

# РАЗДЕЛ IV РЕЛЕ, КОНТАКТОРЫ, КОММУТАТОРЫ

## Глава 11 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

### 11.1. Электромагнитные реле

В системах автоматики и телемеханики одним из наиболее распространенных элементов является реле. Реле — это устройство, которое автоматически осуществляет скачкообразное изменение (переключение) выходного сигнала под воздействием управляющего сигнала, изменяющегося непрерывно в определенных пределах.

Электрическое реле является промежуточным элементом, который приводит в действие одну или несколько управляемых электрических цепей при воздействии на него определенных электрических сигналов управляющей цепи (рис. 11.1).

Основные параметры реле:

*мощность срабатывания*  $P_{ср}$  — минимальная электрическая мощность, которая должна быть подведена к реле от управляющей цепи для его надежного срабатывания, т. е. приведения в действие управляемой цепи. Эта мощность определяется общими электрическими и конструктивными параметрами реле;

*мощность управления*  $P_y$  — максимальная электрическая мощность в управляемой цепи, при которой контакты реле еще работают надежно. Мощность управления определяется параметрами контактов реле, переключающих управляемую цепь.

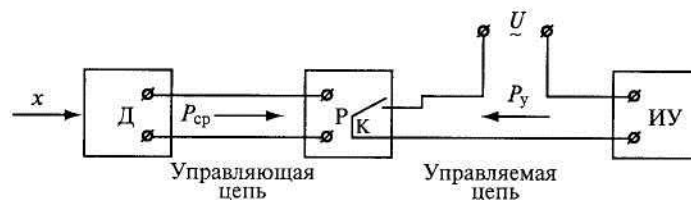


Рис. 11.1. Структурная схема включения реле в систему автоматического управления:  
 $x$  — контролируемая величина; Д — датчик; Р — реле; ИУ — исполнительные устройства; К — контакт реле

Выбор соответствующего типа реле производится на основании значений  $P_{ср}$  и  $P_y$ , так как эти параметры постоянны для отдельных конструкций реле;

*допустимая разрывная мощность*  $P_p$  — мощность в цепи, разрываемой контактами при определенном токе или напряжении без образования устойчивой электрической дуги при данном напряжении;

*коэффициент управления*  $K_y$  — величина, характеризующая отношение управляемой мощности к мощности срабатывания реле:  $K_y = P_y / P_{ср} \geq 1$ ;

*время срабатывания*  $t_{ср}$  — интервал времени от момента поступления сигнала из управляющей цепи до момента начала воздействия реле на управляемую цепь. Допустимое значение  $t_{ср}$  определяется необходимой быстротой передачи сигнала в управляемую цепь.

Существующие типы реле можно классифицировать по следующим основным признакам:

назначению — управления, защиты и сигнализации;

принципу действия — электромеханические (электромагнитные, нейтральные, электромагнитные поляризованные, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные, электротермические), магнитные бесконтактные, электронные, триггерные (бесконтактно-электронные), фотоэлектронные, ионные;

измеряемой величине — электрические (тока, напряжения, мощности, сопротивления, частоты, коэффициента мощности), механические (силы, давления, скорости, перемещения, уровня, объема и др.), тепловые (температуры, количества теплоты), оптические, силы звука и других физических величин (времени, вязкости и др.);

мощности управления — маломощные с мощностью управления  $P_y \leq 1$  Вт, средней мощности с  $P_y = 1 \dots 10$  Вт, мощные с  $P_y > 10$  Вт;

времени срабатывания — безынерционные ( $t_{cp} \leq 0,001$  с), быстродействующие ( $t_{cp} = 0,001 \dots 0,050$  с), замедленные ( $t_{cp} = 0,15 \dots 1,00$  с), реле времени ( $t_{cp} > 1$  с).

Наиболее распространены электромеханические реле, в которых изменение входной электрической величины вызывает механическое перемещение подвижной части — якоря, приводящее к замыканию или размыканию контактов.

### Электромагнитные реле постоянного тока

Электромагнитные реле являются наиболее распространенными из группы электромеханических реле и получили широкое применение в устройствах автоматики, телемеханики и вычислительной техники. Если электромеханические реле используются для переключения мощных цепей тока, они называются *контакторами*. Реле постоянного тока подразделяются на нейтральные и поляризованные. *Нейтральное* реле одинаково реагирует на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке, т.е. положение якоря не зависит от направления тока в обмотке реле. *Поляризованные* реле реагируют на полярность сигнала.

По характеру движения якоря электромеханические нейтральные реле подразделяются на два типа: с угловым движением якоря и втяжным якорем.

На рис. 11.2 показаны схемы электромеханических реле клапанного типа и с втягиваемым внутрь катушки якорем. Для уменьшения магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора сердечник электромеханического реле обычно снабжается полюсным наконечником.

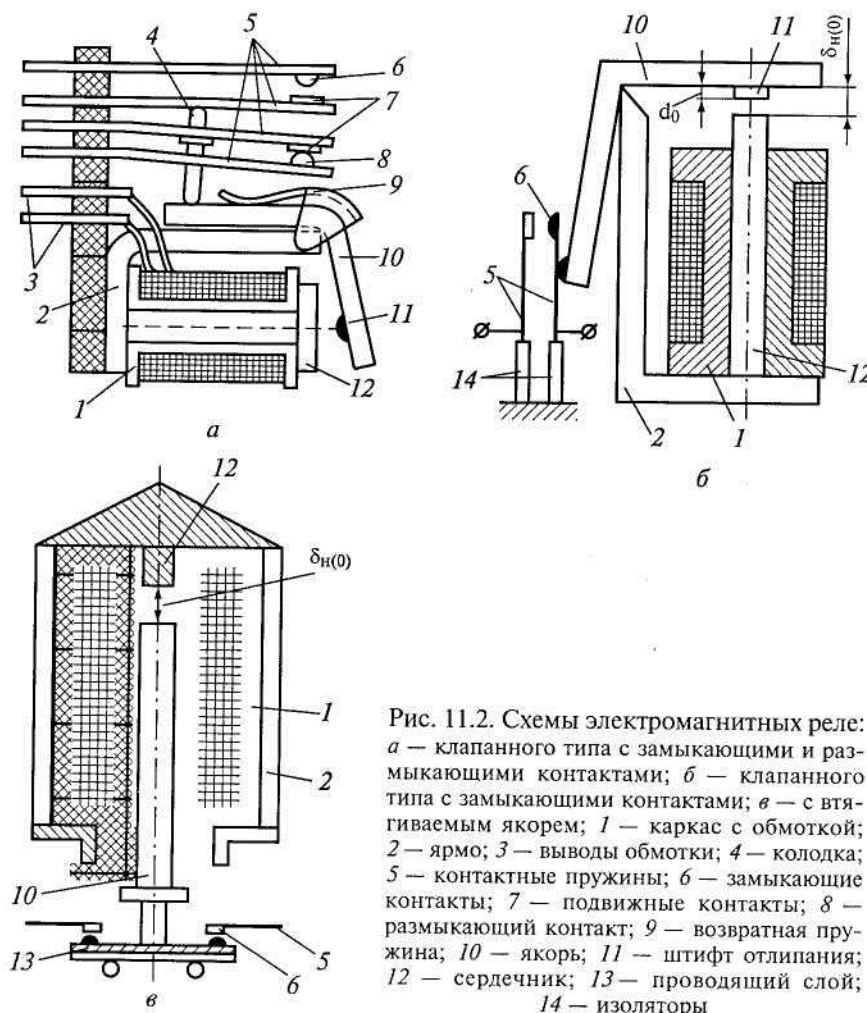


Рис. 11.2. Схемы электромеханических реле: а — клапанного типа с замыкающими и размыкающими контактами; б — клапанного типа с замыкающими контактами; в — с втягиваемым якорем; 1 — каркас с обмоткой; 2 — ярмо; 3 — выводы обмотки; 4 — колодка; 5 — контактные пружины; 6 — замыкающие контакты; 7 — подвижные контакты; 8 — размыкающий контакт; 9 — возвратная пружина; 10 — якорь; 11 — штифт отлипания; 12 — сердечник; 13 — проводящий слой; 14 — изоляторы

При отсутствии управляющего сигнала якорь удален от сердечника на максимальное расстояние за счет возвратной пружины (см. рис. 11.2, а). В этом случае одна пара контактов замкнута (размыкающие контакты — РК), а другая пара разомкнута (замыкающие контакты — ЗК).

Принцип действия таких реле заключен в следующем: при подаче тока в обмотку (катушку) создается магнитный поток, который, проходя через сердечник, ярмо, якорь и воздушный зазор  $\delta_{н(0)}$ , создает магнитное усилие, притягивающее якорь к сердечнику. При этом якорь, воздействуя на колодку, перемещает ее таким образом, что контакты ЗК замыкаются, а РК размыкаются. В некоторых конструкциях реле якорь при выключении тока под действием собственного веса возвращается в исходное положение (см. рис. 11.2, в).

Рассмотрим особенности работы реле по этапам (рис. 11.3) на примере реле с угловым перемещением якоря (см. рис. 11.2, б). За счет индуктивности катушки реле ток в ней нарастает (убывает) не мгновенно, а постепенно. При детальном рассмотрении работы реле в процессе срабатывания и отпущения можно определить четыре этапа.

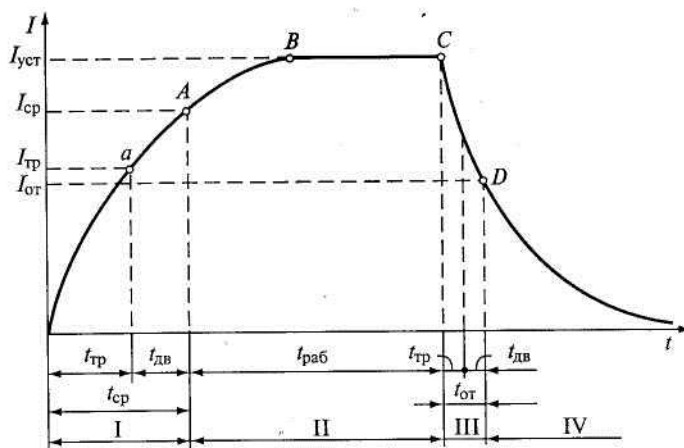


Рис. 11.3. Временная диаграмма работы реле

Этап I — срабатывание реле. Длительность этого этапа — время полного срабатывания  $t_{ср}$ , т.е. промежуток времени от момента подачи напряжения на катушку реле до момента надежного замыкания контактов (точка  $A$ );  $I_{тр}$  — ток трогания, при котором начинается движение якоря;  $t_{тр}$  — время, за которое ток достигает значения  $I_{тр}$ , (точка  $a$ ), т.е. промежуток, соответствующий началу движения якоря;  $I_{ср}$  — ток, при котором срабатывает реле;  $t_{дв}$  — время движения якоря при срабатывании. Таким образом, время полного срабатывания, отвечающее окончанию движения якоря,  $t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}$ .

Этап II — работа реле ( $t_{раб}$  — время работы реле). После того как реле сработает, ток в обмотке продолжает увеличиваться (участок  $AB$ ), пока не достигнет установившегося значения. Участок  $AB$  необходим для того, чтобы обеспечить надежное притяжение якоря к сердечнику, исключающее вибрацию якоря при сотрясениях реле. Впоследствии ток в обмотке реле остается неизменным. Отношение установившегося тока  $I_{уст}$  к току срабатывания  $I_{ср}$  называется коэффициентом запаса реле по срабатыванию  $K_{зап}$ , т.е.  $K_{зап}$  показывает надежность работы реле:  $K_{зап} = I_{уст}/I_{ср} = 1,5...2$ . Величина  $I_{уст}$  не должна превышать значения, допустимого для обмотки реле по условиям ее нагрева.

Этап III — отпущение реле. Этот период начинается от момента прекращения подачи сигнала (точка  $C$ ) и продолжается до момента, когда ток в обмотке реле уменьшится до значения  $I_{от}$  (точка  $D$  — прекращение воздействия реле на управляемую цепь). При этом различают время трогания при отпущении  $t_{тр}$  и время движения  $t_{дв}$ .

Время отпущения  $t_{от} = t_{тр} + t_{дв}$ , где  $t_{тр}$  — время до начала движения якоря при отпущении;  $t_{дв}$  — продолжительность перемещения якоря. Отношение тока отпущения к току срабатывания называется коэффициентом возврата:  $K_{в} = I_{от}/I_{ср} < 1$ ; обычно  $K_{в} = 0,4...0,8$ .

Этап IV — покой реле — отрезок времени от момента размыкания контактов реле (точка  $D$ ) до момента поступления нового сигнала на его обмотку. При быстром следовании управляющих сигналов друг за другом работа реле характеризуется максимальной частотой срабатывания (числом срабатываний реле в единицу времени).

### Тяговые и механические характеристики электромагнитного реле

Электромагнитное тяговое усилие — сила притяжения якоря к катушке реле прямо пропорциональна квадрату тока в катушке, обратно пропорциональна квадрату длины  $\delta$  воздушного зазора и не зависит

от направления тока в управляющей обмотке.

В процессе срабатывания реле изменяется длина воздушного зазора, а следовательно, изменяется электромагнитное усилие на якоре. Зависимость электромагнитного усилия от величины воздушного зазора между якорем и сердечником  $F_3 = f(\delta)$  называется *тяговой характеристикой* электромагнитного реле (рис. 11.4).

При достаточно больших значениях величины воздушного зазора  $\delta$  электромагнитное усилие достигает минимального значения  $F_{3min}$ , а магнитное сопротивление воздушного зазора становится значительно больше магнитного сопротивления стальных элементов магнитопровода ( $R_{мб} \gg R_{м.ст}$ ); однако при малых значениях зазора  $\delta$  сопротивление  $R_{м.ст}$  резко уменьшается и становится сравнимым с  $R_{м.ст}$ , т.е. электромагнитное усилие не может быть бесконечно большим. Практически оно достигает некоторого значения  $F_{max}$ .

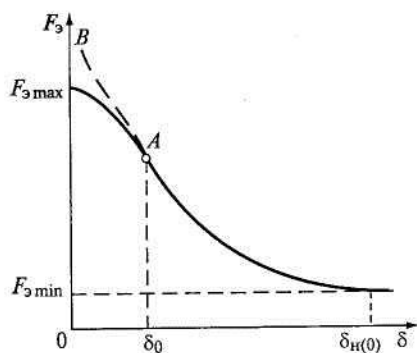


Рис. 11.4. Тяговая характеристика электромагнитного реле

Так как после отключения обмотки реле части магнитопровода сохраняют некоторую намагниченность, обусловленную коэрцитивной силой, то при  $\delta \rightarrow 0$  возможно «залипание» притянутого якоря под действием остаточной намагниченности стали. Для уменьшения этого притяжения, т.е. исключения «залипания», применяют немагнитный штифт (наклейки или прокладки), который закрепляется на вертикальной части якоря против оси сердечника (см. рис. 11.2, а, б). С помощью штифта, толщина которого  $\delta_0 = 0,1$  мм, при притянута якоря обеспечивается некоторый минимальный воздушный зазор  $\delta \geq \delta_0$ , что облегчает отход якоря при выключении тока. При этом создается достаточное магнитное сопротивление, которое уменьшает остаточный магнитный поток до минимального значения. Работа электромагнитного реле сводится к замыканию и размыканию контактных пружин, число которых в разных конструкциях реле колеблется в пределах 2... 16.

Перемещению якоря по направлению к сердечнику в процессе притяжения противодействуют силы упругих элементов реле — возвратной пружины и контактных пружин. При разных положениях якоря эти силы различны, т.е. противодействующие силы зависят от величины воздушного зазора  $\delta$ . Зависимость механических (противодействующих) сил от величины зазора между якорем и сердечником называется *механической характеристикой реле*  $F_m = f(\delta)$ . Силы, преодолеваемые якорем реле при его перемещении, изображаются, как правило, в виде ломаных линий.

В качестве примера рассмотрим построение механической характеристики реле с контактной группой, действующей на замыкание (рис. 11.5). В процессе работы реле якорь 3 сначала преодолевает натяжение спиральной пружины П, а затем его мостик  $m$  после подъема на расстояние  $\delta_1$  являющееся холостым ходом, производит подъем контактных пружин 1 и 2.

На горизонтальной оси механической характеристики в виде отрезка  $0a$  отложим расстояние  $\delta_{н(0)}$  — между торцом сердечника и якорем в нерабочем состоянии реле, равное сумме холостого хода якоря  $\delta_1$  его рабочего хода  $\delta_2 + \delta_3$ , отрезков  $ef$  и  $dc$  и длине штифта отлипания  $\delta_0$ . На оси ординат отложим силу, которую преодолевает якорь при перемещении. В отпущенном положении якорь испытывает лишь натяжение возвратной спиральной пружины (точка  $b$ ), а контактные пружины удерживаются колодкой 4 и прижимаются к нему силой предварительного натяжения, что устраняет вибрацию контактов при обратном ходе якоря. Ордината  $ab$  характеризует усилие  $F_0$ , действующее на якорь в его исходном положении (для того чтобы сдвинуть якорь из начального положения).

