

Раздел III

КОММУТАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Глава 15

КОММУТАЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 15.1. Назначение. Основные понятия

Коммутационные элементы предназначены для включения, отключения и переключения электрических цепей. Под коммутацией обычно понимают выполнение этих трех операций. Различают коммутационные элементы ручного и автоматического управления. Коммутационные элементы ручного управления срабатывают при непосредственном механическом воздействии на их органы управления. Автоматические коммутационные элементы срабатывают под воздействием электромагнитных сил на их приводные органы. Основной частью таких элементов обычно является электромагнит, входным сигналом для них служит электрический ток или напряжение. Автоматические коммутационные элементы используются в системах автоматики и при дистанционном управлении различными механизмами и устройствами. Они рассматриваются в последующих главах данного раздела.

В этой главе рассмотрены коммутационные элементы с механическим приводом. Используются они, как правило, для местного управления и для подачи сигналов о достижении каких-либо промежуточных и конечных положений. По своему назначению коммутационные элементы подразделяют на два вида: для коммутации силовых цепей (обмоток электродвигателей, мощных электромагнитов, трансформаторов, нагревателей и других потребителей) и для коммутации цепей управления (обмоток релейно-контактной аппаратуры, устройств контроля, регулирования и сигнализации). Такое разделение обусловлено различными значениями токов и напряжений в коммутируемых цепях, что, в свою очередь, влияет на конструктивное исполнение и габаритные размеры. Изучение коммутаци-

онных элементов для силовых цепей не входит в нашу задачу. Отметим только, что наибольшее распространение для этих целей получили рубильники и переключатели рубящего типа, обеспечивающие быстрое размыкание и имеющие специальные устройства для гашения электрической дуги.

Все коммутационные элементы, используемые в цепях управления, обязательно имеют следующие узлы: неподвижные контакты, подвижные контакты и орган управления. Кроме того, они могут иметь элементы фиксации, монтажа и настройки, дугогашения и т. п. Необходимые коммутационные элементы выбирают по допустимым значениям тока и напряжения. Но наиболее важной для практики характеристикой коммутационных элементов является их надежность, т. е. сохранение работоспособности при большом числе срабатываний.

Коммутационные элементы различают по числу коммутируемых цепей (одноцепные и многоцепные) и по числу фиксированных положений, причем имеются коммутационные элементы с самовозвратом в исходное положение, т. е. без фиксации переключенного положения, что может быть необходимо для ряда схем управления.

К коммутационным элементам с механическим приводом относятся кнопки управления, микропереключатели, тумблеры, клавишные, поворотные, рычажные и кулачковые переключатели, а также концевые и путевые выключатели.

§ 15.2. Кнопки управления и тумблеры

Кнопки управления — это аппараты, подвижные контакты которых перемещаются и срабатывают при нажатии на толкатель кнопки. Комплект кнопок, смонтированных на общей панели, представляет собой кнопочную станцию. Используемые в схемах автоматики кнопки управления различают по числу и типу контактов (от 1 до 4 замыкающих и размыкающих), форме толкателя (цилиндрический, прямоугольный и грибовидный), способу защиты от воздействия окружающей среды (открытые, закрытые, герметичные, взрывобезопасные и т. д.).

Независимо от конструкции и габаритных размеров кнопок (рис. 15.1, *а*, *б*) все они имеют неподвижные контакты 1 и подвижные контакты 6, перемещаемые с помощью толкателя 3. Внешняя цепь подсоединяется к кнопке с помощью винтовых зажимов 7. Корпус 2 кнопки фиксируется на панели управления гайками 4 и 5.

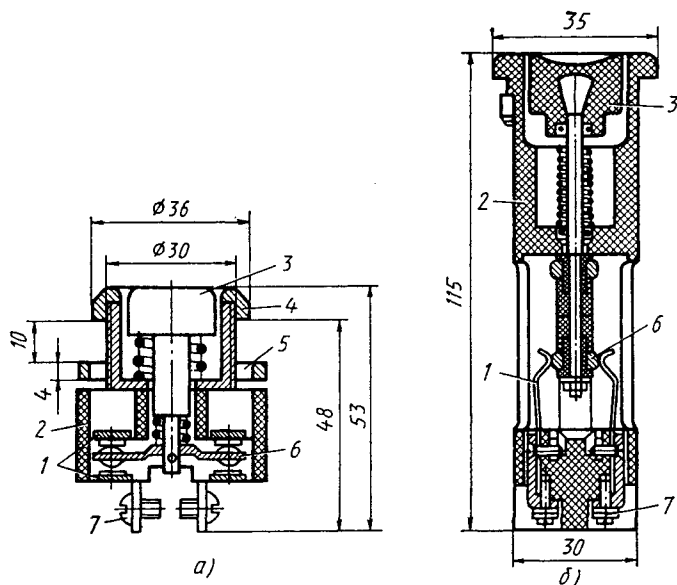


Рис. 15.1. Конструкции кнопок управления

Электрические параметры наиболее распространенных кнопок приведены в табл. 15.1. Кнопки управления общепромышленного применения серий КУ и КЕ имеют различные исполнения и формы толкателей.

Таблица 15.1. Электрические параметры кнопок управления различных типов

Наименование параметров	Типы кнопок				
	КУ 0	КУ 1, КУ 2	КЕ	БК 14-21	К 20, К 03
Номинальное напряжение, В: переменного тока постоянного тока	380	500	500	660	380
	220	440	220	440	220
Минимальное напряжение, В	24	24	24	12	—
Номинальный ток, А	2,5	5	6	10	5
Разрываемый переменный ток, А	2,5	12	9,6	16	6

Для коммутации цепей электроники выпускаются специальные кнопки (например, типа ВК14-21). Малогабаритные кнопки управ-

ления выполняют на основе микровыключателя типа МП, который используют в качестве исполнительного контактного элемента в тумблерах типа МТІ и МТП. Долговечность и надежность кнопок управления оценивают коммутационной износостойкостью, которую выражают в гарантированном числе циклов включений-отключений под нагрузкой. Этот параметр различен для разных кнопок и условий эксплуатации. Например, для кнопок типа ВК14-21 с медными контактами он составляет $0,25 \cdot 10^6$ циклов, с биметаллическими контактами — $2,5 \cdot 10^6$, с серебряными контактами — $4 \cdot 10^6$ циклов. Механическая износостойкость всегда превышает коммутационную. В последнее время все большее распространение получили кнопки управления с прямоугольной формой толкателя — их называют клавишами.

На основе кнопок управления изготовляют кнопочные станции, содержащие до 12 кнопок различного исполнения, собранных на общей панели или в одном корпусе. Такие коммутационные устройства называют кнопочными или клавишными переключателями (рис. 15.2).

Переключатель представляет собой наборную панель из кнопок 1 (или клавиш), смонтированных на общем каркасе 2 и снабженных механизмом фиксации, который может быть независимым для каждой кнопки (клавиши) или взаимно заблокированным. Кнопки могут также иметь самовозврат в исходное положение или чередование включенного и отключенного фиксированных поло-

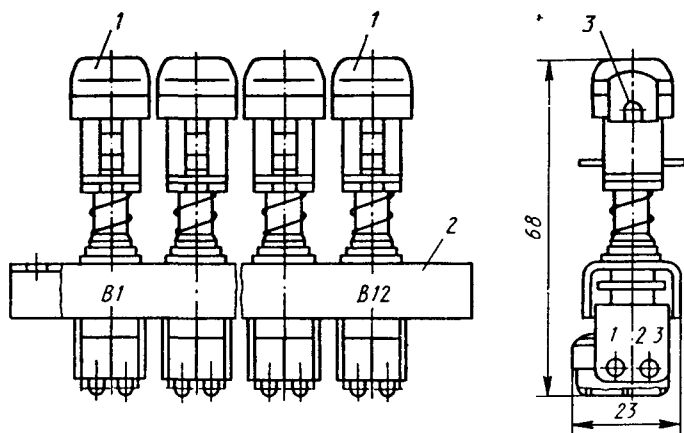


Рис. 15.2. Кнопочный переключатель

жений. Каждая кнопка или клавиша осуществляет коммутацию одной или нескольких цепей. Некоторые типы переключателей снабжают специальной кнопкой возврата (сброса) включенных кнопок в исходное положение. В этом случае возможно включенное положение нескольких кнопок одновременно. Особенностью этих переключателей является двухпозиционное положение (включено, отключено) каждой кнопки или клавиши. Необходимый режим или программа управления задается путем набора включенных и отключенных положений соответствующих кнопок (клавиш). При этом положение кнопок или клавиш (поднятое или утопленное) играет роль указателя. Для этой цели используют также световые сигнализаторы 3 (лампы или светодиоды), вмонтированные в корпус блока переключателя (рис. 15.2). Закрытое исполнение и использование высококачественных материалов (биметаллов, сплавов серебра и т. п.) для контактов обеспечивают малые переходные сопротивления, что весьма важно при установке этих переключателей в низковольтных и слаботочных цепях автоматики и электроники.

Для более мощных цепей автоматики применяют тумблеры, используемые в качестве выключателей, а также двух- и трехпозиционных переключателей. На рис. 15.3 показано устройство двухпозиционного тумблера. Мостиковый контакт, выполненный в виде токопроводящего ролика 1, замыкает одну из двух пар неподвижных контактов 2. Переключение контактов тумблера осуществляется воздействием на рычаг 3, а ускорение срабатывания (мгновенное действие) обеспечивается пружиной 4. Номинальный ток тумблера 1 и 2 А при напряжении 220 В, масса их не превышает 30 г.

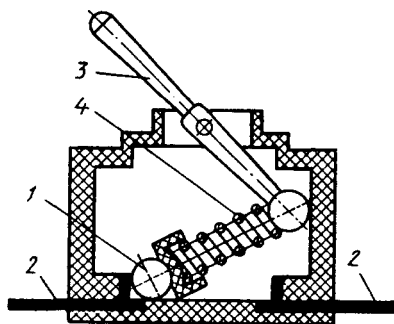


Рис. 15.3. Двухпозиционный тумблер

§ 15.3. Пакетные переключатели

Для коммутации нескольких цепей при нескольких фиксированных положениях для выбора различных режимов работы используются пакетные переключатели. Такой переключатель (рис. 15.4, а) состоит из ряда слоев — пакетов 3 (показан отдельно на рис. 15.4, б), внутри которых находятся подвижный 5 и неподвижный 4 контакты. Подвижный контакт 5 закреплен на оси 2, вращающейся с помощью рукоятки 1 и имеющей ряд фиксированных положений, в которых замыкаются неподвижные контакты одного из пакетов. Выводы 6 неподвижных контактов закреплены в корпусе переключателя. Недостаток таких пакетных переключателей — низкая надежность скользящих контактов.

Пакетные переключатели кулачкового типа, в которых электрическая цепь замыкается неподвижными контактами, более надежны. Подвижными у них являются диэлектрические кулачки, которые и замыкают контакты в зависимости от профиля кулачка и положения оси.

Конструкции пакетных переключателей, предназначенных для цепей управления, позволяют получить десятки и сотни вариантов разнообразных схем соединений при числе коммутируемых цепей до 24 (12 пакетов) и количестве фиксированных положений до 8 (через 45, 60 или 90°).

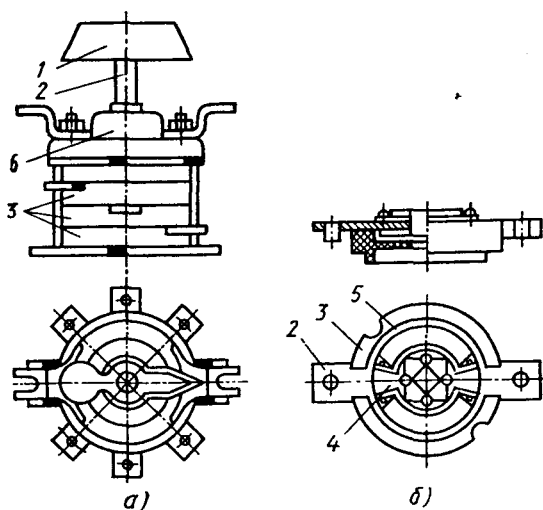


Рис. 15.4. Пакетный переключатель

Имеются переключатели и без фиксации переключаемого положения — с самовозвратом в исходное положение. Особенность этих переключателей — наличие запирающего (на ключ) устройства, что исключает бесконтрольное переключение.

Наиболее распространенными переключателями цепей управления являются аппараты серий ПКУ2 и ПКУ3. Номинальный (длительно допустимый) ток переключателей серии ПКУ2 — 6 А при напряжении 380 В переменного тока и 220 В постоянного тока, а для переключателей серии ПКУ3 — 10 А при 500 В переменного тока. Как видно по техническим параметрам, такие переключатели пригодны и для непосредственного включения и отключения довольно мощных потребителей электроэнергии, например электродвигателей мощностью в несколько киловатт.

Меньшими габаритами обладают переключатели серий ПУ и ПЭ, имеющие поворотные механизмы привода на два или три положения. Среди них имеется исполнение с выемным ключом-рукояткой. Такими переключателями, как правило, блокируют подачу напряжения в схему управления, изменяют режимы и способы управления. При этом предусмотрена возможность запирания переключателя как в отключенном, так и в других его положениях. Номинальный ток переключателей серий ПУ и ПЭ — 5 А при напряжении 220 В переменного тока и 1 А при 110 В постоянного тока.

Системы автоматического и программного управления требуют весьма сложных переключений, для которых необходимы многопозиционные и многоцепные переключатели (при числе цепей и положений порой в несколько десятков). Конструктивно такие коммутационные элементы выполнены в виде двух, четырех (и более) неподвижных секций, смонтированных на платах, и подвижных контактов, закрепленных на общем валу и фиксируемых специальным пружинно-шариковым фиксатором в заданных позициях.

На рис. 15.5 показаны наиболее распространенные ползунковые переключатели серии ПП однопанельного исполнения на 35 цепей. Переключатели в открытом исполнении предназначены для встраиваемого монтажа за панелью управления. Аналогичные щеточные переключатели, но закрытого исполнения, имеют от 1 до 4 секций при числе контактов в каждой секции от 4 до 24. Они обеспечивают надежную коммутацию при токе нагрузки до 1 А цепей переменного (напряжением 380 В) и постоянного (напряжением 220 В) тока.

В радиоэлектронной аппаратуре используются аналогичные пакетным переключатели — так называемые галетные. Они имеют от 2 до 11 положений при числе секций (галет) от 1 до 4. На рис. 15.6 показан переключатель серии ПГС на 10 положений.

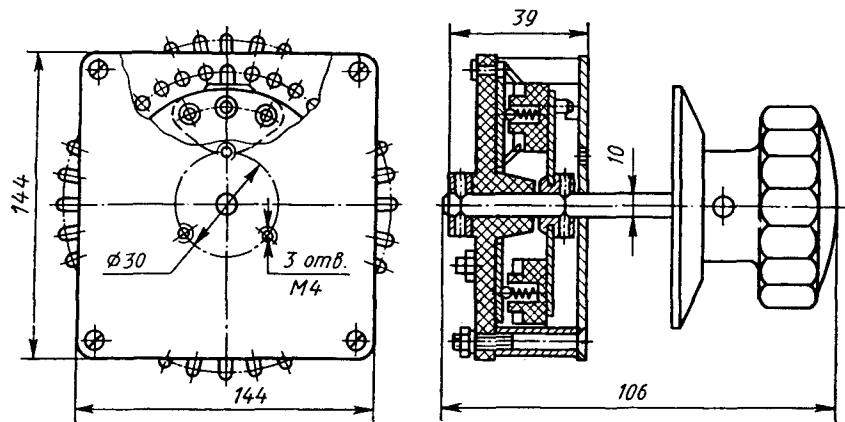


Рис. 15.5. Ползунковый переключатель

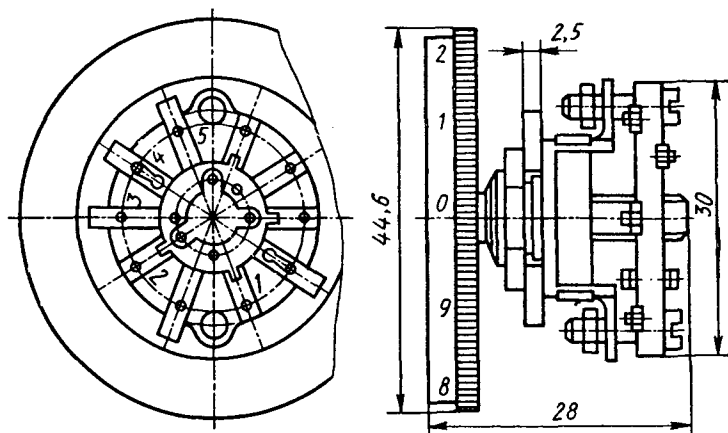


Рис. 15.6. Галетный переключатель

В последнее время в автоматике все шире используются достижения микроэлектроники, например большие интегральные схемы. Для коммутации в цепях, содержащих подобные элементы, необходимы переключатели, контакты которых обеспечивали бы надежное прохождение очень слабых токов (милли- или микроамперы) при пониженных значениях напряжений (до 5 В). Рассмотренные в данном параграфе переключатели, как правило, такими свойствами не

обладают, так как их контакты имеют значительные (порой в несколько ом) переходные сопротивления. В этом случае предпочтительнее применение клавишных переключателей с биметаллическими или серебряными контактами.

§ 15.4. Путевые и конечные выключатели

Путевые и конечные выключатели представляют собой коммутационные элементы, кинематически связанные с рабочей машиной и срабатывающие в зависимости от перемещения подвижной части рабочей машины. Путевые выключатели срабатывают в определенных промежуточных точках на пути перемещения, конечные выключатели срабатывают в крайних точках: в начале и конце пути. Особенно широко путевые и конечные выключатели используются в схемах автоматизированного электропривода различных производственных механизмов. С их помощью происходят автоматическое управление приводом на отдельных участках пути и автоматическое отключение в крайних положениях механизма.

В зависимости от устройства, осуществляющего замыкание или размыкание контактов, путевые и конечные выключатели можно подразделить на кнопочные (нажимные), рычажные, шпindelные и вращающиеся. Переключение контактов в этих выключателях осуществляется следующим образом. В кнопочных — нажатием рабочего органа механизма на шток, с которым связаны контакты выключателя. В рычажных — воздействием рабочего органа механизма на рычаг, с которым связаны контакты. В шпindelных — перемещением гайки по винту, связанному через передачи с валом механизма. Во вращающихся — переключающими кулачковыми шайбами, связанными с валом механизма.

В штоковых выключателях скорость переключения контактов определяется скоростью перемещения производственного механизма. При малой скорости взаимное перемещение подвижных и неподвижных контактов происходит медленно, что приводит к длительному горению дуги, возникающей между размыкающимися контактами, и их быстрому разрушению из-за оплавления и усиленного окисления. Для нормальной работы такого выключателя скорость перемещения механизма должна быть не менее 0,5 м/мин. А для обеспечения мгновенного переключения контактов используются специальные пружинные механизмы, освобождающиеся с помощью спусковых механизмов (собачек). Пружины также используются для обеспечения необходимой силы контактного нажатия. На рис. 15.7

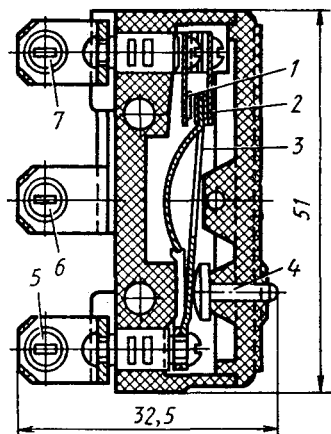


Рис. 15.7. Конечный микро-выключатель с мгновенным переключением контактов

показано устройство простого конечного выключателя. Закрепляется он таким образом, чтобы упор на подвижной части производственного механизма находился напротив штока 4. При нажатии упора на шток 4 последний давит на пружину 3. При достижении определенной силы нажатия пружина 3 перебрасывается влево, размыкая контакт 2 и замыкая контакт 1. При этом ток пойдет по другой цепи управления. Внешние соединения выключателя выполняются с помощью пайки к выводам: 5 — неподвижный контакт (общий); 6 — размыкающийся контакт 2; 7 — замыкающийся контакт 1. Плоская пружина 3 выполнена из трех частей. Средняя часть длиннее крайних, поэтому она всегда находится

в изогнутом состоянии и стремится прижимать контакты в их крайних положениях (1 или 2). Переключатель способен работать в цепях с напряжением до 380 В при токе до 3 А. Перемещение штока составляет 0,5—0,7 мм, необходимое усилие для срабатывания не более 5—7 Н. Время срабатывания 0,01—0,02 с при частоте включений до двух раз в минуту.

На рис. 15.8 показан конечный выключатель типа ВК-111 с мостиковыми контактами. Переключение контактов производится нажатием на шток 1, а возврат контактов в исходное положение осуществляется пружиной 2. Использование мостикового контакта 3 уменьшает вероятность возникновения дуги, поскольку цепь разрывается в двух точках. Такие выключатели могут работать при токе включения до 20 А и длительном токе 6 А. Износоустойчивость выключателей — 10^6 срабатываний. Допустимая частота — 600 включений в час.

На рис. 15.9 показан выключатель с малым временем срабатывания (моментного действия). Контакты подобных выключателей переключаются с постоянной скоростью при определенном положении производственного механизма независимо от скорости движения. Поэтому их применяют при малых скоростях (до 0,5 м/мин) или при необходимости повышенной точности срабатывания (до 0,05 мм).

При нажатии упора на ролик 1 рычаг 2 поворачивается и давит на набор спиральных пружин 3, мгновенно действующих на пово-

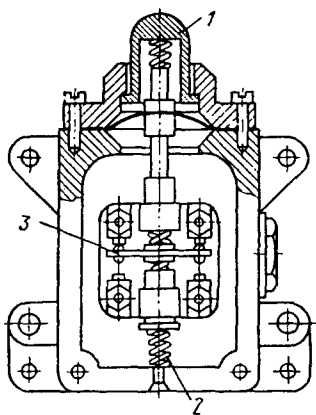


Рис. 15.8. Конечный выключатель типа ВК-111 с мостиковыми контактами

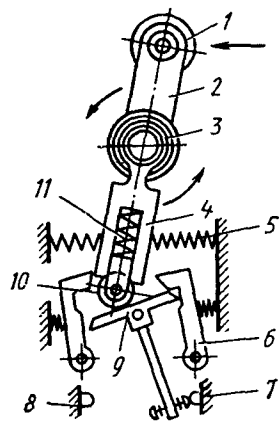


Рис. 15.9. Путьевой выключатель моментного действия

док 4. Поводок поворачивается, и ролик 10, сжимая пружину 11, движется по планке 9, занимая положение правее от оси поворота планки 9. При этом собачка 6 отводится и контактный мостик под действием пружины 11 и ролика 10 перебрасывается в другое положение, размыкая контакт 7 и замыкая контакт 8. После отхода упора от ролика 1 поводок 4 и контактный мостик возвращаются в исходное положение под действием пружины 5.

В некоторых случаях используют многопозиционные трех- и пятиконтактные датчики, последовательно управляющие несколькими управляющими цепями. Конструкции таких датчиков сложнее, и они значительно дороже двухконтактных.

Рассмотренные путьевые и конечные выключатели имеют сравнительно низкую надежность, связанную с повышенным износом контактной пары. Более высокая надежность обеспечивается при использовании бесконтактных датчиков (например, индуктивного или фотоэлектрического типов), мгновенность срабатывания которых обеспечивается с помощью электронных схем.

Контрольные вопросы

1. Что такое коммутация?
2. Какие коммутационные элементы вы используете у себя дома?
3. Как осуществляется моментное действие выключателя?

Глава 16

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

§ 16.1. Режим работы контактов

В коммутационных и электромеханических элементах, предназначенных для переключений электрических цепей при ручном и автоматическом управлении, основным является *контактный узел*. Именно надежность контактного узла определяет работоспособность любой коммутационной аппаратуры.

Контактный узел состоит из подвижного и неподвижного контактов. Эти контакты могут находиться в замкнутом и разомкнутом состоянии. В замкнутом состоянии сопротивление между контактами должно быть минимальным. Это сопротивление называют сопротивлением контактного перехода. Казалось бы, для того чтобы обеспечить малое сопротивление контактного перехода, надо увеличить площадь соприкосновения контактов. Однако даже при самой тщательной шлифовке поверхности контактов остается много микровыступов и микровпадин (рис. 16.1). Поэтому площадь реально контактирующей поверхности меньше площади контактов. Для того чтобы увеличить реальную контактирующую поверхность, надо приложить силу, прижимающую контакты друг к другу. В первый момент при сближении контактов они соприкасаются лишь в одной точке (рис. 16.1, а), площадь которой очень мала, а сопротивление контактного перехода велико. Усилие прижима F_c создает на малой площади большое удельное давление, что приводит к смятию материала контактов, увеличению площади соприкосновения и появлению новых точек соприкосновения (рис. 16.1, б). Удельное давление

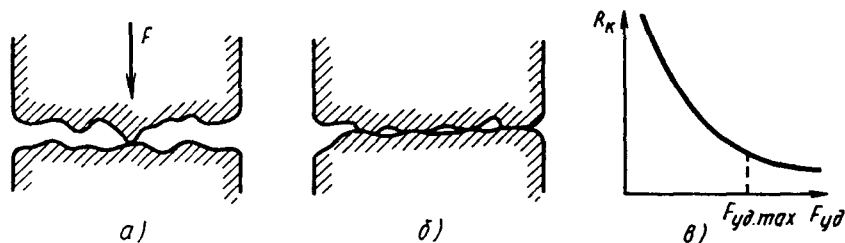


Рис. 16.1. Изменение сопротивления контактного перехода в зависимости от усилия прижима

уменьшается, и процесс сближения контактов и смятия их материала завершится тогда, когда это удельное давление сравняется с пределом прочности материала на смятие. Характер зависимости сопротивления контактного перехода R_k от удельного контактного давления $F_{уд}$ (рис. 16.1, в) показывает, что увеличение $F_{уд}$ целесообразно только до некоторого предела, при котором сопротивление R_k уже достаточно близко к минимально возможному, определяемому электропроводностью материала контактов. Через замкнутые контакты проходит ток I , и они нагреваются под действием выделяющейся теплоты, соответствующей мощности потерь в контактном переходе: $P_k = I^2 R_k$. Поэтому допустимое значение тока, проходящего через контакты, зависит от термической прочности контактов и от условий теплоотвода, т. е. от конструкции и размеров контактов.

В разомкнутом состоянии сопротивление контактов должно стремиться к бесконечности (практически миллионы ом), что обеспечивается изолирующими свойствами среды в контактном промежутке и расстоянием между контактами. В разомкнутом состоянии контакты подвергаются химическому воздействию окружающей среды, происходит их *коррозия*. Эта коррозия заключается в образовании оксидных (под действием кислорода воздуха) и сульфидных (под действием серы воздуха) пленок. У некоторых материалов (например, у меди) эти пленки обладают большим сопротивлением, что приводит к увеличению сопротивления контактного перехода при замыкании контактов.

Наиболее тяжелый режим работы контактов связан с размыканием электрической цепи, поскольку при размыкании контактов между ними возникает электрическая дуга. При этом происходит расплавление контактов и их износ, который называется *электрической эрозией*.

Таким образом, в процессе работы контакты подвергаются механическому истиранию, химической коррозии и электрической эрозии. Уменьшить отрицательное влияние этих факторов можно при правильном выборе конструкции контактов и их материала.

§ 16.2. Конструктивные типы контактов

По форме контактирующих поверхностей все конструкции контактов могут быть подразделены на три основных типа: точечные, линейные и поверхностные. *Точечные* контакты (рис. 16.2, а) имеют вид конусов или полусфер, соприкасающихся с плоскостью или полусферой в одной точке. Такие контакты предназначены для пере-

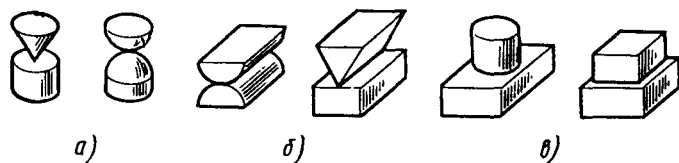


Рис. 16.2. Основные типы контактов

ключения малых токов. *Линейные* контакты (рис. 16.2, б) имеют вид двух цилиндрических поверхностей, или призмы и плоскости, соприкасающихся по линии. Они предназначены для средних и больших токов. *Плоскостные* контакты (рис. 16.2, в) имеют соприкосновение по плоскости и предназначены для больших токов.

Контактные узлы включают в себя кроме контактов витые или плоские пружины, обеспечивающие силу прижима между контактами.

На рис. 16.3 показан рычажный контактный узел, состоящий из двух плоских пружин с неподвижным 1 и подвижным 2 контактами.

Пружины жестко закреплены одним концом в изоляционном основании 3. Перемещение подвижного контакта 2 происходит под действием упора 4. После того как подвижный контакт 2 переместится на величину раствора контактов x_0 , произойдет замыкание контактов. Обе пружины получают дополнительный прогиб на величину провала контактов x_n , поскольку движение упора 4 немного продолжится. За счет этого произойдет проскальзывание контактов (его еще называют притиранием), которое необходимо для удаления пыли и оксидной пленки с поверхности контактов.

На рис. 16.4 показан мостиковый контактный узел, обеспечивающий разрыв электрической цепи в двух местах, что повышает надежность работы. При перемещении упора 1 мостик с двумя подвижными контактами 3 перемещается в направлении двух неподвижных контактов 4 до соприкосновения контактов. Витая пружина 2 обеспечивает усилие прижима и возможность самоустан-

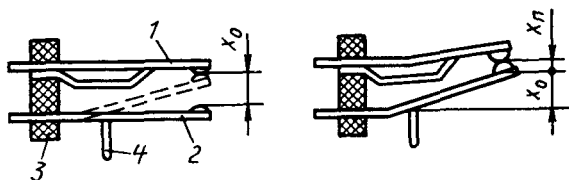


Рис. 16.3. Рычажный контактный узел

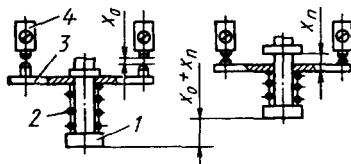


Рис. 16.4. Мостиковый контактный узел

новки подвижных контактов относительно неподвижных, что компенсирует износ контактов и некоторые неточности при их изготовлении. Полный ход упора 1 состоит из раствора контактов x_0 и провала x_n (аналогично контактному узлу по рис. 16.3).

На рис. 16.5 показан рычажный контактный узел с шарнирным закреплением подвижного контакта 2 , соприкасающимся с неподвижным контактом 3 по линии. Контактное нажатие осуществляется с помощью пружины 4 . Перемещение подвижного контакта происходит при повороте рычага 1 против часовой стрелки относительно оси O_1 . Сначала подвижный контакт 2 перемещается на величину раствора контакта до соприкосновения с неподвижным контактом 3 в точке A . После этого подвижный контакт совершает сложное движение, поворачиваясь одновременно относительно оси O_2 и вместе с рычагом 1 относительно оси O_1 . В результате подвижный контакт 2 перекачивается по неподвижному 3 . В замкнутом положении контактирование происходит в точке B . Перекачивание способствует очищению контактов от окисных пленок, а главное — точка B не подвергается электрической эрозии в момент размыкания контактов.

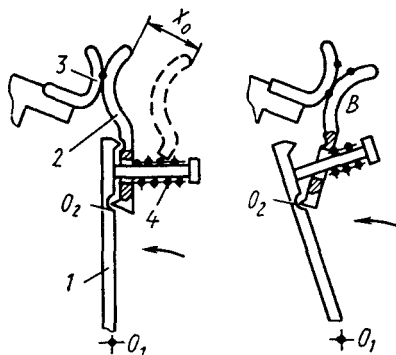


Рис. 16.5. Рычажный контактный узел с перекачивающимися контактами

§ 16.3. Материалы контактов

При выборе материала контактов необходимо обеспечить выполнение целого ряда требований: большая механическая прочность, высокая температура плавления, хорошие теплопроводность и электропроводность, устойчивость против коррозии и эрозии. Низкая стоимость, конечно, желательна, но она не относится к основным требованиям. Основные требования — это те, которые обеспечивают высокую надежность. Известны случаи, когда отказ одного-единственного контакта приводил к потерям, в миллионы раз превышающим стоимость этого контакта.

Перечисленным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяют серебро, золото, платина и их сплавы, вольфрам, медь (табл. 16.1).

Таблица 16.1. Материалы для контактов

Материалы	Плотность, г/см ³	Твердость по Виккерсу	Точка плавления, °С	Удельное сопротивление, Ом·см·10 ⁶	Теплопроводность, Вт/(см·с·град)
Серебро	10,5	26	960	1,6	4,186
Платина	21,3	65	1770	11,6	0,71
Палладий	11,9	40	1554	10,7	0,71
Золото	19,3	20	1063	2,4	2,92
Серебро – золото (10 %)	11,4	29	965	3,6	1,98
Серебро – палладий (10 %)	10,6	40	1000	6,8	1,46
Серебро – медь (10 %)	10,3	62	778	2,0	3,42
Платина – иридий (20 %)	21,6	120	1780	24,5	0,3
Платина – серебро (40 %)	11,0	95	1290	35,8	0,312
Золото – серебро (30 %)	16,6	32	1025	10,4	0,667

Сопротивление контактного перехода определяется по формуле

$$R_k = a/F^b, \quad (16.1)$$

где a — коэффициент, зависящий от материала и обработки поверхности контакта; F — контактное усилие; b — коэффициент формы контактов.

Для точечных контактов $b \approx 0,5$; для линейных $b = 0,55 \div 0,7$; для плоскостных $b \approx 1,0$.

Коэффициент a для меди, например, находится в пределах от 0,07 до 0,28, т. е. может изменяться в четыре раза. Наименьшие значения a (и соответственно сопротивления R_k) обеспечиваются при покрытии меди слоем олова (лужение). Слой олова препятствует образованию оксида, поэтому для луженых медных контактов коэффициент $a < 0,1$. Большие значения a получаются для нелуженых плоскостных медных контактов, поскольку у них имеются участки, покрытые слоем окиси. Для серебряных контактов $a = 0,06$. Интересно отметить, что электропроводность оксида серебра и чистого серебра примерно равны.

Для малых контактных усилий в высокочувствительных реле применяются благородные металлы (платина, золото, платиноиридий) при контактных усилиях $F = 0,01 \div 0,05$ Н. Эти материалы не окисляются и мало подвержены эрозии. При контактных усилиях $F = 0,05 \div 1$ Н и малой частоте срабатывания применяется серебро, которое имеет хорошую электропроводность, легко обрабатывается, но имеет невысокую твердость и подвержено эрозии. При контактных усилиях $F = 0,3 \div 1$ Н и большой частоте срабатывания используются металлокерамические контакты, получаемые методами порошковой металлургии (путем спекания смеси порошков двух металлов: серебра с вольфрамом, молибденом или никелем, меди с вольфрамом или молибденом). При контактных усилиях $F > 1$ Н и большой частоте срабатывания применяется вольфрам.

Наиболее дешевым материалом является медь, она применяется для мощных контактов, имеющих сравнительно большие размеры и требующих большого расхода материала. Контактные усилия для меди $F > 3$ Н. Для защиты от коррозии кроме лужения применяется серебрение или кадмирование медных контактов.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит сопротивление контактного перехода?
2. Какие конструкции контактного узла применяют для повышения надежности его работы?
3. Какие материалы используют для контактов?

Глава 17

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ РЕЛЕ

§ 17.1. Назначение. Принцип действия

В системах автоматики одним из наиболее распространенных элементов является *реле* — устройство, в котором при плавном изменении входного (управляющего) сигнала осуществляется скачкообразное изменение (переключение) выходного сигнала.

В электромеханических реле изменение (переключение) выходного сигнала осуществляется посредством контактов, а усилие, перемещающее контакты, создается электромеханическим преобразователем электрической энергии в механическую. Простейшим из таких преобразователей является электромагнит. Поэтому из электромеханических реле наибольшее распространение получили электромагнитные реле.

Пусть входной сигнал $x_{вх}$ изменяется во времени непрерывно (т. е. может принимать любые значения) от нуля до некоторого значения, а затем также непрерывно уменьшается, как показано на рис. 17.1, а. Сначала при малых значениях $x_{вх}$ выходной сигнал $x_{вых}$ равен нулю. Но когда входной сигнал увеличится до некоторого значения $x_{вх.сп}$, выходной сигнал скачком примет значение $x_{вых.сп}$ (рис. 17.1, б). При дальнейшем увеличении входного сигнала выходной сигнал не изменяется и остается равным $x_{вых.сп}$. При уменьшении сигнала $x_{вх}$ значение выходного сигнала не изменяется, но при

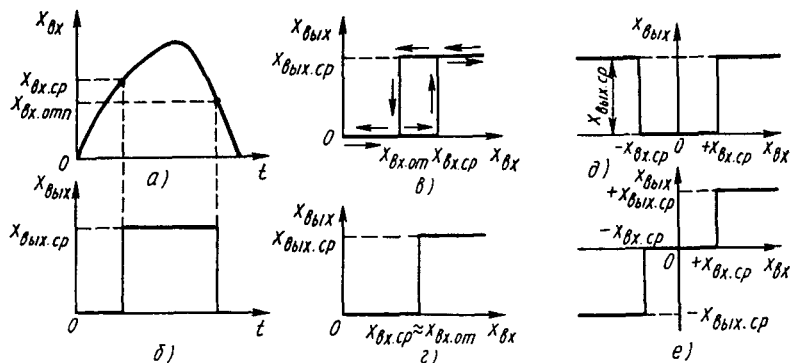


Рис. 17.1. Характеристики реле

уменьшении его до значения $x_{\text{вых.отп}}$ выходной сигнал скачком уменьшается до нуля. При дальнейшем уменьшении входного сигнала нулевое значение выходного сигнала сохраняется. Зависимость выходного сигнала от входного показана на рис. 17.1, в.

Значение входного сигнала $x_{\text{вых.ср}}$, при котором выходной сигнал скачком изменяется от 0 до $x_{\text{вых.ср}}$, называется сигналом *срабатывания*. Значение входного сигнала $x_{\text{вых.отп}}$, при котором выходной сигнал скачком изменяется от $x_{\text{вых.ср}}$ до 0, называется сигналом *отпускания*. Как правило, сигнал срабатывания больше сигнала отпускания ($x_{\text{вых.ср}} > x_{\text{вых.отп}}$). Поэтому изменение $x_{\text{вых}}$ при увеличении $x_{\text{вх}}$ происходит по одному графику, а при уменьшении $x_{\text{вх}}$ — по другому (рис. 17.1, в). В этом случае можно сказать, что характеристика реле имеет петлю гистерезиса. В ряде случаев, когда значения сигналов срабатывания и отпускания близки, гистерезисом можно пренебречь. В этом случае зависимость $x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}})$ показана на рис. 17.1, г. Теперь рассмотрим изменение выходного сигнала при изменении полярности входного сигнала. Если полярность входного сигнала не влияет на полярность выходного сигнала, то при $x_{\text{вх}} = -x_{\text{вых.ср}}$ выходной сигнал скачком изменяется от нуля до $x_{\text{вых.ср}}$ (рис. 17.1, д). Такую характеристику имеют *нейтральные реле*. Если полярность выходного сигнала влияет на полярность выходного сигнала, то при $x_{\text{вх}} = -x_{\text{вых.ср}}$ выходной сигнал скачком изменяется от нуля до $-x_{\text{вых.ср}}$ (рис. 17.1, е). Такую характеристику и подобные ей имеют *поляризованные реле*.

По принципу действия различают электромагнитные реле, магнитные бесконтактные реле, электронные, полупроводниковые и фотоэлектрические реле и др.

Реле применяются в схемах автоматического управления, а также для сигнализации, защиты и блокировки.

Рассмотрим работу реле на примере схемы сигнализации, показанной на рис. 17.2, с использованием реле. Реле состоит из обмотки 1, размещенной на неподвижном сердечнике 2, подвижного якоря 3 и контактов 4, 5, 6. Сердечник с обмоткой и якорем представляет собой электромагнит. Когда под действием напряжения U по обмотке 1 проходит ток I , якорь 3 притягивается к сердечнику 2 и перемещает подвижный контакт 6 влево. При этом контакты 5 и

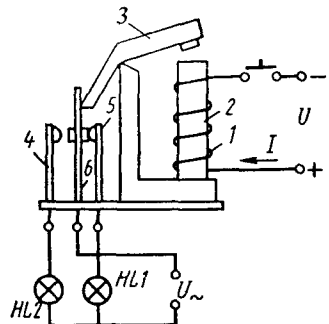


Рис. 17.2. Схема сигнализации с электромагнитным реле

6 размыкаются, а контакты 6 и 4 замыкаются. Контакт 6 размещен на плоской пружине. Когда ток в обмотке 1 прекратится, сила притяжения якоря 3 к сердечнику 2 будет равна нулю и усилие сжатой пружины контакта 6 заставит якорь вернуться в прежнее положение. При этом снова замкнутся контакты 5, 6 и разомкнутся контакты 6 и 4. Таким образом, основными частями реле являются электромагнит, контактный узел и противодействующая пружина.

Сигнализация по схеме на рис. 17.2 работает следующим образом. Пока кнопка не нажата, ток в реле не поступает и горит лампа *HL1* (зеленая), которая питается напряжением сети переменного тока U через замкнутые контакты 5 и 6. Лампа *HL2* (красная) при этом не горит, поскольку контакты 6 и 4 разомкнуты. Если нажата кнопка, то ток идет в обмотку реле, оно срабатывает (т. е. в электромагните якорь 3 притягивается к сердечнику 2) и замыкаются контакты 6, 4, а контакты 5, 6 размыкаются. Загорается лампа *HL2* (красная), получая питание через контакты 6, 4, а лампа *HL1* гаснет. Так будет до тех пор, пока нажата кнопка. Если ее отпустить, то схема возвратится в исходное состояние.

На рис. 17.3 показана электрическая схема, соответствующая рис. 17.2, на которой использованы стандартные условные обозначения элементов. Обмотка реле обозначена прямоугольником. Контактные пары 5—6 и 6—4 показаны в том состоянии, в котором они находятся, когда ток по обмотке реле не проходит. Контакты 5—6 называются размыкающими, контакты 6—4 — замыкающими. Обратите внимание на то, что обмотка реле и его контакты обозначены одинаковыми буквами *K*. На электрической схеме они могут находиться в самых разных местах, хотя конструктивно относятся к одному и тому же устройству. Одно реле может иметь несколько замыкающих и размыкающих контактов, но все они должны обозначаться одинаковыми буквами (или буквами и цифрами, если в схеме используется несколько реле).

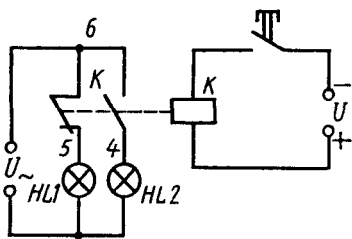


Рис. 17.3. Электрическая схема сигнализации (условное изображение)

Ток и мощность в цепи обмотки реле обычно значительно меньше, чем ток и мощность в цепи нагрузки, переключения в которой осуществляются с помощью контактов этого реле. Поэтому можно говорить об эффекте усиления, обеспечиваемом реле. Это значит, что кнопка в цепи обмотки реле может быть маломощной. Например, вместо нее можно применить путевой выключа-

тель или микропереключатель. А контакты реле уже могут быть достаточно мощными, но они размещены в более благоприятных условиях, чем управляющие контакты путевого выключателя, находящегося непосредственно на производственном механизме. Само реле находится обычно в каком-либо шкафу управления, а в конструкции реле предусмотрены меры по защите контактов.

§ 17.2. Основные параметры и типы электромагнитных реле

К основным параметрам электромагнитных реле относятся следующие.

Ток срабатывания $I_{\text{ср}}$, при протекании которого по обмотке реле происходит срабатывание электромагнита и переключение контактов.

Рабочий ток $I_{\text{р}}$, при котором обеспечивается надежное удержание контактов в переключенном состоянии. Обычно $I_{\text{р}} > I_{\text{ср}}$.

Ток отпускания $I_{\text{отп}}$, при котором электромагнит отпускает и контакты возвращаются в исходное состояние: $I_{\text{отп}} < I_{\text{ср}}$.

Допустимый ток через контакты $I_{\text{к доп}}$.

Допустимое напряжение между контактами $U_{\text{к доп}}$, которое ограничивается напряжением пробоя между разомкнутыми контактами.

Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ — промежуток времени с момента подачи напряжения на обмотку реле до момента переключения контактов.

Время отпускания $t_{\text{отп}}$ — промежуток времени с момента снятия напряжения с обмотки реле до момента отпускания реле.

По мощности управления (электрической мощности, потребляемой обмоткой) реле разделяют на маломощные ($P_{\text{к доп}} < 1$ Вт), средней мощности ($P_{\text{к доп}} = 1 \div 10$ Вт) и мощные ($P_{\text{к доп}} > 10$ Вт). Мощность управления определяется напряжением питания реле и током срабатывания.

По времени срабатывания электромагнитные реле подразделяются на быстросрабатывающие ($t_{\text{ср}} < 50$ мс), нормальные ($t_{\text{ср}} = 50 \div 150$ мс) и замедленные ($t_{\text{ср}} = 0,15 \div 1$ с). Для получения задержки срабатывания на время больше секунды служат специальные реле времени.

В зависимости от питания обмотки реле и способа создания магнитного поля различают электромагнитные реле постоянного и переменного тока. В свою очередь, электромагнитные реле постоянного тока разделяются на нейтральные и поляризованные. В нейтральных реле независимо от направления тока в обмотке срабаты-

вают одни и те же группы контактов. В поляризованных реле при одном направлении тока в обмотке срабатывает одна группа контактов, при другом направлении тока — другая группа контактов.

По характеру движения якоря электромагнитные нейтральные реле разделяют на два типа: с поворотным якорем и с втяжным якорем.

Отечественная промышленность выпускает в большом количестве электромагнитные реле разных типов для разнообразного применения. Для промышленной автоматики в последнее время освоены промежуточные реле серий РП20, РП21 и РПЛ с приставками. Реле РП20 и РП21 применяются в цепях управления электроприводами с питанием от сети переменного тока напряжением до 440 В и от сети постоянного тока напряжением до 220 В. Они могут иметь устройства для гашения дуги и число контактов до 8. Реле РПЛ применяются для коммутации цепей переменного тока напряжением до 660 В и цепей постоянного тока напряжением до 440 В. К этим реле имеются приставки типа ПКЛ, отличающиеся числом контактов (до четырех размыкающих и замыкающих), приставки ПВЛ, обеспечивающие выдержку времени от 0,1 до 180 с, приставки ППЛ, обеспечивающие удерживание контактной системы реле во включенном состоянии после обесточивания обмотки реле.

Наиболее разнообразны реле для радиоэлектроники. Самые большие из них (типов РКА, РПН, МКУ-48 и др.) применяются главным образом в аппаратуре связи, но могут использоваться и для промышленной автоматики. Самые маленькие (типа РЭС) называются миниатюрными. Например, реле РЭС 80 имеет массу 2 г и габаритные размеры 5,3×10,4×10,8 мм. Элементы контактного узла миниатюрных реле крепятся непосредственно на металлических выводах цоколя.

§ 17.3. Электромагнитные реле постоянного тока

Устройство электромагнитных реле постоянного тока показано на рис. 17.4: *a* — с поворотным якорем, *b* — с втяжным якорем. Основные детали и узлы реле имеют следующие обозначения: 1 — катушка на каркасе; 2 — ярмо; 3 — сердечник; 4 — якорь; 5 — штифт отлипания (немагнитная прокладка); 6 — возвратная пружина; 7 — подвижные контакты; 8' и 8'' — неподвижные контакты.

Магнитопровод электромагнитного механизма реле состоит из неподвижной и подвижной частей. Подвижная часть называется якорем. Неподвижная часть состоит из сердечника, который нахо-

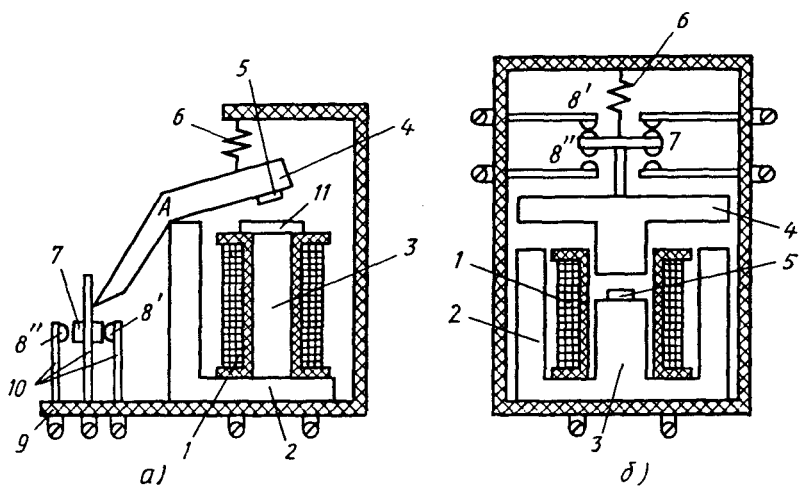


Рис. 17.4. Электромагнитные реле постоянного тока

дится внутри катушки, и ярма — той части магнитопровода, которая охватывает катушку.

В реле с поворотным ярком (рис. 17.4, а) электромагнитный механизм и контактный узел закреплены на общем изоляционном основании 9. При протекании тока по обмотке катушки 1 ярко 4 притягивается к сердечнику 3 и совершает поворот относительно точки опоры А. При этом ярко перемещает подвижный контакт 7, который размыкается с неподвижным контактом 8' и замыкается с неподвижным контактом 8''. Контакты закреплены на плоских пружинах 10, которые служат и для подсоединения к внешней цепи. Когда ток через обмотку реле прекращается, ярко поворачивается в исходное положение.

В некоторых реле это происходит под действием силы тяжести ярка, в некоторых — под действием контактных пружин или специальной возвратной пружины 6. Для того чтобы ярко при обесточивании обмотки не прилипал к сердечнику из-за остаточного намагничивания магнитопровода, на ярке устанавливается штифт отлипания 5 — пластинка из немагнитного материала, обеспечивающая зазор примерно в 0,1 мм между ярком и сердечником при срабатывании реле. Обычно сердечник имеет полюсный наконечник 11 для уменьшения магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора.

В электромагнитном реле с втяжным ярком (рис. 17.4, б) при протекании тока по обмотке катушки 1 ярко 4 втягивается внутрь

ее до упора в сердечник 3. При этом подвижные мостиковые контакты 7 размыкаются с неподвижными контактами 8' и замыкаются с неподвижными контактами 8". Возврат якоря 4 в исходное положение при обесточивании реле происходит под действием возвратной пружины 6. Как и в реле с поворотным якорем, для исключения залипания якоря служит штифт 5. Для возврата якоря в исходное положение может использоваться и сила тяжести якоря.

§ 17.4. Последовательность работы электромагнитного реле

Рассмотрим последовательность работы электромагнитного реле с момента подачи напряжения на обмотку реле до момента снятия напряжения с обмотки и возвращения якоря в исходное положение. Поскольку обмотка реле имеет индуктивное сопротивление, ток в ней не может измениться скачком. Изменение тока (как нарастание, так и убывание) происходит плавно по экспоненциальной кривой (рис. 17.5).

На рис. 17.5, показывающем изменение тока обмотки реле во времени, можно выделить четыре участка.

Участок I характеризует срабатывание реле. Он начинается с момента подачи напряжения на обмотку реле (точка O) и заканчивается в момент надежного замыкания контактов (точка A). На этом участке происходит срабатывание реле, и продолжительность его называется временем срабатывания $t_{ср}$. Сразу после подачи напряжения ток в обмотке реле нарастает довольно быстро, поскольку постоянная времени сравнительно мала. Постоянная времени катушки, имеющей сопротивление R и индуктивность L , равна отношению L/R , а пока якорь не начал приближаться к сердечнику, магнитная цепь имеет большой зазор и, следовательно, индуктивность мала. Когда ток в обмотке реле достигнет значения $I_{тр}$, при котором начинает движение (трогается) якорь, зазор начнет уменьшаться, индуктивность будет возрастать, а скорость нарастания тока будет уменьшаться. Время срабатывания состоит из времени трогания $t_{тр}$ и времени движения якоря

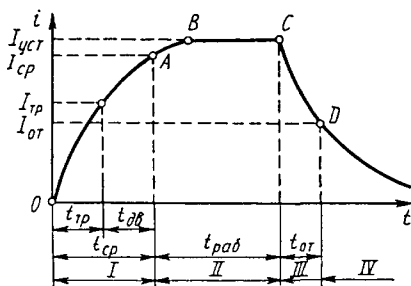


Рис. 17.5. График изменения тока в обмотке реле

ря $t_{дв}$ ($t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}$). В точке A ток имеет значение $I_{ср}$. Ток срабатывания больше тока трогания, поскольку за время $t_{дв}$ продолжалось его нарастание.

В точке A закончилось движение якоря. Начинается участок II , характеризующий реле в рабочем состоянии. Продолжительность этого участка $t_{раб}$. В начале этого участка ток продолжает увеличиваться. В точке B рост тока прекращается, значение его определяется отношением напряжения на обмотке U к активному сопротивлению обмотки R . Это установившийся ток $I_{уст} = U/R$. Участок AB необходим для того, чтобы обеспечить надежное притяжение якоря к сердечнику, исключаящее вибрацию якоря при сотрясениях реле. Отношение установившегося тока $I_{уст}$ к току срабатывания $I_{ср}$ называется коэффициентом запаса реле по срабатыванию $K_{зап} = I_{уст} / I_{ср}$; $K_{зап} = 1,5 \div 2$. В то же время $I_{уст}$ должен быть ограничен по соображениям нагрева.

Участок III начинается с момента снятия напряжения с обмотки реле. В точке C начинается уменьшение тока, и в точке D якорь начинает отходить от сердечника (отпускает). В этой точке ток $I_{от}$ не обеспечивает такую силу притяжения, которая превышала бы противодействующую силу пружины. Время отпускания состоит из времени трогания и времени движения якоря до размыкания контактов: $t_{от} = t_{тр} + t_{дв}$. Отношение тока отпускания к току срабатывания называется коэффициентом возврата: $K_{в} = I_{от} / I_{ср}$; $K_{в} = 0,4 \div 0,8$.

На участке IV якорь возвращается в исходное состояние и остается в нем до тех пор, пока не будет снова подано напряжение на обмотку реле.

§ 17.5. Тяговая и механическая характеристики электромагнитного реле

Перемещение якоря электромагнитного реле происходит под действием двух сил: силы тяги, обусловленной электромагнитным полем, и противодействующей силы, обусловленной упругой деформацией пружин. Обе эти силы зависят от перемещения якоря, т. е. от величины зазора δ между якорем и сердечником.

Зависимость между электромагнитной силой тяги F_3 и величиной зазора δ называется *тяговой характеристикой* $F_3 = f(\delta)$. Зависимость между противодействующей силой F_m и величиной зазора δ называется *механической характеристикой*: $F_m = f(\delta)$.

Рассмотрим сначала тяговую характеристику электромагнитного механизма реле. К обмотке реле, имеющей активное сопротивление

R и число витков ω , приложено напряжение u . Под действием этого напряжения по обмотке протекает ток i и создается магнитный поток Φ .

Уравнение равновесия напряжения в процессе срабатывания реле записывается в соответствии со вторым законом Кирхгофа и законом электромагнитной индукции:

$$u = Ri + \omega d\Phi/dt. \quad (17.1)$$

Умножим выражение (17.1) почленно на idt и проинтегрируем его за время от 0 до t , в течение которого магнитный поток возрастает от 0 до Φ :

$$\int_0^t ui dt = \int_0^t i^2 R dt + \omega \int_0^\Phi i d\Phi. \quad (17.2)$$

Левая часть уравнения (17.2) — это вся энергия, полученная от источника питания. Первое слагаемое в правой части — это энергия, расходуемая на нагрев обмотки. Второе слагаемое в правой части — это энергия, запасенная в магнитном поле реле:

$$W = \omega \int_0^\Phi i d\Phi. \quad (17.3)$$

Данный интеграл может быть представлен графически как площадь фигуры, заключенной между кривой намагничивания и осью ординат (рис. 17.6). Энергия магнитного поля состоит из энергии, которая сосредоточена в воздушном зазоре (заштрихованная площадь $Ob\Phi$ на рис. 17.6, а), и энергии, распределенной в стальных частях магнитопровода (заштрихованная площадь Oab на рис. 17.6, а). Магнитопровод реле обычно не насыщен, т. е. работа реле происходит на прямолинейном участке кривой намагничивания. Поскольку воздушный зазор имеет сравнительно большую величину, можно пренебречь второй частью энергии (площадью Oab).

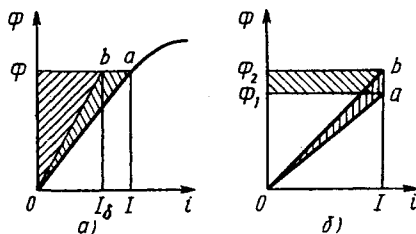


Рис. 17.6. Графическое изображение энергии, запасенной в магнитном поле реле

Магнитную энергию, запасенную в воздушном зазоре, приближенно определяем как площадь всего треугольника $Oa\Phi$:

$$W_{\delta} \approx I\omega\Phi/2. \quad (17.4)$$

Теперь рассмотрим процесс изменения энергии магнитного поля при перемещении якоря, полагая ток в обмотке реле неизменным: $I = \text{const}$. При перемещении якоря уменьшается зазор, а магнитный поток увеличивается от Φ_1 до Φ_2 . Следовательно, изменение энергии ΔW можно приближенно определить как площадь прямоугольника $\Phi_1 ab\Phi_2$ на рис. 17.6, б:

$$\Delta W = I\omega(\Phi_2 - \Phi_1). \quad (17.5)$$

До начала движения якоря энергия поля определялась площадью треугольника $Oa\Phi_1$, после перемещения якоря на δ энергия поля определялась площадью треугольника $Ob\Phi_2$. Разница этих площадей и даст изменение магнитной энергии в воздушном зазоре:

$$\Delta W_{\delta} = I\omega\Phi_2/2 - I\omega\Phi_1/2 = I\omega(\Phi_2 - \Phi_1)/2. \quad (17.6)$$

Изменение энергии ΔW по уравнению (17.5) произошло за счет поступления энергии из сети. Половина ее, как видно из уравнения (17.6), пошла на изменение энергии в воздушном зазоре. Куда же была израсходована вторая половина энергии ΔW , численно примерно равная ΔW_{δ} ?

