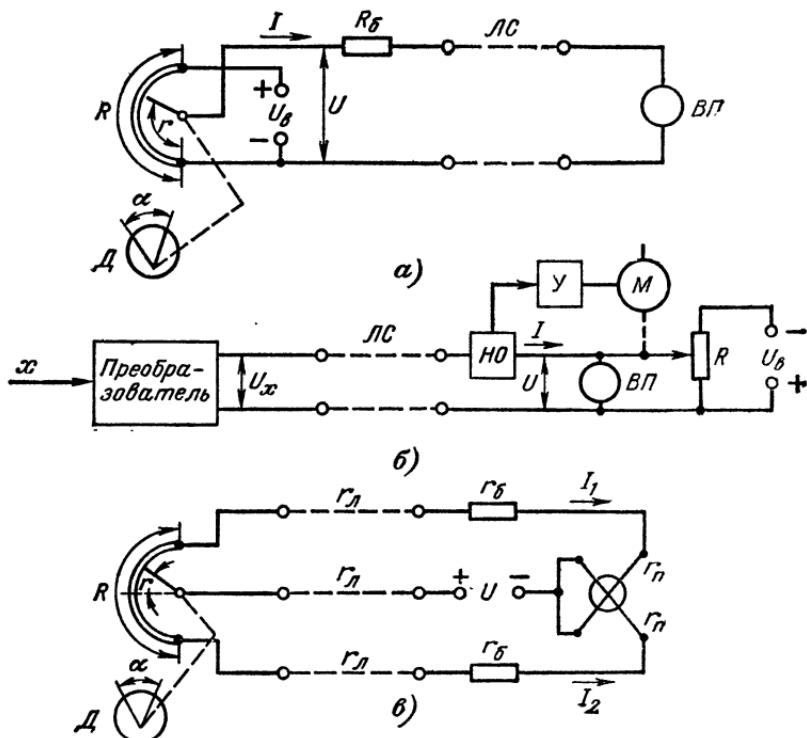


Рис. 10-2. Схемы телеметрических систем интенсивности.

a — небалансная токовая система с реостатным преобразователем; *б* — потенциометрическая балансная система напряжения; *в* — токовая логометрическая система.

Напряжение U , подводимое к линии, и ток I в линии будут также пропорциональны углу поворота α :

$$\left. \begin{aligned} U &= U_B \frac{r}{R} = U_B k\alpha; \\ I &= \frac{U_B}{R_\pi} k\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (10-1)$$

где $R_\pi = r_\pi + r_\pi + R_B$ — полное сопротивление цепи (r_π — сопротивление линии связи; r_π — сопротивление выходного прибора).

Отклонение стрелки выходного прибора $ВП$ пропорционально току в линии связи, а следовательно, углу поворота α подвижной части датчика $Д$. Шкала прибора градуируется в значениях измеряемой величины.

Напряжение вспомогательного источника U_b должно быть стабилизировано, так как ток I в линии связи пропорционален этому напряжению и отклонение напряжения U_b от нормального значения вызовет погрешность телеизмерения.

Балластное сопротивление R_b выполняется из проволоки с низким температурным коэффициентом сопротивления (манганина и константана) и выбирается обычно в 20 раз большим, чем сопротивление линии связи r_l . Поэтому изменение сопротивления r_l не оказывается на полном сопротивлении цепи R_p и не вызывает заметных погрешностей телеизмерения.

6) Балансные системы

Принцип действия балансных телеизмерительных систем основан на сравнении двух параметров: одного, создаваемого током в линии связи, и другого, создаваемого измеряемой величиной. Ток в линии связи изменяется автоматически в зависимости от измеряемой величины и не зависит или очень мало зависит от других факторов, например от изменения сопротивления линии связи, напряжения вспомогательных источников питания и т. д.

На рис. 10-2, б представлена структурная схема потенциометрической балансной системы напряжения. На передающей стороне измеряемая величина x преобразуется в напряжение U_x постоянного тока, которое подается в линию связи. В качестве преобразователя наиболее часто используются термоэлектрические сопротивления.

На приемной стороне к линии подсоединен автоматический потенциометр, состоящий из узла сравнения HO (нуль-орган), усилителя $У$, реверсивного двигателя M и реохорда R . Реохорд R нагружен на вспомогательный источник постоянного напряжения U_b .

Потенциометр устроен таким образом, что путем автоматического перемещения движка по реохорду R все время поддерживается равновесие $U_x = U$. При изменении напряжения U_x появляется напряжение разбаланса, которое обнаруживается узлом сравнения HO . Последний воздействует через усилитель $У$ на реверсивный двигатель M . В зависимости от знака напряжения разбаланса двигатель перемещает движок по реохорду до тех пор, пока снова не установится равновесие напряжений $U_x = U$. Напряжение U фиксируется выходным прибором $ВП$.

Следует отметить, что в момент равенства напряжений $U_x=U$ ток в линии связи равен нулю. Поэтому изменение сопротивления проводов не вызывает погрешности измерений. Однако погрешности от изменения сопротивления изоляции здесь не устраняются.

в) Логометрические системы

В логометрических системах значение измеряемой величины передается не абсолютным уровнем сигнала в линии связи, а определяется отношением двух токов (напряжений), передаваемых одновременно по нескольким проводам линии связи. На приемной стороне отношение этих токов (напряжений) измеряется логометром.

Рассмотрим схему токовой логометрической системы, приведенную на рис. 10-2, в. На передающей стороне в качестве преобразователя используется потенциометр R , движок которого соченен с подвижной частью датчика D . За начальное положение принято среднее положение движка потенциометра, причем отклонение движка в одну сторону от середины будем считать положительным, а в другую — отрицательным. Источник постоянного напряжения U включен последовательно со средним проводом линии связи.

В исходном состоянии, когда измеряемая величина равна нулю, движок потенциометра находится в среднем положении ($r=0$) и токи I_1 и I_2 , протекающие в рамках логометра, равны

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{\frac{R}{2} + R_{\text{п}}} ,$$

где $R_{\text{п}}=r_b+r_{\text{п}}+2r_{\text{л}}$ — полное сопротивление цепи (r_b — балластное сопротивление; $r_{\text{п}}$ — сопротивление рамки логометра; $r_{\text{л}}$ — сопротивление одного провода линии связи).

Подвижная часть датчика при повороте ее на угол α , пропорциональный измеряемой величине, перемещает движок потенциометра R . В этом случае токи I_1 и I_2 в рамках логометра изменятся

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{п}} + \frac{R}{2} - r} ;$$

$$I_3 = \frac{U}{R_{\Pi} + \frac{R}{2} + r},$$

где r -- сопротивление части потенциометра при отклонении движка от середины.

Отношение токов

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{\Pi} + \frac{R}{2} + r}{R_{\Pi} + \frac{R}{2} - r}$$

будет определяться сопротивлением r , которое зависит от положения движка потенциометра R и, следовательно, от значения измеряемой величины.

По условию работы логометра угол поворота β его стрелки определяется функцией;

$$\beta = f(I_1/I_2),$$

т. е. показания логометра пропорциональны значению измеряемой величины.

Следует отметить, что отношение токов I_1 и I_2 является сложной функцией от r , поэтому шкала логометра будет нелинейной.

Недостатком данной системы является необходимость в трехпроводной линии связи, поэтому подобные системы применяются лишь для передачи значений измеряемой величины на небольшие расстояния, чаще всего в пределах предприятия или объекта.

10-4. ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В импульсных системах переносчиком сигнала является серия импульсов. Информация об измеряемой величине наносится на нее при помощи различных видов импульсной модуляции. В зависимости от используемого вида модуляции импульсные системы делятся на *частотно-импульсные, время-импульсные и кодоимпульсные или цифровые*.

В импульсных системах изменение параметров линии связи существенно не сказывается на результатах телеметрического измерения и дальность передачи данных зависит лишь от мощности сигнала и чувствительности приемника.

а) Частотно-импульсные системы

В частотно-импульсных системах в зависимости от значения измеряемой величины изменяется частота передаваемых импульсов. На рис. 10-3 показан принцип частотно-импульсной модуляции. Измеряемая величина x изменяется по синусоидальному закону. При увеличении мгновенного значения x частота импульсов тока увеличивается, при уменьшении x уменьшается.

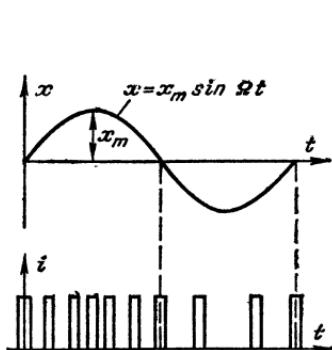


Рис. 10-3. Частотно-импульсная модуляция.

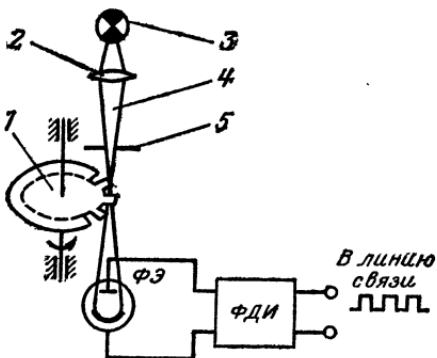


Рис. 10-4. Схема фотоэлектрического бесконтактного прерывателя.

В существующих частотно-импульсных системах преимущественно используются импульсы постоянного тока низкой частоты, не более 30 Гц. Применение импульсов низкой частоты позволяет увеличить их длительность и значительно сузить передаваемую полосу частот, что особенно важно при многократном использовании линии связи.

Существует два способа получения импульсного частотно-модулированного сигнала телеметрии. При первом способе измеряемая величина преобразуется во вспомогательный механический параметр, например в частоту вращения, а последняя — частоту следования импульсов. При втором способе измеряемая величина вначале преобразуется во вспомогательный электрический параметр (постоянный ток или напряжение), а затем при помощи генераторов импульсов получают серию импульсов, частота которых пропорциональна этому параметру (току или напряжению).

В качестве примера рассмотрим схему фотоэлектрического бесконтактного прерывателя (рис. 10-4), осуществляющего преобразование измеряемой величины в импульсный частотно-модулированный сигнал первым способом.

Измеряемая величина x воздействует на диск 1 и изменяет его частоту вращения. По краю диска 1 выполнены прямоугольные вырезы. Луч света 4 от осветительной лампы 3 проходит через линзу 2, диафрагму 5 и попадает через вырезы в диске 1 на фотоэлемент $\Phi\mathcal{E}$. При вращении диска 1 луч света 4 периодически прерывается зубцами диска. Частота пульсаций светового потока будет определяться частотой вращения диска. Пульсирующий световой поток преобразуется фотоэлементом в импульсы тока.

Если обозначим число зубцов в диске через m , а частоту вращения через n , то частота следования импульсов

$$f = mn.$$

Так как частота вращения диска 1 пропорциональна измеряемой величине x , то

$$f \equiv mx.$$

Следует отметить, что вместе с изменением частоты следования импульсов при изменении частоты вращения диска изменяется и их длительность. Чтобы длительность импульсов не менялась, на выходе схемы стоит импульсный формирователь длительности импульсов ФДИ.

Приемные устройства частотно-импульсных систем по принципу действия являются частотомерами, измеряющими частоту импульсов тока в линии связи. Наиболее простым является так называемый конденсаторный частотомер, различные модификации которого широко применяются в телеметрических системах в настоящее время.

На рис. 10-5, а приведена схема простейшего релейно-конденсаторного частотомера. На вход реле P подается модулированная по частоте серия импульсов (рис. 10-5, б). При включении реле P приходящим импульсом контакт реле перебрасывается в положение 1, и конденсатор C_2 заряжается от источника постоянного стабилизированного напряжения U_0 через резистор R_1 и приемный измерительный прибор $ИП$. После прекращения

- импульса контакт реле P переключается в положение 2. В этом случае заряжается конденсатор C_1 через резистор R_1 и измерительный прибор $ИП$. Конденсатор C_2 в это время разряжается через резистор R_2 . Таким образом реле P своим контактом поочередно включает конденсаторы C_1 и C_2 на зарядку от источника U_0 и на разрядку через резисторы R_1 и R_2 . Один импульс, подаваемый на реле P , вызывает двукратное протекание тока через измерительный прибор $ИП$ (рис. 10-5, б).

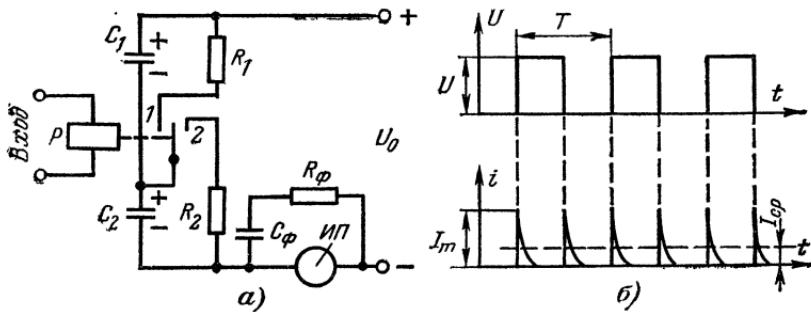


Рис. 10-5. Релейно-конденсаторный частотометр.

а — структурная схема; *б* — временные диаграммы.

Измерительный прибор $ИП$, в качестве которого обычно используется магнитоэлектрический миллиамперметр, фиксирует среднее значение импульсов тока

$$I_{ср} = 2CU_0f, \quad (10-2)$$

где $C = C_1 = C_2$ — емкость конденсаторов;

U_0 — напряжение источника питания;

f — частота приходящих импульсов.

Из выражения (10-2) следует, что средний ток $I_{ср}$, а значит, и показания прибора зависят от частоты f приходящих импульсов.

При низких частотах средний ток $I_{ср}$ очень мал и отсчет измеряемой величины будет затруднен сильными колебаниями стрелки прибора. Во избежание этого применяется сглаживающий фильтр, состоящий из конденсатора C_ϕ и резистора R_ϕ .

б) Время-импульсные системы

Во время-импульсных телеизмерительных системах в зависимости от значения измеряемой величины передаваемые импульсы изменяют либо свою длительность, либо свое местоположение относительно тактовых точек. В первом случае это достигается с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), во втором — фазоимпульсной модуляции (ФИМ).

Системы с широтно-импульсной модуляцией называются широтно-импульсными, а с фазоимпульсной модуляцией — фазоимпульсными системами. Ниже рассматриваются широтно-импульсные телеизмерительные системы.

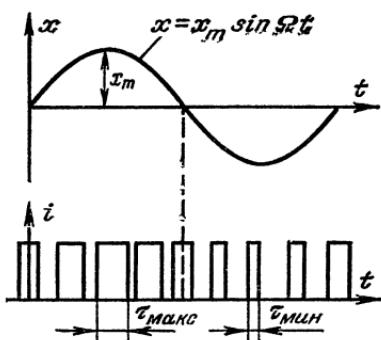


Рис. 10-6. Широтно-импульсная модуляция.

закону. При увеличении мгновенного значения x длительность импульсов увеличивается, а при уменьшении x — уменьшается. Частота и амплитуда импульсов не изменяются.

В передающих устройствах преобразование измеряемой величины в широтно-импульсный сигнал осуществляется различными способами.

На рис. 10-7, а приведена структурная схема преобразователя, основанная на принципе динамической компенсации.

Сущность метода динамической компенсации заключается в сравнении параметра (в данном случае напряжения), изменяющегося пропорционально значению измеряемой величины, с параметром (напряжением), изменяющимся по линейному закону. Момент равенства этих параметров (напряжений) фиксируется узлом сравнения.

Схема состоит из генератора тактовых импульсов ГТИ, триггера T , генератора пилообразного напряжения ГПН и узла сравнения НО (нуль-органа).

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 10-7, б.

Под воздействием тактовых импульсов, вырабатываемых генератором тактовых импульсов ГТИ, запускаются генератор пилообразного напряжения ГПН и триггер T , который изменяет свое состояние. Снимаемое с выхода ГПН пилообразное напряжение u_1 (рис. 10-7, б) поступает на один из входов узла сравнения НО. На другой

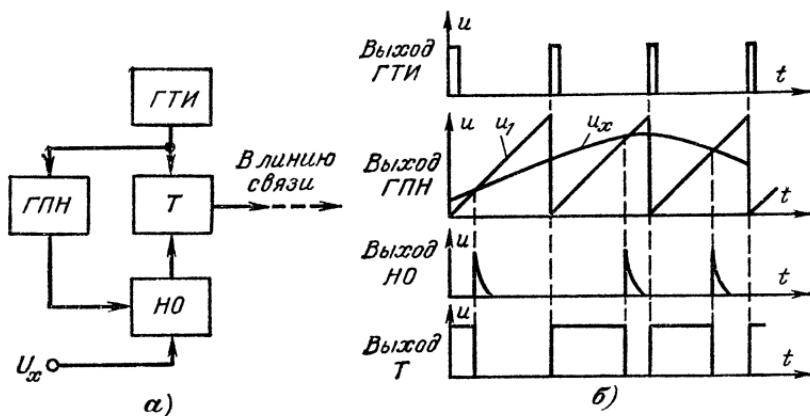


Рис. 10-7. Преобразователь напряжения постоянного тока, основанный на принципе динамической компенсации.

а — структурная схема; б — временные диаграммы.

вход НО подается пропорционально значению измеряемой величины напряжение u_x . В момент равенства напряжений u_x и u_1 узел сравнения НО выдает импульс, который восстанавливает первоначальное состояние триггера T . Прямоугольные импульсы, снимаемые триггера T , подаются в линию связи. Из рис. 10-7, б видно, что длительность импульсов, вырабатываемых триггером, пропорциональна значению измеряемой величины.

Приемники широтно-импульсных систем по принципу действия являются измерителями длительности импульсов. Они делятся на две группы: электромеханические и электрические. К первой относятся различного рода самопищащие приборы, записывающие на ленточной диаграмме форму импульсов; секундомеры, включающиеся и выключающиеся импульсами тока, поступающими по линии связи, и электромеханические устройства. Подоб-

ные устройства применяются для измерения больших длительностей — от одной до нескольких десятков секунд.

В электрических приемниках осуществляется преобразование длительности импульсов в напряжение или ток,

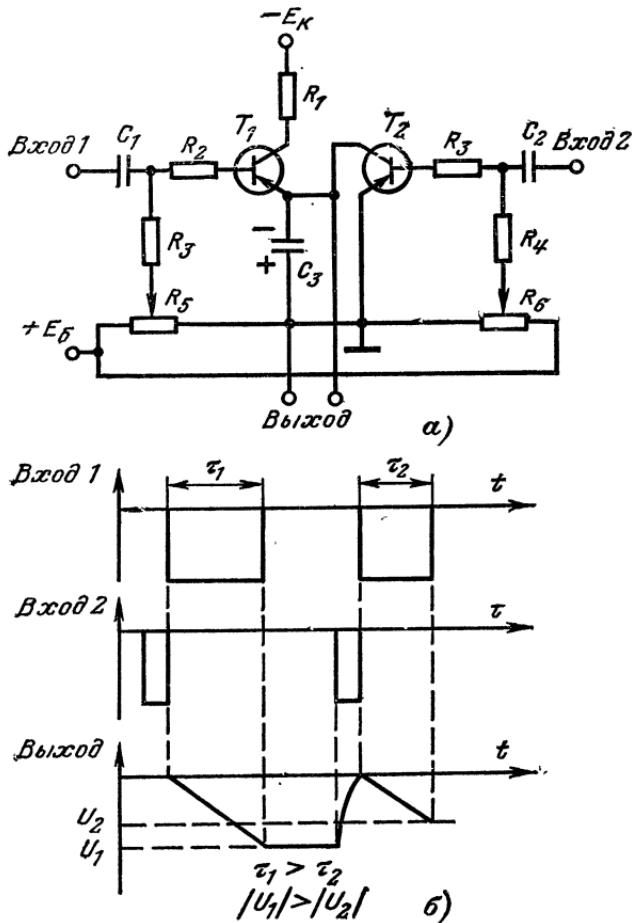


Рис. 10-8. Конденсаторный преобразователь длительности импульса в напряжение постоянного тока.

a — принципиальная схема; *б* — временные диаграммы.