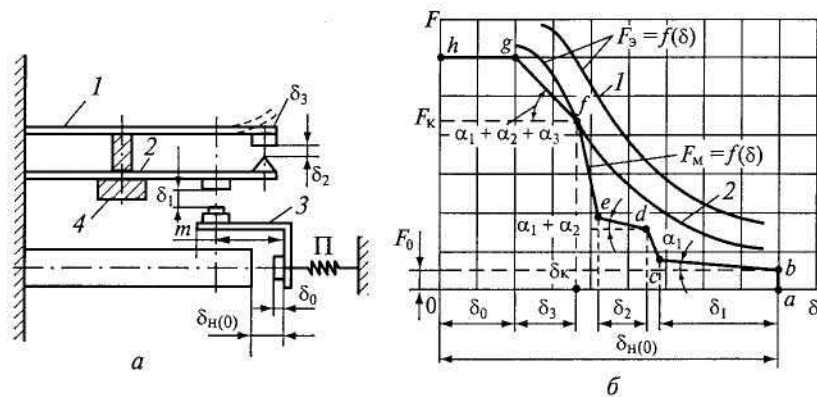


Рис. 11.5. Схема реле (а) и построение его механической характеристики (б):  
1, 2 — контактные пружины; 3 — якорь; 4 — колодка

На протяжении холостого хода якоря (участок  $\delta_1$ ) происходит растяжение пружины П, причем нагрузка якоря равномерно растет по ординате  $bc$ . Угол наклона  $\alpha_1$  характеризуется упругими свойствами пружины П. При соприкосновении упора, имеющегося на мостике  $m$ , с нижней контактной пружиной 2 якорь преодолевает первоначальное натяжение этой пружины, несколько изгибая ее (участок  $cd$ ). В точке  $d$  нижняя контактная пружина отходит от колодки и якорь на участке  $de$  преодолевает совместное сопротивление двух пружин (возвратной спиральной и нижней контактной). Угол наклона участка  $de$  равен сумме углов  $\alpha_1 + \alpha_2$ , где угол  $\alpha_2$  зависит от упругих свойств нижней контактной пружины. Перемещение якоря на этом участке характеризуется абсциссой  $\delta_2$ .

С момента снятия нижней пружины с колодки происходит ее подъем до замыкания контакта между пружинами 1 и 2. После замыкания контакта (точка  $e$ ) якорь начинает преодолевать предварительное натяжение верхней контактной пружины — участок  $ef$ . В точке  $f$  верхняя пружина снимается с колодки и на участке  $fg$  якорь преодолевает противодействие трех пружин (двух контактных и одной спиральной). Угол наклона участка  $fg$  определяется суммой трех углов  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ , где угол  $\alpha_3$  характеризуется упругими свойствами верхней контактной пружины. Для надежности замыкания контактов, которое теоретически произойдет уже в точке  $f$ , якорь должен дополнительно переместиться на расстояние  $\delta_3$  (чтобы обеспечить необходимое контактное усилие 2,6... 5,1 Н). От последней построенной точки  $g$  проведем горизонтальную прямую  $gh$ , которая определит длину штифта отлипания  $\delta_0$ .

Из построения нетрудно понять, что отрезки ломаной линии характеризуют отдельные этапы работы пружин. Для притяжения якоря реле необходимо, чтобы электромагнитное усилие  $F_3$  на всем пути движения якоря было больше сил, противодействующих его движению. Для обеспечения этого условия тяговая характеристика реле (кривая 1) должна располагаться выше его механической характеристики. Однако слишком большое превышение электромагнитного усилия над противодействующими нежелательно, так как это может привести к сильным ударам якоря о сердечник и вибрации контактов. Кроме того, в этом случае ток в обмотке реле был бы чрезмерно большим, что привело бы к недопустимому увеличению сечения проводов. Поэтому при расчете принимают расположение тяговой характеристики над механической с касанием ее хотя бы в одной точке  $f$  (кривая 2). Координаты точки  $f(F_k$  и  $\delta_k$ ) называются критическими. Электромагнитное усилие  $F_3$ , обеспечивающее указанное расположение характеристики и пропорциональное току срабатывания, рассчитывается по значениям критического усилия  $F_k$  и критического зазора  $\delta_k$ .

На рис. 11.6 изображено согласование тяговой и механической характеристик реле. Для правильного согласования необходимо, чтобы тяговые характеристики при токах срабатывания  $I_{cp}$  и отпускания  $I_{от}$ , проходя соответственно через точки механической характеристики 1 и 2, не пересекались с ней в зоне зазоров  $\delta$  ( $\delta_0 < \delta < \delta_{H(0)}$ ), иначе якорь может остановиться в промежуточных точках 3 и 4 характеристик, как это показано на рис. 11.6, б.

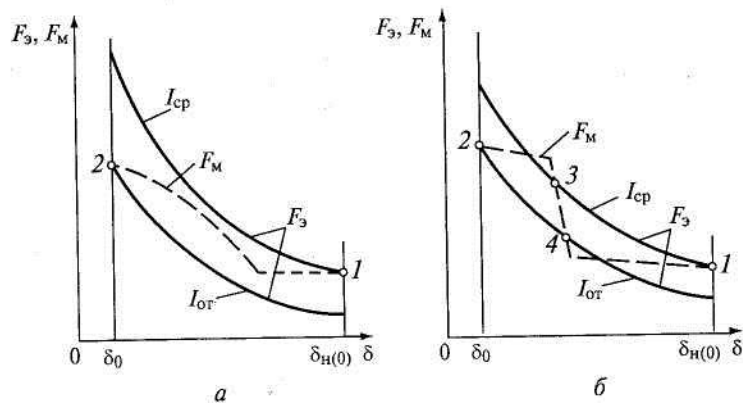


Рис. 11.6. Удачное (а) и неудачное (б) согласования тяговой и механической характеристик реле

Ток срабатывания  $I_{cp}$  — ток в обмотке реле, при котором электромагнитное усилие становится больше механического и якорь реле притягивается к сердечнику при зазоре  $\delta_{н(0)}$ . Ток отпускания  $I_{от}$  — ток при зазоре  $\delta_0$ , когда якорь возвращается в исходное положение (т.е. ток не в состоянии создать электромагнитное усилие, удерживающее якорь).

### Электромагнитные реле переменного тока

В тех случаях, когда основным источником энергии является сеть переменного тока, желательно применять реле, обмотки которых питаются переменным током. При подаче в обмотку реле переменного тока якорь будет притягиваться к сердечнику так же, как и при постоянном токе под действием электромагнитной силы  $F_3$ , пропорциональной магнитному потоку  $\Phi_\delta$ , возникающему в зазоре между якорем и сердечником и создаваемому при протекании тока в обмотке электромагнита:

$$F_3 = \Phi_\delta^2 / (2\mu_0 S_\delta).$$

Так как ток в обмотке электромагнита переменный, то и магнитный поток  $\Phi_\delta$ , создаваемый этим током в рабочем зазоре, будет также переменным, т. е.

$$\Phi_\delta = \Phi_{\delta \max} \sin \omega t.$$

После преобразований получим

$$F_3 = F_{3 \max} \sin^2 \omega t;$$

или

$$F_{3 \max} = \Phi_{\delta \max}^2 / (2\mu_0 S_\delta), \quad (11.1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

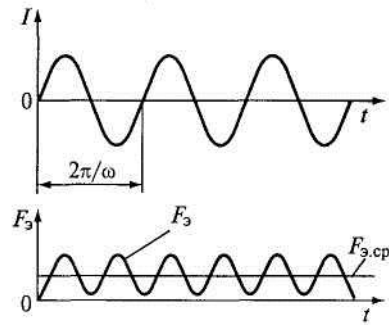


Рис. 11.7. Графики тока и электромагнитного усилия в обмотке реле переменного тока

Изменение тока  $I$  в обмотке и соответствующее изменение электромагнитного усилия во времени изображены на рис. 11.7.

Якорь будет притягиваться к сердечнику под действием среднего значения электромагнитного усилия, т. е. его постоянной составляющей  $F_{э,ср}$ . Величина  $F_{э,ср}$  определяется путем тригонометрического преобразования формулы (11.1):

$$\begin{aligned} F_э &= (F_{э, \max} / 2)(1 - \cos 2\omega t) = \\ &= F_{э, \text{ср}} - F_э, \end{aligned} \quad (11.2)$$

где постоянная составляющая электромагнитного усилия

$$F_{э, \text{ср}} = F_{э, \max} / 2 = \Phi_{\delta, \max}^2 / (4\mu_0 S_{\delta}),$$

а переменная составляющая

$$F_э = (F_{э, \max} / 2) \cos 2\omega t.$$

Из формулы (11.2) следует, что электромагнитное усилие меняется (пульсирует) с удвоенной частотой  $2\omega$ , обращаясь в нуль дважды за период питающего (входного) напряжения. Следовательно, якорь реле может вибрировать, периодически оттягиваться от сердечника возвратной пружиной, что вызывает износ его оси, обгорание контактов, прерывание электрической цепи и другие нежелательные явления.

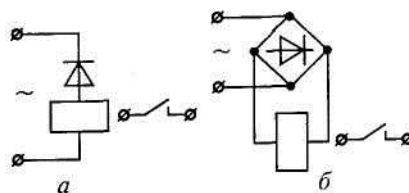


Рис. 11.8. Схемы включения реле постоянного тока в сеть переменного тока с однополупериодным (а) и с двухполупериодным (б) выпрямлением

Хотя переменный ток является более распространенным, чем постоянный, реле постоянного тока нашли большее применение, так как они требуют использования шихтованного магнитопровода (набранного из отдельных листов), а также специальных мер для устранения вибрации якоря. Возможно включение реле постоянного тока в сеть переменного тока через выпрямительные устройства. На рис. 11.8 изображены схемы подобных устройств.

Рассмотрим способы устранения вибрации якоря реле переменного тока.

*Применение двухфазного реле.* На рис. 11.9, а изображена схема двухфазного реле переменного тока, имеющего две обмотки, расположенные на двух сердечниках ЭМ1 и ЭМ2 с общим якорем. Обмотки реле соединены параллельно друг другу. В цепь одной из обмоток включен конденсатор С, благодаря чему токи  $I_1$  и  $I_2$  в обмотках реле оказываются сдвинутыми по фазе на угол  $\pi/2$  (рис. 11.9, б). Так как токи в обмотках проходят через нуль в разные моменты времени, то результирующее тяговое усилие  $F_{\Sigma(p)}$ , действующее на якорь, никогда не обращается в нуль и имеет постоянное значение, т.е. не содержит переменной составляющей (рис. 11.9, в).

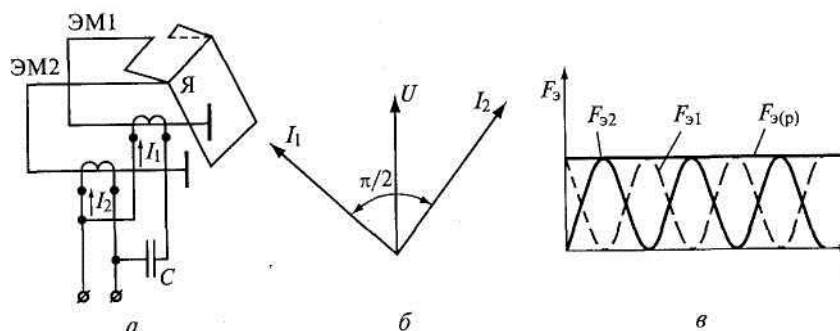


Рис. 11.9. Двухфазное реле переменного тока:  
а — схема включения; б — векторы токов в обмотках; в — результирующие усилия

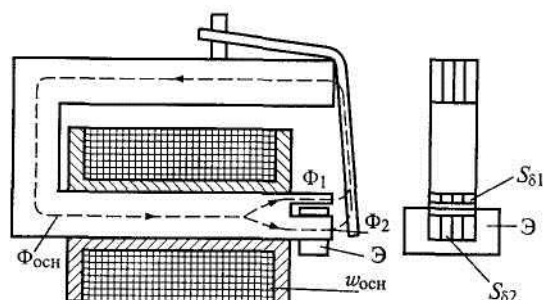


Рис. 11.10. Схема реле переменного тока с короткозамкнутым витком

*Применение короткозамкнутого витка (экрана),* охватывающего часть конца сердечника (расщепленный сердечник), является наиболее эффективным способом устранения вибрации якоря реле.

На рис. 11.10 изображена схема реле переменного тока с короткозамкнутым витком (контакты реле и выводы обмотки на схеме не показаны). Конец сердечника, обращенный к якорю, расщеплен на две части, на одну из которых надета короткозамкнутая обмотка — экран Э (один или несколько витков).

Принцип работы реле заключается в следующем. Переменный магнитный поток  $\Phi_{осн}$  основной обмотки  $w_{осн}$ , проходя через разрезанную часть сердечника, делится на две части. Часть потока  $\Phi_2$  проходит через экранированную половину полюса сечением  $S_{\delta 2}$ , в которой размещается короткозамкнутая обмотка (экран), а другая часть потока  $\Phi_1$  проходит через неэкранированную половину полюса сечением  $S_{\delta 1}$ . Поток  $\Phi_2$  наводит в короткозамкнутом витке ЭДС  $e_{кз}$ , которая создает ток  $i_{кз}$ . При этом возникает еще один магнитный поток  $\Phi_{кз}$ , который воздействует на магнитный поток  $\Phi_2$  и вызывает его отставание относительно потока  $\Phi_1$  по фазе на угол  $\varphi = 60 \dots 80^\circ$ . Благодаря этому результирующее тяговое усилие  $F$ , никогда не доходит до нуля, так как потоки проходят через нуль в разные моменты времени.

## 11.2. Поляризованные электромагнитные реле

В отличие от рассмотренных ранее нейтральных электромагнитных реле, у поляризованного реле направление электромагнитного усилия зависит от полярности сигнала постоянного тока в обмотке. Поляризация этих реле осуществляется при помощи постоянного магнита.

Существует много конструктивных разновидностей поляризованных реле, которые классифицируются по ряду признаков. По конструктивной схеме магнитной цепи различают реле с последовательной, параллельной (дифференциальной) и мостовой магнитными цепями, по числу



обмоток управления — одно и многообмоточные, по способу настройки контактов (числу устойчивых положений якоря) — двух- и трехпозиционные.

Поляризованные реле могут быть использованы также в качестве вибропреобразователей, но наибольшее распространение они получили в маломощной автоматике, особенно в следящих системах при управлении реверсивными двигателями.

К числу достоинств поляризованных реле относятся: высокая чувствительность, которая характеризуется малой мощностью срабатывания и составляет  $10^{-5}$  Вт; большой коэффициент управления; малое время срабатывания (единицы миллисекунд).

Недостатки по сравнению с нейтральными электромагнитными реле следующие: несколько сложнее конструкция; большие габаритные размеры, вес и стоимость.

В поляризованных реле используют дифференциальные и мостовые схемы магнитных цепей, которые имеют много разновидностей (название цепей определяется типом электрической схемы замещения электромагнитной системы). На рис. 11.11 изображено *поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи*.

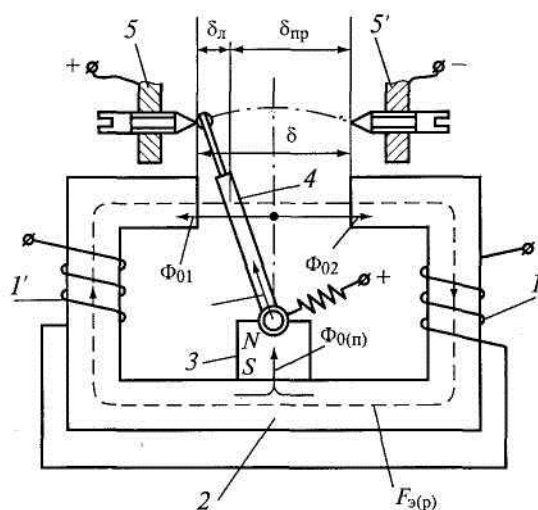


Рис. 11.11. Поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи:  
 $I, I'$  — намагничивающие катушки; 2 — ярмо; 3 — постоянный магнит;  
 4 — якорь; 5, 5' — контакты

На якорь реле действует два независимых друг от друга потока: поток  $\Phi_{0(п)}$ , создаваемый постоянным магнитом 3 и не зависящий от рабочего состояния схемы, в которую включено реле, и рабочий (управляющий) поток  $\Phi_{э(р)}$ , создаваемый намагничивающими катушками 1 и 1' и зависящий от тока, протекающего по их обмоткам.

Электромагнитное усилие, действующее на якорь 4, зависит, таким образом, от суммарного действия потоков  $\Phi_{э(р)}$  и  $\Phi_{0(п)}$ . Изменение направления электромагнитного усилия при изменении полярности тока в рабочей обмотке происходит вследствие того, что изменяется направление рабочего потока относительно поляризующего.

Поляризующий поток  $\Phi_{0(п)}$  проходит по якорю и разветвляется на две части —  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  в соответствии с проводимостями воздушных зазоров слева  $\delta_л$  и справа  $\delta_сп$  от якоря. В зависимости от полярности управляющего сигнала рабочий поток  $\Phi_{э(р)}$  вычитается из потока  $\Phi_{01}$  в зазоре слева от якоря и прибавляется к потоку  $\Phi_{02}$  справа от якоря (как показано на рис. 11.11), или наоборот. В случае, показанном на рисунке, якорь перекинется из левого положения в правое. При выключении сигнала якорь будет находиться в том положении, которое он занимал до выключения сигнала. Таким образом, результирующее электромагнитное усилие, действующее на якорь, будет направлено в сторону того зазора, где магнитные потоки суммируются.