Эта вторая половина энергии (на рис. 17.6, б она соответствует площади треугольника Oab) расходуется на создание механической работы $A_{\text{мех}}$ при перемещении якоря под действием электромагнитной силы F_3

$$A_{\text{мех}} = F_3\delta \approx \Delta W_{\delta}. \quad (17.7)$$

Подставляя в (17.7) выражение (17.6), получим

$$A_{\text{мех}} = I\omega(\Phi_2 - \Phi_1)/2,$$

откуда

$$F_3 = I\omega(\Phi_2 - \Phi_1)/(2\delta). \quad (17.8)$$

Магнитный поток в воздушном зазоре создается за счет магнитодвижущей силы (МДС) $(I\omega)_{\delta}$ и пропорционален магнитной проводимости зазора G_{δ} .

Так как мы приняли $I = \text{const}$, то и МДС $(I\omega)_{\delta} = \text{const}$, а изменение потока $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ происходит за счет изменения проводимости воздушного зазора ΔG_{δ} :

$$\Delta\Phi = (I\omega)_{\delta}\Delta G_{\delta}. \quad (17.9)$$

Подставляя (17.9) в (17.8), получим

$$F_3 = (I\omega)_\delta^2 \Delta G_\delta / (2\delta). \quad (17.10)$$

Для воздушного зазора длиной δ между двумя плоскостями, площадь сечения которых s_δ , магнитная проводимость определяется по формуле

$$G_\delta = \mu_0 s_\delta / \delta, \quad (17.11)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Подставляя (17.11) и значение μ_0 в (17.10), получим электромагнитную силу при изменении зазора от δ до нуля:

$$F_3 = 2\pi 10^{-7} (I\omega)_\delta^2 s_\delta / \delta^2. \quad (17.12)$$

Эту формулу можно преобразовать, учитывая, что $\Phi_\delta = B_\delta s_\delta = (I\omega)_\delta G_\delta s_\delta$:

$$F_3 = \Phi_\delta^2 / (2\mu_0 s_\delta) \approx 4B_\delta^2 s_\delta 10^5. \quad (17.13)$$

Из (17.12) следует, что электромагнитное тяговое усилие прямо пропорционально квадрату МДС, т. е. не зависит от направления тока в обмотке реле. Эта сила тяги обратно пропорциональна квадрату длины δ воздушного зазора. Тяговая характеристика $F_3 = f(\delta)$ показана на рис. 17.7. В зоне малых зазоров реальная тяговая характеристика отличается от теоретической, построенной по (17.12), — штриховая кривая на рис. 17.7. Напомним, что мы выводили уравнение силы тяги, приняв некоторые допущения. При малых зазорах необходимо учитывать магнитное сопротивление стальных участков магнитопровода, которыми мы пренебрегли.

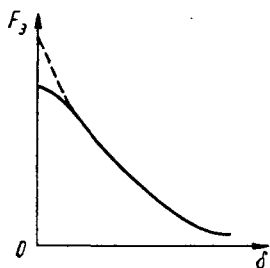
Рассмотрим теперь механическую характеристику реле. Перемещению якоря реле в направлении сердечника противодействуют силы упругих элементов. Такими упругими элементами являются возвратная и контактная пружины.

Подвижный контакт реле обычно размещается на плоской пружине, представляющей собой упругую металлическую пластину, один конец которой жестко закреплен, а другой — может перемещаться (см., например, контакт *б* на рис. 17.2). Противодействующая сила, развиваемая плоской пружиной, определяется по формуле

$$F_M = \frac{3EJ}{l^3} x, \quad (17.14)$$

Рис. 17.7. Тяговая характеристика

где E — модуль упругости материала пружины



жины; $J = bh^3/12$ — момент инерции пружины; b — ширина; h — толщина пружины; l — расстояние от места закрепления пружины до точки приложения силы; x — перемещение пружины в точке приложения силы.

В исходном состоянии пружина не деформирована, сила равна нулю. Перемещение пружины x при срабатывании реле будет происходить в направлении уменьшения зазора, поэтому зависимость $F_m(\delta)$ имеет вид

$$F_m = \frac{3EJ}{l^3}(\delta - x). \quad (17.15)$$

В качестве возвратных обычно используются витые пружины. Зависимость усилия, развиваемого винтовой пружиной, от перемещения имеет вид, аналогичный уравнению (17.15):

$$F_m = \frac{GJ}{2\pi r_n^3}(\delta - x) + F_{нач}, \quad (17.16)$$

где G — модуль упругости при сдвиге; J — момент инерции при кручении; r — радиус витка пружины; n — число витков; $F_{нач}$ — сила предварительного натяга пружины.

Графики зависимости противодействующих сил пружин имеют вид прямых линий, поскольку эти силы пропорциональны деформации (перемещению) пружины.

Рассмотрим построение механической характеристики реле на примере контактной группы, показанной на рис. 17.8, а. При срабатывании реле якорь 1 сначала преодолевает натяжение винтовой пружины 4, затем, когда конец рычага доходит до контактной пластины 2, добавляется усилие от ее деформации, а когда контакт пластины 2 замыкается с контактом пластины 3, добавляется и усилие от деформации этой пластины 3. Механическая характеристика $F_m = f(\delta)$ показана на рис. 17.8, б. В исходном состоянии на якорь действует лишь начальное усилие $F_{нач}$ — предварительный натяг пружины 4.

При изменении зазора δ на δ_1 будет холостой ход рычага якоря до соприкосновения с пластиной 2, противодействующая сила возрастает пропорционально деформации винтовой пружины 4 (участок ab).

Затем наклон прямой резко возрастает, поскольку началась деформация пластины 2 (участок bc). Такой наклон сохраняется при изменении зазора δ на δ_2 — холостой ход пластины 2 до соприкосновения с пластиной 3. Затем наклон прямой еще возрастает, поскольку началась деформация пластины 3 (участок cd). Рост проти-

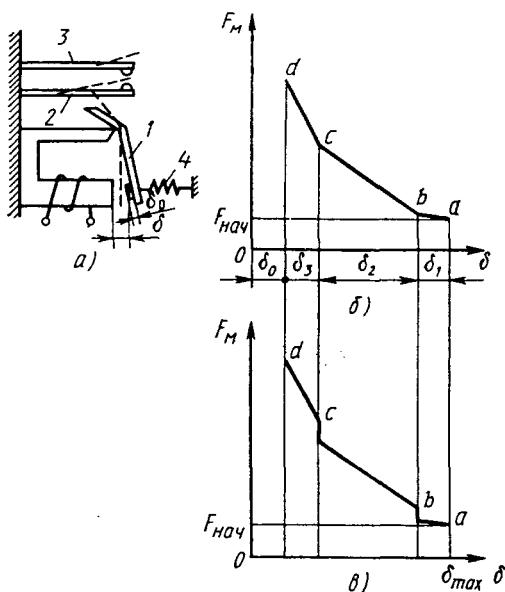


Рис. 17.8. Построение механической характеристики реле

водействующего усилия прекращается, когда якорь полностью притянется к сердечнику. Величина зазора при этом равна толщине штифта отлипания δ_0 . Из построения видно, что механическая характеристика имеет вид ломаной линии, где каждый отрезок характеризует работу какой-либо группы пружин.

В том случае, когда все пружины, создающие противодействующее усилие в контактной группе реле, имеют начальное натяжение, переход с одного отрезка на другой происходит скачком (в точках b и c на рис. 17.8, в).

Для работы реле необходимо, чтобы тяговая и механическая характеристики были согласованы. Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика, соответствующая току срабатывания, везде находилась выше механической характеристики. При начальном зазоре эти характеристики имеют общую точку (точка A на рис. 17.9). Для

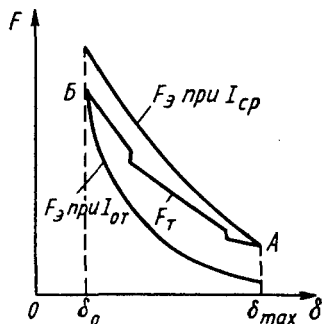


Рис. 17.9. Согласование тяговой и механической характеристик

отпускания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика, соответствующая току отпускания, везде находилась ниже механической характеристики. При минимальном зазоре эти характеристики могут иметь общую точку (точка *Б* на рис. 17.9).

§ 17.6. Основы расчета магнитопровода электромагнитного реле

Для определения тяговой характеристики проводят расчет магнитной цепи реле. При этом определяют и необходимую намагничивающую силу обмотки реле. Используются аналитические (по формулам) и графические (с помощью построения графиков) методы расчета.

Расчет магнитных цепей проводится на основании законов, аналогичных по форме записи законам Ома и Кирхгофа для электрических цепей. В этом случае вместо тока берется магнитный поток, вместо источника ЭДС — источник МДС, вместо электрического сопротивления — магнитное. При расчете магнитных цепей обычно требуется учитывать магнитные потоки рассеяния, замыкающиеся по воздуху. На рис. 17.10, *а* показан эскиз магнитной цепи реле, а на рис. 17.10, *б* — соответствующая этой цепи схема замещения, где учтены магнитные сопротивления отдельных участков, имеющих постоянное сечение: $R_{сер}$ — сердечника, $R_{яр}$ — ярма (т. е. той части неподвижного магнитопровода, на которой не размещена катушка обмотки), $R_{як}$ — якоря. Магнитное сопротивление воздушного зазора R_{δ} , а магнитное сопротивление на пути потока рассеяния принято сосредоточенным и обозначено R_{σ} . На самом деле потоки рассеяния распределены в пространстве между сердечником и ярмом, их

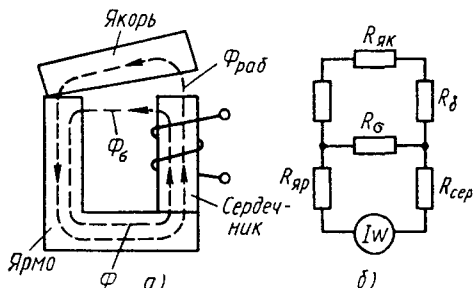


Рис. 17.10. Магнитная цепь реле и ее схема замещения

пути показаны на эскизе (рис. 17.10, а). Рабочий поток $\Phi_{\text{раб}}$, создающий тяговое усилие, проходит через зазор. Источник МДС (катушка реле с током) создает магнитный поток $\Phi = \Phi_{\text{раб}} + \Phi_{\sigma}$, часть которого не создает тягового усилия, рассеивается. Необходимо стремиться к тому, чтобы потоки рассеяния были минимальными.

Для различных типов конструкций магнитопровода реле рассчитаны коэффициенты рассеяния σ , показывающие, во сколько раз должен быть больше общий поток, чем поток рассеяния:

$$\sigma = \Phi / \Phi_{\text{раб}}.$$

Эта величина приводится в справочниках по расчету электрических аппаратов. Она находится в пределах от 1,3 до 2,5. Величина σ обычно увеличивается с увеличением хода якоря. Если задаться величиной σ , то схема замещения упрощается: из нее исключается магнитное сопротивление R_{σ} .

Сложность расчета магнитной цепи заключается в том, что магнитные сопротивления стальных участков не являются постоянными величинами, они зависят от степени насыщения, от магнитных свойств материала.

Для изготовления магнитопроводов электромагнитных реле используют магнитомягкие материалы с высокой магнитной проницаемостью в средних полях (с напряженностью 160—8000 А/м). Чаще всего применяют электротехнические кремнистые стали (горячекатаные и холоднокатаные), а для высокочувствительных реле — пермаллой (железоникелевые сплавы).

Рассмотрим аналитический метод расчета. Пусть заданы размеры и материалы каждого участка магнитной цепи. По заданному значению магнитного потока требуется определить МДС катушки.

1. Для каждого участка магнитной цепи определяется магнитная индукция $B = \Phi/s$, где s — площадь поперечного сечения участка.

По магнитной индукции определяют напряженность магнитного поля. Для участков из ферромагнитных материалов — по кривым намагничивания, для воздушных зазоров — по формуле $H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0$.

3. Требуемая МДС определяется как сумма падений МДС на всех участках последовательной магнитной цепи (т. е. по закону полного тока):

$$I\omega = \sum_{k=1}^{k=n} H_k l_k,$$

где l_k — длина k -го участка; H_k — напряженность магнитного поля на k -м участке.

Графический метод расчета обычно используется при решении обратной задачи: по заданной намагничивающей силе определить магнитный поток и соответствующую ему силу тяги. Заранее неизвестно, как распределены падения МДС на отдельных участках, чему равна магнитная индукция на этих участках, поскольку магнитный поток связан с МДС нелинейной зависимостью. Задача решается методом последовательных приближений. Задаемся произвольно несколькими значениями магнитного потока и определяем соответствующие им значения МДС. По результатам расчета строим кривую намагничивания данной конкретной цепи $\Phi = f(I\omega)$. По этой кривой уже нетрудно найти значение магнитного потока, соответствующее заданной МДС. Значения силы тяги можно затем рассчитать по формуле (17.12).

Для расчета магнитной цепи реле при разных значениях воздушного зазора используется следующий графоаналитический метод. По произвольно заданным значениям магнитного потока находят падение МДС на стальном участке цепи $U_{м.ст}$ (т. е. в ярме и якоре, изготовленных из стали) и в воздушном зазоре $U_{м.в}$. Затем из начала координат строят кривую $\Phi = f(U_{м.ст})$. На оси абсцисс находят точку a , соответствующую заданному значению МДС ($I\omega$). Из этой точки проводят влево прямую $\Phi = f(I\omega - U_{м.в})$. В точке пересечения этих кривых находят значение искомого потока, а по оси абсцисс — значения $U_{м.ст}$ и $U_{м.в}$ (рис. 17.11). Для построения тяговой характеристики проводят ряд прямых для разных значений зазоров. При этом определяется ряд значений индукции, соответствующих различным зазорам. По найденным значениям индукции в зазоре и уравнению (17.12) определяют силу тяги и строят тяговую характеристику.

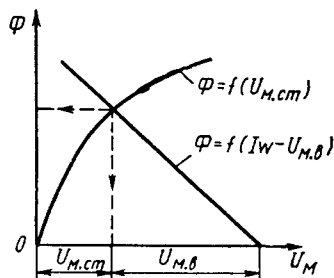


Рис. 17.11. К расчету магнитной цепи реле графоаналитическим методом

§ 17.7. Основы расчета обмотки реле

В задачу расчета обмотки реле входит определение диаметра провода и числа витков. Конструкция катушки фактически определена конструкцией и размерами магнитной системы реле. По форме различают круглые и прямоугольные катушки реле. Круглая катушка (рис. 17.12, *а*) характеризуется внутренним ($D_{\text{вн}}$) и наружным ($D_{\text{нар}}$) диаметрами намотки, длиной намотки l_n , длиной каркаса катушки L_k . Сечение катушки при продольном разрезе катушки называется окном намотки. Площадь окна намотки

$$Q_0 = l_n H, \quad (17.17)$$

где $H = (D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}})/2$ — высота окна намотки. Средняя длина витка

$$l_{\text{ср}} = \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}})/2. \quad (17.18)$$

Прямоугольная катушка (на рис. 17.12, *б* показана с торца) характеризуется двумя внутренними размерами (a и b) и двумя наружными размерами (A и B). Остальные размеры совпадают с размерами круглой катушки.

Высота окна намотки $H = (A - a)/2 = (B - b)/2$. Средняя длина витка определяется по формуле

$$l_{\text{ср}} = 2(a + b) + \pi H, \quad (17.19)$$

где второе слагаемое учитывает закругление провода.

Для обмоток реле чаще всего применяют медные изолированные провода с удельным сопротивлением $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. В зависимости от изоляции различают марки проводов ПЭЛ (эмалевая лаковой изоляция), ПЭВ (эмалевая винифлексовая изоля-

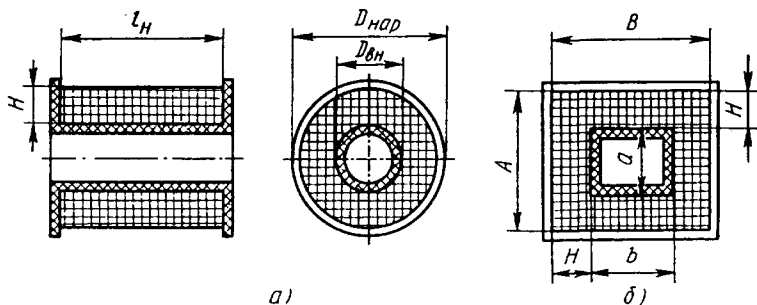


Рис. 17.12. Катушки реле

ция), ПЭЛШО (с шелковой оплеткой поверх эмалевой изоляции), ПЭТВ (теплостойкая изоляция).

Существует три способа намотки провода на катушку:

- 1) рядовая намотка (рис. 17.13, *а*), когда витки в ряду расположены плотно, а витки соседних рядов лежат точно друг над другом;
- 2) шахматная намотка (рис. 17.13, *б*), когда витки очередного ряда расположены в углублениях между витками нижнего ряда;
- 3) намотка навалом, неупорядоченная намотка, когда витки укладываются рядами без соблюдения соосности слоев.

Важной характеристикой намотки является коэффициент заполнения, который учитывает заполнение окна катушки медью провода.

Коэффициентом заполнения называется отношение сечения меди катушки к площади окна:

$$k_3 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega}{Q_0}, \quad (17.20)$$

где d — диаметр провода (без изоляции); ω — число витков.

Коэффициент заполнения зависит от изоляции провода и катушки, способа намотки. Более высокие коэффициенты заполнения обеспечивает упорядоченная намотка (особенно шахматная). Однако для тонких проводов ($d < 0,35$ мм) упорядоченную намотку выполнить трудно и применяется, как правило, намотка навалом. Для тонких проводов относительная толщина изоляции больше, чем для толстых проводов. Например, для провода диаметром $d = 0,1$ мм диаметр с изоляцией ПЭЛ составляет 0,12 мм, с изоляцией ПЭВ-2 — 0,13 мм, с изоляцией ПЭЛШО — 0,175 мм, т. е. увеличивается соответственно в 1,2; 1,3; 1,75 раза. Для провода диаметром $d = 1,0$ мм диаметр с изоляцией ПЭЛ составляет 1,07 мм, изоляцией ПЭВ-2 — 1,11 мм, с изоляцией ПЭЛШО — 1,135 мм, т. е. увеличивается соответственно в 1,07; 1,11; 1,135 раза. Поэтому для обмоток из толстых проводов коэффициент заполнения значительно выше, чем для тонких проводов. Надо также отметить, что для мощных реле используются бескаркасные обмотки. Они наматываются на временные

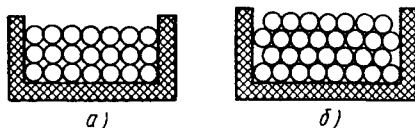


Рис. 17.13. Способы намотки провода

разъемные шаблоны, затем закрепляются с помощью изолирующей ленты и пропитки лаками и устанавливаются непосредственно на сердечник реле.

Сопротивление обмотки реле

$$R = 4\rho l_{\text{ср}} \omega / (\pi d^2) = \rho l_{\text{ср}} \omega / q, \quad (17.21)$$

где $q = \pi d^2/4$ — сечение провода.

В зависимости от условий работы различают реле напряжения, работающие при неизменном напряжении ($U = \text{const}$), и реле тока, работающие при заданном токе ($I = \text{const}$).

Реле напряжения включается на полное напряжение источника питания и является в своей цепи единственной нагрузкой. Ток обмотки и, следовательно, МДС зависят от сопротивления обмотки. Если заданы напряжение U и МДС $I\omega$, то диаметр провода обмотки определяется по формуле

$$d = 2\sqrt{\rho l_{\text{ср}} (I\omega) / U\pi}. \quad (17.22)$$

По справочнику выбирается ближайший больший стандартный диаметр провода. Число витков определяется с учетом коэффициента заполнения, выбираемого из справочника. Ток в обмотке определяется по закону Ома: $I = U/R$.

Выбранный диаметр провода проверяется на нагрев по допустимой плотности тока $\Delta_{\text{доп}} = 2,5 \div 3 \text{ А/мм}^2$ (для новейших марок проводов с улучшенной изоляцией допускается большая плотность тока):

$$I/q \leq \Delta_{\text{доп}}. \quad (17.23)$$

Реле тока может включаться последовательно с нагрузкой, имеющей значительно большее сопротивление, чем обмотка реле. Реле тока служат обычно для отключения нагрузки при аварийных значениях тока. Их называют максимальными реле. В практике используют также минимальные реле, действующие при уменьшении тока в нагрузке. При расчете обмотки токового реле число витков определяется по заданным значениям МДС и тока: $\omega = I\omega/I$.

Диаметр провода определяется с учетом коэффициента заполнения k_3 на основании известной площади окна намотки Q_0 с помощью уравнения (17.20):

$$d = 2\sqrt{\frac{k_3 Q_0}{\pi \omega}}. \quad (17.24)$$

После выбора стандартного диаметра (сечения) провода необходимо проверить его на нагрев по допустимой плотности тока.

§ 17.8. Электромагнитные реле переменного тока

В предыдущих параграфах рассматривалась работа реле при питании от сети постоянного тока. При подаче в обмотку реле переменного тока якорь также будет притягиваться к сердечнику. Это объясняется тем, что, согласно уравнению (17.12), электромагнитное тяговое усилие пропорционально квадрату МДС, а значит, и квадрату тока в обмотке. Поэтому, хотя переменный ток периодически меняет свое направление, знак тягового усилия не будет зависеть от направления тока. Таким образом, всегда будет действовать именно сила притяжения, а не сила отталкивания. Переменный ток, протекая по обмотке реле, создает в рабочем зазоре переменный магнитный поток

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta \max} \sin \omega t. \quad (17.25)$$

Подставляя (17.25) в уравнение (17.13), получим

$$F_{\delta} = F_{\delta \max} \sin^2 \omega t, \quad (17.26)$$

где

$$F_{\delta \max} = \Phi_{\delta \max}^2 / (2\mu_0 s_{\delta}). \quad (17.27)$$

На рис. 17.14 показаны графики изменения тока i от времени в обмотке реле и электромагнитного тягового усилия F_{δ} . Якорь притягивается к сердечнику под действием среднего значения электромагнитного усилия, т. е. его постоянной составляющей $F_{\delta \text{cp}}$, показанной на рис. 17.14 прямой линией. Величина $F_{\delta \text{cp}}$ определяется из уравнения (17.26), если заменить $\sin^2 \omega t$ на $(1 - \cos 2\omega t)/2$:

$$F_{\delta} = 0,5F_{\delta \max}(1 - \cos 2\omega t) = F_{\delta \text{cp}} - 0,5F_{\delta \max} \cos 2\omega t, \quad (17.28)$$

где

$$F_{\delta \text{cp}} = F_{\delta \max} / 2 = \Phi_{\delta \max}^2 / (4\mu_0 s_{\delta}), \quad (17.29)$$

а переменная составляющая $0,5F_{\delta \max} \cos 2\omega t$ изменяется с двойной частотой.

Из уравнения (17.29) видно, что при одинаковых конструктивных размерах реле и равных значениях максимальной магнитной индукции среднее значение электромагнитного усилия $F_{\delta \text{cp}}$ реле переменного тока вдвое меньше, чем реле постоянного тока. Дважды за период электромагнитное усилие обращается в нуль. Следовательно, якорь реле может вибрировать, периодически оттягиваясь от сердечника возвратной пружиной. Конечно, из-за массы якоря сила инерции не позволяет ему совершать колебательные движения. Пе-

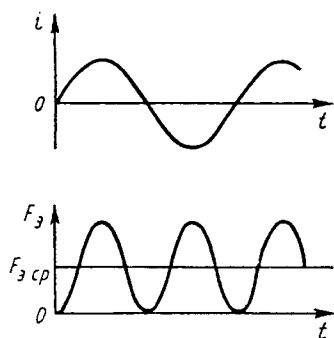


Рис. 17.14. Графики изменения тока и тягового усилия реле переменного тока

риодическое изменение силы тяги является именно как дрожание якоря, сопровождаемое характерным гудением на частоте 100 Гц (при питании от сети промышленной частоты 50 Гц). В реле переменного тока для устранения вибрации якоря применяются специальные конструктивные меры. Следует также отметить, что наличие переменного потока в магнитопроводе реле приводит к появлению вихревых токов в стали. Эти токи нагревают сердечник, ярмо и якорь реле, на что бесполезно расходуется энергия. Для уменьшения вихревых токов и потерь

энергии магнитопровод набирается из отдельных тонких (толщиной 0,5 или 0,35 мм) листов электротехнической стали, которые изолируют друг от друга, что увеличивает сопротивление на пути вихревых токов, уменьшает сечение стали на этом пути.

Реле постоянного тока получили большее распространение, чем реле переменного тока. Главное их преимущество — меньшие габариты и большая чувствительность. При наличии сети переменного тока можно включать реле постоянного тока через выпрямительные устройства.

Реле переменного тока имеет еще одну важную особенность по сравнению с реле постоянного тока. При питании обмотки реле от сети переменного тока сопротивление этой обмотки имеет как активную составляющую R , так и индуктивную составляющую $X_L = \omega L$, определяемую индуктивностью обмотки L . При подключении обмотки реле к постоянному напряжению ток не зависит от перемещения якоря, он остается постоянным и определяется сопротивлением R .

Рассмотрим три основных способа устранения вибрации реле переменного тока: применение короткозамкнутого витка; применение многофазной обмотки; применение массивного якоря.

Наиболее часто для исключения вибрации реле переменного тока используется короткозамкнутый виток, охватывающий часть сердечника (рис. 17.15, а, б). В сердечнике делается щель на небольшую глубину (обычно пропиливается). В эту щель вставляется одна сторона короткозамкнутого витка, обычно представляющего собой медную штампованную прямоугольную рамку. Принцип действия короткозамкнутого витка заключается в следующем. Переменный

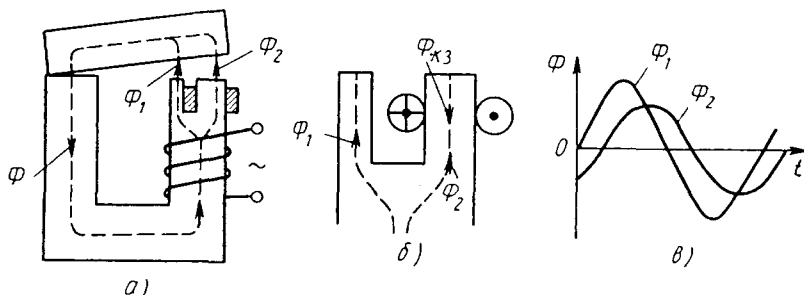


Рис. 17.15. Короткозамкнутый виток в реле переменного тока

магнитный поток Φ , созданный током в обмотке реле, проходит по сердечнику и разветвляется на две части: один поток Φ_1 проходит по стали, не пронизывая плоскость витка; другой поток Φ_2 проходит по стали, наводя в витке переменную ЭДС, как во вторичной обмотке трансформатора. Так как виток замкнут накоротко, то в нем под действием наведенной ЭДС пойдет ток, создавая магнитный поток $\Phi_{кз}$, препятствующий изменению магнитного потока Φ_2 (правило Ленца). Это приводит к отставанию по фазе потока Φ_2 от потока Φ_1 . Следовательно, в рабочем зазоре реле переменного тока будут действовать два сдвинутых во времени потока (рис. 17.15, б). Поэтому электромагнитная тяговая сила ни в один из моментов времени не будет равна нулю; когда магнитный поток Φ_1 равен нулю, то сила создается еще не равным нулю потоком Φ_2 , а когда этот поток Φ_2 станет равен нулю, уже поток Φ_1 возрастет и обеспечит создание тяговой силы. С помощью короткозамкнутого витка удастся обеспечить отставание магнитного потока Φ_2 от Φ_1 на 60 – 70° . Но за счет встречно направленного потока $\Phi_{кз}$ величина Φ_2 получается меньше, чем Φ_1 .

Обеспечить равенство потоков Φ_2 и Φ_1 и сдвиг их по фазе на 90° можно с помощью двухфазного реле. Такое реле имеет два сердечника с отдельными обмотками и общий якорь. В цепь одной из обмоток включается конденсатор, обеспечивающий сдвиг по фазе токов в обмотках на 90° . При таком сдвиге фаз и равенстве магнитных потоков результирующая сила притяжения якоря будет иметь постоянное значение. При наличии трехфазной сети электромагнитный механизм реле может быть выполнен в виде Ш-образного сердечника с тремя обмотками (на каждом стержне — одна обмотка) и плоского якоря. Обмотки обычно соединяются звездой и включаются в трехфазную сеть. Три магнитных потока в трех рабочих зазорах будут создавать постоянное тяговое усилие на якоря. Однако точка

приложения этого усилия будет перемещаться по якору; ведь сначала якорь сильнее притягивается к крайнему стержню, потом к среднему, к другому крайнему и т. д.

Утяжеленный якорь благодаря большой инерции не может вибрировать с удвоенной частотой (2ω), так как он не успевает отходить от сердечника в те моменты времени, когда ток в обмотке реле проходит через нуль и тяговое усилие равно нулю. Однако применение утяжеленного якоря приводит к увеличению размеров реле и уменьшению чувствительности. Этот способ применяется редко, например когда исполнительный механизм, связанный с якорем реле, имеет большую инерцию.

При подключении обмотки реле к переменному напряжению ток будет изменяться в зависимости от перемещения якоря. Действительно, электромагнитный механизм реле похож на электромагнитный датчик перемещения: его индуктивность L возрастает с уменьшением воздушного зазора. Следовательно, при притягивании якоря к сердечнику индуктивное сопротивление будет возрастать, а ток — уменьшаться. Поэтому тяговое усилие реле переменного тока в отличие от реле постоянного тока мало увеличивается или вообще не увеличивается по мере уменьшения воздушного зазора.

§ 17.9. Быстродействие электромагнитных реле

В § 17.2 в числе основных параметров электромагнитных реле были отмечены параметры, характеризующие быстродействие реле: время срабатывания $t_{ср}$ и время отпускания $t_{отп}$. Эти параметры определяются при анализе переходных процессов, происходящих при включении и отключении реле. Рассмотрим эти процессы применительно к обмотке реле постоянного тока.

Цепь обмотки реле можно представить в виде последовательно-соединения активного сопротивления R и индуктивности L . Переходный процесс при включении реле можно рассматривать как известный из электротехники случай включения катушки индуктивности на постоянное напряжение (рис. 17.16). С момента замыкания ключа K возникает переходный процесс, в течение которого ток в обмотке реле увеличивается от нуля до некоторого установившегося значения $i = I_{уст}$, изменяются и напряжения u_R и u_L . Электрическое состояние цепи по схеме рис. 17.16 в любой момент переходного процесса характеризуется уравнением

$$U = u_R + u_L = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (17.30)$$

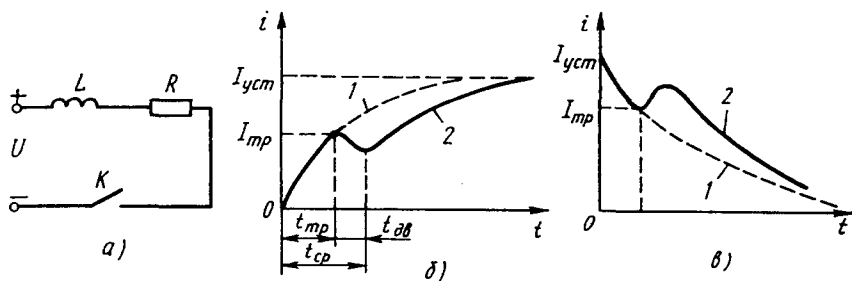


Рис. 17.16. Переходные процессы при включении и выключении реле постоянного тока

Решение этого уравнения относительно тока имеет вид

$$i = I_{уст}(1 - e^{-t/T}), \quad (17.31)$$

где $I_{уст} = U/R$; $T = L/R$ — постоянная времени цепи.

График зависимости $i = f(t)$ представляет собой экспоненту (пунктирная кривая 1 на рис. 17.16, б). Формула (17.31) получена в предположении, что индуктивность L обмотки реле постоянна. В действительности в процессе движения якоря к сердечнику индуктивность L увеличивается (аналогично работе электромагнитного индуктивного датчика перемещения, рассмотренного в гл. 6). Изменение индуктивности начинается с того момента времени, когда ток в обмотке достиг значения тока трогания ($i = I_{тр}$). Начинаящееся увеличение индуктивности приводит к увеличению постоянной времени $T = L/R$. Следовательно, рост тока замедляется. Кроме того, быстрое возрастание магнитного потока вызывает увеличение противоЭДС, т. е. напряжения на индуктивности u_L . Это приводит даже к уменьшению на некоторое время тока в цепи (см. сплошную кривую 2 на рис. 17.16, б). Как только якорь притянется к сердечнику, индуктивность обмотки перестает увеличиваться и ток снова возрастает по экспоненте, но с меньшей скоростью, чем на начальном участке, поскольку увеличилась постоянная времени.

Время срабатывания реле $t_{ср}$ определяется двумя составляющими (рис. 17.16, б): временем трогания $t_{тр}$ и временем движения $t_{дв}$, т. е.

$$t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}. \quad (17.32)$$

Величину времени трогания получим, подставляя в (17.31) значение

$$I_{тр} = I_{уст}(1 - e^{-t_{тр}/T}), \quad (17.33)$$

откуда

$$t_{\text{тр}} = T \ln \frac{I_{\text{уст}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{тр}}}, \quad (17.34)$$

т. е. время трогания пропорционально постоянной времени.

Время движения $t_{\text{дв}}$ зависит от механической инерционности электромагнитного механизма реле. Оно может быть определено на основании второго закона Ньютона $a = F/m$, где a — ускорение, m — масса. Для уменьшения времени движения необходимо стремиться к уменьшению массы якоря. Для данного типа реле можно считать величину $t_{\text{дв}}$ приблизительно постоянной. Поэтому основным фактором, влияющим на время срабатывания реле $t_{\text{ср}}$, является постоянная времени $T = L/R$.

Рассмотрим способы ускорения срабатывания реле постоянного тока, основанные именно на изменении длительности переходного процесса. Последовательно с обмоткой реле включается добавочное активное сопротивление $R_{\text{доб}}$ (рис. 17.17), а напряжение питания повышается на величину ΔU , которая выбрана таким образом, чтобы установившееся значение тока осталось неизменным, т. е.

$$I_{\text{уст}} = \frac{U + \Delta U}{R + R_{\text{доб}}} = \frac{U}{R}.$$

Теперь постоянная времени уменьшилась $\left(\frac{L}{R + R_{\text{доб}}} < \frac{L}{R} \right)$ и нарастание тока будет происходить по более крутой экспоненте (кривая 2 на рис. 17.17, б), чем без добавочного сопротивления (кривая 1 на рис. 17.17, б).

Еще большее ускорение срабатывания реле можно получить подключив параллельно добавочному сопротивлению $R_{\text{доб}}$ конденса-

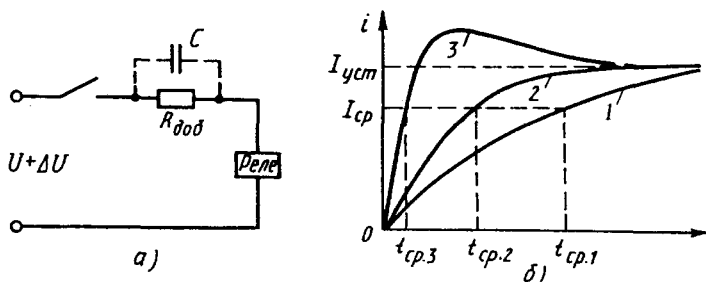


Рис. 17.17. Способы ускорения срабатывания реле постоянного тока

тор емкостью C (на рис. 17.17, *a* это включение показано пунктиром). При замыкании ключа K ток переходного процесса проходит через емкость в обход $R_{доб}$. Ведь до замыкания ключа напряжение на конденсаторе было равно нулю, а скачком оно измениться не может. Поэтому в первый момент времени все повышенное напряжение приложено именно к катушке реле. В цепи появляется значительный ток, но он не опасен для обмотки, поскольку действует короткое время. По окончании переходного процесса ток уменьшается до установившегося значения, поскольку он проходит через $R_{доб}$ (через конденсатор постоянный ток не проходит). Емкость конденсатора (в мкФ) выбирается из условия

$$C = \frac{L}{R + R_{доб}} 10^6. \quad (17.35)$$

Теперь рассмотрим переходный процесс при отключении реле. При размыкании ключа K (рис. 17.16, *a*) ток в обмотке реле уменьшается от значения $I_{уст}$ до нуля. Энергия, запасенная в магнитном поле обмотки реле, поддерживает некоторое время ток за счет дугового разряда между контактами ключа K . Уравнение тока переходного процесса получим, решая дифференциальное уравнение (17.30) при $U = 0$:

$$i = I_{уст} e^{-t/T}, \quad (17.36)$$

где $T = L/R$; L — индуктивность обмотки реле при притянутом якоре.

График зависимости $i = f(t)$ показан на рис. 17.16, *b* в виде экспоненты (пунктирная кривая 1). Кривая 2 показывает реальное изменение тока в обмотке реле при отключении. Всплеск тока на этой кривой объясняется изменением индуктивности обмотки при движении якоря (аналогично всплеску тока при включении реле).

К схемным методам замедления времени срабатывания и отпущения относятся метод шунтирования обмотки реле конденсатором (рис. 17.18). При включении реле ток в его обмотке будет нарастать медленнее за счет процесса зарядки конденсатора. Время срабатывания может быть увеличено примерно до 1 с по сравнению с примерно 50 мс при включении без конденсатора. При отключении реле, наоборот, конденсатор будет разряжаться на обмотку реле, замедляя уменьшение в ней

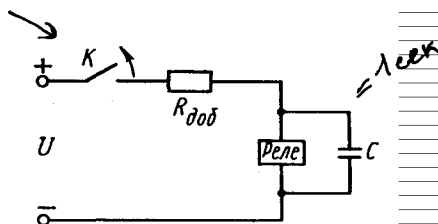


Рис. 17.18. Схема для замедления времени срабатывания

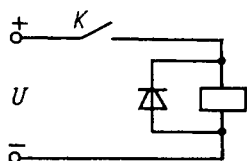


Рис. 17.19. Схема включения реле с шунтирующим диодом

тока. Дополнительное сопротивление $R_{доб}$ необходимо для ограничения тока, потребляемого от источника питания.

Эффективным схемным методом замедления времени отпускания является включение параллельно обмотке реле диода (в непроводящем по отношению к направлению питания направлении). В этом случае (рис. 17.19) ЭДС самоиндукции, возникающая в обмотке реле при отключении, создает ток, протекающий через обмотку и реле и удерживающий якорь некоторое время в притянутом положении. Включение диода используется и для защиты обмотки реле от пробоя под действием перенапряжений при отключении.

Замедление работы реле обеспечивается и с помощью короткозамкнутого витка (или обмотки) на пути магнитного потока.

К конструктивным методам уменьшения временных параметров реле относятся уменьшение хода якоря, уменьшение вихревых токов за счет применения шихтованного (набранного из отдельных пластин) магнитопровода. Следует также напомнить, что реле постоянного тока являются более быстродействующими, чем реле переменного тока.

К конструктивным методам уменьшения временных параметров реле относятся уменьшение хода якоря, уменьшение вихревых токов за счет применения шихтованного (набранного из отдельных пластин) магнитопровода. Следует также напомнить, что реле постоянного тока являются более быстродействующими, чем реле переменного тока.

Контрольные вопросы

1. Что такое реле?
2. Как работает электромагнитное реле?
3. Перечислите основные параметры электромагнитного реле.
4. Поясните график изменения тока в обмотке реле при его срабатывании и отключении.
5. Что такое тяговая и механическая характеристики реле?
6. Чем отличаются реле переменного тока от реле постоянного тока?
7. Какие способы позволяют повысить быстродействие реле?

Глава 18

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

§ 18.1. Назначение. Принцип действия

В автоматических системах очень часто требуется, чтобы элементы, в том числе и электромагнитные реле, реагировали не только на значение, но и на полярность тока на входе. Например, в системе автоматического регулирования температуры при температуре сверх требуемого значения (задания) должен включаться охладитель (например, вентилятор), а при температуре ниже требуемого значения должен включаться нагреватель. Следовательно, реле при одной полярности входного сигнала должно включать одну группу контактов, а при другой полярности — другую. Как известно из электротехники, при пропускании тока по катушке с сердечником создается магнитное поле и на находящиеся в этом поле стальные детали будет действовать сила притяжения. Направление тока или знак индукции магнитного поля не влияют на направление силы. Это всегда сила притяжения, а не отталкивания. В предыдущей главе приведены формулы для электромагнитной силы (17.12) и (17.13). В этих формулах значение тока или магнитного потока стоит в квадрате, что и доказывает математически неизменность направления электромагнитной силы при изменении знака тока или потока.

Для получения в электромагнитном механизме знакопеременной зависимости тяговой силы от направления входного сигнала необходимо наличие двух магнитных потоков: создаваемого током в обмотке реле и постоянного, неизменного по величине и направлению, создаваемого обычно постоянным магнитом. Таким образом, при одном направлении тока в обмотке реле магнитные потоки будут складываться, а при другом направлении тока — вычитаться. Следовательно, изменение направления тока приведет к изменению абсолютной величины магнитного потока, чего не было в электромагнитных нейтральных реле.

Чувствительность к направлению (*поляризация*) осуществляется именно за счет постоянного магнитного потока. Все *поляризованные реле* основаны на использовании в электромагнитном механизме двух потоков. По конструктивной схеме магнитной цепи различают поляризованные реле, построенные по *дифференциальной* и *мостовой* схемам. По числу устойчивых положений якоря различают *двухпозиционные* и *трехпозиционные* поляризованные реле.

§ 18.2. Магнитные цепи поляризованных реле

Поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи показано на рис. 18.1. Рабочий (управляющий) магнитный поток Φ_y создается при протекании тока I по обмотке реле, состоящей из двух одинаковых половин 1 и $1'$, включенных последовательно и согласно. Постоянный (поляризующий) магнитный поток Φ_n создается постоянным магнитом 2 . Катушки реле 1 и $1'$ размещены на неподвижном сердечнике (ярме) 3 . Якорь 4 может поворачиваться относительно оси O в рабочем зазоре δ . На якоре размещен подвижный контакт, который может замыкаться с неподвижными контактами 5 или $5'$.

Магнитный поток Φ_y показан пунктиром, а магнитный поток Φ_n — сплошной линией. Направление потока Φ_n неизменно, а направление потока Φ_y зависит от направления тока в катушке реле. На рис. 18.1 направление потока Φ_y показано для указанного на этом рисунке направления тока I .

Поляризующий поток Φ_n проходит по якору 4 и разветвляется на две части Φ_{n1} и Φ_{n2} в соответствии с проводимостями воздушных зазоров слева (δ_n) и справа (δ_n) от якоря. В зависимости от полярности тока I в обмотке реле рабочий поток Φ_y вычитается из потока Φ_{n1} в зазоре слева от якоря и складывается с потоком Φ_{n2} в зазоре справа от якоря (как показано на рис. 18.1) или наоборот: потоки складываются в левом зазоре и вычитаются в правом зазоре при противоположном направлении тока. На якорь действуют две электромагнитные силы, направленные встречно, каждая из которых

пропорциональна в соответствии с уравнением (17.13) квадрату потока в соответствующей части зазора. Для направлений тока и магнитных потоков, показанных на рис. 18.1, результирующее тяговое усилие заставит якорь перекинуться из левого положения в правое. При отключении входного сигнала ($I = 0$) якорь остается в том положении, которое он занимал до отключения сигнала. Реле, показанное на рис. 18.1, является двухпозиционным. Результирующее электромагнитное усилие, действующее на якорь поляризованного реле, направлено в сторону

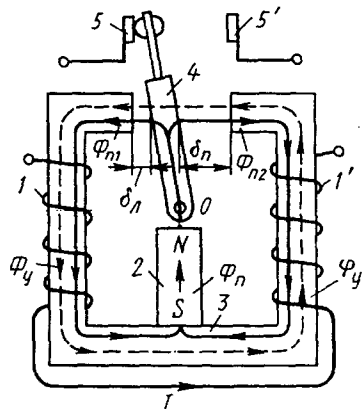


Рис. 18.1. Поляризованное реле

того зазора, где управляющий и поляризующий магнитные потоки складываются.

Рассмотрим усилия, действующие на якорь поляризованного реле. Определяются они в соответствии с уравнением (17.13). В среднем положении якоря магнитные проводимости левого и правого зазора одинаковы и поэтому поляризующий поток делится на две равные части: $\Phi_{n1} = \Phi_{n2} = \Phi_n/2$. При отсутствии управляющего потока на якорь будут действовать одинаковые усилия влево и вправо:

$$F_{эл} = F_{эн} = 4 \cdot 10^5 \left(\frac{\Phi_n}{2} \right)^2 \frac{1}{s_\delta} = 10^5 \frac{\Phi_n^2}{s_\delta}, \quad (18.1)$$

где s_δ — площадь сечения воздушного зазора.

Результирующая сила, равная разности $F_{эл}$ и $F_{эн}$ при среднем положении якоря, будет равна нулю. Однако якорь в среднем положении находится в состоянии неустойчивого равновесия. Достаточно незначительного смещения якоря от среднего положения, чтобы произошло перераспределение потоков. Уменьшается магнитное сопротивление того зазора, в какую сторону сместился якорь. Следовательно, в ту же сторону увеличится магнитный поток, а значит, и сила, направленная в сторону уменьшения зазора. Полагая сечение воздушного зазора неизменным, рассмотрим перераспределение поляризующего потока в зависимости от магнитного сопротивления, которое будет в этом случае пропорционально величине зазора.

Отношение магнитных потоков в левом и правом зазоре обратно пропорционально отношению магнитных сопротивлений этих зазоров:

$$\Phi_{n1}/\Phi_{n2} = R_{m2}/R_{m1} = \delta_l/\delta_n. \quad (18.2)$$

Учитывая, что $\Phi_{n1} + \Phi_{n2} = \Phi_n$, а $\delta_l + \delta_n = \delta$ (рис. 18.1), после преобразований получаем

$$\Phi_{n1} = \Phi_n \frac{\delta - \delta_l}{\delta};$$

$$\Phi_{n2} = \Phi_n \frac{\delta_l}{\delta}.$$

Соответственно электромагнитные силы притяжения якоря, направленные влево и вправо

$$F_{эл} = 4 \cdot 10^5 \frac{\Phi_n^2 (\delta - \delta_l)^2}{s_\delta \delta^2}; \quad F_{эн} = 4 \cdot 10^5 \frac{\Phi_n^2 \delta_l^2}{s_\delta \delta^2}.$$

Результирующая сила определяется как разность этих сил:

$$F_3 = F_{3л} - F_{3п} = 4 \cdot 10^5 \frac{\Phi_n^2 \delta^2 - 2\delta\delta_{л}}{\delta^2} = 4 \cdot 10^5 \frac{\Phi_n \delta - 2\delta_{л}}{\delta}. \quad (18.3)$$

При $\delta_{л} < \delta/2$ (якорь ближе к левому крайнему положению) сила тянет якорь влево.

При $\delta_{л} > \delta/2$ (якорь ближе к правому крайнему положению) сила тянет якорь вправо.

Контактное давление выключенного реле определяется силой при $\delta_{л} = 0$

$$F_{30} = 4 \cdot 10^5 \frac{\Phi_n^2}{s_{\delta}}. \quad (18.4)$$

При подаче тока в обмотку поляризованного реле в магнитной цепи возникает магнитный поток Φ_y , который (для полярности, показанной на рис. 18.1) складывается в правом зазоре с $\Phi_{п2}$ и в левом вычитается из $\Phi_{п1}$.

При достижении Φ_y значения, равного $\Phi_{п}$, контактное усилие будет равно нулю. Как только Φ_y станет больше $\Phi_{п}$, якорь перекинется в крайнее правое положение. Ток, при котором якорь перебрасывается в новое положение, называется током срабатывания $I_{ср}$. В новом положении якоря произойдет перераспределение поляризующего магнитного потока между зазорами. Суммарный поток в новом положении якоря при $I_{ср}$ будет равен $\Sigma\Phi = \Phi_{п} + \Phi_y$. Так как при срабатывании $\Phi_y = \Phi_{п}$, то $\Sigma\Phi = 2\Phi_{п}$, а усилие, пропорциональное квадрату магнитного потока, возрастет в четыре раза по сравнению с усилием в обесточенном реле. Таким образом, в процессе перемещения якоря из одного положения в другое происходит значительное увеличение тягового усилия. Этим и объясняется то, что поляризованные реле имеют очень высокое быстродействие: время срабатывания составляет несколько миллисекунд. Кроме того, дополнительное усилие, сжимая контакты, позволяет при очень малом управляющем сигнале управлять относительно мощными электрическими цепями. Однако главным достоинством поляризованных реле является их высокая чувствительность. Чаще всего не стремятся к увеличению разрывной мощности их контактов, поскольку это требует увеличения хода якоря, что приводит к потере чувствительности. Поэтому высокочувствительные поляризованные реле выполняются маломощными с ходом якоря от одного крайнего положения до другого порядка 0,1—0,2 мм.

Работа поляризованного реле с мостовой схемой магнитной цепи (рис. 18.2) происходит аналогично реле с дифференциальной схемой. Отличие заключается в том, что магнитная цепь для управляющего потока Φ_y , создаваемого обмоткой реле, выполнена отдельно от магнитной цепи для поляризующего потока Φ_n , создаваемого постоянным магнитом. Благодаря этому поляризованные реле мостового типа имеют более высокую стабильность параметров и устойчивее к внешним механическим воздействиям.

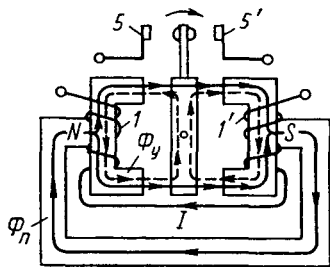


Рис. 18.2. Поляризованное реле с мостовой магнитной цепью

§ 18.3. Настройка контактов и устройство поляризованного реле

Кроме электромагнитного усилия на якорь поляризованного реле воздействует усилие пружин, не показанных на рис. 18.1 и 18.2. В зависимости от положения неподвижных контактов и натяжения (или сжатия) пружин поляризованные реле могут настраиваться на двух- или трехпозиционную работу.

Рассмотрим настройку контактов реле на двухпозиционную работу. Пружины с двух сторон воздействуют на якорь с равными усилиями в нейтральном положении. Если усилия пружин невелики и неподвижные контакты расположены симметрично относительно нейтрали, то при отсутствии входного сигнала (тока в обмотке реле) за счет одной из составляющих поляризующего потока ($\Phi_{п1}$ или $\Phi_{п2}$) якорь I остается в том же положении, в котором он находился до снятия входного сигнала. Следовательно, остаются замкнутыми соответствующие контакты реле (например, контакты 2—3 на рис. 18.3,а). В этом случае механическое усилие пружин, стремящееся вернуть якорь в нейтральное положение, меньше тягового усилия от потока постоянного магнита, стремящегося удерживать якорь в притянутом положении. При подаче тока обратной полярности в обмотку реле якорь перебрасывается в противоположное крайнее положение, размыкая контакты 2—3 и замыкая контакты 2—4. При снятии этого входного сигнала контакты 2—4 остаются замкнутыми. Даже если входной сигнал будет снят в тот момент, когда якорь находится в нейтральном положении, такое положение

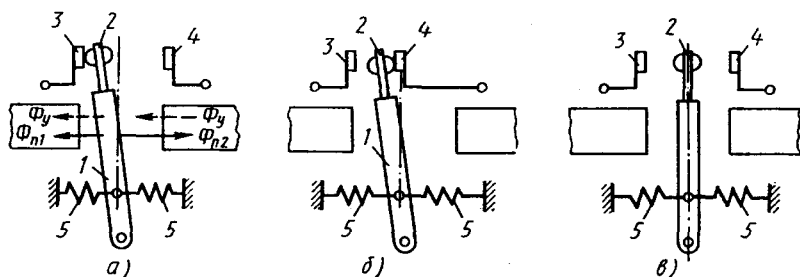


Рис. 18.3. Настройка контактов поляризованного реле

будет неустойчивым. При малейшем отклонении якоря от этого положения (например, из-за незначительного сотрясения или вибрации) возрастет поляризующий поток в том направлении, куда отклонился якорь, и соответствующее ему электромагнитное усилие переместит якорь до упора в том же направлении.

Таким образом, при такой настройке якорь реле занимает только два устойчивых симметричных положения (позиции): крайнее левое (замкнуты контакты 2—3) или крайнее правое (замкнуты контакты 2—4).

Возможна настройка на двухпозиционную работу с преобладанием (приоритетом) одной из позиций (рис. 18.3, б). Если неподвижный контакт, например 3, установить с той же стороны относительно нейтрали, что и второй неподвижный контакт 4, то тяговое усилие от потока поляризующего Φ_{n1} , стремящееся удержать якорь реле в крайнем левом положении, будет намного меньше тягового усилия от поляризующего потока Φ_{n2} , стремящегося удержать якорь в крайнем правом положении. В результате этого при снятии входного сигнала якорь реле под действием тягового усилия от потока Φ_{n2} будет устанавливаться и удерживаться в крайнем правом положении. Таким образом, подобная настройка обеспечивает двухпозиционную настройку реле с приоритетом одной позиции. При подаче в обмотку реле тока соответствующей полярности якорь занимает крайнее левое положение (замкнуты контакты 2—3), а при подаче тока обратной полярности или при отсутствии тока в обмотке реле якорь занимает крайнее правое положение (замкнуты контакты 2—4).

Для настройки поляризованного реле на трехпозиционную работу необходимы пружины 5 большой жесткости, обеспечивающие превышение механического усилия над электромагнитным усилием от поляризующего магнита в крайних положениях якоря. В этом случае при отсутствии тока в обмотке реле его якорь будет установ-

ливаться в нейтральное положение при разомкнутых контактах (рис. 18.3, в). Таким образом, обеспечиваются три позиции (положения) якоря: 1) крайнее левое положение (замкнуты контакты 2—3) при подаче в обмотку тока соответствующей полярности; 2) крайнее правое положение (замкнуты контакты 2—4) при подаче в обмотку реле тока обратной полярности; 3) нейтральное среднее положение (все контакты разомкнуты) при снятии входного сигнала с обмотки реле.

Отечественной промышленностью выпускаются поляризованные реле различных типов и с различной настройкой контактов. Например, реле типа РП-4 — двухпозиционное (с нейтральной настройкой); реле типа РП-5 — трехпозиционное; реле типа РП-7 — двухпозиционное с преобладанием. Эти реле могут иметь несколько независимых обмоток, что расширяет их возможности применения в системах автоматики.

На рис. 18.4 показано поляризованное реле типа РП-7, состоящее из катушки 1, полюсных наконечников 2, якоря 3, контактных пружин с подвижными контактами 4, неподвижных контактов 5, магнитопровода 6, керамической колодки 7 со штырьковыми выводами, что позволяет быстро включать реле в рабочую схему, вставляя его в соответствующую соединительную колодку.

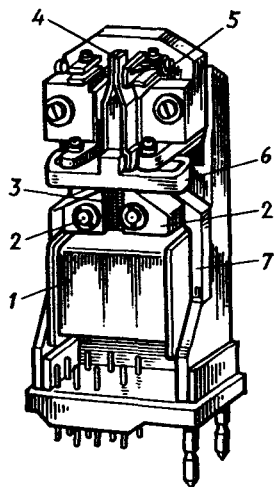


Рис. 18.4. Поляризованное реле типа РП-7

§ 18.4. Вибропреобразователи

Вибропреобразователь представляет собой электромагнитное устройство типа поляризованного реле; это реле работает в вибрационном режиме, поскольку его обмотка подключена к источнику переменного тока. Вибропреобразователи предназначены для преобразования постоянного тока в переменный. Они также могут применяться и для обратного преобразования — переменного тока в постоянный. В системах автоматики вибропреобразователи получили широкое применение при усилении слабых сигналов постоянных токов и напряжений, поступающих от датчиков (термопар, фотоэлементов, датчиков Холла и др.). Дело в том, что электронные и

полупроводниковые усилители, усиливающие непосредственно сигнал постоянного тока, имеют серьезный недостаток, который называется «дрейф нуля». Он заключается в том, что даже при отсутствии входного сигнала (при нулевом сигнале) на выходе усилителя постоянного тока появляется некоторое напряжение, вызванное нагревом, наводками, изменениями параметров отдельных элементов усилителя. Поэтому предпочитают предварительно преобразовать слабый сигнал постоянного тока в сигнал переменного тока, затем усилить его (усилители переменного тока не имеют дрейфа нуля), а потом снова выпрямить. Электрическое устройство, преобразующее сигнал постоянного тока в соответствующий ему сигнал переменного тока заданной частоты, называется *модулятором*. Вибропреобразователь нашел широкое применение именно в качестве модулятора.

Усиление сигналов постоянного тока выполняют по структурной схеме (рис. 18.5, а), состоящей из модулятора (М), усилителя (У) демодулятора (ДМ). Напряжение постоянного тока $U_{вх=}$, которое необходимо усилить, поступает на модулятор, который также получает питание от источника переменного напряжения $U_{п\sim}$, изменяю-

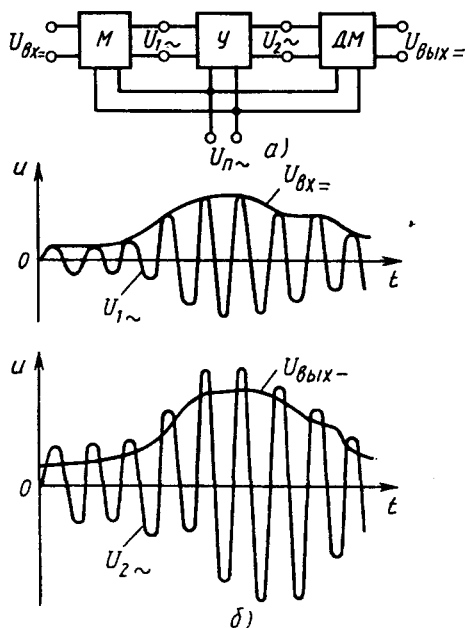


Рис. 18.5. Усиление сигнала постоянного тока с модуляцией и демодуляцией

щегося с частотой f . Переменное напряжение U_1 на выходе модулятора будет также изменяться с частотой f , которая называется несущей частотой. Амплитуда этого переменного напряжения U_1 будет пропорциональна входному сигналу постоянного тока $U_{вх=}$. Затем усилитель переменного тока (У) усиливает напряжение U_1 до значения U_2 (рис. 18.5, б). Надо отметить, что обычно усиление происходит не только по напряжению, но и по мощности. Выходное переменное напряжение усилителя U_2 , изменяющееся с частотой f , с помощью демодулятора (ДМ) преобразуется (выпрямляется) в пропорциональное напряжение постоянного тока $U_{вых=}$. Таким образом, как на входе схемы, так и на выходе имеются напряжения постоянного тока, причем выходное напряжение больше и пропорционально входному напряжению. Однако сам процесс усиления постоянного тока заменяется усилением переменного тока.