которые измеряются магнитоэлектрическими приборами. Такие устройства используются для измерения кратковременных импульсов — от нескольких миллисекунд и меньше.

Наиболее совершенными являются конденсаторные преобразователи длительности импульсов в напряжение постоянного тока. Упрощенная схема такого преобразователя приведена на рис. 10-8, а. Для работы этого преобразователя необходимо, чтобы кроме импульсов, несущих информацию и подводимых к зажиму *Вход 1*, имелись опорные импульсы, предшествующие информационным и подводимые к зажиму *Вход 2*.

В исходном состоянии транзисторы T_1 и T_2 закрыты положительным напряжением, подаваемым на их базы с потенциометров R_5 и R_6 . Конденсатор памяти C_3 разряжен. С приходом на *Вход 1* отрицательного информационного импульса последний открывает транзистор T_1 и конденсатор памяти C_3 заряжается от источника постоянного напряжения E_k по цепи: корпус, C_3 , транзистор T_1 , R_1 , $-E_k$, причем используется лишь начальный участок экспоненты. Напряжение, до которого заряжается конденсатор памяти C_3 , пропорционально длительности информационного импульса (рис. 10-8, б). Это напряжение снимается с выхода схемы и измеряется магнитоэлектрическим прибором или регистрируется светолучевым осциллографом. Перед приходом следующего информационного импульса на *Вход 2* поступает отрицательный опорный импульс, который через дифференцирующую цепочку C_2 , R_4 подается на базу транзистора T_2 . Транзистор T_2 открывается и конденсатор памяти C_3 разряжается через него. Таким образом, опорный импульс приводит схему в исходное состояние.

в) Кодоимпульсные системы

В кодоимпульсных системах измеряемая величина передается в виде кодоимпульсного сигнала, представляющего собой определенную комбинацию импульсов (код).

Кодоимпульсный сигнал получается путем кодоимпульсной модуляции, принцип которой показан на рис. 10-9.

Измеряемая величина $x(t)$, являющаяся непрерывной функцией времени, квантуется по уровню и по времени, т. е. представляется в виде ступенчатой функции $x'(t)$. Каждая ступенька функции $x'(t)$ соответствует определенному уровню, который передается соответствующей кодовой комбинацией в определенный момент времени. В большинстве случаев в телеметрических системах применяются двоичные или двоично-десятичные коды

(см. § 9-8). Если, например, для передачи значений функций $x'(t)$ используется обычный двоичный код, то ступенька, соответствующая уровню 3, передается комбинацией 011 в момент времени t_0 , следующая ступенька, соответствующая уровню 4, — комбинацией 100 в момент времени t_1 и т. д.

Измеряемая величина обычно представлена в виде механического перемещения (углового или линейного)

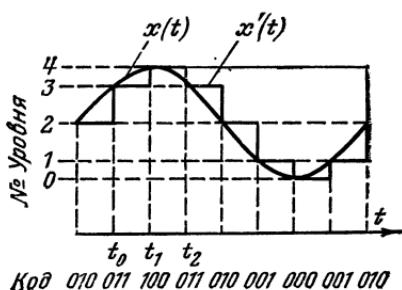


Рис. 10-9. Кодоимпульсная модуляция.

или электрической величины. Поэтому передающее устройство кодоимпульсной системы телеизмерения содержит преобразователь измеряемой величины в код, дополненный необходимыми элементами для передачи кода в канал связи. Эти преобразователи осуществляют преобразование непрерывной измеряемой величины в цифровой эквивалент — код и называются *аналого-цифровыми*. Работа подобных преобразователей была рассмотрена в гл. 6.

В приемных устройствах кодоимпульсных систем осуществляется обратное преобразование — восстановление измеряемой величины, которая была передана серией кодовых комбинаций. В качестве преобразующих устройств используются *цифро-аналоговые* преобразователи.

Рассмотрим схему пятиразрядного преобразователя кода в напряжение, выполненную в виде декодирующей сетки из резисторов (рис. 10-10). Работа схемы основана на принципе суммирования токов. Схема состоит из источников тока I_1 — I_5 и последовательно соединенных резисторов R , $2R$, $4R$, $8R$, сопротивления которых выбраны так, что обеспечивают двоичный закон выходного напряжения при последовательном замыкании ключей K_0 — K_4 .

Все источники тока дают одинаковые токи I и имеют бесконечно большое внутреннее сопротивление. Это значит, что при параллельной работе они не влияют друг на друга и полностью развязаны между собой. Напряжение $U_{\text{ых}}$ представляет собой суммарное падение на-

пряжения на цепочке резисторов. Перед преобразованием последовательный цифровой код, которым представлена измеряемая величина, записывается в регистр и в нужный момент с триггеров регистра снимаются напряжения, управляющие ключами $K_0—K_4$.

Если, например, пятый разряд кода содержит единицу, то ключ K_4 замкнут и ток I источника 5 протекает по

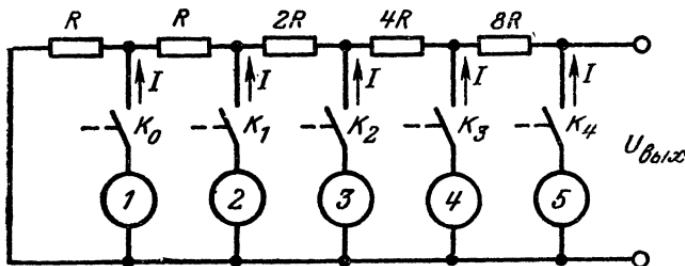


Рис. 10-10. Схема преобразователя кода в напряжение.

всем сопротивлениям схемы. Выходное напряжение в этом случае

$$U_{\text{вых}} = I(R + R + 2R + 4R + 8R) = IR2^4.$$

Если все разряды кода содержат единицы, то ключи $K_0—K_4$ замкнуты и на выходе возникнет максимальное напряжение

$$U_{\text{вых}} = IR(2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4).$$

Таким образом $U_{\text{вых}}$ будет пропорционально коду, в соответствии с которым замыкаются ключи $K_0—K_4$.

10-5. ЧАСТОТНЫЕ ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Принцип действия частотных телеметрических систем переменного тока основан на передаче значений измеряемой величины переменным током синусоидальной формы, частота которого зависит от значения измеряемой величины. На принимающей стороне частота сигнала измеряется частотомером, проградуированным в соответствующих единицах. Частотно-модулированные колебания обладают высокой помехоустойчивостью, и измене-

ние параметров линии связи не искажает частоты передаваемого сигнала, поэтому частотные системы могут осуществлять передачу на большие расстояния.

Частотные телеметрические системы обычно классифицируют по используемому диапазону частот. Различают низкочастотные системы, работающие в подтональном диапазоне (0 — 300 Гц), и системы работающие в диапазоне тональных и высоких частот ($f > 300$ Гц).

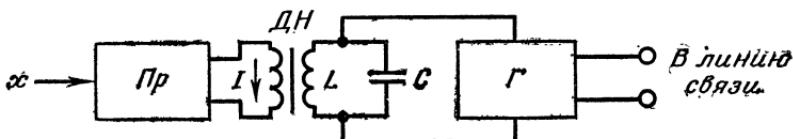


Рис. 10-11. Индуктивный преобразователь измеряемой величины в частоту переменного тока.

Передающие устройства частотных систем содержат преобразователи измеряемой величины в частоту переменного тока. Основным элементом преобразователей является электронный генератор синусоидальных колебаний. В настоящее время широко применяются LC - и RC -генераторы. Частотная модуляция осуществляется путем изменения настройки генератора в зависимости от значения измеряемой величины. В LC -генераторах настроенным элементом служит либо емкость, либо индуктивность колебательного контура. Настройка RC -генераторов осуществляется изменением емкости или активного сопротивления.

Следует отметить, что механическое перемещение элемента настройки генератора создает нежелательную нагрузку на датчик или первичный измерительный прибор, поэтому стремятся управлять частотой генератора электрическим способом. На рис. 10-11 приведена схема преобразователя, в которой управление частотой генератора Γ осуществляется постоянным током. В качестве индуктивности контура LC -генератора используется дроссель насыщения $ДН$ с насыщенным стальным сердечником. Измеряемая величина x преобразуется в первичном преобразователе $Пр$ в постоянный ток I , который пропускается по обмотке управления дросселя $ДН$. Известно, что индуктивность дросселя с насыщенным сердечником уменьшается при подмагничивании сердечника

постоянным током. Таким образом, при изменении тока I в зависимости от изменения измеряемой величины x будет меняться индуктивность контура, а следовательно, и частота колебаний.

Приемники частотных систем по принципу действия являются частотомерами. В настоящее время известны два типа приемников: *аналоговые* (непрерывные) и *цифровые* (дискретные).

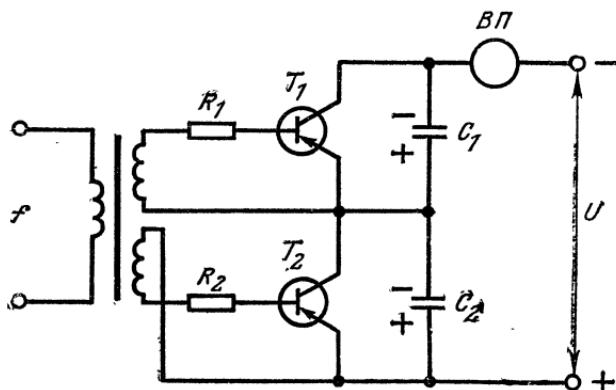


Рис. 10-12. Схема конденсаторного преобразователя частоты.

Большинство аналоговых приемников основано на преобразовании частоты в постоянный ток (или напряжение) и измерении тока (или напряжения) магнитоэлектрическим прибором. На рис. 10-12 приведена схема конденсаторного преобразователя частоты в постоянный ток. По принципу действия эта схема аналогична схеме релейно-конденсаторного частотомера (см. рис. 10-5, а). Транзисторы T_1 и T_2 поочередно открываются напряжением измеряемой частоты. Например, если транзистор T_1 открыт, то транзистор T_2 заперт. В этом случае конденсатор C_1 разряжается через транзистор T_1 , а конденсатор C_2 заряжается от источника постоянного напряжения U через транзистор T_1 и выходной прибор $ВП$. В следующий полупериод происходит заряд конденсатора C_1 и разряд конденсатора C_2 . Через прибор $ВП$ дважды за период протекают импульсы зарядного тока. Если допустить, что конденсаторы C_1 и C_2 полностью заряжаются и разряжаются и $C_1 = C_2 = C$, то среднее значение тока

$$I_{cp} = 2CUf$$

пропорционально частоте f при условии, что напряжение источника питания U постоянно.

В цифровых приемниках цифровую форму отсчета получают путем добавления к аналоговому приемнику аналого-цифрового преобразователя или применения счетчиков, подсчитывающих число периодов измеряемой частоты f за определенный промежуток времени.

10-6. КАНАЛЫ СВЯЗИ

Каналом связи называется совокупность технических средств, обеспечивающих передачу сообщений по линии связи от одного источника одному приемнику. Следует подчеркнуть, что *канал связи* и *линия связи* — различные понятия. В образовании канала связи, помимо линии связи, участвуют приемо-передающая аппаратура телемеханики и устройства связи. С помощью различных технических средств на одной и той же линии связи можно получить несколько каналов связи.

В настоящее время в качестве линий связи используются проводные линии связи, линии электропередач и радиолинии. Если проводные линии связи используются только для передачи телемеханической информации, то они называются *физическими проводными линиями связи*. По физическим линиям организуется много каналов связи для передачи информации многим приемникам или от многих источников. Это осуществляется при помощи частотного и временного разделения сигналов, которые будут рассмотрены ниже.

Проводные линии связи делятся на *воздушные* и *кабельные*. Воздушные линии связи представляют собой металлические провода, подвешенные при помощи изоляторов и специальной арматуры на столбах.

Кабельные линии связи состоят из изолированных параллельных проводов, заключенных в общую влагозащитную оболочку, а иногда в броневые оковы. Кабели бывают подземные, подводные и воздушные.

Следует отметить, что физические проводные линии связи — это лучший вариант для организации каналов связи, по которым можно передавать телемеханические сообщения. Однако он дорог и поэтому прокладка самостоятельной линии связи на большие расстояния производится только в исключительных случаях. Как правило, для передачи телемеханической информации организуют-

ся каналы связи по так называемым занятым линиям, по которым передается информация связи (телеграфные и фототелеграфные сообщения, телефонная связь, радиовещание и т. д.). В этом случае для целей телемеханики предназначается телефонный или телеграфный канал, т. е. выделяется определенная полоса частот. Телефонный канал пропускает спектр частот от 300 до 2700—3400 Гц. Он может делиться в свою очередь на телеграфные каналы. Ширина полосы телеграфного канала, как правило, не превышает 140 Гц и вполне достаточна для передачи обычного телемеханического сообщения. При этом для передачи телемеханической информации используется хорошо налаженная аппаратура связи, т. е. происходит простая замена передаваемой информации. Вместо сообщений связи передаются телемеханические сообщения.

Иногда для образования каналов связи используют линии энергоснабжения, причем в связи с большим уровнем помех передача сигналов производится на частотах в диапазоне от 30—50 Гц до 300 кГц. Линии энергоснабжения, которые применяются для передачи телемеханических сигналов, делятся на высоковольтные линии электропередачи (ВЛ) и промышленные или распределительные силовые сети (РСС).

Каналы связи по ВЛ широко применяются для управления объектами в энергосистемах. В последнее время они начали использоваться для телеконтроля и управления местными электростанциями и другими установками в сельском хозяйстве.

Распределительные силовые сети используются в первую очередь там, где дополнительная прокладка проводных линий связи затруднительна и дорогостояща, например на шахтах, нефтепромыслах и т. д. Применение линий энергоснабжения для передачи телемеханической информации связано с некоторыми трудностями, главной из которых является использование дополнительной специальной аппаратуры, необходимой для присоединения к линиям, находящимся под высоким напряжением.

Радиолинии в настоящее время являются единственным средством телемеханической связи с подвижными объектами, такими как космические корабли, спутники, ракеты, самолеты, связь с которыми невозможна при помощи проводов. Однако при неудачном выборе диапазона частот надежность передачи информации по радиоли-

ниям резко уменьшается. В длинноволновом и коротковолновом диапазонах качество радиосвязи в значительной мере зависит от времени года и суток, метеорологических условий, состояния ионосферы и т. д. Более надежной оказывается радиосвязь на ультракоротких волнах (УКВ), поэтому для организации каналов связи используются ультракороткие волны в диапазоне от 30 МГц до 30 ГГц. Волны УКВ-диапазона в отличие от длинных и коротких волн распространяются только прямолинейно в пределах прямой геометрической видимости. При необходимости связи на большие расстояния (за пределами прямой видимости) применяются ретрансляционные станции или так называемые радиорелейные станции. Ряд таких станций, поочередно принимающих, усиливающих и передающих сигналы, образуют радиорелейную линию связи. При передаче информации по радиорелейным линиям связи также используются методы частотного и временного разделения сигналов, позволяющие обеспечить передачу большого числа сообщений.

10-7. СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕСИГНАЛИЗАЦИИ

Телеуправлением называется передача на расстояние сигналов, действующих на исполнительные органы управляемого объекта, а телесигнализацией — передача на расстояние сигналов о состоянии контролируемого объекта.

В системах ТУ—ТС с диспетчерского пункта на управляемый объект передаются команды управления, а с объекта на диспетчерский пункт приходят сигналы об исполнении команд, т. е. о том, что данный объект включился или выключился. Как правило, в системах ТУ—ТС с одного диспетчерского пункта осуществляется управление несколькими объектами, причем по одной линии связи производится передача многих сигналов. Поэтому избирание определенного объекта и независимая передача самих сообщений являются главными функциями системы, а способы их реализации определяют принципы ее построения.

Сущность избирания заключается в том, что с помощью посылки условного сигнала, присвоенного каждому объекту, осуществляется воздействие на определенную исполнительную цепь.

Независимая передача большого количества сообщений осуществляется с помощью различных методов *разделения сигналов*.

Разделение и избирание — понятия, близкие друг другу. Разделение и избирание предназначаются для признания сигналу таких отличных свойств, с помощью которых можно обеспечить передачу многих сигналов по одной линии связи и выбор данного объекта. Таким образом, можно считать, что разделение сигналов относится к линии связи, а избирание — к объекту.

В телемеханике наиболее часто используются три основных способа разделения сигналов: *схемный* (или *электрический*), *частотный* и *временной*.

При *схемном* (или *электрическом*) способе разделения для передачи каждого сигнала отводится своя электрическая цепь. Системы ТУ—ТС с подобным методом разделения сигналов называются *многопроводными системами ТУ—ТС*.

При *частотном* способе разделения сигналы передаются по одной электрической цепи и каждому сигналу присваивается своя частота.

Системы с таким способом разделения называются *частотными системами ТУ—ТС*.

В системах с *временным разделением* сигналы передаются последовательно во времени. Подобные системы называются *временными*.

Ниже рассматриваются упрощенные схемы этих систем.

а) Многопроводные системы ТУ — ТС

В многопроводных системах ТУ—ТС в отличие от устройств дистанционного управления для передачи информации используются сигналы, представляющие собой одиночные посылки с различными признаками (признаком посылки является амплитуда, полярность, длительность импульсов, частота и т. д.). Каждая одиночная посылка соответствует определенному объекту управления или сигнализации, а ее признак определяет содержание команды или сигнала (например, «Включить — отключить» или «Включено — отключено»). Использование таких сигналов требует для каждого объекта управления отдельного линейного провода.

Общее число проводов n определяется по формуле

$$n = \frac{N}{k},$$

где N — число передаваемых сигналов;

k — число используемых признаков посылок.

В подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с двухпозиционными объектами, которым передаются команды «Включить» или «Отключить», а с

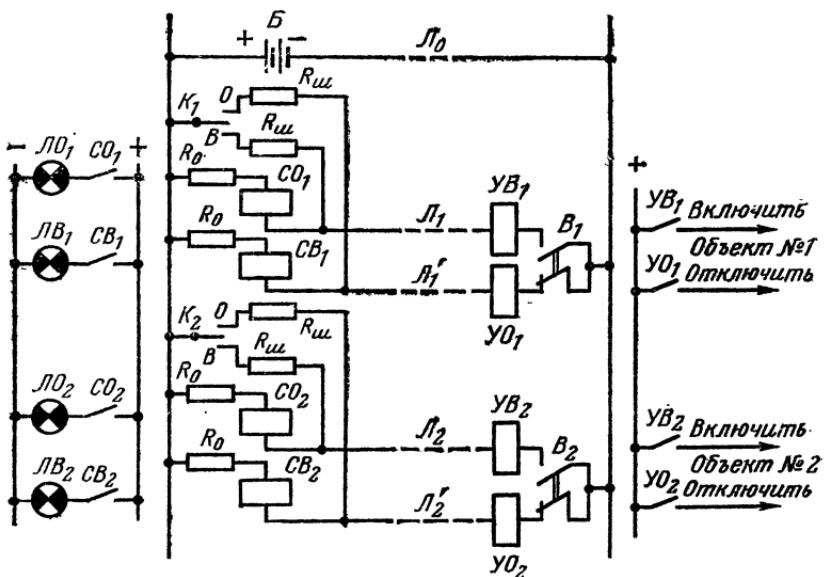


Рис. 10.13. Принципиальная схема многопроводной системы телепрограммирования и телесигнализации с амплитудным избиранием.

них поступают сигналы «Включено» или «Отключено». Для передачи таких команд и сигналов обычно используются посылки тока с различной полярностью или амплитудой ($k=2$). Общее число линейных проводов для каждого объекта будет равно двум без учета одного общего провода питания.

В качестве примера рассмотрим схему многопроводной системы ТУ—ТС, которая предназначена для управления на расстоянии электрическими выключателями (рис. 10-13). Управление каждым двухпозиционным объектом и сигнализация его состояния осуществляются по двум соединительным проводам. Провода L_1 и L_2 использу-

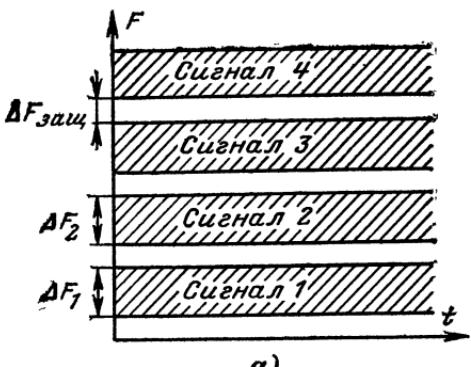
зуются для передачи на объекты № 1 и 2 команды управления «Включить» и команды сигнализации состояния «Отключено». Провода L'_1 и L'_2 используются для передачи команды «Отключить» и сигнализации состояния «Включено». Общий провод L_0 служит для соединения цепей контролируемых объектов с батареей B , установленной на диспетчерском пункте.

Разделение сигналов телеуправления и телесигнализации производится по амплитудному признаку: ток управления в несколько раз превосходит ток сигнализации.

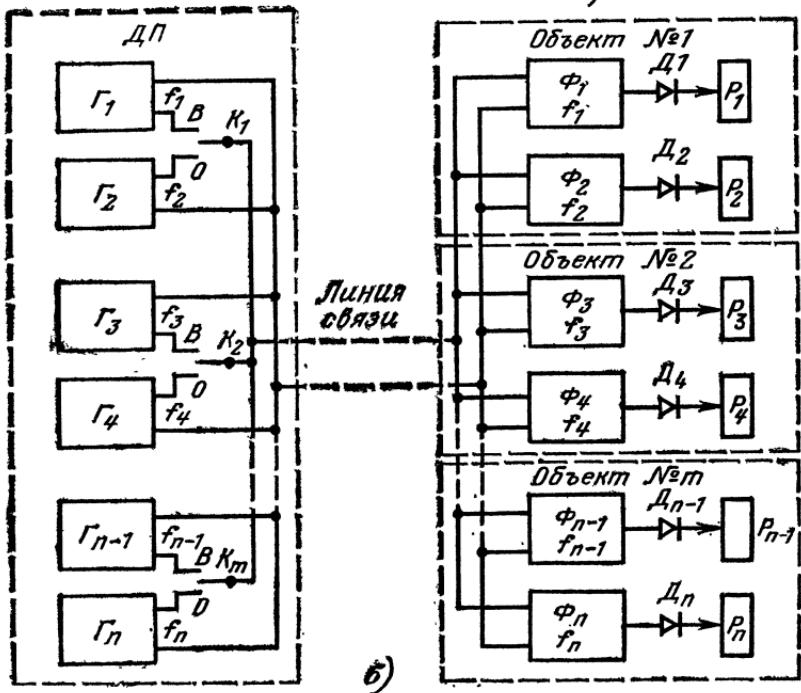
Управление объектами осуществляется с помощью ключей K_1 и K_2 . При посылке команды управления «Включить» ключи K_1 и K_2 ставятся в положение B . Команда «Отключить» посыпается при постановке ключей K_1 и K_2 в положение O . На объектах управления вспомогательные контакты B_1 и B_2 выключателей в зависимости от их положения замыкают одну из линейных цепей. При включенных выключателях контакты B_1 и B_2 замыкают нижние цепи (как показано на рис. 10-13), а при отключенных выключателях замкнуты верхние цепи.

Сигнализация положения объекта осуществляется током малой амплитуды. В данном случае (как показано на рис. 10-13) замкнуты цепи реле сигнализации CB_1 и CB_2 . В этих цепях за счет включения ограничительных сопротивлений R_0 протекает малый контрольный ток, который достаточен только для срабатывания реле сигнализации CB_1 и CB_2 . Реле управления отключением YO_1 и YO_2 при малом контрольном токе не срабатывают. Контакты реле сигнализации CB_1 и CB_2 замыкают цепи сигнальных лампочек LB_1 и LB_2 , которые сигнализируют о включении выключателей на объектах № 1 и 2.

Для отключения выключателей на объектах ключи K_1 и K_2 переводят в положение O . В этом случае ограничительные резисторы R_0 шунтируются резисторами $R_{ш}$ с малыми сопротивлениями. Общее сопротивление цепей уменьшается и ток в линейных цепях увеличивается в 2—3 раза. При таком большом токе срабатывают реле управления отключением YO_1 и YO_2 , которые замыкают своими контактами цепи управления приводами выключателей. Происходит изменение положения выключателей и их вспомогательные контакты B_1 и B_2 переключаются: цепи управления отключением разрываются и замыкаются цепи сигнализации, в результате чего сраба-



a)



б)

Рис. 10-14. Частотная система ТУ—ТС.

а — иллюстрация частотного способа разделения сигналов; *б* — структурная схема частотной системы ТУ—ТС.

тывают реле CO_1 и CO_2 , которые своими контактами замыкают цепи сигнальных лампочек LO_1 и LO_2 , сигнализирующих об отключении выключателей на объектах № 1 и 2.

б) Частотные системы ТУ — ТС

В частотных системах ТУ—ТС каждому сигналу, который подлежит передаче, выделяется своя полоса частот ΔF , т. е. каждый сигнал занимает конечный частотный интервал (рис. 10-14, а).

В качестве примера рассмотрим упрощенную схему частотной системы ТУ—ТС, в которой реализуется принцип независимых посылок (рис. 10-14, б).

На диспетчерском пункте ДП расположены генераторы $G_1—G_n$, которые генерируют синусоидальные колебания с частотами $f_1—f_n$.

Каждому двухпозиционному объекту присваиваются две частоты: одна для команды «Включить» (f_1, f_3, \dots, f_{n-1}), другая для команды «Отключить» (f_2, f_4, \dots, f_n). Управление осуществляется с помощью трехпозиционных ключей $K_1—K_m$. Положение B соответствует команде «Включить», положение O — команде «Отключить».

На объектах управления устанавливаются по два полосовых фильтра¹, пропускающих сигналы соответствующих частот, и два исполнительных реле для выполнения команд включения и отключения. Реле подключаются к фильтрам через детекторы².

В качестве полосовых фильтров используются электрические RC -фильтры. Практически невозможно выполнить фильтр с бесконечно узкой полосой пропускания, поэтому между полосами частот занимаемыми каждым сигналом, имеется защитный интервал $\Delta F_{\text{заш}}$ (рис. 10-14, а), чтобы не оказывалось влияние одного канала на другой.

Для передачи на объект № 1 команды «Включить» ключ K_1 нужно поставить в положение B . В этом случае к линии связи подключается генератор G_1 , который генерирует сигнал с частотой f_1 . Этот сигнал на приемной

¹ Полосовой фильтр — устройство, предназначенное для пропускания сигналов в определенной полосе частот.

² Детектор — устройство, предназначенное для выделения модулирующего сигнала. В данном случае детектор выделяет огибающую синусоидального колебания, проходящего через полосовой фильтр.

стороне пройдет только через фильтр Φ_1 и после выпрямления детектором D_1 включит реле P_1 , которое управляет исполнительным органом объекта № 1.

Для передачи команды «Отключить» необходимо ключ K_1 поставить в положение O . В этом случае на управляемом объекте № 1 сработает реле P_2 . Аналогично осуществляется управление другими объектами.

Частотное разделение сигналов, используемое в частотных системах ТУ—ТС, позволяет одновременно управлять всеми объектами. При этом в линии связи будет сложное колебание, из которого полосовыми фильтрами Φ_1 — Φ_n будут выделяться частоты, несущие определенные команды соответствующим объектам. Но для того чтобы получить обратную сигнализацию о выполнении команды или об изменении состояния объекта в рассмотренной системе, требуется наличие точно таких же устройств. При этом на каждом объекте управления устанавливаются по два генератора, а на диспетчерском пункте полосовые фильтры, детекторы и реле сигнализации. Это увеличивает число частот и элементов аппаратуры, поэтому для экономного использования полосы частот используют сложное кодирование передаваемого сигнала.

в) Временные системы ТУ — ТС

Во временных системах ТУ—ТС каждому сигналу, который должен быть передан, линия связи предоставляется поочередно: за промежуток времени t_1 передается сигнал 1, за промежуток времени t_2 — сигнал 2 и т. д. (рис. 10-15, а). Каждый сигнал занимает свой временной интервал, не занятый другими сигналами. Однако для передачи всех сигналов требуется одна и та же полоса частот. Время, которое отводится для передачи всех сигналов, называется циклом. Рассмотрим упрощенную схему временной системы ТУ—ТС, приведенную на рис. 10-15, б. В данной системе передающие и приемные узлы поочередно подключаются к линии связи с помощью синхронно и синфазно работающих коммутирующих устройств P_1 и P_2 , называемых распределителями. В системах ТУ—ТС в настоящее время применяются бесконтактные распределители, однако для более наглядного пояснения работы временной системы на рис. 10-15, б в качестве распределителей приведены шаговые искатели, ко-

торые иногда еще находят применение. Каждый искатель состоит из щетки Щ и четырех ламелей. Щетки на обоих искателях вращаются синхронно, т. е. с одинаковой угловой скоростью, делая одинаковое число оборотов в единицу времени и синфазно. Последнее означает, что если на диспетчерском пункте щетка замыкает ламель 1, то на приемной стороне также должна замыкаться ламель 1. Вращение щеток осуществляется специальными устройствами, которые на рисунке не показаны. К ламелям распределителя P_1 подсоединенны трехпозиционные ключи K_1 — K_4 .

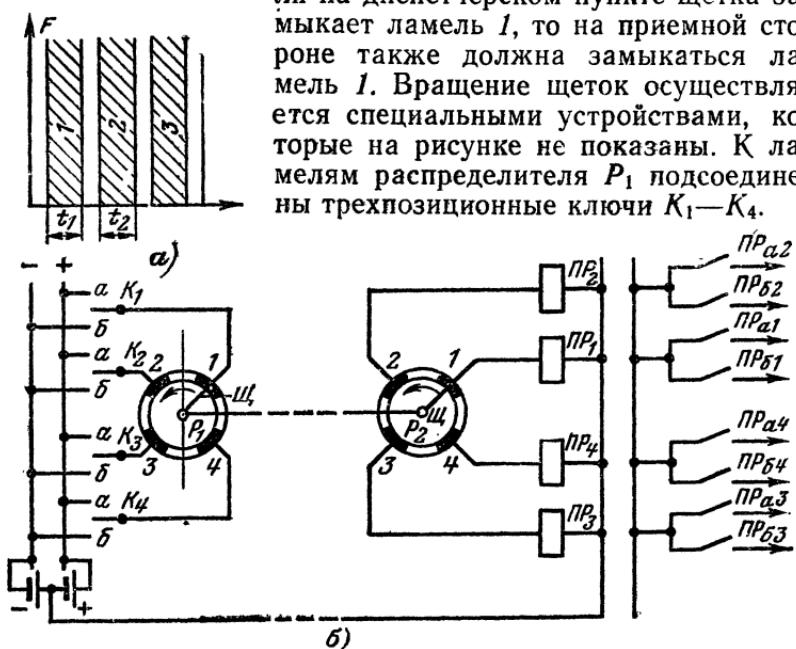


Рис. 10.15. Временная система ТУ-ТС.

a — иллюстрация временного способа разделения сигналов; *б* — структурная схема временной системы ТУ-ТС.

Положение ключей определяет знак напряжения, приложенного к соответствующей ламели распределителя P_1 . В положении *а* к ламелям распределителя P_1 подводится положительное напряжение, а в положении *б* — отрицательное напряжение. К ламелям приемного распределителя P_2 подключены обмотки поляризованных реле PR_1 — PR_4 . При синфазном вращении щеток распределителей P_1 и P_2 ключи K_1 — K_4 будут поочередно соединяться электрически с поляризованными реле, например ключ K_1 с реле PR_1 , ключ K_2 с реле PR_2 и т. д. При каждом переключении распределителей P_1 и P_2 в линию связи будет посыпаться импульс тока, полярность которого оп-

ределяется положением соответствующего ключа. В результате реле PR_1 — PR_4 будут переключать свои контакты в зависимости от положения ключей K_1 — K_4 . Например, при установке ключа K_1 в положение b сработает реле PR_1 и замкнет контакт PR_{61} . Таким образом передаются команды на объекты управления. Безошибочная передача команд возможна только при согласованной работе распределителей P_1 и P_2 . Синхронно-синфазное переключение распределителей может осуществляться различными методами, которые здесь не рассматриваются. Синхронно-синфазное переключение распределителей приводит к усложнению системы, а также к невозможности одновременной передачи информации всем объектам. Однако временные системы имеют то преимущество, что позволяют для передачи информации многим объектам использовать одну двухпроводную линию связи.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

П-1. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы помогают учащимся лучше усвоить пройденный теоретический материал, связать теорию с практикой, закрепить полученные знания, получить практические навыки по постановке и проведению экспериментов, а также по оформлению соответствующих отчетов. Правильная организация лабораторных занятий способствует быстрому и продуктивному проведению лабораторных работ.

Сознательное выполнение учащимися лабораторной работы невозможно без предварительной подготовки. Поэтому до сведения учащихся должен быть доведен график проведения лабораторных работ, который должен неукоснительно выполняться. Исходя из возрастных особенностей учащихся техникумов полезно на занятиях, предшествующих очередной лабораторной работе, выдавать им домашнее задание по подготовке к предстоящему лабораторному занятию.

При подготовке к выполнению лабораторной работы учащиеся повторяют соответствующий теоретический материал, а также подготавливают «скелет» отчета, который должен содержать:

1) титульный лист, заполняемый в соответствии с ГОСТ 2.105-68, разд. 4, ЕСКД — заполняются поля 1, 2, 4, 6 и 7;

поле 1: наименование министерства и техникума;

поле 2: наименование лаборатории;

поле 4: лабораторная работа № ... и ее название;

поле 6: в левой части — принял, преподаватель (фамилия),

дата; в правой части: выполнил (фамилия), группа, дата;

поле 7: год;

2) цель работы;

3) оборудование (заполняется по описанию лабораторной установки или оставляется свободное место для заполнения на рабочем месте в лаборатории);

4) домашние расчеты и соответствующие им графики, например расчет градуировочной характеристики термопары и ее график;

5) принципиальная или функциональная схема лабораторного макета или установки;

6) ход выполнения работы (кратко указывается пункт работы, заготавливаются таблицы, записываются расчетные формулы, оставляется место для расчетов, заготавливаются листы миллиметровой или специальной, например, логарифмической бумаги);

7) выводы (заполняются после обработки результатов эксперимента);

8) контрольные вопросы и ответы на них.

Перед допуском учащегося к рабочему месту качество подготовки к предстоящей лабораторной работе должно проверяться преподавателем путем беглого опроса с помощью программированных контрольных заданий. Можно для этого использовать и специальные устройства программированного контроля, например типа «Кактус» или др.

При проведении лабораторных занятий учебная группа обычно разбивается на две подгруппы, каждая из которых делится на бригады. Разбивка на бригады может производиться старостой подгруппы или преподавателем. В каждой бригаде следует назначать старшего (бригадира), под ответственность которого лаборантом выдается необходимая аппаратура, принадлежности, инструкции и т. д. Бригадир несет ответственность за порядок на рабочем месте и по окончании лабораторного занятия сдает рабочее место, а также все оборудование и документацию лаборанту.

На первом лабораторном занятии учащиеся должны быть ознакомлены с правилами поведения учащихся в лаборатории, правилами техники безопасности и спецификой работы на рабочих местах лаборатории, а также с требованиями, предъявляемыми к оформлению отчета о проделанной работе. Инструктаж по технике безопасности необходимо оформить личными подписями учащихся в специальном журнале.

Примечные правила поведения учащихся в лаборатории:

1) учащиеся, не подготовленные к работе, не допускаются к ее выполнению;

2) обязательным условием допуска учащегося к очередной работе является сдача им отчета по предыдущей работе;

3) учащиеся, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к лабораторным занятиям не допускаются;

4) опаздывать на занятия, самовольно занимать и покидать рабочее место, отлучаться из лаборатории без разрешения преподавателя нельзя;

5) включение питания к исследуемой схеме разрешается только после проверки схемы лаборантом или преподавателем;

6) перед включением питания все реостаты в схеме должны быть полностью введены, потенциометры — выведены, а многопредельные измерительные приборы включены на максимальные пределы измерения;

7) включив питание, учащиеся должны удостовериться, что стрелки всех измерительных приборов отклоняются в нужную сторону;

8) все переключения в исследуемой схеме и вспомогательных цепях производятся только после отключения питания;

9) при наличии любых неисправностей в исследуемой схеме или в используемой аппаратуре необходимо отключить питание и доложить лаборанту или преподавателю;

10) учащиеся несут материальную ответственность за произошедшую по их вине порчу лабораторного оборудования;

11) после выполнения каждого пункта задания полученные результаты необходимо показать преподавателю для проверки;

12) разборка лабораторной установки разрешается только по указанию преподавателя или лаборанта;

13) после выполнения лабораторной работы учащиеся оформляют отчет и сдают его для проверки;

14) учащийся, пропустивший плановое лабораторное занятие или не успевший закончить работу в срок, выполняет эту работу во внеурочное время.