В *поляризованном реле с мостовой схемой магнитной цепи* (рис. 11.12) силы притяжения якоря, включенного в одну из диагоналей этой схемы, действуют так же, как и в дифференциальной схеме, т.е. в воздушном зазоре с одной стороны якоря рабочий поток  $\Phi_{э(р)}$  направлен согласно с поляризующим потоком  $\Phi_{0(п)}$ , а с другой — встречно. Мостовые схемы поляризованных реле имеют более высокую стабильность параметров и устойчивость к внешним механическим воздействиям.

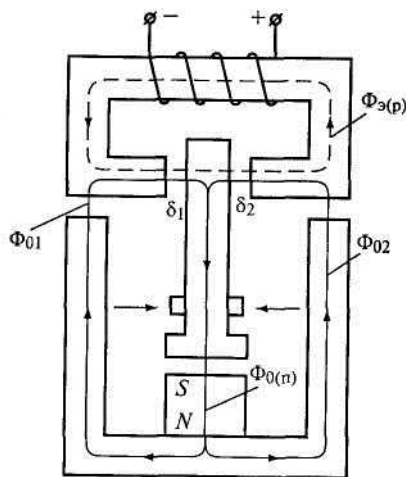


Рис. 11.12. Поляризованное реле с мостовой схемой магнитной цепи

Поляризованные реле выпускаются трех видов настройки. Реле, изображенное на рис. 11.11, является двухпозиционным. Если неподвижные контакты 5 и 5' симметрично расположены относительно нейтральной линии (якорь отрегулирован симметрично), то при выключении управляющего сигнала якорь реле остается в том же положении, которое он занимал при наличии управляющего сигнала. Повторное включение управляющего сигнала прежней полярности не вызовет изменения положения якоря. Если изменить полярность управляющего сигнала, то якорь перебросится в другое положение и останется в нем после снятия сигнала. Такая настройка называется нейтральной или двухпозиционной.

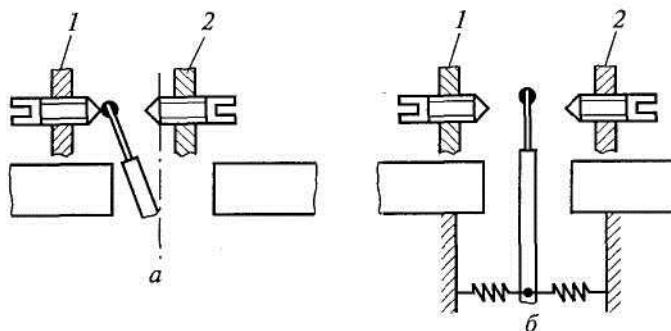


Рис. 11.13. Способы настройки контактов поляризованного реле: *a* — двухпозиционного с поджатием к одному из контактов; *б* — трехпозиционного; 1, 2 — контакты

Если (рис. 11.13, *a*) один из контактов 1 или 2 выдвинут за нейтральную линию, то реле является двухпозиционным с преобладанием к одному из контактов. В этом случае при выключенном реле якорь всегда прижат к левому контакту 1 (к правому контакту 2, если за нейтральную линию выдвинут левый контакт) и перебрасывается вправо лишь на время протекания в управляющей обмотке тока соответствующей полярности.

Трехпозиционное реле имеет симметрично расположенные от нейтральной линии неподвижные контакты (рис. 11.13, *б*). Якорь при отсутствии управляющего сигнала удерживается в среднем положении с помощью специальных пружин, расположенных с двух сторон, или закрепляется на плоской пружине, упругость которой создает устойчивое положение равновесия в среднем положении. При подаче сигнала в управляющую обмотку контакт на якоре замыкается с левым или правым контактом (в зависимости от полярности сигнала) и возвращается в нейтральное положение после снятия сигнала.

Поляризованные реле находят широкое применение в схемах автоматики благодаря своим характерным особенностям. Наличие нескольких обмоток позволяет использовать их в качестве логических элементов, небольшая мощность срабатывания — в качестве элементов контроля небольших электрических сигналов, малое время срабатывания и чувствительность к полярности входных сигналов — в качестве амплитудных модуляторов и демодуляторов. Благодаря высокой

чувствительности поляризованные реле часто используют в маломощных цепях переменного тока с включением через выпрямитель.

### 11.3. Контакты реле. Средства дуго- и искрогашения

Контакты, являясь важнейшим элементом реле, определяют надежность и срок их службы. По характеру работы контакты подразделяются на *замыкающие* (при отсутствии сигнала в обмотке реле они разомкнуты, а при наличии тока в управляющей обмотке они замыкаются) и *размыкающие* (при отсутствии сигнала они замкнуты и размыкаются при наличии сигнала в обмотке реле). В процессе работы реле контакты могут находиться в следующих состояниях: замкнутом, в процессе размыкания, разомкнутом и в процессе замыкания.

К тяжелым условиям работы контактов, при которых происходит наибольший износ, относятся их замкнутое состояние, когда через контакты течет весь ток нагрузки, и процесс размыкания, когда между контактами возникает дуга.

По мере увеличения усилия  $F_k$ , действующего на контакты, увеличивается площадь их соприкосновения, а переходное сопротивление уменьшается. При наличии на поверхности контактов окисной пленки необходимо, чтобы механическое давление в точках контакта было достаточным для ее разрушения.

Зависимость переходного сопротивления от контактного давления следующая:

$$R_k = a / (0,1F_k)^b,$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от свойств контактного материала и шероховатости контактной поверхности;  $F_k$  — контактное усилие;  $b$  — коэффициент, характеризующий форму контактов.

Контакты по форме контактирующих поверхностей и в зависимости от тока, на который они рассчитаны, делят на три основные группы (рис. 11.14):

*точечные* — конус и плоскость или полусфера и плоскость (теоретически с соприкосновением в одной точке), рассчитаны на небольшие токи;

*плоскостные* — плоскость и плоскость, рассчитаны на средние токи;

*линейные* — с соприкосновением по линии, рассчитаны на большие токи.

В реле малой и средней мощностей наибольшее распространение имеет точечный контакт, как обеспечивающий надежное электрическое соединение при небольшом контактном давлении. Контакты при этом закрепляются на упругих плоских пружинах. Существуют контакты специальных типов: вакуумные и ртутные.

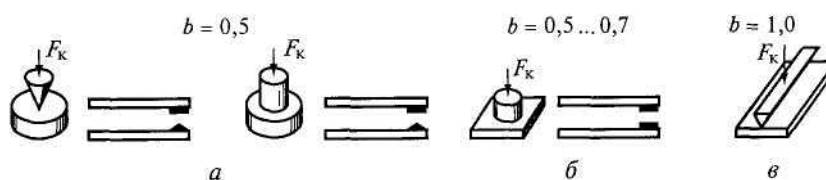


Рис. 11.14. Типы контактов реле:  
 $a$  — точечные;  $b$  — плоскостные;  $c$  — линейные

К материалам, из которых изготавливаются контакты, предъявляются особые требования: они должны быть механически прочными, твердыми, иметь высокие значения температуры плавления, обладать хорошей тепло- и электропроводностью, легко обрабатываться, быть устойчивыми против коррозии и эрозии, а также дешевыми.

На практике при выборе материала контактов пользуются следующими соображениями:

малые давления — 0,01... 0,03 Н (высокочувствительные реле) — платина;

давления от 0,05 до 1 Н (при малой частоте срабатывания) — серебро;

давления от 0,3 до 1 Н (при большей частоте срабатывания) — металлокерамические материалы;

давление свыше 1 Н (большая частота срабатывания) — вольфрам.

Основной причиной разрушения контактов, определяющей срок их службы, является дуговой разряд, возникающий при их размыкании. Причиной интенсивного разряда является наличие в управляемой

цепи реактивного сопротивления. Если оно имеет емкостный характер, то интенсивное искрение наблюдается при замыкании контактов. Если же управляемая цепь содержит значительную индуктивность, то особенно сильный и затяжной разряд возникает при разрыве этой цепи из-за образующегося перенапряжения на контактах. В большинстве случаев управляемая цепь содержит индуктивность.

Применяются два основных метода искро- и дугогашения: шунтирование индуктивности разрываемой цепи и шунтирование контактов. В обоих случаях, пока контакты замкнуты, в магнитном поле индуктивности накапливается энергия, которая при размыкании контактов расходуется не в дуге, а в шунтирующем устройстве. Методы искрогашения сводятся к созданию замедленного исчезновения тока.

На рис. 11.15 изображены основные схемы искрогашения. В схеме, представленной рис. 11.15, а, применяется метод шунтирования индуктивной нагрузки последовательным включением емкости с сопротивлением  $R_m$ . В момент размыкания контактов в контуре, образованном нагрузкой и шунтом, под действием энергии, запасенной в магнитном поле, возникает ток переходного процесса, который протекает еще некоторое время после размыкания контактов, предотвращая тем самым наведение высоких значений ЭДС самоиндукции.

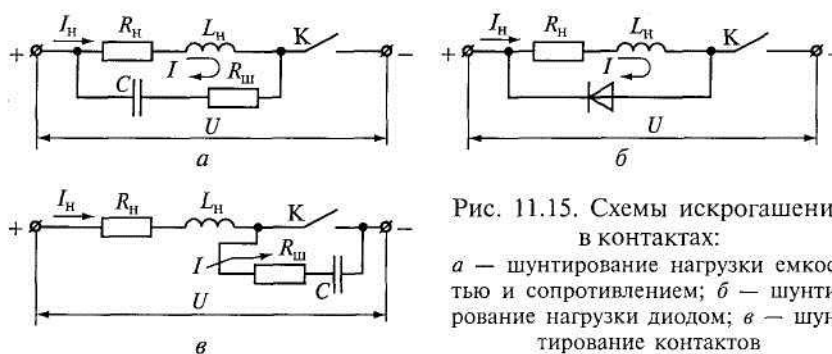


Рис. 11.15. Схемы искрогашения в контактах:  
а — шунтирование нагрузки емкостью и сопротивлением; б — шунтирование нагрузки диодом; в — шунтирование контактов

Энергия магнитного поля переходит в теплоту, которая выделяется на сопротивлении шунта  $R_m$ . Наличие конденсатора в схеме исключает прохождение тока нагрузки при замкнутых контактах, и, следовательно, исключаются потери энергии в сопротивлении шунта.

Для того чтобы в контуре  $L_H - R_H - C - R_{ш}$  не возникли автоколебания тока, емкость выбирают из условия  $R_H + R_m > 2\sqrt{L_H/C}$ .

В схеме на рис. 11.15, б диод производит аналогичное действие, т. е. шунтирует индуктивную нагрузку и пропускает ток переходного процесса  $I$ , который создает ЭДС самоиндукции в момент разрыва управляемой цепи. При замкнутых контактах диод заперт напряжением сети и не пропускает ток нагрузки.

На рис. 11.15, в изображена схема шунтирования контактов емкостью с сопротивлением. Здесь емкость исключает протекание тока нагрузки в шунтирующей цепи при разомкнутых контактах. Кроме того, устраняется расход энергии как в цепи нагрузки, так и в шунтирующем сопротивлении, поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток.

Цепочка  $R_{ш} - C$  создает путь мимо контактов для убывающего после их разрыва тока нагрузки и для рассеяния энергии, запасенной в магнитном поле цепи нагрузки. После размыкания контактов ток по мере заряда конденсатора от нуля до напряжения питания  $U$  постепенно уменьшается до нуля (т.е. резкого увеличения напряжения на контактах не возникает). Напряжение на контактах, как и на емкости, постепенно увеличивается до значения  $U$ . Ток в этом случае проходит мимо контактов через цепочку  $R_{ш} - C$  и дуговой разряд не возникает. Так как на практике емкость конденсатора выбирают в пределах  $0,5... 2$  мкФ, то зарядка конденсатора будет происходить медленно и, следовательно, напряжение на контактах будет также нарастать достаточно медленно.

#### 11.4. Реле времени

Реле времени создает регулируемую выдержку времени от момента подачи сигнала на срабатывание до момента замыкания (или размыкания) контактов. Программное реле — это разновидность реле времени с несколькими контактами, имеющими различные регулируемые, как правило, независимые

друг от друга выдержки времени. Например, существуют реле счета импульсов, контакты которых замыкаются после отсчета заранее заданного числа импульсов, подаваемых на катушку управления. Устройство таких реле имеет много общего с шаговыми искателями.

Для создания выдержки времени применяются электрический разрядный  $RC$  - контур, электромагнитные реле с короткозамкнутыми гильзами, механические механизмы (анкерный и планетарный), пневматические и др.

На рис. 11.16 дана схема реле времени с пьезокерамическим элементом. Пьезокерамические материалы, полученные, например, на основе титаната бария, обладают свойством изменять свои линейные размеры в электрическом поле. Пьезокерамический биморфный элемент (БЭ) состоит из двух прочно склеенных пластинок, на наружных поверхностях которых, а также в месте их соединения размещены металлические обкладки. Верхний слой элемента в электрическом поле удлиняется, нижний — укорачивается. В результате этот элемент, консольно закрепленный на одном конце, изгибается, что приводит к замыканию контакта К1. При снятии электрического поля с обкладок деформация биморфного элемента исчезает, контакт К1 размыкается, а контакт К2 замыкается.

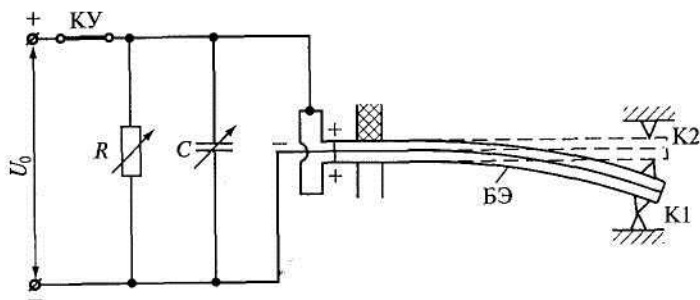


Рис. 11.16. Схема реле времени с пьезокерамическим элементом

При замкнутой кнопке управления (КУ) конденсатор  $C$  и обкладки БЭ заряжены до напряжения  $U_0$  и сам БЭ деформирован. При отключении КУ начинается разряд конденсатора  $C$  на резистор  $R$ . Напряжение на обкладках БЭ постепенно снижается, и его механическая деформация также постепенно исчезает.

Процесс разряда конденсатора описывается уравнением

$$RI + (1/C) \int Idt = 0.$$

Решение этого уравнения при начальном условии  $t = 0$  и  $I = I_0$  имеет вид

$$I = I_0 e^{-t/(RC)}.$$

Изменение напряжения на конденсаторе в обкладках БЭ описывается аналогичной зависимостью

$$U = U_0 e^{-t/(RC)}.$$

Допустим, что реле срабатывает и его контакт К2 замыкается, когда напряжение снизится до значения  $U_{сраб}$ . Тогда время срабатывания

$$t_{сраб} = RC \ln (U_0 / U_{сраб}).$$

Реле времени с электромагнитным замедлением (электромагнитное реле времени) основано на использовании вихревых токов для замедления срабатывания электромагнитной системы. На магнитопровод  $I$  (рис. 11.17) надета металлическая (обычно медная) гильза (или шайба)  $3$ , равнозначная короткозамкнутой обмотке с одним витком. Когда изменяется основной поток  $\Phi_0$ , созданный током катушки  $2$ , в гильзе  $3$  наводятся вихревые токи, поток  $\Phi_{вх}$  от которых имеет направление,

препятствующее изменению основного потока в соответствии с принципом инерции Ленца. Когда поток  $\Phi_0$  нарастает, поток  $\Phi_{вх}$  имеет противоположное направление, а когда  $\Phi_0$  снижается — направление  $\Phi_{вх}$  совпадает с  $\Phi_0$ .

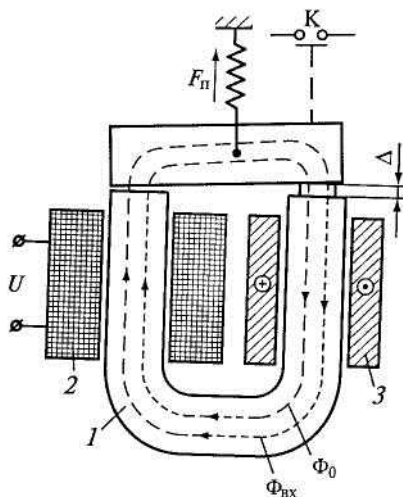
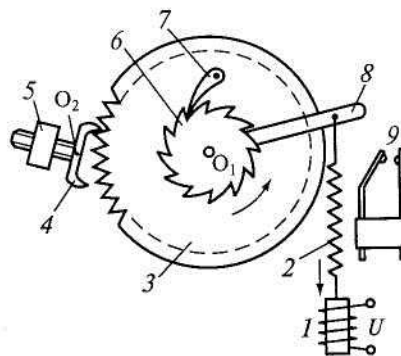


Рис. 11.17. Электромагнитное реле времени:  
1 — магнитопровод; 2 — катушка;  
3 — медная гильза

Широко распространены *реле времени с механическим замедлением*, в частности с часовым механизмом. В таких реле (рис. 11.18) при подаче напряжения на электромагнитный привод 1 растягивается пружина 2 и часовой механизм приходит в действие. Анкер 4, поворачиваясь вокруг оси  $O_2$ , «перепускает» зубчатый диск 3, который вращается вокруг оси  $O_1$ . Перемещающийся вместе с ним рычаг 8 в конце пути упирается в пластинчатый контакт 9 и замыкает его. Храповой механизм дает подвижной системе реле возможность возвратиться в исходное положение, когда будет снято напряжение электромагнитного привода 1. Возврат осуществляется специальной пружиной (на рисунке не показана). Изменяя расстояние от грузика 5 до оси  $O_2$  и массу грузика, можно регулировать момент инерции анкера и через него — выдержку времени реле.