Напомним, что процесс преобразования переменного напряжения по амплитуде (без усиления по мощности) выполняется очень просто — с помощью трансформатора. Постоянное же напряжение не трансформируется. Поэтому, когда требуется повысить напряжение постоянного тока, используют схему, состоящую из модулятора, трансформатора и выпрямителя. Такая задача возникает довольно часто на подвижных объектах, питаемых от аккумуляторов или батареек с напряжением 1,5—1,2 В. В этих случаях также можно использовать в качестве модулятора вибропреобразователь.

Устройство вибропреобразователя показано на рис. 18.6. Обмотка возбуждения 1 питается переменным током с частотой 50 Гц и создает переменный магнитный поток. Поляризующий магнитный поток создается постоянным магнитом 2 . В рабочем зазоре вибропреобразователя вибрирует с частотой 50 Гц якорь 3 , имеющий постоянное электрическое соединение с контактной упругой пластиной 4 . В крайних положениях якоря происходит замыкание его контактной пластины 4 со стержневыми контактами 5 , размещенными на упорных пластинах 6 . Для регулировки работы вибропреобразователя служит винт 7 . Включение вибропреобразователя в схему осуществляется с помощью стержневых

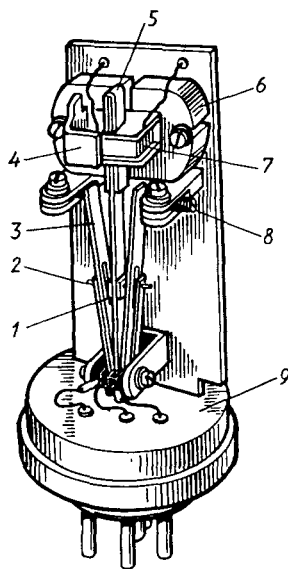


Рис. 18.6. Устройство вибропреобразователя

контактов 8, закрепленных на цоколе 9. Цоколь и стержневые контакты такие же, как у электронных ламп, что позволяет легко и быстро заменять вибропреобразователь, а несимметричное расположение стержней исключает возможность ошибочного подключения вибропреобразователя.

Так как в зазоре вибропреобразователя действует переменное магнитное поле, то якорь 3 будет периодически перемагничиваться. Поэтому он будет попеременно притягиваться то к северному, то к южному полюсу постоянного магнита 2. Следовательно, попеременно будет происходить замыкание контактной пластины 4 то с левым, то с правым контактом 5.

Схема включения вибропреобразователя для преобразования постоянного тока в переменный показана на рис. 18.7, а. На вход схемы подается постоянное напряжение $U_{вх}$, график которого показан на рис. 18.7, б. На обмотку вибропреобразователя подается переменное напряжение питания U_{\sim} . Под действием этого напряжения контакт 1 вибропреобразователя периодически замыкается то с контактом 2, то с контактом 3. При замыкании контактов 1 и 2 напряжение на выходе вибропреобразователя (точки а и б) равно входному напряжению: $U_{аб} = U_{вх}$. При замыкании контактов 1 и 3 напряжение на выходе вибропреобразователя равно нулю: $U_{аб} = 0$. Таким образом, напряжение на выходе вибропреобразователя $U_{аб}$ имеет вид прямоугольных импульсов (рис. 18.7) с периодом следования $T = t_n + t_p$, где t_n — ширина импульса, определяемая длительностью замкнутого состояния контактов 1—2, t_p — ширина паузы, определяемая длительностью замкнутого состояния контактов 1—3. Обычно вибропреобразователь настраивается так, что $t_n = t_p$. Последовательность однополярных импульсов $U_{аб}$ можно представить в виде суммы постоянной составляющей $U_{аб}/2$ и переменной составляющей в виде симметричных прямоугольных колебаний напряже-

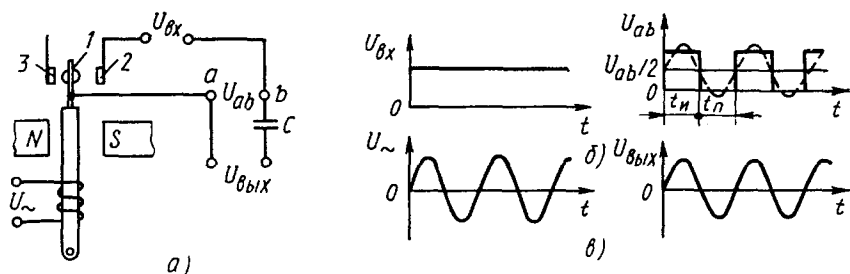


Рис. 18.7. Преобразование сигнала постоянного тока в переменный с помощью вибропреобразователя

ния с амплитудой $U_{аб}/2$. Разделительный конденсатор C пропускает только переменную составляющую, т. е. симметричные прямоугольные колебания с амплитудой $U_{аб} = U_{вх}/2$ и периодом T (рис. 18.7). Эти колебания можно приблизительно представить в виде синусоидальных колебаний, показанных на рис. 18.7 пунктиром. Выражение для синусоиды выходного напряжения получают разложением периодических прямоугольных колебаний в тригонометрический ряд:

$$u_{\text{вых}} = \frac{2U_{\text{вх}}}{\pi} \sin \omega t,$$

где $2U_{\text{вх}}/\pi$ — амплитуда синусоидальных колебаний; $\omega = 2\pi/T$ — угловая частота колебаний.

На рис. 18.8 показана трансформаторная схема включения модулятора с вибропреобразователем. Входное постоянное напряжение подается на подвижный контакт вибропреобразователя 1 и среднюю точку первичной обмотки трансформатора Tr . В результате поочередного замыкания контактов $1-2$ и $1-3$ напряжение $U_{\text{вх}}$ подается то на левую, то на правую половину первичной обмотки трансформатора, причем направление тока в этой обмотке каждый раз изменяется. Следовательно, в сердечнике трансформатора будет создан переменный магнитный поток, а в выходной обмотке трансформатора будет наводиться ЭДС, значение которой пропорционально входному напряжению (с учетом коэффициента трансформации), а частота изменения будет равна частоте напряжения U_{\sim} , поданного на обмотку вибропреобразователя. Для выделения синусоидального выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ служит конденсатор C , включаемый параллельно вторичной обмотке трансформатора. Вибропреобразователь, используемый в качестве электромагнитического модулятора, является источником электромагнитных помех, для борьбы с которыми вибропреобразователь помещают в экран. Так как вибропреобразователь работает с очень слабыми входными сигналами, то источником помех могут быть и термоЭДС, возникающие на контактах. Для борьбы с этими помехами в качестве материала для контактов используется золото и его сплавы.

Так как разрывная мощность контактов и напряжения на контактах очень малы, то зазор между контактами можно уменьшить до 10 мкм, что позволяет создать достаточно надежную кон-

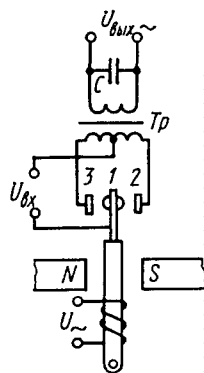


Рис. 18.8. Трансформаторная схема модулятора с вибропреобразователем

тактную систему, работающую без дребезга и с очень малым временем переключения цепи.

Отечественной промышленностью выпускаются вибропреобразователи типа ВП, питаемые напряжением 6,3 В при частоте 50 Гц, как и цепь накала обычных электронных ламп. Так же как и электронные лампы, вибропреобразователи имеют цоколь с выводами. Имеются также вибропреобразователи для питания от сети 400 Гц.

К достоинствам вибропреобразователей следует отнести высокую стабильность (отсутствие дрейфа нуля), возможность преобразования очень слабых сигналов постоянного тока (микровольты и миллиамперы), сравнительно малые габариты и вес, небольшую стоимость.

Недостатками вибропреобразователей считаются наличие высших гармоник в выходном сигнале, непригодность для преобразования быстропеременных сигналов постоянного тока (имеющих переменную составляющую с частотой, которая соизмерима с несущей частотой), наличие контактов, являющихся источниками помех и причиной выхода из строя.

Вместо вибропреобразователей находят применение полупроводниковые и магнитные модуляторы (последние рассмотрены в гл. 26).

Контрольные вопросы

1. В чем разница между поляризованным и нейтральным реле?
2. Как выполняется настройка контактов поляризованного реле?
3. Зачем нужен вибропреобразователь?

Глава 19

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ РЕЛЕ

§ 19.1. Типы специальных реле

Наибольшее распространение в системах автоматики получили реле электромагнитного типа, рассмотренные в гл. 17 и 18. Однако находят применение и электрические реле других типов, в которых тяговое усилие, необходимое для переключения контактов, создается не с помощью электромагнита. Сюда относятся прежде всего

реле, аналогичные по принципу действия электроизмерительным приборам различных систем: *магнитоэлектрической, электродинамической, индукционной*. Если в электроизмерительном приборе подвижная часть перемещает по шкале стрелку или какой-либо указатель, то в реле соответствующего типа подвижная часть перемещает контакты.

Для получения значительных выдержек* времени при замыкании и размыкании контактов используются специальные *реле времени*; некоторые из них имеют в основе электромагнитный механизм, но с добавлением различных устройств, обеспечивающих задержку срабатывания или отпущения.

Для автоматизации процессов нагрева и охлаждения применяются *электротермические реле*, в которых переключение электрических контактов обеспечивается температурной деформацией металлов или температурным расширением жидкостей и газов.

В системах автоматической защиты оборудования от аварийных режимов используются специальные реле, срабатывающие при определенном значении тока, напряжения, скорости, момента, давления и других параметров.

§ 19.2. Магнитоэлектрические реле

Принцип действия магнитоэлектрического реле основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке, выполненной в виде поворотной рамки.

Магнитоэлектрическое реле (рис. 19.1) состоит из постоянного магнита 1, между полюсными наконечниками которого находится цилиндрический стальной сердечник 2. В кольцевом зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается равномерное радиально направленное магнитное поле. В зазоре размещена легкая алюминиевая рамка 3 с обмоткой из тонкого провода, к которой подводится ток по спиральным пружинам из фосфористой или оловянно-цинковой бронзы. Эти пружины создают противодействующий момент, стре-

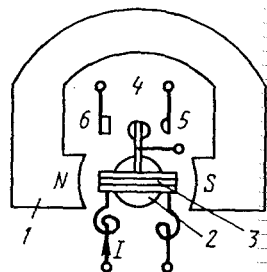


Рис. 19.1. Магнитоэлектрическое реле

* Под выдержкой времени понимается промежуток времени между подачей напряжения на обмотку реле и срабатыванием его контактов.

мящийся установить рамку с обмоткой таким образом, чтобы ее плоскость была направлена по оси полюсов магнита I . При пропускании тока I по обмотке реле на рамку с обмоткой действует вращающий момент, заставляющий ее поворачиваться вокруг оси в направлении, определяемом полярностью тока. Жестко закрепленный на рамке подвижный контакт 4 замыкается с одним из неподвижных контактов 5 или 6 .

Сила, действующая на проводник длиной l , обтекаемый током I и помещенный в магнитное поле с индукцией B , определяется на основании закона Ампера:

$$F = BIl. \quad (19.1)$$

На рамку длиной l , шириной a , с числом витков ω действует вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = BIl\omega a. \quad (19.2)$$

Для конкретного реле $Bl\omega a = K = \text{const}$, следовательно,

$$M_{\text{вр}} = KI. \quad (19.3)$$

Из уравнения (19.3) видно, что при неизменных конструктивных параметрах реле и заданном токе I в его обмотке вращающий момент имеет постоянное значение.

В то же время противодействующий момент, создаваемый закручивающимися токоподводящими пружинами, пропорционален углу закрутки, т. е. углу поворота рамки. Поскольку направление поворота рамки определяется направлением тока в обмотке, магнитоэлектрическое реле является поляризованным и может быть выполнено трехпозиционным.

По сравнению с другими электромеханическими реле магнитоэлектрическое реле является наиболее чувствительным, оно срабатывает при мощности управления в доли милливатта. Усилие на контактах магнитоэлектрического реле невелико (порядка 10^{-2} Н и меньше), поэтому для повышения надежности контакты выполняются из платины и платиноиридиевого сплава. При резком изменении усилия маломощные контакты быстро изнашиваются, поэтому магнитоэлектрические реле используются обычно в схемах, где сигнал постоянного тока изменяется медленно. Недостатком магнитоэлектрических реле является сравнительно большое время срабатывания (0,1—0,2 с). По своему быстрдействию они уступают нейтральным электромагнитным реле.

§ 19.3. Электродинамические реле

Принцип действия электродинамического реле основан на взаимодействии двух катушек с током, одна из которых подвижна, а другая неподвижна. От магнитоэлектрического реле электродинамическое реле отличается тем, что индукция в рабочем зазоре создается не постоянным магнитом, а неподвижной катушкой на сердечнике, т. е. электромагнитным способом. От электромагнитного реле электродинамическое реле отличается тем, что тяговое усилие воздействует не на стальной якорь, а на подвижную катушку.

Устройство электродинамического реле показано на рис. 19.2. На магнитопровод 3 надета неподвижная катушка 2, обтекаемая током I_2 . Между полюсными наконечниками магнитопровода находится цилиндрический стальной сердечник 4. В кольцевом зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается равномерное радиально направленное магнитное поле. В зазоре размещена легкая алюминиевая рамка 1 с обмоткой из тонкого провода, к которой подводится ток I_1 по спиральным пружинам, создающим противодействующий момент, стремящийся установить плоскость рамки 1 вдоль оси полюсных наконечников.

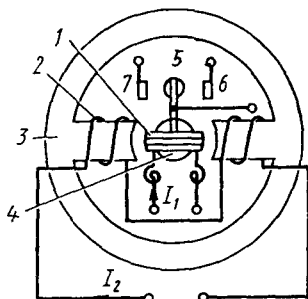


Рис. 19.2. Электродинамическое реле

При подаче управляющего тока I_1 в обмотку рамки 1 она будет поворачиваться в зазоре между полюсными наконечниками и сердечником. Жестко закрепленный на рамке подвижный контакт 5 замыкается с одним из неподвижных контактов 6 и 7.

Сила, действующая на проводники рамки электродинамического реле, так же как и для магнитоэлектрического реле, определяется законом Ампера. Следовательно, будут справедливы уравнения (19.1) и (19.2). Однако входящая в эти уравнения индукция B не постоянна, а определяется намагничивающей силой, создаваемой катушкой 2 с током I_2 :

$$B = I_2 \omega_2 / (R_m s_g), \quad (19.4)$$

где R_m — магнитное сопротивление на пути магнитного потока возбуждения; s_g — площадь поперечного сечения рабочего воздушного зазора.

Подставляя (19.4) в (19.2) и выразив через постоянный коэффициент K сочетание всех неизменных конструктивных и обмоточных данных реле, получим уравнение для вращающего момента электродинамического реле:

$$M_{вр} = KI_1I_2. \quad (19.5)$$

Из (19.5) видно, что направление поворота рамки зависит от направления токов в обеих обмотках реле, т. е. оно будет положительным при одинаковых направлениях токов и отрицательным при разных направлениях.

При работе реле на постоянном токе и питании его неизменным по значению и направлению током возбуждения I_2 электродинамическое реле (как и магнитоэлектрическое) является поляризованным и трехпозиционным. В зависимости от направления управляющего тока I_1 замыкается пара контактов 6—7 или 6—8, а при отсутствии тока I_1 контакт 6 находится в среднем, незамкнутом, положении.

Однако в отличие от магнитоэлектрического реле электродинамическое может работать при питании переменным током. В этом случае на рамку воздействует переменный магнитный поток, а направление поворота определяется средним за период значением вращающего момента

$$M_{вр\text{ ср}} = KI_1I_2 \cos \varphi, \quad (19.6)$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов в обмотках; φ — угол сдвига фаз между токами.

Из (19.6) следует, что электродинамическое реле реагирует на фазу входного сигнала, т. е. его можно использовать как реле сдвига фаз, срабатывающее при определенном значении φ . Это же реле может реагировать и на мощность переменного или постоянного тока. В этом случае на одну из обмоток подается ток, а на другую — напряжение цепи.

При последовательном соединении обмоток $I_1 = I_2 = I$ вращающий момент

$$M_{вр} = KI^2, \quad (19.7)$$

т. е. зависимость тягового усилия от тока будет аналогична электромагнитному нейтральному реле.

К недостаткам электродинамических реле следует отнести их большие габариты и вес.

§ 19.4. Индукционные реле

Принцип действия индукционного реле основан на взаимодействиях переменных магнитных потоков с токами, индуцированными этими потоками.

Индукционное реле (рис. 19.3) состоит из двух неподвижных электромагнитов 1 и 2, по обмоткам которых протекают соответственно переменные токи I_1 и I_2 . В воздушном зазоре электромагнитов установлен алюминиевый или медный диск 3, который может поворачиваться относительно оси 4. Переменные магнитные потоки, создаваемые электромагнитами 1 и 2, индуцируют ЭДС в диске 3, под действием которых в диске создаются вихревые токи (так же, как в короткозамкнутом роторе асинхронного двигателя).

Для того чтобы взаимодействие магнитных потоков с вызванными ими же токами привело к созданию вращающего момента, необходимо наличие сдвига по фазе токов I_1 и I_2 . Только в этом случае в зазоре индукционного реле будет создано вращающееся магнитное поле, аналогично тому, как это происходит в двухфазном асинхронном двигателе. При сдвиге фаз между токами I_1 и I_2 в 90° сила взаимодействия магнитного потока электромагнита 1 с током, индуцированным в диске от потока электромагнита 2, будет всегда совпадать по направлению с силой взаимодействия магнитного потока электромагнита 2 с током, индуцированным в диске от потока электромагнита 1. При совпадении токов I_1 и I_2 по фазе в среднем за период результирующая сила будет равна нулю.

Вращающий момент, приложенный к диску, определяется так:

$$M_{\text{вр}} = KI_1 I_2 \sin \varphi, \quad (19.8)$$

где K — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных и обмоточных данных реле; φ — фазовый сдвиг между I_1 и I_2 .

Этот вращающий момент, преодолевая сопротивление пружины 4, поворачивает диск до тех пор, пока не замкнутся контакты 5.

Поскольку индукционное реле реагирует на фазу, его (как и электродинамическое) можно применять в качестве реле фазы. Малая инерция подвижной части позволяет использовать такие реле как быстродействующие в схемах автоматической защиты и блокировки. Особенно они распространены

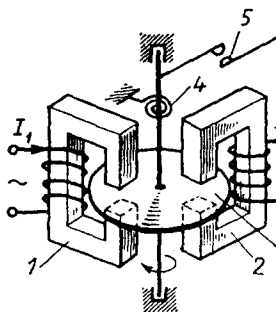


Рис. 19.3. Индукционное реле

ны в автоматике на железных дорогах. Они могут использоваться в качестве реле тока, напряжения, мощности, частоты, фазы, сопротивления. Достоинством их является то, что они не требуют подвода тока к подвижной части. Чувствительность индукционных реле невелика, для их срабатывания требуется мощность не менее 0,5 Вт.

Рассмотрим также применение индукционного реле в качестве реле скорости (рис. 19.4). Входной вал 5 реле связан с механизмом, скорость которого требуется контролировать. На валу 5 установлен цилиндрический постоянный магнит 4. При вращении поле магнита пересекает проводники короткозамкнутой обмотки 3 поворотного статора 6. В обмотке 3 наводится ЭДС, значение которой пропорционально скорости вращения входного вала 5. Под действием этой ЭДС по обмотке 3 проходит ток, сила взаимодействия которого с вращающимся полем магнита 4 стремится повернуть статор 6 в направлении вращения. При определенной скорости вращения сила возрастает настолько, что упор 2, преодолевая противодействие плоской пружины, переключает контакты реле. В зависимости от направления вращения переключается контактный узел 1 или 7. Точность работы индукционного реле скорости невелика. В точных системах контроля скорости необходимо использование более сложной схемы, включающей в себя индукционный датчик скорости и высокочувствительное поляризованное реле.

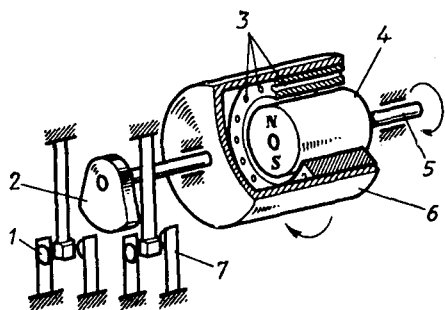


Рис. 19.4. Индукционное реле скорости

§ 19.5. Реле времени

Для получения больших задержек при включении и отключении контактов используются реле времени. В этих реле обычно используют электромагнит, который приводит в действие какое-либо механическое устройство, имеющее значительную инерционность, либо включает электродвигатель, перемещающий контакты через редуктор с большим передаточным отношением.

Рассмотрим в качестве примера несколько типов реле времени.

Маятниковое (часовое) реле времени (рис. 19.5) состоит из электромагнита с втяжным якорем 1, который при подаче входного

сигнала перемещает тягу 2 и, сжимая пружину 3, стремится переместить рычаг с зубчатым сектором 4 справа налево. Но спусковое зубчатое колесо 5 со скобой 6 может поворачиваться за каждое качание маятника 7 только на один зуб, благодаря чему скорость перемещения зубчатого сектора ограничивается. После того как все зубцы сектора 4 выйдут из зацепления с храповым колесом 8, сработает микропереключатель 9.

При снятии выходного сигнала с электромагнита 1 сектор 4 быстро возвращается в исходное положение под действием веса якоря электромагнита 1 и усилия пружины 3. Микропереключатель выключается без задержки времени. Таким образом, обеспечивается задержка времени только при срабатывании реле, но не при отпуске.

Грубая настройка времени срабатывания регулируется винтом 10, ограничивающим длину зацепления сектора 4 с храповым колесом 8. Точная настройка времени срабатывания регулируется перемещением груза маятника 7. Маятниковое реле обеспечивает выдержку времени до десятков секунд.

Пневматическое реле времени (рис. 19.6) также имеет электромагнит 1 и пневматическую приставку с микропереключателем 2. Герметическая камера 3 пневматической приставки сообщается с атмосферой через узкое отверстие 4. Камера 3 перегорожена эластичной плоской мембраной 5, выполненной из силиконовой резины. Мембрана соединена со штоком 6, который опирается на якорь электромагнита 1.

При подаче управляющего сигнала якорь электромагнита 1 втягивается. Шток 6, лишенный опоры, под действием пружины 11 медленно опускается вниз по мере заполнения полости приставки воздухом через отверстие 4. В конце хода штока рычаг 8 производит переключение контактов микропереключателя 2. Возврат реле в исходное положение происходит при снятии входного сигнала с электро-

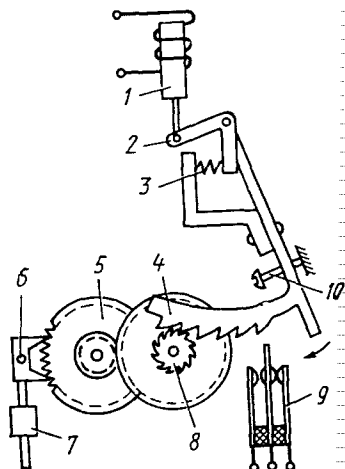


Рис. 19.5. Маятниковое реле времени с электромагнитом

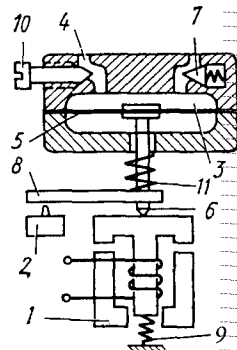


Рис. 19.6. Пневматическое реле времени с электромагнитом

магнита под действием пружины 9. При этом воздух из пневматической камеры мгновенно вытесняется через обратный клапан 7. Возврат контактов реле, следовательно, происходит без задержки времени. Если обратный клапан 7 размещен не в верхней, а в нижней камере, то соответственно с замедлением будет происходить не срабатывание реле, а отпускание. Для регулировки выдержки времени реле используется винт 10, изменяющий сечение дросселирующего отверстия 4. Пневматические реле обеспечивают выдержку времени до нескольких минут.

Для получения больших выдержек времени (десятки минут и часы) используют электродвигательные (моторные) реле времени. На рис. 19.7 показана схема устройства такого реле. При подаче управляющего сигнала на обмотку электромагнита 1 включается муфта сцепления 2 и вращение синхронного микроэлектродвигателя 3 через редуктор 4 передается кулачку с упором 5, который после поворота на некоторый угол включит микропереключатель 6. После снятия управляющего сигнала муфта сцепления разъединяет кинематическую цепь от электродвигателя к кулачку, а сам кулачок под действием пружины 7 возвращается в исходное положение, выключая при этом микропереключатель 6. Точная настройка времени срабатывания электродвигательного реле обеспечивается изменением начального положения кулачка с упором, а грубая — изменением передаточного отношения редуктора.

Существуют многоценные реле такого типа, в которых на валу установлено в разных положениях несколько кулачков, обеспечивающих независимые выдержки времени срабатывания и отключения соответствующего количества контактных групп. С помощью таких устройств (иногда их называют командоаппаратами) обеспечивается программное (по времени) управление комплектными электроустановками.

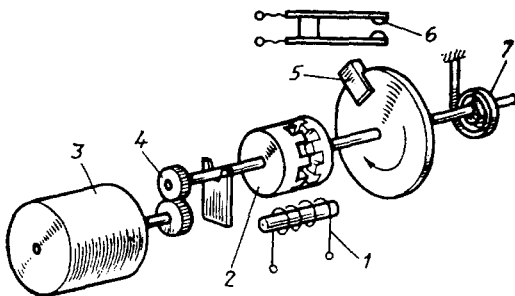


Рис. 19.7. Моторное реле времени с электромагнитом

§ 19.6. Электротермические реле

Электротермические реле предназначены для автоматического переключения электрических контактов в зависимости от температуры. Задача поддержания необходимой температуры или отключения какого-либо устройства при достижении некоторой температуры очень распространена в технике, причем не только в промышленной, но и в бытовой. Например, в холодильнике, в электроустье, в духовке электрической плиты установлены электротермические реле, которые также часто называют тепловыми реле. Потребность в тепловых реле исчисляется миллионами штук в год, поэтому главными требованиями к ним являются простота, дешевизна, надежность.

Наиболее широкое распространение получили биметаллические реле. Элементом, воспринимающим температуру, в таких реле является биметаллическая пластина (рис. 19.8, а). Она состоит из слоев двух металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. Например, для латуни этот коэффициент почти в 20 раз больше, чем для инвара (сплав железа с никелем). Поэтому при увеличении температуры слой латуни удлиняется значительно больше, чем слой инвара. Эти слои соединены жестко (сваркой или пайкой), и вся биметаллическая пластина при нагреве изгибается в сторону инвара. Поскольку один конец биметаллической пластины закреплен, второй конец перемещается, размыкая одну пару контактов и замыкая другую.

С помощью тепловых реле осуществляется и токовая защита различных электроустановок. В электротермических реле для токовой защиты используется тепловое действие электрического тока. Нагрев биметаллической пластины производится с помощью нагревательной спирали, по которой проходит ток. На рис. 19.8, б показана схема реле защиты электродвигателя от перегрева. Через нагревательную спираль *1* проходит ток одной из фаз цепи питания электродвигателя. Если нагрузка электродвигателя возрастает сверх

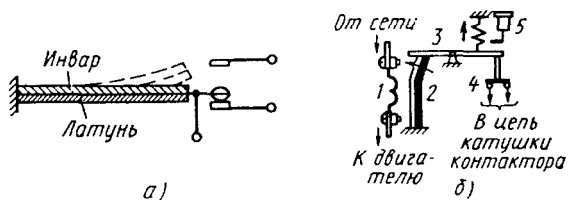


Рис. 19.8. Тепловое (электротермическое) реле

допустимых пределов, ток в спирали 1 увеличивается, температура растёт и биметаллическая пластина 2 изгибается влево, освобождая защёлку спускового механизма 3. Это приводит к размыканию контактов 4 реле, которые находятся в цепи питания аппаратуры включения электродвигателя. После остановки электродвигателя возврат контактов 4 реле и спускового механизма 3 в исходное положение выполняется вручную нажатием на кнопку 5 после остывания биметаллической пластины. Но для повторного запуска электродвигателя этого недостаточно, необходима подача специального сигнала на аппаратуру включения электродвигателя. Биметаллические реле обладают большой инерционностью и не реагируют на большие, но кратковременные увеличения тока. Поэтому пусковые токи электродвигателя не приводят к срабатыванию теплового реле.

В некоторых реле используется не косвенный нагрев биметаллической пластины с помощью спирали, а прямой — пропусканием тока непосредственно через пластину. Основным недостатком биметаллических реле является низкая точность. Но благодаря простоте и низкой стоимости они получили преимущественное распространение. Из числа других электротермических реле следует упомянуть электроконтактные термометры, в которых контакты замыкаются столбиком ртути, по уровню которой можно одновременно определить значение истинной температуры. Точность электроконтактных термометров выше, чем у биметаллических. Известны также электротермические реле с расширяющимся газом. В таких реле газ при нагреве вытесняет ртуть, находящуюся на дне баллона, и тем самым разрывает контакт.

§ 19.7. Шаговые искатели и распределители

Шаговые искатели и распределители под действием управляющего сигнала осуществляют поочередное переключение нескольких исполнительных цепей. В простейшем случае шаговый искатель (рис. 19.9, а) имеет один входной зажим и несколько выходных. При подаче управляющего импульса в обмотку электромагнита (ЭМ) входной зажим перемещается на один шаг, соединяясь с очередным выходным зажимом. Следовательно, номер подсоединённого выходного зажима определяется количеством импульсов, поступивших на обмотку электромагнита (ЭМ).

Устройство шагового искателя показано на рис. 19.9, б. По окружности расположен набор неподвижных контактов — ламелей 1.

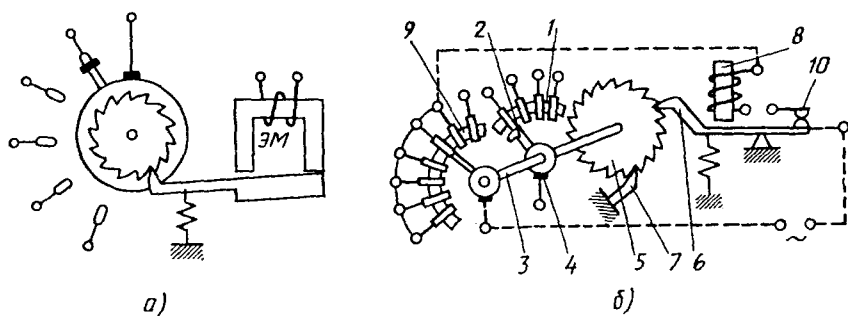


Рис. 19.9. Шаговые искатели

По этим ламелям скользит подвижный контакт 2, закрепленный на оси 3 и имеющий токоподвод с помощью кольца и щетки 4.

Шаговое перемещение контакта 2 осуществляется храповым механизмом, состоящим из храпового колеса 5, рабочей собачки 6 и формирующей собачки 7. Приводом храпового механизма служит электромагнит 8. При подаче в обмотку электромагнита управляющего импульса якорь притягивается к сердечнику и поворачивает храповое колесо на один зубец. В результате контакт 2 переходит с одной ламели на другую и происходит переключение во внешней цепи.

Шаговый искатель может иметь несколько рядов ламелей и контактов, укрепленных на одной оси, что позволяет увеличить число коммутируемых цепей. Шаговый механизм искателя может перемещаться лишь в одном направлении. Поэтому возврат подвижного контакта в исходное положение происходит после завершения полного оборота. Если число тактов в цикле работы шагового искателя меньше числа ламелей, то для ускоренного возврата в исходное положение используется специальный ряд ламелей 9 (рис. 19.9, б). Все ламели этого ряда, кроме нулевой, электрически соединены друг с другом. Цепь возврата образуется ламелями 4, катушкой электромагнита 8 и вспомогательными размыкающими контактами 10. При каждом срабатывании электромагнита 8 контакты 10 размыкаются и цепь возврата, показанная на рис. 19.9, б пунктиром, прерывается. Якорь электромагнита 8 возвращается в исходное положение, и контакты 10 вновь замыкаются, восстанавливая цепь возврата. В результате собачка 6 получает импульсное движение с частотой, определяемой собственной частотой электромеханической системы, и контакт 2 быстро перемещается по ламелям. Когда контакт 2 дойдет до нулевой ламели, цепь возврата размыкается и уско-

ренное движение шагового механизма прекращается. С помощью шагово-декадных распределителей осуществляется, например, автоматическая телефонная связь. Когда мы набираем номер вызываемого телефона, то диск телефонного аппарата дает столько импульсов, до какой цифры мы его повернули. При этом шагово-декадный распределитель произвел соединение с соответствующим выходным проводом и одновременно подключил очередную декаду ламелей (новый ряд из десяти ламелей).

В шаговых искателях разных типов число рядов ламелей может достигать 8, а число ламелей в ряду — 50. Все шаговые искатели рассчитаны на работу в импульсном режиме с частотой до 10 срабатываний в секунду.

§ 19. . Магнитоуправляемые контакты. Типы и устройство

В обычных электромагнитных реле наиболее часто отказ возникает из-за контактов, которые подвергаются вредным воздействиям окружающей среды (окислению, загрязнению, коррозии и др.). Существенно повысить надежность реле можно за счет герметизации контактов. Так как в этом случае невозможно механически связать контактный узел с электромагнитным приводом, то необходимо для перемещения герметизированных контактов использовать силы электромагнитного притяжения. Контактные пластины для этого изготавливаются из ферромагнитного материала. Таким образом, контакты становятся магнитоуправляемыми.

К магнитоуправляемым контактам относятся *герконы* (т. е. герметизированные контакты) и *ерри* *ы*. Применяются они для тех же целей, что и мощные электромагнитные реле. Они и возникли в результате совершенствования контактных электромагнитных устройств и стремления свести к минимуму их недостатки: сравнительно небольшой срок службы (до 10^7 срабатываний), невысокое быстродействие (десятки миллисекунд), потребление энергии в течение всего периода притяжения якоря и необходимость периодического обслуживания.

Геркон (рис. 19.10, *a*) представляет собой впаянные в стеклянную ампулу (баллон) пермаллоевые пластины *l*, служащие одновременно токоподводами, контактами и магнитопроводом. Пластины впаяны в ампулу таким образом, чтобы контакты, в качестве которых используются внутренние концы пластин, покрытые золотом, радием или вольфрамом, находились на некотором расстоянии друг от друга, т. е. были разомкнуты.

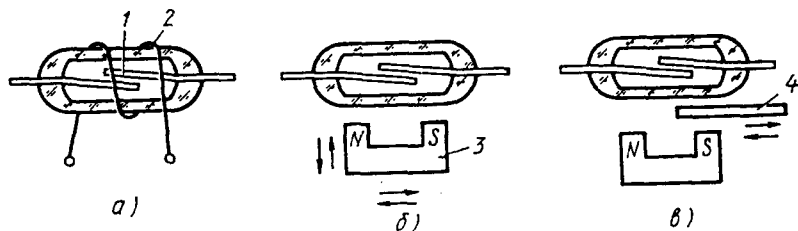


Рис. 19.10. Герконы — герметизированные магнитоуправляемые контакты

К наружным концам пластин припаивают провода, служащие для присоединения к внешней цепи. Если геркон поместить в магнитное поле, созданное током в обмотке 2, окружающей геркон, то на контакты будет действовать электромагнитная сила F_3 . Если эта сила окажется больше противодействующего усилия упругих пластин, то произойдет замыкание контактов.

Электромагнитная сила притяжения контактов определяется аналогично силе притяжения, действующей в любом другом электромагнитном механизме:

$$F_3 = 0,5(I\omega)^2 \frac{dG_8}{d\delta}. \quad (19.9)$$

Принимая зазор между пластинами плоскопараллельным, можно записать выражение для производной проводимости:

$$dG_8/d\delta = -bl_1\mu_0/\delta^2. \quad (19.10)$$

После подстановки (19.10) в уравнение (19.9) получим

$$F_3 = 0,5(I\omega)^2 bl_1\mu_0/(l + \delta)^2, \quad (19.11)$$

где I — ток в обмотке; ω — число витков; l — длина обмотки; l_1 — перекрытие пластин; b — ширина пластин.

После отключения обмотки пластины под действием сил упругости возвращаются в исходное состояние, т. е. контакты размыкаются. Следовательно, удержать контакт в замкнутом состоянии можно только за счет потребления энергии от сети, что является одним из недостатков геркона. Герконы бывают вакуумные и газонаполненные, в которых стеклянная ампула заполнена азотом, водородом или инертным газом.

Для управления магнитоуправляемым контактом можно использовать не только магнитное поле катушки с током (рис. 19.10, а), но и магнитное поле постоянного магнита (рис. 19.10, б). В последнем случае срабатывание контактов осуществляется в зависимости от взаимного перемещения геркона и постоянного магнита 3. Изме-

ние магнитного поля, воздействующего на контакты, может осуществляться и за счет изменения параметров магнитной цепи при перемещении ферромагнитного экрана 4 (рис. 19.10, в).

Большая часть управляющего магнитного потока во всех схемах герконов, изображенных на рис. 19.10, проходит по воздуху. Так как воздушные участки имеют значительное магнитное сопротивление, то чувствительность устройств на герконах сравнительно невелика. Она, например, ниже чувствительности якорных электромагнитных реле с одинаковыми коммутационными параметрами.

Для повышения чувствительности используют герконы с внешним магнитопроводом (рис. 19.11). Однако при этом увеличивается инерционность. Наличие внешнего магнитопровода увеличивает магнитную проводимость и, следовательно, индуктивность всей системы. Постоянная времени при этом возрастает пропорционально индуктивности. Комбинированная конструкция, объединяющая магнитоуправляемые контакты и внешний магнитопровод, называется ферридом. Название «феррид» объясняется тем, что первоначально эти элементы имели магнитопровод из феррита. Затем появились конструкции и с металлическим магнитопроводом. Так как материал магнитопровода имеет остаточную намагниченность, то феррид после отключения запоминает воспринятую информацию.

Повысить чувствительность можно не только за счет внешнего магнитопровода, но и с помощью поляризирующего постоянного магнита. В этом случае уже небольшой ток в обмотке приводит к срабатыванию контактов, если магнитные потоки обмотки и постоянного магнита направлены в одну сторону. С помощью поляризирующего магнита можно получить устройства, работающие не на замыкание контактов, а на их размыкание. Магнитный поток постоянного магнита должен быть таким, чтобы контакты при отсутствии тока в обмотке управления были притянуты друг к другу. При подаче тока в обмотку управления создается магнитный поток обратного направления, и под действием сил упругости контакты размыкаются.

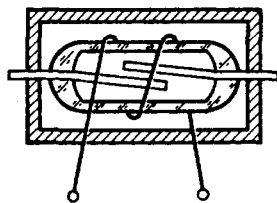


Рис. 19.11. Геркон с внешним магнитопроводом (феррид)

Реле на магнитоуправляемых контактах могут производить несколько сотен срабатываний в секунду, а общее число срабатываний может достигать 10^{12} . При этом сопротивление контактного перехода в замкнутом состоянии может составлять 10^{-3} Ом, а в разомкнутом — 10^9 – 10^{11} Ом. Выпускаемые промышленностью герконы имеют массу 0,4–3 г.

§ 19.9. Применение магнитоуправляемых контактов

На основе магнитоуправляемых контактов выпускаются высоконадежные промежуточные электромагнитные реле с числом контактных групп до десяти. В таких реле внутри общей катушки управления размещается несколько пар контактов (рис. 19.12). Как уже отмечалось, по сравнению с обычными электромагнитными реле герконовые имеют большее быстродействие и более надежны. Однако им свойственны и некоторые недостатки. Они имеют в 2—3 раза меньшие значения удельных токовых нагрузок на контакты, более критичны к переходным процессам в коммутируемой цепи. Например, при 3—5-кратном увеличении тока по сравнению с номинальным возможно сваривание контактов. В цепях с конденсаторами возможны значительные броски тока, поэтому применение герконовых реле для коммутации таких цепей не рекомендуется.

Необходимо отметить и характерный для герконовых реле недостаток — вибрация контактов при срабатывании. Это явление называется «дребезг» контактов. После подачи управляющего сигнала контакты сначала замыкаются, но тут же размыкаются под действием сил упругости. Таких циклов замыкания-размыкания может быть несколько. Затем происходит несколько колебаний контактов без размыкания; при этом происходит изменение контактного сопротивления. Время вибрации контактов может составлять половину полного времени срабатывания. Для борьбы с «дребезгом» контактов применяют специальные конструктивные и схемные решения.

На основе магнитоуправляемых контактов могут быть построены различные путевые и конечные выключатели, реле различных неэлектрических величин. В качестве примера на рис. 19.13 показаны термоэлектрические реле (*а*) с биметаллической пластиной и реле давления (*б*) с упругим элементом в виде сильфона (гофрированного упругого стакана из фосфористой бронзы). При изменении температуры или давления постоянный магнит приближается к геркону и его контакты срабатывают.

Магнитоуправляемые контакты специальной конструкции начинают применяться и для переключений в силовых цепях с мощностью до нескольких сотен ватт. В таких устройствах используется более массивный жесткий подвижный контактный сердечник, закрепленный

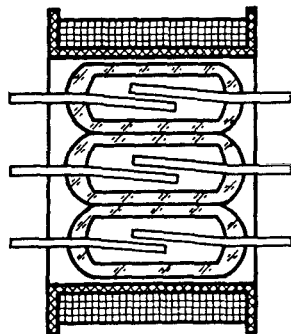


Рис. 19.12. Герконовое реле

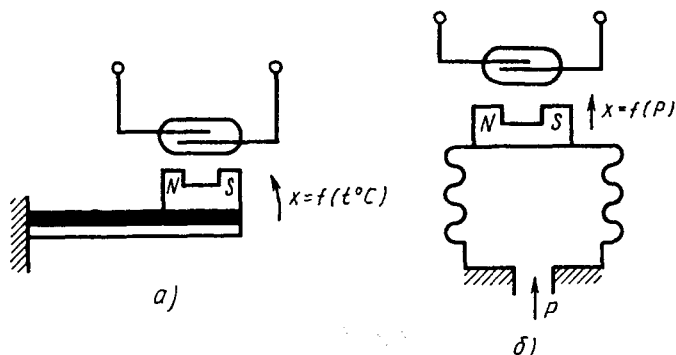


Рис. 19.13. Герконовые реле температуры и давления

на возвратной пружине. При этом за счет снижения электрического сопротивления контактной системы и улучшения теплоотдачи удастся повысить ток через контакты. Для этих же целей возможно применение жидкометаллических герметизированных контактов, внутри герметизированного баллона которых токопроводящие детали частично или полностью смочены ртутью.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия магнитоэлектрического реле.
2. Принцип действия электродинамического реле.
3. Принцип действия индукционного реле.
4. Как работает реле времени?
5. Принцип действия электротермического реле.
6. Как работает шаговый искатель?
7. Что такое геркон и как он устроен?

Глава 20

КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

§ 20.1. Назначение контакторов и магнитных пускателей

Наиболее распространенным потребителем электрической энергии является электродвигатель. Примерно $\frac{2}{3}$ всей вырабатываемой в стране электроэнергии потребляется электродвигателями. Основ-

ным коммутационным аппаратом, осуществляющим подключение электродвигателя к питающей сети, является *контактор*. Электромагнитный контактор представляет собой выключатель, приводимый в действие с помощью электромагнита. По сути дела, это мощное электромагнитное реле, контактный узел которого способен замыкать и размыкать силовые цепи с токами в десятки и сотни ампер при напряжениях в сотни вольт. При таких электрических нагрузках необходимо принятие специальных мер по гашению дуги. Поэтому по сравнению с обычными электромагнитными реле электромагнитные контакторы имеют дугогасительные устройства и более мощные электромагнит и контактные узлы. Кроме силовых (мощных) контактов имеются и блокировочные контакты, используемые в цепях управления для целей автоматизации. Различают контакторы постоянного и переменного тока. Для автоматического пуска, остановки и реверса электродвигателей применяют *магнитные пускатели*. Они представляют собой комплектные электрические аппараты, включающие в себя электромагнитные контакторы, кнопки управления, реле защиты и блокировки.

Контакторы и магнитные пускатели используются и для включения других мощных потребителей электроэнергии: осветительных и нагревательных установок, преобразовательного и технологического электрического оборудования.

К этой же группе электрических силовых аппаратов следует отнести *автоматические выключатели*, которые также предназначены для подключения к питающей сети мощных электропотребителей. Замыкание их контактов производится не с помощью электромагнита, а вручную. Автоматически они производят лишь выключение нагрузки, защищая ее от перегрузок по току. Если контакторы и магнитные пускатели способны работать при частых включениях и отключениях, то автоматические выключатели обычно применяют при включениях на продолжительное время. В типовые схемы электропривода обычно входят автоматический выключатель (питающий и силовые, и управляющие цепи) и магнитный пускатель (осуществляющий непосредственную коммутацию для пуска, остановки и реверса электродвигателя).

§ 20.2. Устройство и особенности контакторов

Принцип действия контакторов такой же, как и у электромагнитных реле. Поэтому и устройство их во многом сходно. Главное отличие заключается в том, что контакты контакторов коммутируют

большие токи. Поэтому они выполняются более массивными, требуют больших усилий, между ними при разрыве возникает дуга, которую необходимо погасить.

Основными узлами контактора являются электромагнитный механизм, главный (силовой) контактный узел, дугогасительная система, блокировочный контактный узел.

Электромагнитный механизм осуществляет замыкание и размыкание контактов. При подаче напряжения на втягивающую катушку электромагнита якорь притягивается к сердечнику, а механически связанные с ним подвижные контакты замыкают силовую цепь и выполняют необходимые переключения в цепи управления.

Магнитные системы контакторов в зависимости от характера движения якоря и конструкции различают на поворотные и прямоходовые. Магнитопровод контактора поворотного типа устроен аналогично клапанному реле. Для устранения залипания якоря используют немагнитные прокладки. Для замыкания силовых контактов требуются значительно бóльшие усилия, чем развиваемые в реле. Поэтому электромагнитный механизм контактора выполняется более мощным и массивным. При срабатывании контактора происходит довольно значительный удар якоря о сердечник. Частично этот удар принимает на себя немагнитная прокладка; кроме того, магнитную систему амортизируют пружиной, которая также уменьшает вибрацию контактов.

Магнитопровод контактора прямоходного типа имеет обычно Ш-образную форму. В этом случае для устранения залипания якоря делают зазор между средними стержнями сердечника и якоря.

Втягивающая катушка обычно обеспечивает включение и удержание якоря в притянутом положении. Но иногда используют две катушки: мощную включающую и менее мощную удерживающую. В этом случае контактор во включенном состоянии потребляет меньше электроэнергии, поскольку включающая катушка находится под током только короткое время. Размыкание контактов происходит за счет отключающей пружины при снятии напряжения с катушки контактора. Втягивающая катушка должна обеспечивать надежное срабатывание контактора при снижении напряжения до $0,85U_{ном}$. По нагреву катушка должна выдерживать повышение напряжения до $1,05U_{ном}$.

В контакторах с поворотным якорем (см. рис. 20.1) наибольшее распространение получили линейные перекатывающиеся контакты (см. рис. 16.5). В прямоходных контакторах (см. рис. 20.3) применяются мостиковые контактные системы (см. рис. 16.4). Контактный мостик имеет небольшую массу и выполняется самоустанавливаю-

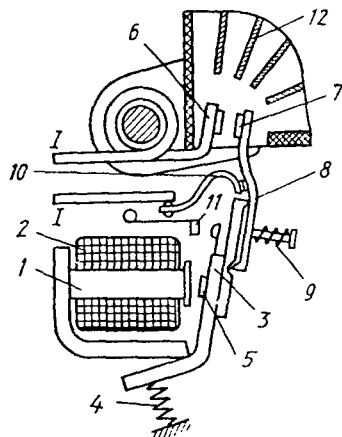


Рис. 20.1. Контактор постоянного тока

шимся, что снижает вибрацию контактов. Для предотвращения вибрации контактная пружина создает предварительное нажатие, равное примерно половине конечной силы нажатия.

У контакторов для длительного режима работы на поверхность медных контактов обычно напаивается металлокерамическая или серебряная пластинка. Контакты иногда могут выполняться из меди, если образующаяся пленка окисла на рабочей поверхности контактов периодически снимается их самоочисткой.

Дугогасительная система контакторов постоянного тока обычно выполняется в виде камеры с продольными щелями, куда дуга вытесняется с помощью магнитной силы. Дугогасительная система контакторов переменного тока обычно имеет вид камеры со стальными дугогасительными пластинами и двойным разрывом дуги в каждой фазе.

Блокировочные или вспомогательные контакты применяются для переключений в цепях управления и сигнализации, поэтому они имеют такое же конструктивное выполнение, как и контакты реле.

§ 20.3. Конструкции контакторов

Как правило, род тока в цепи управления, которая питает катушку контактора, совпадает с родом тока главной цепи. Поэтому контакторы постоянного тока, предназначенные для включения двигателей постоянного тока, имеют электромагнитный механизм, питае-

мый постоянным током. Соответственно контакторы переменного тока, предназначенные для включения двигателей (или другой нагрузки) переменного тока, имеют электромагнитный механизм, питаемый переменным током. Бывают и исключения. Известны, например, случаи, когда катушки контакторов переменного тока получают питание от цепи постоянного тока.

Устройство контактора постоянного тока показано на рис. 20.1. Электромагнитный механизм поворотного типа состоит из сердечника 1 с катушкой 2, якоря 3 и возвратной пружины 4. Сердечник 1 имеет полюсный наконечник, необходимый для увеличения магнитной проводимости рабочего зазора электромагнита. Немагнитная прокладка 5 служит для предотвращения залипания якоря. Силовой контактный узел состоит из неподвижного 6 и подвижного 7 контактов. Контакт 7 шарнирно закреплен на рычаге 8, связанном с якорем 3 и прижатом к нему нажимной пружиной 9. Подвод тока к подвижному контакту 7 выполнен гибкой медной лентой 10. Замыкание главных контактов 6 и 7 происходит с проскальзыванием и перекатыванием, что обеспечивает очистку контактных поверхностей от окислов и нагара. При срабатывании электромагнитного механизма кроме главных контактов переключаются вспомогательные контакты блокировочного контактного узла 11. При размыкании главных контактов 6 и 7 между ними возникает электрическая дуга, ток которой поддерживается за счет ЭДС самоиндукции в обмотках отключаемого электродвигателя. Для интенсивного гашения электрической дуги служит дугогасительная камера 12. Она имеет дугогасительную решетку в виде тонких металлических пластин, которые разрывают дугу на короткие участки. Пластины интенсивно отводят теплоту от дуги и гасят ее. Однако при большой частоте включения контактора пластины не успевают остывать и эффективность дугогашения падает.

Для вытеснения дуги в сторону дугогасительной решетки можно использовать электромагнитную силу, так называемое магнитное дутье. На рис. 20.2 показана дугогасительная камера с узкой щелью и магнитным дутьем. Щелевая камера образована двумя стенками 1, выполненными из изоляционного материала. Система магнитного дутья состоит из катушки 2, включенной последовательно с главными контактами и размещенной на сердечнике 3. Для подвода магнитного поля в зону образования дуги служат ферромагнитные щеки 4. В результате взаимодействия электрического тока дуги с магнитным полем появляется сила F , которая растягивает дугу и вытесняет ее в щелевую камеру между стенками 1. За счет усиленного отвода теплоты стенками камеры дуга быстро гаснет.

При последовательном включении главных контактов в катушке магнитного дутья направление силы F остается постоянным при любом направлении тока в силовой цепи, поскольку сила F пропорциональна квадрату тока (ведь магнитное поле создается этим же током). Поэтому магнитное дутье можно использовать и в контакторах переменного тока.

Контакторы переменного тока отличаются от контакторов постоянного тока прежде всего тем, что они, как правило, выполняются трехполюсными. Основное назначение контакторов переменного тока — включение трехфазных асинхронных электродвигателей. Поэтому они имеют три главных (силовых) контактных узла. Все три главных контактных узла работают от общего электромагнитного приводного механизма клапанного типа, который поворачивает вал с установленными на нем подвижными контактами. С этим же приводом связаны вспомогательные контакты. Главные контактные узлы имеют систему дугогашения с магнитным дутьем и дугогасительной щелевой камерой или дугогасительной решеткой. В контакторах быстрее всего изнашиваются главные контакты, поскольку они подвергаются интенсивной эрозии (как говорится, контакты выгорают). Для увеличения общего срока службы контакторов предусматривается возможность смены контактов.

Наиболее сложным и трудным этапом работы контактов является процесс их размыкания. Именно в этот момент контакты оплавляются, между ними возникает дуга. Для облегчения работы главных контактов при размыкании выпускаются контакторы переменного тока с полупроводниковым блоком. В этих контакторах параллельно главным замыкающим контактам включают по два тиристора (управляемых полупроводниковых диода). Во включенном положении ток проходит через главные контакты, поскольку тиристоры находятся в закрытом состоянии и ток не проводят. При размыкании контактов схема управления на короткое время открывает тиристоры, которые шунтируют цепь главных контактов и разгружают их от тока, препятствуя возникновению электрической дуги. Такие комбинированные тиристорные контакторы выпускаются на токи в сотни ампер. Поскольку тиристоры работают в кратковременном режиме, они не перегреваются и не нуждаются в радиаторах охлаждения.

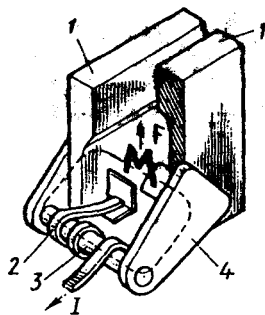


Рис. 20.2. Дугогасительная камера с электромагнитным дутьем

Коммутационная износостойкость комбинированных контакторов составляет несколько миллионов циклов, в то время как главные контакты обычных контакторов постоянного и переменного тока выдерживают обычно 150—200 тыс. включений.

Для управления электродвигателями переменного тока небольшой мощности применяют прямоходовые контакторы с мостиковыми контактными узлами. Благодаря двукратному разрыву цепи и облегченным условиям гашения дуги переменного тока в этих контакторах не требуются специальные дугогасительные камеры с магнитным дутьем, что существенно уменьшает их габаритные размеры.

Электромагнитный привод контактора переменного тока малой мощности (рис. 20.3) имеет Ш-образный сердечник 1 и якорь 2, собранные из пластин электротехнической стали. Часть полюсов сердечника охвачена короткозамкнутым витком, что предотвращает вибрацию якоря, вызванную снижением силы электромагнитного притяжения до нуля при прохождении переменного синусоидального тока через нуль. Катушка 3 контактора охватывает сердечник и якорь, она и создает намагничивающую силу в магнитной системе контактора. На якоре 2 закреплены подвижные контакты 4 мостикового типа, что повышает надежность отключения за счет двукратного размыкания. В пластмассовом корпусе установлены неподвижные контакты 5 и 6. Пружина 7 возвращает контакты 4 в исходное положение. В трехфазном контакторе — три контактные пары, отделенные друг от друга пластмассовыми переключками 8. Главные контакты имеют металло-керамические накладки и защищены крышкой. Вспомогательные контакты на рис. 20.3 не показаны.

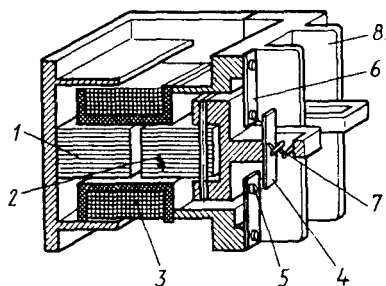


Рис. 20.3. Контактр переменного тока

Вспомогательные контакты на рис. 20.3 не показаны.

§ 20.4. Магнитные пускатели

Магнитный пускатель — это комплектное устройство, предназначенное главным образом для пуска трехфазных асинхронных двигателей. Основной составной частью магнитного пускателя является трехполюсный контактор переменного тока. Кроме того, контактор имеет кнопки управления и тепловые реле.

Схема включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором показана на рис. 20.4. Для пуска электродвигателя M нажимается кнопка $SB1$ («Пуск»). Через катушку контактора KM проходит ток, электромагнит контактора срабатывает и замыкаются все его контакты, которые на схеме обозначаются теми же буквами KM . Силовые контакты KM подключают на трехфазное напряжение обмотку электродвигателя M . Параллельно кнопке $SB1$ подсоединены блокировочные контакты KM . Так как они замкнулись, то после отпускания кнопки $SB1$ катушка контактора получает питание по этим контактам. Следовательно, для включения электродвигателя не надо все время держать кнопку нажатой: достаточно ее один раз нажать и отпустить. Для останова электродвигателя служит кнопка $SB2$ («Стоп»), при нажатии которой разрывается цепь питания контактора KM . Для защиты электродвигателя от перегрева служат тепловые реле $FP1$ и $FP2$, чувствительные элементы которых включаются в две фазы электродвигателя, а размыкающие контакты, обозначенные теми же буквами, включены в цепь питания катушки контактора KM . Для защиты самой схемы управления служат плавкие предохранители FV . На схеме показан также рубильник P , который обычно замкнут. Его размыкают лишь в том случае, когда собираются проводить ремонтные работы. Подобная схема является типовой, она применяется во всех случаях, когда не требуется изменение направления вращения (реверс) электродвигателя и интенсивное (принудительное) торможение.