Примерные правила техники безопасности (вывешиваются на видном месте):

1) запрещается прикасаться к токоведущим участкам схемы, зажимам, гнездам при включенном питании;

2) все переключения в схемах производить только при выключенном питании;

3) вся аппаратура, используемая на рабочем месте, должна быть надежно заземлена;

4) при обнаружении любой неисправности необходимо отключить питание и доложить лаборанту или преподавателю;

5) наличие напряжения на участках схемы проверять только с помощью специальных индикаторов;

6) доступ к узлам лабораторной установки, расположенным в корпусе или защищенном кожухе, возможен только с разрешения преподавателя или лаборанта и при выключенном питании;

7) запрещается касаться движущихся частей установки;

8) запрещается пользоваться приборами и оборудованием, не подлежащими применению в выполняемой работе, и переносить приборы с одного рабочего места на другое;

9) разбирать схему разрешается только после выключения питания.

После выполнения лабораторной работы учащийся обязан составить отчет с анализом полученных результатов и ответами на контрольные вопросы, приводимые в описании лабораторной работы. Отчет должен содержать название и номер лабораторной работы, цель работы и ее краткое содержание, схему исследуемого устройства, перечень используемой аппаратуры, таблицы с результатами измерений и вычислений, формулы, по которым производились вычисления, и значения отдельных расчетных констант, графики, выводы и ответы на контрольные вопросы. Желательно для оформления отчетов по лабораторным работам иметь специальные бланки, облегчающие учащимся работу и оказывающие на них дисциплинирующее действие. Правильное оформление отчетов по лабораторным работам воспитывает у учащихся аккуратность, четкость мышления, последовательность изложения материала. Записи в отчетах должны выполняться четко и аккуратно чернилами или пастой без помарок. Оформление текста, таблиц, расчетов и графиков должно соответствовать требованиям ГОСТ ЕСКД. Графики вычерчиваются на специальной или миллиметровой бумаге формата 11. На ось координат обязательно надписываются откладываемые величины, указываются единицы их измерения и масштабы, а также наносятся масштабные деления. Кривые графиков следует проводить между экспериментально полученными точками усредненно, учитывая ожидаемые теоретические результаты. Отдельные точки в силу случайных или систематических погрешностей могут оказаться за пределами графика и их следует отбросить. В тех областях, где ход кривой монотонный, можно ограничиться небольшим количеством измерений, тогда как в областях точек перегиба или экстремумов количество измерений необходимо увеличить так, чтобы получить достоверный ход кривой. Часто для удобства сравнения результатов опыта на одних

сях координат строится несколько кривых, которые обязательно должны быть пронумерованы в соответствии с вариантами в таблицах измерения и расшифрованы в примечаниях к графикам. Можно разные кривые выполнять в различных цветах. Для снятия частотных характеристик в достаточно широком диапазоне частот следует пользоваться логарифмическим масштабом частоты.

Ниже приводится описание семи лабораторных работ по изучению элементов автоматики и одного практического занятия по ознакомлению с ЭВМ, предусмотренных программой. Ввиду того что в учебнике устройству и работе разных элементов уделяется большое внимание, в настоящей главе теоретические вопросы опускаются.

П-2. Л а б о р а т о р н а я р а б о т а № 1.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ДАТЧИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

В качестве датчика параметрического типа можно использовать потенциометрический датчик угловых или линейных перемещений (рис. П-1).

Ц е л ь р а б о т ы:

- 1) снятие статических характеристик потенциометрических датчиков различных типов;
- 2) определение статического и динамического коэффициентов передачи;
- 3) исследование влияния нагрузки на статические характеристики датчиков.

О писание л а б о р а т о р н о й у с т а н о в к и

Лабораторная установка может быть выполнена на двух проволочных реостатах (линейном Π_1 и круговом Π_2), выполняющих роль потенциометрических датчиков и установленных в прямоугольном

металлическом, деревянном или пластмассовом корпусе. В качестве потенциометра Π_2 можно использовать потенциометр марки ПД. Ручки для перемещения движков реостатов располагаются на лицевой панели установки и снабжаются соответствующими шкалами. Кроме того, на лицевой панели размещаются три переключателя-тумблера, один из которых T_1 служит для подключения питания либо к потенциометру Π_1 , либо к потенциометру Π_2 , второй T_2 — для соответствующего подключения к датчикам вольтметра V и нагрузки R_H , а третий T_3 позволяет отключить нагрузочный резистор и снять характеристику холостого хода датчика. Шкала вольтметра также располагается на лицевой панели установки. Сам

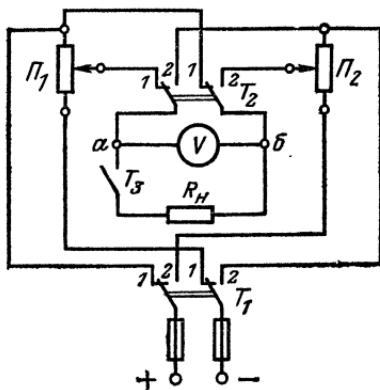


Рис. П-1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для снятия характеристик потенциометрических датчиков.

вольтметр и нагрузочный резистор устанавливаются внутри корпуса. Установка снабжается зажимами для подключения питания и плавкими предохранителями. Для измерения выходного сопротивления датчиков используется омметр или комбинированный прибор Ц-435.

П о р я д о к п р о в е д е н и я р а б о т ы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
2. Ознакомиться с правилами пользования омметром или прибором Ц-435.

3. Снять статические характеристики линейного потенциометрического датчика P_1 без нагрузки $r_x = f(l_x)$ и с нагрузкой $R_x = f(l_x)$, где r_x — выходное сопротивление ненагруженного датчика; R_x — выходное сопротивление нагруженного датчика; l_x — перемещение движка датчика. Выходное сопротивление датчика измеряется на зажимах $a-b$. Результаты измерений заносятся в табл. П-1.

По полученным данным построить графики (на общих осьх координат). Определить статический и динамический коэффициенты передачи.

Т а б л и ц а П-1

l_x , см	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
r_x , Ом											
R_x , Ом											

Примечание. Максимальное перемещение движка зависит от размеров датчика.

4. Снять статические характеристики кругового потенциометрического датчика P_2 без нагрузки $r_x = f(\alpha_x)$ и с нагрузкой $R_x = f(\alpha_x)$, где α_x — угол поворота движка датчика.

Результаты измерения заносятся в табл. П-2.

Т а б л и ц а П-2

α_x , град	15	30	45	60	75	90	...
r_x , Ом							
R_x , Ом							

Примечание. Максимальный угол поворота зависит от конструкции датчика и может быть различным.

- По полученным данным построить графики (на общих осьх координат) и определить статический и динамический коэффициенты передачи.

5. Определить максимальную абсолютную погрешность расчетом и сравнить с экспериментальной. Расчет погрешностей выполнить до-ма в процессе подготовки к лабораторному занятию. В кратких вы-водах о проделанной работе указать причины возникающей погреш-ности и перечислить способы ее уменьшения.

6. Подать питание на потенциометр P_1 и, манипулируя движ-ком P_1 и тумблером T_3 , снять характеристики $U_{\text{вых.х.х}} = f(l_x)$ и $U_{\text{вых}} = f(l_x)$, где $U_{\text{вых.х.х}}$ — напряжение ненагруженного датчика и $U_{\text{вых}}$ — напряжение датчика, нагруженного резистором R_n .

Результаты измерений занести в табл. П-3.

Т а б л и ц а П-3

l_x , см							
$U_{\text{вых.х.х}}$, В							
$U_{\text{вых}}$, В							

Построить характеристики и определить статический и динами-ческий коэффициенты передачи.

7. Подать тумблером T_1 питание на датчик P_2 и, манипулируя движком P_2 и тумблером T_3 , снять характеристики $U_{\text{вых.х.х}} = f(\alpha_x)$ и $U_{\text{вых}} = f(\alpha_x)$.

Результаты измерений занести в табл. П-4.

Т а б л и ц а П-4

α_x , град							
$U_{\text{вых.х.х}}$, В							
$U_{\text{вых}}$, В							

Построить характеристики и определить статический и динами-ческий коэффициенты передачи.

Контрольные вопросы:

1. Какие Вам известны разновидности конструкции потенциомет-рических датчиков?

2. Какие схемы включения потенциометрических датчиков ис-пользуются в автоматике?

3. Каковы достоинства и недостатки потенциометрических дат-чиков?

П-3. Л а б о р а т о р н а я р а б о т а № 2.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

В качестве термоэлектрического датчика может быть использована термопара, например ХК.

Цель работы:

- 1) нахождение зависимости термо-Э. д. с. от температуры горячего спая термопары (снятие статической характеристики термодатчика);
- 2) снятие кривой переходного процесса термодатчика;
- 3) определение коэффициента передачи и постоянной времени термодатчика.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка может быть выполнена в виде съемной лабораторной панели из стеклотекстолита. На панели укрепляется электронагревательный элемент ЭНЭ, в качестве которого может быть использован проволочный остеклованный трубчатый резистор типа ПЭ или ПЭВ. С помощью тумблера T к нему подключается питание. Внутренняя полость электронагревательного элемента используется для помещения исследуемой термопары $T_{\text{п}}$ и контрольного ртутного термометра на 200°C , которые укладываются на специальные кронштейны. Концы термопары выводятся на два нажима k_1 и k_2 , к которым подключается милливольтметр или компенсационный потенциометр ПП-63 для измерения термо-ЭДС термопары. Электрическая схема установки показана на рис. П-2.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.

2. Ознакомиться с правилами пользования компенсационным потенциометром ПП-63.

3. Снять статическую характеристику термопары $E_t = f(t^{\circ})$, где E_t — термо-ЭДС термопары, t° — температура ее горячего спая. Для этого вставить в полость электронагревательного элемента рабочий конец исследуемой термопары и контрольный термометр. Не включая питания, зафиксировать исходную температуру термопары и ее термо-ЭДС. Затем, включив тумблером T питание, нагревать рабочий конец термопары, фиксируя в отдельные моменты времени его температуру и соответствующую ей термо-ЭДС. Результаты измерений занести в табл. П-5.

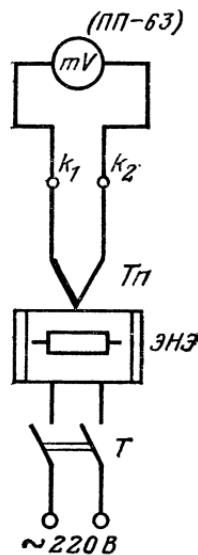


Рис. П-2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для снятия характеристики термопары.

Таблица П-5

$t, ^{\circ}\text{C}$	20	30	40	50	...	200
$E_t, \text{ мВ}$						

По полученным данным построить статическую характеристику термопары $E_t=f(t^0)$ и определить коэффициент передачи.

4. Снять кривую переходного процесса термопары. Для этого можно использовать вторую аналогичную термопару или воспользоваться первой, предварительно вынув ее из электронагревательного элемента и остудив до температуры окружающей среды ($+20^\circ\text{C}$). Доведя температуру электронагревательного элемента до некоторого уставновившегося значения (оно должно быть указано в описании лабораторной работы), вводят охлажденный рабочий конец исследуемой термопары в полость электронагревательного элемента, засекая этот момент по секундомеру, и через определенные равные промежутки времени фиксируют ее термо-ЭДС по показаниям компенсационного потенциометра. Опыт продолжается до тех пор, пока не прекратится рост термо-ЭДС. Результаты измерений заносятся в табл. П-6.

Т а б л и ц а П-6

$t, \text{ с}$	0	10	20	30	40	50	...
$E_{t_0} \text{ мВ}$							

По полученным данным построить график переходного процесса $E_t=f(t)$ и методом касательной определить постоянную времени термопары T .

Контрольные вопросы:

1. Объясните физическую сущность возникновения термо-ЭДС.
2. Перечислите основные материалы, используемые в современных термопарах.
3. Назовите наиболее распространенные марки отечественных термопар.
4. Перечислите основные достоинства и недостатки термопар.
5. Как уменьшается погрешность, возникающая за счет нестабильности температуры свободных концов термопары?

П-4. Л а б о р а т о р н а я р а б о т а № 3. С Н Я Т И Е С Т А Т И ЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В качестве исследуемого магнитного усилителя можно использовать дроссель насыщения с управляющими обмотками, обмотками постоянного подмагничивания (смещения), обмотками обратной связи и рабочими обмотками (переменного тока) или какой-либо типовой магнитный усилитель, например серии ТУМ.

Ц е л ь р а б о т ы:

- 1) ознакомиться с принципами действия дроссельного магнитного усилителя (однотактного);
- 2) снять статические характеристики однотактного дроссельного магнитного усилителя;
- 3) изучить влияние обратной связи и смещения на вид статической характеристики однотактного дроссельного магнитного усилителя;
- 4) определить коэффициенты усиления магнитного усилителя по напряжению, по току и по мощности.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из однотактного магнитного усилителя (дросселя насыщения) с управляющими обмотками w_y , обмотками смещения w_{cm} , обмотками обратной связи w_o и рабочими обмотками переменного тока w_p . С помощью этой установки можно исследовать однотактный магнитный усилитель, переходя от одного варианта схемы к другому путем несложных переключений обмоток. Для упрощения лабораторной установки исследуемый магнитный усилитель питается переменным током промышленной частоты 50 Гц от сети. Это позволяет выполнить сердечник исследуемого усилителя из обычной электротехнической стали. Для питания управляющих обмоток и обмоток смещения требуется источник постоянного тока U_0 напряжением 10—20 В. Для изменения тока в управляющих обмотках, а также для регулирования тока смещения используются лабораторные реостаты. В качестве нагрузочного резистора R_H используется постоянный проволочный осте-клаванный резистор ПЭ или ПЭВ. Для включения переменного напряжения используется выключатель T_1 , для включения и отключения обратной связи — переключатель T_2 , для включения управляющего напряжения — переключатель T_3 и для включения напряжения смещения — переключатель T_4 . Переключатели T_3 и T_4 позволяют изменять полярность напряжения. Лабораторная установка снабжена тремя миллиамперметрами: mA_1 , переменного тока для измерения тока нагрузки, mA_2 и mA_3 постоянного тока для измерения токов управляющей обмотки и обмотки смещения соответственно. Напряжение на нагрузочном резисторе контролируется вольтметром переменного напряжения V_1 , а напряжение на управляющей обмотке — вольтметром постоянного

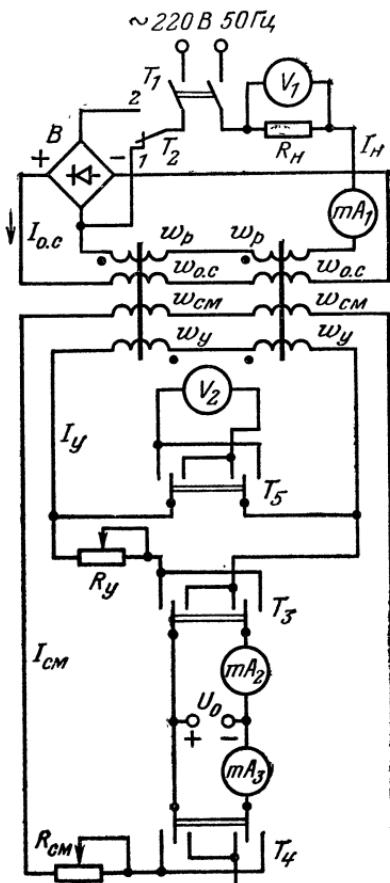


Рис. П-3. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для снятия характеристик магнитного усилителя.

напряжения V_2 , который для измерения напряжения разной полярности снабжается переключателем T_5 .

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать схему однотактного магнитного усилителя без обратной связи (переключатель T_2 в положении 1) и снять его статическую характеристику $I_h = f(I_y)$. Для этого после проверки схемы преподавателем или лаборантом включить переменное напряжение и замерить ток холостого хода. Затем включив постоянное напряжение на управляющую обмотку, постепенно уменьшать сопротивление реостата R_y в ее цепи, контролируя изменение тока управления I_y и тока нагрузки I_h с помощью миллиамперметров mA_2 и mA_1 . Сняв одну ветвь статической характеристики, отключить постоянное напряжение, ввести полностью сопротивление реостата R_y , переключить полярность управляющего напряжения и снять вторую ветвь статической характеристики. Результаты измерений занести в табл. П-7.

Таблица П-7							
I_y , мА				0			
I_h , мА							
Для положительных значений тока управления				Для отрицательных значений тока управления			

По полученным данным построить статическую характеристику исследуемого магнитного усилителя.

3. Снять статическую характеристику $I_h = f(I_y)$ однотактного магнитного усилителя с обратной связью. Для этого включить обратную связь, установив переключатель T_2 в положение 2 и повторить операции, описанные в п. 2 для прямой и обратной полярности управляющего напряжения. Результаты измерений занести в таблицу, выполненную по форме табл. П-7. По полученным данным построить статическую характеристику исследуемого магнитного усилителя.

4. Изучить влияние смещения на вид статической характеристики однотактного магнитного усилителя с обратной связью. Для этого к обмоткам смещения схемы подключить источник постоянного напряжения и, включив переменное напряжение, подобрать реостатом R_{cm} такой ток смещения, при котором ток холостого хода $I_{x,x}$ окажется минимальным. Значения токов I_{cm} и $I_{x,x}$ зафиксировать в табл. П-8. Затем повторить операции по снятию статической характеристики $I_h = f(I_y)$ магнитного усилителя, описанные в пп. 2 и 3. Результаты измерений занести в табл. П-8.

По данным таблицы построить статическую характеристику исследуемого магнитного усилителя.

5. Определить коэффициенты усиления каждой исследуемой схемы по напряжению, по току и мощности на прямолинейных участках каждой ветви статической характеристики.

Таблица П-8

 $I_{\text{cm}} = \dots = \text{const}; I_{\text{x.x}} = \dots$

I_y , мА					0			
I_h , мА								

Контрольные вопросы:

1. Каковы достоинства и недостатки однотактного магнитного усилителя без обратной связи?
2. Как влияет обратная связь на свойства однотактного магнитного усилителя?
3. Как влияет постоянное смещение на статическую характеристику однотактного магнитного усилителя?

П-5. Лабораторная работа № 4.**ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В качестве исследуемого реле можно использовать реле марки МКУ-48.

Цель работы:

- 1) ознакомиться с устройством и особенностями конструкции электромагнитного реле переменного тока МКУ-48;
- 2) определить основные параметры реле: мощность срабатывания P_c , ток срабатывания I_c , напряжение срабатывания U_c , ток отпускания $I_{\text{от}}$, напряжение отпускания $U_{\text{от}}$, а также установившееся значение I_y тока в обмотке реле при номинальном управляющем напряжении. Рассчитать значения коэффициента управления $k_y = P_y/P_c$ и коэффициента возврата $\lambda = I_{\text{от}}/I_c$ реле, взяв значения напряжения U_h и тока I_h , на которые рассчитаны контакты реле, из каталога. Расчет выполняется дома в процессе подготовки к лабораторному занятию;
- 3) оценить влияние фазосдвигающего устройства на поведение реле.

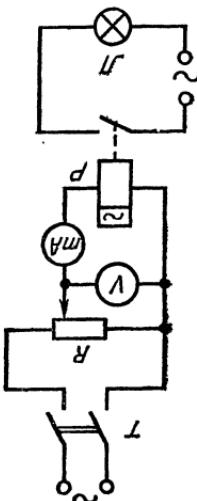


Рис. П-4. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для изучения электромагнитного реле переменного тока.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из реле P (рис. П-4) переменного тока типа МКУ-48, укрепленного на гетинаксовой панели, на которой установлен реостат R , вольтметр V , миллиамперметр mA и сигнальная лампочка L .