Рис. 11.18. Реле времени с анкерным механизмом:  
1 — электромагнитный привод; 2 — пружина; 3 — зубчатый диск; 4 — анкер; 5 — грузик; 6 — храповое колесо; 7 — собачка; 8 — рычаг; 9 — пластинчатый контакт



Выдержка времени, создаваемая реле с часовым механизмом,

$$t = \alpha n z T_a,$$

где  $\alpha$  — угол поворота подвижной системы от начала движения до замыкания контактов;  $n$  — передаточное число зубчатого механизма;  $z$  — число зубьев ходового колеса;  $T_a$  — период колебаний анкера,

$$T_a = 2\pi \sqrt{J\varphi / (M_{дв} - M_{прд})},$$

здесь  $J$  — момент инерции анкера;  $\varphi$  — угол поворота анкера при колебаниях;  $M_{дв}$  — момент, создаваемый движущимися силами;  $M_{прд}$  — момент, создаваемый противодействующими силами.

В некоторых реле применяется пневматическое или гидравлическое замедление. Изменением сечения отверстия, через которое проникает воздух (или жидкость) из одного объема в другой, достигается регулировка выдержки времени. Наиболее высокие выдержки времени (до несколько часов) достигаются в реле с планетарным механизмами.

## 11.5. Тепловые реле

Измерительным органом теплового реле является *биметаллический элемент*, который при нагреве изгибается и переводит контактную систему в отключенное или включенное состояние. Биметаллический элемент представляет собой двухслойную пластинку из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). При нагреве слой термоактивного металла существенно расширяется, в то время как слой термоинертного металла почти не деформируется. Если один конец биметаллической пластинки жестко закрепить, то другой свободный конец ее будет изгибаться.

Пластинки биметаллического элемента, прочно соединенные между собой, должны иметь возможно большую разность ТКЛР, что будет увеличивать чувствительность теплового реле. Пределы упругости компонентов биметалла должны быть высокими. В этом случае для них допустима большая температура нагрева, не вызывающая остаточных деформаций.

В качестве материала с низким ТКЛР (термоинертного компонента) часто применяется сплав никеля с железом, называемый инваром. Инвар 36Н содержит 36 % никеля, инвар 39Н — 39 %. В качестве термоактивного компонента с высоким ТКЛР используются различные стали, латунь, константан и другие материалы.

На рис. 11.19 изображена конструктивная схема теплового реле. Биметаллическая пластина / такого реле упирается в верхний конец пружины 7. Нижний конец пружины давит на выступ пластмассовой колодки 4, которая может поворачиваться вокруг оси  $O_1$ .

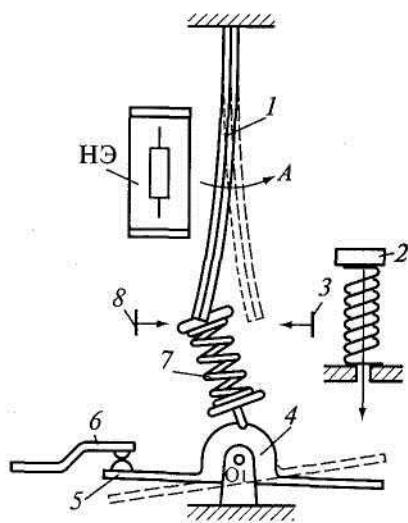


Рис. 11.19. Схема теплового реле:  
1 — биметаллическая пластина; 2 — кнопка ручного возврата; 3, 8 — упоры; 4 — пластмассовая колодка; 5 — подвижный контакт; 6 — неподвижный контакт; 7 — пружина

В положении, изображенном на рис. 11.19, движение пластины 1 и верхнего конца пружины /влево ограничено упором 8. Сила пружины 7 воздействует на выступ пластмассовой колодки 4 так, что она оказывается повернутой по часовой стрелке, а укрепленный на ней подвижный контакт 5 — замкнутым с неподвижным контактом 6.

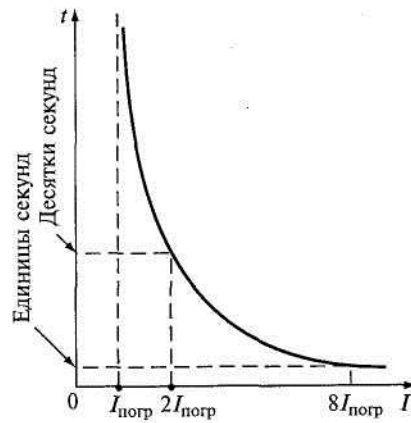


Рис. 11.20. Характеристика теплового реле

При протекании повышенного тока по нагревательному элементу — НЭ (или непосредственно по пластине  $I$ ) — биметаллическая пластинка  $I$  нагревается и ее нижний конец перемещается в направлении стрелки  $A$ . В результате верхний конец пружины  $7$  переходит вправо и создаваемая ею сила воздействует на колодку  $4$  так, что она поворачивается на некоторый угол против часовой стрелки, а контакты  $5$  и  $6$  размыкаются. Упоры  $3$  и  $8$  ограничивают перемещение нижнего конца пластинки  $I$ . Возврат реле в исходное положение происходит самопроизвольно, когда биметаллическая пластинка остынет. В других конструкциях перевод реле в исходное положение осуществляется кнопкой ручного возврата  $2$ .

На рис. 11.20 дана типичная для тепловых реле зависимость времени срабатывания  $t$  от тока  $I$ . При минимальном (пограничном) токе срабатывания  $I_{\text{погр}}$  время срабатывания велико, с увеличением тока оно уменьшается.

## Глава 12 ЭЛЕМЕНТЫ КОНТАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

### 12.1. Общие сведения

Основным аппаратом, производящим замыкание и размыкание главных цепей двигателя при автоматическом управлении, является электромагнитный контактор, представляющий собой выключатель, включаемый и выключаемый при помощи электромагнита. Контакторы обычно применяют одновременно с различными реле, например реле тока, напряжения и др. Контакты реле включают в цепь электромагнитов, что дает возможность производить включение и выключение силовых цепей с током от 10 до нескольких сотен ампер и напряжением до нескольких сотен вольт. Контакторы выполняют как для постоянного, так и для переменного тока, и они могут быть одно- и многополюсными. Контакторы постоянного тока имеют обмотку, питающуюся постоянным током напряжением ПУ или 220 В и потребляют мощность 20... 30 Вт. Обмотки контакторов переменного тока питаются переменным напряжением 127, 220 или 380 В и служат для коммутации цепей переменного тока.

Для автоматического пуска и остановки двигателей применяют магнитные пускатели.

### 12.2. Электромагнитные контакторы

На рис. 12.1 схематически изображен однополюсный контактор; он состоит из стального сердечника  $1$ , на который надета катушка  $2$ .



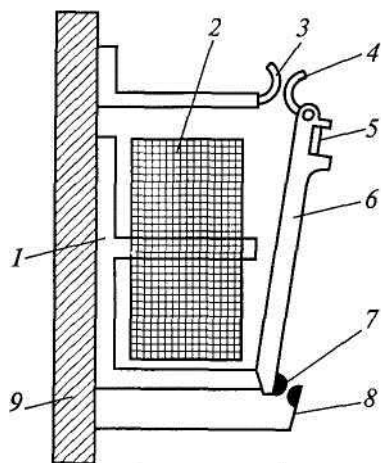


Рис. 12.1. Схема однополюсного контактора:

1 — сердечник; 2 — катушка; 3, 4 — контакты соответственно неподвижный и подвижный; 5 — пружина; 6 — якорь; 7, 8 — блок-контакты; 9 — изолирующая основа

При включении тока в катушке якорь 6 притягивается к сердечнику и замыкает главные линейные притирающиеся контакты: 3 — неподвижный и 4 — подвижный. Пружина 5 обеспечивает надежность прикосновения контактов. Вспомогательные блок-контакты 7 и 8 служат для цепей обмоток других контакторов, реле и цепей сигнализации. Число вспомогательных контактов может быть различным, причем они могут быть размыкающими или замыкающими.

При выключении катушки якорь под действием собственного веса (при вертикальном расположении контактора) отпадает и выключает цепь тока; одновременно размыкаются контакты 7 и 8. Включение контакторов может осуществляться специальными замыкателями. Все детали контактора монтируются на изолирующей основе 9. Выбор контакторов производится исходя из напряжения в цепи главных контактов и блок-контактов, а также значения и длительности протекания тока нагрузки. Эти данные приводятся в каталогах и справочниках.

### 12.3. Схемы блокировки и взаимной блокировки реле

На рис. 12.2 изображены типовые релейные схемы, наиболее часто встречающиеся в устройствах автоматики.

*Схема экономичного включения реле* (см. рис. 12.2, а). При срабатывании реле Р его собственные блок-контакты (БК) размыкаются и в цепь обмотки включается добавочное сопротивление  $R_d$ , которое до срабатывания реле было замкнуто накоротко замыкающим контактом. При этом ток в цепи резко уменьшается, что делает схему экономичной, так как в этом случае уменьшаются потери энергии в цепи обмотки, а следовательно, и ее нагрев. Уменьшение тока объясняется тем, что для удержания якоря в притянутом положении требуется значительно меньший ток в обмотке реле, чем ток срабатывания. Поэтому если реле должно находиться долго в притянутом состоянии, то выгодно после его срабатывания уменьшить значение тока в обмотке до минимального, необходимого для удержания якоря.

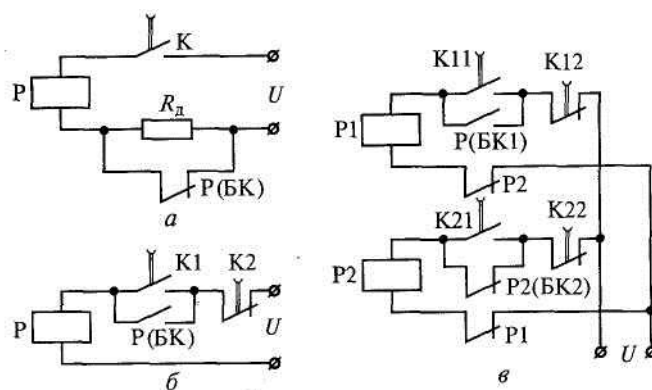


Рис. 12.2. Схемы экономичного включения реле (а), самоблокировки реле (б) и взаимной блокировки двух реле (в)

Схема самоблокировки реле (см. рис. 12.2, б). При нажатии кнопки К1 реле Р срабатывает и своим замыкающим контактом шунтирует кнопку К1; поэтому при отпускании кнопки К1 цепь обмотки реле остается замкнутой.

Для повышения экономичности схемы можно последовательно с контактором реле включить добавочное сопротивление. Для отключения реле достаточно нажать кнопку К2, при этом обмотка реле обесточится и его контакты, шунтирующие кнопку К1, разомкнутся. Эта схема нашла применение при кнопочном управлении каким-либо устройством.

Схема взаимной блокировки двух реле (см. рис. 12.2, в). Эта схема не допускает одновременного включения двух реле, что достигается введением в цепь обмотки одного из них размыкающих контактов другого. Обозначение каждого контакта показывает, какому реле этот контакт принадлежит. Например, если время срабатывания реле Р1 меньше, чем время срабатывания реле Р2, то при одновременном нажатии двух кнопок К11 и К21 срабатывает только реле Р1 и своими контактами размыкает цепь обмотки реле Р2. Если же одновременно срабатывают реле Р1 и Р2, то это приводит к выходу системы из строя (например, если одно реле служит для включения вращения двигателя в одном направлении, а другое реле — в другом).

## 12.4. Магнитные пускатели

Существует много видов автоматических схем управления электрическими двигателями, пуск и остановка которых осуществляются при помощи кнопок. Такие схемы выполняются в виде отдельных устройств, называемых магнитными пускателями. Магнитный пускатель — это один из видов контакторов, предназначенный для пуска трехфазных асинхронных двигателей.

На рис. 12.3, а изображена схема управления электрическим двигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором с помощью *неревверсивного магнитного пускателя*. Эта схема состоит из контактора с тремя главными линейными контактами Л1, одного блок-контакта Б К, служащего для его самоблокировки после срабатывания при нажатии кнопки К1 (Пуск), и двух биметаллических тепловых реле РТ1 и РТ2 для защиты двигателя от перегрузки. Схема работает таким образом. Цепь управления присоединяется к цепи главного тока перед главными контактами пускателя (точки А и Б), в противном случае при отключенном контакторе цепь управления осталась бы без напряжения. При нажатии кнопки К1 (Пуск) образуется цепь: фаза А — контакт теплового реле КРТ1 — втягивающая катушка контактора Р — контакт теплового реле КРТ2 — нажатая кнопка К1 — замкнутая кнопка К2 (Стоп) — фаза Б.

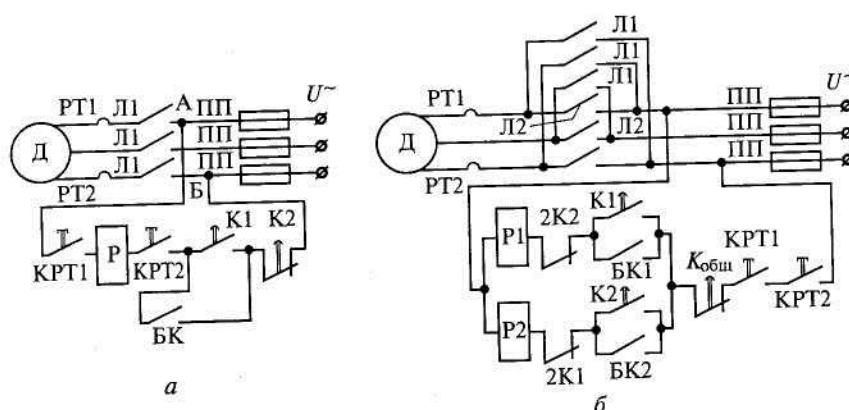


Рис. 12.3. Схемы магнитных пускателей для управления электродвигателями:  
а — нереверсивная; б — реверсивная

Если через катушку контактора пропустить ток, то она замыкает главные контакты и замыкающий блок-контакт БК. В результате электродвигатель Д, присоединенный к сети, начинает вращаться. При замыкании блок-контакта БК пусковая кнопка К1 шунтируется и может быть отпущена, так как ток в катушку Р проходит теперь через блок-контакт БК. При нажатии кнопки К2 (Стоп) цепь катушки обесточивается, поэтому размыкаются главные линейные контакты Л1 и блок-контакт БК, а электродвигатель останавливается. Тот же эффект достигается при отключении напряжения в цепи главного тока при снижении его до 65 % от номинального. Теперь магнитный пускатель

самопроизвольно включиться не может, так как цепь катушки Р разомкнута контактами К1 и БК. Поэтому повторная подача напряжения в цепь главного тока не вызывает включения электродвигателя до тех пор, пока не будет вновь нажата кнопка К1 (Пуск). Таким образом, обеспечивается так называемая «нулевая защита».

Тепловые реле РТ1 и РТ2 включены в цепь главного тока, и через них проходит весь ток электродвигателя. Эти реле имеют размыкающие контакты КРТ1 и КРТ2, включенные последовательно с катушкой Р. При нормальной нагрузке двигателя контакты реле КРТ1 и КРТ2 замкнуты. При перегрузке двигателя одно или два реле (РТ1, РТ2) размыкают свои контакты КРТ1 и КРТ2, что вызывает обесточивание цепи катушки Р. Контакты Л1 и БК размыкаются, и электродвигатель останавливается. Дальнейший принцип работы теплового реле описан ранее. Так как тепловые реле обладают большой тепловой инерцией, то они не могут защитить электродвигатель при коротких замыканиях. Поэтому включение плавких предохранителей ПП необходимо даже при наличии тепловых реле.

При частом реверсировании двигателя применяется *реверсивный магнитный пускатель* (рис. 12.3, б). Реверсивная схема собирается по принципу схемы самоблокировки (см. рис. 12.2, б).

При включении первого магнитного пускателя электродвигатель Д вращается в одном направлении, а при выключении первого пускателя и включении второго — в обратном.

Одновременное включение обоих пускателей недопустимо, так как это может привести к короткому замыканию в цепи главного тока. Чтобы предотвратить включение второго пускателя, когда уже включен первый, в цепь катушки Р2 второго пускателя включают размыкающий контакт 2К1 первого пускателя, и наоборот. Поэтому при включении первого пускателя его контакт 2К1 размыкается и нажатие кнопки К2 не приводит к включению второго пускателя.

Для реверсирования двигателя необходимо сначала отключить работающий двигатель, а затем пустить его в обратном направлении. В схеме предусматривается только одна кнопка «Стоп» —  $K_{общ}$ , включенная в неразветвленную часть цепи, куда включены контакты тепловых реле КРТ1 и КРТ2.

## 12.5. Автоматические выключатели

Автоматические выключатели (автоматы), как правило, предназначены для отключения поврежденного участка сети при возникновении в нем аварийного режима (короткого замыкания, тока перегрузки, пониженного напряжения). Термическое и электродинамическое (при коротком замыкании) воздействия повышенных токов могут привести к выходу из строя электрооборудования. В условиях пониженного напряжения, если механический момент нагрузки на валу остается неизменным, через работающие двигатели также будет протекать повышенный ток.

Автомат в отличие от контактора имеет узел элементов защиты, автоматически обнаруживающий появление в сети ненормальных условий и дающий сигнал на отключение.