На рис. 20.5 показана конструкция нереверсивного магнитного пускателя, который смонтирован в ящике с открывающейся крышкой. Электромагнитный механизм I контактора при срабатывании

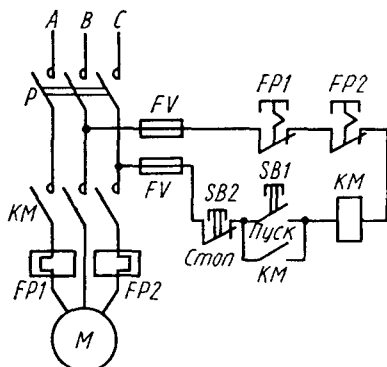


Рис. 20.4. Схема включения трехфазного асинхронного электродвигателя с магнитным пускателем

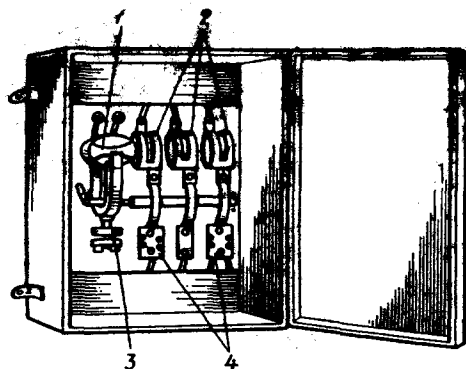


Рис. 20.5. Конструкция нереверсивного магнитного пускателя

перемещает три подвижных контакта 2, размещенных в дугогасительных камерах. Одновременно переключаются блокировочные контакты 3. Последовательно с двумя главными контактными узлами включены тепловые реле 4.

Кнопки «Пуск» и «Стоп» обычно находятся вне ящика пускателя, они размещены на пульте управления под рукой у рабочего. Кнопка «Стоп» имеет красный цвет.

Реверсивная схема включения трехфазного асинхронного двигателя показана на рис. 20.6. Для того чтобы реверсировать (изменить направление вращения) трехфазный асинхронный двигатель, необходимо изменить порядок чередования фаз на обмотке статора. Например, если для прямого вращения фазы подключались в последовательности *ABC*, то для обратного вращения необходима последовательность *ACB*. Поэтому в состав реверсивного магнитного пускателя входят два контактора: *KВ* для вращения вперед и *КН* для вращения назад. Кроме того, реверсивный магнитный пускатель имеет три кнопки управления и тепловые реле. В ряде случаев в комплект магнитного пускателя входят пакетный переключатель и плавкие предохранители. Схема (рис. 20.6) работает следующим образом.

Для включения электродвигателя *M* в прямом направлении необходимо нажать кнопку *SB1* («Вперед»). При этом срабатывает контактор *KВ* и своими силовыми контактами подключает к трехфазной сети обмотки электродвигателя. Одновременно блокировочные контакты *KВ* разрывают цепь питания катушки контактора *КН*, чем исключается возможность одновременного включения обоих контакторов. Для включения электродвигателя в обратном направлении необходимо нажать кнопку *SB2* («Назад»). В этом случае срабатывает

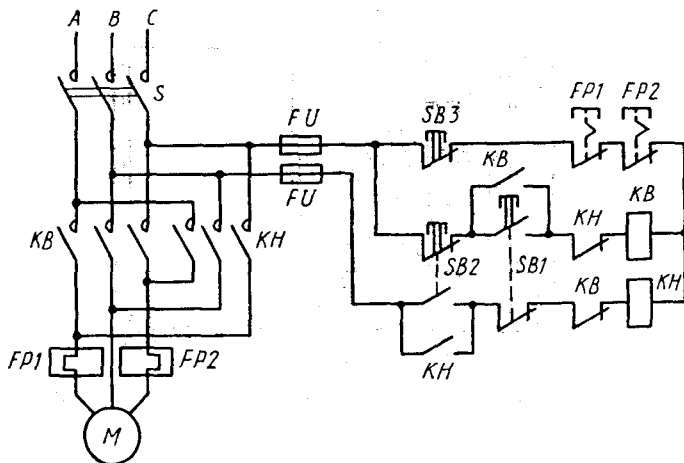


Рис. 20.6. Схема включения трехфазного асинхронного электродвигателя с реверсивным магнитным пускателем

контактор *КН* и своими силовыми контактами подключает к трехфазной сети обмотки электродвигателя. Последовательность соединения фаз теперь иная, чем при срабатывании контактора *КВ*: две фазы из трех поменялись местами. При срабатывании контактора *КН* его блокировочные контакты разрывают цепь питания катушки контактора *КВ*. Нетрудно видеть, что при одновременном включении контакторов *КВ* и *КН* произошло бы короткое замыкание двух линейных проводов трехфазной сети друг на друга. Для того чтобы исключить такую аварию, и нужны блокировочные размыкающиеся контакты контакторов *КВ* и *КН*. Следовательно, если подряд нажать обе кнопки (*SB1* и *SB2*), то включится только тот контактор, кнопка которого была нажата раньше (пусть даже на мгновение).

Для реверса электродвигателя надо предварительно нажать кнопку *SB3* («Стоп»). В этом случае блокировочные контакты подготавливают цепь управления для нового включения. Для надежной работы необходимо, чтобы силовые контакты контактора разомкнулись раньше, чем произойдет замыкание блокировочных контактов в цепи другого контактора. Это достигается соответствующей регулировкой положения блокировочных контактов по ходу якоря электромагнитного механизма контактора. Для блокировки кнопок *SB1* и *SB2* используются замыкающиеся блокировочные контакты соответствующего контактора, подключенные параллельно кнопке.

Необходимо исключить одновременное срабатывание обоих контакторов, для чего используют двойную или даже тройную бло-

кировку. Для этой цели в схеме рис. 20.6 применяют двухцепные кнопки *SB1* и *SB2*. Например, кнопка *SB1* при нажатии замыкает свои контакты в цепи контактора *KB* и разрывает свои контакты в цепи контактора *KH*. Аналогично работает двухцепная кнопка *SB2*. Кроме того, реверсивные магнитные пускатели могут иметь механическую блокировку с перекидным рычагом, препятствующим одновременному срабатыванию электромагнитов контакторов. Контакты тепловых реле *FP1* и *FP2*, включенные в две фазы обмотки электродвигателя, отключают цепь питания катушек обоих контакторов при длительном протекании большого тока, чтобы не допустить перегрева обмоток. Для защиты схемы управления служат плавкие предохранители *FV*.

Магнитные пускатели и контакторы выбирают по номинальному току электродвигателя с учетом условий эксплуатации. В промышленности применяются магнитные пускатели серий ПМЕ и ПМЛ с прямоходовыми контакторами и серии ПАЕ с подвижной системой поворотного типа.

§ 20.5. Автоматические выключатели

Автоматический выключатель предназначен для включения и отключения электрических цепей и электрооборудования, а также для защиты от больших токов, возникающих при коротких замыканиях и перегрузках. В отличие от магнитного пускателя автоматический выключатель не может использоваться для автоматических систем, использующих электрические управляющие сигналы. Он также не обеспечивает реверса электродвигателя. Автоматический выключатель часто используют для продолжительного включения нереверсируемых электродвигателей. Может он также использоваться вместо рубильника в схемах с магнитным пускателем (см. рис. 20.4 и 20.6).

Устройство автоматического воздушного выключателя (автомата) показано на рис. 20.7. С помощью рукоятки *1* производится включение и отключение автомата. В состоянии, показанном на рисунке, автомат отключен и подвижный контакт *2* не замкнут с неподвижным контактом *3*. Для включения автомата следует взвести пружину *6*, при этом рукоятка *1* перемещается вниз и поворачивает деталь *4*, которая своим нижним концом входит в зацепление с зубом удерживающего рычага *5*. Теперь автомат готов к включению. Для его включения рукоятку *1* перемещают вверх. Пружина *6* займет такое положение, что шарнирно соединенные рычаги *7* и *8* перемещаются вверх по отношению к тому положению, когда они на-

ходятся на одной прямой. Автомат включится: цепь тока создается через контакты 2 и 3, расцепители 9 и 10.

Автоматическое отключение автомата происходит при срабатывании расцепителей. При длительных токовых перегрузках срабатывает тепловой биметаллический расцепитель 10, свободный конец которого перемещается вниз, поворачивая рычаг 5 по часовой стрелке. Зуб рычага расцепляется с деталью 4, которая поворачивается, а рычаги 7 и 8 проходят мертвое положение. Усилие пружины 6 направлено вниз, под его действием размыкаются контакты 2 и 3. Отключение при максимально допустимом токе происходит под действием электромагнитной силы $F_{\text{Э}}$, выводящей зуб рычага 5 из зацепления с деталью 4. Если произошло автоматическое отключение нагрузки, то рукоятка 1 остается в верхнем положении.

Ручное отключение автомата происходит при перемещении рукоятки 1 вниз. Возникающая при размыкании контактов 2 и 3 электрическая дуга гасится с помощью дугогасительной решетки 11.

Автоматы могут снабжаться расцепителями минимального напряжения, отключающими автомат при напряжении в сети ниже допустимого значения. Для дистанционного управления автоматическим выключателем могут использоваться специальные их конструкции, дополненные электромагнитным приводом рукоятки 1.

Выпускаемые промышленностью автоматические выключатели типов АК, АП, АЕ имеют от 1 до 3 пар силовых контактов. Они предназначены для цепей с напряжением от 110 до 500 В при токах в десятки ампер. Время автоматического отключения составляет 0,02—0,04 с.

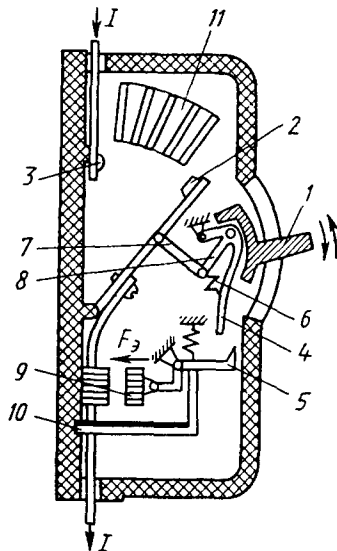


Рис. 20.7. Автоматический выключатель

Контрольные вопросы

1. Где используются контакторы и магнитные пускатели?
2. Чем отличается контактор от обычного реле?
3. Как работает автоматический выключатель?

Глава 21

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

§ 21.1. Назначение электромагнитных исполнительных устройств

Исполнительные устройства в системах автоматики предназначены для приведения в действие (т. е. для привода) различных регулирующих органов, оказывающих непосредственное воздействие на объект управления с целью достижения выходной величиной этого объекта требуемого значения. Существует большое разнообразие регулирующих органов: для изменения подачи жидкостей и газов в трубопроводах устанавливаются заслонки, клапаны, шиберы и краны; в подъемно-транспортных устройствах это различные контакторы, муфты, тормоза, вариаторы скорости; в осветительных и нагревательных электроустановках это различные коммутационные аппараты.

Для воздействия на регулирующие органы необходимо выполнить механическую работу: повернуть заслонку или кран, соединить две половинки муфты, переместить шестерню на валу коробки передач, замкнуть контакты и т. д. Входным сигналом исполнительного устройства в электрических системах автоматики является электрический ток или напряжение, а выходным сигналом — механическое перемещение.

Для преобразования электрической энергии в механическую служат электромагниты и электродвигатели. В данной главе будут рассмотрены только электромагнитные исполнительные устройства. Электродвигатели являются электрическими машинами и изучаются в соответствующем курсе. Следует отметить, что почти всегда, когда ставится вопрос о разработке привода для регулирующего органа, приходится делать выбор между двумя вариантами: электромагнит или электродвигатель. Основное преимущество электромагнита — простота конструкции. У электродвигателя достоинств больше: высокий КПД, возможность получения любых скоростей и перемещений. Однако эти преимущества проявляются только в сравнительно сложных системах автоматики и при продолжительном режиме работы. При необходимости иметь небольшие перемещения (несколько миллиметров) и усилия (несколько десятков — сотен ньютон) электромагниты выгоднее, чем электродвигатель с редуктором.

В предыдущих главах уже рассматривались электромагниты, используемые как составная часть электромагнитных реле и контакто-

ров. В данной главе будут рассмотрены общие вопросы классификации электромагнитов, их расчета, конструирования, применения в качестве исполнительных элементов систем автоматики.

§ 21.2. Классификация электромагнитов

В зависимости от вида тока в обмотке электромагниты подразделяют на электромагниты постоянного и переменного токов, по скорости срабатывания — на быстродействующие, нормальные и замедленного действия. По назначению электромагниты разделяют на приводные и удерживающие.

Приводные электромагниты служат для выполнения механической работы. При подаче питания они перемещают различные исполнительные устройства: клапаны, толкатели, заслонки, золотники, железнодорожные стрелки. Они перемещают контакты реле и контакторов, печатающие и перфорирующие устройства. Для выполнения этой работы электромагниты должны быть рассчитаны на определенную силу и перемещение.

Удерживающие электромагниты служат не для перемещения, а лишь для удерживания ферромагнитных деталей. Например, электромагнит, используемый при подъеме железного металлолома, только удерживает его, а перемещение осуществляется подъемным краном. В этом случае электромагнит выполняет лишь роль крюка подъемного крана. В металлообработке используются электромагнитные плиты для фиксации обрабатываемой детали на станке. Известны также электромагнитные замки. Поскольку удерживающие электромагниты не совершают работы, они рассчитываются лишь на определенное усилие. В некоторых случаях электромагнит имеет две катушки: одна, более мощная, используется для перемещения якоря, а другая — лишь для удерживания якоря в притянутом положении.

Велико разнообразие электромагнитов специального назначения. Они используются для фокусировки электронных пучков в телевидении, в ускорителях элементарных частиц, в разнообразных измерительных приборах, в медицинской аппаратуре и т. д.

По конструктивному выполнению различают клапанные (поворотные), прямоходовые и электромагниты с поперечным движением. *Клапанные* электромагниты имеют небольшое перемещение якоря (несколько миллиметров) и развивают большое тяговое усилие.

Прямоходовые электромагниты имеют большой ход якоря и большее быстродействие; по размерам они меньше, чем клапанные.

Часто они представляют собой соленоид (цилиндрическую катушку, стягивающую в себя ферромагнитный стержень), поэтому их иногда называют соленоидными электромагнитами.

Различные конструкции электромагнитов показаны на рис. 21.1. Несмотря на большое их многообразие (далеко не все возможные конструкции показаны на этом рисунке), все они состоят из катушки 1, якоря (подвижного магнитопровода) 2, неподвижного магнитопровода (сердечника 3 и ярма 4). Кроме того, они имеют различные пружины, крепежные, фиксирующие и передающие детали, корпус. По конструкции магнитной цепи различают электромагниты с разомкнутым (рис. 21.1, *з, е*) и замкнутым магнитопроводом (рис. 21.1, *а, б, в, д, ж, з*). По форме магнитопровода различают электромагниты с П-образным, Ш-образным и цилиндрическим магнитопроводом.

Магнитопроводы электромагнитов постоянного тока обычно выполняются сплошными из магнитомягких материалов: обычных конструкционных сталей и низкоуглеродистых электротехнических сталей. Высокочувствительные электромагниты имеют магнитопровод из пермаллоев (сплавов железа с никелем и кобальтом). В быстродействующих электромагнитах стремятся к уменьшению вихревых токов, для чего используют электротехнические кремнистые стали с повышенным электрическим сопротивлением и шихтованный (наборный) магнитопровод.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод электромагнитов переменного тока собирают (шихтуют) из изолирован-

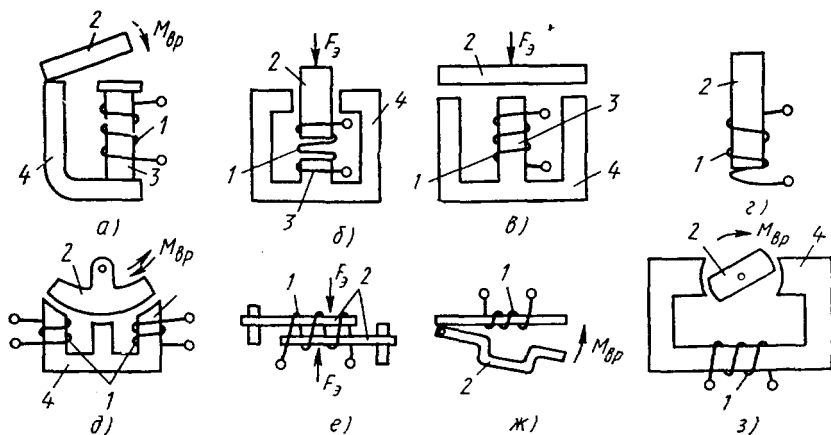


Рис. 21.1. Варианты конструктивных схем электромагнитов

ных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. В качестве материала используются горячекатаные и холоднокатаные электротехнические стали. Отдельные части магнитопровода, которые трудно выполнить шихтованными, изготавливают из сплошного материала толщиной 2—3 мм.

Катушки электромагнитов по своей конструкции бывают каркасные и бескаркасные, а по форме сечения — круглые и прямоугольные. Провод каркасной катушки наматывают на каркас из изоляционного материала (текстолит, гетинакс, пластмасса). Провод бескаркасной катушки наматывают прямо на сердечник, обмотанный изоляционной лентой, или на специальный шаблон. Для обеспечения прочности катушки, выполненной на шаблоне, ее обматывают лентой (бандажируют) и пропитывают компаундным лаком. Катушки, как правило, наматывают медным проводом с изоляцией, выбираемой исходя из назначения и условий работы электромагнита.

В зависимости от способа включения различают последовательные и параллельные катушки. Параллельные катушки имеют большое число витков и наматываются тонким проводом. Обычно они включаются на полное напряжение сети. Последовательные катушки имеют сравнительно малое сопротивление, так как выполняются толстым проводом и с малым числом витков. Ток такой катушки определяется не ее сопротивлением, а зависит от тех устройств, с которыми катушка включена последовательно.

Различают также электромагниты, предназначенные для длительной, кратковременной и повторно-кратковременной работы.

§ 21.3. Порядок проектного расчета электромагнита

Исходными данными для расчета электромагнита обычно являются требуемое тяговое усилие F_z , ход (или угол поворота) якоря и напряжение питания U . Кроме того, в задании на проектирование указываются режим работы электромагнита и условия эксплуатации. Могут быть заданы требуемые быстродействие, габариты, вес, стоимость.

В результате расчета необходимо выбрать конструкцию электромагнита, материал магнитопровода, определить геометрические размеры магнитопровода и катушки, обмоточные данные.

На первом этапе проектного расчета необходимо выбрать конструкцию электромагнита, используя понятие конструктивного фак-

тора A . Эта величина определяется в зависимости от тягового усилия F_3 и хода якоря δ :

$$A = \sqrt{F_3} / \delta, \quad (21.1)$$

где F_3 — в Н; δ — в см.

При $A < 0,2$ используют прямоходовый электромагнит соленоидного типа; при $1,85 < A < 16$ — прямоходовый с коническим стопом; при $16 < A < 90$ — прямоходовый с плоским стопом; при $2,6 < A < 26$ — с поворотным якорем клапанного типа.

Форму электромагнита выбирают с учетом необходимой тяговой характеристики. На рис. 21.2 показаны типичные тяговые характеристики электромагнитов. Если необходимо иметь пологую тяговую характеристику 1, то следует применять прямоходовый электромагнит, если крутую 2 — клапанный электромагнит. Ш-образная форма электромагнита (кривая 3) используется преимущественно в схемах переменного тока.

На втором этапе выбирается индукция и определяется сечение магнитопровода.

Сила притяжения якоря в основном создается магнитным потоком в воздушном зазоре. Поэтому при проектном расчете влияние на тяговую силу потоков рассеяния обычно не учитывается. Оптимальный магнитный поток и индукция в рабочем воздушном зазоре может находиться в весьма широких пределах и зависит от соотношения между тяговым усилием и величиной хода, т. е. от конструктивного фактора A . На рис. 21.3 приведены зависимости индукции B_δ от конструктивного фактора для трех конструкций электромагнитов (с плоским стопом, с коническим стопом, клапанного типа). После выбора по этим кривым индукции B_δ можно определить площадь сечения полюсного наконечника.

Напомним формулу (17.13), связывающую тяговое усилие F_3 с индукцией в зазоре B_δ и сечением полюсного наконечника s :

$$F_3 = 4B_\delta^2 s \cdot 10^5.$$

При определении диаметра сердечника необходимо предварительно задаться индукцией в стали $B_{ст}$ и коэффициентом рассеяния σ магнитной системы. Для мощных электромагнитов $B_{ст}$ принимается в пределах 1,2—1,4 Тл, для небольших магнитных систем реле — в пределах от 0,4 до 0,7 Тл. Коэффициент рассеяния $\sigma = 1,5 \div 2,5$. Меньшие значения берутся при малых ходах яко-

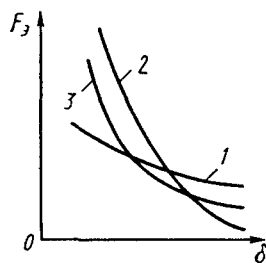


Рис. 21.2. Тяговые характеристики электромагнитов разных конструкций

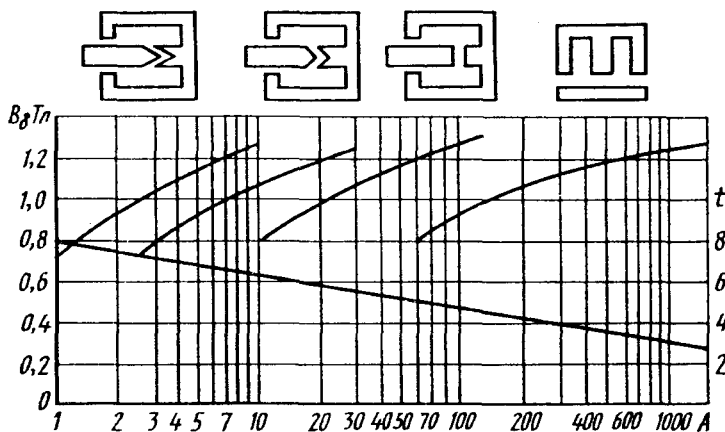


Рис. 21.3. Зависимость индукции в зазоре электромагнита и размеров катушки от величины конструктивного фактора

ря, большие — для перемещений в несколько сантиметров. Сечение сердечника определяется по формуле

$$s_c = \sigma B_\delta s / B_{ст}. \quad (21.2)$$

Сечение ярма обычно принимается равным сечению сердечника s_c , а сечение якоря — меньшим:

$$s_{як} = s_c / \sigma. \quad (21.3)$$

На следующем этапе определяются геометрические размеры электромагнита, связанные с размещением катушки. При протекании по катушке с числом витков ω тока I катушка должна создать МДС, обеспечивающую индукцию в зазоре B_δ . Так как часть этой МДС теряется в паразитных зазорах и в стали магнитопровода, то следует учесть долю МДС, не участвующую в создании требуемого тягового усилия. Введем коэффициент α , представляющий собой отношение МДС, не участвующей в создании тягового усилия, к общей МДС катушки. Тогда, полагая проводимость воздушного зазора $G = s/\delta$, определяем полную МДС катушки:

$$I\omega = B_\delta \delta / \mu_0 (1 - \alpha), \quad (21.4)$$

где $\alpha = 0,15 \pm 0,75$. Ее можно уточнить при расчете магнитной цепи с использованием кривых намагничивания для выбранного материала магнитопровода.

Соотношение высоты обмоточного пространства катушки h к его ширине a ($t = h/a$) обычно выбирается по конструктивному фак-

тору (нижняя кривая на рис. 21.3). Конкретные размеры катушки выбирают на основании условий нагрева катушки. При этом учитываются режим работы, коэффициент теплоотдачи K_T , способ намотки, влияющий на коэффициент заполнения K_3 , изоляция провода, определяющая допустимую температуру $\tau_{уст}$. Кроме того, необходимо учесть и возможность снижения напряжения питания $U_{ном}$ до U_{min} ($U_{min} = \gamma U_{ном}$).

С учетом этих факторов ширина обмоточного пространства катушки определяется по формуле

$$a = \sqrt[3]{\rho (Iw)^2 / (2\gamma^2 K_3 K_T t^2 \tau_{уст})}. \quad (21.5)$$

Зная размеры катушки, можно определить все размеры магнитопровода электромагнита: высоту сердечника и ярма, расстояние между ними и т. д.

§ 21.4. Особенности расчета электромагнитов переменного тока

В электромагнитах переменного тока индукция в магнитной цепи изменяется по синусоидальному закону. Так как максимальное (амплитудное) значение индукции в $\sqrt{2}$ раз больше действующего значения, а величина тягового усилия пропорциональна квадрату индукции, то электромагнит переменного тока при одинаковой степени насыщения магнитопровода развивает в два раза меньшее значение тягового усилия. Поэтому при определении конструктивного фактора для электромагнита переменного тока принимается удвоенное значение тягового усилия:

$$A = \sqrt{2F_3} / \delta. \quad (21.6)$$

Оптимальные соотношения между высотой и шириной обмоточного пространства катушки $t = h/a$ получаются меньшими, чем для электромагнитов постоянного тока. Поэтому катушки электромагнитов переменного тока будут короче и толще. Более короткая катушка уменьшает длину сердечника и его объем, что приводит к снижению потерь в стали, вызванных гистерезисом и вихревыми токами. Этим потерь не было в электромагнитах постоянного тока. Там стремились к уменьшению потерь в меди, что обеспечивалось уменьшением средней длины витка катушки за счет малой ее толщины. В электромагнитах переменного тока надо стремиться к уменьшению суммарных потерь (и в меди, и в стали).

При уточненном расчете электромагнитов необходимо учитывать потоки рассеяния и падения МДС в нерабочих зазорах и в стали. Кроме того, в электромагнитах переменного тока необходимо учитывать потери на гистерезис P_r и на вихревые токи в магнитопроводе P_b .

Эти потери пропорциональны частоте питания, массе магнитопровода и индукции в квадрате. Для материалов, используемых в магнитной цепи электромагнита, в справочниках приводятся удельные потери (в зависимости от толщины листа и частоты) на единицу массы.

Число витков обмотки электромагнита переменного тока

$$\omega = U / (2\pi f \Phi). \quad (21.7)$$

Диаметр провода определяется по допустимой с точки зрения нагрева плотности тока. При этом ток определяется с учетом потерь в стали:

$$I = \sqrt{I_n^2 + I_\mu^2}, \quad (21.8)$$

где I_n — ток потерь в стали; I_μ — ток намагничивания.

Значения I_n и I_μ можно определить с помощью электрической схемы замещения электромагнита (рис. 21.4). На схеме приняты следующие обозначения: R — активное сопротивление обмотки; X_p — индуктивное сопротивление, соответствующее рабочему потоку; X — индуктивное сопротивление, соответствующее потоку рассеяния; R_n — активное сопротивление, обусловленное потерями в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи.

Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении обмотки R и потоком рассеяния, то ток потерь

$$I_n = (P_r + P_b) / U. \quad (21.9)$$

Намагничивающий ток, создающий рабочий магнитный поток, определяется по МДС ($I\omega$). Если пренебречь падением МДС в стали и нерабочих зазорах, то

$$I_\mu = \Phi_\delta / (\omega G_\delta),$$

где Φ_δ — действующее значение переменного магнитного потока в рабочем зазоре; G_δ — магнитная проводимость рабочего зазора.

Предварительный расчет электромагнита с короткозамкнутым витком проводится без учета экранирующего

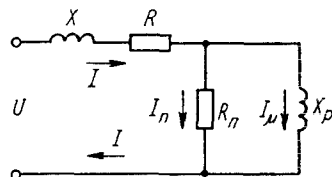


Рис. 21.4. Схема замещения электромагнита

действия этого витка. Точный расчет параметров короткозамкнутого витка довольно сложен. На практике его выполняют из меди или латуни таким образом, чтобы он охватывал примерно $\frac{3}{4}$ полюса электромагнита. При Ш-образном магнитопроводе короткозамкнутый виток 3 располагается на среднем (рис. 21.5, а) или на крайних стержнях (рис. 21.5, б). С витком на среднем стержне выполнены широко распространенные электромагниты серии МИС. Для уменьшения падения МДС в нерабочем зазоре между якорем 1 и сердечником 2 имеется так называемый воротничок 5. Номинальное тяговое усилие электромагнитов серии МИС изменяется от 15 до 120 Н при ходе якоря 15–30 мм. Механическая износостойкость составляет примерно 10^6 циклов включений-отключений.

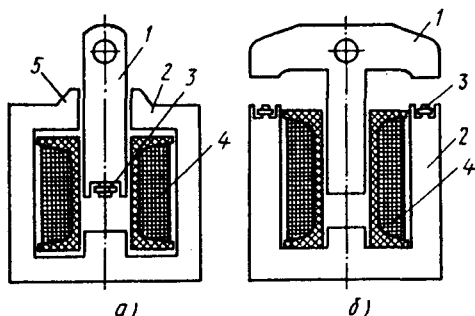


Рис. 21.5. Электромагниты переменного тока

С витками на крайних стержнях (рис. 21.5, б) выполнены длинноходовые электромагниты серии ЭД. Они имеют Т-образный якорь 1. Тяговое усилие создается во всех трех стержнях, т. е. магнитная цепь содержит три рабочих зазора. Тяговое усилие электромагнитов серии ЭД достигает 250 Н при максимальном перемещении якоря до 40 мм. Электромагниты срабатывают при подаче тока в обмотку 4.

§ 21.5. Электромагнитные муфты

Электромагнитная муфта предназначена для передачи вращающего момента двигателя к рабочему механизму. Муфта состоит из двух частей: ведущей и ведомой, которые образуют замкнутую магнитную систему. Муфта выполнена из ферромагнитных материалов и имеет одну или несколько обмоток возбуждения.

Различают *фрикционные* муфты и *асинхронные* (индукционные) муфты. Во фрикционных муфтах передача вращения происходит за счет силы трения между ведущей частью, закрепленной на валу электродвигателя, и ведомой частью, которая может перемещаться вдоль вала рабочего механизма на шлицах или шпонке. При подаче тока в обмотку возбуждения создается магнитодвижущая сила и подвижная часть муфты прижимается к неподвижной. Такая муфта работает как электромагнит. Для передачи значительных моментов используются многодисковые конструкции электромагнитных муфт. Как на ведущем, так и на ведомом валу имеется несколько стальных дисков, которые под действием МДС притягиваются друг к другу и благодаря трению их поверхностей передается вращение. Соприкасающиеся поверхности фрикционных муфт выполняют из специального материала — сплава феррадо, имеющего коэффициент трения в 3—4 раза больший, чем у стали.

Различают конструкции электромагнитных фрикционных муфт с неподвижной катушкой электромагнита и с вращающейся катушкой.

В маломощных муфтах (рис. 21.6, *а*) ведущая 1 и ведомая 2 полумуфты не имеют обмоток, но одна из них (обычно ведомая) может перемещаться вдоль вала по шпонке или шлицам. Обе муфты окружены неподвижной катушкой электромагнита 3, которая при подключении к напряжению создает магнитный поток. Возникающие электромагнитные силы прижимают ведомую полумуфту к ведущей. Момент трения между полумуфтами должен быть больше момента нагрузки на ведомом валу. При отключении катушки муфты неподвижная полумуфта отжимается от подвижной с помощью пружины (на рисунке не показана). Обычно эта же пружина прижимает полумуфту к тормозным поверхностям, что обеспечивает быструю остановку ведомого вала. В мощных муфтах (рис. 21.6, *б*) для увеличения величины передаваемого момента в подвижной части муфты используется несколько стальных дисков 2, имеющих свобо-

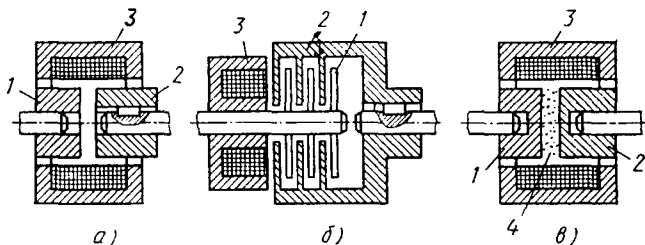


Рис. 21.6. Электромагнитные муфты

ду перемещения вдоль оси вращения ведущего и ведомого валов. Соответствующее количество стальных дисков *1* жестко закреплено на ведущем валу. На этом же валу закреплена катушка электромагнита *3*, подача тока к которой осуществляется с помощью контактных колец и щеток. Электромагнитные силы притягивают подвижные диски к неподвижным. Большая площадь соприкосновения обеспечивает большой момент трения.

В электромагнитных муфтах с ферромагнитным наполнителем (рис. 21.6, в) передача вращения осуществляется за счет того, что зазор между ведомой *1* и ведущей *2* полумуфтами заполнен смесью *4* из зерен ферромагнитного материала и наполнителя. При пропускании тока через катушку *3* муфты создается магнитный поток, заставляющий ферромагнитные зерна ориентироваться вдоль силовых линий и образовывать мостики, связывающие ведущую и ведомую полумуфты. Зерна ферромагнитного материала имеют размеры от 4 до 50 мкм. Наполнитель может быть сухим (тальк, графит) или жидким (трансформаторные и силиконовые масла, фтористые соединения). Электромагнитные муфты с ферромагнитным наполнителем более надежны, чем фрикционные, имеют меньшее время срабатывания (до 20 мс). Необходима регулярная смена наполнителя.

В электромагнитных индукционных муфтах передача вращающего момента происходит за счет индукционных токов, т. е. без непосредственного механического соприкосновения обеих частей муфты. Одна из частей муфты (рис. 21.7) имеет электромагнитные полюсы *1* с обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током. Она называется индуктором и конструктивно выполнена подобно ротору синхронного генератора. Другая часть муфты имеет короткозамкнутую обмотку *2*, аналогичную роторной обмотке асинхронного двигателя. Эта часть называется якорем. При вращении индуктора в обмотке якоря наводится ЭДС и идет ток. Взаимодействие этого тока с магнитным потоком возбуждения создает электромагнитный момент, приводящий во вращение якорь. В муфте происходят те же физические процессы, что и в асинхронном электродвигателе. Раз-

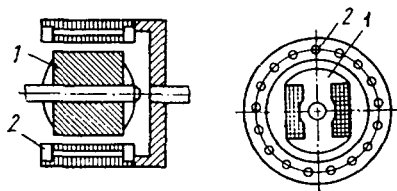


Рис. 21.7. Электромагнитная индукционная муфта

ница заключается в том, что вращение магнитного поля в двигателе происходит при подаче трехфазного переменного тока в обмотку неподвижного статора, а в муфте вращение магнитного поля происходит за счет механического вращения индуктора, возбужденного постоянным током. Так же как и в асинхронном двигателе, вращающий момент возникает лишь при неодинаковой скорости индуктора и якоря. Ведомая часть муфты вращается с частотой $n_2 = n_1(1 - s)$, где n_1 — частота вращения ведущего вала, s — скольжение. Величина скольжения обычно составляет 0,03—0,05.

Если момент нагрузки приводного механизма оказывается больше максимального момента муфты, то происходит опрокидывание—вращение ведомой части прекращается. Благодаря способности к опрокидыванию муфта может защитить приводной двигатель от больших перегрузок. Величина вращающего момента, передаваемого муфтой, зависит от магнитного поля возбуждения. Изменяя ток возбуждения, можно регулировать величину критического момента муфты. Разница в скоростях вращения ведомой и ведущей частей асинхронной муфты принципиально необходима для создания вращающего момента на ведомой части. Поэтому асинхронные муфты называют еще электромагнитными муфтами скольжения. Они получили наибольшее распространение в качестве элемента регулируемого автоматизированного электропривода переменного тока, включающего помимо муфты нерегулируемый электродвигатель и систему автоматического регулирования тока возбуждения муфты. К достоинствам такого привода с муфтой скольжения относятся простота устройства и эксплуатации, низкая стоимость, высокая надежность. Но с увеличением скольжения растут потери мощности и КПД привода снижается.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия электромагнита.
2. Каков порядок расчета электромагнита?
3. Как работает электромагнитная муфта?

Раздел IV

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ И МОДУЛЯТОРЫ

Глава 22

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

§ 22.1. Физические основы работы магнитных усилителей

Работа магнитных усилителей основана на использовании свойств ферромагнитных материалов. Эти свойства известны из курса физики. Если по обмотке, расположенной на сердечнике из ферромагнитного материала, проходит электрический ток, то в сердечнике возникает магнитное поле. Это магнитное поле в сердечнике характеризуется напряженностью H и магнитной индукцией B . Напряженность магнитного поля H создается током, проходящим по обмотке, и выражается в амперах на метр (А/м). Магнитная индукция B увеличивается при возрастании напряженности H и выражается в теслах (Тл). Кривая, характеризующая зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H , называется кривой намагничивания ферромагнитного материала (рис. 22.1).

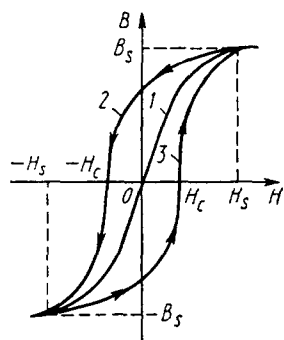


Рис. 22.1. Кривая намагничивания ферромагнитного материала

Начиная с некоторого значения напряженности магнитного поля дальнейшее ее увеличение практически не приводит к изменению магнитной индукции. В этом случае говорят, что магнитный материал достиг состояния насыщения. Максимальная индукция в сердечнике называется индукцией насыщения B_s , напряженность поля при этом равна H_s .

Если далее уменьшать напряженность поля, то изменение магнитной индукции происходит по новой кривой (кривая 2). Индукция при этом уменьшается медленнее, чем она возрастала при увеличении H

от 0 до H_s (кривая 1). При уменьшении напряженности магнитного поля до нуля (т. е. при отсутствии тока в обмотке) индукция в сердечнике сохраняет значение B_r , называемое остаточной индукцией. При увеличении напряженности магнитного поля в обратном направлении (т. е. при изменении направления тока в обмотке) индукция уменьшается до нуля при напряженности $-H_c$, которая носит название коэрцитивной силы. Затем при значении напряженности $-H_s$ сердечник снова насыщается, индукция в нем будет равна $-B_s$. Теперь при изменении напряженности от $-H_s$ до $+H_s$ изменение индукции происходит по кривой 3. Таким образом, изменение индукции в зависимости от напряженности поля происходит по графику, имеющему вид петли, называемой петлей гистерезиса. Как видим, зависимость $B(H)$ имеет явно выраженный нелинейный характер.

В зависимости от ширины петли гистерезиса различают магнитомягкие и магнитотвердые материалы. Материалы с широкой петлей гистерезиса называются магнитотвердыми, они используются для постоянных магнитов. Материалы с узкой петлей гистерезиса называются магнитомягкими, они используются для сердечников магнитных усилителей и других электромагнитных устройств: реле, трансформаторов, электрических машин. Для пояснения принципа действия магнитного усилителя можно пренебречь петлей гистерезиса и считать, что изменение магнитной индукции в зависимости от напряженности происходит по средней (основной) кривой намагничивания (кривая 1 на рис. 22.1).

Рассмотрим процессы, происходящие в сердечнике, если к обмотке (рис. 22.2) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, где u — мгновенное значение напряжения; U_m — максимальное (амплитудное) значение напряжения; ω — угловая частота; t — текущее значение времени.

Под действием этого напряжения по обмотке пойдет ток i , а в сердечнике происходит изменение магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H .

Связь между электрическими и магнитными величинами определяется на основании закона полного тока и закона электромагнитной индукции. Согласно закону полного тока, напряженность магнитного поля H в сердечнике пропорциональна току i в обмотке и обратно пропорциональна средней длине сердечника.

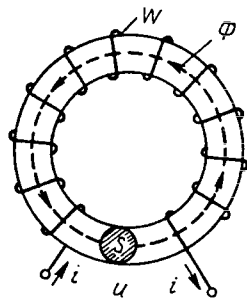


Рис. 22.2. Сердечник с обмоткой, отбрасываемой током

Согласно закону электромагнитной индукции, при изменении магнитной индукции (магнитного потока Φ) в обмотке индуцируется электродвижущая сила (ЭДС) e , которая пропорциональна числу витков обмотки ω и скорости изменения магнитного потока Φ .

Так как магнитный поток равен произведению магнитной индукции B на сечение сердечника s , то

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\omega s \frac{dB}{dt}.$$

Знак минус означает, что ЭДС e направлена навстречу напряжению u , вызывающему появление магнитного потока, т. е. противодействует причине, вызвавшей ее появление — изменению магнитного потока (правило Ленца).

Приложенное к обмотке переменное напряжение u уравновешивается падением напряжения на активном сопротивлении обмотки r и значением ЭДС e :

$$u = ir + e.$$

ЭДС e намного больше ir , т. е. r мало, поэтому можно принять $u = e$.

Подставляя в это равенство значения напряжения $u = U_m \sin \omega t$ и ЭДС $e = -\omega s \frac{dB}{dt}$, получим

$$U_m \sin \omega t = -\omega s \frac{dB}{dt},$$

откуда

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{U_m \sin \omega t}{\omega s}.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$B = -\frac{U_m}{\omega s} \int \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\omega s \omega} \cos \omega t + B_0 = B_m \cos \omega t + B_0,$$

где B_0 — постоянная интегрирования, представляющая собой постоянную составляющую магнитной индукции. B_0 определяется начальным магнитным состоянием сердечника (при отсутствии подмагничивания сердечника постоянным магнитным полем $B_0 = 0$).

Амплитудное (максимальное) значение переменной составляющей индукции равно

$$B_m = \frac{U_m}{\omega s \omega}. \quad (22.1)$$

Так как действующее значение синусоидального напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитудного значения U_m , то на основании формулы (22.1) можно записать

$$U = E = U_m / \sqrt{2} = 4,44 f \omega s B_m, \quad (22.2)$$

где U и E — соответственно действующие значения напряжения и ЭДС, а $f = \omega / (2\pi)$ — их частота, Гц.

Анализ уравнения (22.2) позволяет сделать важный вывод: амплитуда магнитной индукции B_m не зависит от магнитных свойств сердечника и постоянной составляющей магнитной индукции и однозначно определяется амплитудой приложенного к обмотке переменного напряжения. В зависимости от магнитных свойств сердечника и первоначального подмагничивания B_0 изменяется не амплитуда переменной составляющей индукции, а ток i в обмотке и соответственно напряженность магнитного поля H .

В соответствии с законом полного тока можно записать выражение для среднего значения напряженности поля:

$$H = i \omega / l,$$

где l — средняя длина сердечника.

Для выяснения зависимости тока i , протекающего по обмотке с числом витков ω при синусоидальном напряжении u , от свойств материала сердечника и постоянной составляющей магнитной индукции воспользуемся графическими построениями.

На рис. 22.3 изображена средняя кривая намагничивания сердечника $B = f(H)$, обозначенная MON . На этом же рисунке изображены две кривые изменения во времени магнитной индукции: 1 — при отсутствии постоянной составляющей магнитной индукции; 2 — при наличии постоянной составляющей, равной B_0 .

Проецируя значения магнитной индукции, соответствующие кривой 1, на кривую намагничивания, находим кривую изменения напряженности поля I' в зависимости от времени при переменной индукции без постоянной составляющей. Аналогичным построением находим кривую изменения напряженности поля $2'$ в зависимости от времени при наличии постоянной составляющей индукции. Так как напряженность поля может быть создана только током i , протекающим в обмотке сердечника, то кривые $1'$ и $2'$ на рис. 22.3 в другом масштабе представляют собой зависимости этого тока i от времени. Из сравнения кривых $1'$ и $2'$ видно, что при подмагничивании сердечника постоянным током, т. е. при наличии постоянной составляющей магнитной индукции B_0 , растет переменная составляющая напряженности поля и, следовательно, переменный ток в обмотке. На этом явлении и основано действие магнитных усилителей.

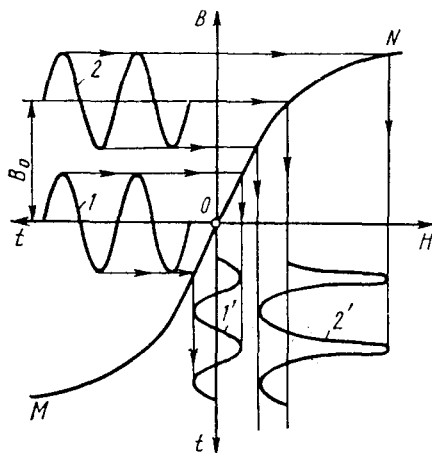


Рис. 22.3. Влияние постоянного подмагничивания на ток в обмотке с сердечником

Важной характеристикой материала сердечника является относительная магнитная проницаемость $\mu = B/(\mu_0 H)$, где μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Относительная проницаемость является безразмерной величиной, показывающей, во сколько раз проницаемость данного материала сердечника превышает проницаемость вакуума (или воздуха). Из анализа кривой намагничивания $B(H)$ видно, что магнитная проницаемость ферромагнитного материала, из которого изготовлен сердечник, непостоянна. Сначала кривая идет круто вверх, малым изменениям H соответствуют большие изменения B , т. е. магнитная проницаемость велика. Затем кривая изгибается и идет полого, индукция B мало увеличивается при возрастании H , т. е. магнитная проницаемость уменьшается. Именно из-за нелинейного характера изменения индукции от напряженности, т. е. из-за непостоянства магнитной проницаемости, и достигается эффект усиления в магнитном усилителе. Подмагничивание постоянным током приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к увеличению (усилению) переменного тока.

§ 22.2. Принцип действия магнитного усилителя

Для изучения принципа действия магнитного усилителя рассмотрим его простейшую схему (рис. 22.4, а, б), состоящую из двух обмоток. Одна обмотка — рабочая (или обмотка переменного тока) с числом

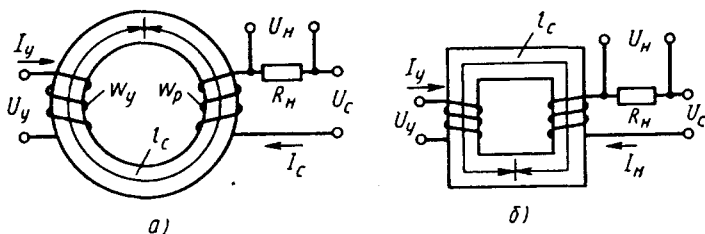


Рис. 22.4. Простейший магнитный усилитель (дрессель насыщения)

витков w_p , другая — обмотка управления (или управляющая) с числом витков w_y . Обе обмотки размещены на общем ферромагнитном замкнутом сердечнике. На обмотку управления подается входной сигнал в виде напряжения постоянного тока U_y или тока I_y , подлежащего усилению. Последовательно с рабочей обмоткой включена нагрузка R_H , напряжение на которой U_H является выходным сигналом усилителя. Цепь рабочей обмотки получает питание от источника напряжения переменного тока (например, промышленной частоты 50 Гц). Сердечник одновременно намагничивается двумя полями: постоянным, созданным током I_y , протекающим в обмотке w_y , и переменным, созданным током I_H , протекающим в обмотке w_p . Если принять сопротивление рабочей обмотки чисто индуктивным X_p , а форму тока — близкой к синусоидальной, то ток в нагрузке

$$I_H = U_c / \sqrt{R_H^2 + X_p^2} = U_c / \sqrt{R_H^2 + (\omega L_p)^2}. \quad (22.3)$$

Так как обычно $R_H \ll \omega L_p$, то

$$I_H = U_c / (\omega L_p). \quad (22.4)$$

где ω — угловая частота питающего напряжения U_c ; L_p — индуктивность рабочей обмотки.

Напряженность магнитного поля в сердечнике создается именно током I_H . Так как мы приняли допущение о синусоидальности тока, то и напряженность будет изменяться по синусоидальному закону. Амплитудное значение напряженности

$$H_m = \sqrt{2} I_H w_p / l_c, \quad (22.5)$$

где l_c — средняя длина сердечника.

Выразим из уравнения (22.4) индуктивность рабочей обмотки:

$$L_p = \frac{U_c}{\omega I_H}.$$

Подставим сюда значение $U_c = 4,44f\omega_p s B_M$ из уравнения (22.2) и значение $I_n = H_M l_c / (\sqrt{2}\omega_p)$ из уравнения (22.5):

$$L_p = \frac{\omega_p^2 s}{l_c} \frac{B_M}{H_M} = \frac{\omega_p^2 s}{l_c} \mu_0 \mu_d, \quad (22.6)$$

где μ_d — динамическая (или действующая) магнитная проницаемость материала сердечника для переменной составляющей магнитного поля:

$$\mu_d = B_n / (\mu_0 H_M). \quad (22.7)$$

Так как с увеличением постоянной составляющей индукции B_0 амплитуда индукции B_M остается неизменной, а H_M растет (см. рис. 22.3), то, согласно формулам (22.6) и (22.7), проницаемость сердечника и индуктивность L_p рабочей обмотки уменьшаются при подмагничивании сердечника постоянным магнитным полем. Характер зависимости μ_d и L_p от напряженности постоянного поля H_0 при $B_M = \text{const}$ показан на рис. 22.5. H_0 определяется током в обмотке управления:

$$H_0 = I_y \omega_y / l_c. \quad (22.8)$$

Из формул (22.4) и (22.6) следует, что при неизменном напряжении сети U_c ток в цепи нагрузки I_n может быть увеличен только за счет уменьшения магнитной проницаемости μ_d для переменной составляющей магнитного поля, так как остальные параметры (ω ; ω_p ; s ; l_c ; μ_0) не изменяются. Уменьшение магнитной проницаемости μ_d достигается за счет увеличения постоянного подмагничивающего поля в сердечнике, создаваемого управляющим током I_y в соответствии с уравнением (22.8).

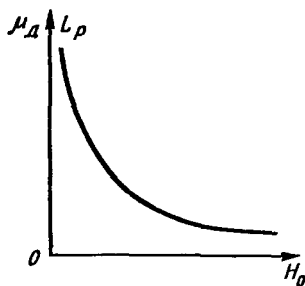


Рис. 22.5. Зависимость магнитной проницаемости и индуктивности от напряженности постоянного магнитного поля

При изменении тока нагрузки I_n будет изменяться и падение напряжения U_n на нагрузке R_n , т. е. выходной сигнал. Мощность, выделяемая в нагрузке, может во много раз превышать мощность, расходуемую в управляющей обмотке, т. е. схема обладает усилительными свойствами и ее можно рассматривать как простейший магнитный усилитель. Такой усилитель называют еще дроссельным, поскольку изменение тока в нагрузке обеспечивается за счет изменения ин-

дуктивности рабочей обмотки, т. е. сопротивления дросселя — катушки с сердечником (рис. 22.6).

Рассмотренная схема (по рис. 22.4) имеет серьезные недостатки и крайне редко применяется на практике. Дело в том, что замыкающийся по сердечнику переменный магнитный поток наводит в обмотке управления (как во вторичной обмотке трансформатора) переменную ЭДС. Поэтому выходной сигнал может влиять на входной. А усилители должны обладать однонаправленностью действия: только от входа к выходу. Для уменьшения значения переменного тока, протекающего по цепи управления под влиянием наведенной ЭДС, последовательно с управляющей обмоткой w_y включают большую индуктивность L_y . Однако при этом увеличивается инерционность усилителя: при быстрых изменениях входного напряжения ток управления изменяется медленно. Кроме того, увеличивается расход материала (так как необходим сердечник и для дросселя), возрастают габариты и вес усилителя. Другим недостатком рассмотренной схемы является то, что форма тока в нагрузке существенно отличается от синусоиды, что видно по кривой 2' на рис. 22.3.

Для уничтожения ЭДС, наводимой в обмотке управления, используются схемы магнитных усилителей с двумя одинаковыми сердечниками (рис. 22.7, а, б). Такие схемы составлены из схем по рис. 22.4 как из типовых элементов, что особенно хорошо видно на рис. 22.7, а. Рабочая обмотка w_p и обмотка управления w_y имеют по две секции — по одной на каждом сердечнике. Секции управляющей

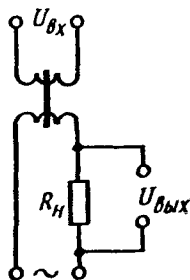


Рис. 22.6. Электрическая схема дроссельного усилителя

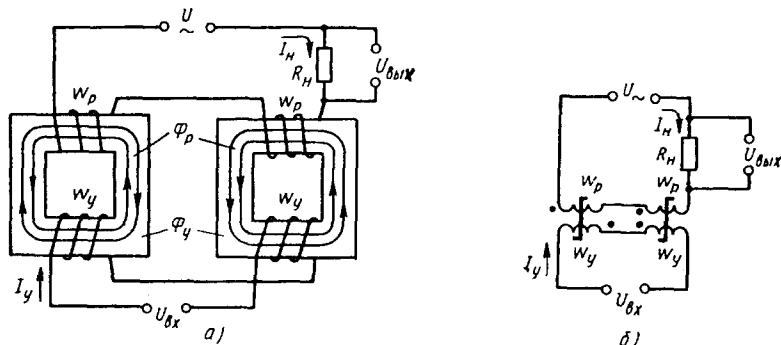


Рис. 22.7. Магнитный усилитель на двух сердечниках

обмотки ω_y соединяются последовательно и встречно; следовательно, происходит взаимное вычитание ЭДС, индуцируемых в каждой секции. Поскольку сердечники и соответствующие обмотки на них одинаковы, происходит взаимное уничтожение (компенсация) ЭДС, наведенных переменным магнитным полем. Секции рабочей обмотки ω_p включены последовательно и согласно. В один полупериод питающего переменного напряжения U_{\sim} переменный магнитный поток Φ_{\sim} складывается с постоянным магнитным потоком Φ_y в одном сердечнике и вычитается в другом сердечнике. В следующем полупериоде сердечники меняются ролями. Таким образом, совместное действие на цепь нагрузки обеих секций рабочих обмоток в каждый из полупериодов совершенно одинаково. Обе полуволны нагрузки будут симметричны (без четных гармоник), т. е. форма кривой тока будет менее искажена, чем в схеме с одним сердечником (см. рис. 22.3).

§ 22.3. Основные схемы и параметры нереверсивных магнитных усилителей

Проследим пути магнитных потоков в обоих сердечниках магнитного усилителя, изображенного на рис. 22.7. Магнитные потоки обмотки управления Φ_y в соседних стержнях направлены в одну сторону (согласно), а магнитные потоки рабочей обмотки Φ_p — в противоположные стороны (встречно). Поэтому обмотку управления можно выполнять не в виде двух секций (по одной на каждом сердечнике), а общей — охватывающей стержни обоих сердечников (рис. 22.8, а). ЭДС, наведенные переменными магнитными потоками Φ_{\sim} в секциях рабочей обмотки, расположенных на крайних стержнях, взаимно компенсируются. Возможно и выполнение магнит-

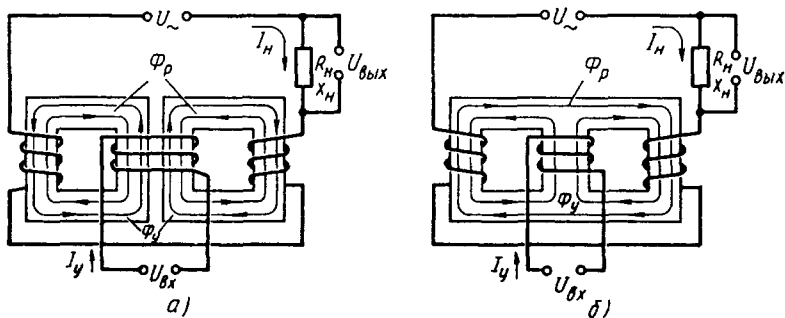


Рис. 22.8. Магнитные усилители с общей обмоткой управления

ных усилителей на Ш-образном сердечнике (рис. 22.8, б). Секции рабочей обмотки наматываются на крайних стержнях, а обмотка управления — на среднем стержне. В этом случае в среднем стержне происходит компенсация переменного потока Φ_{\sim} , поскольку потоки от каждой секции рабочей обмотки направлены в среднем стержне навстречу друг другу и равны по величине. Поэтому выходной сигнал не будет влиять на входной.

Нет принципиальной разницы между выполнением магнитного усилителя на одном Ш-образном или на двух сердечниках. Поэтому при дальнейшем рассмотрении будем изображать только схемы соединения обмоток, отмечая при необходимости согласное и встречное включения секций обмоток с помощью точек, указывающих начало обмотки.

В зависимости от соединения секций рабочей обмотки и нагрузки различают схемы с последовательной и параллельной нагрузкой. На рис. 22.7 и 22.8 нагрузка включается последовательно с рабочей обмоткой. Диаграммы ЭДС для такой схемы показаны на рис. 22.9. Ток нагрузки в этом случае будет синусоидален, поскольку при неизменном входном сигнале в каждом из полупериодов питающего напряжения рабочий поток одной секции складывается с потоком управления, а рабочий поток другой секции вычитается из потока управления. Поэтому общая индуктивность L_p рабочей обмотки будет постоянна при неизменном входном сигнале. Мгновенное значение тока нагрузки

$$i_n = \frac{U_m}{\sqrt{(R_n + R_p)^2 + (X_n + X_p)^2}} \sin(\omega t - \varphi),$$

где R_n и X_n — активное и индуктивное сопротивления нагрузки соответственно; R_p и X_p — активное и индуктивное сопротивления рабочей обмотки (обеих секций);

$\varphi = \arctg \frac{X_n + X_p}{R_n + R_p}$ — фазовый сдвиг между током и напряжением,

определяемый отношением активного и индуктивного сопротивлений.

При неизменном входном сигнале все сопротивления неизменны и ток имеет синусоидальную форму.

Синусоидальный ток рабочей обмотки создает в сердечнике синусоидальную напряженность поля H_p , что, в свою очередь, приводит к несинусоидальному потоку. Кривая изменения индукции в одном периоде получена графически на рис. 22.9, а. Как видно из диаграмм мгновенных значений (рис. 22.9, б, в), ЭДС, создаваемые

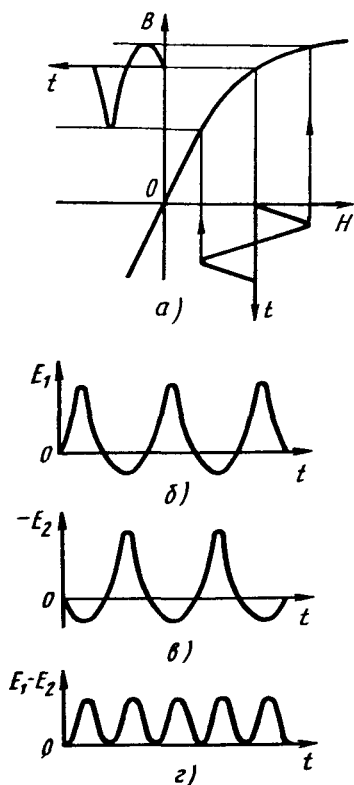


Рис. 22.9. Диаграммы ЭДС и тока в магнитном усилителе

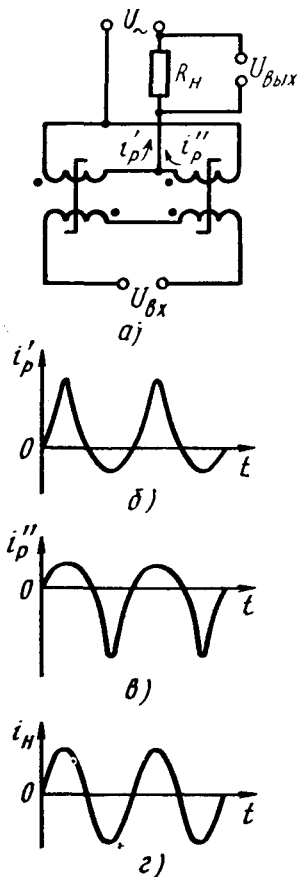


Рис. 22.10. Магнитный усилитель с параллельным соединением секций рабочей обмотки и диаграммы токов

несинусоидальными потоками разных секций рабочей обмотки в обмотке управления, не уничтожаются полностью. Это приводит к появлению в обмотке управления ЭДС двойной частоты 2ω (рис. 22.9, в). В тех случаях, когда наличие ЭДС двойной частоты в цепи управления нежелательно, предпочтение следует отдать параллельному соединению секций рабочей обмотки.