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Ознакомиться с устройством и особенностями конструкции реле переменного тока. Нарисовать эскиз конструкции исследуемого реле.

3. Определить основные параметры реле. Для этого тумблером T подключить к входным зажимам установки переменное напряжение, предварительно установив движок реостата R в крайнее левое положение. Медленно и плавно перемещая движок вправо, следить за изменением показаний вольтметра V и миллиамперметра mA и зафиксировать их показания U_c и I_c в момент срабатывания реле, о чем сигнализирует вспыхнувшая лампочка L . Продолжая перемещение движка реостата вправо, довести напряжение U_y до его номинального значения (из паспорта реле) и зафиксировать соответствующее ему значение установленного тока I_y в управляющей обмотке реле. Затем, перемещая движок в обратном направлении, добиться отпускания реле и зафиксировать соответствующие этому моменту значения тока и напряжения ($I_{\text{от}}$ и $U_{\text{от}}$). Результаты измерений и рассчитанные значения k_y и λ занести в табл. П-9.

Таблица П-9

Тип реле	Паспортные значения				Измеренные значения				Найденные значения		
	$U_{\text{н}} \cdot \text{В}$	$I_{\text{н}} \cdot \text{А}$	$P_y \cdot \text{Вт}$		$U_c \cdot \text{В}$	$I_c \cdot \text{мА}$	$I_y \cdot \text{мА}$	$U_{\text{от}} \cdot \text{В}$	$I_{\text{от}} \cdot \text{мА}$	k_y	λ

4. Оценить влияние фазосдвигающего устройства на поведение реле. Для этого отключить одну из обмоток или снять с сердечника реле короткозамкнутый виток и наблюдать работу реле, подав на него переменное управляющее напряжение номинального значения (в этом режиме не следует долго держать реле под напряжением).

Контрольные вопросы:

1. Как ведет себя реле постоянного тока при подаче на его обмотку переменного напряжения?
2. Каким образом устраняется вибрация якоря реле переменного тока?
3. Начертите векторную диаграмму токов, ЭДС и магнитных потоков реле переменного тока.

П-6. Лабораторная работа № 5.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО МОСТА

В качестве электронного автоматического моста может быть использован мост типа МСМР2-03.

Цель работы:

- 1) ознакомиться с принципом действия и устройством автоматического электронного моста;
- 2) провести исследование работы автоматического моста.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка может быть представлена в виде электронного автоматического моста типа МСМР2-03, сушильного шкафа СШ с терморезистором R_t и электронного осциллографа. Терморезистор соединяется с входными зажимами моста гибкими изолированными проводниками. Для градуировки автоматического моста

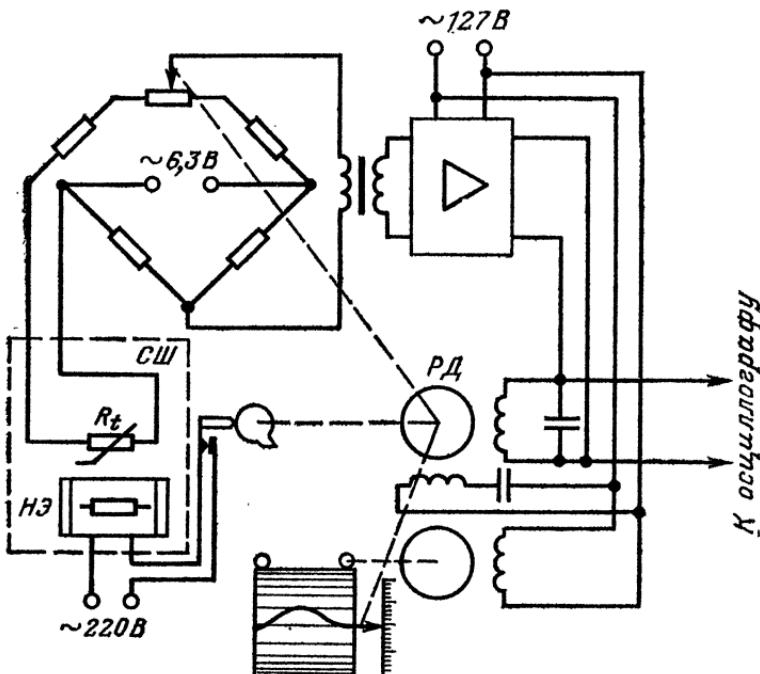


Рис. П-5. Упрощенная принципиальная электрическая схема лабораторной установки для изучения электронного автоматического моста.

необходим магазин сопротивлений, например, типа МСР. Упрощенная схема лабораторной установки показана на рис. П-5.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия электронного автоматического моста МСМР2-03. Открыть крышку моста и рассмотреть расположение его основных узлов.

2. Проградуировать мост. Для этого вместо терморезистора подключить к мосту магазин сопротивлений и, включив прибор, изменять сопротивление магазина от 53 до 88 Ом через каждые 5 Ом.

Таблица II-10

$R_{\text{маг}}$, Ом	53	58	63	68	73	78	83	88
Показания шкалы, °С								

занося в табл. II-10 значения установленного сопротивления магазина и показания шкалы прибора.

По полученным результатам построить градиуровочный график.

3. Подключить к вертикальным отклоняющим пластинам электронного осциллографа провода от управляющей обмотки балансирующего двигателя типа РД (рис. II-5), установленного в автоматическом мосте и, подав питание на мост и на осциллограф, убедиться в том, что при изменении сопротивления магазина от 60 до 70 Ом фаза управляющего сигнала отличается на 180° от фазы сигнала, соответствующего изменению сопротивления магазина от 70 до 80 Ом.

4. Заменить магазин сопротивления терморезистором R_t , установленным в сушильном шкафу, задать верхний предел регулируемой температуры и, включив прибор, убедиться в его работоспособности.

5. После того как температура в шкафу достигнет установленного предела $t_{\text{макс}}^0$, извлечь из шкафа терморезистор и дать ему остыть до температуры окружающей среды t_0 . При этом на диаграммной бумаге самописец автоматического моста запишет кривую изменения температуры терморезистора. Исходя из известной скорости протяжки диаграммной бумаги (180 мм/ч), определить по полученной кривой постоянную времени T терморезистора R_t , которая будет равна времени установления температуры до значения $t_{\text{макс}}^0 - 0,63$ ($t_{\text{макс}}^0 - t_0$ °).

Контрольные вопросы:

1. Каковы основные достоинства автоматических мостов?
2. Какие марки автоматических мостов отечественного производства Вам известны?
3. Какими основными свойствами должен обладать усилитель автоматического моста?
4. Почему терморезистор часто подключается в схему моста тремя проводами?

П-7. Лабораторная работа № 6.

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА СЕЛЬСИНАХ

В качестве датчика и приемника дистанционной передачи могут быть использованы контактные или бесконтактные сельсины с возбуждением от сети 50 Гц, 110 В, например БД-404А (датчик) и БС-404А (приемник).

Цель работы — ознакомиться с конструкцией сельсинов и определить основные характеристики индукционной самосинхронизирующейся дистанционной передачи.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из сельсина-датчика 3 и сельсина-приемника 5, установленных в корпусе 6 лабораторного макета (рис. П-6). На осях сельсинов закреплены дисковые шкалы 7 с делениями через каждые 10° , а на корпусе лабораторного макета

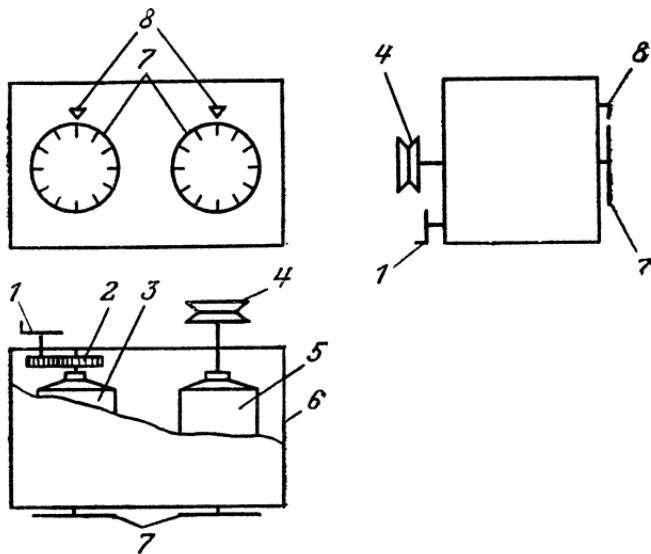


Рис. П-6. Оборудование лабораторной установки для изучения электрической дистанционной передачи на сельсинах.

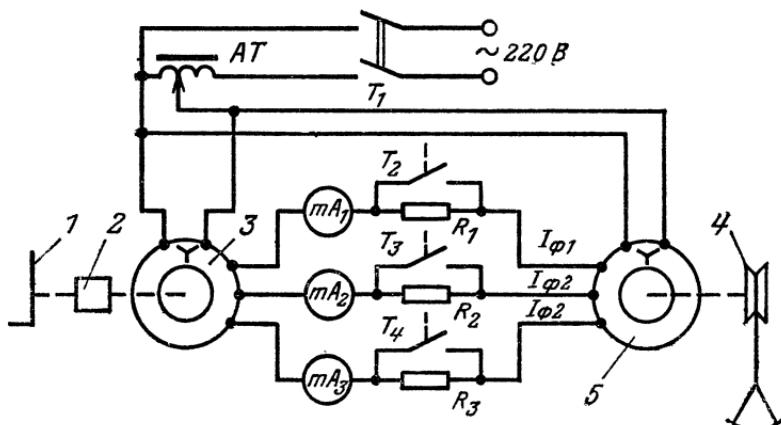


Рис. П-7. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для изучения электрической дистанционной передачи на сельсинах.

нанесены риски 8 для отсчета углов поворота шкал. Ротор сельсина-датчика механически соединен со штурвалом 1 через необратимую замедляющую передачу 2. На оси сельсина-приемника жестко закреплен шкив 4 с шнуром и чашкой для грузов, посредством которых создается требуемый нагрузочный момент.

Электрическая схема лабораторного макета показана на рис. П-7 (поз. 1—5 — те же, что и на рис. П-6).

Автотрансформатор АТ служит для понижения напряжения сети с 220 В до 110 В и для регулирования напряжения возбуждения U_B . При использовании для этого лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР или РНО на его верхней панели следует установить ограничитель, предотвращающий подачу на сельсины напряжения выше 110 В. Миллиамперметры $mA_1 - mA_3$ служат для контроля токов $I_{\Phi 1} - I_{\Phi 3}$ в фазах трехфазных обмоток сельсинов. Резисторы $R_1 - R_3$ служат для имитации удлинения линии связи между сельсинами. Они включаются или закорачиваются с помощью выключателей $T_2 - T_4$.

Порядок проведения работы

1. Познакомиться с лабораторным макетом и исследуемой схемой. Записать паспортные данные всех приборов и устройств, используемых в лабораторной работе.

2. Снять характеристику $M_c = f(\theta)$ при двух значениях напряжения возбуждения: $U_B = U_{B,\text{ном}} = 110$ В и $U_B = 0,9U_{B,\text{ном}} = 99$ В и для двух значений сопротивления линии связи: $R_L = R_{\min}$ (при закороченных резисторах $R_1 - R_3$) и $R_L = R_{\max}$ (при включенных резисторах $R_1 - R_3$). Для этого включить тумблером T_1 напряжение

Таблица П-11

Вращение по (против) часовой стрелки (по указанию преподавателя)						
θ	Измерено			Вычислено		
	$G, \text{ г}$		$M_c, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$U_B = 110 \text{ В}$		$U_B = 99 \text{ В}$
	$U_B = 110 \text{ В}$	$U_B = 99 \text{ В}$		$R_L = R_{\min}$	$R_L = R_{\max}$	
$R_L = R_{\min}$	$R_L = R_{\max}$	$R_L = R_{\min}$	$R_L = R_{\min}$	$R_L = R_{\max}$	$R_L = R_{\min}$	$R_L = R_{\min}$
0						
10°						
20°						
\dots						
90°						

возбуждения сельсинов и, обернув шнур вокруг шкива, нагружать чашку гирьками от разновесов, создавая момент на валу сельсина-приемника и отклоняя тем самым его ротор от согласованного положения в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$ приблизительно через 10° . Для каждого отклонения фиксировать показание шкалы сельсина-приемника. Результаты измерений занести в табл. П-11.

Значение синхронизирующего момента определяется как $M_c = Gr$, где G — масса груза с учетом массы чашки; r — радиус шкива.

По данным опыта построить графики $M_c = f(\theta)$ (три графика на общих осях координат).

3. Определить максимальную статическую погрешность системы. Для этого включить питание и, задавая ротору сельсина-датчика различные углы поворота α , фиксировать соответствующие им углы поворота β сельсина-приемника. Измерения производить при повороте как по часовой, так и против часовой стрелки в пределах одного оборота. Результаты измерений занести в табл. П-12.

Т а б л и ц а П-12

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
α	β	$\vec{\theta} = \alpha - \beta$	α	β	$\vec{\theta} = \alpha - \beta$

Максимальная статическая погрешность дистанционной передачи определяется из выражения

$$\theta_{\max} = \frac{|\vec{\theta}_{\max}| + |\vec{\theta}_{\max}|}{2},$$

где $\vec{\theta}_{\max}$ — максимальная погрешность при повороте по часовой стрелке;

$\vec{\theta}_{\max}$ — то же при повороте против часовой стрелки.

4. Снять характеристику $I_\Phi = f(\theta)$ при заторможенном роторе сельсина-приемника и изменении рассогласования θ в пределах от 0 до 360° . Для этого в чашку, подвешенную к шкиву сельсина-приемника, поместить максимальный груз, препятствующий повороту ротора сельсина-приемника. Включив питание, поворачивать ротор сельсина-датчика по часовой стрелке в пределах одного оборота, фиксируя через каждые 30° поворота показания миллиамперметров, включенных в цепи трехфазных обмоток сельсинов. Результаты измерений занести в табл. П-13.

Т а б л и ц а П-13

θ	I_{Φ_1}	I_{Φ_2}	I_{Φ_3}

По результатам опыта построить на общих осях координат графики $I_{\phi_1}=f(\theta)$; $I_{\phi_2}=f(\theta)$ и $I_{\phi_3}=f(\theta)$. При построении графиков учесть, что с переходом значения тока через нуль его фаза изменяется на 180° .

Контрольные вопросы:

1. Как влияют напряжение возбуждения сельсинов и расстояние между ними на значение синхронизирующего момента?
2. Как классифицируются сельсины-датчики и сельсины-приемники по точности?
3. Почему при рассогласовании между сельсинами, равном 180° , сельсин-приемник находится в неустойчивом равновесии?
4. Почему синхронизирующие моменты, возникающие в сельсины-датчике и сельсины-приемнике при наличии рассогласования, направлены встречно?

П-8. Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

В качестве исследуемой следящей системы может быть использована маломощная (приборная) одноканальная следящая система переменного тока с электронным усилителем на лампах или транзисторах, измерителем рассогласования на сельсинах и асинхронным двухфазным исполнительным двигателем.

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия следящей системы и усвоить приемы определения основных погрешностей следящих систем.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из одноканальной приборной следящей системы переменного тока, задающего устройства ЗУ, вольтметра V переменного тока и электронного осциллографа Осц. Упрощенная электрическая схема лабораторной установки показана на рис. П-8. В качестве имитатора задающего устройства удобно использовать механизм синусной заводки. Упрощенная схема электрического механизма синусной заводки показана на рис. П-9. При вращении управляющего двигателя 1 с постоянной скоростью амплитуда напряжения, снимаемого с однофазной обмотки вспомогательного сельсина 2 , будет изменяться по синусоидальному закону, вследствие чего на выходе фазочувствительного усилителя 3 возникает выпрямленное напряжение изменяющейся полярности, значение которого изменяется по синусоидальному закону. Частота этого напряжения пропорциональна частоте вращения управляющего двигателя, а амплитуда регулируется потенциометром 4 , включенными на выходе усилителя. Двигатель 5 , вал которого механически связан с ротором сельсина-датчика СД следящей системы, будет при этом вращаться с частотой, изменяющейся по синусоидальному закону (так называемая синусная заводка). Для задания сельсина-датчику постоянной частоты вращения следует остановить управляющий двигатель 1 . При этом с однофазной обмотки вспомогательного сельсина 2 будет на вход усилителя поступать переменное напряжение постоянной амплитуды, значение которой определяется угловым положением ротора вспомогательного сель-

сина. Таким образом, с помощью механизма синусной заводки можно задавать следящей системе различные законы движения входного вала, которые будут отрабатываться исполнительным двигателем ИД системы, поворачивающим через редуктор Ред нагрузку Н (рис. П-8).

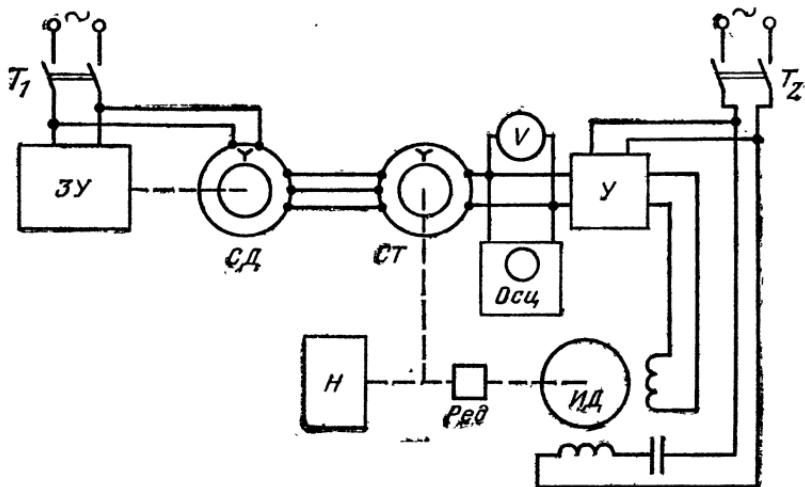


Рис. П-8. Упрощенная принципиальная электрическая схема лабораторной установки для изучения следящей системы.

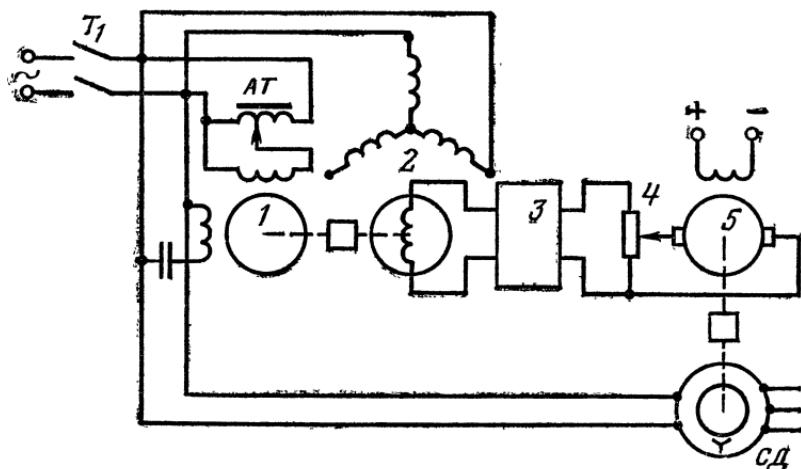


Рис. П-9. Упрощенная принципиальная электрическая схема электрического механизма синусной заводки.