Различают несколько типов автоматов: *универсальные* (работают на постоянном и переменном токе), *установочные* (предназначаются для установки в общедоступных помещениях и выполняются по типу установочных изделий), *быстродействующие* постоянного тока и *гашения магнитного поля* мощных генераторов.

На рис. 12.4 дана условная конструктивная схема универсального автомата в упрощенном изображении. Автомат коммутирует электрическую цепь, подсоединяемую к выводам *а* и *б*. В указанном положении автомат отключен и силовая электрическая цепь разомкнута. Чтобы включить автомат, необходимо повернуть по часовой стрелке рукоятку 3. При этом создается усилие, которое, перемещая рычаги 4 и 5 вправо, будет поворачивать основную несущую деталь 6 автомата вокруг неподвижной оси О по часовой стрелке. В результате замыкаются и включают цепь тока сначала дугогасительные 8 и 10, а затем главные 7 и 11 контакты автомата. После этого вся система остается в крайнем правом положении, в котором фиксируется и удерживается специальной защелкой (на рисунке не показана).

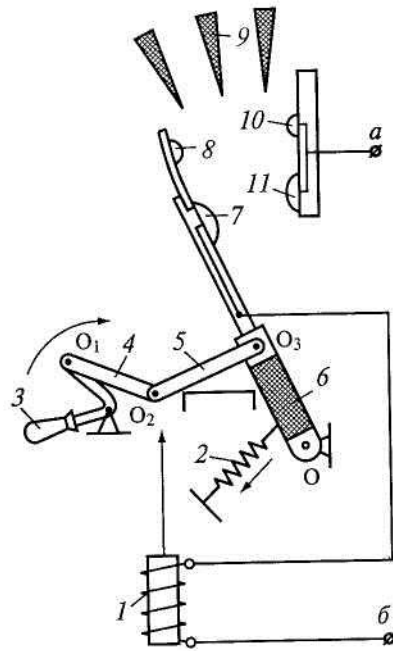


Рис. 12.4. Схема автоматического выключателя:

1 — катушка расцепителя; 2 — пружина; 3 — рукоятка; 4, 5 — рычаги; 6 — несущая деталь; 7, 8, 10, 11 — контакты; 9 — дугогасительная камера

Отключающая пружина 2 взводится при включении автомата. При подаче команды на отключение она отключает автомат. Когда по катушке 1 электромагнитного расцепителя протекает ток короткого замыкания, на его якоре создается электромагнитная сила, переводящая рычаги 4 и 5 вверх за мертвую точку, в результате чего автомат пружиной 2 отключается автоматически. При этом контакты размыкаются и возникающая на них дуга выдувается в дугогасительную камеру 9 и гасится в ней. Система рычагов 4 и 5 выполняет функции механизма свободного расцепления, который в реальных автоматах имеет более сложное устройство. Механизм свободного расцепления позволяет автомату отключаться в любой момент времени, в том числе и в процессе включения, когда включающая сила воздействует на подвижную систему автомата. Если рычаги 4 и 5 переведены вверх за мертвую точку, то жесткая связь между приводной и подвижной системами нарушается. Мертвая точка соответствует такому положению рычагов, когда прямые линии  $O_1O_2$  и  $O_2O_3$ , соединяющие оси вращения, совпадают по направлению друг с другом. В этом случае автомат немедленно отключается за счет действия возвратной пружины 2, независимо от того, воздействует ли включающая сила на приводимую систему автомата или нет.

При отключении автомата первыми размыкаются главные контакты 7 и 11 и весь ток переходит в параллельную цепь контактов 8 и 10 с накладками из дугостойкого материала. На главных контактах дуга не может возникнуть, так как они не должны обгорать, поэтому дугогасительные контакты размыкаются, когда главные контакты расходятся на значительное расстояние.

## Глава 13

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

#### 13.1. Общие сведения о гидравлических системах и элементах

В настоящее время гидравлические системы и элементы автоматики в основном используются в силовых устройствах и приводах управления. Например, в системах автоматики на самолетах гидравлические элементы широко используются для уборки и выпуска шасси, закрылков, аэродинамических тормозов, в управлении при рулежке самолета, для торможения колес шасси и других устройствах.

Любую гидросистему можно разделить на следующие составные части:

- энергетическая часть, в которую входят емкости с рабочей жидкостью (насосы, фильтры, гидроаккумуляторы, гидробаки и т.д.);
- агрегаты — потребители гидравлической энергии (гидроусилители органов управления, силовые цилиндры и гидромоторы);
- коммуникации и агрегаты гидросистемы (трубопроводы, шланги, поворотные соединения, краны, переключатели, сигнализаторы давления и т.д.).

Размещение (компоновка) гидросистемы определяется необходимостью непосредственной близости ее энергетической части к источникам энергии, которыми служат основные двигатели, осуществляющие привод гидравлических насосов, и непосредственной связи агрегатов — потребителей гидравлической энергии с органами управления и узлами механизации.

Применение гидравлических приводов обусловлено требованиями минимизации массы и габаритных размеров агрегатов и систем. Гидравлические насосы, двигатели, силовые устройства в 4 — 5 раз легче аналогичных электрических устройств таких же мощностей и усилий.

Положительными качествами гидравлических систем являются также простота, надежность, долговечность, широкий температурный режим работы.

Гидравлические системы в «чистом» виде в настоящее время находят все более редкое применение, поскольку уступают электрическим схемам в удобстве передачи командных импульсов и требуемой массе трубопроводов (по сравнению с электропроводами) при передаче одинаковой мощности. В целях минимизации массы развитие гидравлических систем пошло по пути создания электрогидравлических командных и исполнительных агрегатов. Поэтому современная гидросистема по существу является электрогидравлической.

Для исполнения команд по управлению агрегатами гидравлическая система должна содержать в себе устройства, которые обеспечивают получение управляющей команды, преобразуют управляющий сигнал в силовое воздействие и сигнализируют об исполнении управляющих команд. Эти функции невозможно выполнить без энергетической установки и рабочего тела для передачи энергии, а также преобразователей сигналов управления и сигнализации.

Так, например, на самолете Ан-124 «Руслан» гидросистема состоит из четырех автономных систем. Каждая из систем имеет свой основной источник питания — насос переменной подачи с приводом от основного (собственного) двигателя самолета. Насосы питают рабочей жидкостью приводы систем управления самолетом и механизации крыла, механизм поворота колес передней опоры, сети управления передними и задними грузовыми люками. Тормоза подключены к трем автономным гидросистемам для повышения надежности. В случае снижения давления в напорных магистралях ниже допустимого для обеспечения нормальной работы основных потребителей другие потребители получают меньше рабочей жидкости или вообще отключаются. В каждой автономной гидравлической системе кроме основных насосов предусмотрены резервные источники питания — автоматически или вручную включаемые гидротрансформаторы, турбонасосная установка и электропроводная насосная станция.

Гидравлическую систему в общем случае характеризуют:

- состав функциональных потребителей;
- применяемая рабочая жидкость и величина ее давления;
- тип применяемых насосов для создания давления (плунжерные, шестеренчатые, лопастные и т.д.);
- исполнительные силовые приводы (гидроцилиндры, гидроусилители, гидродвигатели и т.д.);
- устройства, преобразующие поступающие командные сигналы (электрические, пневматические, механические и др.) в гидравлические командные воздействия (открытие и закрытие кранов, перемещение плунжеров, открытие или закрытие клапанов);
- устройство и емкость баков для рабочей жидкости;
- фильтры для защиты агрегатов от воздействия загрязненной жидкости и очистки жидкости;
- способ уплотнения подвижных и неподвижных соединений (марка применяемой резины, конструкцией уплотнительных колец, манжет и т.д.);
- допустимый температурный режим работы агрегатов, рабочей жидкости, уплотнений и способы защиты от теплового воздействия, а также способ охлаждения рабочей жидкости (применение теплообменных радиаторов или естественное рассеивание теплоты от гидробака).

Все агрегаты, входящие в гидросистему, можно объединить в следующие функциональные группы: насосы, исполнительные гидравлические приводы, гидравлические баки, агрегаты управления, предохранительные устройства, фильтры, трубопроводы.

### 13.2. Характеристики рабочих жидкостей

Рабочим телом в гидравлической передаче является жидкость, свойства которой определяют рабочий процесс передачи гидравлической энергии. Физические свойства рабочей жидкости характеризуются удельным весом, сжимаемостью, вязкостью. Кроме этих параметров для оценки жидкости как рабочего тела в гидропередачах необходимо учитывать ее стойкость к механическим воздействиям, химическую стойкость при высоких и низких температурах рабочего диапазона гидросистемы, смазывающие качества и стабильность смазывающих свойств, степень агрессивности к металлам и уплотнительным элементам конструкции, уровни пожароопасности и токсичности при воздействии на человека (самой жидкости и ее паров).

Рассмотрим свойства двух наиболее распространенных рабочих жидкостей: масла — АМГ-10 и жидкости 7-50С-3, применяемых в современных гидросистемах самолетов. Их плотности  $\rho$  (удельные веса  $\gamma$ ) равны соответственно  $833 \text{ кг/м}^3$  ( $8163,94 \text{ Н/м}^3$ ) и  $921 \text{ кг/м}^3$  ( $9031,92 \text{ Н/м}^3$ ). Для сравнения плотность (удельный вес) воды составляет  $999 \text{ кг/м}^3$  ( $9796,84 \text{ Н/м}^3$ ).

При нагреве гидравлическая жидкость расширяется, как и все жидкости, изменяя *удельный вес* и *плотность*. Уравнение Менделеева устанавливает связь между изменением температуры и массой единицы объема жидкости:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{15}}{1 + \beta_t(t - 15)},$$

где  $\gamma_t$  — искомый удельный вес при заданной температуре  $t$ ,  $\gamma_{15}$  — удельный вес при  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\beta_t$  — коэффициент объемного расширения (для гидрожидкостей  $\beta_t = 0,0007$ ).

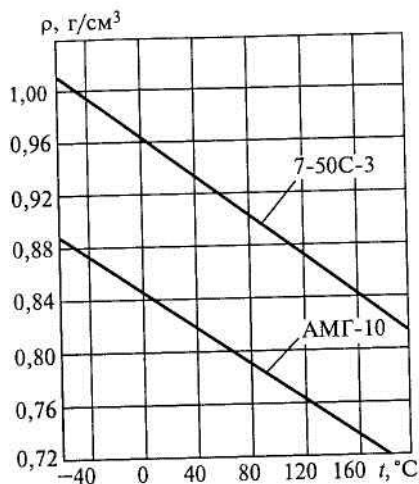


Рис. 13.1. Зависимости плотности масла АМГ-10 и рабочей жидкости 7-50С-3 от температуры

По графикам изменения плотностей масла АМГ-10 и рабочей жидкости 7-50С-3 в зависимости от температуры (рис. 13.1) можно определить увеличение объема залитой в гидросистему жидкости и оценить изменение уровня жидкости в баке при нагреве. Расширение жидкости при нагреве необходимо учитывать в случае, когда она заперта в цилиндре гидравлическим краном, так как давление в замкнутой системе может превысить допустимые напряжения в трубопроводах и цилиндре и привести к их разрушению. Плотность гидрожидкости изменяется приблизительно на 7 % при изменении температуры на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Сжимаемость жидкости* определяется объемным модулем упругости  $E$ , который для гидрожидкостей находится в пределах от 1350 до 1750 МПа. Для воды при относительно небольших

давлениях модуль упругости принят равным 1962 МПа. Сжимаемость жидкости характеризуется коэффициентом относительного сжатия

$$\beta = \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V},$$

где  $V$  — объем жидкости;  $\Delta V$  — изменение объема  $V$  при изменении давления  $\Delta p$ .

Следовательно, коэффициент  $\beta = 1/E$ .

Для принятых давлений в гидросистемах можно считать  $\beta = 0,00007$ . Это означает, что при изменении давления на  $10^5$  Па относительное изменение объема  $\Delta V/V = 0,00007$ . Во многих расчетах сжимаемостью жидкости можно пренебречь в виду ее малого значения.

Одно из важнейших свойств жидкости называется вязкостью. *Вязкость* — это способность жидкости сопротивляться скольжению ее слоев друг относительно друга при движении.

Сила трения, которая приходится на единицу поверхности соприкосновения двух скользящих слоев жидкости, при условии, что градиент скорости по нормали равен единице, называется *коэффициентом динамической вязкости*  $\mu$ .

Таблица 13.1

**Кинематическая вязкость масла АМГ-10 и рабочей жидкости 7-50С-3 при различных температурах**

Наименование гидрожидкости	Вязкость кинематическая $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , при температуре, °С					
	-60	-50	20	100	150	200
АМГ-10	3200...4100	960...1250	20...23	4,5...5,0	2,5...2,8	—
7-50С-3	3500...3900	1100...1370	22...24	3,8...4,1	—	Не менее 1,5

Отношение коэффициента динамической вязкости  $\mu$  к плотности  $\rho$  называется *коэффициентом кинематической вязкости*  $\nu$ . Величины  $\nu$ ,  $\mu$  и  $\rho$  связаны между собой следующим соотношением:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Вязкость жидкости обусловлена силами молекулярного сцепления, которые с увеличением температуры уменьшаются, уменьшается при этом и вязкость (табл. 13.1).

Физико-механические, смазывающие и другие свойства минеральных масел и их смесей, применяемых в гидросистемах, ухудшаются в процессе эксплуатации вследствие их окисления при контакте с воздухом, эмульсирования и вспенивания при попадании в них воздуха и влаги. Это ухудшение свойств рабочих жидкостей проявляется в уменьшении их вязкости, загрязнении отложениями в виде смол, частичками металла, пыли и т.д. При этом наиболее эффективным способом продления эксплуатационных качеств жидкости является ее непрерывная и тщательная фильтрация.

Кроме того, гидравлические жидкости растворяют газы, которые в дисперсном состоянии практически не оказывают механического воздействия на работу гидросистемы. Однако при уменьшении давления в какой-либо зоне растворенные газы выделяются в виде мелких пузырьков, объединяясь в более крупные и образуя газовые полости, которые ухудшают механические свойства гидросистемы. Разные газы обладают различной растворимостью в жидкостях, применяемых в гидросистемах. Так, растворимость воздуха составляет около 11 % от объема жидкости; азота — 13 %; диоксида углерода — 85 %.

Засорение жидкости воздухом ухудшает условия работы насосов и всей гидросистемы в целом, нарушает плавность движения гидроприводов, ухудшает смазку и вызывает коррозию деталей гидроагрегатов.

В дополнение к изложенным свойствам гидрожидкостей АМГ-10 и 7-50С-3 приведем для них следующие технические данные. Масло АМГ-10 готовят загущением маловязкой нефтяной фракции.

Оно содержит антиокислительную присадку; оно некоррозионно и нетоксично. Работоспособно масло при температуре от -60 до 125 °С в контакте с воздухом или азотом и кратковременно до 150°С только в контакте с техническим азотом. В качестве уплотнителей при работе с маслом используются резины из нитрильного каучука марок В-14, ИРП-1078, ИРП-1353. Жидкость АМГ-10 — однородная, прозрачная, красного цвета.

Рабочая жидкость 7-50С-3 представляет собой смесь синтетических продуктов — полисилоксанов и органических эфиров. Содержит антиокислительную и противокоррозионную присадки. Работает в диапазоне температур от -60 до 175 °С в контакте с воздухом и техническим азотом и кратковременно до 200 °С в контакте с азотом. Жидкость малотоксична, имеет повышенное воздействие на медь, кадмиевые и фосфатные покрытия. Применяется с уплотнительной резиной марки ИРП-1353 и фторкаучуком ИРП-1287. Жидкость 7-50С-3 — прозрачная, цвет не регламентируется.

### 13.3. Гидравлические насосы и двигатели

В системах гидроавтоматики для создания давления и расхода рабочей жидкости для гидроприводов, а также для преобразования напора рабочей жидкости в механическую энергию применяются *поршневые роторные насосы и двигатели с аксиальным расположением цилиндров*. Роторные насосы и двигатели являются механизмами обратимого действия, т. е. насос может работать как двигатель, если к нему подводить рабочую жидкость под давлением, а с вала снимать полезную мощность.

Требование уменьшения массы и объема агрегатов гидросистемы обусловило применение высоких давлений и больших скоростей вращения насосов гидросистемы. Насосы создают давление рабочей жидкости 20...30 МПа при скорости вращения ротора до 5000 об/мин, обеспечивая скорость подачи жидкости от 4 до 90 л/мин. Кроме обеспечения необходимого давления и расхода (подачи) при минимальных массе и объеме насосы должны обеспечить на выходе минимальную пульсацию давления и расхода, чтобы не вызвать вибрационные напряжения в трубопроводах и агрегатах, а также надежно работать в широком диапазоне температур от -65 до 180 °С.

Для обеспечения бескавитационной работы насосов давление жидкости на входе должно быть не менее 0,2 МПа. Обычно давление на входе обеспечивается за счет поддавливания, в результате которого в гидробаке поддерживается давление в диапазоне 0,3... 0,5 МПа.

*Поршневые (плунжерные) насосы с аксиальным расположением цилиндров* могут быть разделены на две основные группы:

- поршневые насосы с наклонной (качающейся) шайбой, ось цилиндрического блока которых совпадает с осью входного вала, а ход поршня зависит от угла наклона опорной шайбы относительно входного вала;
- поршневые насосы с наклонным цилиндрическим блоком, ось входного вала которых совпадает с осью опорной шайбы, а ход поршня зависит от угла наклона цилиндрического блока относительно оси входного вала.