При параллельном соединении секций рабочей обмотки (рис. 22.10, а) в каждой из них протекает несинусоидальный ток, содержащий четные гармоники (рис. 22.10, б, в). Однако ток нагруз-

ки, представляющий собой сумму токов секций, близок к синусоидальному (рис. 22.10, з). Это объясняется тем, что четные гармоники тока циркулируют в короткозамкнутом контуре, образованном секциями рабочей обмотки, и не выходят в цепь нагрузки. Наличие короткозамкнутого контура в цепи рабочей обмотки приводит к уменьшению быстродействия по сравнению с последовательным соединением секций рабочей обмотки.

Схема магнитного усилителя, в которой нагрузка включена параллельно секциям рабочей обмотки, соединенным встречно, показана на рис. 22.11. Для поддержания неизменным тока питания используется достаточно большое добавочное сопротивление R_d . В зависимости от входного сигнала происходит перераспределение токов между нагрузкой и рабочей обмоткой. При отсутствии управляющего сигнала ($I_y = 0$) индуктивное сопротивление рабочей обмотки X_p максимально, вследствие чего в рабочую обмотку отводится незначительный ток. При этом ток в нагрузке имеет максимальное значение. По мере увеличения входного сигнала индуктивное сопротивление рабочей обмотки уменьшается, а ток в ней возрастает, что приводит к уменьшению тока нагрузки.

Аналогично происходит изменение тока в нагрузке в так называемой трансформаторной схеме (рис. 22.12). Здесь помимо секций обмотки w_{p1} , включенных встречно через добавочное сопротивление R_d на напряжении источника питания U , имеется обмотка w_{p2} , питающая нагрузку R_H . Такая схема позволяет изолировать цепь нагрузки от цепи питания и получать на нагрузке практически любое напряжение, отличное от напряжения питания. Ток в нагрузке за-

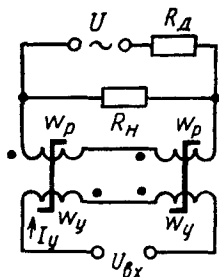


Рис. 22.11. Магнитный усилитель с параллельной нагрузкой

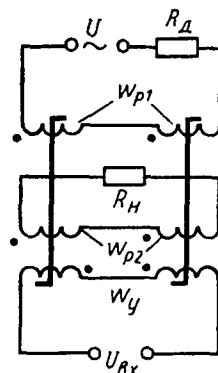


Рис. 22.12. Трансформаторная схема магнитного усилителя

висит от коэффициента трансформации обмоток, под которым в данном случае понимается отношение напряжений на обмотках ω_{p1} и ω_{p2} . Этот коэффициент не остается постоянным, как в обычном трансформаторе, а зависит от сигнала управления, изменяющего магнитную проницаемость. При отсутствии управляющего сигнала ($I_y = 0$) магнитная проницаемость и индуктивность обмоток имеют максимальное значение и падение напряжения на этих обмотках велико. Коэффициент трансформации будет максимален, и соответственно ток нагрузки I_n имеет максимальное значение. При увеличении входного сигнала индуктивность обмотки ω_{p2} уменьшается. Соответственно уменьшаются коэффициент трансформации, напряжение на обмотке ω_{p2} и ток нагрузки I_n .

Схема с параллельным соединением нагрузки (рис. 22.11) применяется чаще всего тогда, когда имеется источник тока, например в схемах автоматики, питаемых от трансформаторов тока. Применение источника напряжения и использование добавочного сопротивления R_d экономически невыгодно из-за больших потерь в этом сопротивлении. Трансформаторные магнитные усилители с параллельной нагрузкой широко используют как элементы реверсивных схем магнитных усилителей (см. гл. 24).

Все рассмотренные схемы магнитных усилителей (см. рис. 22.7—22.12) питали нагрузку переменным током. При необходимости питать нагрузку постоянным током используются выпрямительные схемы. В качестве примера включения нагрузки постоянного тока на рис. 22.13, а приведена схема с последовательным включением выпрямительного моста и нагрузки. Магнитный усилитель с выходным постоянным током может использовать и двухполупериодную схему на двух диодах и трансформаторе с выводом от средней точки вторичной обмотки (рис. 22.13, б).

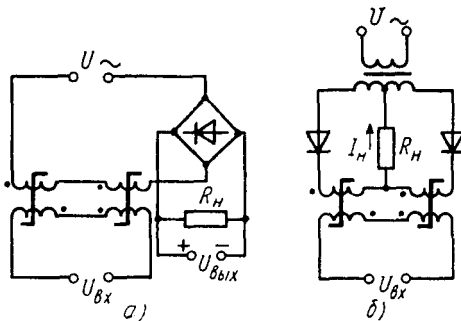


Рис. 22.13. Магнитные усилители с нагрузкой постоянного тока

§ 22.4. Основные характеристики магнитных усилителей

Основной характеристикой магнитного усилителя является зависимость действующего или среднего значения тока в нагрузке от тока управления: $I_n = f(I_y)$. Графическое изображение такой зависимости называется *статической характеристикой вход-выход*. Для всех рассмотренных выше схем магнитных усилителей зависимость магнитной проницаемости и индуктивности рабочей обмотки от тока управления показана на рис. 22.14. При отсутствии управляющего сигнала ($I_y = 0$) эти величины имеют максимальное значение. Если подадим в обмотку управления постоянный ток I_y , то в сердечнике создается постоянный магнитный поток, накладывающийся на переменный поток, созданный рабочей обмоткой. По мере увеличения входного сигнала I_y из-за нелинейности характеристики намагничивания происходит насыщение сердечника.

Это приводит к уменьшению магнитной проницаемости μ , а следовательно, и индуктивности рабочей обмотки L_p . Направление (полярность) тока управления не влияет на μ и L_p . Вид статической характеристики вход-выход зависит от того, как включена нагрузка: последовательно или параллельно рабочей обмотке.

На рис. 22.15, а показана статическая характеристика для схем магнитных усилителей (см. рис. 22.7, 22.8, 22.10, 22.13). Здесь I_0 — ток холостого хода усилителя (подмагничивающее поле отсутству-

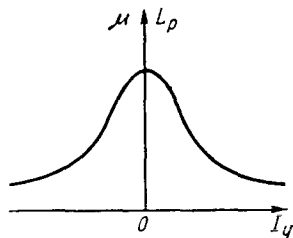


Рис. 22.14. Зависимость магнитной проницаемости и индуктивности от тока управления

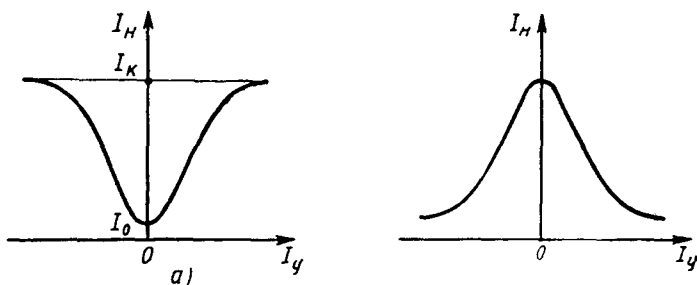


Рис. 22.15. Статические характеристики магнитных усилителей

ет), I_k — максимальный ток. В идеальном усилителе при отсутствии входного сигнала ($I_y = 0$) должен быть равен нулю и выходной сигнал ($I_n = 0$). Однако из-за того, что при $I_n = 0$ магнитная проницаемость и индуктивность рабочей обмотки не равны бесконечности, через нагрузку протекает небольшой ток холостого хода $I_n = I_0$. По мере увеличения входного сигнала (тока управления) растет выходной сигнал (ток нагрузки), но из-за насыщения сердечника этот рост ограничен некоторым максимальным током $I_n = I_k$. Отношение максимального тока к току холостого хода называется *коэффициентом кратности тока* $K = I_k / I_0$ — это один из параметров усилителя. Чем больше этот коэффициент, тем лучше усилитель.

Наряду с коэффициентом кратности тока магнитный усилитель характеризуется следующими параметрами: коэффициентом усиления, чувствительностью, максимальной мощностью в нагрузке, КПД рабочей цепи, постоянной времени, добротностью.

Рассмотрим коротко эти параметры. *Коэффициент усиления* — это отношение приращения тока, напряжения или мощности в нагрузке к приращению соответствующего параметра в цепи управления.

Коэффициент усиления по току

$$k_I = \frac{I_n - I_0}{I_y} \quad (22.9)$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \frac{U_n - U_0}{U_y} \quad (22.10)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$k_P = k_I k_U = k_I^2 \frac{R_n}{R_y} = \frac{P_n - P_0}{P_y} \quad (22.11)$$

Поскольку статическая характеристика магнитного усилителя нелинейна, коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности не являются постоянными величинами. Поэтому различают максимальные значения k_I , k_U , k_P и их значения, соответствующие заданной выходной мощности усилителя.

При большом значении коэффициента кратности тока K , когда ток холостого хода по сравнению с максимальным током нагрузки мал, можно с достаточной точностью считать, что $k_I = I_k / I_y$; $k_U = U_k / U_y$; $k_P = \frac{I_k^2 R_n}{I_y^2 R_y}$. Например, уже при $K = 5$ ошибка от пренебрежения током холостого хода не превышает 4 %.

Чувствительность $P_{y \min}$ — минимальная мощность входного сигнала, начиная с которого пропорционально изменяется ток нагрузки.

Максимальная мощность в нагрузке

$$P_{n \max} = I_k^2 R_n.$$

Коэффициент полезного действия рабочей цепи

$$\eta = I_n^2 R_n / (I_n^2 R) = R_n / R,$$

где R — полное активное сопротивление рабочей цепи.

Постоянная времени T характеризует быстродействие усилителя и определяется отношением индуктивности и активного сопротивления обмотки управления $T = L_y / R_y$.

Добротность является универсальным параметром, учитывающим и коэффициент усиления и быстродействие:

$$D = k_p / T.$$

Магнитные усилители по сравнению с другими типами усилителей обладают таким существенным преимуществом, как высокая стабильность во времени параметров и статической характеристики. Имея практически неограниченный срок службы, магнитные усилители не требуют регламентных работ и могут использоваться во взрыво- или пожароопасных условиях, а также при наличии радиоактивного излучения.

Максимальная мощность магнитных усилителей достигает сотен киловатт. Например, на Московском трансформаторном заводе еще в 1933 г. были изготовлены магнитные усилители мощностью 800 кВт для автоматического регулирования частоты вращения мощного асинхронного двигателя. Коэффициент усиления по мощности 100-ваттного магнитного усилителя при частоте питания 50 Гц обычно составляет 50—200. Для более мощных усилителей этот коэффициент увеличивается.

КПД простейших неререверсивных магнитных усилителей обычно лежит в пределах от 0,6 до 0,98. Коэффициент кратности магнитных усилителей в значительной степени зависит от материала сердечника. Для магнитных усилителей с сердечниками из трансформаторной стали $K = 5 \div 40$, а с сердечниками из сплавов высокой магнитной проницаемости $K = 100 \div 200$.

Минимальное значение усиливаемой мощности составляет $10^{-4} - 10^{-1}$ Вт для сердечников из трансформаторной стали и $10^{-8} - 10^{-6}$ Вт для сердечников из сплавов высокой проницаемости.

Статическая характеристика вход-выход магнитных усилителей с параллельным включением нагрузки (рис. 22.11) имеет вид, показанный на рис. 22.15, б. Она обратна характеристике усилителя с последовательной нагрузкой. Действительно, при управляющем сигнале $I_y = 0$ индуктивность L_p рабочей обмотки будет максимальной и, следовательно, ток в нагрузке I_n будет иметь наибольшее значение. С ростом входного сигнала ток в нагрузке I_n уменьшается, так как все большая часть тока питания ответвляется в рабочую обмотку, индуктивное сопротивление которой уменьшается.

§ 22.5. Теория идеального магнитного усилителя

Теоретически магнитный усилитель можно рассматривать как переменную индуктивность, величина которой зависит от тока управления. В связи с нелинейностью кривой намагничивания переменный ток, протекающий по рабочей обмотке, содержит высшие гармоники. Расчеты для цепей с такими токами весьма сложны. Поэтому для математического анализа работы магнитного усилителя делают различные упрощения (допущения), не вносящие существенных погрешностей, но позволяющие получить сравнительно простые методы расчета.

Наибольшее распространение получила теория идеального магнитного усилителя. Эта теория основана на предположении, что сердечник имеет идеальную кривую намагничивания (рис. 22.16). По сравнению с реальной эта кривая имеет следующие особенности:

- 1) на участке от $B = 0$ до $B = B_s$ магнитная проницаемость равна бесконечности;
- 2) в области насыщения магнитная проницаемость равна нулю;
- 3) площадь петли гистерезиса равна нулю.

На основании теории идеального магнитного усилителя можно получить представление о форме кривых индукции, ЭДС, напряжения и тока. А главное — эта теория дает простые формулы для основных параметров усилителя.

Рассмотрим работу идеального магнитного усилителя при последовательном соединении рабочей обмотки с нагрузкой и выходным постоянным током (см. рис. 22.13, а). Будем по-

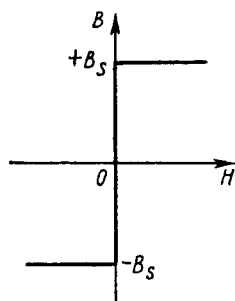


Рис. 22.16. Идеальная кривая намагничивания

лагать, что и рабочая обмотка, и обмотка управления состоят из двух секций, расположенных соответственно на двух сердечниках. Секции обмотки управления включены встречно. Число витков рабочей обмотки — ω_p , секций обмотки управления — ω_y .

Пусть приложенное к рабочей обмотке напряжение изменяется по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$. В секциях обмотки управления наводятся ЭДС, сумма которых должна быть равна нулю. Если пренебречь сопротивлением цепи управления, то уравнение ЭДС имеет вид

$$e_{y1} + e_{y2} = -\omega_y s (dB_1/dt - dB_2/dt) = 0,$$

где e_{y1} и e_{y2} — ЭДС, индуцируемые в первом и втором сердечниках переменным магнитным потоком, созданным секциями рабочей обмотки; B_1 и B_2 — мгновенные значения индукции в первом и втором сердечниках с поперечным сечением s . Отсюда

$$dB_1/dt = dB_2/dt. \quad (22.12)$$

Интегрируя это равенство, при наличии тока управления получим

$$B_1 = B_2 + 2B_0, \quad (22.13)$$

где $2B_0$ — постоянная интегрирования, представляющая собой удвоенное значение составляющей индукции в каждом сердечнике от тока управления.

Из уравнений (22.12) и (22.13) видно, что индукции в обоих сердечниках изменяются во времени по одному закону и отличаются друг от друга на постоянную величину $2B_0$. Поэтому и ЭДС, индуцируемые в секциях рабочей обмотки, будут равны:

$$e_{p1} = e_{p2}, \quad (22.14)$$

где $e_{p1} = -\omega_p s dB_1 / dt$; $e_{p2} = -\omega_p s dB_2 / dt$.

Рассмотрим режим работы усилителя, когда подмагничивание отсутствует, т. е. $I_y = 0$. Если при напряжении, приложенном к рабочей обмотке, оба сердечника находятся в ненасыщенном состоянии, т. е. $|B_1| < B_s$ и $|B_2| < B_s$, то магнитная проницаемость сердечников равна бесконечности, а следовательно, и индуктивное сопротивление рабочей обмотки равно бесконечности. В этом случае ток в цепи рабочей обмотки равен нулю и напряжение источника питания равно и направлено навстречу ЭДС самоиндукции секций рабочей обмотки:

$$u = -(e_{p1} + e_{p2}).$$

В соответствии с равенством (22.14) напряжение питания распределится поровну между секциями рабочей обмотки:

$$e_{p1} = e_{p2} = -0,5U = -0,5U_m \sin \omega t,$$

или, подставляя значения ЭДС e_{p1} и e_{p2} ,

$$\omega_p s dB_1/dt = \omega_p s dB_2/dt = 0,5U_m \sin \omega t, \quad (22.15)$$

Проинтегрировав (22.15), получим закон изменения индукции:

$$B_1 = B_2 = \int \frac{U_m}{2\omega_p s} \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{2\omega_p s \omega} \cos \omega t,$$

или

$$B_1 = B_2 = -B_m \cos \omega t,$$

где $B_m = \frac{U_m}{2\omega_p s \omega}$.

На рис. 22.17 показаны графики изменения напряжения, приложенного к рабочей обмотке (рис. 22.17, а), и индукции при отсутствии подмагничивания (пунктирная линия на рис. 22.17, б).

Теперь рассмотрим режим работы при наличии подмагничивания, т. е. когда по обмотке управления проходит ток. Этот постоянный ток создает постоянное магнитное поле, индукция которого равна B_0 . В одном сердечнике магнитные потоки, обусловленные постоянным и переменным токами, будут складываться, а в другом — вычитаться, вследствие чего значения индукции в сердечниках будут отличаться на величину $2B_0$. В результате кривая индукции в одном сердечнике пойдет выше, а в другом — ниже (соответственно B_1 и B_2 на рис. 22.17, б).

Пусть в начальный момент подачи тока управления ($t=0$) индукция $B_2 = -B_s$. В этом случае индукция B_1 имеет некоторое начальное значение $2B_0 - B_s$. По мере возрастания напряжения питания индукция B_1 увеличивается и при $\omega t = \alpha_{\text{нас}}$ достигает значения насыщения. За это же время с такой же скоростью согласно уравнению (22.12) уменьшается по абсолютной величине индукция B_2 от своего начального значения $-B_s$.

Закон изменения индукции в сердечниках за время от $\omega t = 0$ до $\omega t = \alpha_{\text{нас}}$ получим, интегрируя уравнение (22.15):

$$B_1 = B_2 = \frac{1}{\omega_p s} \int_0^{\omega t} \frac{U_m}{2} \sin \omega t d(\omega t) = B_m (1 - \cos \omega t).$$

Индукция B_1 , достигнув величины насыщения, в дальнейшем некоторое время остается постоянной. Из уравнения (22.12) можно заключить, что если в одном сердечнике индукция постоянна, то в другом сердечнике в тот же промежуток времени индукция также будет постоянной. Это условие выполняется даже в том случае, если этот другой сердечник ненасыщен. Поэтому если с момента $\omega t = \alpha_{\text{нас}}$ индукции в сердечниках не меняются, то ЭДС самоиндукции в секциях рабочей обмотки равны нулю и все напряжение питания оказывается приложенным к нагрузке.

Ток в нагрузке скачком достигает наибольшего значения $i = u/R$, где R — активное сопротивление рабочей цепи. Таким образом, от $\omega t = 0$ до момента насыщения первого сердечника при $\omega t = \alpha_{\text{нас}}$ все напряжение сети приложено к рабочей обмотке, а остальную часть полупериода от $\alpha_{\text{нас}}$ до $\omega t = \pi$ — к нагрузке (рис. 22.17, а). В следующий полупериод этот процесс повторяется с тем отличием, что сердечники меняются ролями. Таким образом, в интервале управления (от 0 до $\alpha_{\text{нас}}$) оба сердечника ненасыщены, а в интервале насыщения (от $\alpha_{\text{нас}}$ до π) один из них насыщен, что приводит к постоянству потока и в другом сердечнике.

На рис. 22.17, г показана кривая тока в рабочей обмотке, а на рис. 22.17, в — в нагрузке. Как видно из совместного рассмотрения графиков на рис. 22.17, б, в, г, напряжение на нагрузке при угле насыщения $\alpha_{\text{нас}}$ скачком достигает наибольшего значения и затем изменяется по синусоидальному закону. Угол $\alpha_{\text{нас}}$ определяется постоянной индукцией B_0 , т. е. управляющим сигналом U_y . Если сигнал $U_y = 0$, то $B_0 = 0$, а угол $\alpha_{\text{нас}} = \pi$, следовательно, ток в нагрузке равен нулю. С ростом сигнала U_y увеличивается B_0 , а угол $\alpha_{\text{нас}}$ уменьшается и ток в нагрузке растёт.

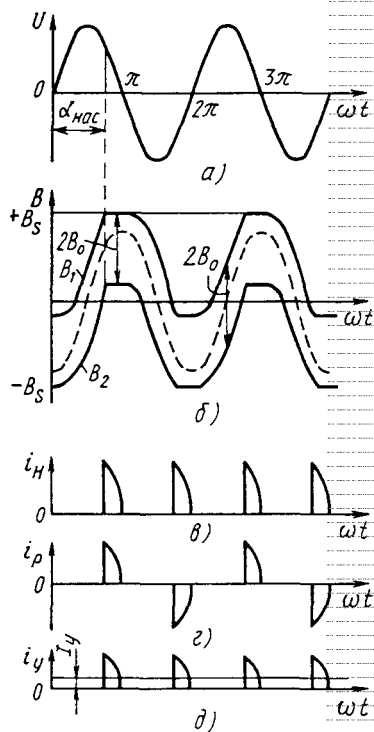


Рис. 22.17. Диаграммы мгновенных значений напряжения, индукции, токов

Режим работы магнитного усилителя напоминает работу тиратрона с фазовым управлением, где угол $\alpha_{\text{нас}}$ является углом зажигания тиратрона. Поэтому угол $\alpha_{\text{нас}}$ в теории магнитных усилителей (по аналогии с тиратронными цепями) также называют углом зажигания или регулирования. Идеальный магнитный усилитель действует как переключатель, который периодически подключает нагрузку к источнику питания в моменты, фиксированные относительно начала полупериода напряжения питания и определяемые значением управляющего сигнала.

Определим уравнение статической характеристики вход-выход для идеального магнитного усилителя.

Из идеальной кривой намагничивания (см. рис. 22.16) видно, что для ненасыщенного сердечника $H = 0$. Выше было установлено, что сердечники усилителя насыщаются поочередно, причем в каждый полупериод один из сердечников ненасыщен. В первом полупериоде (рис. 22.17) ненасыщен второй сердечник и для него справедливо равенство

$$H = i\omega_p/l + i_y\omega_y/l = 0,$$

где l — средняя длина магнитопровода.

Во втором полупериоде ненасыщенным оказывается первый сердечник и для него справедливо это же равенство. Поэтому мгновенные значения токов в рабочей и управляющей обмотках в любой момент времени связаны соотношением

$$i_y\omega_y = |i|\omega_p. \quad (22.16)$$

Изменение тока управления i_y происходит с частотой, которая вдвое больше частоты питания (рис. 22.17, д). Этот ток содержит кроме переменной и постоянную составляющую. Переменная составляющая является следствием трансформации тока из цепи нагрузки в соответствии с соотношением (22.16); она имеет основную частоту $2f = \omega/\pi$. Постоянная составляющая I_y (среднее значение тока) не может появляться вследствие трансформации, она обусловлена управляющим сигналом и численно равна току сигнала I_y (рис. 22.17, д). Так как формула (22.16) справедлива для мгновенных значений тока в течение всего полупериода, то аналогичное равенство будет справедливо и для средних значений токов нагрузки и управления:

$$I_H\omega_p = I_y\omega_y, \quad (22.17)$$

или $H_{\text{ср}} = H_y$, где $H_{\text{ср}}$ — среднее (за половину периода) значение напряженности магнитного поля от тока нагрузки. Полученное равенство представляет собой основное уравнение идеального магнитно-

го усилителя и по нему строится статическая характеристика $I_n = f(I_y)$, показанная на рис. 22.18 (кривая 1). Максимально возможное значение тока имеет место при $\alpha_{нас} = 0$, когда постоянно насыщены оба сердечника сразу. В этом случае равенство (22.17) теряет свою силу. Максимальная величина постоянной составляющей тока нагрузки в этом случае

$$I_{нmax} = \frac{2U_{м}}{\pi R} = \frac{U_{срmax}}{R},$$

где $U_{срmax}$ — максимальная величина постоянной составляющей выпрямленного напряжения; $R = R_n + R_p$ — активное сопротивление рабочей цепи, состоящее из сопротивления нагрузки R_n и сопротивления рабочей обмотки R_p .

При рассмотрении работы идеального магнитного усилителя не учитывалось сопротивление выпрямителя R_b , которое несколько уменьшает значение тока нагрузки.

Из формулы (22.17) можно определить значения коэффициентов усиления магнитного усилителя:

по току

$$k_I = I_n / I_y = \omega_y / \omega_p;$$

по напряжению

$$k_U = U_n / U_y = I_n R_n / (I_y R_y) = k_I R_n / R_y = \omega_y R_n / (\omega_p R_y);$$

по мощности

$$k_P = P_n / P_y = I_n U_n / (I_y U_y) = k_I k_U = k_I^2 R_n / R_y = \omega_y^2 R_n / (\omega_p^2 R_y).$$

Из последней формулы следует, что чем больше число витков обмотки управления при заданном сопротивлении R_y этой обмотки, тем больше коэффициент усиления по мощности.

Если усилитель выполнен без выпрямителя на выходе, т. е. по нагрузке проходит переменный ток, то в этом случае за выходной сигнал принимают действующее значение тока нагрузки

$$I_{н-} = I = k_\Phi I_{ср},$$

где k_Φ — коэффициент формы кривой тока нагрузки.

Соответственно коэффициенты усиления будут равны

$$k_{I-} = k_\Phi k_I; \quad k_{U-} = k_\Phi k_U; \quad k_{P-} = k_\Phi^2 k_P.$$

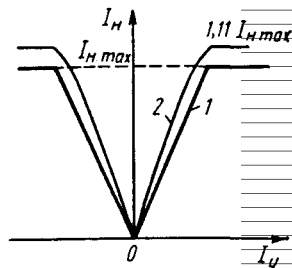


Рис. 22.18. Статические характеристики идеального магнитного усилителя

Статическая характеристика усилителя без выпрямителя показана на рис. 22.18 (кривая 2). Нелинейность характеристики объясняется тем, что коэффициент формы зависит от $\alpha_{\text{нас}}$. При $\alpha_{\text{нас}} = 0$ имеем $\alpha_{\text{нас}} = 1,11$, а с ростом $\alpha_{\text{нас}}$ коэффициент формы увеличивается.

Если в нагрузке переменного тока имеется индуктивность, то она сглаживает кривую тока и вызывает отставание тока от напряжения.

Полученное выше основное уравнение (22.17) идеального магнитного усилителя с последовательным соединением секций рабочей обмотки справедливо и для параллельного соединения. В этом случае также происходит поочередное насыщение сердечников. Однако четные гармоники в цепи управления отсутствуют, зато они протекают в контуре рабочей обмотки. Так как через секцию рабочей обмотки каждого сердечника проходит половина тока нагрузки, то уравнение статической характеристики имеет вид

$$I_n \omega_p = 2I_y \omega_y.$$

Соответственно изменяется выражение для коэффициентов усиления.

§ 22.6. Инерционность идеального магнитного усилителя

Изменение напряжения на нагрузке магнитного усилителя отстает от изменения входного сигнала U_y , т. е. усилитель обладает некоторой инерционностью. Инерционность магнитного усилителя определяется переходным процессом в цепи управления, вихревыми токами и потерями на гистерезис в сердечниках, переходным процессом в цепи переменного тока.

Вихревые токи и потери на гистерезис вызывают отставание постоянной составляющей индукции от напряженности поля подмагничивания. Однако применение для сердечников тонких листов из железоникелевых сплавов позволяет свести потери на гистерезис и вихревые токи практически к нулю. Поэтому в большинстве случаев замедлением процесса, вызванным вихревыми токами и гистерезисом, можно пренебречь.

У большинства магнитных усилителей время переходного процесса в цепи нагрузки во много раз меньше длительности процесса в цепи управления. Поэтому считают, что инерционность всего усилителя определяется только постоянной времени цепи управления.

При подаче напряжения на обмотку управления постоянная составляющая тока не сразу достигает установившегося значения.

Уравнение переходного процесса в цепи управления имеет вид

$$U_y = I_y R_y + d\psi_y / dt,$$

где ψ_y — потокосцепление двух обмоток управления; R_y — полное сопротивление цепи управления.

Так как обмотки управления включены встречно, то

$$\psi_y = \omega_y s B_1 - \omega_y s B_2 = \omega_y s (B_1 - B_2).$$

На основании формулы (22.13) $\psi_y = 2\omega_y s B_0$. Тогда

$$U_y = I_y R_y + 2\omega_y s dB_0 / dt. \quad (22.18)$$

Согласно теории идеального магнитного усилителя, имеем.

$$B_0 = B_s - B_m (1 - \cos \alpha_{\text{нас}}) / 2.$$

Из выражения для среднего рабочего тока получим

$$\cos \alpha_{\text{нас}} = \frac{\pi R}{U_M} I_{\text{ср}} - 1, \quad (22.19)$$

где $U_M = 4\pi f \omega_p s B_m$.

На основании (22.17)

$$I_{\text{ср}} = \frac{\omega_y}{\omega_p} I_y$$

Подставив значения U_M и $I_{\text{ср}}$ в выражение (22.19), имеем

$$\cos \alpha_{\text{нас}} = \frac{R\omega_y I_y}{4f\omega_p^2 s B_m} - 1.$$

Тогда уравнение для B_0 запишем в виде

$$B_0 = B_s - B_m + \frac{R\omega_y I_y}{8fs\omega_p^2}. \quad (22.20)$$

Подставив в выражение (22.18) значение B_0 , получим уравнение переходного процесса в цепи управления:

$$T_y \frac{dI_y}{dt} + I_y = \frac{U_y}{R_y},$$

где $T_y = \frac{1}{4f} \frac{R\omega_y^2}{R_y\omega_p^2}$ постоянная времени цепи управления, которая,

как видим, зависит не только от параметров самой цепи управления, но и от параметров рабочей цепи.

Если в выражении для T_y заменить отношение витков через коэффициенты усиления, а отношение сопротивлений — через КПД, то после несложных преобразований постоянную времени цепи управления можно представить как

$$T_y = \frac{1}{4f\eta} k_I k_U = \frac{1}{4f\eta} k_p,$$

где $\eta = R_n/R$ — коэффициент полезного действия рабочей цепи магнитного усилителя.

Для оценки качества усилителя в переходном режиме вводится понятие о его добротности. Добротность равна отношению коэффициента усиления по мощности к постоянной времени, т. е.

$$D = k_p/T_y = 4f\eta. \quad (22.21)$$

Для усилителя с выходным переменным током

$$D_{\sim} = k_{p_{\sim}}/T_y = k_{\phi}^2 D.$$

Следовательно, при $\eta = \text{const}$ добротность не зависит от параметров обмоток, нагрузки и мощности и определяется только частотой напряжения источника питания. Из выражения (22.21) видно, что при заданных f и η увеличение коэффициента усиления по мощности вызывает пропорциональное возрастание T_y . Поэтому практически добротность усилителя повышают путем увеличения частоты напряжения питания.

Постоянную времени цепи управления можно значительно уменьшить за счет снижения k_p . Однако это не даст возможность беспредельно уменьшать запаздывание усилителя в целом, так как в этом случае необходимо учитывать запаздывание рабочей цепи переменного тока. Так как время переходного процесса в рабочей цепи составляет 0,5—1 периода питания, то длительность переходного процесса в усилителе в целом не может быть меньше этой величины. При $f = 50$ Гц время переходного процесса не может быть меньше 0,01—0,02 с. Следовательно, действенным средством уменьшения инерционности магнитного усилителя является повышение частоты напряжения питания.

Если в усилителе кроме обмоток управления и рабочих имеется еще ряд обмоток, то каждая из них создает свой замкнутый контур, который замедляет изменение управляющего потока. Результирующая постоянная времени приближенно равна сумме постоянных времени всех обмоток управления и смещения.

§ 22.7. Графоаналитический способ построения статической характеристики магнитного усилителя

При рассмотрении физических процессов в магнитных усилителях видно, что рабочие точки двух сердечников в один и тот же момент времени находятся на различных участках кривой намагничивания. Когда один сердечник насыщен, другой находится в ненасыщенном состоянии, и наоборот. При расчете усилителя значительно удобнее иметь единую эквивалентную кривую намагничивания, на которой рабочая точка была бы общей для обоих сердечников и полностью характеризовала работу и состояние усилителя. Такой эквивалентной кривой является кривая одновременного намагничивания материала сердечников постоянным и переменным магнитными полями.

В расчетной практике широко распространен графоаналитический способ построения статических характеристик, основанный на теории линеаризованного магнитного усилителя. При этом используются экспериментально снятые характеристики одновременного намагничивания материала сердечника переменным и постоянным полями $B = f(H; H_-)$. Здесь B и H — индукция и напряженность переменного магнитного поля, а H_- — напряженность постоянного магнитного поля. Семейство характеристик $B = f(H; H_-)$ приведено на рис. 22.19. На форму кривых этого семейства оказывает влияние не только материал сердечника, но и наличие воздушных зазоров и полей рассеяния, частота питающей сети, форма и размеры сердечника, схема соединения обмоток ω_p , величина сопротивления управляющей цепи. Все указанные факторы автоматически учитываются при экспериментальном снятии семейства кривых намагничивания. Поэтому нельзя характеристики, снятые для одного типа сердечника, использовать при расчете усилителя, имеющего другой сердечник.

Семейство кривых $B = f(H; H_-)$ строится по формулам

$$B = \frac{E_p}{2\pi f \omega_p s}; \quad H = \frac{\omega_p I}{l}; \quad H_- = \frac{\omega_y I_y}{l}.$$

где E_p — ЭДС в рабочих обмотках, а соответствующие токи и напряжения определяются по методу амперметра — вольтметра.

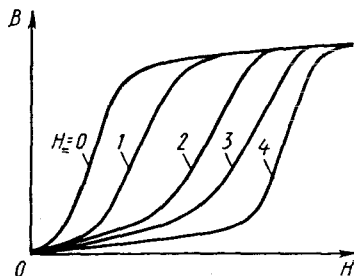


Рис. 22.19. Семейство кривых намагничивания при одновременном действии постоянного и переменного магнитных полей

Формула для определения индукции справедлива для синусоидальных B и E_p . Поэтому при ее использовании осуществляется линеаризация, переходят к эквивалентным синусоидам ЭДС и тока в рабочей цепи.

Для усилителя с выходным постоянным током используются характеристики $B_m = f(H_{cp}; H_{\pm})$. Здесь H_{cp} определяется по среднему значению рабочего тока I_{cp} , а $B_m = \sqrt{2} B$.

Рассмотрим порядок построения статической характеристики линеаризованного усилителя с выходным переменным током. Для цепи переменного тока усилителя, состоящей из последовательно соединенных дросселя и активной нагрузки, можно написать следующее уравнение:

$$U^2 = (IR)^2 + E_p^2, \quad (22.22)$$

где $R = R_n + R_p$.

При последовательном соединении обмоток ω_p имеем

$$E_p = 2\pi f \omega_p s B;$$

$$I = Hl/\omega_p.$$

Подставив значения I и E_p в выражение (22.22), получим уравнение эллипса

$$\left(\frac{B}{B'_0}\right)^2 + \left(\frac{H}{H'_k}\right)^2 = 1, \quad (22.23)$$

где $B'_0 = \frac{U}{2\pi f \omega_p s}$; $H'_k = \frac{U \omega_p}{Rl}$ — полуоси эллипса.

Уравнение (22.23) связывает переменные B и H . Эти же величины связаны и характеристиками намагничивания $B = f(H; H_{\pm})$.

Совместное графическое решение уравнений эллипса и семейства характеристик намагничивания позволяет получить при известных параметрах нагрузки и напряжении питания статическую характеристику усилителя.

По известным значениям полуосей строим на семействе характеристик намагничивания эллипс, оси которого совпадают с осями координат (рис. 22.20, а). Точки пересечения эллипса с кривыми $H_{\pm} = \text{const}$ определяют в соответствующей системе координат H_{\pm}, H характеристику усилителя $H = f(H_{\pm})$, которая может быть легко пересчитана в характеристику $I_n = f(I_y)$.

При комплексной нагрузке в дополнение к эллипсу из начала координат проводим луч ON под углом α к оси абсцисс:

$$\alpha = \arctg \frac{X_H I}{2\pi f \omega_p^2 s},$$

где X_H — реактивное сопротивление нагрузки.

Вычитая из ординат эллипса ординаты прямой ON , получим кривую, показанную на рис. 22.20, *a* пунктиром. Точки пересечения этой кривой с характеристиками намагничивания определяют зависимость $H = f(H_-)$ для индуктивной нагрузки. При емкостной нагрузке ординаты эллипса и прямой ON складываются.

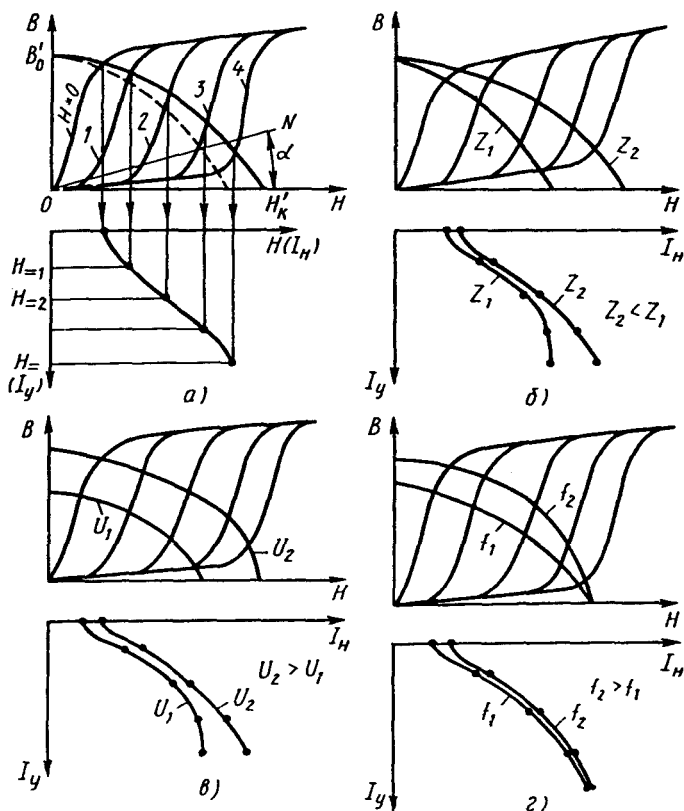


Рис. 22.20. Графическое построение статических характеристик магнитного усилителя

Рассмотренный способ построения статической характеристики усилителя позволяет удобно выявить влияние различных факторов на характеристику «вход-выход». Для этого необходимо определить, используя формулу (22.23), как влияет рассматриваемый параметр на величины полуосей эллипса B'_0 и H'_k . Например, при повышении напряжения полуоси эллипса возрастают. Смещение точек, определяющих ток холостого хода, показывает, что с увеличением напряжения он также возрастает.

Влияние различных параметров показано на рис. 22.20, б, в, г. Из рисунка видно, что увеличение частоты питания почти не сказывается на характеристике усилителя. Возрастание сопротивления нагрузки приводит к снижению коэффициента кратности тока в нагрузке.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия магнитного усилителя.
2. Почему в магнитном усилителе выходной сигнал не влияет на входной?
3. Какими параметрами характеризуется магнитный усилитель?

Глава 23

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

§ 23.1. Назначение и способы введения обратной связи

Характеристики магнитного усилителя могут быть значительно улучшены за счет введения дополнительного воздействия, зависящего от тока или напряжения на выходе усилителя. Такое воздействие, подаваемое с выхода усилителя на его вход, называется обратной связью.

В магнитных усилителях различают положительную и отрицательную, внешнюю и внутреннюю, жесткую и гибкую обратную связь.

При *положительной* обратной связи выходной сигнал, подаваемый на вход усилителя, складывается (суммируется) с входным управляющим сигналом. При *положительной* обратной связи повышается коэффициент усиления и улучшается быстродействие магнитного усилителя.

При *отрицательной* обратной связи выходной сигнал, подаваемый на вход усилителя, вычитается из входного управляющего сигнала. За счет отрицательной обратной связи улучшается стабильность преобразования входного сигнала в выходной, т. е. улучшаются измерительные свойства магнитного усилителя. Однако при отрицательной обратной связи уменьшается коэффициент усиления. Поэтому в магнитных усилителях наибольшее распространение получила положительная обратная связь. Если специально не оговорено, какой вид обратной связи используется, то под словами «магнитный усилитель с обратной связью» обычно понимается именно усилитель с положительной обратной связью.

Для осуществления *внешней* обратной связи предусматривается специальная обмотка обратной связи, которая располагается на сердечниках усилителя так же, как и обмотка управления. При *внутренней* обратной связи никакой дополнительной обмотки обратной связи не требуется. Сигнал обратной связи проходит в виде составляющей через рабочие (выходные) обмотки усилителя. При этом последовательно с рабочими обмотками включаются однополупериодные выпрямители. За счет постоянной (выпрямленной) составляющей выходного тока создается магнитный поток обратной связи, изменяющий степень насыщения сердечника усилителя. При положительной обратной связи магнитный поток обратной связи суммируется с магнитным потоком обмотки управления и насыщение сердечника увеличивается. Поэтому в литературе усилители с внутренней обратной связью иногда называют усилителями с самонасыщением или самоподмагничиванием.

При *жесткой* обратной связи сигнал обратной связи пропорционален выходному сигналу. При *гибкой* обратной связи сигнал обратной связи пропорционален скорости изменения выходного сигнала. Следовательно, гибкая обратная связь действует лишь в переходном процессе, т. е. при изменении выходного сигнала. Она и предназначена для улучшения динамики работы магнитного усилителя.

§ 23.2. Однотактный магнитный усилитель с внешней обратной связью

Типовые схемы магнитных усилителей с внешней обратной связью приведены на рис. 23.1. Эти магнитные усилители кроме рабочей обмотки ω_p и обмотки управления ω_u имеют специальную обмотку обратной связи ω_{oc} , в которую подводится сигнал с выхода усилителя.

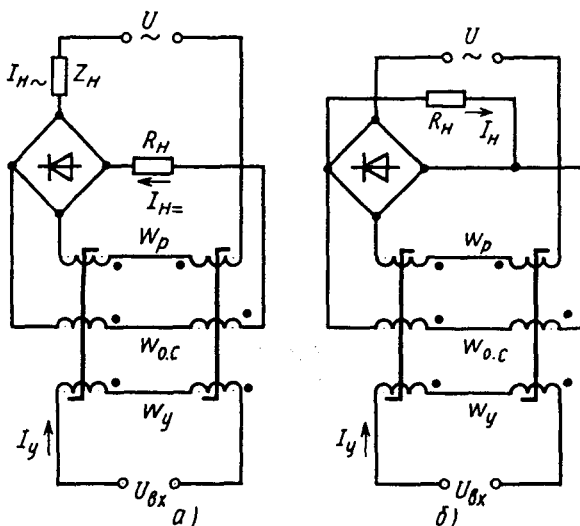


Рис. 23.1. Магнитные усилители с внешней обратной связью

Существует два вида внешней обратной связи: по току и по напряжению. В схеме по рис. 23.1, а в обмотку обратной связи подается выпрямленный ток нагрузки I_H . Таким образом осуществляется обратная связь по току. В схеме по рис. 23.1, б в обмотку обратной связи подается выпрямленное напряжение нагрузки U_H . Так осуществляется обратная связь по напряжению. Направление тока I_{oc} в обмотках обратной связи постоянно и определяется полярностью подключения их к выпрямителю. Если действие тока I_{oc} в обмотке w_{oc} усиливает действие тока управления I_y в обмотке w_y , то имеем положительную обратную связь. Магнитодвижущие силы обмоток управления и обратной связи при этом складываются. Перейти от положительной обратной связи к отрицательной можно путем изменения полярности (направления) тока управления в обмотке w_y или перемены концов обмотки w_{oc} , подключаемой к выпрямителю. В этом случае магнитодвижущие силы обмоток управления и обратной связи вычитаются.

В схеме (рис. 23.1, а) нагрузка может быть включена как постоянного, так и переменного тока. Нагрузка постоянного тока R_H включена последовательно с обмоткой обратной связи w_{oc} , т. е. после выпрямителя. Нагрузка переменного тока Z_H включается до выпрямителя. В этом случае выпрямитель служит только для осуществления обратной связи. В некоторых случаях и при нагрузке посто-

янного тока для питания обмотки обратной связи используется отдельный выпрямитель, что повышает стабильность характеристик магнитного усилителя.

Обратная связь по напряжению обычно применяется в мощных магнитных усилителях, т. е. при больших токах нагрузки. В этом случае для выпрямителя в цепи обратной связи по току потребовались бы диоды на большие токи, которые имеют большие габариты и используются со специальными охлаждаемыми радиаторами. Да и саму обмотку обратной связи потребовалось бы выполнять очень толстым проводом.

С точки зрения принципа действия разницы между усилителями с обратной связью по току и по напряжению нет.

Для статической характеристики идеального магнитного усилителя (см. § 22.5) при наличии обратной связи уравнение (22.17) будет иметь вид

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y \pm I_{oc} \omega_{oc}, \quad (23.1)$$

где знак плюс соответствует положительной обратной связи, а знак минус — отрицательной.

Поскольку длина пути l для постоянного и переменного магнитных потоков у большинства магнитных усилителей одинакова, можно записать равенство напряженностей магнитного поля:

$$H_{cp} = H_{\pm},$$

где H_{cp} — среднее за полпериода значение напряженности переменного магнитного поля; H_{\pm} — напряженность постоянного магнитного поля, создаваемого совместными действиями обмоток управления и обратной связи; $H_{\pm} = H_y \pm H_{oc}$.

Напряженность магнитного поля, создаваемого обмоткой обратной связи,

$$H_{oc} = I_{oc} \omega_{oc} / l.$$

При обратной связи по току полагаем, что весь выпрямленный ток нагрузки проходит по обмотке обратной связи, т. е. $I_{cp} = I_{oc}$. Тогда

$$H_{oc} = K_{oc} H_{cp},$$

где K_{oc} — коэффициент обратной связи.

Таким образом, коэффициент обратной связи представляет собой отношение постоянной составляющей напряженности обратной связи к среднему значению напряженности переменного поля. Численно он определяется как отношение числа витков обмотки обрат-

ной связи к числу витков рабочей обмотки: $K_{oc} = \omega_{oc} / \omega_p$. Поскольку при положительной обратной связи $H_{oc} < H_{cp}$, значение коэффициента K_{oc} обычно меньше единицы. Чем больше K_{oc} , тем сильнее обратная связь.

Используя коэффициент обратной связи, можно записать уравнение статической характеристики идеального магнитного усилителя:

$$H_{cp} = \frac{H_y}{1 \pm K_{oc}}. \quad (23.2)$$

В этом уравнении знак минус соответствует положительной обратной связи, а знак плюс — отрицательной.

Для внешней обратной связи характерно то, что можно разомкнуть обмотку обратной связи, а работоспособность магнитного усилителя сохранится. Коэффициент обратной связи при этом равен нулю, а все формулы будут аналогичны приведенным в гл. 22, если подставить $K_{oc} = 0$.

С учетом (23.2) и обозначая коэффициенты усиления магнитного усилителя без обратной связи через k_{I0} (по току), k_{U0} (по напряжению), k_{P0} (по мощности), получим значение этих коэффициентов при наличии обратной связи:

$$\left. \begin{aligned} k_I &= \frac{I_H}{I_y} = \frac{\omega_y / \omega_p}{1 \pm K_{oc}} = \frac{k_{I0}}{1 \mp K_{oc}}; \\ k_U &= k_I \frac{R_H}{R_y} = \frac{k_{U0}}{1 \mp K_{oc}}; \\ k_P &= k_I^2 \frac{R_H}{R_y} = \frac{k_{P0}}{(1 \mp K_{oc})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (23.3)$$

Таким образом, в магнитных усилителях положительная обратная связь повышает усиление тока, напряжения и мощности.

Теоретически при $K_{oc} = 1$ коэффициенты усиления стремятся к бесконечности. Напомним, что вывод формул был проведен для идеального магнитного усилителя. На практике при $K_{oc} > 1$ усилитель переходит в релейный режим работы, при котором ток нагрузки изменяется скачкообразно, аналогично скачкообразному изменению тока в цепи контактов реле при его срабатывании. Такой режим магнитного усилителя используется в бесконтактных магнитных реле, рассматриваемых в гл. 26.

§ 23.3. Инерционность магнитного усилителя с обратной связью

Наличие обратной связи оказывает влияние и на переходный процесс в магнитном усилителе, т. е. на динамический режим его работы. Анализ переходного режима в усилителе с обратной связью проводится, так же как и в § 22.7, на основании формулы (22.18). Отличие заключается в том, что в уравнении (22.20) произведение $I_y \omega_y$ заменяют $I_y \omega_y (1 \mp K_{oc})$. Объясняется это тем, что в усилителе с обратной связью магнитный поток управления создается совместным действием двух обмоток: управления и обратной связи. Следовательно, и напряженность постоянного магнитного поля, создаваемого этими обмотками

$$H_{\pm} = H_y \pm H_{oc}.$$

В усилителе без обратной связи напряженность постоянного магнитного поля определялась только H_y . Поэтому при анализе усилителя с обратной связью следует брать вместо H_y $H_{\pm} = H_y + H_{oc}$. Принимая (как и в предыдущем параграфе) $H_{cp} = H_{\pm}$, можем записать

$$H_{\pm} = H_y / (1 \mp K_{oc}) \quad \text{или} \quad H_y = H_{\pm} (1 \mp K_{oc})$$

В результате уравнение переходного процесса будет теперь характеризоваться постоянной времени

$$T_y = T_{y0} / (1 \mp K_{oc}), \quad (23.4)$$

где $T_{y0} = \frac{1}{4f} \frac{R \omega_y^2}{R_y \omega_p^2}$ — постоянная времени цепи управления усилителя без обратной связи.

Знак минус в уравнении (23.4) соответствует положительной обратной связи.

Добротность усилителя (отношение коэффициента усиления по мощности к постоянной времени) получаем из (23.3) и (23.4):

$$D = \frac{k_p}{T_y} = \frac{D_0}{1 \mp K_{oc}}, \quad (23.5)$$

где D_0 — добротность усилителя без обратной связи, определяемая по уравнению (22.21).

Как видно из (23.5), наличие положительной обратной связи увеличивает и добротность магнитного усилителя.

После подстановки (22.21) в (23.3) получим

$$D = \frac{4\eta f}{1 \mp K_{oc}}, \quad (23.6)$$

где $\eta = R_n / (R_n + R_p + R_b + R_{oc})$ — КПД; R_n — сопротивление нагрузки; R_p — сопротивление рабочей обмотки; R_b — сопротивление выпрямителя; R_{oc} — сопротивление обмотки обратной связи.

Для работы усилителя в оптимальном режиме обычно принимают $K_{oc} = 0,96$. Анализ выражения (23.6) показывает, что, вводя в усилитель положительную обратную связь и сохраняя значение коэффициента усиления по мощности, можно значительно снизить постоянную времени (например, при $K_{oc} = 0,96$ в 25 раз), т. е. улучшить быстродействие усилителя. Достигается это за счет уменьшения числа витков (т. е. индуктивности) обмотки управления усилителя. Другим способом уменьшения постоянной времени является увеличение частоты питания f , что также следует из уравнения (23.6). Поэтому для магнитных усилителей используют источники питания повышенной частоты (400, 500, 1000 Гц). Для усилителей малой мощности постоянная времени может быть снижена до нескольких миллисекунд, а для большой мощности — до нескольких десятков миллисекунд.

В случае применения магнитного усилителя с выходным переменным током (без выпрямителя в цепи нагрузки) в уравнения (23.4)—(23.6) необходимо ввести коэффициент формы переменного тока k_ϕ .

§ 23.4. Регулировка коэффициента обратной связи

Для регулировки коэффициента обратной связи используют два способа: изменение числа витков обмотки обратной связи и изменение тока в обмотке обратной связи. При использовании первого способа обмотку обратной связи выполняют с отводами, что позволяет ступенчато изменять K_{oc} . При втором способе обычно используют регулировочные резисторы, обеспечивающие плавное изменение K_{oc} . Регулировочный резистор в усилителе с обратной связью по току подключается параллельно обмотке обратной связи (рис. 23.2, а), а в усилителе с обратной связью по напряжению — последовательно этой обмотке (рис. 23.2, б).

В магнитных усилителях с обратной связью по току регулировочный резистор $R_{рег}$ подключают параллельно не ко всей обмотке

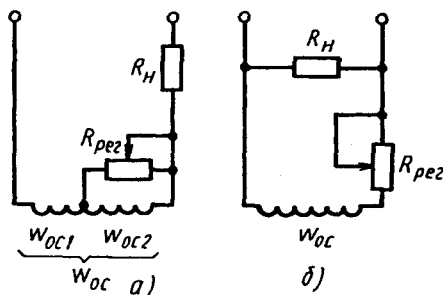


Рис. 23.2. Схемы регулировки коэффициента обратной связи

ω_{oc} , а только к части ее витков, составляющих примерно 10—20 % от общего числа витков ω_{oc} , для чего делается специальный отвод. Делается это для того, чтобы не возростала значительно инерционность усилителя. Ведь образованный обмоткой и регулировочным резистором замкнутый контур замедляет изменение потока тем больше, чем больше его индуктивность.

Если регулировочный резистор подключен параллельно к части витков обмотки обратной связи ω_{oc2} (рис. 23.2, а), то коэффициент обратной связи определяется по формуле

$$K_{oc} = \frac{\omega_{oc} - \omega_{oc2}}{\omega_{oc}} + \frac{\omega_{oc2}}{\omega_{oc}} \frac{R_{per}}{R_{oc2} + R_{per}}, \quad (23.7)$$

или $K_{oc} = (\omega_{oc} / \omega_p) K_{per}$, где $K_{per} = R_{per} / (R_{oc2} + R_{per})$.

Для обратной связи по напряжению (рис. 23.2, б) ток обратной связи

$$I_{oc} = \frac{U_H}{R_{oc} + R_H} = \frac{R_H}{R_{oc} + R_H} I_{cp},$$

тогда

$$K_{oc} = \frac{\omega_{oc} R_H}{\omega_p (R_{oc} + R_H)} = \frac{\omega_{oc} R_H}{\omega_p R_{oc}} K_{per}, \quad (23.8)$$

где $K_{per} = R_{oc} / (R_{oc} + R_H)$.

Следовательно, при любом виде обратной связи (по току или по напряжению) сопротивление регулировочного резистора учитывается введением в формулу для K_{oc} регулировочного коэффициента K_{per} , определяемого по (23.7) или (23.8).

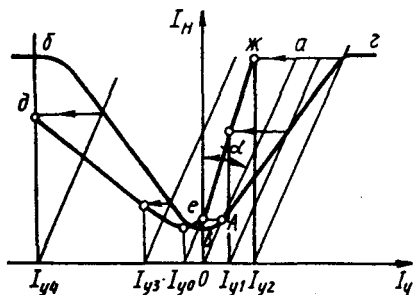


Рис. 23.4. Графическое построение статической характеристики магнитного усилителя с обратной связью

ристикой усилителя *бвг* определяет новое значение тока холостого хода. Сносим это значение на ось ординат (точка *е*). Затем проводим еще несколько прямых, параллельных *Оа*, и находим точки их пересечения с кривой *бвг*. Из точек пересечения этих прямых с осью абсцисс восставляем перпендикуляры, на которые сносим точки пересечения характеристики обратной связи с характеристикой усилителя без обратной связи.

Из построения видно, что ток $I_{y1} < I_{y2}$, т. е. для получения одного и того же тока нагрузки I_n в магнитном усилителе с обратной связью требуется меньший ток в управляющей обмотке, чем в усилителе без обратной связи.

Построенная таким образом характеристика усилителя с обратной связью обозначена *деж*. Анализируя вид этой кривой, приходим к заключению, что характеристика магнитного усилителя получается несимметричной: в правой части ее крутизна больше, чем у усилителя без обратной связи, а в левой части — меньше. Ветвь *еж* соответствует положительной обратной связи, а ветвь *де* — отрицательной обратной связи.

Построение на рис. 23.4 выполнено для значения $K_{oc} < 1$. Сравнение характеристик магнитного усилителя с обратной связью и без обратной связи показывает, что с увеличением K_{oc} ток холостого хода в нагрузке возрастает. Для уменьшения тока холостого хода в усилителе с положительной обратной связью применяют обмотку смещения $\omega_{см}$, охватывающую, подобно обмоткам управления и обратной связи, оба сердечника (рис. 23.5, *а*). Эта обмотка питается постоянным током и обеспечивает постоянное подмагничивание сердечников. Благодаря такому подмагничиванию характеристика усилителя смещается влево или вправо параллельно самой себе (рис. 23.5, *б*).

Иногда с помощью обмотки смещения начальную рабочую точку смещают на середину линейного участка (рис. 23.5, *в*). Такой усилитель можно назвать поляризованным: при положительных значениях I_y ток нагрузки линейно возрастает, при отрицательных — уменьшается.