Порядок проведения работы

1. Познакомиться с лабораторным макетом следящей системы, ее принципиальной электрической схемой, а также со схемой и устройством механизма синусной заводки.

2. Включить электронный осциллограф и соединить его вертикальный вход (вход y) с однофазной обмоткой сельсина-трансформатора CT следящей системы.

3. При выключенном питании следящей системы подать выключателем T_1 питание на механизм синусной заводки и проверить его работу в режиме различных постоянных скоростей, а также в режиме синусной заводки с различными значениями амплитуды и периода «качки», наблюдая за изменением сигнала ошибки на входе усилителя U следящей системы по экрану осциллографа. Период «качки» устанавливается движком автотрансформатора AT , а амплитуда — движком потенциометра 4 (рис. П-9).

4. Включить выключателем T_2 питание следящей системы и дать ей согласоваться с механизмом синусной заводки, наблюдая за изменением сигнала ошибки на экране осциллографа.

5. Измерить вольтметром напряжение U_θ на входе усилителя при согласованном положении системы и механизма синусной заводки. Зная передаточный коэффициент сельсина-приемника, определить статическую ошибку $\theta_{ст}$ следящей системы.

6. Включить механизм синусной заводки на постоянную частоту вращения Ω и наблюдать за отработкой этой частоты следящей системой. В процессе работы системы так отрегулировать усиление электронного осциллографа, чтобы амплитуда сигнала ошибки U_θ наблюдаемого на экране, укладывалась в одну клетку градуировочной сетки экрана. Замерив вольтметром значение сигнала ошибки, определить цену одной клетки градуировочной сетки. По значению сигнала ошибки определить значение динамической установившейся (скоростной) ошибки $\theta_{д.уст}$ следящей системы при заданной скорости слежения.

7. Остановив механизм синусной заводки, установить его на режим «качки» с заданными значениями ее амплитуды A и периода T . Включить механизм синусной заводки вместе со следящей системой на заданный режим и наблюдать на экране осциллографа за изменением сигнала ошибки. Зафиксировать максимальную амплитуду $U_{\theta_{\max}}$ сигнала ошибки по градуировочной сетке осциллографа и, зная цену одной клетки, определить значение максимума.

Таблица П-14

Согласованное положение		Движение с постоянной скоростью			Синусная заводка («качка»)			
Сигнал ошибки U_θ , В	Статическая ошибка $\theta_{ст}$, град	Угловая скорость Ω , град/с	Сигнал ошибки U_θ , В	Установившаяся динамическая ошибка $\theta_{д.уст}$, град	Амплитуда A , град	Период T , с	Сигнал ошибки $U_{\theta_{\max}}$, В	Максимальная динамическая ошибка $\theta_{д.макс}$, град

мальной динамической ошибки $\theta_{\text{д, макс}}$ при «качке». Обратить внимание на то, в какие моменты «качки» ошибка достигает максимума.

Результаты изменений занести в табл. П-14.

Контрольные вопросы:

1. В чем отличие приборных следящих систем от силовых?
2. Как классифицируются следящие системы по типу усилителя?
3. Что понимается под чувствительностью следящей системы и от чего она зависит?
4. Какие устройства и схемы можно использовать для измерения рассогласования в следящих системах?

П-9. Практическое занятие.

МАЛАЯ УНИВЕРСАЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА «НАИРИ-К»

Краткая техническая характеристика

Машина выполнена на полупроводниковых элементах и относится к классу стационарных цифровых ЭВМ дискретного действия малой производительности. Она предназначена для решения широкого круга математических задач, возникающих при экономических и инженерных расчетах, а также в процессе научных исследований. Ввод задач на языке, близком к обыкновенному математическому, и наличие автоматического программирования не требуют от оператора специальной подготовки по программированию. Машина «Найри-К» является двухадресной программно управляемой машиной с естественным порядком выполнения команд. Такая машина обладает возможностью ввода задач на обыкновенном математическом языке с использованием автоматического программирования, ее можно также использовать и в режиме настольной счетной машины. Форма представления чисел — с фиксированной запятой или с плавающей запятой. Система счисления двоичная.

Память машины состоит из оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) на ферритовых сердечниках и долговременного запоминающего устройства (ДЗУ) на оксиферах. Устройство управления машиной основано на принципе микропрограммирования. Арифметические операции производятся параллельным способом. Информация может вводиться с печатающего устройства или с перфорированной бумажной ленты с помощью трансмиттера в буквенно-цифровой двоично-кодированной системе. Вывод результатов производится на буквенно-цифровую печать или перфорацию в виде букв и десятичных чисел. Средняя скорость вычислений с фиксированной запятой для операций суммирования составляет 2—4 тыс. операций/с, а операций умножения — не менее 260 операций/с. При вычислениях с плавающей запятой скорость вычислений составляет не менее 600 операций/с. Температура в помещении, где установлена машина, не должна выходить за пределы 10—35° С.

Состав машины

Машина состоит из следующих основных частей (рис. П-10): главного шкафа 1, шкафа питания 2 и устройства ввода данных и вывода результатов, в состав которого входят шкаф 3, печатаю-

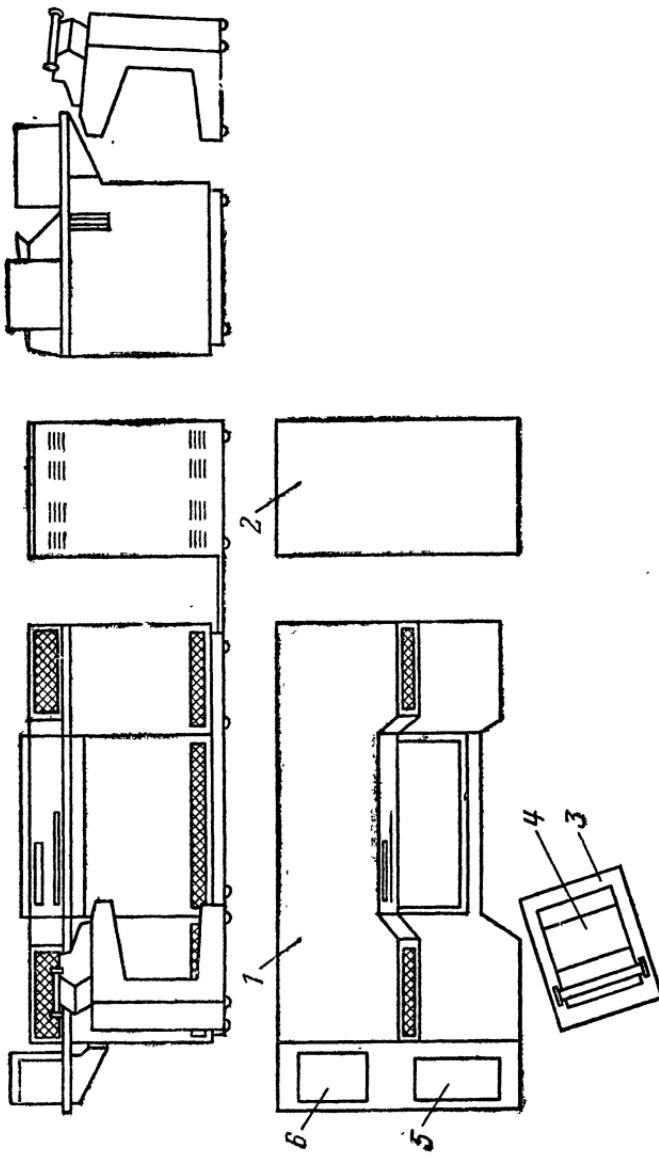


Рис. П-10. Внешний вид вычислительной машины «Найри-К».

щее устройство 4, считающее устройство (трансмиттер) 5 и перфоратор 6.

В главном шкафу сосредоточены следующие основные функциональные устройства машины: арифметическое устройство АУ, устройство управления УУ, оперативное запоминающее устройство ОЗУ, долговременное запоминающее устройство ДЗУ, пульт управления ПУ с панелями сигнализации и управления (рис. П-11).

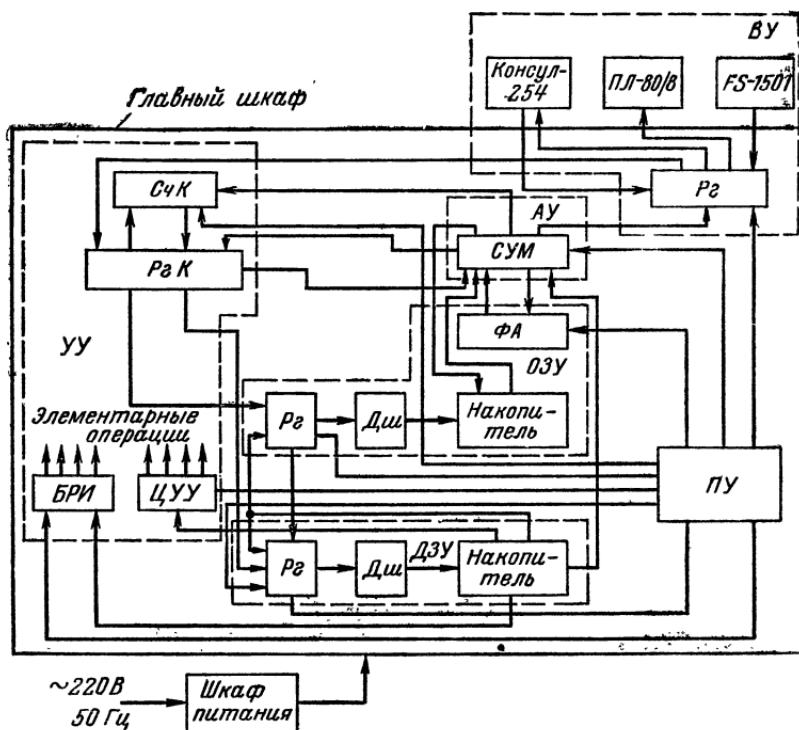


Рис. П-11. Компоновка и функциональные связи вычислительной машины «Наири-К».

Краткое описание основных устройств машины

Арифметическое устройство АУ машины параллельного типа со сквозным переносом выполняет арифметические и логические операции над числами и командами. Оно состоит из одного регистра-сумматора СУМ. Сумматор одновременно служит регистром числа как для оперативного, так и для долговременного запоминающих устройств. Между сумматором и фиксированными адресами ФА оперативного запоминающего устройства ОЗУ имеются двусторонние прямые передачи (чтение и запись). Сумматор 37-разрядный, причем 34 разряда объединены для представления

дробной части числа, 35-й разряд представляет собой целую часть числа, 36-й разряд отведен для знака числа, а один разряд является дополнительным. Все арифметические операции в сумматоре выполняются в режиме с фиксированной запятой. При операциях над числами с плавающей запятой 36-разрядные коды в сумматоре разбиваются на две части — мантиссу и порядок. Мантисса содержит 29 разрядов, два из которых представляют собой знак мантиссы, порядок же содержит семь разрядов, один из которых представляет собой знак порядка. Сумматор оперирует с мантиссой и порядком в режиме с фиксированной запятой.

Сумматор позволяет осуществлять сдвиги кода влево (*логический сдвиг*) и вправо (*арифметический сдвиг*). Дополнительный разряд сумматора предусмотрен для округления результата, для анализа множителя или делителя при операциях умножения и деления.

Устройство управления УУ предназначено для автоматического управления последовательностью операций в процессе решения задачи согласно заданной программе, для выработки управляющих сигналов, необходимых для автоматической работы машины, и, в частности, для обеспечения следующих этапов работы машины: автоматического ввода программы вычисления и исходных данных в машину; выборки команд и чисел из оперативной или долговременной памяти; непосредственного выполнения операций и записи результатов вычислений в ОЗУ; выдачи окончательных результатов из машины на печать или перфорацию; обеспечения возможности контроля и управления работой машины оператором.

Устройство управления состоит из следующих блоков:

14-разрядного счетчика команд *C4К*, указывающего адрес ячейки ОЗУ или ДЗУ, из которой необходимо выбрать очередную команду; он же выполняет функцию счетчика циклов при выполнении операций умножения, деления и др.;

36-разрядного регистра команд *РгК*, принимающего и хранящего команду во время ее выполнения (команда в зависимости от признаков может иметь семь разных модификаций);

центрального устройства управления ЦУУ, построенного по принципу микропрограммного управления. В качестве запоминающего устройства для хранения микропрограмм используется часть ДЗУ. Для хранения необходимого количества элементарных операций, а также адреса следующей микрокоманды в этой части ДЗУ, разрядность увеличена до 72. Импульсы «Чтение ДЗУ»рабатываются специальным задающим генератором.

Выполнение каждой новой операции начинается с выборки кода команды из ОЗУ или ДЗУ согласно номеру, записанному в *C4К*, затем производится расшифровка команды и выполнение соответствующей операции. Работу устройства управления, необходимую для выполнения одной операции, можно разделить на следующие пять этапов:

1) выборка кода команды из ДЗУ или ОЗУ в сумматор *AУ*, формирование и передача команды в *РгК*;

2) определение модификации выбранной команды и передача адреса или его содержимого в соответствующий фиксированный адрес ОЗУ;

3) анализ признака и при необходимости разделение содержимого адресов на две части — мантиссу и порядок с помощью блока разделения импульсов *БРИ*;

4) выполнение операции согласно ее коду;

5) запись результатов операции.

Оперативное запоминающее устройство ОЗУ матричного типа служит для записи, хранения и выдачи команд, различных вспомогательных данных, промежуточных и конечных результатов вычислений. Время обращения к ОЗУ составляет 24 мкс. Емкость ОЗУ равна 4096 36-разрядных чисел, в том числе 7 фиксированных адресов с непосредственным обращением к ним. Оперативное запоминающее устройство матричного типа, использующее для записи и чтения совпадающие по времени полутоки. Конструктивно магнитный куб ОЗУ собирается из 36 ферритовых матриц. Каждая матрица объединяет в себе разряд всех 4096 чисел и имеет по 64 координаты X и Y , одну обмотку считывания и одну обмотку запрета. Выборка адреса осуществляется с помощью трехступенчатого дешифратора $Dш$ X и Y на 64 выхода каждый. При чтении информации из какой-нибудь ячейки ОЗУ, кроме фиксированных $ФA$, содержимое данной ячейки стирается и автоматически регенерируется в регистре Rg . Чтение из фиксированных ячеек приводит к стиранию информации без автоматической регенерации.

Долговременное запоминающее устройство ДЗУ предназначено для хранения и выдачи команд различных вспомогательных данных и микропрограмм управления.

Время обращения к ДЗУ равно 20 мкс. Общая емкость ДЗУ составляет 16 384 числа. Из них первые 2048 чисел имеют 72 разряда и служат для хранения микропрограммы управления и констант, используемых в целях управления. Остальная часть служит для хранения различных подпрограмм, дешифрации исходной информации, автоматического программирования, решения различных стандартных задач и т. п. Эта часть ДЗУ имеет 36 разрядов.

Накопитель ДЗУ имеет 9 ячеек, выполненных в виде диодно-трансформаторных матриц. Матрица имеет 8 горизонтальных и 36 вертикальных рядов (по числу разрядов запоминаемых чисел). Информация в ячейку вводится с помощью прошивки кодов по разрядам и рядам. Провод прошивки, последовательно пронизывает или обходит сердечники всех рядов, начиная с нулевого, в зависимости от прошиваемого в данном разряде кода. Количество проводов прошивки доходит до 256. Таким образом емкость одной ячейки накопителя составляет 2048 адресов.

В части хранения микропрограммы управления удвоение разрядности достигается за счет параллельной работы двух ячеек накопителя ДЗУ. Считанная из ДЗУ информация записывается в регистр Rg .

Выбор адреса для чтения необходимой информации производится с помощью четырех дешифраторов $Dш$:

1) потенциального дешифратора выбора ячейки накопителя на 8 выходов;

2) потенциального дешифратора выбора провода на 16 выходов;

3) импульсного дешифратора выбора провода на 16 выходов;

4) потенциального дешифратора выбора ряда на 8 выходов.

Обращение к ДЗУ производится импульсами от центрального устройства управления ЦУУ.

Внешнее устройство ВУ предназначено для ввода информации в машину и вывода результатов вычислений. Оно состоит

из печатающего устройства «Консул-254», перфоратора ПЛ-80/8 и считывающего устройства с перфоленты типа FS-1501. Местное управление внешнего устройства содержит регистр внешнего устройства Р2, общий для всех аппаратов, в котором принимаются и хранятся коды при вводе и выводе информации, и схему управления, которая в зависимости от набранного на пульте режима обеспечивает работу соответствующего аппарата. Скорость печати составляет 8—10 знаков/с, скорость считывания с перфоленты до 100 знаков/с, скорость перфорации до 75 знаков/с.

Внешнее устройство при выборе соответствующего режима может работать независимо от машины и выполнять перфорацию с печатающего устройства с печатью, дублирование перфолент и печать с перфоленты.

Пульт управления ПУ состоит из двух панелей: панели сигнализации и панели управления.

Панель сигнализации предназначена для выбора необходимого режима машины при решении и отладке задачи и сигнализации состояния машины. На панели сигнализации расположены кнопки выбора режима работы машины и внешних устройств и их сигнализации, а также неоновые лампы сигнализации состояния триггеров различных регистров машины.

Панель управления предназначена для проверки и наладки машины, а также для проверки и регулировки уровней питающих напряжений. На панели управления расположены клавиши для набора кода и различные регистры машины, клавиши остановки по адресу, а также клавиши набора наладочных режимов работы машины и ряда элементарных операций. Там же находятся кнопки управления, позволяющие принимать любые коды в различные регистры машины, а также гасить их. На панели управления находятся переключатель и резисторы для регулировки частоты генератора, переменные резисторы для регулировки уровней питания, вольтметр для измерения напряжений и переключатели для подключения измеряемого напряжения к вольтметру.

Конструкция машины

Главный шкаф машины выполнен в виде письменного стола, что позволяет оператору сидя выполнять все необходимые операции с машиной, работу с печатающим устройством, необходимые регистрацию и отметки в журналах и др.

Перед оператором находится наклонная панель сигнализации, а под подвижной крышкой, образующей в закрытом положении рабочую панель-стол, расположена панель управления. Панель управления можно поворачивать вокруг горизонтальной оси, что делает возможным доступ к любой ее части. Обе панели съемные. Со схемой машины они соединяются шестью штепсельными разъемами, что позволяет производить их монтаж и проверку отдельно от главного шкафа. На обеих панелях применены однотипные клавишные группы.

Главный шкаф имеет три отсека. В левом отсеке расположен накопитель ОЗУ, который можно выкатывать по направляющим на длину жгутов проводов.

При необходимости накопитель можно отделить от главного шкафа, разъединяя разъемы, что дает возможность производить индивидуальную наладку.

Накопитель ОЗУ состоит из блока памяти, корпуса для 66 ячеек, двух панелей с конденсаторами фильтра питания и панели с разъемами, установленных на раме накопителя. Блок памяти собран из 36 ферритовых и двух ложных матриц, расположенных по бокам основных. На блоке матриц на ось устанавливаются дешифраторные платы, выполненные печатным монтажом.