В обеих группах цилиндры блока вращаются относительно корпуса насоса, что позволяет просто осуществить торцевое распределение жидкости при входе ее в цилиндр и выталкивании жидкости из цилиндра поршнями. Число цилиндров в цилиндрическом блоке колеблется от 7 до 9. Цилиндрический блок открытой стороной цилиндров скользит по неподвижному торцевому распределительному диску, на поверхности которого имеются два серповидных окна для входа и выхода жидкости. Серповидные окна расположены так, что распределительные перемычки между ними соответствуют крайним (мертвым) положениям поршней в цилиндрах. Ширина перемычки несколько больше диаметра отверстия в цилиндре. Схемы, поясняющие работу аксиально-поршневого насоса, показаны на рис. 13.2.

Подача насоса регулируется изменением угла наклона оси шайбы относительно цилиндрического блока. Угол наклона регулируется поворотом шайбы относительно цилиндрического блока либо, наоборот, наклоном цилиндрического блока относительно неподвижной опорной шайбы и изменяется от 5 до 20°.

Поршневые насосы — качающие устройства объемного типа. Их теоретическая подача (рабочий объем) за один оборот равна объему, описываемому поршнями:

$$g = \frac{\pi d^2 h z}{4} 10^{-6},$$



где  $d$  — диаметр цилиндра;  $h$  — ход поршня;  $z$  — число поршней в цилиндрическом блоке.  
Теоретический объемный расход

$$Q = gn,$$

где  $n$  — частота вращения ротора насоса.

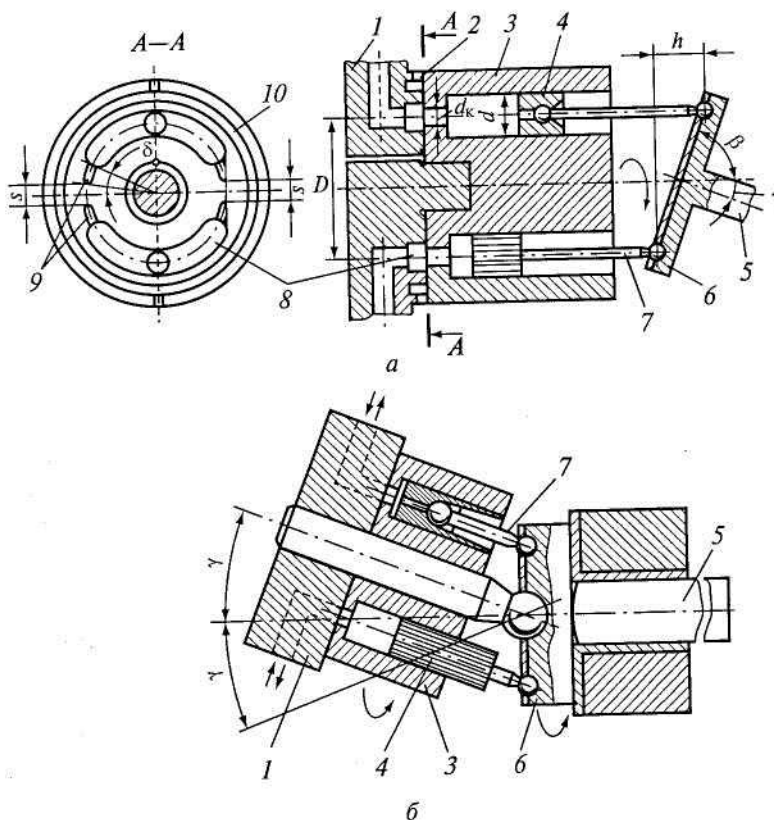


Рис. 13.2. Схемы аксиальных насосов:  
*a* — с изменением угла наклона шайбы; *b* — с изменением положения цилиндрического блока; 1 — неподвижный упорно-распределительный диск; 2 — канавка дренажа; 3 — цилиндрический блок; 4 — поршень; 5 — опорная шайба; 6 — ведущий диск; 7 — поршневой шатун; 8 — окно; 9 — распределительные перемычки для смягчения нарастания давления; 10 — канавка

На рис. 13.3 показан принцип работы аксиального насоса с автоматическим регулированием подачи за счет изменения угла наклона шайбы. Чувствительным элементом здесь служит мембрана 4, действующая при повышении давления выше заданного значения на клапан 5, управляющий давлением в правой полости силового цилиндра, поршень которого изменяет угол наклона опорной шайбы 3. При открытии клапана 5 давление в правой полости силового цилиндра 7, питающейся из полости нагнетания насоса через дроссельное отверстие 2 в поршне, снижается и поршень перемещается под действием давления в левой полости вправо, при этом подача насоса уменьшается. При закрытии клапана 5 давления в правой и левой полостях силового цилиндра 1 выравниваются и его поршень, перемещаясь влево под действием пружины и давления жидкости на неуравновешенную площадь поршня силового цилиндра 1, поворачивает опорную шайбу 3 в положение с максимальным углом наклона, а следовательно, устанавливает насос на максимальную подачу.

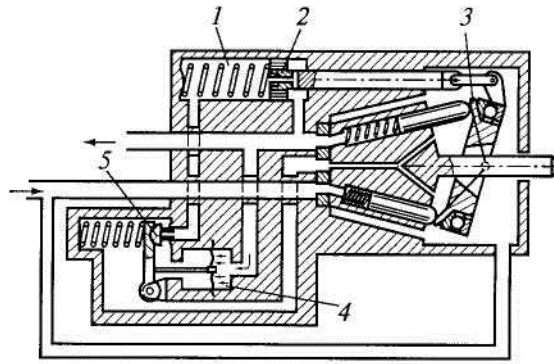


Рис. 13.3. Схема аксиального насоса с автоматическим регулированием подачи изменением наклона шайбы:  
 1 — силовой цилиндр; 2 — дроссельное отверстие; 3 — опорная шайба; 4 — мембрана; 5 — клапан

### 13.4. Силовые цилиндры

Силовой цилиндр является двигателем, преобразующим энергию жидкости или газа в механическую энергию перемещения поршня. Поршень в силовом цилиндре совершает возвратно-поступательное движение.

По конструкции силовые цилиндры можно объединить в следующие группы.

*Силовой цилиндр с односторонним выходом штока поршня* (рис. 13.4, а). Движущее усилие на поршневом штоке при движении на выпуск штока

$$P = pf,$$

где  $p$  — рабочее давление (перепад давлений  $p_1$  и  $p_2$  в полостях цилиндра, разделенного поршнем,  $p = p_1 - p_2$ );  $f$  — рабочая площадь (площадь живого сечения) поршня

$$f = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4},$$

где  $D$  — диаметр поршня;  $d$  — диаметр штока.

Если давление  $p_2$  на сливе значительно ниже давления  $p_1$  нагнетания и им можно пренебречь, то

$$P = p_n f = p_n \frac{\pi D^2}{4},$$

где  $p_n$  — давление нагнетания,  $p_n = p_1$ .

*Движущее усилие на поршневом штоке при движении на уборку штока*

$$P = pf = (p_2 - p_1)f = p_2 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} - p_1 \frac{\pi D^2}{4} = (p_2 - p_1) \frac{\pi D^2}{4} - p_2 \frac{\pi d^2}{4}.$$

Если давлением слива (в этом случае  $p_1$ ) можно пренебречь, то

$$P = p_2 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}.$$

*Силовой цилиндр с двусторонним выходом штоков поршня* (рис. 13.4, б). Движущее усилие такого цилиндра

$$P = pf = (p_1 - p_2) \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}.$$

Усилие на штоках поршней при прямом и обратном ходе зависит только от перепада давлений на поршне.

Силовой цилиндр одностороннего действия с одинаковым давлением в полостях цилиндра (рис. 13.4, в). Движущее усилие на поршневом штоке такого цилиндра при прямом ходе

$$P = p_1 \frac{\pi d^2}{4}.$$

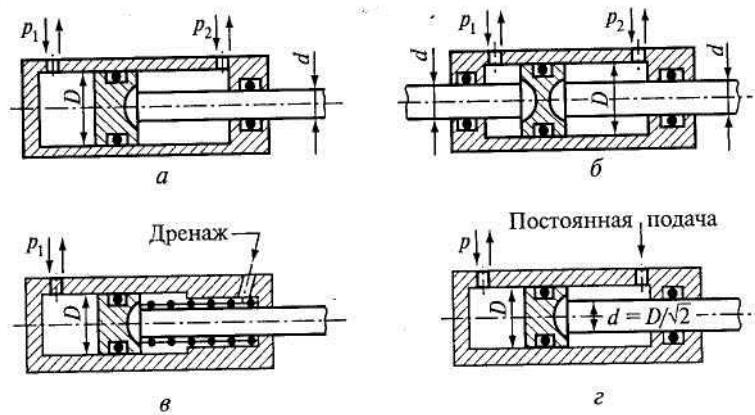


Рис. 13.4. Схемы силовых цилиндров:

а — с односторонним выходом штока поршня; б — с двусторонним выходом штоков поршня; в — одностороннего действия; г — дифференциальный

Возвратное движение поршня в данном случае осуществляется за счет пружины.

Дифференциальный силовой цилиндр (рис. 13.4, г). При одинаковом давлении в обеих полостях цилиндра  $p_1 = p_2 = p$ . Тогда

$$P_{\text{выпуска}} = p \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4};$$

$$P_{\text{уборки}} = p \left[ \frac{\pi D^2}{4} - \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) \right] = p \frac{\pi d^2}{4}.$$

Для того чтобы  $P_{\text{выпуска}} = P_{\text{уборки}}$ , необходимо выполнение следующего равенства:

$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi d^2}{4},$$

откуда  $d = D/\sqrt{2}$ . При этом:

максимальные усилия на выпуск и на уборку равны;

при одинаковом давлении в полостях цилиндра поршень занимает любое промежуточное положение;

рабочая площадь цилиндра  $f = \frac{\pi d^2}{4}$ .

На практике из-за механических потерь усилие на штоке поршня  $P_{\text{эф}}$  меньше величины  $P$ , рассчитанной по формуле  $P = pf$ :

$$P_{\text{эф}} = P \eta_{\text{мех}},$$

где  $\eta_{\text{мех}}$  — механический КПД силового цилиндра,  $\eta_{\text{мех}} = 0,99 \dots 0,85$  (среднее значение  $\eta_{\text{мех}} = 0,95$ ).

Скорость перемещения поршня гидравлического цилиндра зависит от расхода жидкости и площади

живого сечения:

$$U_n = \frac{Q\eta_{об}}{f},$$

где  $Q$  — расход жидкости, поступающей в рабочий цилиндр;  $\eta_{об}$  — объемный КПД силового цилиндра, учитывающий перетечку жидкости (при уплотнении металлическими кольцами  $\eta_{об} = 0,98$ );  $f$  — площадь живого сечения поршня.

Выход штока гидравлического цилиндра практически не зависит от нагрузки на штоке. Шток выходит плавно без толчков по мере расхода поступающей в цилиндр жидкости. Скорость выхода штока можно регулировать постановкой жиклера на входе в рабочую полость цилиндра.

Условия работы пневматического цилиндра совершенно иные вследствие двух факторов: сжимаемости газа и различного усилия трения в уплотнении поршня (коэффициент трения покоя больше коэффициента трения движения). В пневматическом цилиндре шток выходит резко или с толчками даже при медленном нарастании давления в цилиндре.

### 13.5. Гидравлические усилители

Гидравлическим усилителем называется устройство, перемещающее золотник или иное управляющее устройство гидравлического исполнительного механизма и одновременно усиливающее мощность входного сигнала. Гидравлический усилитель обеспечивает в системах регулирования однонаправленное прохождение сигнала от электромеханического преобразователя к выходному гидравлическому исполнительному механизму большой мощности.

Гидроусилители используются для построения высококачественных быстродействующих гидравлических и электрогидравлических следящих систем и систем автоматического регулирования.

Давление жидкости в напорной магистрали гидроусилителей может варьироваться от 7 до 300 кг/см<sup>2</sup>. Вес гидроусилителей находится в пределах от 0,3 до 20 кг. Мощность потока жидкости, управляемая гидроусилителем, может изменяться в диапазоне от 1 до 206 кВт, а коэффициент усиления по мощности — в пределах 300... 300000.

Гидравлический усилитель (бустер) имеет следующие преимущества перед другими усилительными устройствами:

- высокую чувствительность к перемещению входного звена управления;
- высокую скорость исполнения, практическое согласование динамики входного и выходного звеньев;
- большое развиваемое усилие, зависящее только от давления гидрожидкости и диаметра цилиндра исполнительного механизма.

Для осуществления слежения в гидроусилителях применяется жесткая обратная связь выхода со входом так, что любое рассогласование приводит к равновесию, но уже в новом согласованном состоянии ведущего и ведомого звеньев.

Принцип действия гидроусилителя основан на автоматическом поддержании согласования между входом и выходом и слежении выходного звена за входом, разность между которыми дает рассогласование, приводящее в действие исполнительный механизм, восстанавливающий согласование. Схема однокоординатного гидроусилителя с жесткой обратной связью выхода со входом, представлена на рис. 13.5. Принцип действия такого гидроусилителя заключается в следующем. При перемещении ручки управления 2 перемещается тяга 7. Так как золотник 3 легко перемещается, центр шарнира 6 в первый момент движения тяги 1 будет неподвижен, ввиду чего движение ручки управления вызовет через рычаг 7 смещение плунжера золотника 3.

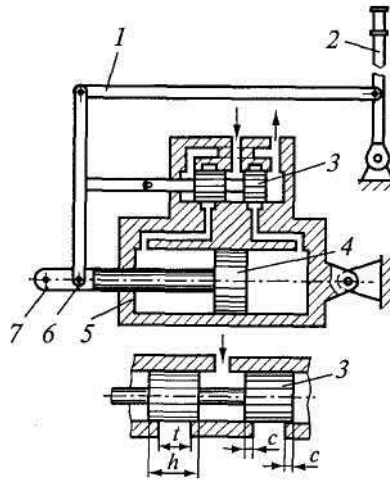


Рис. 13.5. Принципиальная схема гидроусилителя с двухпоясковым золотником:  
 1 — тяга; 2 — ручка управления; 3 — золотник; 4 — поршень; 5 — цилиндр; 6 — шарнир; 7 — рычаг

В результате этого жидкость под давлением поступит в соответствующую полость цилиндра 5. Другая полость цилиндра через золотник 3 соединяется со сливом. Под действием давления жидкости произойдет перемещение поршня 4, а следовательно, и центра шарнира 6 выхода на некоторое расстояние, пропорциональное отклонению тяги ( системы ручного управления. Если движение ручки управления 2 будет прекращено, то тяга 1 также остановится и движущийся поршень 4 сообщит через рычаг 7 плунжеру золотника 3 перемещение, противоположное тому, которое он получил до этого при смещении ручки. Так как окно золотника, имеющего размер  $l$ , вследствие обратного движения плунжера будет перекрываться, количество жидкости, поступающей в цилиндр 5, уменьшится и скорость поршня будет снижаться до тех пор, пока в среднем (нейтральном) положении золотника поступление жидкости не прекратится и поршень не остановится.

При движении ручки управления 2 в другую сторону движение всех элементов регулирующего устройства будет происходить в противоположном направлении.

Реальный гидроусилитель обрабатывает заданное перемещение лишь после того как перемещен распределительный золотник, ширина пояска плунжера которого равна  $h$ . Это запаздывание происходит за счет перекрытия золотником проходных отверстий на величину  $c = (h - t)/2$ . Перекрытие образует основную «зону нечувствительности»; обычно оно минимально и равно 0,05 мм на сторону.

### 13.6. Распределительные устройства

Распределительные устройства предназначены для направления потока жидкости к рабочим полостям силовых агрегатов, предохранения агрегатов и трубопроводов системы от повышения давления сверх допустимого, а также регулирования доступа жидкости к агрегатам. Основные конструктивные узлы распределителей бывают трех типов: клапанные, золотниковые и крановые.

В *клапанном распределителе* направление потока жидкости к рабочим агрегатам осуществляется путем открытия проходного отверстия клапаном (конусным, тарельчатым, шариковым) под действием усилия, необходимого для перемещения клапана.

Статическое усилие  $R$ , которое необходимо приложить к хвостовику конусного клапана с острой кромкой седла (рис. 13.6, а) для открытия и удержания клапана без учета гидродинамических сил потока жидкости, найдем, допуская, что давление на внешний торец хвостовика  $a$  клапана не действует:

$$R = p_1 F - p_2 (F - f) + P_{пр} + S_{п},$$

где  $p_1, p_2$  — давления соответственно в полости 1 подвода жидкости к клапану и в полости 2 отвода жидкости в систему потребителей;  $F$  — площадь контакта конусной части клапана с седлом,  $F = \pi D^2/4$ ;  $f$  — площадь хвостовика (штока) клапана,  $f = \pi d^2/4$ ;  $P_{пр}$  — усилие предварительной затяжки пружины;  $S_{п}$

— сила трения в состоянии покоя.

Силы, действующие на клапан с коническим седлом (рис. 13.6, б), зависят при тех же условиях от ширины поверхности контакта клапана и его седла.

Усилие, приложенное к хвостовику клапана для его открытия (при допущении, что на поверхности контакта давление отсутствует),

$$R = p_1 F_1 + P_{пр} + S_{тр} - p_2 (F_2 - f),$$

где  $F_1, F_2$  — площади окружностей контакта клапана с гнездом по диаметрам  $D_1; D_2$ .