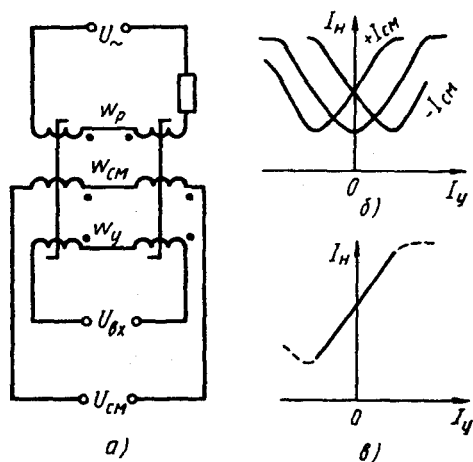


Рис. 23.5. Магнитный усилитель с обмоткой смещения

§ 23.7. Магнитные усилители с внутренней обратной связью

В рассмотренных выше магнитных усилителях со специальной обмоткой обратной связи положительная обратная связь проявлялась в том, что в сердечниках магнитного усилителя кроме постоянного подмагничивания от тока управления создавалось еще одно постоянное магнитное поле, пропорциональное току (или напряжению) нагрузки. Такой же эффект достигается и в усилителях с внутренней обратной связью — постоянное магнитное поле создается за счет постоянной составляющей тока нагрузки, протекающей по рабочим обмоткам усилителя. Следовательно, нет необходимости в специальных обмотках обратной связи. Усилители с внутренней обратной связью называют еще усилителями с самоподмагничиванием. Рассмотрим работу простейшей схемы (рис. 23.6, а), которая лежит в основе всех схем усилителей с внутренней обратной связью. На сердечнике расположены две обмотки: управления w_y и рабочая w_p . Для ограничения переменного тока в цепи обмотки управления, трансформируемого (наводимого) из цепи рабочей обмотки, служит индуктивность L_y . Напомним, что индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ пропорционально частоте, поэтому на значение постоянного тока I_y индуктивность L_y практически не влияет. Последовательно с нагрузкой R_n в цепь рабочей обмотки включен выпрямительный диод D . Поэтому под действием переменного синусоидального

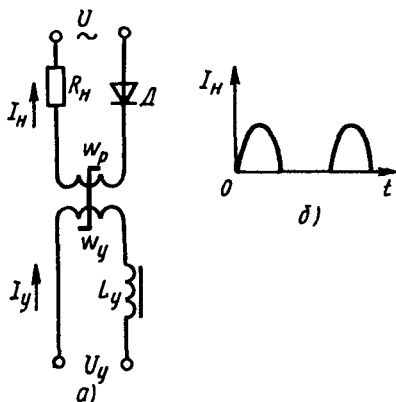


Рис. 23.6. Простейшая схема магнитного усилителя с внутренней обратной связью

напряжения U по рабочей обмотке и в нагрузке проходит однопериодный выпрямленный ток (рис. 23.6, б). Этот ток можно представить в виде суммы постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая тока нагрузки I_H создает в сердечнике постоянное магнитное поле, т. е. возникает эффект, аналогичный действию обмотки обратной связи в усилителе с внешней обратной связью. Функции обмотки обратной связи в схеме (рис. 23.6, а) выполняет рабочая обмотка, а коэффициент обратной связи в этом случае

$K_{ос} = 1$. Данная схема для магнитных усилителей практически почти не применяется, она служит лишь для иллюстрации принципа действия внутренней обратной связи.

Основные схемы магнитных усилителей с внутренней обратной связью показаны на рис. 23.7. Для нагрузки переменного тока используется схема (рис. 23.7, а) с обмотками управления, расположенными на двух сердечниках и включенными так, что переменные составляющие ЭДС, трансформируемые из рабочей обмотки, взаимно уничтожаются. Обратите внимание на точки: они показывают, что обмотки управления включены согласно, а рабочие обмотки — встречно. В один из полупериодов питающего напряжения ток в на-

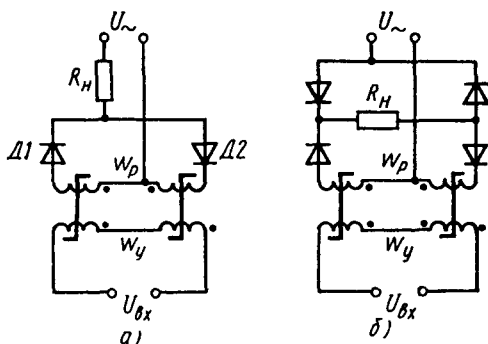


Рис. 23.7. Основные схемы магнитных усилителей с обратной связью

грузку идет через диод $D1$, а в другой — через диод $D2$. Если из схемы исключить эти диоды, то получится обычный магнитный усилитель с параллельным соединением рабочих обмоток без обратной связи (постоянная составляющая в токе рабочих обмоток будет отсутствовать).

Для нагрузки постоянного тока используется схема (рис. 23.7, б) с выпрямительным мостом. Через каждую из рабочих обмоток попеременно проходит однополупериодный выпрямленный ток, соответствующий току нагрузки. А через нагрузку R_n проходит двухполупериодный выпрямленный ток.

Для ступенчатой регулировки коэффициента обратной связи используют рабочие обмотки, состоящие из нескольких частей, которые могут быть включены встречно или согласно. Для плавной регулировки K_{oc} применяют регулировочный резистор, шунтирующий диоды. Например, в схеме по рис. 23.7, а при сопротивлении, шунтирующем диоды, равном нулю, будем иметь $K_{oc} = 0$, т. е. обратная связь отсутствует. При отсутствии шунтирующих резисторов (т. е. шунтирующее сопротивление равно бесконечности) $K_{oc} = 1$.

Вид статических характеристик усилителей с внешней и внутренней обратной связью практически одинаков. То же можно сказать и о значениях коэффициента усиления. Похожи и их динамические свойства, если при этом учесть, что число витков рабочей обмотки усилителя с внутренней обратной связью должно быть в два раза больше числа витков рабочей обмотки усилителя с внешней обратной связью при прочих равных условиях. Однако потери в рабочей цепи усилителя с самоподмагничиванием меньше, чем с внешней обратной связью, поскольку в каждый полупериод питающего напряжения ток проходит лишь по одной из рабочих обмоток. Следовательно, магнитный усилитель с внутренней обратной связью имеет больший КПД и коэффициент усиления по мощности, что приводит к увеличению добротности. При одинаковых размерах сердечников усилитель с внутренней обратной связью имеет выходную мощность почти в полтора раза больше, чем усилитель с внешней обратной связью. Кроме этих достоинств усилители с внутренней обратной связью имеют меньшее число обмоток, а в некоторых случаях и меньшее число диодов (вентилей). Поэтому в настоящее время преимущественное применение (особенно в мощных усилителях) получила внутренняя обратная связь. Внешнюю обратную связь применяют в тех маломощных усилителях, где главным требованием является стабильность работы. Сюда относятся, например, магнитные усилители, применяемые в измерительной и вычислительной технике.

Следует отметить, что для создания высококачественных и стабильных магнитных усилителей с самонасыщением требуются не только высококачественные материалы для сердечников, но и высококачественные выпрямители, имеющие прежде всего высокое обратное сопротивление.

Контрольные вопросы

1. Зачем в магнитных усилителях используется обратная связь?
2. В чем разница между внешней и внутренней обратной связью?
3. Как регулируется коэффициент обратной связи?

Глава 24

РЕВЕРСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

§ 24.1. Статическая характеристика реверсивного (двухтактного) магнитного усилителя

Реверсивные магнитные усилители отличаются тем, что при изменении полярности входного сигнала (тока управления) изменяется полярность выходного сигнала (тока нагрузки). Реверсивные магнитные усилители могут питать нагрузку постоянного или переменного тока. В последнем случае в зависимости от полярности тока управления изменяется на 180° фаза выходного напряжения. Статическая характеристика реверсивного магнитного усилителя показана на рис. 24.1. Она представляет собой симметричную кривую, проходящую через начало координат. Таким образом, при отсутствии управляющего сигнала ($I_y = 0$) ток в нагрузке I_n также равен нулю. Напомним, что в нереверсивных (однотактных) магнитных усилителях при $I_y = 0$ через нагрузку проходит ток холостого хода I_{n0} , для уменьшения которого используют, например, смещение.

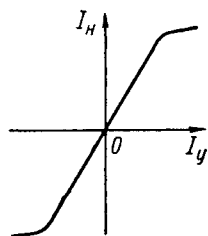


Рис. 24.1. Статическая характеристика реверсивного магнитного усилителя

Соответствующую статическую характеристику реверсивного магнитного усилителя можно получить, если соединить два одинаковых

нереверсивных усилителя таким образом, чтобы они действовали на общую нагрузку встречно при общем управляющем сигнале. На рис. 24.2 показаны две характеристики (1 и 2) однотактных магнитных усилителей со смещением и без обратной связи. При встречном включении таких усилителей их результирующая статическая характеристика получается графически сложением кривых 1 и 2. Для того чтобы ток нагрузки при $I_y = 0$ был равен нулю, необходима идентичность характеристик магнитных усилителей, составляющих реверсивный магнитный усилитель. Однотактные магнитные усилители, на основе которых выполняется реверсивный магнитный усилитель, могут быть включены по дифференциальной или мостовой схеме. Напомним, что аналогичным способом обеспечивалась реверсивная характеристика в различных преобразователях, рассмотренных в разделе II. Различают реверсивные магнитные усилители с выходным постоянным и переменным током, с обратными связями и без них. Так как реверсивный магнитный усилитель состоит из двух однотактных усилителей, то он имеет четыре сердечника, но разработаны схемы и с уменьшенным числом сердечников.

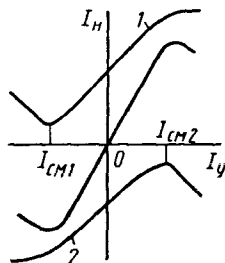


Рис. 24.2. Построение статической характеристики реверсивного магнитного усилителя

§ 24.2. Усилители с выходным переменным током

Дифференциальная схема реверсивного магнитного усилителя без обратной связи показана на рис. 24.3. Два одинаковых однотактных усилителя $MУ1$ и $MУ2$ с последовательно соединенными рабочими обмотками питаются от вторичной обмотки дифференциального трансформатора Tr . Нагрузка Z_n включена между средними точками вторичной обмотки трансформатора Tr и рабочих обмоток усилителей $MУ1$ и $MУ2$. Применяя принцип наложения, можно рассматривать ток через нагрузку как разность двух токов: I_1 и I_2 . При отсутствии входного сигнала ($I_y = 0$) токи I_1 и I_2 должны быть равны. Они определяются смещением, т. е. начальным подмагничиванием за счет постоянного тока, протекающего по обмоткам смещения $\omega_{см}$. Для балансировки (установки нуля) реверсивного усилителя при $I_y = 0$ служит регулировочный резистор $R_{рег}$. Дело в том, что изготовить два однотактных магнитных усилителя с абсолютно одинаковыми характеристиками практически невозможно, поэтому путем

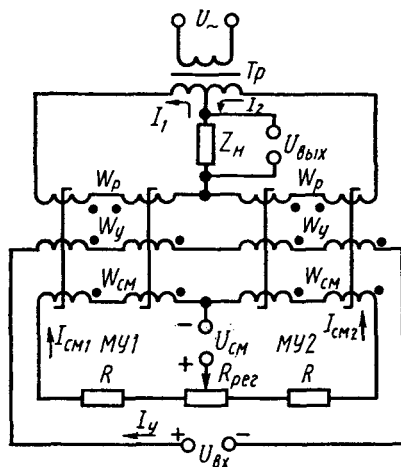


Рис. 24.3. Дифференциальная реверсивная схема магнитного усилителя

регулировки смещения обеспечивают равенство токов I_1 и I_2 при $I_y = 0$. Обычно не удается добиться одновременно равенства и амплитуды и фаз этих токов, поэтому даже при $I_y = 0$ по нагрузке проходит ток небаланса ($I_n \neq 0$).

Обмотки смещения и управления одноконтурных усилителей $MU1$ и $MU2$ включены таким образом, что при подаче управляющего сигнала I_y в одном усилителе напряженности поля управления и смещения складываются, а в другом — вычитаются. В итоге ток I_1 одного усилителя возрастает, а ток I_2 другого усилителя уменьшается и в нагрузке появляется ток $I_n = I_1 - I_2$. При перемене полярности тока управления магнитные усилители как бы меняются местами: I_1 уменьшается, а I_2 возрастает. В итоге фаза выходного тока $I_n = I_1 - I_2$ изменяется на 180° . Следует обратить внимание на то, что, поскольку речь идет о переменных токах, ток нагрузки фактически представляет собой не алгебраическую, а геометрическую (векторную) разность.

Заметим, что короткозамкнутый контур, создаваемый обмотками смещения (как и любой другой обмоткой), увеличивает инерционность усилителя, т. е. затягивает продолжительность переходного процесса. Для того чтобы уменьшить это вредное влияние, сопротивление контура увеличивают за счет дополнительных постоянных сопротивлений R .

Существенным недостатком дифференциальной схемы реверсивного усилителя по рис. 24.3 является наличие трансформатора

Тр. От этого недостатка свободна мостовая схема реверсивного усилителя.

Данная схема также содержит четыре сердечника, причем обмотки управления и смещения выполняются так же, как и в дифференциальной схеме, а рабочие обмотки w_p соединяются в схему моста, как показано на рис. 24.4. В одну диагональ моста (между точками a и b) подводится напряжение источника питания U , а в другую диагональ моста (между точками c и d) включается нагрузка Z_n . При отсутствии тока управления ($I_y = 0$) индуктивные сопротивления всех рабочих обмоток w_p одинаковы и мост уравновешен, т. е. ток в цепи нагрузки отсутствует ($I_n = 0$). Так же как и в дифференциальной схеме, при подаче управляющего сигнала ($I_y \neq 0$) подмагничивающее поле обмоток управления складывается с полем обмоток смещения в одной паре сердечников, а в другой паре — вычитается из него. Таким образом, индуктивное сопротивление одной пары рабочих обмоток, включенных в противоположные плечи моста, уменьшается, а индуктивные сопротивления другой пары рабочих обмоток соответственно в других противоположных плечах моста увеличиваются. В результате баланс моста нарушается и через нагрузку Z_n протекает ток. Направление тока нагрузки определяется полярностью тока управления, т. е. при изменении полярности сигнала фаза тока нагрузки меняется на 180° . Поэтому статическая характеристика мостовой схемы, так же как и дифференциальной, имеет вид, показанной на рис. 24.1.

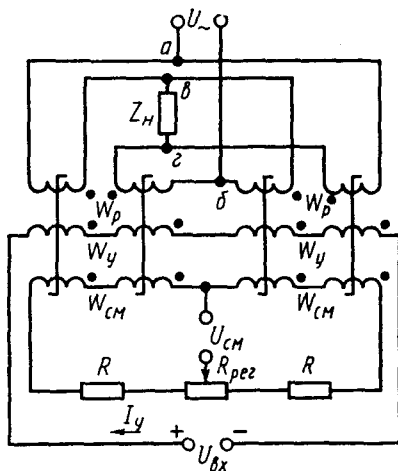


Рис. 24.4. Мостовая реверсивная схема магнитного усилителя

Не требуется отдельного трансформатора и в так называемой трансформаторной схеме реверсивного магнитного усилителя. Эта схема работает аналогично дифференциальной, но отличается удвоенным количеством рабочих обмоток. Половина этих обмоток выполняет функции первичных обмоток трансформатора и включается на напряжение питания U . Другая половина этих обмоток выполняет функции вторичных обмоток трансформатора и питает нагрузку. Таким образом, сердечники магнитного усилителя одновременно являются и сердечниками трансформатора.

Сопоставление дифференциальной, мостовой и трансформаторной схем показывает, что с точки зрения коэффициента усиления и отдаваемой мощности они примерно одинаковы. Но наиболее простой является мостовая схема, которая и находит наибольшее применение. Однако применять ее можно лишь тогда, когда напряжение питания на 20—30 % превышает требуемое максимальное напряжение на нагрузке. В других случаях применяют трансформаторную или дифференциальную схему реверсивного магнитного усилителя.

§ 24.3. Реверсивные магнитные усилители с выходным постоянным током

В реверсивном магнитном усилителе с выходным постоянным током при изменении полярности входного сигнала ток в нагрузке меняет направление на обратное. Такие усилители выполняются по дифференциальной схеме, т. е. ток в нагрузке представляет собой разность двух выпрямленных токов. Реверсивный усилитель выполняется в виде двух однотактных (нереверсивных) усилителей с выпрямителями в цепях рабочих обмоток. На рис. 24.5 приведена одна из возможных схем реверсивного усилителя с выходным постоянным током. Рассмотрим отдельно цепь постоянного тока (рис. 24.6, *a*). Для того чтобы токи каждого из однотактных усилителей I_1 и I_2 протекали через нагрузку R_n во встречных направлениях, диодные выпрямительные мосты должны быть соединены последовательно. Однако при таком соединении образуется шунтирующая цепь, через которую может проходить ток, минуя нагрузку. Через нагрузку проходит только часть тока рабочих обмоток, определяемая соотношением сопротивлений нагрузки и диодного моста. Это существенно снижает максимальную мощность в нагрузке. Для увеличения тока в нагрузке последовательно с выпрямительными мостами включаются балластные сопротивления R_b . На рис. 24.6, *б* показаны зависимости

$I_H = f(I_Y)$ при наличии балластных сопротивлений ($R_G \neq 0$) и без них ($R_G = 0$). При $R_G = 0$ возрастает максимальный ток в нагрузке, но нарастание функции $I_H = f(I_Y)$ происходит не так быстро, как при

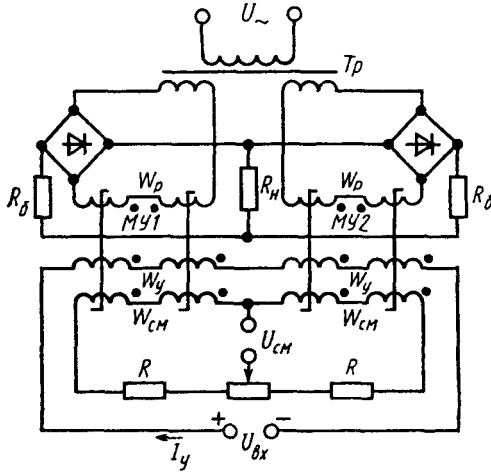


Рис. 24.5. Реверсивный магнитный усилитель с выходным постоянным током

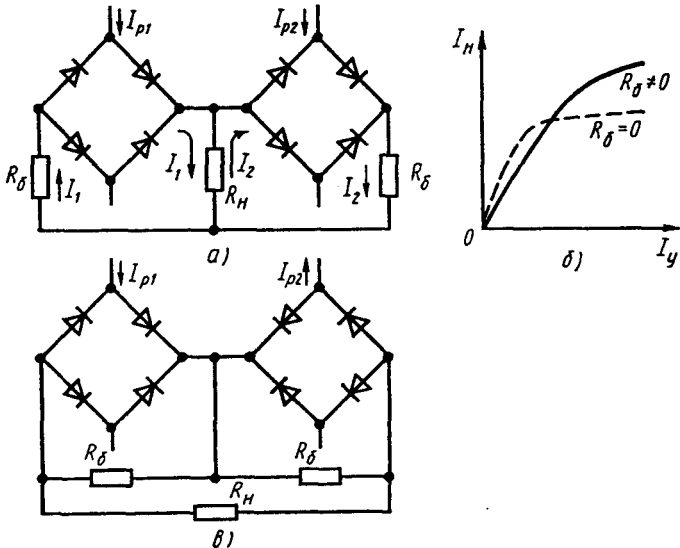


Рис. 24.6. Цепь нагрузки реверсивного магнитного усилителя

$R_6 = 0$. Таким образом, если необходимо иметь усилитель с высоким коэффициентом усиления при малых сигналах управления и с ограничением величины выходного сигнала (например, при использовании в качестве нагрузки измерительного прибора), то используется схема без балластных сопротивлений. Если же требуется получить максимальную мощность на выходе и линейную характеристику в широком диапазоне входных сигналов, то необходимо использовать балластные сопротивления. При соединении балластных сопротивлений по схеме (рис. 24.6, в) к нагрузке прикладывается разность выпрямленных напряжений однотактных усилителей.

Для получения максимальной мощности в нагрузке необходимы определенные соотношения между сопротивлениями R_n , R_6 и полным сопротивлением z_k рабочих обмоток при максимальном подмагничивании. Для схемы по рис. 24.6, а

$$R_n = z_k/2, \quad R_6 = \sqrt{2}R_n.$$

Для схемы по рис. 24.6, в

$$R_n = 2z_k, \quad R_6 = R_n/\sqrt{2}.$$

Важно отметить что даже при таком оптимальном соотношении между сопротивлениями КПД реверсивного магнитного усилителя с выходным постоянным током не превышает 17 %. Это означает, что мощность каждого из однотактных усилителей, входящих в состав реверсивного усилителя, должна быть по крайней мере в шесть раз больше требуемой мощности в нагрузке. Из-за этого недостатка схемы (рис. 24.5 и 24.6) применяют лишь для маломощных усилителей.

Для более мощных усилителей используются схемы, в которых предусмотрены меры по увеличению КПД. Один из возможных способов — замена балластных сопротивлений полупроводниковыми триодами (рис. 24.7).

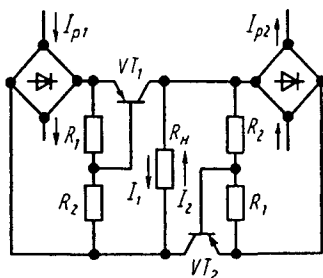


Рис. 24.7. Цепь нагрузки реверсивного магнитного усилителя с повышенным КПД

Управляющее напряжение, подаваемое на базу транзисторов VT_1 и VT_2 с делителя напряжения R_1 и R_2 , пропорционально выходному напряжению соответствующего однотактного усилителя и при его увеличении открывает соответствующий триод. Ток в нагрузке при замене балластных сопротивлений транзисторами увеличивается почти в 2,5 раза, а выходная мощность — почти в 6 раз.

§ 24.4. Обратная связь в реверсивных магнитных усилителях

Обратная связь в реверсивных магнитных усилителях может быть внешней и внутренней.

При внешней обратной связи ее обмотки могут быть выполнены отдельно для каждого из однотактных усилителей, входящих в реверсивную схему. Такая схема показана на рис. 24.8, а для дифференциального усилителя с выходным переменным током. Обмотка обратной связи может включаться и последовательно с нагрузкой через выпрямитель (рис. 24.8, б), т. е. быть общей для обоих входящих в схему однотактных усилителей.

Аналогичные схемы включения обмоток обратной связи могут быть использованы и для реверсивных магнитных усилителей с выходным постоянным током. Теоретически реверсивные усилители с отдельными обмотками обратной связи могут работать без обмоток

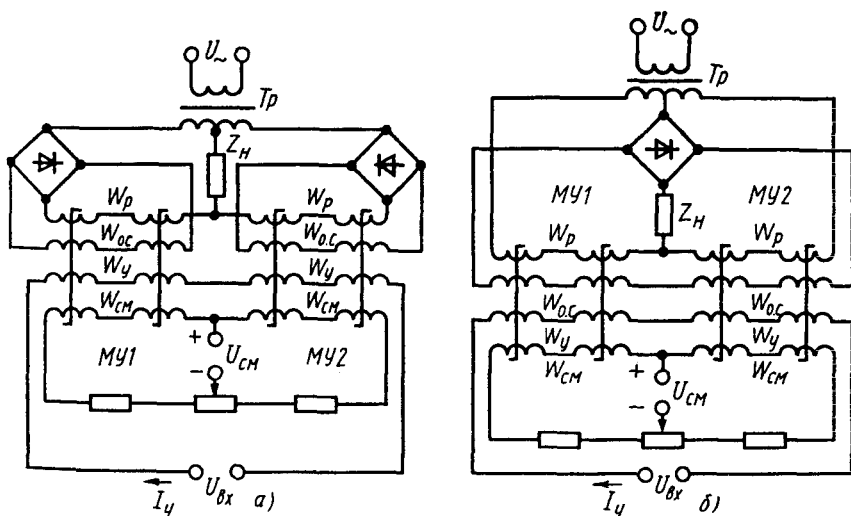


Рис. 24.8. Реверсивные магнитные усилители с внешней обратной связью

смещения, поскольку необходимое начальное смещение создается за счет прохождения по обмоткам обратной связи тока холостого хода. На практике обычно используют небольшую обмотку смещения, с помощью которой может быть выбран необходимый режим для каждого однотактного усилителя и точно установлен нулевой выходной сигнал при $I_y = 0$.

Следует также отметить, что включение общей обмотки обратной связи для реверсивных магнитных усилителей с выходным постоянным током еще более снижает и без того низкий КПД, однако повышает стабильность нуля.

В системах автоматики, как уже отмечалось, усилители обычно используются для питания исполнительных электродвигателей. Наибольшей простотой и надежностью характеризуются двухфазные асинхронные электродвигатели, скорость которых регулируется за счет изменения напряжения на управляющей обмотке. Для управления такими двигателями и используются реверсивные магнитные усилители с обратными связями. На рис. 24.9 показана дифференциальная схема реверсивного магнитного усилителя с внутренней обратной связью. Для балансировки схемы (настройки нуля и вида выходной характеристики) используются обмотки смещения, питаемые через регулировочный резистор $R_{рег}$.

Ток нагрузки в сопротивлении Z_H равен разности токов двух однотактных усилителей $MУ1$ и $MУ2$: $i_H = i_1 - i_2$.

Внутренняя обратная связь обеспечивается в каждом из этих однотактных усилителей за счет постоянной составляющей токов i_1 и i_2 , выпрямленных с помощью диодов. При этом постоянная состав-

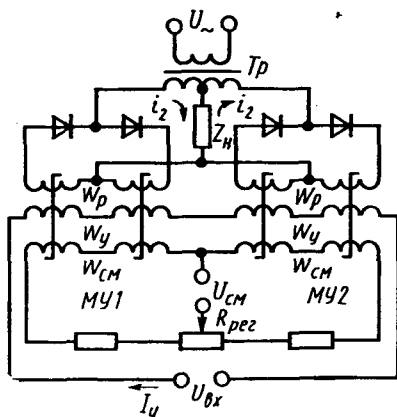


Рис. 24.9. Реверсивный магнитный усилитель с внутренней обратной связью

ляющая протекает лишь по рабочим обмоткам, а в нагрузку поступает близкий к синусоидальному ток $i_n = i_1 - i_2$. При наличии управляющего тока $I_y = 0$ определенной полярности действующее значение тока I_1 возрастает, а I_2 — уменьшается (поскольку в данном случае подмагничивание сердечников $MУ1$ возрастает, а в $MУ2$ — уменьшается). При изменении полярности сигнала управления картина меняется: I_1 уменьшается, а I_2 увеличивается. Фаза переменного тока в нагрузке при этом изменяется на 180° .

Рассмотрим влияние смещения на вид статической характеристики реверсивного магнитного усилителя. На рис. 24.10 показано построение статической характеристики реверсивного магнитного усилителя при разных значениях смещения. Построение выполняется графическим сложением двух статических характеристик однотактных магнитных усилителей $MУ1$ и $MУ2$, включенных дифференциально (настречу друг другу).

Характеристики на рис. 24.10, а соответствуют отсутствию смещения. Значения токов I_1 и I_2 на выходе каждого из однотактных усилителей при $I_y = 0$ близки к максимальным значениям, что вызывает дополнительный нагрев усилителя. Кроме того, результирующая характеристика $I_n = f(I_y)$ имеет очень пологий начальный участок, т. е. усилитель будет нечувствительным при малых сигналах управления. Для устранения этих недостатков и необходимо применять смещение (начальное подмагничивание сердечников). Направление тока смещения выбирают таким, чтобы уменьшились значения токов I_1 и I_2 при $I_y = 0$. Характеристика $I_1 = f(I_y)$ при этом смещается вправо, а характеристика $I_2 = f(I_y)$ — влево.

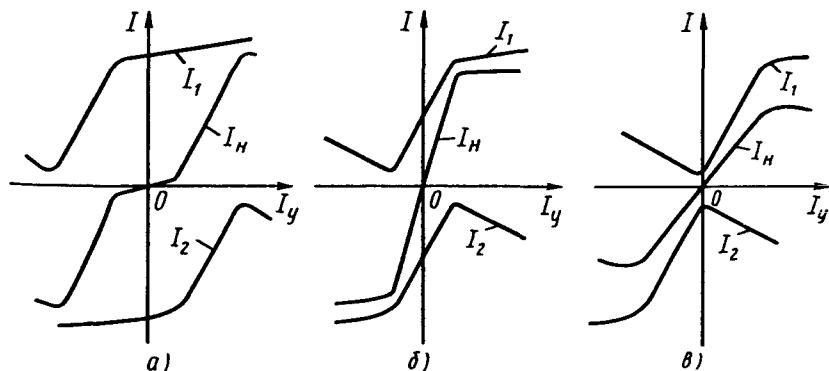


Рис. 24.10. Влияние смещения на вид статической характеристики реверсивного магнитного усилителя

Обычно величину смещения выбирают в зависимости от назначения усилителя, обеспечивая его работу в одном из двух режимов: режим класса А или режим класса В. Если начальное (при $I_y = 0$) состояние каждого из однотактных усилителей соответствует точке на середине линейного (рабочего) участка его характеристики (рис. 24.10, б), то считается, что усилитель работает в режиме класса А. Следовательно, в режиме класса А смещение выбирается таким, чтобы токи I_1 и I_2 при $I_y = 0$ были равны примерно половине своего максимального значения. В этом режиме достигается наибольший коэффициент усиления.

В режиме класса В смещение (начальное подмагничивание) увеличивается таким образом, чтобы токи I_1 и I_2 при $I_y = 0$ имели минимальное значение (рис. 24.10, в). В этом режиме обеспечиваются минимальные потери (а значит, и высокий КПД) при малых сигналах управления. При кратковременной работе усилителя режим класса В позволяет уменьшить сечение провода рабочих обмоток.

Можно построить реверсивный магнитный усилитель с внутренней обратной связью и по мостовой схеме, однако схема будет более сложной, чем дифференциальная, поскольку потребуется удвоенное число выпрямителей.

§ 24.5. Основы расчета магнитных усилителей

Одним из основных вопросов при расчете магнитного усилителя является определение его габаритов. Габариты всего усилителя и его сердечников определяются значениями мощности нагрузки, коэффициента усиления, допустимого нагрева и магнитным режимом сердечников.

Если выбрать провода с высокотемпературной изоляцией или принять меры к интенсивному охлаждению усилителя (например, за счет обдува или радиаторов), то габариты усилителя можно существенно уменьшить. Точно так же можно уменьшить габариты сердечников за счет применения высококачественных магнитных материалов с большой индукцией и малыми потерями. Естественно, в этих случаях снижение габаритов будет оплачено повышением стоимости усилителя, изготовленного из более дорогих материалов.

При проектном расчете стремятся к оптимальному решению под которым понимается достижение минимальных габаритов, минимального веса или минимальной стоимости при заданной выходной мощности и коэффициенте усиления.

Мы рассмотрим последовательность расчета, основанного на определенной зависимости объема сердечников от мощности нагрузки и магнитного режима сердечников. Эта зависимость остается неизменной при различных способах создания подмагничивающего поля. Поэтому полученные упрощенные соотношения будут справедливы для расчета различных схем магнитных усилителей: однотактных и двухтактных, без обратной связи и с обратной связью (как внешней, так и внутренней).

Объем стали одного сердечника усилителя может быть определен по формуле

$$V_c = \frac{10^8 P}{2\pi f H_{\text{МК}} \sqrt{B_{\text{М0}}^2 - B_{\text{МК}}^2}}, \quad (24.1)$$

где P — выходная мощность усилителя; f — частота питания; $H_{\text{МК}}$ — напряженность поля при максимальном подмагничивании; $B_{\text{МК}}$ — индукция в сердечнике при максимальном подмагничивании; $B_{\text{М0}}$ — то же без подмагничивания.

Величины $H_{\text{МК}}$, $B_{\text{МК}}$, $B_{\text{М0}}$ определяются выбранным материалом сердечников. Для различных материалов рассчитаны кривые зависимости минимального удельного объема V_c / P от напряженности постоянного магнитного поля при максимальном подмагничивании $H_{\text{=}}$ (рис. 24.11).

Сердечники выполняются из листового материала, толщина которого Δ (мм) определяется частотой питания f : $\Delta = a / \sqrt{f}$, где a — постоянный коэффициент зависит от материала сердечника. Мень-

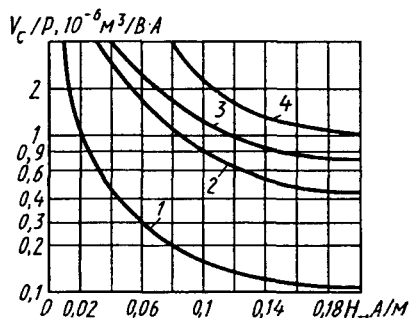


Рис. 24.11. Зависимости минимального удельного объема сердечника от максимального подмагничивания для разных материалов и значений кратности тока в нагрузке K (1 — пермаллой 65НП, $\Delta = 0,05$ мм, $f = 500$ Гц, $K = 10$; 2 — то же, но $f = 50$ Гц; 3 — сталь Э320, $\Delta = 0,35$ мм, $f = 50$ Гц, $K = 10$; 4 — то же, но $K = 50$)

шие значения a (0,7—1,9) берутся для пермаллоев, большие (3—3,5) — для холоднокатаной электротехнической стали. Обычно пермаллои применяют в усилителях малой мощности (несколько ватт).

После определения минимального удельного объема эту величину умножают на мощность нагрузки и определяют требуемый объем стали V_c . Затем выбирают подходящий сердечник (обычно тороидальный или Ш-образный) и определяют толщину набора h .

Для тороидального сердечника

$$h = \frac{2V_c}{(D-d)l_c k_{zc}}, \quad (24.2)$$

где D — внешний диаметр тороида; d — внутренний диаметр тороида; l_c — длина среднего магнитного пути в сердечнике; k_{zc} — коэффициент заполнения сталью.

Для Ш-образного сердечника

$$h = \frac{V_c}{bl_c k_{zc}}, \quad (24.3)$$

где b — ширина среднего стержня.

В этих формулах имеется в виду использование сдвоенных сердечников с общей обмоткой управления.

Объем меди усилителя без обратной связи определяется размерами пластин сердечника и толщиной набора. При определении объема меди следует учитывать коэффициент заполнения окна сердечника медью, зависящей от толщины изоляции и способа намотки. Зная объем стали и объем меди усилителя, можно определить его габариты и вес.

Расчет основных характеристик усилителя выполняется по расчетным формулам, приведенным в предыдущих главах и параграфах.

Контрольные вопросы

1. Зачем нужна обмотка смещения?
2. Какой вид имеет статическая характеристика реверсивного магнитного усилителя?
3. Какой порядок расчета магнитного усилителя?

Глава 25

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

§ 25.1. Многокаскадный магнитный усилитель

Для получения больших коэффициентов усиления используется последовательное соединение нескольких магнитных усилителей. В этом случае выходной сигнал предыдущего усилителя является входным сигналом последующего. Такое соединение усилителей называют каскадным, а каждый из усилителей — каскадом. Электромагнитное устройство в целом называют многокаскадным магнитным усилителем. Общий коэффициент усиления многокаскадного магнитного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Число отдельных каскадов в магнитном усилителе может достигать 5—6. При этом инерционность многокаскадного усилителя определяется постоянной времени, представляющей собой сумму постоянных времени отдельных каскадов. Поэтому многокаскадные усилители находят применение и в тех случаях, когда необходимо уменьшить инерционность усилителя при заданном коэффициенте усиления.

Рассмотрим схему двухкаскадного реверсивного усилителя с выходным переменным током (рис. 25.1). Схема каждого из каскадов (*МУ1* и *МУ2*) аналогична рассмотренной в гл. 24 дифференциальной схеме реверсивного усилителя. Такой усилитель может использоваться для управления исполнительным двухфазным асинхронным электродвигателем.

На выходе первого каскада (*МУ1*) включены мостовые выпрямители *B1* и *B2*, предназначенные для питания обмоток управления второго каскада (*МУ2*). Нагрузка Z_n переменного тока включена на выходе

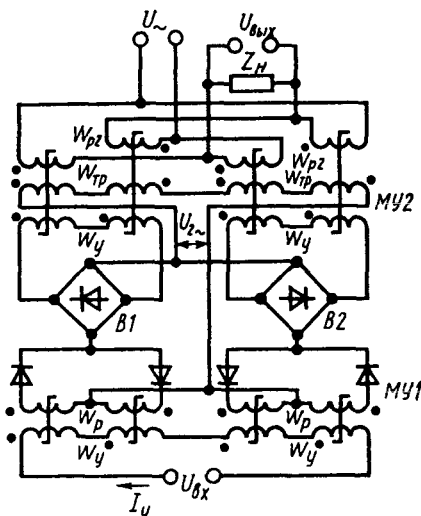


Рис. 25.1. Двухкаскадный магнитный усилитель

второго каскада. Напряжение питания первого каскада U_{2-} — снимается со специальных трансформаторных обмоток $\omega_{\text{тр}}$, намотанных на сердечниках МУ2 таким образом, что наводимые в них из рабочих обмоток $\omega_{\text{р2}}$ ЭДС складываются. Поэтому напряжение U_{2-} не зависит от изменяющихся напряжений на отдельных обмотках $\omega_{\text{у}}$. Это напряжение остается пропорциональным напряжению питания сети U_{1-} . Следовательно, в данной схеме не нужен отдельный трансформатор питания.

В основном инерционность многокаскадного усилителя определяется инерционностью первого каскада. Поэтому первый каскад обычно выполняют с небольшим коэффициентом усиления и малой постоянной времени. А необходимый общий коэффициент усиления стремятся получать за счет следующих каскадов. В итоге инерционность, например, двухкаскадного усилителя будет меньше, чем инерционность однокаскадного усилителя одинаковой мощности с тем же коэффициентом усиления.

Пример 25.1. Определить постоянную времени однокаскадного магнитного усилителя с положительной обратной связью при $k_p = 3,6 \cdot 10^3$; $K_{\text{ос}} = 0,97$; $f = 50$ Гц.

Определить постоянную времени двухкаскадного усилителя, работающего на той же частоте и с таким же коэффициентом обратной связи, но с коэффициентами усиления первого каскада $k_{p1} = 60$ и второго каскада $k_{p2} = 60$, обеспечивающими общий коэффициент усиления $k_{p1}k_{p2} = 60 \cdot 60 = 3,6 \cdot 10^3$. Сравнить эти постоянные времени, полагая для простоты КПД $\eta = 1$.

Из (23.6) получим выражение для постоянной времени при положительной обратной связи

$$T_{\text{ос}} = \frac{k_p(1 - K_{\text{ос}})}{4f\eta}.$$

Постоянная времени однокаскадного усилителя

$$T_1 = 3600(1 - 0,97)/(4 \cdot 50) = 0,54 \text{ с.}$$

Постоянную времени двухкаскадного усилителя определяем как сумму постоянных времени каждого каскада:

$$T_2 = 60(1 - 0,97)/(4 \cdot 50) + 60(1 - 0,97)/(4 \cdot 50) = 0,009 + 0,009 = 0,018 \text{ с;}$$

$$T_1 / T_2 = 0,54 / 0,018 = 30.$$

Как видно из данного примера, инерционность двухкаскадного усилителя при том же усилении уменьшается в 30 раз. Для уменьшения инерционности используют питание первых каскадов повы-

щенной частотой и лишь последний (выходной) каскад питают напряжением той частоты, на которую рассчитана нагрузка.

§ 25.2. Быстродействующие магнитные усилители

К быстродействующим относятся магнитные усилители, постоянная времени которых меньше длительности периода переменного питающего напряжения. Если в обычных усилителях на инерционность оказывает основное влияние цепь управления, то в быстродействующих усилителях необходимо учитывать запаздывание и в рабочей цепи. Высокое быстродействие в магнитных усилителях (в одном каскаде) может быть обеспечено лишь при использовании высококачественных материалов для сердечников. К таким материалам относятся железоникелевые сплавы (пермаллой), основные достоинства которых — близкая к прямоугольной петля гистерезиса, высокая магнитная проницаемость в слабых полях и малое значение коэрцитивной силы.

Для упрощенного анализа работы быстродействующего магнитного усилителя воспользуемся теорией идеализированного магнитного усилителя, т. е. пренебрежем шириной петли гистерезиса магнитного материала сердечника. Представим эту кривую графически в виде ломаной линии, состоящей из трех отрезков (рис. 25.2, а). Вертикальный участок этого графика соответствует магнитной проницаемости, стремящейся к бесконечности, а на горизонтальных участках магнитная проницаемость стремится к нулю. Это означает, что в режиме работы сердечника на вертикальном участке индуктивное сопротивление рабочей обмотки стремится к бесконечности, а на горизонтальном участке — к нулю.

Простейшим быстродействующим магнитным усилителем является схема на одном сердечнике с внутренней обратной связью за счет однополупериодного выпрямления в цепи рабочей обмотки (рис. 25.2, б). Работу такой схемы можно рассматривать по двум полупериодам питающего напряжения $U_~$. Когда диод D открыт (полярность приложенного напряжения совпадает с проводящим

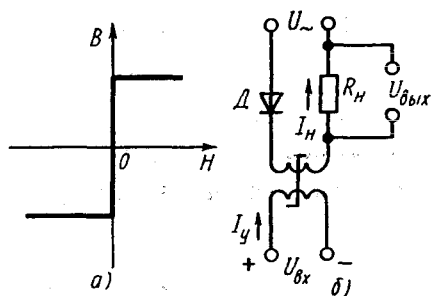


Рис. 25.2. Простейший быстродействующий магнитный усилитель.

направлением диода), изменение магнитного состояния сердечника происходит под действием тока в рабочей обмотке. Этот полупериод называется *рабочим*. Когда диод D закрыт, изменение магнитного состояния сердечника происходит только под влиянием тока в обмотке управления. Этот полупериод называется *управляющим*.

В рабочем полупериоде можно выделить два режима работы усилителя: рабочая точка находится на вертикальном или на горизонтальном участке характеристики намагничивания (рис. 25.2, *a*). В первом режиме индуктивное сопротивление рабочей обмотки очень велико и ток в рабочей цепи (ток нагрузки I_H) равен нулю. Во втором режиме индуктивное сопротивление рабочей обмотки близко к нулю и ток в рабочей цепи I_H определяется только мгновенным значением напряжения питания и активным сопротивлением нагрузки. В зависимости от значения тока управления изменяется момент времени, в который индуктивное сопротивление рабочей обмотки скачком изменяется от бесконечности до нуля (напомним, что речь идет об идеализированном магнитном усилителе). На рис. 25.3 показаны кривые тока в рабочей цепи для двух значений фазы отпираания усилителя. Рабочий ток, как видно из рисунка, имеет вид срезанных по вертикали синусоидальных импульсов. Максимальная амплитуда импульсов $I_H = U_{\text{max}} / R_H$.

Отпирание усилителя зависит от магнитного состояния сердечника в конце предшествующего (т. е. управляющего) полупериода. Чем выше на вертикальном участке кривой намагничивания находится точка начальной индукции (B_{01} и B_{02} на рис. 25.3, *б*), тем быстрее наступает момент времени, когда рабочая точка перемещается

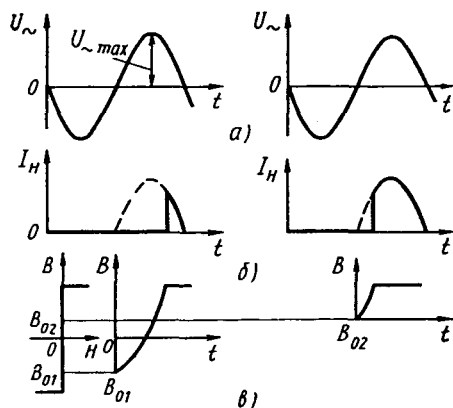


Рис. 25.3. Диаграммы напряжения, тока и индукции

на горизонтальную часть кривой намагничивания и индукция достигает значения B_s . Если в очередном управляющем полупериоде ток управления отсутствует, то к очередному рабочему полупериоду начальное значение индукции не изменится ($B_0 = B_s$) и выходной сигнал будет иметь максимальное значение. Минимальное запаздывание обусловлено принципом работы усилителя с обратной связью и может колебаться от длительности полупериода (в случае совпадения момента подачи сигнала и началом управляющего полупериода) до длительности периода (в случае подачи сигнала с началом рабочего полупериода).

Зависимость выходного тока от управляющего показана на рис. 25.4, а. Как видно из характеристики $I_H = f(I_Y)$, при $I_Y = 0$ выходной ток максимален, а для его уменьшения требуется подавать отрицательный входной сигнал ($-I_Y$). На практике удобнее иметь прямо пропорциональную зависимость выходного сигнала от входного (рис. 25.4, б). Для получения такой характеристики в управляющую цепь включают дополнительный источник напряжения смещения $U_{см}$ (его называют опорным напряжением) с той же частотой, что и напряжение питания, но сдвинутый по фазе на 180° (рис. 25.5, а).

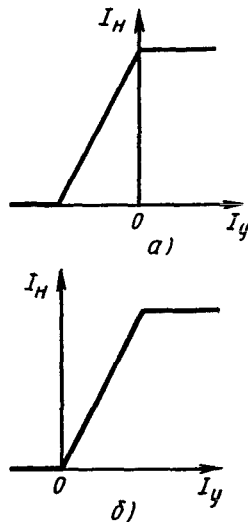


Рис. 25.4. Статические характеристики

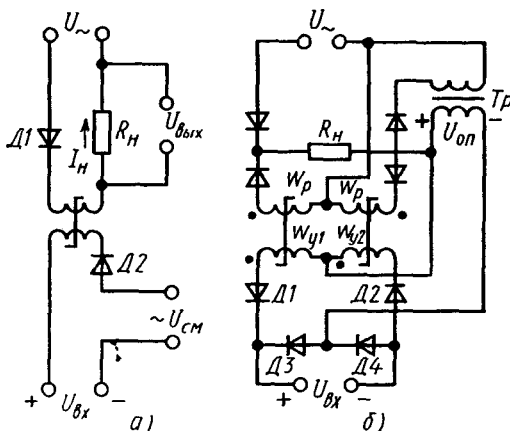


Рис. 25.5. Схемы быстродействующих магнитных усилителей со смещением

При выполнении соотношения между питающим и опорным напряжениями $U_{см} / U_- = \omega_y / \omega_p$ необходимое размагничивание сердечника будет происходить в течение управляющего полупериода за счет $U_{см}$ и при $I_y = 0$. Соответственно при $I_y = 0$ ток нагрузки будет равен нулю, а при увеличении тока управления будет возрастать ток нагрузки, как показано на рис. 25.4, б.

На основе двух однополупериодных схем построены двухполупериодные и реверсивные быстродействующие магнитные усилители. При этом усилители с выходным постоянным или переменным током отличаются соединением цепи нагрузки.

На рис. 25.5, б показана схема двухполупериодного быстродействующего усилителя, в которой опорное напряжение, обеспечивающее смещение, подается со вторичной обмотки трансформатора Tr . Поскольку это напряжение в течение одного полупериода запирает диод $D1$, а в течение другого полупериода — $D2$, в каждый из полупериодов ток проходит только по одной обмотке управления.

На рис. 25.5 показана полярность опорного напряжения, при которой диод $D2$ закрыт, а диод $D1$ открыт. Ток управления при этом протекает по цепи «+» $U_{оп} - \omega_{y1} - D1 - U_{вх} - D4$ («+» $U_{оп}$). В другой полупериод, когда изменится полярность $U_{оп}$, ток управления пойдет по обмотке ω_{y2} . Проследите его путь самостоятельно.

Надо отметить, что быстродействующие магнитные усилители имеют коэффициенты усиления по напряжению и по мощности меньше, чем усилители с нормальным быстродействием. Они становятся быстродействующими именно за счет повышения мощности управляющего сигнала. Поэтому для маломощных усилителей предпочтительнее «обычные» схемы, а не быстродействующие.

Чаще всего быстродействующие усилители применяются для непосредственного усиления сигналов переменного тока (без предварительного выпрямления). Но достоинства быстродействующего усилителя будут сведены на нет, если исполнительное устройство в системе автоматики будет обладать большим запаздыванием. Поэтому реверсивные быстродействующие магнитные усилители получили применение в следящих системах с малоинерционными исполнительными электродвигателями (например, имеющими полый тонкостенный ротор или дисковый ротор с печатной обмоткой).

§ 25.3. Операционные магнитные усилители

Операционные усилители предназначены для использования в измерительных, моделирующих и вычислительных системах автоматики. Главное требование, предъявляемое к ним, — это высокая

стабильность параметров: постоянство коэффициента усиления и отсутствие дрейфа нуля. Наиболее широко применяются полупроводниковые операционные усилители. Однако и магнитные операционные усилители имеют определенные достоинства. В частности, с помощью магнитного усилителя значительно проще выполнять такую операцию, как суммирование сигналов.

Пусть магнитный усилитель имеет несколько обмоток управления с одинаковым числом витков ω_y . Тогда магнитный поток управления будет создаваться суммарным действием всех токов, протекающих по n обмоткам управления:

$$I_{y1}\omega_y + I_{y2}\omega_y + \dots + I_{yn}\omega_y = \omega_y \sum_{i=1}^n I_{yi}.$$

Точность суммирования для обычного усилителя с несколькими обмотками управления составляет несколько процентов. Для получения высокой точности (сотые доли процента) применяют специальные операционные суммирующие усилители. Высокая точность суммирования сигналов в таких усилителях достигается за счет использования отрицательной обратной связи, охватывающей весь усилитель. Так как при этом уменьшается коэффициент усиления, то для компенсации такого уменьшения применяют положительную обратную связь или многокаскадную схему.

Структурная схема суммирующего операционного магнитного усилителя показана на рис. 25.6. На вход усилителя с коэффициентом усиления по току K_i поступают входные сигналы I_{y1} , I_{y2} , ..., I_{yn} и сигнал отрицательной обратной связи, $I_{o.o.c}$, представляющий собой выходной ток $I_{вых}$ (обычно не весь ток, а его часть $I_{o.o.c} = \beta I_{вых}$). В соответствии с уравнением из § 1.5 для отрицательной обратной связи имеем коэффициент передачи

$$K = \frac{K_i}{1 + \beta K_i}.$$

При достаточно большом значении K_i , непостоянство коэффициента передачи K суммирующего усилителя будет характеризоваться сотыми долями процента, т. е. выходной сигнал будет достаточно строго пропорционален сумме входных сигналов.

Операционные магнитные усилители могут использоваться в системах автоматизации для разных целей. *Развязыва-*

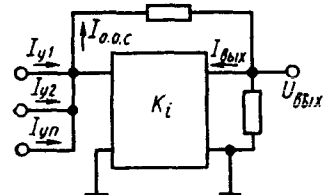


Рис. 25.6. Суммирующий операционный усилитель

чительное уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения, повышение КПД, равномерную загрузку фаз питающей сети.

Трехфазные магнитные усилители представляют собой три одинаковых однофазных магнитных усилителя, рабочие обмотки которых подключаются к трехфазной сети по схеме «звезда» или «треугольник». При этом на каждую фазу может приходиться по одному или по два сердечника. Соответственно с этим различают трехфазные усилители на трех сердечниках (трехдроссельные) и на шести сердечниках (шестидроссельные).

На рис. 25.9 показаны схемы трехфазных усилителей с выходным постоянным током. В каждой фазе схемы по рис. 25.9, а имеется одноконтурный однополупериодный усилитель на одном сердечнике, общая нагрузка R_H включается в нулевой провод. Основное достоинство этой схемы заключается в простоте и дешевизне конструкции усилителя, что обусловлено малым числом элементов. Существенными недостатками усилителя на трех сердечниках по сравнению с усилителем на шести сердечниках (рис. 25.9, б) являются более низкий КПД и более значительные пульсации выпрямленного напряжения на нагрузке. В схеме (рис. 25.9, б) высокий КПД и малые пульсации выходного напряжения обеспечиваются благодаря двухполупериодному выпрямлению тока в каждой из фаз.

В схеме с тремя сердечниками допустимо только последовательное соединение всех трех обмоток управления. Однако при этом в обмотках управления наводится напряжение тройной частоты (из-за несинусоидальности тока в рабочих обмотках при насыщении сердечников). В схеме с шестью сердечниками удастся довольно успешно бороться с наведенным напряжением повышенной частоты

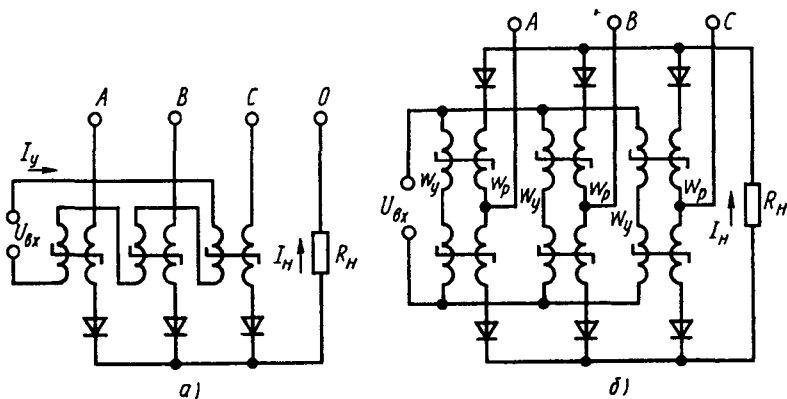


Рис. 25.9. Трехфазные магнитные усилители с выходным постоянным током

ты. Например, в схеме на рис. 25.9, б используется параллельное соединение трех пар обмоток управления и последовательное соединение обмоток управления пары сердечников в каждой фазе. В этом случае в каждой паре обмоток управления ω_y , относящихся к одной фазе, индуцируются четные гармоники ЭДС. При этом вторые (самые крупные) гармоники ЭДС одной пары обмоток ω_y сдвинуты по фазе на 120 или 240° относительно этих же гармоник двух других пар обмоток ω_y . При параллельном соединении отдельных пар обмоток управления, как это сделано в схеме по рис. 25.9, б, четные гармоники тока могут свободно циркулировать по этим обмоткам, не оказывая влияния на источник входного сигнала. Напряжение удвоенной частоты на зажимах обмоток управления будет небольшим, а характеристика «вход-выход» $I_n = f(I_y)$ будет такой же линейной, как у обычных однофазных усилителей. В усилителе на трех сердечниках зависимость $I_n = f(I_y)$ имеет нелинейный характер.

На рис. 25.10 показан однотактный (нереверсивный) трехфазный усилитель, предназначенный для регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя M . Последовательно с каждой фазой обмотки статора двигателя включается однофазный магнитный усилитель. Следовательно, нагрузкой для каждого однофазного усилителя является соответствующая обмотка статора. При этом рабочая обмотка рассчитывается на фазное напряжение. Магнитный усилитель позволяет регулировать напряжение на зажимах статора. При уменьшении напряжения на двигателе снижается его скорость, правда довольно незначительно. Заметим, что для регулирования скорости асинхронного двигателя в широких пределах используются другие схемы (с переключением числа пар полюсов при ступенчатом регулировании, с тиристорными преобразователями частоты питания при плавном регулировании).

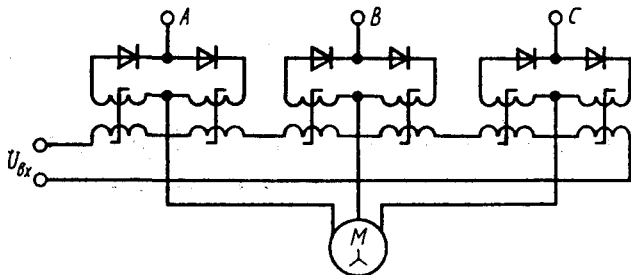


Рис. 25.10. Нереверсивный трехфазный магнитный усилитель для регулирования асинхронного электродвигателя

ющий усилитель используется в тех случаях, когда на вход измерительного устройства надо подать сигнал от датчика, обладающего большим внутренним сопротивлением. Если этот сигнал подключать непосредственно на вход схемы, имеющей низкое входное сопротивление, то сигнал датчика сильно уменьшится из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении датчика.

Развязывающий усилитель обеспечивает согласование выходного сопротивления датчика с входным сопротивлением, которое является нагрузкой датчика. Структурная схема развязывающего усилителя показана на рис. 25.7, а. Это как бы суммирующий усилитель с одной входной обмоткой. Если эта обмотка включена между датчиком с выходным напряжением U_d и нагрузкой R_H , то входной ток усилителя

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_d - I_{\text{вх}} R_H}{R_y} \approx \frac{U_d - K_i I_{\text{вх}} R_H}{R_y},$$

где R_y — сопротивление управляющей (входной) обмотки магнитного усилителя.

Отсюда входное сопротивление, которым нагружен датчик,

$$R_{\text{вх}} = U_d / I_{\text{вх}} = R_y + K_i R_H \approx K_i R_H.$$

При высоком значении K_i входное сопротивление будет достаточно большим. Развязывающий усилитель легко преобразуется в масштабный усилитель, изменяющий сигнал датчика в определенное количество раз. В масштабном усилителе (рис. 25.7, б) на вход подается не все напряжение нагрузки, а его часть (с помощью делителя напряжения на резисторах R_1 и R_2).

На базе операционного усилителя с одной входной обмоткой строятся схемы интегрирующего и дифференцирующего усилителей.

В *интегрирующем* операционном усилителе (рис. 25.8, а) сигнал отрицательной обратной связи вводится через конденсатор с емко-

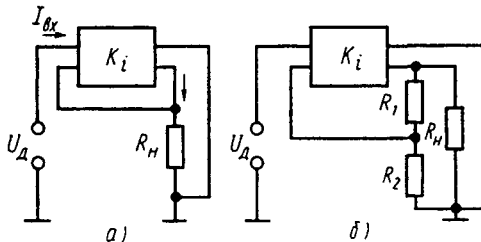


Рис. 25.7. Развязывающий (а) и масштабный (б) операционные усилители

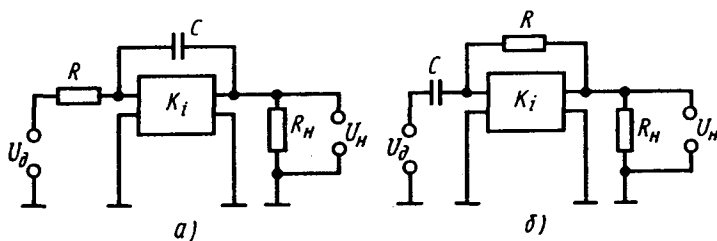


Рис. 25.8. Интегрирующий (а) и дифференцирующий (б) операционные усилители

стью C . При большом значении K_i напряжение на нагрузке будет пропорционально интегралу сигнала датчика:

$$U_H \approx \frac{1}{CR} \int_0^t U_d dt.$$

В дифференцирующем операционном усилителе (рис. 25.8, б) емкость C включена не в цепь обратной связи, а на вход. В этом случае напряжение на нагрузке будет пропорционально производной сигнала датчика:

$$U_H \approx CR dU_d/dt.$$

На базе суммирующего усилителя с несколькими входными обмотками можно выполнять также операции умножения и деления. Для этого необходимо подавать в обмотки управления токи, пропорциональные логарифмам входных сигналов.