Корпус накопителя состоит из трех панелей. На каждой панели в ряд размещено по 22 разъема, куда вставляются 36 ячеек токо-вого ключа ТК-2, 18 ячеек усилителя считывания и 8 ячеек линии задержки. По бокам и наверху корпуса установлены платы с навесными элементами.

В правом отсеке главного шкафа в нижней части находится 9 ячеек накопителя ДЗУ размерами 400×480×40 мм. Ячейки выполнены на плоских широких рамках из прессматериала, имеющих на конце панель с тремя 30-контактными вилками. С левой стороны блок ячеек закрыт панелью с двумя ручками для съема.

Блоки ячеек главного шкафа расположены в три ряда. В первых двух рядах в средней части корпуса размещены 24 блока (по 12 в каждом ряду), а в третьем ряду слева — 6 блоков. Для установки каждого блока ячеек в каркас вмонтировано по две направляющих сверху и снизу. Блоки ячеек вставляются сзади машины. Предусмотрена возможность вывода их на удлинители, чем обеспечивается доступ ко всем точкам коммутирующих плат ячеек. Блоки ячеек можно фиксировать затягиванием винта на задних панелях, что обеспечивает надежную транспортировку главного шкафа без снятия этих блоков.

Блоки ячеек машины являются основными звенями как для монтажа в них радиодеталей, так и для осуществления схем машины. Они состоят из каркаса-рамки и имеют заднюю и переднюю панели. На задних панелях смонтировано по два 38-контактных разъема, а на передних установлено по 20 гнезд для вывода контрольных точек.

Каркас главного шкафа закрывается съемными щитами как с передней, так и с задней стороны и тремя крышками сверху. После их снятия открывается доступ к любой части машины.

В нижней части машины под блоками ячеек расположены вентиляторы для циркуляции воздуха. Для этой же цели установлены сетки и жалюзи на съемных щитах и крышках.

Шкаф питания представляет собой каркас, сваренный из уголков. В нем размещено 12 блоков питания. На каркасе смонтированы направляющие для блоков питания. С передней и задней стороны шкаф питания имеет съемные щиты с сетками и жалюзи для вентиляции. На задней стороне смонтированы панели с разъемами, в которые входят разъемы блоков. Нагнетание воздуха создается вентиляторами, расположенными снизу, а отсос теплого воздуха осуществляется двумя вентиляторами, расположенными сверху с задней стороны. Электрическая связь шкафа питания с главным шкафом осуществляется жгутами через три разъема. Подключение к сети осуществляется шнуром со штепсельной вилкой. Для заземления в нижней части шкафа имеется медная шина сечением 30×1 мм.

В состав внешнего устройства входят: печатающее устройство «Консул-254», восьмидорожечный перфоратор ПЛ-80/8,читывающее устройство FS-1501 и шкаф, соединяющийся с машиной жгутами с разъемами.

Задания к практическому занятию

I. Ознакомиться с техническими характеристиками машины «Наири-К».

Контрольные вопросы:

1. К какому классу ЭВМ относится машина «Наири-К»?
2. Каково назначение машины «Наири-К»?
3. Какова форма представления чисел в машине «Наири-К»?
4. На каких элементах выполнена память машины?
5. Каким способом выполняются арифметические операции в машине?
6. Как вводятся данные в машину?
7. Как выводятся результаты вычислений из машины?
8. Какова скорость выполнения математических операций в машине «Наири-К»?
9. Каковы условия эксплуатации машины?

II. Ознакомиться с компоновкой и конструкцией машины «Наири-К» (рис. П-10).

Контрольные вопросы:

1. Из каких основных частей состоит машина «Наири-К»?
2. Что входит в состав главного шкафа машины и его отдельных отсеков?
3. Что входит в состав устройства ввода данных и вывода результатов?

III. Ознакомиться с функциональной схемой машины (рис. П-11).

Контрольные вопросы:

1. Что представляет собой арифметическое устройство машины?
2. Какие функции выполняет устройство управления?
3. Из каких основных блоков состоит управляющее устройство?
4. Из каких основных этапов состоит работа управляющего устройства?
5. Каковы назначение и основные характеристики оперативного ЗУ?
6. Каковы назначение и основные характеристики долговременного ЗУ?
7. Какие блоки участвуют в операции выбора адреса для чтения необходимой информации?
8. Каково назначение внешнего устройства и из каких блоков оно состоит?
9. Из чего состоит пульт управления?
10. Каково назначение панели сигнализации?
11. Каково назначение панели управления?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. А. Автоматические показывающие, самопищащие и регулирующие приборы. Л., «Машиностроение», 1973. 288 с.
2. Андреев Ф.-Ф. Электронные устройства автоматики и их расчет. М., «Машиностроение», 1971. 350 с.
3. Анисимов Б. В., Голубкин В. Н. Аналоговые вычислительные машины М., «Высшая школа», 1971. 447 с.
4. Анисимов Б. В., Четвериков В. Н. Основы теории и проектирования цифровых вычислительных машин. Изд. 2-е, испр. и доп. М., «Машиностроение», 1965. 483 с.
5. Аранович Б. И., Шамрай Б. В. Электромагнитные устройства автоматики. М., «Энергия», 1965. 484 с.
6. Арменский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические микромашины. М., «Высшая школа», 1968. 213 с.
7. Моделирование на аналоговых вычислительных машинах. Л., «Энергия», 1972. 208 с. Авт.: Е. А. Архангельский, А. А. Знаменский, Ю. А. Лукомский, Э. П. Чернышев.
8. Асташкин Н. Н., Вальденберг Ю. С., Генис Я. Г. Вычислительная техника для управления производственными процессами (Справочник). М., «Энергия», 1971. 479 с.
9. Аттура Г. Магнитные усилители. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 288 с.
10. Башта Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М., «Машиностроение», 1972. 320 с.
11. Бесекерский В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М., «Наука», 1970. 575 с.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Лекции и упражнения. Ч. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960. 368 с.
13. Общая электротехника. Под ред. А. Т. Блажкина. М.—Л., «Энергия», 1964. 656 с.
14. Большая Советская Энциклопедия. Т. 6. Изд. 3-е. М., «Советская энциклопедия», 1971. 624 с.
15. Большая Советская Энциклопедия. Т. 14. Изд. 2-е. М., «Советская энциклопедия», 1952. 656 с.
16. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. М., «Высшая школа», 1971. 430 с.
17. Основы автоматического управления. М., Воениздат. Авт.: Г. И. Ванюрихин, А. Н. Герасимов, С. В. Лучко, Л. Ф. Порфириев.
18. Васильев Д. В., Митрофанов Б. А., Рабкин Г. Л. Проектирование и расчет следящих систем. Л., «Судостроение», 1964. 607 с.
19. Вершинин Н. И., Верцайзер А. Л., Яковлев В. М. Автоматическое регулирование. М.—Л., «Энергия», 1965. 136 с.
20. Основные технические и эксплуатационные характеристики аналоговых вычислительных машин. Справочное пособие. Под ред. И. М. Виттенберга, М., «Машиностроение», 1972. 300 с.

21. Воробьева Т. М. Электромагнитные муфты. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960. 207 с.
22. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. М., «Наука», 1968. 416 с.
23. Основные понятия автоматики. Терминология. Вып. 71. М., «Наука», 1966. 20 с.
24. Гавриленко Б. А., Минин В. А., Рождественский С. Н. Гидравлический привод. М., «Машиностроение», 1968. 503 с.
25. Гинзбург С. А., Лехтман И. Я., Малов В. С. Основы автоматики и телемеханики. М., «Энергия», 1968. 512 с.
26. Грубов В. И., Кирдан В. С. Электронные вычислительные машины и моделирующие устройства. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1969. 184 с.
27. ГОСТ 3044-61. Термопары. Градуировочные таблицы при температуре свободных концов 0°С. М., Изд-во стандартов, 1970. 10 с.
28. Счетно-решающие устройства. М., «Машиностроение», 1966. 498 с. Авт.: С. О. Доброгурский, В. А. Казаков, Л. А. Соломонов, В. К. Титов.
29. Дроздов Е. А., Прохоров В. И., Пятибратьев А. П. Основы вычислительной техники. М., Воениздат, 1961. 425 с.
30. Дунаевский С. Я., Крылов О. А., Мазия Л. В. Моделирование элементов электромеханических систем. М., «Энергия», 1971. 287 с.
31. Дусавицкий Ю. Я. Магнитные стабилизаторы постоянного напряжения. М., «Энергия», 1970. 88 с.
32. ГОСТ 2.721-68 — ГОСТ 2.748-68, ГОСТ 2.750-68, ГОСТ 2.751-68. Единая система конструкторской документации, обозначения условные графические в схемах. М., Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1969. 304 с.
33. Ермолин Н. П. Расчет трансформаторов малой мощности. Л., «Энергия», 1969. 190 с.
34. Ермолин Н. П. Электрические машины. М., «Высшая школа», 1975. 295 с.
35. Жданов Л. С., Мааранджян В. А. Курс физики. Ч. 2 М., «Наука», 1970. 608 с.
36. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М., «Наука», 1969. 507 с.
37. Зубков В. П., Скосырев И. С. Новые устройства в системах автоматики. Л., ЛДНТП, 1969. 32 с.
38. Иванов А. А. Теория автоматического управления и регулирования. М., «Недра», 1970. 352 с.
39. Иванчук Б. Н., Липман Р. А., Рувинов Б. Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. М., «Энергия», 1968. 112 с.
40. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. М., «Машиностроение», 1973. 606 с.
41. Ильин В. А. Телемеханика и ее применение в народном хозяйстве. М., «Наука», 1965. 149 с.
42. Ильин В. А. Телеконтроль и телеуправление рассредоточенными объектами. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 311 с.
43. Каган Б. М., Каневский М. М. Цифровые вычислительные машины и системы. М., «Энергия», 1974. 678 с.
44. Квартин М. И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчет. М., «Высшая школа», 1973. 344 с.
45. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их

применение для исследования систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1959. 492 с.

46. Колосов С. П., Калмыков И. В., Нефедова В. И. Элементы автоматики. М., «Машиностроение», 1970. 392 с.

47. Коломейцева М. Б., Кулаков Л. Н., Пушкарев С. М. Программные регуляторы индукционного нагрева. М., «Энергия», 1972. 57 с.

48. Константиновский М. И. Малогабаритные аналоговые вычислители. М., «Энергия», 1966. 239 с.

49. Комар М. А. Основы электропривода и аппаратуры управления. М., «Энергия», 1968. 342 с.

50. Китов А. И., Криницкий Н. А. Электронные цифровые машины и программирование. Изд. 2-е, стереотипное. М., Физматгиз, 1961. 572 с.

51. Клюев А. С. Автоматическое регулирование. М., «Энергия», 1967. 344 с.

52. Крутов В. И., Спорыш И. П., Юношев В. Д. Основы теории автоматического регулирования. М., «Машиностроение», 1969. 359 с.

53. Купершmidt Я. А., Малов В. С., Пшеничников А. М. Современные телемеханические системы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 88 с.

54. Куропаткин П. В. Теория автоматического управления. М., «Высшая школа», 1973. 528 с.

55. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М., «Наука», 1973. 736 с.

56. Литвинов А. П., Моржаков С. П., Фабрикант Е. А. Основы автоматики. М., «Машиностроение». 1967. 272 с.

57. Элементы автоматики. Сборник лабораторных работ Под ред. Н. С. Львова. М., МВТУ, 1959. Вып. 4. 124 с.

58. Майзель М. М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами. М., «Высшая школа», 1972. 464 с.

59. Малинин Р. М. Питание радиоаппаратуры от электросети. М., «Энергия», 1970. 119 с.

60. Мельников В. И., Сурков А. Н. Теория автоматического регулирования и системы автоматики. М., «Машиностроение», 1972. 352 с.

61. Миловзоров В. П. Электромагнитная техника. М., «Высшая школа», 1966. 472 с.

62. Мочалов В. Д. Магнитные интегрирующие схемы вычислительной техники и автоматики. М., «Энергия», 1968. 104 с.

63. Телемеханика. М., «Высшая школа», 1967. 424 с. Авт.: В. М. Новицкий, Е. И. Гольдштейн, Е. Л. Собакин, Л. В. Траут.

64. Носова Ф. А., Пятаков В. В. Методические указания к проведению лабораторных работ по автоматике. Л., ЛРПТ, 1968. 80 с.

65. Нудлер Г. И., Тульчин И. К. Основы автоматизации производства. М., «Высшая школа», 1968. 209 с.

66. Пантаев Н. Ф., Дианов В. Г. Основы теории автоматического регулирования и авторегуляторы. М., «Недра», 1970. 365 с.

67. Пантаев Н. Ф., Смирнов П. Ф. Контроль и автоматизация теплосиловых установок. М., «Недра», 1969. 168 с.

68. Папернов А. А. Логические основы цифровых машин и программирования. М., «Наука», 1965. 560 с.

69. Подрешетников В. А., Плотников В. М. Детали и узлы пневматических релейных устройств. М., «Машиностроение», 1972. 193 с.

70. Попов Е. П. Автоматическое регулирование и управление. М., «Наука», 1966. 388 с.
71. Электромагнитные элементы автоматики. М., Воениздат, 1970. 356 с. Авт.: Л. Ф. Порфириев, Е. А. Фабрикант, С. М. Федоров, В. И. Цветков.
72. Попов В. С., Николаев С. А. Общая электротехника с основами электроники. М., «Энергия», 1972. 504 с.
73. Прагер И. Л. Электронные аналоговые вычислительные машины. М., «Машиностроение», 1971. 263 с.
74. Преснухин Л. Н., Нестеров П. В. Цифровые вычислительные машины. М., «Высшая школа», 1974. 415 с.
75. Основы автоматического управления. Под ред. В. С. Пугачева. М., «Наука», 1968. 679 с.
76. Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник. Под ред. Ю. М. Пятина. М., «Машиностроение», 1969. 631 с.
77. Редман В. Г. Сборник лабораторных работ по курсу «Элементы автоматики и телемеханики». Л., ЛФМТ, 1959. 32 с.
78. Ровинский С. В., Тимофеев Н. К. Элементы и системы электротехники. Л., ЛГУ, 1974. 144 с.
79. Рогинский В. Ю. Электропитание радиоустройств. М., «Энергия», 1970. 320 с.
80. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М., «Наука», 1966, 719 с.
81. Розенблат М. А. Магнитные усилители и модуляторы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 112 с.
82. Розенблат М. А. Магнитные усилители с самонасыщением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 127 с.
83. Самофалов К. Г. Вычислительные устройства. Киев, Государственное изд-во технической литературы УССР, 1963. 263 с.
84. Санковский Е. А., Свердлов О. С., Исаев Г. Г. Элементы автоматических устройств. Минск, 1962. 617 с.
85. Сотков Б. С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств. М., «Энергия», 1965. 576 с.
86. Сотков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970. 271 с.
87. Стародуб К. Я., Михайлов Н. Н. Синхронные передачи и следящие системы. М., «Машиностроение», 1971. 280 с.
88. Столяров И. М. Магнитные усилители с полупроводниковыми и магнитными ключами. Л., «Энергия», 1965. 80 с.
89. Стригин В. В. Автоматика и вычислительная техника. М., «Высшая школа», 1970. 324 с.
90. Теория автоматического регулирования. Кн. 1. Под ред. В. В. Соловькова. М., «Машиностроение», 1967. 768 с.
91. Техническое описание малой универсальной вычислительной машины «Наирис». Ч. I, кн. 1. Ереван, 1970. 120 с.
92. Тищенко Н. М. Проектирование магнитных и полупроводниковых элементов автоматики. М., «Энергия», 1970. 640 с.
93. Толмасский И. С. Высокочастотные магнитные материалы. М., «Энергия», 1968. 72 с.
94. Тутевич В. Н. Телемеханика. М., «Энергия», 1973. 384 с.
95. Угинчус А. А. Гидравлика и гидравлические машины. Харьков ХГУ, 1970. 395 с.

96. Устинский А. П. Дифференциальные электромагнитные муфты и коробки передач. М., «Энергия», 1972. 80 с.
97. Фремке А. В. Телеизмерение. М., «Высшая школа», 1968. 261 с.
98. Хализев Г. П. Электропривод и основы управления. М., «Высшая школа», 1968. 335 с.
99. Чечет Ю. С. Электрические микромашины автоматических устройств. М. — Л., «Энергия», 1964. 424 с.
100. Чудаков А. Д. Цифровые устройства пневмоники. М., «Энергия», 1971. 112 с.
101. Расчет измерительных и усилильных элементов автоматических систем. Под ред. Н. М. Чумакова. Киев, «Техника», 1971. 356 с.
102. Чупраков Ю. И. Основы гидро- и пневмоприводов. М., «Машиностроение», 1966. 160 с.
103. Шляндин В. М. Элементы автоматики и счетно-решающие устройства. М., «Машиностроение», 1967. 306 с.
104. Шляндин В. М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы. М., «Высшая школа», 1973. 280 с.
105. Юревич Е. И. Электромагнитные устройства автоматики. М. — Л., «Энергия», 1964. 416 с.
106. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Л., «Энергия», 1969. 375 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Автоматизация 5
- Автоматика 9
- Автоматическая система измерения 185
 - балансная 187
 - небалансная 185
 - компенсации 11
 - контроля 10, 179
 - обучаемая 232
 - обучения 232
 - программного регулирования 220
 - регистрации 182
 - регулирования 11
 - астатическая 228
 - импульсная 224
 - непрерывного действия 223
 - прерывного действия 223
 - релейная 223
 - самообучающаяся 232
 - самонастраивающаяся 229
 - статическая 226
 - сигнализации 181, 204
 - сортировки 182
 - стабилизации 219
 - указания 182
 - управления 11
 - централизованного контроля 207
- Автоматический контроль 179
 - активный 181
 - пассивный 179
 - потенциометр 190
 - регулятор 6
 - уравновешенный мост 195
- Алгебра логики 343
- Алгоритм 365
 - управления 7
 - функционирования 7

Б

- Байт 362
 - Бит 362
-
- Возмущающие воздействия 212
 - Вращающийся трансформатор 322
 - Время разгона двигателя 162
 - регулирования 239
 - Вычислительная машина аналоговая 315
 - управляющая 370
 - цифровая 334

Вычислительное устройство дискретного действия 307, 309

- комбинированное 307, 309
- непрерывного действия 307

Г

- Гидравлический привод 304
- Гистерезис 19

Д

- Датчик 16, 23
 - генераторный 25, 46
 - емкостный 43
 - индуктивный 37
 - контактный 25
 - магнитоупругий 42
 - параметрический 24, 407
 - потенциометрический 27, 29
 - пьезоэлектрический 49
 - реостатный 27
 - тахометрический 52
 - термоэлектрический 46, 410
- Двигатель 17
 - двухфазный асинхронный 166
- Демодулятор 62
- Дешифратор 354
- Динамическая характеристика звена 250
 - (дифференциальная) чувствительность 24
- Добротность системы 296
- Дроссель 96
- насыщения переменного тока 64

З

- Звено апериодическое 245
 - безынерционное 243
 - динамическое 240
 - дифференцирующее 247
 - интегрирующее 244
 - колебательное 247
- Зона нечувствительности 156