При открытом клапане давление в цепи изменяется по степенному закону, но на практике обычно применяют закон изменения давления линейным, т.е. в щели среднее давление

$$P_{ср} = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

При больших давлениях и проходных сечениях требуются значительные усилия для открытия клапана, поэтому применяют различные способы для его снижения.

*Золотниковые распределительные устройства* получили наиболее широкое распространение, так как они уравновешены по отношению к действию статических сил давления жидкости и обладают малым трением. Рабочим элементом распределителя является цилиндрический плунжер с кольцевыми проточками и поясками, который перемещается в осевом направлении во втулке, имеющей окно для подвода и отвода жидкости.

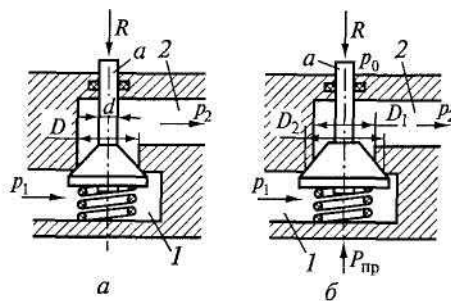


Рис. 13.6. Распределитель клапанный:  
а — с острой кромкой седла; б — с конусным седлом; 1 — полость подвода;  
2 — полость отвода

Принцип действия распределителей поясним на примере схемы, приведенной на рис. 13.7, а. Рабочая жидкость под давлением нагнетания  $p_n$  подводится к каналу 3, из которого в зависимости от положения плунжера 5 поступает под давлением  $p_1$  в соответствующую полость рабочего цилиндра б двигателя. Одновременно с этим нерабочая полость рабочего цилиндра, в которой жидкость находится под давлением  $p_2$ , соединяется с каналом слива 2, ведущим в резервуар. Пояски 1 и 4 предназначены для разгрузки плунжера 5 от давления  $p_0$  сливной линии.

В ручных золотниковых распределителях (рис. 13.7, б) применяются золотники без поясков.

В следящих системах наибольшее распространение получили золотники, показанные на рис. 13.7, в.

Необходимо учитывать следующие особенности золотниковых распределителей:

ширина пояска золотника должна быть больше ширины окна во втулке, чтобы золотник мог полностью перекрывать окно и, следовательно, движение жидкости;

расположение окон во втулке и поясков золотника должно быть согласовано таким образом, чтобы закрытие или открытие каналов подачи и слива жидкости из рабочего цилиндра происходило одновременно;

зазор между золотником и втулкой должен обеспечивать минимальный переток жидкости и отсутствие гидравлического «защемления» золотниковой пары. Обычно зазор в паре составляет 0,010...0,012 мм.

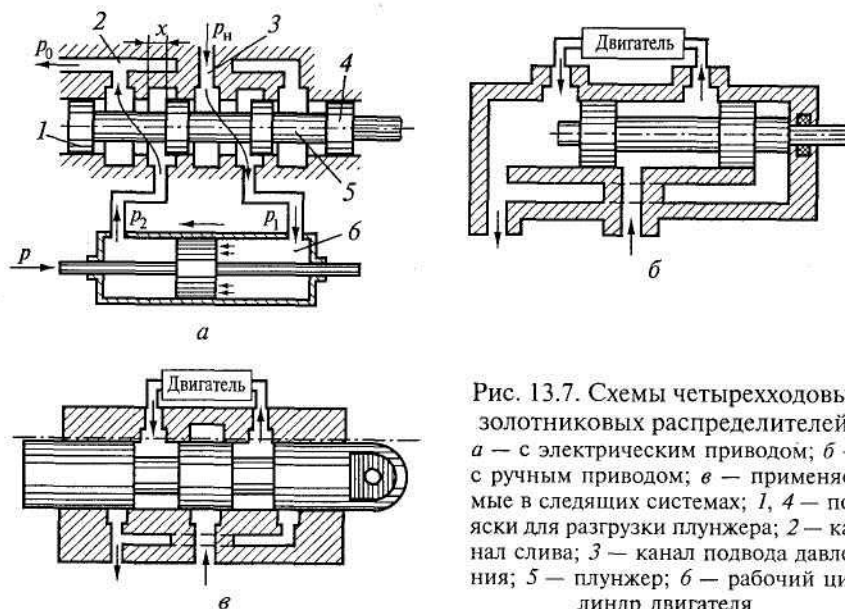


Рис. 13.7. Схемы четырехходовых золотниковых распределителей: *а* — с электрическим приводом; *б* — с ручным приводом; *в* — применяемые в следящих системах; 1, 4 — пояски для разгрузки плунжера; 2 — канал слива; 3 — канал подвода давления; 5 — плунжер; 6 — рабочий цилиндр двигателя

Золотниковые распределители с серводействием применяются в тех случаях, когда необходимы малые усилия для приведения в действие исполнительных механизмов. При этом между исполнительным механизмом и распределительным золотником устанавливают усиленное звено, которым служит вспомогательный золотник.

В этом случае электромагнит или другое задающее устройство воздействует на вспомогательный золотник 3 малого сечения (рис. 13.8), который питает полости основного распределительного золотника 2, питающего в свою очередь исполнительный гидравлический двигатель 1.

*Предохранительные клапаны* также относятся к распределительным устройствам. Конструкция предохранительного клапана позволяет с помощью регулировки при повышении давления сверх установленного перепускать рабочую жидкость из магистрали высокого давления в сливную магистраль. По своему назначению клапаны могут быть предохранительными и переливными. Предохранительный клапан работает эпизодически, переливной клапан поддерживает предельное рабочее давление в системе и работает постоянно.

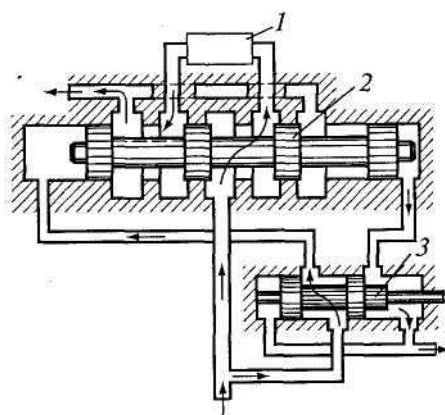


Рис. 13.8. Золотниковый распределитель с серводействием: 1 — двигатель; 2 — распределительный золотник; 3 — вспомогательный золотник малого сечения

Принцип действия предохранительных клапанов основан на взаимодействии двух противоположно направленных сил: силы давления рабочей жидкости и противодействующей силы, создаваемой сжатой пружиной (противовесом или противодавлением). Если сила затяжки пружины больше силы давления рабочей жидкости, то клапан закрыт. В противоположном случае клапан отрывается от седла и часть рабочей жидкости вытекает в сливную магистраль через зазор между клапаном и его седлом. Схемы предохранительных клапанов показаны на рис. 13.9.

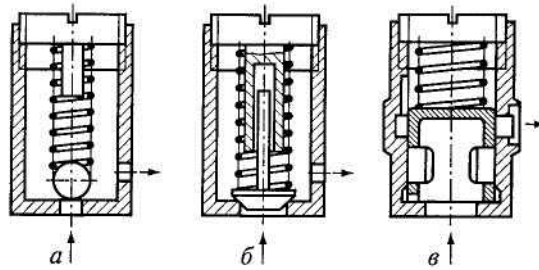


Рис. 13.9. Схемы предохранительных клапанов: *a* — шарикового; *b* — тарельчатого; *в* — плунжерного

*Редукционный клапан* постоянного давления применяется для понижения давления в сетях питания потребителей, работающих при пониженном по сравнению с общей сетью давлении. На рис. 13.10 показаны схемы редукционного клапана. Плунжер 2 удерживается в открытом положении противодействующей пружиной 7 до тех пор, пока вторичное пониженное (редуцированное) давление  $p_{ред}$  не возрастет до значения, обусловленного усилием сжатия этой пружины. После этого плунжер будет перемещаться в сторону закрытия проходного канала, ведущего от источника высокого давления 3 в зону низкого (редуцированного) давления 4.

Клапан будет открыт при условии

$$P_{1пр} \geq p_{ред} f_k$$

и закроется, когда

$$P_{2пр} \leq p_{ред} f_k,$$

где  $P_{1пр}$ ,  $P_{2пр}$  — соответственно усилия сжатия пружины для закрытого и открытого клапанов (можно принять  $P_{1пр} = P_{2пр}$ ),  $p_{ред}$  — заданное редуцированное давление;  $f_k = \pi d^2/4$  — площадь сечения плунжера.

*Дроссельные устройства* применяются для регулирования скоростей выхода поршня. Они создают сопротивление перетеканию жидкости, ограничивая таким образом расход жидкости, поступающей к гидроцилиндру. Ограничение расхода жидкости зависит от сопротивления, создаваемого дроссельным устройством.

Наиболее простым является пластинчатый дроссель, в котором имеется малое отверстие с острой кромкой. Такое отверстие создает местное сопротивление. Дроссель выполняется в виде шайбы с конусным входом, что позволяет уменьшить толщину дроссельных кромок и довести ее до 0,2... 0,5 мм. При такой толщине кромок вязкое сопротивление становится ничтожно малым по сравнению с сопротивлением местных потерь при внезапном расширении канала и практически не зависит от вязкости жидкости.

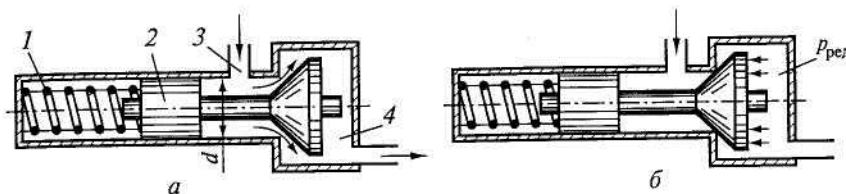


Рис. 13.10. Схемы редукционного клапана открытого (*a*) и закрытого (*б*): 1 — пружина; 2 — плунжер; 3 — проходной канал от источника высокого давления; 4 — зона низкого давления

Проходное сечение дросселя  $f$ , в котором потери на трение жидкости минимальны, находится в следующей практической зависимости от расхода жидкости  $Q$  и перепада давлений  $\Delta p$  жидкости на дросселе:



$$f = \frac{Q}{1080\sqrt{\Delta p}}$$

На практике в случае малого проходного сечения пластинчатого дросселя (с диаметром менее 1,5 мм) во избежание возможного его засорения посторонними частицами применяется пакет дросселей, собранных в одном корпусе (рис. 13.11). Дроссельные шайбы, в каждой из которых два-три отверстия, собираются в общий пакет через уплотнительные резиновые кольца. Требуемый перепад давлений (а следовательно, и расход жидкости) обеспечивается соответствующим числом дроссельных шайб, которое подбирается на стенде. Толщина замыкающего кольца зависит от общего числа дроссельных шайб.

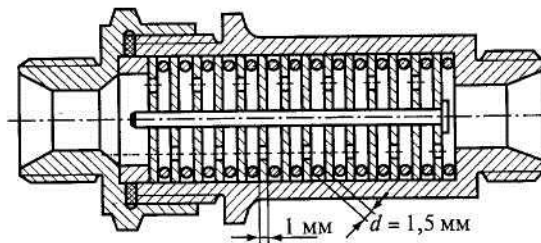


Рис. 3.11. Схема пакета дросселей

### 13.7. Воздух для пневматических приборов

В пневмоавтоматике основным источником энергии является сжатый воздух.

Рабочий диапазон изменения входных и выходных пневматических сигналов приборов и средств автоматизации обычно находится в пределах 20... 100 кПа.

Номинальное нормальное питающее давление сжатого воздуха составляет 140 кПа. Допустимое отклонение давления питания установлено в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения.

Кроме нормального диапазона давлений вычислительные пневматические приборы работают также в низком диапазоне рабочих давлений 0... 1000 Па.

Работа приборов в низком диапазоне давлений имеет следующие преимущества:

- становится возможным использование линейных дросселей, необходимых для реализации точных математических операций;
- потребление воздуха снижается в 10... 100 раз;
- мощность, потребляемая пневматическими агрегатами, по сравнению с мощностью, потребляемой при работе в нормальном диапазоне давлений, уменьшается в 1000... 10000 раз;
- размеры проходных сечений дросселей увеличиваются, что предотвращает их засорение.

Низкое давление целесообразно только в приборах, осуществляющих вычислительные операции.

Для питания исполнительных механизмов необходимы высокие давления.

Сжатый воздух для питания пневматических устройств должен быть очищен от пыли, влаги и масла; относительная влажность воздуха  $\varphi$  при 20°C не должна превышать 50...60 %.

Системы автоматизации при минусовых температурах, а также точные пневматические вычислительные приборы требуют снижения влажности питающего воздуха до 2...3%, что предотвращает выпадение в них влаги при низких температурах окружающего воздуха (-30...-40°C). Для такой глубокой осушки воздуха применяют двухступенчатые дегидраторы.

Воздух представляет собой смесь газов, главным образом азота и кислорода, составляющих по весу соответственно 75,6 и 23,1%.

Состояние воздуха определяется двумя величинами: его удельным весом  $\gamma$  и температурой  $t$ , от которых зависят все остальные его параметры, в том числе и давление  $p$ , плотность  $\rho$ , удельный объем  $v$  и др.

Основные параметры, характеризующие состояние воздуха, а также формулы для их расчета приведены в соответствующей справочной литературе.

### 13.8. Пневматические дроссели и распределители

*Дросселирующие органы* предназначены для создания сопротивления течению воздуха. Они делятся на постоянные, регулируемые и переменные. Сопротивление постоянных дросселей не изменяется во время работы пневматического устройства; сопротивление регулируемых дросселей перенастраивается вручную, а переменных — изменяется без участия человека во время работы пневматических устройств.

По характеру течения воздуха в каналах дроссели подразделяют на турбулентные и ламинарные. Для турбулентных дросселей характерны малые отношения длины канала к диаметру. Течение в дросселях такого типа обычно принимают адиабатическим.

Ламинарные дроссели характеризуются большими отношениями их длины к диаметру.

*Распределители сжатого воздуха* (воздухораспределители, пневмораспределители) — это устройства для включения (отключения) подачи воздуха или изменения направления потока воздуха, подаваемого к различным устройствам пневматической системы. По конструкции механизмов, открывающих и закрывающих впускные и выхлопные отверстия, различают распределители клапанные, золотниковые и крановые. При дистанционном управлении на распределители подается электрический или пневматический сигнал.

В поршневых следящих пневмоприводах в качестве распределителей чаще всего используются цилиндрические золотники, конструкции которых аналогичны гидравлическим.

### 13.9. Пневматические усилители

Пневматические усилители предназначены для усиления сигналов по мощности и давлению. Пневмоусилители делятся на два класса: *дроссельные* и *струйные*. Наиболее распространены дроссельные пневматические усилители типа сопло — заслонка и золотники. Усилитель типа сопло — заслонка является частным случаем междроссельной камеры. К струйным усилителям относится струйная трубка.

Золотниковые пневматические усилители по своей конструкции и принципу действия практически не отличаются от аналогичных гидравлических золотниковых усилителей.

Ввиду малой вязкости воздуха утечки в пневматических золотниках велики, поэтому зазор между штоком и втулкой золотника необходимо делать как можно меньше (для золотников с диаметрами 10...25 мм не более 0,010 мм).

Так как воздух не обладает смазывающей способностью, следует избегать конструкций пневматических золотников с большим числом трущихся поверхностей и сочетать материалы с хорошими антифрикционными свойствами при отсутствии смазки.

Преимущество пневматических золотников состоит в том, что массовый расход воздуха, а следовательно, и гидродинамические силы, действующие на них, сравнительно невелики. Поэтому для привода пневматических золотников можно использовать маломощную систему. Кроме того, в пневматических золотниках нет необходимости введения компенсации гидродинамических сил.

### 13.10. Пневматические исполнительные механизмы и приводы

*Пневматический мембранный исполнительный механизм* (ПМИМ) — исполнительный механизм, в котором перемещение выходного органа (штока) достигается изменением давления воздуха на мембране.

Благодаря простоте устройства, быстродействию и надежности эти исполнительные механизмы получили широкое распространение в промышленности главным образом для перемещения регулирующих органов в системах автоматического регулирования и дистанционного управления запорными устройствами, а также для приведения в действие реле различных защитных устройств (реле срабатывает, когда давление, действующее на мембрану ПМИМ, достигает заданного значения). Основные параметры, характеризующие ПМИМ: диапазон изменения командного давления воздуха, действующего на мембрану, эффективная площадь мембраны и ход штока.

Упругим элементом ПМИМ обычно служит эластичная резиноканевая мембрана. При определении развиваемого мембраной усилия необходимо учитывать ее жесткость, увеличение которой уменьшает чувствительность ПМИМ.

Качество работы ПМИМ зависит от их статических и динамических характеристик.

Статическая характеристика определяет зависимость хода штока ПМИМ от изменения давления, действующего на мембрану; динамическая характеристика — время и характер срабатывания при изменении входного командного давления.

Динамические параметры ПМИМ зависят главным образом от времени наполнения и опорожнения мембранной камеры и задаются обычно совместно с характеристиками подводных трубопроводов.

*Пневматический поршневой исполнительный механизм (ППИМ)* — исполнительный механизм, в котором перемещение выходного органа (штока) достигается подачей сжатого воздуха в цилиндр, снабженный поршнем.

ППИМ широко применяются в качестве приводов в системах пневмоавтоматики, станкостроении для приведения в действие зажимных устройств и механизмов подачи для торможения и др. По конструкции ППИМ аналогичны силовым гидроцилиндрам.