§ 25.4. Трехфазные магнитные усилители

Трехфазные магнитные усилители обычно используются для управления исполнительными устройствами систем автоматики при питании от промышленной сети трехфазного переменного тока. Они могут питать нагрузку переменного или постоянного тока.

Трехфазные магнитные усилители с выходным переменным током чаще всего применяются для регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных электродвигателей (это, кстати, наиболее распространенный потребитель электроэнергии в народном хозяйстве) и для стабилизации напряжения трехфазных источников питания.

Трехфазные магнитные усилители с выходным постоянным током обеспечивают по сравнению с однофазными усилителями зна-

чительное уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения, повышение КПД, равномерную загрузку фаз питающей сети.

Трехфазные магнитные усилители представляют собой три одинаковых однофазных магнитных усилителя, рабочие обмотки которых подключаются к трехфазной сети по схеме «звезда» или «треугольник». При этом на каждую фазу может приходиться по одному или по два сердечника. Соответственно с этим различают трехфазные усилители на трех сердечниках (трехдроссельные) и на шести сердечниках (шестидроссельные).

На рис. 25.9 показаны схемы трехфазных усилителей с выходным постоянным током. В каждой фазе схемы по рис. 25.9, а имеется одноконтурный однополупериодный усилитель на одном сердечнике, общая нагрузка R_H включается в нулевой провод. Основное достоинство этой схемы заключается в простоте и дешевизне конструкции усилителя, что обусловлено малым числом элементов. Существенными недостатками усилителя на трех сердечниках по сравнению с усилителем на шести сердечниках (рис. 25.9, б) являются более низкий КПД и более значительные пульсации выпрямленного напряжения на нагрузке. В схеме (рис. 25.9, б) высокий КПД и малые пульсации выходного напряжения обеспечиваются благодаря двухполупериодному выпрямлению тока в каждой из фаз.

В схеме с тремя сердечниками допустимо только последовательное соединение всех трех обмоток управления. Однако при этом в обмотках управления наводится напряжение тройной частоты (из-за несинусоидальности тока в рабочих обмотках при насыщении сердечников). В схеме с шестью сердечниками удастся довольно успешно бороться с наведенным напряжением повышенной частоты.

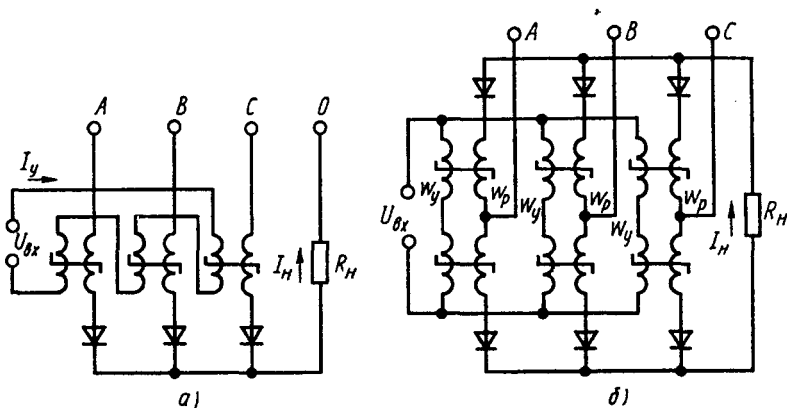


Рис. 25.9. Трехфазные магнитные усилители с выходным постоянным током

ты. Например, в схеме на рис. 25.9, б используется параллельное соединение трех пар обмоток управления и последовательное соединение обмоток управления пары сердечников в каждой фазе. В этом случае в каждой паре обмоток управления ω_y , относящихся к одной фазе, индуцируются четные гармоники ЭДС. При этом вторые (самые крупные) гармоники ЭДС одной пары обмоток ω_y сдвинуты по фазе на 120 или 240° относительно этих же гармоник двух других пар обмоток ω_y . При параллельном соединении отдельных пар обмоток управления, как это сделано в схеме по рис. 25.9, б, четные гармоники тока могут свободно циркулировать по этим обмоткам, не оказывая влияния на источник входного сигнала. Напряжение удвоенной частоты на зажимах обмоток управления будет небольшим, а характеристика «вход-выход» $I_n = f(I_y)$ будет такой же линейной, как у обычных однофазных усилителей. В усилителе на трех сердечниках зависимость $I_n = f(I_y)$ имеет нелинейный характер.

На рис. 25.10 показан однотактный (неревверсивный) трехфазный усилитель, предназначенный для регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя M . Последовательно с каждой фазой обмотки статора двигателя включается однофазный магнитный усилитель. Следовательно, нагрузкой для каждого однофазного усилителя является соответствующая обмотка статора. При этом рабочая обмотка рассчитывается на фазное напряжение. Магнитный усилитель позволяет регулировать напряжение на зажимах статора. При уменьшении напряжения на двигателе снижается его скорость, правда довольно незначительно. Заметим, что для регулирования скорости асинхронного двигателя в широких пределах используются другие схемы (с переключением числа пар полюсов при ступенчатом регулировании, с тиристорными преобразователями частоты питания при плавном регулировании).

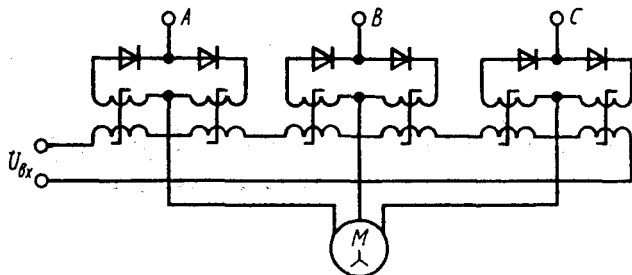


Рис. 25.10. Неревверсивный трехфазный магнитный усилитель для регулирования асинхронного электродвигателя

Возможно применение трехфазных магнитных усилителей и для автоматизации пуска асинхронных двигателей, когда усилитель включается в комбинации с релейно-контакторной аппаратурой.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы магнитных усилителей специального назначения.
2. Что требуется для повышения быстродействия магнитного усилителя?
3. Для выполнения каких функций нужны операционные усилители?

Глава 26

МАГНИТНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ И БЕСКОНТАКТНЫЕ МАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

§ 26.1. Назначение магнитных модуляторов

Магнитные модуляторы предназначены для преобразования постоянного напряжения (или тока) в пропорциональное ему переменное напряжение (или ток). Необходимость в таком преобразовании возникает при измерении малых сигналов постоянного тока или напряжения, которые не могут быть непосредственно поданы на измерительные или исполнительные устройства без предварительного усиления. В то же время непосредственное усиление сигналов постоянного тока электронными и полупроводниковыми усилителями имеет серьезный недостаток — нестабильность нулевого сигнала, так называемый дрейф нуля. В случае преобразования сигнала постоянного тока в переменный можно заменить низкостабильный усилитель постоянного тока высокостабильным усилителем переменного тока.

Для такого преобразования можно использовать и электромеханическое устройство — вибропреобразователь, рассмотренный в гл. 18. Однако наличие у вибропреобразователя периодически размыкающихся и замыкающихся контактов является причиной его сравнительно невысокой надежности. Так как магнитный модулятор не имеет контактов, т. е. является бесконтактным элементом автоматики, то и надежность его выше, чем у вибропреобразователя.

По принципу действия и устройству магнитный модулятор ничем не отличается от магнитного усилителя. Надо отметить, что бесконтактное преобразование постоянного тока в переменный выполняют и модуляторы других типов, например полупроводниковые (в том числе транзисторные).

По сравнению с полупроводниковыми отдельные типы магнитных модуляторов имеют лучшую стабильность нуля (особенно при изменении температуры окружающей среды). Так же как и полупроводниковые, магнитные модуляторы могут выполнять преобразование постоянного напряжения в переменное с одновременным усилением. Магнитные модуляторы простыми способами обеспечивают суммирование большого числа сигналов без необходимости введения гальванической связи между ними. *Гальваническая* связь заключается в непосредственном соединении электрических цепей. Она порой бывает крайне нежелательной, поскольку приводит к вредному влиянию одного элемента автоматики на другой. Наиболее серьезный недостаток магнитных модуляторов по сравнению с полупроводниковыми — это большие габариты и вес.

Довольно часто комбинируют магнитный модулятор с полупроводниковым усилителем, т. е. проектируют магнитно-полупроводниковые преобразователи. В этом случае можно получить оптимальное соотношение между такими техническими характеристиками, как точность, чувствительность, коэффициент усиления, вес, габариты, стоимость, надежность.

Магнитные модуляторы, предназначенные для работы на последующий электронный или полупроводниковый каскад усиления, называют магнитными усилителями напряжения. Различают магнитные модуляторы с выходным переменным током основной и удвоенной частоты.

§ 26.2. Магнитные модуляторы с выходным переменным током основной частоты

В качестве магнитного модулятора с выходным переменным током основной частоты (т. е. равной частоте источника питания) можно использовать любую из рассмотренных в гл. 24 схем двухтактных магнитных усилителей: дифференциальную, мостовую или трансформаторную.

Выбор между той или иной схемой делается в зависимости от мощности управляющего сигнала и необходимого коэффициента усиления по напряжению.

Очевидно, что наибольший коэффициент усиления можно получить в трансформаторной схеме за счет выполнения вторичной обмотки с большим числом витков, т. е. как бы с помощью повышающего трансформатора. Однако при этом возникают прежде всего чисто технологические трудности с намоткой большого числа витков на небольшом сердечнике маломощного магнитного усилителя. А кроме того, останется меньше пространства для размещения обмотки управления. Вообще доказано, что мощность управления P_y связана с площадью окна Q_y для обмотки управления обратно пропорциональной зависимостью. Чем меньше площадь окна Q_y , тем большая потребуется мощность управления для создания необходимой напряженности магнитного поля в сердечнике. Поэтому трансформаторную схему двухтактного магнитного усилителя реально применяют для магнитных модуляторов при $P_y > 10^{-8}$ Вт. При меньших значениях P_y (до 10^{-14} Вт) используют мостовую и дифференциальную схемы как более чувствительные.

Для получения необходимого коэффициента усиления по напряжению используется отдельный выходной трансформатор $Tr2$, как это показано на рис. 26.1. Для балансировки нуля используется резистор R_p , с движка которого подается напряжение на первичную обмотку $Tr2$. Сопротивление R_p выбирается примерно равным сопротивлению рабочих обмоток w_p .

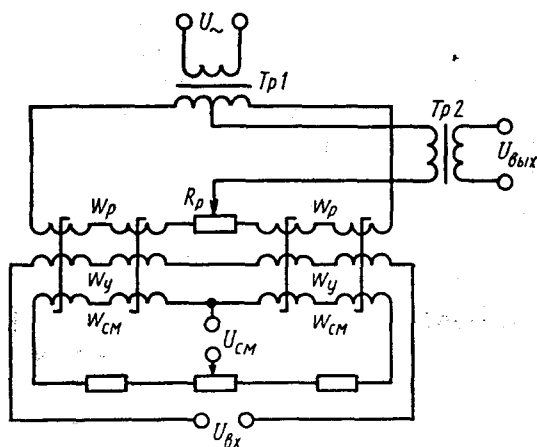


Рис. 26.1. Магнитный модулятор с выходным переменным током на частоте питания

§ 26.3. Магнитные модуляторы с выходным переменным током удвоенной частоты

При рассмотрении процессов, проходящих в идеальном магнитном усилителе, отмечалось, что ток управления можно представить как сумму постоянной и переменной составляющих, причем переменная составляющая изменяется с частотой, вдвое превышающей частоту питания. Если постоянная составляющая обусловлена управляющим сигналом I_y , то переменная составляющая возникает вследствие трансформации тока из цепи нагрузки. Трансформируемая из рабочей обмотки ЭДС двойной частоты имеет фазу, которая при перемене полярности управляющего сигнала меняется на 180° . При снятии управляющего сигнала ($I_y = 0$) ЭДС двойной частоты пропадает. Таким образом, единственной причиной появления ЭДС двойной частоты является подача входного сигнала на усилитель. Заметим, что какие-либо другие причины (неидентичность сердечников, например) не могут привести к возникновению ЭДС двойной частоты при питании усилителя синусоидальным напряжением.

Эффект появления ЭДС двойной частоты и используется в магнитных модуляторах с выходным переменным током удвоенной частоты (рис. 26.2).

Обмотка управления ω_y в схемах таких модуляторов используется как для подачи входного сигнала $U_{вх}$, так и для снятия выходного сигнала $U_{вых}$. ЭДС двойной частоты выделяется с помощью выходного трансформатора Tr . Первичная обмотка этого трансформатора может подключаться параллельно обмотке управления ω_y (рис. 26.2, а) или последовательно с ней (рис. 26.2, б). В обоих случаях фаза выходного напряжения $U_{вых}$ изменяется на 180° при изменении полярности $U_{вх}$, т. е. схемы являются реверсивными. В схеме с параллельным соединением обмоток (рис. 26.2, а) постоянный ток не поступает в первичную обмотку выходного (обычно повышающего) трансформатора Tr . Путь постоянной составляющей тока

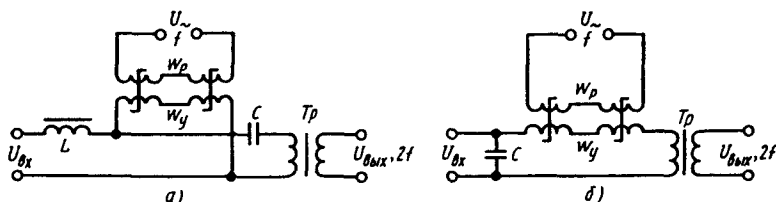


Рис. 26.2. Магнитные модуляторы с выходным переменным током удвоенной частоты

преграждает конденсатор C . Напомним, что емкостное сопротивление $X_C = 1/(\omega C)$, т. е. для постоянной составляющей ($\omega = 0$) емкостное сопротивление стремится к бесконечности. Дроссель L (индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$) имеет очень малое сопротивление для сигнала постоянного тока, а для тока двойной частоты представляет большое сопротивление. Поэтому дроссель L препятствует прохождению тока двойной частоты через источник входного сигнала (например, датчик). Как правило, стремятся избежать обратного воздействия последующего элемента в системе автоматики на предыдущий (за исключением тех случаев, когда специально созданы обратные связи).

В схеме с последовательным соединением обмоток (рис. 26.2, б) конденсатор C шунтирует источник входного сигнала, поэтому ток двойной частоты замыкается через этот конденсатор, не попадая в источник входного сигнала. Специальный дроссель для обеспечения режима вынужденного подмагничивания в этой схеме не требуется. Его роль играет первичная обмотка трансформатора Tr .

Конденсатор C и дроссель L в схемах магнитного модулятора с выходом на удвоенной частоте играют роль фильтра. Для получения высокой чувствительности и точности преобразования приходится использовать фильтры на выходе и входе. Поэтому модуляторы с выходным током удвоенной частоты оказываются сложнее модуляторов с выходным током основной частоты. Кроме того, они потребляют большую мощность, имеют низкий КПД и небольшой коэффициент усиления. Главное их достоинство — высокая чувствительность: они способны воспринимать управляющие сигналы мощностью всего лишь в 10^{-17} — 10^{-19} Вт (при использовании высококачественных магнитных материалов).

Более простые схемы имеют магнитные модуляторы с выходным током удвоенной частоты со взаимно перпендикулярными обмотками. На рис. 26.3 приведены конструктивная (а) и электрическая (б) схемы такого модулятора. Кольцевой сердечник модулятора состоит из двух одинаковых половинок (одна из них показана на рис. 26.3, в) с кольцевым пазом. Рабочая обмотка w_p изготовлена в виде кольца и уложена в этот паз. Затем обе половинки сердечника соединяются, причем соприкасающиеся поверхности их тщательно шлифуются для уменьшения магнитного сопротивления. Обмотка управления w_y равномерно наматывается по всей длине сердечника.

Рабочая обмотка w_p создает поперечное магнитное поле, замыкающееся в пределах периметра поперечного сечения сердечника. Обмотка управления w_y создает продольное магнитное поле, замыкающееся по окружности сердечника. Пути потоков Φ_p и Φ_y показа-

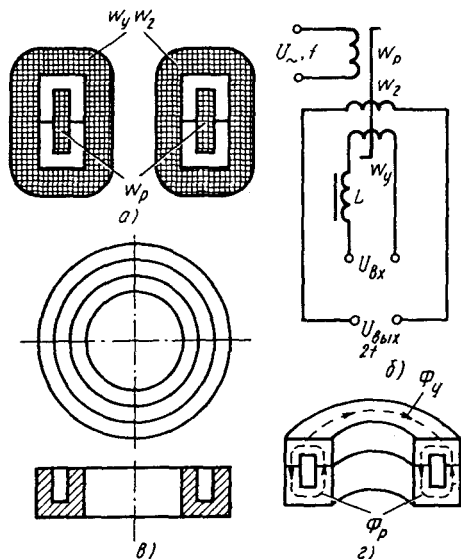


Рис. 26.3. Магнитный модулятор со взаимно перпендикулярными обмотками

ны на рис. 26.3, г пунктиром. Так как эти потоки имеют разные пути, то между обмотками w_p и w_y отсутствует трансформаторная связь. Следовательно, никакие изменения поперечного потока Φ_p не могут наводить ЭДС в обмотке w_y , а ЭДС двойной частоты на выходе возникает лишь при появлении входного сигнала ($U_{вх}$).

Обмотка w_y является одновременно и выходной, с нее снимается напряжение $U_{вых}$.

Периодическое изменение индуктивности обмотки управления w_y создается за счет изменения магнитной проницаемости сердечника в продольном направлении магнитным потоком Φ_y . При насыщении сердечника поперечным полем (магнитный поток Φ_p) эта проницаемость значительно уменьшается. Насыщение сердечника происходит дважды за период питания обмотки w_p . Если на обмотку w_y будет подано постоянное входное напряжение $U_{вх}$, то ток в этой обмотке будет изменяться соответственно изменению насыщения сердечника, т. е. будет содержать переменную составляющую удвоенной частоты питания $2f$.

Такая схема может не иметь фильтров в цепи питания и на выходе, поскольку значительно уменьшаются паразитные наводки. Кроме того, она обеспечивает более высокую стабильность нуля. Нижний предел мощности сигнала управления для такой схемы составляет 10^{-14} Вт при уровне входного сигнала порядка 10 мкВ.

§ 26.4. Магнитные модуляторы с выходным импульсным сигналом

Наряду с магнитными модуляторами, имеющими выходной переменный ток основной или удвоенной частоты, применяются модуляторы с выходным импульсным сигналом. Под импульсом обычно понимается электрический сигнал в виде тока или напряжения, который в течение некоторого промежутка времени остается неизменным по полярности, но изменяется по величине. Затем до поступления очередного импульса ток и напряжение равны нулю. Форма импульса может быть самой разнообразной: прямоугольной, треугольной, трапецеидальной и т. п.

В модуляторах с выходным импульсным сигналом промежуток времени между импульсами значительно превышает их длительность. Амплитуда импульса определяется величиной управляющего сигнала на входе модулятора, полярность импульса — полярностью управляющего сигнала. Питание модулятора с импульсным выходным сигналом осуществляется либо достаточно большим по значению переменным током, либо периодическими импульсами постоянного тока.

В первом случае значения переменного тока выбирают таким, чтобы сердечники усилителя в течение большей части полупериода находились в состоянии насыщения. Тогда индукция в каждом сердечнике будет меняться дважды за период на $2B_s$: один раз — от $-B_s$ до $+B_s$, другой раз — от $+B_s$ до $-B_s$ (напомним, что B_s — индукция насыщения). Эти изменения будут происходить за весьма малый промежуток времени (т. е. будет большая скорость dB/dt), поэтому импульсы ЭДС, индуцируемые в выходной обмотке, достигают большой величины.

Когда сигнал на входе отсутствует, импульсы ЭДС e_1 и e_2 , индуцируемые в выходной обмотке при изменении индукции соответственно в первом и втором сердечниках, равны и противоположны по направлению. Следовательно, результирующая ЭДС в выходной обмотке равна нулю (рис. 26.4, а).

При подаче управляющего сигнала на вход моменты насыщения каждого сердечника в соседние полупериоды изменяются в противоположные направления (рис. 26.4, б). Поэтому на выходе модулятора появляются импульсы, величина которых пропорциональна входному сигналу, а полярность определяется направлением тока управления I_y (рис. 26.4, в, г). Частота импульса будет вдвое превышать частоту питающего переменного тока, поскольку за один период его изменения индукция изменяется дважды.

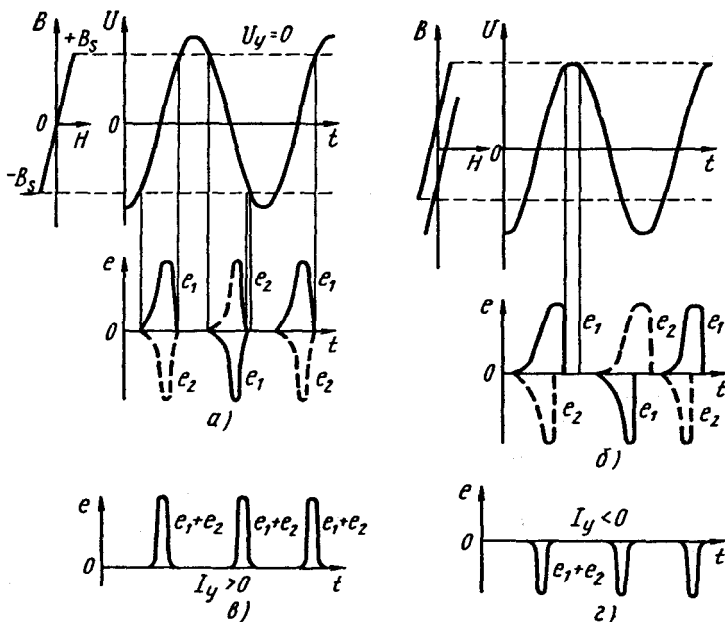


Рис. 26.4. Диаграммы ЭДС магнитного модулятора с импульсным выходом

При питании магнитных модуляторов однополярными импульсами необходимы дополнительные элементы, обеспечивающие исклечение импульсов обратной полярности. Магнитные модуляторы с импульсным выходным сигналом имеют более высокий коэффициент усиления ($k_U = 10^4 \div 10^5$), чем модуляторы с выходным переменным синусоидальным током.

Особенно большое усиление обеспечивается при импульсном питании модулятора, однако при этом ухудшается чувствительность.

§ 26.5. Магнитомодуляционные датчики магнитных величин

В разд. II были рассмотрены электрические датчики неэлектрических величин, используемые в системах автоматики. В этом параграфе даются краткие сведения о датчиках, используемых для измерения внешних магнитных полей. Эти элементы автоматики удобнее изучать не в специальном разделе, посвященном датчикам, а в главе, посвященной магнитным модуляторам, поскольку магнитомодуляционный датчик (называемый также феррозондом) представляет собой, по существу, магнитный модулятор с выходным пере-

менным током удвоенной частоты. Особенность его и отличие от рассмотренных выше магнитных модуляторов в том, что он имеет разомкнутый магнитный сердечник в виде пермаллоевой трубки или пластины.

Применение разомкнутого сердечника позволяет измерять малые напряженности внешнего магнитного поля (до 10^{-4} А/м), даже значительно меньшие, чем напряженность магнитного поля Земли. Магнитомодуляционные датчики широко используются в навигационных приборах, металлоискателях, приборах для геомагнитной разведки, поиска полезных ископаемых, бесконтактных путевых переключателях, магнитных дефектоскопах и других устройствах.

Форма сердечников для магнитомодуляционных датчиков определяется назначением этих датчиков. Прямые (стержневые) сердечники применяются в датчиках, измеряющих практически равномерные поля. Простейшая схема такого датчика показана на рис. 26.5. Напряжение питания с частотой f подается на обмотки возбуждения w_b , намотанные порознь на двух параллельных стержнях и включенные встречно. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается с выходной обмотки $w_{\text{вых}}$, охватывающей оба стержня. Постоянное подмагничивание стержней определяется напряженностью внешнего магнитного поля H_y . Выходное напряжение изменяется с частотой $2f$, а его амплитуда пропорциональна H_y .

Для измерения неоднородного магнитного поля используется сердечник с малым воздушным зазором δ (рис. 26.6), куда проникает измеряемое поле. Две половины обмотки возбуждения w_b включены встречно. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое с обмотки $w_{\text{вых}}$, имеет двойную частоту.

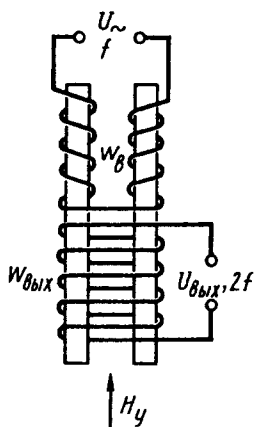


Рис. 26.5. Стержневой магнитомодуляционный датчик

Расчет магнитомодуляционного датчика проводится аналогично расчету магнитного модулятора. Если в магнитном модуляторе напряженность подмагничивающего поля определяется током в обмотке управления ($H_y = I_y w_y / l$), то в магнитомодуляционном датчике эта же величина определяется внешним магнитным полем с напряженностью H_y .

Магнитомодуляционный датчик в принципе можно использовать как магнитный модулятор, если размес-

тить на сердечнике обмотку управления w_y . Однако коэффициент усиления при этом значительно снижается из-за того, что магнитная цепь разомкнута.

Все же иногда разомкнутые сердечники применяют и для модуляторов, например когда требуется преобразовать слабый сигнал от источника тока с большим внутренним сопротивлением. В этом случае нужна обмотка управления с очень большим числом витков, а ее значительно проще изготовить именно на разомкнутом сердечнике.

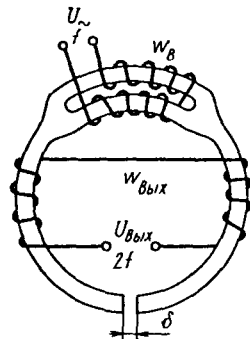


Рис. 26.6. Магнитомодуляционный датчик с малым зазором

§ 26.6. Назначение и принцип действия бесконтактных магнитных реле

Бесконтактные магнитные реле предназначены для включения различных устройств при подаче управляющего сигнала. Таким образом, они нужны для тех же целей, что и обычные электромагнитные реле. Но если включение нагрузки с помощью электромагнитных реле происходит за счет замыкания электрических контактов, то в бесконтактных реле включение нагрузки происходит за счет значительного и очень быстрого изменения сопротивления. Следовательно, включение и отключение происходят без разрыва цепи и соответственно без связанных с таким разрывом последствий: искрения, дугообразования, окисления и износа контактов.

Основным достоинством бесконтактных реле является высокая надежность, которая обусловлена именно отсутствием контактов и подвижных частей. Кроме того, надо отметить и другие преимущества бесконтактных реле перед контактными: возможность эксплуатации во взрывоопасных и запыленных помещениях, в условиях повышенной влажности и химически агрессивных паров; стабильность параметров срабатывания и отпускания при наличии вибрации, ударных нагрузок, невесомости, при изменении пространственного положения; простота эксплуатации, высокая чувствительность.

Принцип действия бесконтактного магнитного реле основан на использовании в магнитном усилителе положительной обратной связи с $K_{oc} > 1$. В § 23.6 было рассмотрено построение характери-

ки магнитного усилителя с положительной обратной связью. Из этого построения видно, что с увеличением коэффициента обратной связи характеристика становится все более несимметричной и ее правая ветвь возрастает все круче и круче. Теоретически уже при $K_{oc} = 1$ возникает скачкообразное увеличение тока в нагрузке, т. е. релейный режим. Практически вследствие потерь энергии в сердечнике и отклонения его характеристики намагничивания от идеальной релейный режим наступает при $K_{oc} = 1,05 \div 1,3$.

Для получения больших значений K_{oc} в схемах с внутренней обратной связью вводится дополнительно и специальная обмотка обратной связи. Схемы с внешней и внутренней обратной связью называются схемами со смешанной обратной связью. Они наиболее рациональны в конструктивном отношении, поскольку позволяют снизить число витков обмотки обратной связи, а следовательно, уменьшить габариты и упростить изготовление бесконтактного магнитного реле.

Надо отметить, что бесконтактные реле строятся не только на базе магнитного усилителя с положительной обратной связью. Они могут быть созданы и на базе полупроводниковых элементов, в первую очередь транзисторов и тиристоров.

§ 26.7. Характеристики и схемы бесконтактных магнитных реле

Выполним графическое построение характеристики бесконтактного магнитного реле с помощью метода, рассмотренного в § 23.6.

Прежде всего строим характеристику магнитного усилителя без обратной связи, откладывая по оси абсцисс напряженность управляющего поля H_y (и соответствующее ей значение тока управления I_y) и по оси ординат напряженность H_{cp} (и соответствующее ей значение тока нагрузки I_n). Для идеального магнитного усилителя $H_{cp} = H_y$, поэтому линейный участок характеристики I на рис. 26.7 имеет угол наклона к оси ординат 45° . На этом же графике строим характеристику обратной связи, представляющую собой прямую 2, проведенную по отношению к оси ординат под углом $\alpha = \arctg K_{oc}$.

Так как мы проводим построение для случая $K_{oc} > 1$, то $\alpha > 45^\circ$ и прямая 2 проходит ниже линейного участка характеристики I . Пересечение характеристики I и прямой 2 дает значение тока нагрузки при $I_y = 0$. Затем проводим несколько прямых, параллельных прямой 1 из различных точек, соответствующих новым значениям $I_y < 0$. Обратите внимание, что при этом пересечение происходит не

в одной, а в двух и даже трех точках. Теоретически характеристика $I_n = f(I_y)$ имеет S-образную форму. Часть этой характеристики (участок $бв$ на рис. 26.7) показана пунктиром. Работа усилителя на этом участке невозможна, поскольку электрическая цепь находится в неустойчивом режиме. Реальная характеристика $I_n = f(I_y)$ показана сплошной линией. При постепенном изменении управляющего сигнала (начиная с больших отрицательных значений $-I_y$) в сторону увеличения (абсолютное значение тока при этом уменьшается) ток в нагрузке сначала плавно изменяется до точки $в$. Дальнейшее изменение тока I_y в этом же направлении приводит к скачкообразному изменению тока: переход из точки $в$ в точку $а$. Затем снова происходит плавное незначительное изменение тока нагрузки: участок характеристики правее точки $а$.

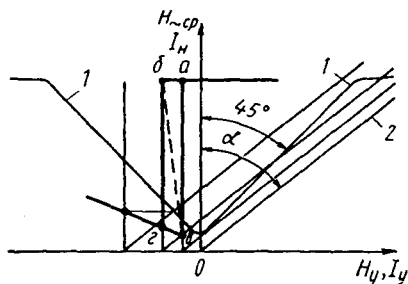


Рис. 26.7. Релейная характеристика магнитного усилителя при $K_{ос} > 1$

При изменении управляющего тока в противоположном направлении (от положительных значений I_y до отрицательных) ток нагрузки сначала плавно изменяется до точки $б$, в которой происходит скачок к минимальному значению в точке $г$. В результате характеристика получает вид, как у поляризованного реле с размыкающим контактом. Максимальное значение тока I_n соответствует замыканию контакта, а минимальное значение тока нагрузки — размыканию контакта. В обычном контактном реле это минимальное значение тока нагрузки естественно равно нулю.

Схемы бесконтактных магнитных реле со смещением показаны на рис. 26.8, $а, б$. В схеме по рис. 26.8, $а$ обмотка смещения питается от самостоятельного источника питания. На практике благодаря смещению можно получить разный вид характеристик бесконтактного реле (рис. 26.8, $в$).

Если сместить характеристику вправо таким образом, чтобы ось ординат проходила посередине петли гистерезиса этой характеристики (рис. 26.8, $в$), то бесконтактное магнитное реле может выполнять роль триггера, т. е. запоминающего устройства. При $I_y = 0$ реле имеет два устойчивых состояния (точки $а$ и $б$ на рис. 26.8, $в$). Реле будет находиться в том состоянии, в котором оно находилось до снятия управляющего сигнала I_y . Если раньше ток управления был отрицательным, то состояние реле определяется точкой $а$ (минимальный ток нагрузки). Если раньше ток управления был положительным, то

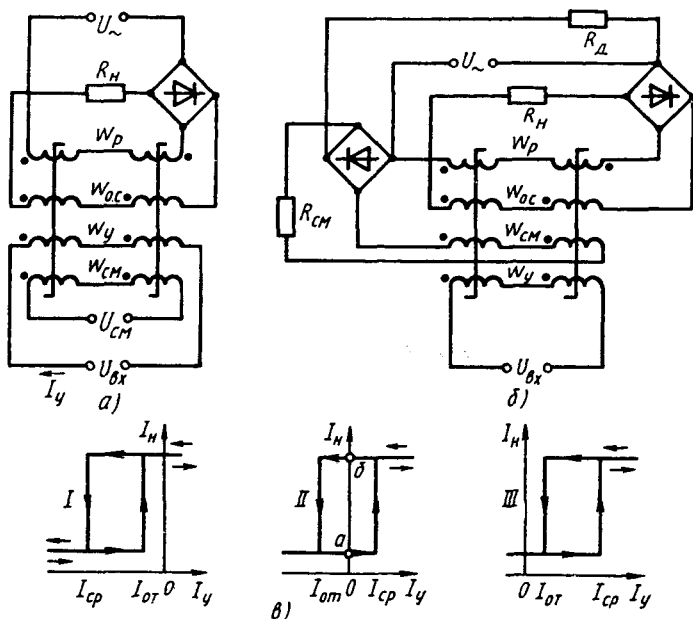


Рис. 26.8. Схемы и характеристики бесконтактных магнитных реле

состояние реле определяется точкой б (максимальный ток нагрузки). Значит, такое реле «запоминает» свое предыдущее состояние.

Правда, если временно будет отключено напряжение питания, то после его повторного включения состояние реле будет неопределенным (а или б). Оно обусловлено случайными причинами: неидентичностью сердечников и обмоток.

В схеме по рис. 26.8, б обмотка смещения питается выпрямленным током от того же источника, что и рабочая обмотка. Этим обеспечивается стабилизация тока срабатывания при колебаниях напряжения питания.

Для основных параметров бесконтактного магнитного реле приняты те же термины, что и для обычных контактных реле. Ток управления, при котором ток нагрузки изменяется скачком от минимального до максимального значения, называют током срабатывания. Соответственно ток управления, при котором ток нагрузки скачком уменьшается, называют током отпускания.

Недостатками бесконтактных магнитных реле являются следующие их отличия от обычных реле: переключение происходит лишь в одной цепи (заменяется как бы только одна пара контактов), минимальный ток отличен от нуля.

§ 26.8. Основы расчета и конструирования бесконтактных магнитных реле

Расчет бесконтактного магнитного реле проводят в той же последовательности, что и для обычного магнитного усилителя.

Исходными данными для расчета являются сопротивление нагрузки R_n , токи нагрузки (максимальный $I_{n \max}$ и минимальный $I_{n \min}$), частота источника питания f , токи обмотки управления (ток срабатывания $I_{ср}$ и ток отпускания $I_{от}$), требуемое быстродействие (время отпускания $t_{от}$ и время срабатывания $t_{ср}$).

Обычно целью расчета является определение размеров магнитопровода и обмоточных данных.

Размеры магнитопровода определяются величиной максимальной мощности в нагрузке $P_{n \max} = I_{n \max}^2 R_n$ и выбранным материалом сердечника:

$$Q_o Q_c = \frac{P_{n \max} 10^6}{2,22 f k_m k_c j B_{\max}}, \quad (26.1)$$

где Q_o — площадь окна катушки; Q_c — площадь сечения магнитопровода; k_m — коэффициент заполнения окна катушки медным проводом; k_c — коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью; B_{\max} — магнитная индукция; j — допустимая плотность тока в обмотке.

Для уменьшения размеров магнитопровода следует применять материалы с высокой индукцией насыщения (пермаллой), увеличивать плотность тока j в обмотке за счет улучшения теплоотдачи обмотки и применения теплоустойкой изоляции.

Размеры магнитопровода, полученные (по 26.3), уточняются по справочнику, где приведены стандартные размеры.

Сначала выполняется построение статической характеристики без обратной связи. Затем по методу, изложенному в § 26.7, строят статическую характеристику усилителя с обратной связью и подбирают необходимое значение коэффициента обратной связи K_{oc} .

Следует отметить, что ширина петли характеристики (см. рис. 26.8, в) магнитного реле уменьшается, а ток холостого хода увеличивается при больших значениях B_{\max} . Обычно эту величину выбирают на колене кривой намагничивания (выше линейного участка).

Высокая стабильность — одно из главных требований, предъявляемых к магнитному реле. Установлено, что ток срабатывания более стабилен, чем ток отпускания. Объясняется это тем, что ток от-

пускания зависит от максимального тока нагрузки, который, в свою очередь, зависит от колебаний напряжения питания и сопротивления нагрузки. Поэтому целесообразно применять бесконтактные магнитные реле, работающие на «замыкание».

Для получения достаточной стабильности желательно иметь индуктивное сопротивление рабочих обмоток во много раз большим активного сопротивления нагрузки, что снизит влияние колебаний активного сопротивления на характеристики реле. Для стабилизации тока срабатывания целесообразно применение схемы с автоматическим смещением (см. рис. 26.8, б).

При конструировании бесконтактных магнитных реле используются те же материалы и сердечники, что и для магнитных усилителей. Однако следует иметь в виду, что пермаллой очень чувствительны к механическим нагрузкам, даже к таким сравнительно малым, которые создаются обмотками. Поэтому кольцевые магнитопроводы заключают в защитные каркасы, поверх которых и размещаются обмотки. Все реле также закрывают коробкой и иногда заливают изоляционными компаундами, что кроме защиты от механических воздействий обеспечивает и повышение надежности.

Контрольные вопросы

1. Зачем нужны магнитные модуляторы?
2. Что измеряют магнитомодуляционные датчики?
3. Принцип действия магнитного реле.

Раздел V

ЦИФРОВЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Глава 27

ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

§ 27.1. Достоинства дискретных систем

Наряду с непрерывными системами автоматического управления все большее распространение получают дискретные системы, в которых при непрерывном изменении входной величины, хотя бы в одном звене выходная величина изменяется не непрерывно, а дискретно. Процесс преобразования непрерывной величины в дискретную (прерывистую, изменяющуюся скачком) называется квантованием. В зависимости от способа квантования дискретные системы подразделяются на импульсные, релейные и цифровые. В импульсных системах квантование происходит по времени, т. е. через равные промежутки времени фиксируется значение непрерывной величины и передается в виде импульса. В релейных системах квантование осуществляется по уровню, т. е. при достижении входным непрерывным сигналом определенного уровня выходной сигнал дискретно (скачком) изменяется и остается неизменным до тех пор, пока входной сигнал не достигнет другого определенного уровня. В цифровых системах происходит одновременно квантование по времени и по уровню.

Импульсные системы могут рассматриваться как совокупность импульсного элемента и непрерывной части, объединяющей все элементы непрерывного действия. Процесс квантования во времени, осуществляемый импульсным элементом, поясняется на рис. 27.1.

В строго определенные моменты времени выходной сигнал (сплошная линия на рис. 27.1, *а*) передается в виде импульса. Для простоты будем рассматривать только прямоугольные импульсы (рис. 27.1, *б*). Чередуются они с периодом T . Следовательно, сигнал

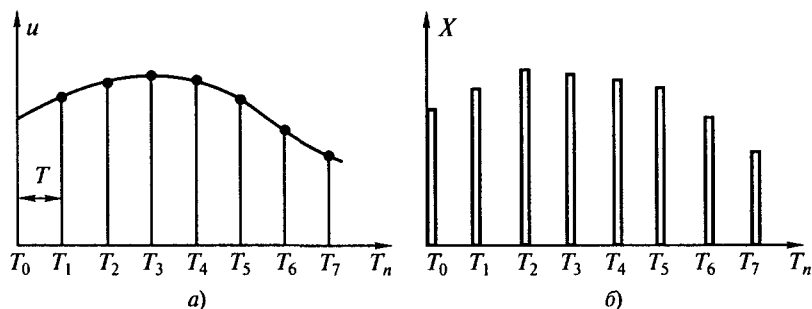


Рис. 27.1. Квантование во времени непрерывного сигнала

имеется только в моменты времени $0, T, 2T, 3T, \dots, nT$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Поэтому зависимость импульсного сигнала от времени можно обозначить $x[nT]$. Такая дискретная передача сигнала имеет ряд преимуществ перед непрерывной передачей, что и объясняет распространение дискретных систем. Улучшается процесс измерения регулируемой величины, поскольку объект нагружается измерительным элементом только в краткие промежутки времени. На рис. 27.2 показан импульсный измерительный элемент, состоящий из потенциометра 1 с движком 2.

Перемещение движка 2 определяется давлением в сильфоне 3, соединенном тягой с этим движком. Падающая дужка 4 подвешена на пружине 5 и под действием эксцентрика (кулачка) 6, вращающегося с постоянной скоростью, периодически прижимает движок 2 к потенциометру 1. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ представляет собой последовательность прямоугольных импульсов постоянной длительности. Амплитуда каждого импульса пропорциональна отклонению

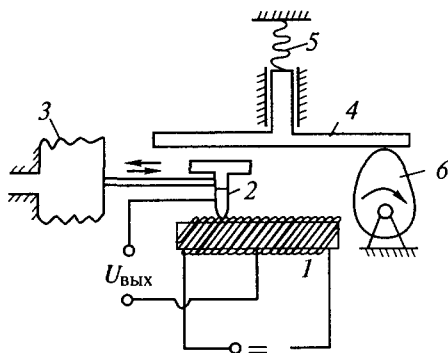


Рис. 27.2. Импульсный датчик давления

движка от средней точки обмотки потенциометра. Для надежной работы потенциометрического датчика требуется хороший контакт между движком и обмоткой, что обеспечивается при достаточном усилии нажатия. Однако при большом усилии нажатия сильфону будет не под силу перемещать движок, т. е. чувствительность измерительного элемента снижается. Желательно иметь и высокую чувствительность и высокую надежность. Импульсный датчик позволяет удовлетворить обоим требованиям: перемещение движка сильфоном происходит при отсутствии трения между движком и обмоткой, а достаточное усилие прижатия движка к обмотке при сьеме выходного напряжения обеспечивается с помощью пружины 5.

При импульсном сигнале повышается пропускная способность линии передачи сигнала, поскольку в промежутках между импульсами одного источника информации можно передавать импульсы другого источника. Импульсные устройства имеют меньшие габариты и вес по сравнению с непрерывными, поскольку в среднем потребляют меньшую мощность.

В качестве импульсного элемента чаще всего используются так называемые «электронные ключи», они и обеспечивают электронную коммутацию в дискретных системах.

§ 27.2. Электронные коммутаторы

Рассмотренные в главе 15 коммутационные элементы выполняют переключение электрических цепей при непосредственном механическом воздействии для ручного управления и под воздействием электромагнитных сил при автоматическом управлении. Электромагнитные коммутаторы имеют невысокое быстродействие — в лучшем случае порядка нескольких микросекунд. Значительное повышение быстродействия обеспечивается применением электронных коммутационных элементов, построенных на полупроводниковых приборах. Такие электронные коммутаторы называются транзисторными и диодными ключами. В системах автоматики с управлением от ЭВМ, использующих элементы импульсной и цифровой техники, переключения выполняют именно электронные коммутаторы. Наибольшее распространение получили электронные устройства, в которых в качестве коммутирующего элемента используются транзисторы. В отличие от диодных ключей, у которых вход и выход имеют непосредственную связь, транзисторные ключи позволяют отделить входную (управляющую) цепь от выходной (управляемой) цепи, что зачастую бывает необходимо.

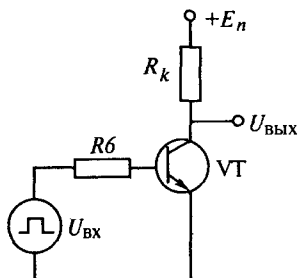


Рис. 27.3. Транзисторный ключ

Схема наиболее простого транзисторного ключа показана на рис. 27.3. Так же как и механический ключ (тумблер или выключатель), транзисторный ключ может находиться в одном из двух состояний: разомкнутым, когда транзистор закрыт («выключено»), и замкнутым, когда транзистор открыт («включено»). Изменение состояния ключа происходит под влиянием входного управляющего напряжения $U_{вх}$, при этом закрытому состоянию транзистора соответствует низкий

положительный уровень входного сигнала, а открытому состоянию — высокий положительный уровень входного сигнала. Нагрузка к транзисторному ключу может подключаться двумя способами — параллельно $R_к$ и параллельно транзистору. Простейшая схема транзисторного ключа имеет два основных недостатка: большая задержка выключения при работе на емкостную нагрузку и сильная зависимость выходного напряжения от величины сопротивления нагрузки. С целью устранения этих недостатков используют более сложные устройства — составные ключи. Для повышения быстродействия используется ключ с ускоряющей емкостью (конденсатор подключается параллельно резистору в управляющей цепи), ключ с отрицательной обратной связью и другие схемы ключей. Работа транзистора в ключевых схемах изучается в курсе электронной техники.

В системах автоматики достаточно часто возникает задача последовательного опроса нескольких датчиков; или поочередного подключения нескольких источников информации к общему управляющему устройству. Такие задачи можно решать, например, с помощью шаговых искателей и распределителей (см. § 19.7). Однако как и другие контактные электромеханические устройства, они имеют низкую надежность и действуют медленно. Поэтому в современной технике предпочтительнее применение электронных устройств. Для адресного подключения одной из нескольких входных линий к одной выходной линии служит мультиплексор (см. § 27.6). Обратная задача — переключение одной входной линии на несколько выходных — решается с помощью демультиплексора. По существу мультиплексор и демультиплексор являются электронными коммутаторами. Их работа основана на выполнении некоторых логических операций, поэтому они будут рассматриваться после ознакомления с логическими элементами.

§ 27.3. Элементы цифровой техники

Системы с цифровым сигналом обладают теми же достоинствами, что и импульсные системы, а кроме того, лучше защищены от помех, поскольку определенный достигнутый уровень передается с помощью двоичных сигналов, которые очень четко отличаются друг от друга. Эти сигналы условно называются 1 (единица, или логическая единица) и 0 (ноль, или логический ноль). При этом «1» и «0» — это символы, а не значения сигналов в каких-нибудь единицах измерения. Например, за «1» можно принять напряжения более 5 вольт. Следовательно и 6, и 7, и 8 В будут восприниматься как «1». Пусть нам надо передать по проводам сигнал «1». Подаем на входные зажимы цепи 8 В. Если длина линии велика и сопротивление проводов большое, то при передаче произойдет падение напряжения в проводах и на выходе окажется только 7 В. Но и этот сигнал в цифровой системе воспринимается как «1». Следовательно, искажение информации при передаче не произошло. Если бы передавался аналоговый сигнал, то ошибка при передаче составила бы 1 В, т. е. 12,5 %. Каждый уровень в цифровой системе передается двоичным числом (комбинацией из «0» и «1»), состоящим из нескольких разрядов. Чем больше уровней, тем больше разрядов должно быть в числе. Двоичным числом, состоящим из n разрядов, можно передать 2^n уровней. Например в цифровой передаче телефонного разговора используется квантование на 256 уровней и каждый отсчет передается восьмиразрядным двоичным числом ($2^8 = 256$). Из комбинации «0» и «1» можно составлять условные обозначения (коды), добавлять вспомогательные разряды, позволяющие обнаружить и даже устранить случайную ошибку при передаче. Поэтому в общем случае цифровой сигнал называют кодовой информацией или кодовым словом. Для обработки и преобразования кодовой информации (последовательности символов «0» и «1») выполняются логические операции. Эти операции осуществляются в логических элементах.

Основные логические элементы

Логический элемент — это устройство, реализующее одну из логических операций. Логические элементы, используемые в системах автоматики, основаны на использовании самых различных физических явлений и свойств. Наиболее часто применяются электронные устройства, выполняемые как интегральные микросхемы. Промышленность выпускает серии интегральных схем, выполняющих самые разнообразные логические операции. Например, широко применяемые серии К155, К555, К1533 и др. включают в себя более 150 мик-

росхем, в том числе около 50 схем логических элементов различного функционального назначения. Любую логическую функцию можно выполнить с помощью логических операций И, ИЛИ, НЕ. Эти операции называют элементарными, а устройства для их реализации называются элементарными логическими элементами. На рис. 27. 4 показаны условные обозначения логических элементов НЕ (а), И (б), ИЛИ (в).

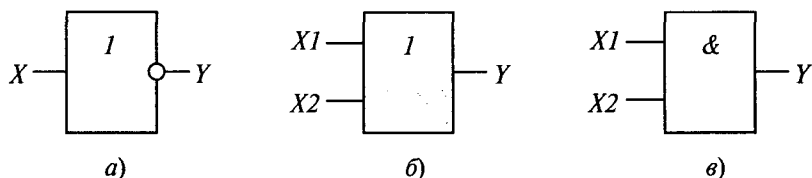


Рис. 27.4. Логические элементы

Все логические элементы обозначаются в виде прямоугольников с линиями, по которым подводятся входные и выходные сигналы. Обычно слева располагаются линии входных сигналов, а справа — выходных. В прямоугольнике изображается знак логической операции: & — И, 1 — ИЛИ. Если выход обозначен окружностью, то элемент производит логическое отрицание результата операции, указанной внутри прямоугольника. Логическое отрицание называют инверсией, а выход, обозначенный окружностью, называют инверсным выходом. На рис. 27.4 входные сигналы обозначены буквой X , а выходные — Y . Работу каждого элемента поясняет таблица 27.1, на которой показано соответствие выходных сигналов при любой возможной комбинации входных сигналов. Такая таблица называется таблицей истинности или таблицей переключений. Показанные на рис. 27.4 элементы И и ИЛИ имеют по два входа, но они выпускаются и с большим числом входов.

Таблица 27.1

НЕ	
X	Y
0	1
1	0

ИЛИ		
X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

И		
X1	X2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Входные и выходные сигналы могут принимать одно из двух значений: «логическая 1» и «логический 0». При конкретной практической реализации эти сигналы представляются различными физическими величинами (например, электрическое напряжение или потенциал). Знание абсолютной величины сигнала при этом не требуется, достаточно различать более положительную и менее положительную величину. При этом сигнал может иметь и отрицательную полярность. На рис. 27.5 эти два значения обозначены латинскими буквами H (от английского high — высокий) и L (от английского low — низкий). Эти два значения называют логическими уровнями.

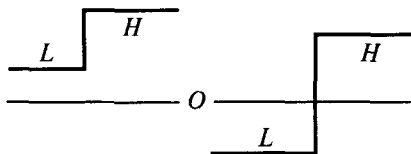


Рис. 27.5. Логические уровни сигналов

Один из этих уровней принимается за «1», другой — за «0» (в зависимости от договоренности, соглашения). Различают соглашение положительной логики (при котором логический уровень H принимают за «1», а логический уровень L — за «0») и соглашение отрицательной логики (при котором логический уровень H принимают за «0», а логический уровень L — за «1»). Обычно принимают единое соглашение для всей схемы или используют указатели полярности сигналов. Следует отметить, что логические элементы И и ИЛИ обладают свойством двойственности — один и тот же элемент в зависимости от принятого соглашения может выполнять функции либо элемента И, либо ИЛИ. Как уже отмечалось, любая сложная логическая функция может быть выполнена с помощью элементарных логических операций И, ИЛИ, НЕ. Но есть возможность выполнить любую сложную логическую функцию и с помощью некоторого количества совершенно однотипных элементов, выполняющих только одну операцию. Например, есть серии микросхем, построенных на основе составной логической схемы И-НЕ, а есть серии, построенные на основе составной логической схемы ИЛИ-НЕ. Условные обозначения логических элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ показаны на рис. 27.6. Использование единого базового элемента для всей серии позволяет использовать единую технологию для всей серии микросхем, увеличить объем выпуска и соответственно снизить стоимость каждого элемента.

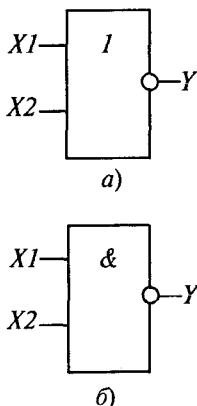


Рис. 27.6. Базовые логические элементы

Таблица 27.2

ИЛИ-НЕ		
X1	X2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

И-НЕ		
X1	X2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

В табл. 27.2 приведены соотношения между комбинациями входных сигналов и выходным сигналом для базовых логических элементов (т. е. таблицы истинности).

По виду входных и выходных сигналов логические элементы делятся на потенциальные и импульсные. В потенциальных элементах сигналы «1» и «0» представляются двумя уровнями (см. рис. 27.5), а в импульсных — наличием или отсутствием импульсов (или импульсами разной полярности). Наибольшее распространение получили потенциальные элементы.

Полученную в результате логических операций информацию в виде двоичных кодовых слов необходимо запоминать и хранить. Для этой цели служат устройства памяти (триггеры и регистры).

§ 27.4. Элементы памяти для цифровых систем

Устройства памяти

Основным устройством, которое способно запомнить цифровую информацию, является триггер. Триггер — это устройство, которое имеет два устойчивых состояния, одно из которых принимается за «1», а другое — за «0».

Электромагнитное реле тоже можно рассматривать как триггер, поскольку реле имеет два состояния — включено и выключено. В цифровых схемах для автоматики наибольшее распространение получили полупроводниковые триггеры, выпускаемые в виде интегральных микросхем. Такие триггеры, как правило, являются двухкаскадными усилителями постоянного тока с положительной обратной связью (выход усилителя соединен с его входом).

На рис. 27.7 показана схема простейшего статического триггера. Из двух транзисторов один обязательно открыт, а другой закрыт.

Если закрыт VT1, то положительный потенциал с его коллектора подается на базу VT2, и наоборот. Соединение коллектора одного транзистора с базой другого и обеспечивает положительную обратную связь. Несмотря на полную симметрию схемы, такое ее состояние, когда оба транзистора открыты, является неустойчивым и практически невозможным. Даже незначительное случайное увеличение коллекторного тока одного транзистора приведет к уменьшению положительного потенциала на его коллекторе и соответственно на базе другого транзистора. Это приводит к уменьшению коллекторного тока другого транзистора, увеличению потенциала на его коллекторе и соответственно на базе первого транзистора. В итоге первый транзистор еще больше открывается, а второй — еще больше закрывается. Этот процесс протекает очень быстро, лавинообразно и заканчивается тогда, когда первый транзистор полностью откроется (режим насыщения), а второй транзистор полностью закроется, поскольку на его базу будет подан практически нулевой потенциал. Перевод триггера из одного устойчивого состояния в другое осуществляется подачей положительных или отрицательных импульсов на коллекторы одного или другого транзистора. При этом один из входов принимают устанавливающим триггер в состояние «1» и называют вход *S* (от английского *set* — установить), а другой, устанавливающий (сбрасывающий) триггер в состояние «0», называют входом *R* (от английского *reset* — сбросить). Такой триггер называют RS-триггером.

Условное обозначение RS-триггера показано на рис. 27.8. В сериях микросхем RS-триггеры обычно построены на двух базовых логических элементах, тех, на которых основана вся серия (ИЛИ-НЕ либо И-НЕ). Такие триггеры показаны на рис. 27.9, а, б.

Поясним работу RS-триггера на базе элементов ИЛИ-НЕ (рис. 27.9, а) с помощью диаграммы (рис. 27.9, б). При поступлении сигнала «1» на вход *S* триггер переключится в состояние «1», если он был в состоянии «0», или сохраняет «1» на выходе *Q*, если он уже находился в этом состоянии. Соответственно при поступлении «1» на вход *R* триггер переключится в

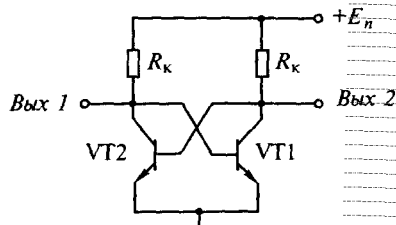


Рис. 27.7. Статический триггер

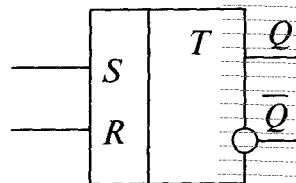


Рис. 27.8. Условное обозначение триггера

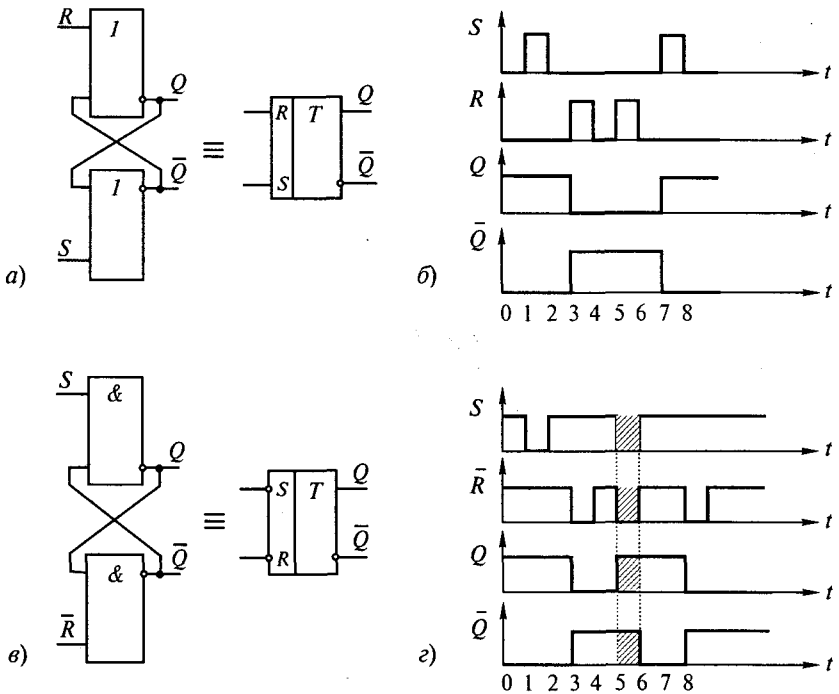


Рис. 27.9. RS-триггеры

«0» или сохранит это состояние. Исходное состояние триггера (сразу после включения и при отсутствии сигналов «1» на входах S и R) не определено, оно является случайной величиной. В отличие от схемы a в схеме b используется отрицательная логика, т. е. «1» имеет менее положительный потенциал, чем «0».