И

- Индукционная передача 286
- Инерционность 24
- Интегратор 318
- Исполнительное устройство 11, 155
 - гидравлическое 174
 - пневматическое 176

К

- Каналы связи 394
- Качество процесса регулирования 236

Кибернетика 8
Код обратный 342
— прямой 342
Контактор 17, 132
Корректирующие устройства 271
— параллельные 272
— последовательные 276
Коэффициент обратной связи 77
— преобразования динамический 18
— относительный 18
— статический 18
— статизма 227
КПД двигателя 167
Критерии устойчивости 267
— алгебраические 268
— частотные 268

Л

Линия связи 12
Логическое отрицание 344
— сложение 344
— умножение 344

М

Магнитный пускатель 17, 134
— усилитель
— многокаскадный 84
— нереверсивный без обратной связи 68
— реверсивный без обратной связи 73
Матрица 363
Механизация 5
Моделирование 312
— математическое 313
— физическое 312
Модулятор 62

О

Обратная связь 21
Объект регулирования 11, 261
Ошибка динамическая 296
— статическая 238, 295

П

Передаточная функция звена 243
Перерегулирование 239
Погрешность 19
— абсолютная 19
— относительная 20
— приведенная относительная 20
Порог чувствительности 19
Потенциометр нелинейный функциональный 321
Преобразователь 101
— пневматический 101
— электропневматический 101
Пусковой момент 162
Пьезоэффект
— обратный 50
— прямой 50

Р

Распределитель 139
— релейные 141
— электромеханические 139
— электронные 141
Регистры 352

Регулирование комбинированное 217
— по возмущению 216
— — отклонению 215
Регулируемая величина 212
Регулируемый параметр 212
Регулирующий орган 214, 263
Реле 16
— безыкарные 123
— бесконтактные магнитные 146
— транзисторные 145
— электронные 143
— индукционные 131
— магнитоэлектрические 129
— тиристорное 148, 149
— фотозависимое 138
— электрическое контактное 119

С

Сельсины 285
Сильфон 103
Синхронизирующий момент 288
— — удельный 288
Система двоичная 337
— десятичная 337
— дистанционной передачи 281
— самопрописывающаяся 7
— следящая 293, 422
— счисления 336
— телеметрическая 12
— телемеханики 12, 374
— телерегулирования 14
— телесигнализации 12
— телеуправления 12
— экстремальная 229
Соединение звеньев 263
— — встречно-параллельное 264
— — параллельное 264
— — последовательное 264
Стабилизатор 16
— компенсационный напряжения 107, 116
— параметрический 106
— — напряжения 110
— — тока 109
Статическая характеристика 24
— — магнитного усилителя с обратной связью 79
— — элемента 248
Степень жесткости 162
— неравномерности 227
Структурная схема 10
— АСР 214
— — следящей системы 294
— — цифровой ЭВМ 331
Сумматор 318
— параллельного действия 357
— последовательного действия 356
Счетчик 350

Т

Тахогенератор переменного тока 36
— — — асинхронный 56, 58
— — — синхронный 56, 57
— — постоянного тока 53
Телемеханика 9
Тензодатчик 31
— полупроводниковый 34
— проволочный 31
— фольговый 33

Т
Транзистор 36.
Термометр сопротивления 35
Термопара 46
Терморезистор 34
Термо-ЭДС 46
Термоэлектрод 47
Трансформаторная передача 292
Триггер 145, 349

У

Управляемый объект 7
Усилитель 16
— гидравлический 91
— дифференцирующий 330
— инерционный 331
— операционный постоянного тока 326
— пневматический 97
— форсирующий 331
— электромашинный 86
Устойчивость 234
Устройство
— автоматическое 5
— — управляемое 7
— арифметическое 335, 355, 427
— ввода 319
— — и вывода информации 358
— воспроизводящее 10
— долговременное запоминающее 429
— задающее 10
— запоминающее 362
— измерительное 214, 261, 263
— множительное 357
— оперативное запоминающее 362, 429
— регистрирующее 319
— решающее 317
— сравнивающее 10
— управления и контроля 319
— управляющее 11

Ф

Феррит-транзисторный элемент 150
— без обратной связи 150
— — с отрицательной обратной связью 153

Феррит-транзисторный элемент с положительной обратной связью 153
Функциональная схема АСР 261

Х

Характеристика амплитудно-фазовая 256
— амплитудно частотная 252, 256
— временная 251
— механическая 162
— регулировочная 169
— скоростная 160
— фазо-частотная 252
— логарифмическая 253

Ц

Цифровая ЭВМ 7
Цифровые индикаторы (указатели) 202

Э

Электромагнит 156, 157
Электромагнитные муфты 17
— вязкого трения 172
— скольжения 173
— сухого трения (фрикционные) 171
— реле переменного тока 127
— постоянного тока 121
— — — нейтральные 121
— — — поляризованные 121, 125
Электромагнитная постоянная времени электродвигателя 165
Электронные множительно-делительные устройства 332
Элемент 14
— логический 347
— цифровой 349
— чувствительный 23

Я

Явление магнитострикции 42

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Часть первая	
ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ	
Глава первая. Общие сведения об системах автоматики и элементах ее составляющих	9
1-1. Структура и назначение отдельных систем автоматики и телемеханики	9
1-2. Функции элементов автоматики и телемеханики	14
1-3. Понятие о датчиках, усилителях, стабилизаторах, переключающих и исполнительных элементах	15
1-4. Общие характеристики элементов	17
1-5. Обратные связи	21
Глава вторая. Датчики	23
2-1. Основные сведения о датчиках и их общие характеристики	23
2-2. Классификация электрических датчиков и требования к ним	24
2-3. Параметрические датчики активного сопротивления	25
а) Контактные датчики	25
б) Реостатные и потенциометрические датчики	27
в) Тензодатчики	31
г) Терморезисторы	34
2-4. Параметрические датчики реактивного сопротивления	37
а) Индуктивные датчики	37
б) Емкостные датчики	43
2-5. Генераторные датчики	46
а) Термоэлектрические датчики	46
б) Пьезоэлектрические датчики	49
в) Тахометрические датчики	52
Глава третья. Усилители и стабилизаторы	60
3-1. Общие сведения об усилителях	60
а) Назначение, классификация и основные характеристики усилителей	60
б) Область применения различных усилителей	61
3-2. Принцип действия и основные соотношения магнитного усилителя. Основные свойства и область применения магнитных усилителей	64

3-3. Нереверсивные (однотактные) магнитные усилители без обратной связи. Основные соотношения	68
а) Дроссельный магнитный усилитель на двух сердечниках	68
б) Дроссельный магнитный усилитель с последовательно включенной нагрузкой	70
в) Дроссельный магнитный усилитель с параллельно включенной нагрузкой	71
г) Дроссельный магнитный усилитель с начальным смещением (подмагничиванием)	72
3-4. Реверсивный (двухтактный) магнитный усилитель без обратной связи	73
3-5. Нереверсивные магнитные усилители с внешней обратной связью	75
а) Магнитный усилитель с обратной связью по току	75
б) Магнитный усилитель с обратной связью по напряжению	77
в) Коэффициент обратной связи	77
г) Влияние обратной связи на коэффициенты усиления магнитного усилителя	78
д) Статические характеристики магнитного усилителя с обратной связью	79
3-6. Нереверсивные магнитные усилители с внутренней обратной связью	80
3-7. Реверсивные магнитные усилители с обратной связью	82
а) Реверсивный магнитный усилитель с внешней обратной связью	82
б) Реверсивный магнитный усилитель с внутренней обратной связью	82
3-8. Многокаскадные магнитные усилители	84
3-9. Электромашинные усилители	86
а) Общие сведения и основные характеристики	86
б) Устройство, принцип действия и область применения ЭМУ с поперечным магнитным полем	88
3-10. Гидравлические усилители	91
а) Основные сведения	91
б) Струйные гидравлические усилители	92
в) Золотниковые гидравлические усилители	94
г) Дроссельные гидравлические усилители типа сопло — заслонка	94
3-11. Пневматические усилители	97
а) Поршневые пневматические усилители	97
б) Мембранные пневматические усилители	98
в) Струйные пневматические усилители	100
3-12. Пневматические и электропневматические преобразователи	101
3-13. Стабилизаторы	106
а) Основные сведения о стабилизаторах	106
б) Способы осуществления стабилизации	107
3-14. Параметрические стабилизаторы	109
а) Параметрические стабилизаторы тока	109
б) Параметрические стабилизаторы напряжения	110
3-15. Компенсационные стабилизаторы	116

3-16. Понятие о гидравлических и пневматических стабилизаторах	118
Г л а в а ч е т в е р т а я . П е р е к л ю ч а ю щ и е у с т р о й с т в а и р а с -	119
п р е д л и т е л и	
4-1. Общие сведения об электрических контактных реле	119
4-2. Электромагнитные реле постоянного тока	121
4-3. Электромагнитные реле переменного тока	127
4-4. Основные понятия о других видах реле	129
а) Магнитоэлектрические реле	129
б) Индукционные реле	131
в) Электротепловые реле	132
4-5. Контакторы и магнитные пускатели	132
4-6. Электронные и фотоэлектронные реле	136
а) Электронные реле	136
б) Фотоэлектронные реле	138
4-7. Распределители	139
4-8. Бесконтактные переключающие устройства	143
а) Бесконтактные электронные реле	143
б) Бесконтактные транзисторные реле	145
в) Бесконтактные магнитные реле	146
г) Тиристорные реле	148
4-9. Феррит-транзисторные элементы	150
а) Феррит-транзисторный элемент без обратной связи	150
б) Феррит-транзисторный элемент с положительной обратной связью	153
в) Феррит-транзисторный элемент с отрицательной обратной связью	153
г) Применение феррит-транзисторных элементов	155
Г л а в а п я т а я . И с п о л н и т е л ь н ы е у с т р о й с т в а (э л е м е н т ы)	155
5-1. Назначение, виды и характеристики исполнительных устройств	155
5-2. Электрические исполнительные устройства	156
5-3. Исполнительные устройства с электромагнитным приводом	156
5-4. Исполнительные устройства с двигателями постоянного тока	158
а) Принцип действия и основные уравнения	158
б) Статические характеристики электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением	160
в) Регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением	162
г) Электромеханическая постоянная времени электродвигателя	165
5-5. Исполнительные устройства с двигателями переменного тока	166
5-6. Электромагнитные муфты	171
а) Основные сведения	171
б) Электромагнитные муфты сухого трения (фрикционные)	171
в) Муфты вязкого трения	172
г) Муфты скольжения	174

5-7. Гидравлические исполнительные устройства	174
5-8. Пневматические исполнительные устройства	176

Часть вторая

СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Глава шестая. Автоматические системы контроля и сигнализации	179
--	-----

6-1. Назначение, виды и особенности автоматических систем контроля	179
6-2. Небалансные и балансные автоматические системы измерения	185
а) Небалансная автоматическая система измерения	185
б) Балансная автоматическая система измерения	187
6-3. Автоматические потенциометры и мосты	189
а) Автоматический потенциометр КСП4	190
б) Автоматический уравновешенный мост КСМ4	195
6-4. Автоматические измерительные системы с цифровым отсчетом	197
а) Общие сведения	197
б) Преобразователи непрерывных величин в дискретные	198
в) Цифровые индикаторы (указатели)	202
6-5. Автоматические системы сигнализации	204
6-6. Автоматические системы централизованного контроля	207
а) Назначение и функции	207
б) Структурная схема	208
в) Типы и устройство машин централизованного контроля	210

Глава седьмая. Автоматические системы регулирования	212
---	-----

7-1. Основные понятия и определения	212
а) Величины (параметры), характеризующие регулируемый процесс	212
б) Понятие о замкнутых и разомкнутых системах	213
в) Внешние воздействия и их виды	213
7-2. Структурная схема АСР. Основные элементы	214
7-3. Принципы регулирования	215
а) Регулирование по отклонению	215
б) Регулирование по возмущению	216
в) Комбинированное регулирование	217
7-4. Классификация автоматических регуляторов	217
7-5. Автоматическая система стабилизации	219
7-6. Автоматическая система программного регулирования	220
7-7. Автоматические системы прямого и непрямого регулирования	222
7-8. Автоматические системы регулирования непрерывного и прерывного (дискретного) действия	223
а) АСР непрерывного действия	223
б) АСР прерывного (дискретного) действия	223
7-9. Статические и астатические системы	226
а) Статическая система	226
б) Астатическая система	228

7-10. Самонастраивающиеся (адаптивные) автоматические системы регулирования	229
а) Экстремальные системы	229
б) Автоматические системы обучения	232
7-11. Основные задачи теории автоматического регулирования	233
7-12. Устойчивость автоматических систем регулирования и качество процесса регулирования	233
а) Основные понятия об устойчивости	233
б) Виды переходных процессов	235
в) Качество процесса регулирования	236
7-13. Требования, предъявляемые к АСР	239
7-14. Типовые динамические звенья и их передаточные функции	240
а) Основные сведения о динамических звеньях	240
б) Составление дифференциального уравнения и его операторная форма записи	241
в) Понятие о передаточной функции звена	243
г) Безынерционные звенья	243
д) Интегрирующее звено	244
е) Инерционное (апериодическое) звено первого порядка	245
ж) Инерционное (апериодическое) звено второго порядка	246
з) Колебательное звено	247
и) Дифференцирующее звено	247
7-15. Статические и динамические характеристики элементов и звеньев	248
а) Статические характеристики	248
б) Динамические характеристики	250
7-16. Функциональная схема АСР, соединение звеньев	261
а) Функциональная схема АСР	261
б) Соединение звеньев	263
7-17. Типовые передаточные функции автоматических регуляторов	265
7-18. Основы анализа устойчивости АСР	267
а) Устойчивость в «малом» и «большом»	267
б) Критерии устойчивости	267
7-19. Корректирующие устройства	271
а) Общие сведения	271
б) Параллельные корректирующие устройства	272
в) Последовательные корректирующие устройства	276
7-20. Увеличение устойчивости и улучшение качества процесса регулирования	277

Глава восьмая. Системы дистанционной передачи и следящие системы

8-1. Назначение, область применения и классификация систем дистанционной передачи	281
8-2. Системы дистанционной передачи угла на постоянном токе	282
а) Система дистанционной передачи угла плавного действия на постоянном токе небалансного типа	282
	445

б) Самобалансирующаяся система дистанционной передачи угла плавного действия	284
в) Система дистанционной передачи угла шагового действия	284
8-3. Системы дистанционной передачи угла на переменном токе	285
а) Основные сведения	285
б) Индукционная передача	286
в) Дистанционная индикаторная передача угла с дифференциальным сельсином	286
г) Трансформаторная передача	292
8-4. Основные сведения о следящих системах	293
а) Принцип построения	293
б) Структурная схема	294
в) Основные параметры следящих систем	295
г) Основные устройства следящих систем	296
8-5. Измерители угла рассогласования	297
а) Общие сведения	297
б) Электрическая следящая система на потенциометрах	299
в) Электрическая следящая система на сельсинах	299
8-6. Копировально-следящие системы	299
8-7. Системы программного управления	301
8-8. Программоносители и считающие устройства	304
8-9. Гидравлический следящий привод	304
а) Некоторые сведения о гидравлическом приводе	304
б) Устройство и действие гидравлического следящего привода	305
Г л а в а д е в я т а я . А в т о м а т и ч е с к и е в y ч и с л и т е л ь н ы e у с т р о i с т в а	307
9-1. Общие сведения и классификация вычислительных устройств	307
9-2. Аналоговые вычислительные машины	312
а) Принципы моделирования	312
б) Принцип действия, основные блоки аналоговых вычислительных машин и их функции	315
9-3. Потенциометрические счетно-решающие элементы	319
9-4. Счетно-решающие элементы на вращающихся трансформаторах	322
9-5. Электронные решавшие элементы на операционных усилителях	326
а) Общие сведения и основные соотношения	326
б) Типовые решавшие схемы с операционными усилителями постоянного тока	328
9-6. Электронные множительно-делительные устройства	332
9-7. Структурная схема цифровой ЭВМ	334
9-8. Арифметические основы цифровой ЭВМ	336
а) Системы счисления	336
б) Формы представления чисел в цифровой ЭВМ	340
в) Коды чисел	342
9-9. Логические основы	343
9-10. Физическое представление чисел в цифровой ЭВМ	345

9-11. Элементы цифровой ЭВМ	347
9-12. Типовые узлы цифровых ЭВМ	350
а) Счетчики	350
б) Регистры	352
в) Дешифраторы	354
9-13 Арифметические устройства	355
а) Сумматоры	356
б) Множительные устройства	357
9-14. Устройства ввода и вывода информации	358
9-15. Запоминающие устройства	362
9-16. Устройства управления	365
а) Понятие о программировании	365
б) Устройства управления	367
9-17. Управляющие вычислительные машины. Применение вычислительных машин в автоматических системах управления	370
 Г л а в а д е с я т а я . Системы телемеханики	374
10-1. Общие сведения, назначение и область применения отдельных видов систем телемеханики	374
10-2. Общие сведения и структура телемеханических систем	376
10-3. Системы интенсивности	377
а) Небалансные системы	378
б) Балансные системы	380
в) Логометрические системы	381
10-4. Импульсные телемеханические системы	382
а) Частотно-импульсные системы	383
б) Время-импульсные системы	386
в) Кодоимпульсные системы	389
10-5. Частотные телемеханические системы переменного тока	391
10-6. Каналы связи	394
10-7. Системы телеуправления и телесигнализации	396
а) Многопроводные системы ТУ—ТС	397
б) Частотные системы ТУ—ТС	401
в) Временные системы ТУ—ТС	402
 П р и л о ж е н и я . Лабораторные работы и практические занятия	405
П-1. Техника и методика проведения лабораторных работ	405
П-2. Лабораторная работа № 1. Изучение работы датчика параметрического типа	408
П-3. Лабораторная работа № 2. Изучение действия термоэлектрического датчика	410
П-4. Лабораторная работа № 3. Снятие статических характеристик магнитных усилителей	412
П-5. Лабораторная работа № 4. Изучение конструкции и работы электромагнитного реле переменного тока	415
	447

П-6. Лабораторная работа № 5. Изучение электронного автоматического моста	416
П-7. Лабораторная работа № 6. Изучение, устройства и действия электрической дистанционной передачи угловых перемещений на сельсинах	418
П-8. Лабораторная работа № 7. Изучение следящей системы	422
П-9. Практическое занятие. Малая универсальная вычислительная машина «Наира-К»	425
Список литературы	433
Предметный указатель	446

**Анатолий Николаевич Чекваскин,
Владимир Николаевич Семин,
Константин Яковлевич Стародуб**

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

Рецензенты: *A. B. Нетушил, Ю. А. Силинский*

Редактор *Ю. А. Турцицын*

Редактор издательства *Н. А. Медведева*

Переплет художника *А. А. Иванова*

Художественный редактор *Т. Н. Хромова*

Технический редактор *Т. А. Маслова*

Корректор *В. С. Антипова*

ИБ № 1994

Сдано в набор 6/XII 1976 г. Подписано к печати 4/IV 1977 г. Т-08218.
Формат 84×108^{1/2}. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 23,52.
Уч.-изд. л. 24,53. Тираж 60.000 экз. Зак. 825. Цена 96 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владimirская типография Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли 600610, г. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Цена 96 коп.