По способу записи информации различают асинхронные и синхронные триггеры. Состояние (выходной сигнал) асинхронного триггера может измениться в любой момент — тогда, когда придет входной сигнал. В синхронном триггере состояние может меняться только в определенные моменты времени — тогда, когда поступает дополнительный синхронизирующий сигнал. RS-триггер является асинхронным. На его базе может быть построен синхронный D-триггер, показанный на рис. 27.10.

Сигналы, предназначенные для записи в триггер, поступают на информационный вход D . Сигналы, определяющие момент записи, поступают на вход C . Изменение состояния статического D-триггера возможно только в течение того времени, когда $C = 1$. Если же на

вход C поступает сигнал «0», то изменение сигнала на выходе триггера не происходит, он сохраняет предыдущее состояние. На диаграмме (рис. 27.10, в) видно, что по окончании первого синхроимпульса на информационный вход D поступал уже сигнал «0», а не «1». Однако состояние триггера, соответствующее этому сигналу, возникло только тогда, когда пришел второй синхроимпульс. Аналогичным образом состояние «1» на выходе Q сохранялось от третьего до пятого синхроимпульса, хотя сигнал «1» на входе D сменился сигналом «0» еще раньше, чем пришел синхроимпульс 5. Поскольку такой триггер задерживает выходной сигнал до прихода очередного синхроимпульса, он и получил свое название D-триггер (от английского *delay* — задержка).

В динамическом синхронном D-триггере информация записывается только в момент перепада напряжения на входе C , т. е. передним фронтом синхроимпульса.

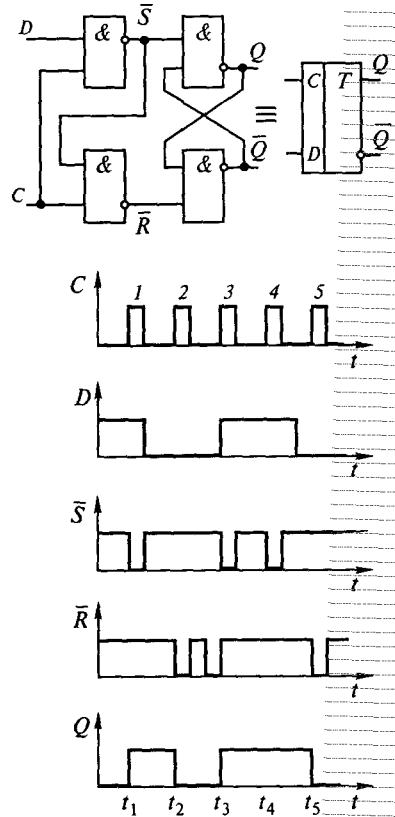


Рис. 27.10. Синхронный D-триггер

§ 27.5. Счетчики импульсов

На базе динамического D-триггера может быть построен счетный T-триггер, условное обозначение которого показано на рис. 27.11, а. Он имеет один вход и два выхода. Сигналы на выходах меняются на противоположные при каждом положительном перепаде напряжения на счетном входе T . Счетный триггер может быть создан на базе динамического D-триггера, если его инверсный выход соединить с информационным входом, как показано на рис. 27.11, б. Рассмотрим его работу с помощью диаграммы на рис. 27.11, в.

Пусть в начальный момент времени на прямом выходе был сигнал «0», тогда на инверсном выходе и, следовательно, на входе D бу-

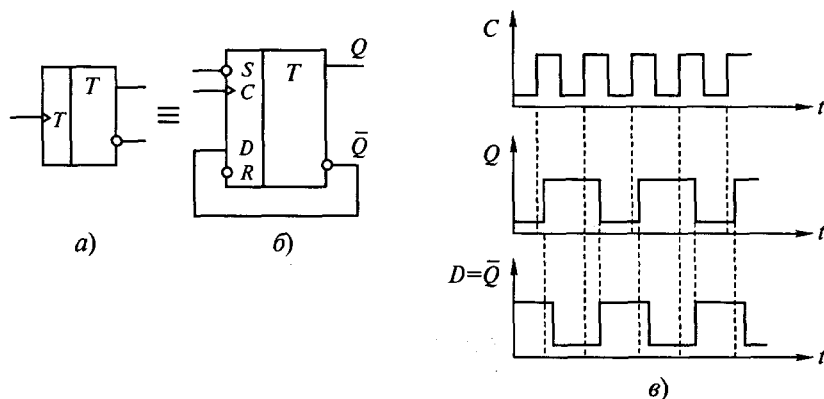


Рис. 27.11. Счетный триггер

дет сигнал «1». По фронту первого синхроимпульса «1» с входа переписывается на прямой выход, а на инверсном выходе появится «0». По фронту второго синхроимпульса этот сигнал «0» переписывается на прямой выход и будет там сохраняться до прихода третьего синхроимпульса и так далее. Обратите внимание на то, что частота сигналов на выходе вдвое меньше входной частоты синхроимпульсов. Поэтому счетный триггер называют делителем частоты.

Для хранения информации о многоразрядном кодовом слове используется несколько триггеров, по одному на каждый разряд. В этом случае такую группу триггеров называют регистром.

Для подсчета импульсов применяют регистры, состоящие из T-триггеров. На рис. 27.12 показан простой трехразрядный двоичный счетчик импульсов, состоящий из трех T-триггеров, имеющих входы R для установки в «0». На рис. 27.13 показаны временные диаграммы сигналов, а табл. 27.3 иллюстрирует состояние триггеров. В исходном состоянии все триггеры были в состоянии «0», после первого входного импульса триггер T1 перейдет в состояние «1», после второго входного импульса T2 перейдет в состояние «1», а T1 — в состояние «0» и т. д.

Из табл. 27.3 видно, что по состоянию триггеров можно определить сколько импульсов поступило на вход к данному моменту времени. После восьмого входного импульса все три триггера переходят в состояние «0» и счет повторяется. В общем случае емкость счетчика (или равный ей коэффициент пересчета) равен 2^n , где n — число триггеров в счетчике. С помощью обратных связей можно получить коэффициент пересчета меньше этой величины.

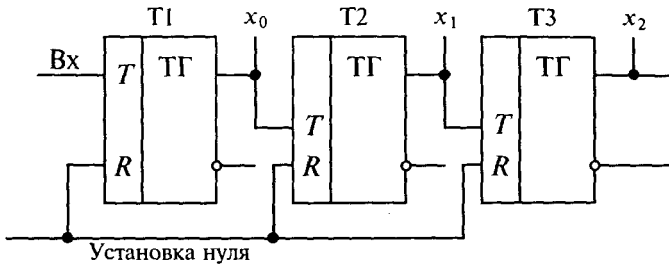


Рис. 27.12. Трехразрядный двоичный счетчик

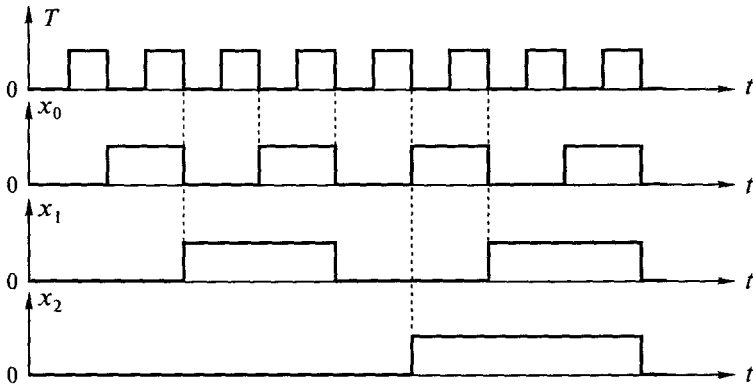


Рис. 27.13. Диаграммы сигналов в счетчике импульсов

Таблица 27.3

Количество входных импульсов	Состояние триггеров		
	T3	T2	T1
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8	0	0	0

§ 27.6. Мультиплексор и демультиплексор

На рис. 27.14 показан мультиплексор, уже упомянутый в § 27.2. В системах автоматического управления он используется для коммутации (подсоединения) выходных сигналов от нескольких источников (например, однотипных датчиков) к одному приемному устройству (например, показывающему прибору). Это подсоединение производится последовательно (в так называемых системах обтекающего контроля) или адресно — по выбору оператора.

Показанный на рис. 27.14 мультиплексор позволяет подключать к выходу Y один из четырех информационных входов $D0, D1, D2, D3$. Выбор информационного входа осуществляется подачей на два адресных входа $A1$ и $A2$ соответствующего кода: 00, 01, 10, 11. Например, при подаче на информационные входы сигнала «10» (т. е. 2 в десятичной системе счисления) появится «1» на выходе 2 дешифратора DC . Эта «1» по входу 7 поступает на двухвходовый логический элемент «И», на другой вход которого поступает информационный сигнал по $D2$. Значит, именно этот второй информационный вход будет подключен к выходу Y мультиплексора. С помощью мультиплексора может быть организована передача сигналов по одному и тому же каналу (выходу Y) от нескольких источников информации. Но, естественно, это происходит не одновременно: при подаче на адресные входы $A1$ и $A2$ кода 00 передается информация от входа $D0$, при подаче кода 01 — от входа $D1$ и т. д. Следовательно, можно сказать, что выход Y — это канал с временным (ударение на последнем слове) разделением каналов. Это особенно важно тогда, когда один и тот же физический канал связи используется для передачи большого количества разных сигна-

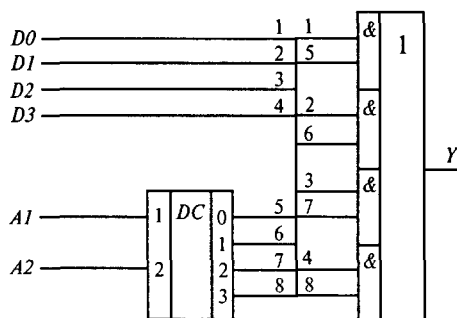


Рис. 27.14. Мультиплексор на 4 информационных входа

лов: например при обмене информацией в сети Интернет, или при автоматическом управлении космическими аппаратами.

После получения информации по такому единственному каналу связи информацию необходимо разделить между соответствующими приемниками. Эту задачу решает демультиплексор. Выбор соответствующего информационного выхода

осуществляется с помощью адресного входа. Схема демультиплектора показана на рис. 27.15.

Здесь так же, как и в схеме мультиплектора, используется дешифратор *DC*. При подаче на адресные входы *A1* и *A2* сигнала 10 на выходе 2 появится «1» и входной сигнал *Y* будет проходить на информационный выход *D2*.

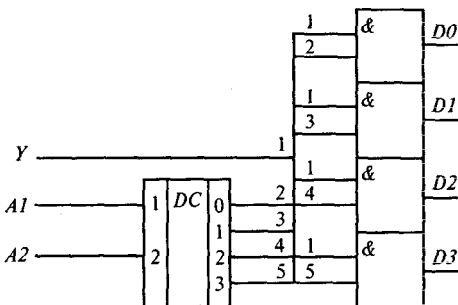


Рис. 27.15. Демультиплектор на четыре информационных выхода

Контрольные вопросы

1. Какими достоинствами обладает импульсный сигнал по сравнению с аналоговым?
2. Как работает транзисторный ключ?
3. Каковы достоинства систем с цифровым сигналом?
4. Какие логические операции называют элементарными?
5. Что такое триггер?
6. Как работает счетчик импульсов?
7. Что такое мультиплектор?
8. Что такое демультиплектор?

Глава 28

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

§ 28.1. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) предназначен для автоматического преобразования (измерения и кодирования) непрерывно изменяющихся во времени (т. е. аналоговых) величин в соответствующие значения числовых кодов. В данном случае под словом «цифра» понимается двоичный код. Когда, например, говорят о

цифровой звукозаписывающей и воспроизводящей аппаратуре или о цифровой телефонии, то подразумевают, что непрерывно изменяющийся звуковой сигнал записывается или передается именно в виде двоичных (бинарных) кодов, т. е. «оцифрованным». Напомним, что в §12.3 уже был рассмотрен фотоэлектрический датчик с цифровым выходом и отметили, что он является аналого-цифровым преобразователем (см. рис. 12.6).

В зависимости от способа преобразования АЦП подразделяют на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. На рис. 28.1 показан АЦП последовательного типа.

По команде «Пуск» цифровой автомат ЦА вырабатывает последовательность двоичных чисел, которые поступают на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), вырабатывающего напряжение $U_{\text{цап}}$, соответствующее каждому входному двоичному сигналу. Это напряжение $U_{\text{цап}}$ непрерывно растет (пока работает ЦА) и поступает на один из входов компаратора K , на другой вход которого поступает входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Компаратор сравнивает эти два сигнала и выдает сигнал при их равенстве. По этому сигналу останавливается ЦА, а на его выходе фиксируется двоичный код, соответствующий $U_{\text{вх}}$. Таким образом, преобразование в последовательном АЦП происходит в ступенчатом режиме, отдельными шагами (тактами), последовательно приближаясь к измеряемому значению. Поэтому последовательные АЦП на каждое преобразование аналогового сигнала затрачивают много времени. Для повышения их быстродействия используется метод поразрядного уравнивания. Иллюстрирующая этот метод схема показана на рис. 28.2.

Роль цифрового автомата выполняет регистр R_2 с датчиком тактовых импульсов ДТИ. Считывание выходного кода происходит по сигналу схемы готовности данных СГД, который поступает при поступлении сигнала от компаратора K о равенстве входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и напряжения $U_{\text{цап}}$. Работа компаратора синхронизирована импульсами ДТИ. Эти же импульсы последовательно переводят разряды регистра R_2 в состояние «1», начиная со старшего, а младшие разряды при этом остаются в состоянии «0». При этом ЦАП вырабатывает соответствующее напряжение, которое сравнивается в компараторе K с входным. Если $U_{\text{цап}}$ больше

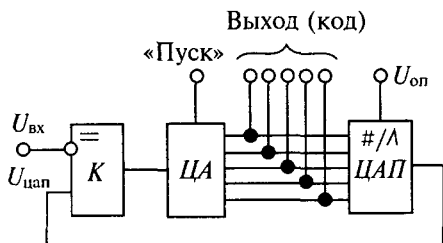


Рис. 28.1. Аналого-цифровой преобразователь последовательного типа

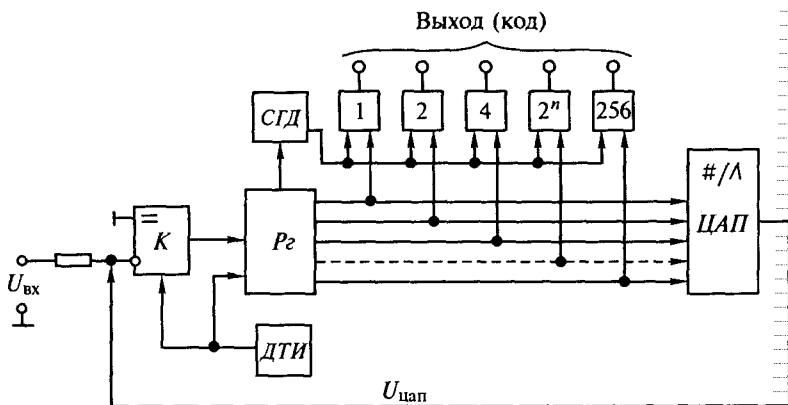


Рис. 28.2. Аналого-цифровой преобразователь

$U_{вх}$, то по команде компаратора старший регистр сбрасывается в состояние «0», если $U_{цап}$ меньше $U_{вх}$, то остается «1» в старшем разряде. Затем в состоянии «1» переводится следующий по старшинству разряд $P_г$ и снова производится сравнение напряжений $U_{цап}$ и $U_{вх}$. Цикл повторяется до тех пор, пока не произойдет сравнение в младшем разряде. После этого $СГД$ выдает сигнал о выдаче выходного кода. Число циклов сравнения в таком АЦП будет равно числу разрядов выходного кода.

Наиболее быстродействующими являются АЦП параллельного типа. Преобразование аналогового сигнала в код в таких АЦП осуществляется за один шаг. Но такие АЦП требуют нескольких компараторов. Выходное напряжение одновременно сравнивается во всех компараторах с несколькими опорными напряжениями. Параллельные АЦП имеют большее число элементов, чем последовательные. Рассмотрим работу трехразрядного параллельного АЦП (рис. 28.3). Три двоичными разрядами можно представить восемь чисел: от 0 до 7. Поэтому используется 7 компараторов для сравнения входного напряжения с опорными напряжениями, получаемыми с помощью схемы резисторного делителя. От каждого компаратора получается сигнал «0», если входное напряжение меньше опорного, и «1» — в противном случае.

Состояние компараторов и соответствующих им двоичных кодов показано в табл. 28.1. Преобразователь кода выдает двоичное трехразрядное число. Время преобразования параллельных АЦП может составлять несколько десятков наносекунд, что в сотни раз быстрее, чем у последовательных АЦП.

§ 28.2. Цифро-аналоговые преобразователи

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для автоматического преобразования (декодирования) входных величин, представленных числовыми кодами, в соответствующие им значения непрерывно изменяющихся во времени (т. е. аналоговых) величин. Иными словами ЦАП выполняет обратное по сравнению с АЦП преобразование. Выходные физические величины АЦП чаще всего представляют собой электрические напряжения и токи, но это могут быть и временные интервалы, и угловые перемещения, и т. п. В системе автоматики с ЭВМ или микропроцессором удобнее обрабатывать (преобразовывать или передавать) цифровой сигнал, но человеку (оператору) привычнее и удобнее воспринимать именно аналоговые сигналы, соответствующие значениям числовых кодов. Можно сказать, что с помощью АЦП информация вводится в ЭВМ, а с помощью ЦАП информация выводится из ЭВМ для воздействия на управляемый объект и восприятия человеком.

В схемах ЦАП обычно используется представление двоичного числа, состоящего из нескольких разрядов, в виде суммы степеней числа 2. Каждый разряд (если в нем записана единица) преобразуется в аналоговый сигнал, пропорциональный двойке в той степени, каков номер разряда, уменьшенный на единицу. На рис. 28.4 показана простая схема ЦАП, основу которой составляет матрица (набор) резисторов, которые подключаются ко входу операционного усилителя ключами, управляемыми соответствующими разрядами двоичного числа. В качестве ключей могут быть использованы триоды (например МДП-транзисторы).

Если в данном разряде записана «1», то ключ замкнут, если «0» — разомкнут. Коэффициент передачи операционного усилителя равен отношению сопротивления резистора в цепи обратной связи

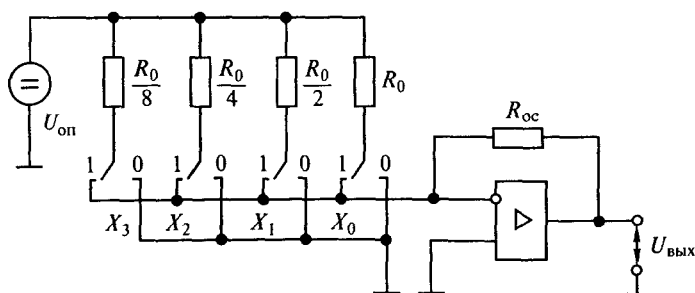


Рис. 28.4. Цифро-аналоговый преобразователь на базе резистивной матрицы

R_{oc} к сопротивлению резистора на входе усилителя (а величина этого сопротивления, как видно из схемы, для каждого разряда различна). Коэффициенты передачи $K = -(U_{вых} / U_{оп})$ по каждому разряду преобразуемого двоичного числа (если в этом разряде записана «1») соответственно равны $K_0 = R_1/R_0$, $K_1 = 2R_1/R_0$, $K_2 = 4R_1/R_0$, $K_3 = 8R_1/R_0$. Выходное напряжение ЦАП определяется суммой

$$U_{вых} = -U_{оп}(K_3 + K_2 + K_1 + K_0) = -U_{оп}(R_1/R_0)(8X_3 + 4X_2 + 2X_1 + X_0),$$

где X принимает значение 1 или 0 в зависимости от того, что записано в данном разряде двоичного числа.

Таким образом, четырехразрядное двоичное число преобразуется в напряжение $U_{вых}$, которое может принимать 16 возможных значений от 0 до $15U_{кв}$, где $U_{кв}$ — шаг квантования. Для уменьшения погрешности квантования необходимо увеличивать число двоичных разрядов ЦАП. При изготовлении интегральных микросхем ЦАП по данной схеме очень трудно сделать высокоточные резисторы с сопротивлениями, отличающимися друг от друга в десятки и сотни раз. Кроме того, нагрузка источника $U_{оп}$ изменяется в зависимости от состояния ключей, поэтому необходимо применять источник с малым внутренним сопротивлением.

Схема ЦАП, показанная на рис. 28.5, свободна от указанных недостатков. В этой схеме весовые коэффициенты каждого разряда задаются последовательным делением опорного напряжения с помощью матрицы резисторов. Эта матрица представляет собой многозвенный делитель напряжения и называется резистивной матрицей типа R - $2R$. В данной схеме ЦАП используются двухпозиционные ключи, которые подсоединяют резисторы $2R$ либо ко входу опера-

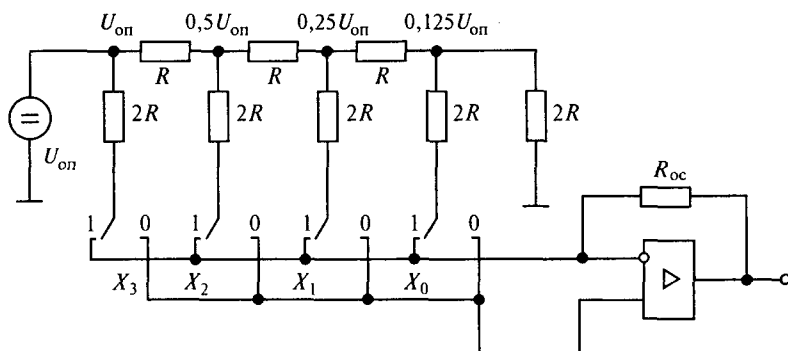


Рис. 28.5. Цифро-аналоговый преобразователь на базе резистивной матрицы R - $2R$.

ционного усилителя (при «1» в данном разряде), либо к общему нулевому проводу. Входное сопротивление резистивной матрицы при этом не зависит от положения ключей. Коэффициент передачи между соседними узловыми точками матрицы составляет 0,5. Для схемы ЦАП по рис. 28.5 выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = -U_{\text{оп}}(R/16R)(X_1 + 2X_2 + 4X_3 + 8X_4).$$

Условное обозначение ЦАП показано на рис. 28.6.

Наибольшее влияние на погрешность ЦАП оказывают отклонения сопротивлений резисторов от их номинальных значений, а также то, что у реального ключа сопротивление в закрытом состоянии не равно бесконечности, а в открытом — не равно нулю. Выпускаемые в интегральном исполнении резистивные матрицы имеют относительную погрешность коэффициента деления порядка сотых долей процента.

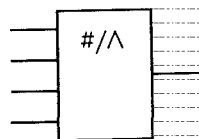


Рис. 28.6. Условное обозначение ЦАП

§ 28.3. Индикаторные устройства

Для отображения информации в системах автоматического управления широко используются индикаторные устройства. Чаще всего информация отображается с помощью оптических индикаторов, поскольку именно с помощью зрения человек воспринимает основной (более трех четвертей) объем информации, используемой и в производственной деятельности, и в быту. Кроме оптических индикаторов используются звуковые (акустические) индикаторы. Например, для сигнализации аварийных ситуаций наиболее приемлемы именно звуковые сигналы (сирена, гудок) в сочетании с привлекающими внимание персонала световыми (т. е. оптическими) сигналами.

Рассмотрим оптические индикаторные устройства, в дальнейшем называемые для краткости индикаторами. Различают активные и пассивные оптические индикаторы. К активным индикаторам относятся лампы накаливания, газоразрядные приборы, кинескопы и другие устройства, излучающие свет в видимой части спектра. К пассивным индикаторам относятся те устройства, которые сами не излучают свет, а лишь отражают свет внешних источников. К ним относятся шкалы измерительных приборов, цифровые индикаторы (например, счетчика электроэнергии в квартире или счетчика километров на приборной панели автомашины), жидкокристаллические индикаторные панели.

Светодиод в настоящее время является одним из наиболее простых и распространенных активных индикаторов. Принцип действия его основан на том, что при протекании прямого тока через полупроводниковый диод происходит излучение фотона (т. е. световой энергии). В кремниевых и германиевых диодах это излучение происходит в невидимом глазом диапазоне длин волн. А если выполнить диод на основе арсенида-фосфида галлия (GaPAs), то излучение происходит в диапазоне длин волн от 0,58 до 0,65 микрон. Это излучение человек воспринимает как желтый (0,58 мкм), оранжевый (0,63 мкм) или красный (0,65 мкм) свет. Светодиод, изготовленный на основе фосфида галлия (GaP), излучает зеленый (0,56 мкм) свет, а изготовленный на основе арсенида галлия (GaAs), — инфракрасный (0,90 мкм), хотя и невидимый человеческим глазом, свет, но удобный для дистанционного управления объектами. В зависимости от количества и пропорции примесей можно изменять длину волны максимума излучения, т. е. цвет свечения фотодиода. Материалы, используемые для изготовления светодиодов, дороже кремния и германия, поэтому светодиоды дороже обычных диодов. Коэффициент полезного действия светодиодов очень мал, только у инфракрасных диодов он составляет примерно 5 %, а у других в сто раз меньше. Быстродействие светодиодов очень высокое: при подаче скачкообразного входного сигнала яркость диода изменяется за сотую долю миллисекунды.

Входным сигналом для светодиода является прямой ток. От его величины зависит и яркость свечения. Хорошая видимость даже при дневном свете обеспечивается при прямом токе от 5 до 20 мА. При этом напряжение на светодиодах составляет 2—3 В. Светодиоды по своим параметрам хорошо согласуются с транзисторными и интегральными схемами. На рис. 28.7 показаны схемы включения светодиодов VD с помощью транзисторного ключа (*a* — высоким

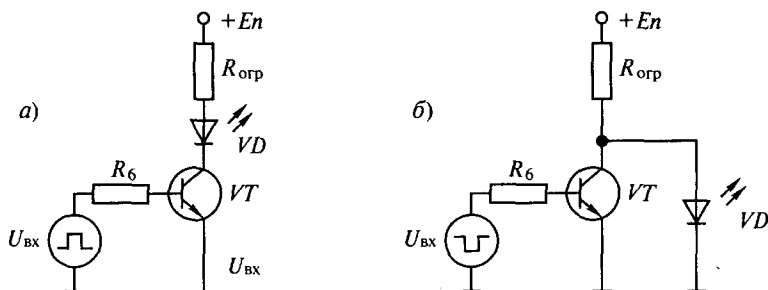


Рис. 28.7. Схемы включения светодиодов

уровнем напряжения, b — низким уровнем). Поскольку транзистор VT обладает усилительными свойствами, ток, потребляемый от источника сигнала, в десятки раз меньше прямого тока светодиода.

Сопротивление резистора $R_{огр}$ ограничивает прямой ток светодиода и его величина равна: $R_{огр} = (E - UVD)/IVD$.

Светодиоды выпускаются в различном исполнении: точечном, линейном, цифрознаковом. Наибольшее распространение получили семисегментные цифровые светодиодные индикаторы. Стилизованное изображение цифры составляется из семи светодиодных сегментов, расположенных в виде цифры 8.

При подаче сигналов на определенные сегменты высвечивается требуемая цифра. Например, для высвечивания цифры 5 необходимо подать сигналы на сегменты a, f, q, c, d (рис. 28.8).

Линейный светодиодный индикатор представляет собой интегральную схему в виде светящегося столбика, образованного последовательно включенными светодиодными сегментами, и блока управления. Внешне такой индикатор выглядит как линейная шкала, он служит для отображения непрерывно меняющейся информации и является аналогом стрелочного измерительного прибора. Эти устройства используются в многоканальных системах для индикации однотипной информации. Несколько расположенных рядом линейных шкал очень удобны для восприятия оператором.

Люминисцентные индикаторы также относятся к типу активных. Они представляют собой электронную вакуумную лампу с катодом, управляющей сеткой и несколькими анодами. Аноды покрыты слоем люминофора, который светится, если на него попадает поток электронов, испускаемых катодом. Устройство люминисцентного индикатора показано на рис. 28.9. В стеклянном баллоне 5 расположены катод 1, сетка 3 и аноды 2 на подложке 4. Катод выполнен в виде двух тонких вольфрамовых нитей, натянутых параллельно анодам. Между катодом и анодами находится плоская сетка. На катод подается напряжение накала, он нагревается и испускает поток электронов. На сетку и аноды подаются положительные (по отношению к катоду) напряжения. Поток электронов из катода устремляется к положительно заряженной сетке, пролетает ее по инерции и попадает в ускоряющее поле тех анодов, на которые подано напряжение. При достижении

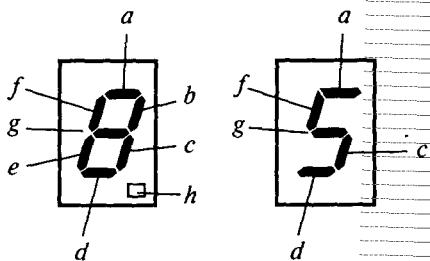


Рис. 28.8. Семисегментный индикатор

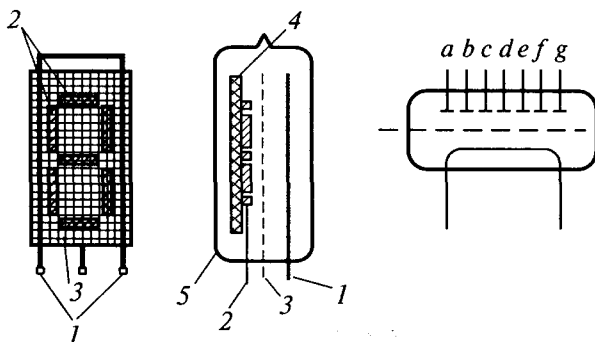


Рис. 28.9. Люминисцентный индикатор

анодов кинетическая энергия разогнавшихся до большой скорости электронов переходит в световую энергию излучаемых люминофором квантов света (как и в обычной электронно-лучевой трубке).

Серийно выпускаемые промышленностью люминисцентные индикаторы работают при напряжении накала до 5 В и сеточном напряжении 20—30 В.

К пассивным относятся жидкокристаллические индикаторы. Считывание с них информации возможно лишь при наличии внешнего освещения — естественного или искусственного. Принцип действия таких индикаторов основан на изменении степени прозрачности органических жидкокристаллических веществ, находящихся в электрическом поле.

Конструктивно жидкокристаллический индикатор (рис. 28.10) выполнен в виде двух плоских стеклянных пластин 1, разделенных по периметру прокладкой 2. На внутреннюю поверхность одной пластины наносятся прозрачные проводящие электроды-сегменты 3, форма и взаимное расположение которых будут определять индицируемые знаки. На всю вторую пластину 1 наносится проводящий прозрачный электрод 4. Пространство между пластинами заполняется жидкокристаллическим веществом, толщина слоя которого составляет примерно 10 микрон. Собранный таким образом пакет из стеклянных пластин, электродов и жидкого кристалла герметизируют. Выводы от электродов проходят через герметик. Для управления индикатором между общим электродом и электродами-сегментами подается напряжение 5—15 В.

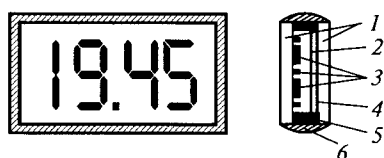


Рис. 28.10. Жидкокристаллический индикатор

Величина тока жидкокристаллического индикатора очень мала, поскольку вещество жидкого кристалла обладает большим удельным сопротивлением — несколько МОм на см. Поэтому и потребление энергии таким индикатором существенно меньше, чем у индикаторов других типов, хотя не следует забывать, что для жидкокристаллического индикатора требуется внешний источник света и не всегда бывает достаточно естественной освещенности. В этом случае требуется дополнительная энергия для питания источника света. При хорошей внешней освещенности контрастность знаков по отношению к фону составляет 70—90 %. Жидкокристаллические индикаторы относятся к высоконадежным элементам автоматики (наработка на отказ составляет несколько десятков тысяч часов), однако необходимо не допускать их нагрев выше 60 °С, а также исключить постоянную составляющую в переменном напряжении. С использованием жидких кристаллов созданы индикаторные панели и экраны. Такие устройства позволяют выводить большой объем информации. На экране отображаются цифровые и буквенные тексты, графики, таблицы, схемы и рисунки.

Оптимальным с точки зрения сочетания качества изображения и стоимости является индикаторный экран на базе электронно-лучевой трубки. В мониторе персонального компьютера, в телевизоре используется именно электронно-лучевая трубка (в телевизоре ее называют кинескопом). Заметим, что в ноутбуке (переносной компьютер с автономным питанием) с целью экономии энергии применяется жидкокристаллический экран. В электронно-лучевой трубке с помощью двух отклоняющих катушек можно изменять пространственное положение электронного луча на экране и выполнить изображение, состоящее более чем из миллиона точек. Но устройство управления электронно-лучевой трубки с трудом согласуется с наиболее перспективными цифровыми системами формирования изображения. В настоящее время более удачным средством для индикации большого объема информации являются плоские информационные экраны или панели. Работа их основана на различных физических принципах, но все они выполняют две задачи: обеспечивают пространственное распределение электрических сигналов для включения любого элемента индикации на всей поверхности экрана-панели и осуществляют преобразование электрического сигнала в оптическое излучение.

Для этого светоизлучающие элементы экрана располагаются в строго фиксированных точках. При этом возможны два способа адресации: параллельный (все элементы индикации независимы и могут включаться в любом порядке) и последовательный (в каждый,

очень короткий момент времени включен лишь один элемент и вся информация создается путем поочередного включения всех необходимых элементов). При параллельной адресации каждый элемент (точка на экране) должен быть соединен с источником сигнала проводником. Это технически трудно осуществимо. Например, для квадратного экрана с 10 000 элементов (сто точек в каждой из ста строчек) потребуется 10 000 проводников и столько же ключей для управления экраном. При последовательной адресации число соединительных проводников и ключей (элементов управления) может быть резко уменьшено за счет применения матричного построения экрана. Такой экран выполняется слоистым с матричной (решетчатой) структурой, как показано на рис. 28.11.

На нижнюю стеклянную пластину 1 наносятся параллельные горизонтальные электроды 2, на верхнюю стеклянную пластину 3 — параллельные вертикальные электроды 4. Между электродами 2 и 4 помещается слой активного оптического материала 5, изменяющего свои оптические свойства при прохождении тока или под воздействием электрического поля. При одновременной подаче напряжения на один из горизонтальных электродов 2 и один из вертикальных электродов 4 происходит включение элемента индикации, находящегося на их пересечении. При этом для экрана с 10 000 элементов при последовательной матричной адресации потребуется всего 200 соединительных проводников и ключевых элементов управления, т. е. в 50 раз меньше, чем при параллельной адресации. Но при последовательной адресации необходимы весьма быстродействующие электрооптические преобразователи. Для нормального восприятия человеком-оператором картинка на экране должна повторяться 50 раз в секунду. Следовательно, каждый элемент экрана будет включаться на время $1/(50 \cdot 10\,000) = 2$ мкс. Используемые в настоящее время оптические материалы, реагирующие на электрические сигналы (жидкие кристаллы, газоразрядная плазма, многие электролю-

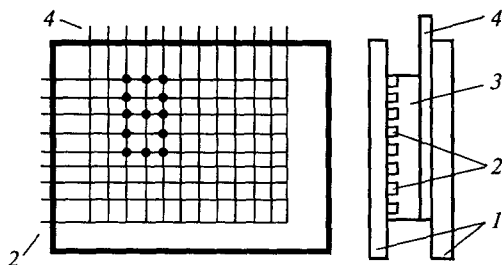


Рис. 28.11. Информационный матричный экран

минофоры), слишком инерционны и не успевают выдать световой сигнал. Можно не сомневаться, что скоро появятся промышленные образцы индикаторных экранов-панелей, не уступающих по стоимости и качеству изображения электронно-лучевой трубке.

Контрольные вопросы

1. Назначение аналого-цифрового преобразователя.
2. Назначение цифро-аналогового преобразователя.
3. Перечислите типы индикаторных устройств.
4. Как устроен жидкокристаллический индикатор?

Глава 29

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 29.1. Назначение корректирующих элементов

Для улучшения показателей качества работы систем автоматики выполняют коррекцию, которая заключается в изменении параметров (коэффициента усиления, постоянных времени и др.) или структуры системы. Основными показателями качества являются точность и устойчивость. Простейшие способы повышения точности заключаются в увеличении коэффициента усиления (изменение параметра) или введении интегрирующего звена (изменение структуры). Корректирующий элемент включают в прямую цепь (последовательная коррекция) или вводят дополнительные обратные связи (параллельная коррекция).

Наиболее часто применяются последовательно включаемые корректирующие элементы, выполняющие операции интегрирования и дифференцирования. Достаточно просто эти операции приближенно выполняются с помощью так называемых RC-цепочек. На рис. 29.1 показаны интегрирующее (а) и дифференцирующее (б) корректирующие звенья.

Включая интегрирующее звено после элемента сравнения (ЭС на рис. 1.1), можно теоретически свести статическую ошибку системы автоматического регулирования к нулю. Использование дифференцирующего звена улучшает динамику работы системы, позволяет ей быстрее реагировать на резкие изменения входных сигналов и возмущающих воздействий.

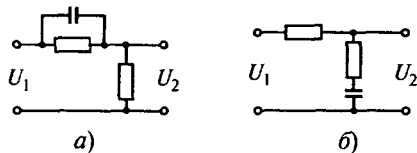


Рис. 29.1. Корректирующие RC-цепочки

§ 29.2. Операционный усилитель в функциональных схемах

Выполнить интегрирование, дифференцирование, получить иные функциональные преобразования непрерывного сигнала можно с помощью схем, построенных на базе операционного усилителя с различными обратными связями. Операционный усилитель (ОУ) очень широко применяется и при аналоговом моделировании систем автоматики. Выпускаются операционные усилители в виде полупроводниковых интегральных микросхем. Широкому применению операционных усилителей способствует их низкая стоимость, близкая к стоимости отдельных транзисторов.

Условное обозначение операционного усилителя показано на рис. 29.2. Представляет он собой усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления (до нескольких миллионов) по напряжению, с большим входным (несколько мегаом) и малым выходным (не более нескольких сотен ом) сопротивлениями. Почти всегда он используется с внешней глубокой отрицательной обратной связью, которая и определяет его результирующие характеристики.

Одна из основных схем включения ОУ показана на рис. 29.3. Эта схема обеспечивает усиление входного сигнала с коэффициентом $K = -R_2 / R_1$. Знак минус в данном случае показывает, что фаза выходного напряжения отличается от фазы входного на 180 градусов, т. е. ОУ изменяет полярность входного сигнала на противоположную, инвертирует сигнал.

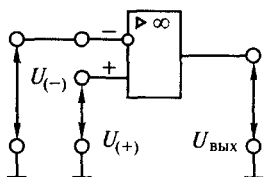


Рис. 29.2. Условное обозначение операционного усилителя

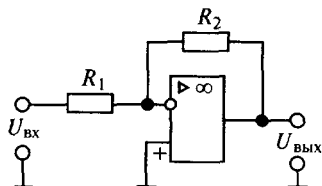


Рис. 29.3. Схема включения операционного усилителя

Схема интегрирующего элемента на базе ОУ показана на рис. 29.4. Выходное напряжение определяется выражением

$$U = -(1/RC) \int U_{\text{вх}} dt.$$

Схема дифференцирующего элемента на базе ОУ показана на рис. 29.5. Выходное напряжение определяется выражением

$$U = -RC (dU/dt).$$

На рис. 29.6 показана схема сумматора на базе ОУ. На вход ОУ поступает несколько входных сигналов, а на выходе получается сумма этих входных сигналов, помноженная на коэффициент усиления ОУ.

Для сравнения двух сигналов по величине используется схема компаратора (от английского compare — сравнить) на базе ОУ, показанная на рис. 29.7. В данной схеме (в качестве примера) выполняется сравнение двух разнополярных напряжений: постоянного $U_{\text{оп}}$ (его называют опорным напряжением) и плавно изменяющегося с постоянной скоростью U_x . Графики сравниваемых напряжений и выходного напряжения компаратора показаны на рис. 29.8. До момента времени t_1 напряжение U_x по абсолютной величине меньше $U_{\text{оп}}$ и выходное напряжение компаратора отрицательное (напомним, что ОУ инвертирует сигнал), в момент времени t_1 напряжение U_x становится по абсолютной величине больше $U_{\text{оп}}$, т. е. на вход ОУ поступит результирующий сигнал отрицательной полярности.

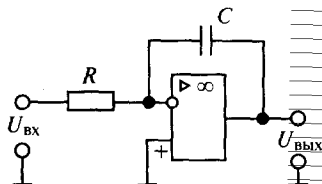


Рис. 29.4. Интегрирующий элемент на базе операционного усилителя

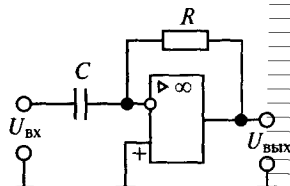


Рис. 29.5. Дифференцирующий элемент на базе операционного усилителя

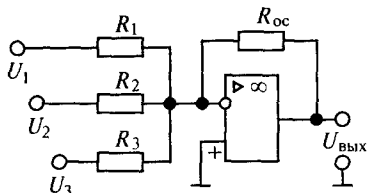


Рис. 29.6. Сумматор на базе операционного усилителя

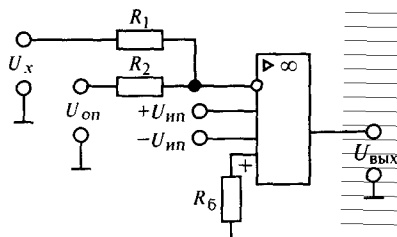


Рис. 29.7. Компаратор на базе операционного усилителя

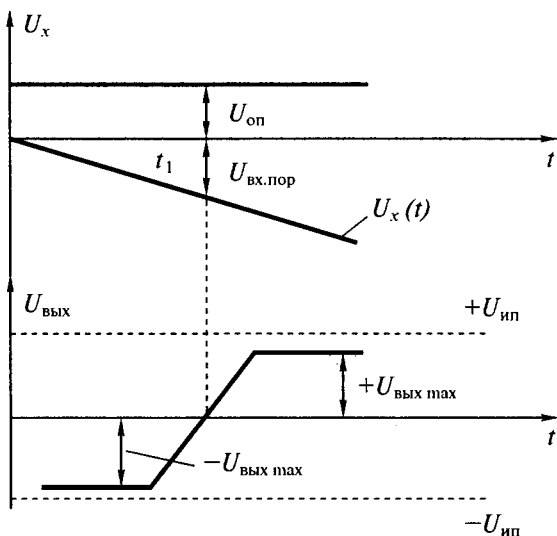


Рис. 29.8. Диаграммы напряжений компаратора

Напряжение на выходе компаратора изменится скачком, сигнализируя о том, что напряжения сравнялись по абсолютной величине.

Сопротивление резистора баланса определяется по формуле

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

В рассмотренной схеме использовался операционный усилитель без обратной связи, следовательно, его коэффициент усиления был очень велик. Это способствует увеличению скорости переключения компаратора.

Контрольные вопросы

1. Зачем нужны корректирующие элементы?
2. Для выполнения каких преобразований нужны операционные усилители?
3. Как работает компаратор?

Заключение

Автоматика — это передний край научно-технического прогресса. В области автоматике изменения происходят очень быстро. Элементы автоматике непрерывно совершенствуются. В книге, которую Вы прочли, рассмотрены современные типовые элементы систем автоматике, тенденции и перспективы развития электромеханических и электромагнитных элементов. Кроме того, существуют элементы автоматике, работающие на других принципах (например, полупроводниковые усилители, тиристорные реле и контакторы, гидравлические исполнительные устройства, пневматические датчики и преобразователи). Необходимо уметь правильно выбрать тип элемента для конкретного применения. Нет четких постоянных правил и установок: когда следует применять элементы одного типа, а когда — другого, поскольку появляются новые элементы. Можно сказать, что элементы разных типов конкурируют между собой.

В последнее время все большее значение приобретает задача охраны окружающей среды. Проблемы экологии важны для всей нашей планеты. Свою роль здесь должны сыграть и элементы автоматике, прежде всего электрические датчики контроля воздушной и водной среды. В настоящее время, например, разработаны нормы допустимых концентраций более чем на 500 газообразных, парообразных веществ и аэрозолей. Соответственно необходимы и датчики, позволяющие автоматически измерять эти концентрации в разных точках и передавать информацию на расстояние. В основном это электрохимические датчики.

Элементы автоматике экологического назначения разрабатываются и совершенствуются ускоренными темпами. Одновременно появляются и датчики новых типов, что объясняется двумя причинами. Человек осваивает для технического использования новые зоны: с очень низкими и очень высокими температурами; с высокими давлениями и космическим вакуумом; со сверхвысокими скоростями и т. д. Традиционные способы измерения и датчики здесь не всегда пригодны. Кроме того, используются новые, ранее не используемые на практике физические явления, применяются новейшие материалы и технологии.

Что касается коммутационных электромеханических элементов и магнитных усилителей, то едва ли можно ожидать существенного расширения их применения, поскольку у них есть «конкуренты» — бурно развивающиеся полупроводниковые приборы. Уже выпускаются тиристорные пускатели, в ряде случаев заменяющие магнитные пускатели. Для малых мощностей (до десятков ватт) полупроводниковые усилители, как правило, предпочтительнее магнитных. Но для средних мощностей (до 1—2 кВт) пока еще довольно часто применяют магнитные усилители. Следует также отметить, что в условиях повышенной радиации электромеханические и магнитные элементы автоматики работают надежнее, чем полупроводниковые. Вообще порой при проектировании систем автоматики бывает целесообразно сочетать достоинства элементов разных типов (в том числе не только электромеханических и полупроводниковых, но и гидравлических, пневматических).

Список литературы

1. Волков Н. И., Миловзоров В. П. Электромашинные устройства автоматики. — М.: Высшая школа, 1986.
2. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1999.
3. Жданов Л. С., Жданов Г. Л. Физика для средних специальных учебных заведений. — М.: Наука, 1987.
4. Захаров И. А. Электроника в технике почтовой связи. — М.: Радио и связь, 1995.
5. Кацман М. М. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 2001.
6. Келим Ю. М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. — М.: Высшая школа, 1991.
7. Ключев А. С. Автоматическое регулирование. — М.: Высшая школа, 1986.
8. Михайлов О. П., Стоколов В. Е. Электрические аппараты и средства автоматизации. — М.: Машиностроение, 1982.
9. Преображенский А. А., Шамрай Б. В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. — М.: Высшая школа, 1982.
10. Ямпольский В. С. Основы автоматики и электронно-вычислительной техники. — М.: Просвещение, 1991.

Содержание

Предисловие	3
Введение	5
Раздел I. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ АВТОМАТИКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Глава 1. Классификация элементов систем автоматики	7
§ 1.1. Состав систем автоматики	7
§ 1.2. Физические основы работы электромеханических и магнитных элементов	10
§ 1.3. Статические характеристики	13
§ 1.4. Динамические характеристики	15
§ 1.5. Обратная связь в системах автоматики	17
§ 1.6. Надежность элементов систем автоматики	19
Контрольные вопросы	22
Глава 2. Основные методы измерения и измерительные схемы	22
§ 2.1. Электрические измерения неэлектрических величин	22
§ 2.2. Мостовая измерительная схема постоянного тока	24
§ 2.3. Чувствительность мостовой схемы	27
§ 2.4. Мостовая схема переменного тока	32
§ 2.5. Дифференциальные измерительные схемы	34
§ 2.6. Компенсационные измерительные схемы	38
§ 2.7. Первичные преобразователи с неэлектрическим выходным сигналом	41
Контрольные вопросы	44
Раздел II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ	45
Глава 3. Классификация электрических датчиков. Контактные датчики	45
§ 3.1. Типы электрических датчиков	45
§ 3.2. Контактные датчики с дискретным выходным сигналом	46
Контрольные вопросы	50
Глава 4. Потенциометрические датчики	51
§ 4.1. Назначение. Принцип действия	51
§ 4.2. Конструкции датчиков	52
§ 4.3. Характеристики линейного потенциометрического датчика	55
§ 4.4. Реверсивные потенциометрические датчики	58
§ 4.5. Функциональные потенциометрические датчики	60
Контрольные вопросы	65
Глава 5. Тензометрические датчики	65
§ 5.1. Назначение. Типы тензодатчиков	65
§ 5.2. Принцип действия проволочных тензодатчиков	66

§ 5.3. Устройство и установка проволочных тензодатчиков	68
§ 5.4. Фольговые, пленочные, угольные и полупроводниковые тензодатчики	72
§ 5.5. Методика расчета мостовой схемы с тензодатчиками	75
Контрольные вопросы	76
Глава 6. Электромагнитные датчики	77
§ 6.1. Назначение. Типы электромагнитных датчиков	77
§ 6.2. Принцип действия и основы расчета индуктивных датчиков	78
§ 6.3. Дифференциальные (реверсивные) индуктивные датчики	85
§ 6.4. Трансформаторные датчики	92
§ 6.5. Магнитоупругие датчики	99
§ 6.6. Индукционные датчики	102
Контрольные вопросы	104
Глава 7. Пьезоэлектрические датчики	105
§ 7.1. Принцип действия	105
§ 7.2. Устройство пьезодатчиков	108
§ 7.3. Чувствительность пьезодатчика и требования к измерительной цепи	109
Контрольные вопросы	110
Глава 8. Емкостные датчики	110
§ 8.1. Принцип действия. Типы емкостных датчиков	110
§ 8.2. Характеристики и схемы включения емкостных датчиков	112
Контрольные вопросы	119
Глава 9. Терморезисторы	119
§ 9.1. Назначение. Типы терморезисторов	119
§ 9.2. Металлические терморезисторы	120
§ 9.3. Полупроводниковые терморезисторы	123
§ 9.4. Собственный нагрев термисторов	125
§ 9.5. Применение терморезисторов	127
Контрольные вопросы	130
Глава 10. Термоэлектрические датчики	131
§ 10.1. Принцип действия	131
§ 10.2. Материалы, применяемые для термопар	133
§ 10.3. Измерение температуры с помощью термопар	137
Контрольные вопросы	141
Глава 11. Струнные датчики	141
§ 11.1. Назначение и принцип действия	141
§ 11.2. Устройство струнных датчиков	143
Контрольные вопросы	146
Глава 12. Фотоэлектрические датчики	146
§ 12.1. Назначение. Типы фотоэлектрических датчиков	146
§ 12.2. Приемники излучения фотоэлектрических датчиков	148
§ 12.3. Применение фотоэлектрических датчиков	152
Контрольные вопросы	159
Глава 13. Ультразвуковые датчики	159
§ 13.1. Принцип действия и назначение	159
§ 13.2. Излучатели ультразвуковых колебаний	161

§ 13.3. Применение ультразвуковых датчиков	163
Контрольные вопросы.	165
Глава 14. Датчики Холла и магнитосопротивления.	165
§ 14.1. Физические основы эффекта Холла и эффекта магнитосопротивления	165
§ 14.2. Материалы для датчиков Холла и датчиков магнитосопротивления	167
§ 14.3. Применение датчиков Холла и датчиков магнитосопротивления	168
Контрольные вопросы.	170
Раздел III. КОММУТАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	171
Глава 15. Коммутационные элементы.	171
§ 15.1. Назначение. Основные понятия	171
§ 15.2. Кнопки управления и тумблеры	172
§ 15.3. Пакетные переключатели.	176
§ 15.4. Путевые и конечные выключатели	179
Контрольные вопросы.	181
Глава 16. Электрические контакты	182
§ 16.1. Режим работы контактов	182
§ 16.2. Конструктивные типы контактов	183
§ 16.3. Материалы контактов	186
Контрольные вопросы.	187
Глава 17. Электромагнитные нейтральные реле.	188
§ 17.1. Назначение. Принцип действия	188
§ 17.2. Основные параметры и типы электромагнитных реле	191
§ 17.3. Электромагнитные реле постоянного тока	192
§ 17.4. Последовательность работы электромагнитного реле	194
§ 17.5. Тяговая и механическая характеристики электромагнитного реле	195
§ 17.6. Основы расчета магнитопровода электромагнитного реле	201
§ 17.7. Основы расчета обмотки реле	204
§ 17.8. Электромагнитные реле переменного тока	207
§ 17.9. Быстродействие электромагнитных реле	210
Контрольные вопросы.	214
Глава 18. Электромагнитные поляризованные реле	215
§ 18.1. Назначение. Принцип действия	215
§ 18.2. Магнитные цепи поляризованных реле	216
§ 18.3. Настройка контактов и устройство поляризованного реле	219
§ 18.4. Вибропреобразователи	221
Контрольные вопросы.	226
Глава 19. Специальные виды реле	226
§ 19.1. Типы специальных реле	226
§ 19.2. Магнитоэлектрические реле	227
§ 19.3. Электродинамические реле	229
§ 19.4. Индукционные реле	231
§ 19.5. Реле времени	232

§ 19.6. Электротермические реле	235
§ 19.7. Шаговые искатели и распределители	236
§ 19.8. Магнитоуправляемые контакты. Типы и устройство.	238
§ 19.9. Применение магнитоуправляемых контактов	241
Контрольные вопросы.	242
Глава 20. Контакторы и магнитные пускатели	242
§ 20.1. Назначение контакторов и магнитных пускателей.	242
§ 20.2. Устройство и особенности контакторов.	243
§ 20.3. Конструкции контакторов	245
§ 20.4. Магнитные пускатели	248
§ 20.5. Автоматические выключатели	252
Контрольные вопросы.	253
Глава 21. Электромагнитные исполнительные устройства	254
§ 21.1. Назначение электромагнитных исполнительных устройств	254
§ 21.2. Классификация электромагнитов	255
§ 21.3. Порядок проектного расчета электромагнита	257
§ 21.4. Особенности расчета электромагнитов переменного тока	260
§ 21.5. Электромагнитные муфты	262
Контрольные вопросы.	265
Раздел IV. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ И МОДУЛЯТОРЫ	266
Глава 22. Магнитные усилители без обратной связи.	266
§ 22.1. Физические основы работы магнитных усилителей	266
§ 22.2. Принцип действия магнитного усилителя.	270
§ 22.3. Основные схемы и параметры неререверсивных магнитных усилителей	274
§ 22.4. Основные характеристики магнитных усилителей.	279
§ 22.5. Теория идеального магнитного усилителя.	282
§ 22.6. Инерционность идеального магнитного усилителя	288
§ 22.7. Графоаналитический способ построения статической характеристики магнитного усилителя	291
Контрольные вопросы.	294
Глава 23. Магнитные усилители с обратной связью	294
§ 23.1. Назначение и способы введения обратной связи	294
§ 23.2. Однотактный магнитный усилитель с внешней обратной связью	295
§ 23.3. Инерционность магнитного усилителя с обратной связью.	299
§ 23.4. Регулировка коэффициента обратной связи.	300
§ 23.5. Характеристики реального магнитного усилителя с обратной связью	302
§ 23.6. Графическое построение статической характеристики магнитного усилителя с обратной связью	303
§ 23.7. Магнитные усилители с внутренней обратной связью.	305
Контрольные вопросы.	308
Глава 24. Реверсивные магнитные усилители	308
§ 24.1. Статическая характеристика реверсивного (двухтактного) магнитного усилителя	308
§ 24.2. Усилители с выходным переменным током	309

§ 24.3. Реверсивные магнитные усилители с выходным постоянным током	312
§ 24.4. Обратная связь в реверсивных магнитных усилителях	315
§ 24.5. Основы расчета магнитных усилителей	318
Контрольные вопросы	320
Глава 25. Магнитные усилители специального назначения	321
§ 25.1. Многокаскадный магнитный усилитель	321
§ 25.2. Быстродействующие магнитные усилители	323
§ 25.3. Операционные магнитные усилители	326
§ 25.4. Трехфазные магнитные усилители	329
Контрольные вопросы	332
Глава 26. Магнитные модуляторы и бесконтактные магнитные реле	332
§ 26.1. Назначение магнитных модуляторов	332
§ 26.2. Магнитные модуляторы с выходным переменным током основной частоты	333
§ 26.3. Магнитные модуляторы с выходным переменным током удвоенной частоты	335
§ 26.4. Магнитные модуляторы с выходным импульсным сигналом	338
§ 26.5. Магнитомодуляционные датчики магнитных величин	339
§ 26.6. Назначение и принцип действия бесконтактных магнитных реле	341
§ 26.7. Характеристики и схемы бесконтактных магнитных реле	342
§ 26.8. Основы расчета и конструирования бесконтактных магнитных реле	345
Контрольные вопросы	346
Раздел V. ЦИФРОВЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ	347
Глава 27. Элементы цифровых систем автоматики	347
§ 27.1. Достоинства дискретных систем	347
§ 27.2. Электронные коммутаторы	349
§ 27.3. Элементы цифровой техники	351
§ 27.4. Элементы памяти для цифровых систем	354
§ 27.5. Счетчики импульсов	357
§ 27.6. Мультиплексор и демультиплексор	360
Контрольные вопросы	361
Глава 28. Преобразователи для цифровых систем автоматики	361
§ 28.1. Аналого-цифровые преобразователи	361
§ 28.2. Цифро-аналоговые преобразователи	365
§ 28.3. Индикаторные устройства	367
Контрольные вопросы	373
Глава 29. Корректирующие элементы	373
§ 29.1. Назначение корректирующих элементов	373
§ 29.2. Операционный усилитель в функциональных схемах	374
Контрольные вопросы	376
Заключение	377
Список литературы	378

Келим Юрий Михайлович
Типовые элементы систем
автоматического управления

Учебное пособие

Редактор *С. Ц. Малинская*
Корректор *Ж. А. Ермолаева*
Компьютерная верстка *И. В. Кондратьевой*

Сдано в набор 17.04.2002. Подписано в печать 28.07.2002. Формат 60x90
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 24. Уч.-изд. л. 24,36.
Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Тираж 6000 экз.
Заказ 4204074.

ЛР № 071629 от 20.04.98
Издательский Дом «ФОРУМ»
101831, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (095) 925-01-97
E-mail: forum-books@mail.ru

ЛР № 070824 от 21.01.93
Издательский Дом «ИНФРА-М»
127214, Москва, Дмитровское ш., 107
Тел.: (095) 485-70-18; 485-74-00
Факс: (095) 485-53-18. Робофакс: (095) 485-54-44
E-mail: books@infra-ml.ru
Http://www.infra-m.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
на ФГУИПП «Нижполиграф».
603006, Нижний Новгород, ул. Варварская, 32.