*Пневмопривод поршневой автоматизированный (ППА)* — автоматический управляемый пневматический поршневой механизм. ППА широко распространены в металлургической промышленности, машиностроении и других отраслях производства. Необходимое условие автоматизации пневмоприводов — оснащение их распределителями сжатого воздуха с дистанционным управлением.

В металлургических машинах обычно применяют распределители с электропневматическим управлением.

В релейных схемах автоматики катушки распределителей переключаются контактами, в бесконтактных схемах, как правило, силовыми полупроводниковыми триодами.

При автоматизации станков и станочных линий применяют распределители с пневматическим управлением, команды на переключение которых подаются, например от пневматических путевых выключателей. ППА подразделяются на короткоходовые и длинноходовые.

В короткоходовых ППА воздух подается в расширяющуюся полость в течение всего времени их хода из одного крайнего положения в другое. Скорость в процессе движения обычно не регулируют.

Плавность хода при необходимости достигается применением *пневматического дросселя*. Схемы автоматики короткоходовых пневмоприводов сравнительно просты и составляются с учетом графика работы механизмов в технологическом потоке. Командные импульсы в схемы подаются от датчиков автоматики, путевых выключателей и т. п.

Длинноходовые ППА (с длиной хода до 10... 12 м) широко применяются в трубопрокатном производстве и развивают скорость движения до 6 м/с при массе перемещаемых частей до 1000 кг и более.

Для предотвращения удара в процессе движения необходимо с высокой точностью подавать команды на начало и конец торможения противодавлением. Такие пневмоприводы автоматизируются с помощью специальных электронных решающих устройств, которые вычисляют для каждого хода путь торможения в зависимости от скорости движения поршня и давления воздуха в магистрали.

Конструкция пневмоприводов аналогична конструкции гидравлических приводов.

## **РАЗДЕЛ V ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ**

### **Глава 14**

## **КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

### **14.1. Классификация исполнительных элементов**

Исполнительные элементы (ИЭ) систем автоматики предназначены для создания управляющего воздействия на регулируемый орган (РО) объекта управления (ОУ). При этом изменяется положение или состояние РО, что приводит в конечном итоге к изменению положения или состояния ОУ в соответствии с алгоритмом управления.

Один из вариантов классификации исполнительных элементов САУ представлен на рис. 14.1.

В зависимости от управляющего воздействия на выходе ИЭ делятся на два вида: силовые и параметрические. Изменение пространственного положения РО возможно в том случае, если ИЭ создают управляющее воздействие в виде силы или момента. Такие ИЭ получили название *силовых*. К

ним относятся электромагниты, электромеханические муфты, различные виды двигателей.

Например, в системе автоматического управления полетом летательного аппарата по высоте ИЭ является двигатель, изменяющий положение руля высоты при отклонении действительного значения высоты от заданного. Устройство, содержащее двигатель, редуктор и элементы управления двигателем (усилитель, реле, контактор, золотниковый распределитель и т.п.), называют силовым приводом, или просто приводом. В зависимости от вида энергии, подводимой к двигателю, различают электро-, пневмо- и гидроприводы. Находят применение и комбинированные приводы: электрогидравлический и пневмогидравлический.

Еще одним вариантом ИЭ является следящий привод, который воспроизводит на выходе заданное на входе перемещение, но с большим механическим усилием, т.е. момент или сила на выходе его существенно больше, чем на входе. Следящий привод широко применяется в автоматических манипуляторах (роботах), станках с числовым программным управлением (ЧПУ), для управления прокатными станами, антеннами радиолокаторов, в космической и ракетной технике и т. д.

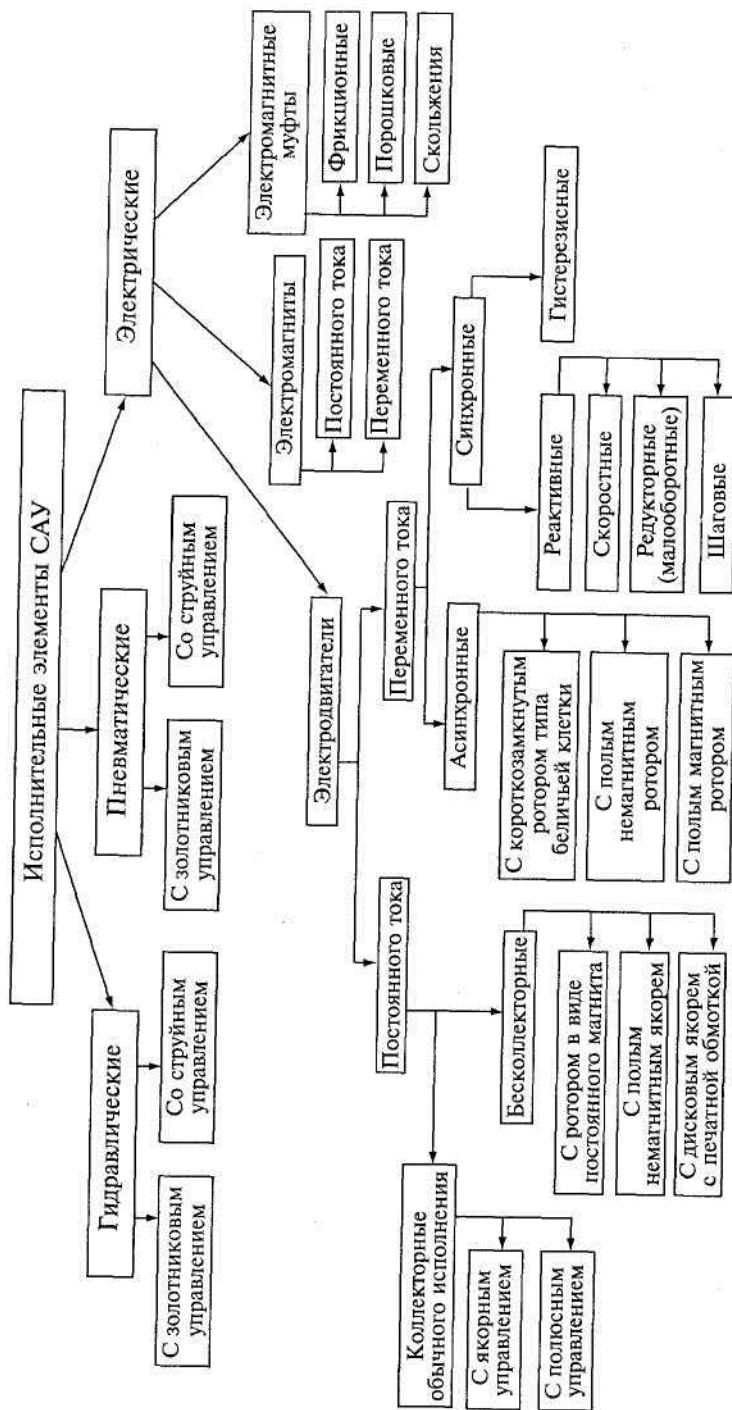


Рис. 14.1. Один из вариантов классификации исполнительных элементов САУ

Следящий привод является частным случаем следящих систем, формально этот привод относится не

к элементам автоматики, а к устройствам, так как в нем объединяются несколько элементов. Но в сложных (комплексных) САУ привод может рассматриваться как один функциональный элемент — исполнительный.

Изменение состояния РО связано с изменением его параметров (сопротивления, магнитного потока, температуры, скорости и т.п.) или параметров энергии, подводимой к нему (напряжения, тока, частоты, фазы — в электрических устройствах; давления рабочей среды — в пневматических и гидравлических устройствах).

Исполнительные элементы, изменяющие состояние РО, называются *параметрическими*. Например, в автоматическом управляющем устройстве термостата ИЭ является усилитель, нагрузкой которого служит нагревательный элемент РО термостата. При отклонении температуры от заданного значения изменяется входное напряжение усилителя; при этом изменяется и выходное напряжение, а следовательно, и ток в нагревательном элементе и температура в термостате. В этом устройстве усилитель совмещает в себе функции и усилителя, и ИЭ. Он создает управляющее воздействие (напряжение, ток), изменяющее температуру нагревательного элемента, например РО. Такое использование усилителей довольно часто встречается в устройствах автоматики. Усилители одновременно являются основным видом параметрических ИЭ.

Особенно часто в качестве параметрических ИЭ используются электромагнитные реле, контакторы, тиристорные и транзисторные реле.

Силовые ИЭ в зависимости от характера движения их выходного вала можно разделить на три вида: с линейным, поворотным (угол поворота меньше  $360^\circ$ ) и вращательным (угол поворота больше  $360^\circ$ ) движениями. Статистическая характеристика ИЭ может быть линейной, нелинейной, реверсивной, нереверсивной и т.д.

К силовым ИЭ предъявляется ряд требований, которые обусловлены конструкцией и алгоритмом работы ОУ, условиями эксплуатации и т.п. Основными требованиями, которым должны удовлетворять характеристики и параметры ИЭ, являются следующие:

максимальная сила или момент, развиваемые ИЭ, должны быть заведомо больше, чем максимальная сила или момент, необходимые для перемещения РО объекта управления во всех режимах работы;

высокое быстродействие;

максимальный КПД;

статическая характеристика ИЭ должна быть близка к линейной, если в процессе работы управляющее воздействие, создаваемое ИЭ, должно плавно регулироваться;

минимальный порог чувствительности; небольшая мощность управления ИЭ; высокая надежность и долговечность; небольшие размеры и масса.

## 14.2. Общие характеристики исполнительных элементов

*Исполнительный элемент (исполнительное устройство)* — функциональный элемент системы автоматического управления, осуществляющий воздействие на объект управления путем изменения потока энергии и потока материалов, поступающих на объект. Исполнительные элементы в основном бывают двух типов:

с механическим двигателем (в частности, сервомотор, серводвигатель или сервопривод), в этом случае исполнительный элемент производит механическое перемещение регулирующего органа;

с электрическим выходом, в этом случае воздействие, непосредственно прикладываемое к объекту регулирования, имеет электрическую природу.

Например, в регуляторе напряжения генератора постоянного тока регулирующим воздействием является напряжение возбуждения, получаемое от усилителя.

В зависимости от характера объекта и вида вспомогательной энергии, применяемой в системе автоматического управления, роль исполнительных элементов выполняют самые разные конструктивные элементы: электронные, электромашинные, магнитные или полупроводниковые усилители, реле, пневматические или гидравлические сервомоторы и др.

Динамические характеристики исполнительных элементов с механическим выходом отличаются значительно большей инерционностью, чем элементы с электрическим выходом. Часто исполнительные элементы второго типа служат приводом исполнительных элементов первого типа.

Сервоэлектродвигатели, применяемые в качестве исполнительных элементов с механическим выходом, отличаются специальным исполнением, обеспечивающим пониженную инерционность

(удлиненным ротором малого диаметра, полым ротором). Значительно меньшую инерционность при той же мощности имеют гидравлические и пневматические серводвигатели.

Требования к исполнительным элементам определяются характеристиками объекта регулирования и требуемым качеством процесса регулирования.

*Исполнительный механизм (сервопривод)* — исполнительный элемент с механическим выходом. Исполнительные механизмы классифицируются по назначению и типу управляемых элементов, виду осуществляемых перемещений, роду применяемой энергии.

Исполнительные механизмы предназначаются для привода:

элементов, регулирующих потоки энергии, жидкости, газа, сыпучих и перемещаемых твердых тел (реостатов, клапанов, задвижек и заслонок, направляющих аппаратов турбин и насосов, шлагбаумов и других устройств);

элементов следящих систем (копировальных станков, манипуляторов, автокомпенсационных, регулирующих и других устройств);

рулевых устройств транспортных объектов;

особых элементов систем управления (противовесов в грузоподъемных сооружениях, зажимных автоматических устройств и т.п.).

К числу контрольных элементов исполнительных механизмов относятся:

механизм обратной связи, определяющий характеристику регулятора либо обеспечивающий передачу сигнала на дистанционный указатель положения исполнительного механизма;

концевые или путевые выключатели, которые останавливают исполнительный механизм в крайних, а иногда и промежуточных положениях (например, трехпозиционный исполнительный механизм), и концевые выключатели, в некоторых случаях выполняющие сигнальные функции;

измеритель вращающего момента на выходной оси исполнительного механизма, обеспечивающий выключение двигателя или его проскальзывание в специальной муфте после достижения предельно допустимого момента, что необходимо для получения запорного или зажимного действия исполнительного механизма или предохранения его от аварий в случае попадания под управляемое устройство посторонних предметов;

тормозное устройство при быстроходных двигателях для борьбы с инерцией в момент остановки;

защелка с выключателем главного соленоида и спускное расцепляющее устройство в исполнительном механизме с соленоидами большой мощности.

В большинстве электрических исполнительных механизмов мощность электродвигателей 10... 1000 Вт. Пневматические исполнительные механизмы работают при давлениях до 0,6 МПа, а гидравлические — до 3 МПа. В некоторых случаях мощность исполнительных механизмов достигает десятков киловатт, а давление — 10 МПа. Исполнительные механизмы обычно развивают на выходном валу вращающий момент от 1 до 100 Н • м при числе рабочих оборотов от 0,25 до 30 с<sup>-1</sup> либо усилие от 100 до 5000 Н при ходе от 25 до 750 мм.

В приборах точной механики применяют исполнительные механизмы с меньшими вращающими моментами и переставляющими усилиями. Время перестановки устройства управляемого исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое обычно находится в пределах 5... 120 с. Время перестановки более 120 с можно увеличить с помощью регуляторов прерывистого (шагового) действия, чтобы не усложнять чрезмерно редуктор. Время перестановки соленоидных, а также дозирующих и аварийных исполнительных механизмов доходит до долей секунд.

*Исполнительный механизм электрический* — исполнительный механизм, в котором перемещение регулирующего органа производится за счет электрической энергии. Электрические исполнительные механизмы бывают двух основных типов:

с приводом от электродвигателя (наиболее широко распространены в схемах общепромышленной автоматики);

с приводом от электромагнита (обычно соленоида).

В электрических исполнительных механизмах применяются асинхронные двигатели. Для исполнительных устройств малой мощности — двухфазные с короткозамкнутым или полым ротором, для более мощных — трехфазные с короткозамкнутым или массивным ротором. Для уменьшения выбега двигателя и улучшения качества регулирования используется электрическое торможение или электромагнитные тормоза, которые накладываются при снятии с двигателя напряжения питания.

Управление электрическим исполнительным механизмом с помощью соответствующих обратных связей можно построить так, чтобы перемещение регулирующего органа или скорость его движения

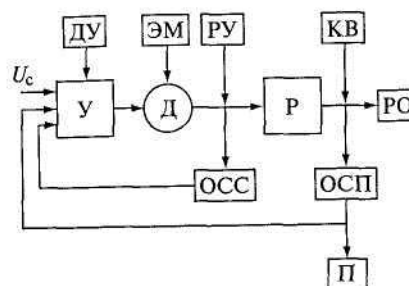
изменялись пропорционально сигналу управления.

Конструктивно электродвигательные исполнительные механизмы выполняются, как правило, с вращательным движением выходного вала и реже с поступательным перемещением выходного штока. В системах общепромышленной автоматики для привода заслонок, кранов, шиберов и других устройств наиболее часто применяются однооборотные электрические исполнительные механизмы, в которых поворот выходного вала составляет 120... 170°. С помощью многооборотных электрических исполнительных механизмов обычно перемещаются такие регулирующие органы, как запорные вентили и задвижки.

Блок-схема электродвигательного исполнительного механизма представлена на рис. 14.2. Она работает следующим образом. Двигатель Д через редуктор Р перемещает регулирующий орган РО. Сигнал  $U_c$ , поступающий на вход электрического исполнительного механизма, имеет обычно недостаточную мощность для управления двигателем, поэтому он предварительно усиливается усилителем У. Концевые выключатели КВ служат для ограничения перемещения РО. Оператор может устанавливать РО с помощью устройства дистанционного управления ДУ, контролируя его положение прибором П, а при неисправности ДУ — штурвалом ручного управления РУ. Датчики обратной связи по положению ОСП, выполняемые в виде потенциометров, индуктивных датчиков или линейных индукционных потенциометров, и датчики обратной связи по скорости ОСС, выполняемые в виде тахогенераторов постоянного или переменного тока, служат для ввода дополнительных сигналов, необходимых для получения требуемых характеристик от электрического исполнительного механизма.

Рис. 14.2. Блок-схема электродвигательного исполнительного механизма:

Д — двигатель; Р — редуктор; РО — регулирующий орган; У — усилитель; КВ — концевой выключатель; ДУ — устройство дистанционного управления; ЭМ — электромагнит; ОСС, ОСП — датчики обратной связи соответственно по скорости и положению; П — контрольный прибор



Номинальный момент  $M$  на выходном валу и время  $T$  полного оборота выходного вала, т. е. быстродействие, являются основными характеристиками электродвигательного исполнительного механизма.

Мощность на валу двигателя  $P$ , необходимая для обеспечения заданных времени  $T$  и момента  $M$ , определяется по формуле

$$P = \frac{61,5M}{T\eta},$$

где  $\eta$  — КПД редуктора.

Инерционность привода электрического исполнительного механизма, определяемая временем от начала движения регулирующего органа до установления полной скорости, зависит от соотношения между пусковым моментом двигателя и моментом инерции привода. Пусковой момент обычно в 2...2,5 раза больше номинального. Важной характеристикой электрического исполнительного механизма является время запаздывания — время от момента подачи сигнала до начала вращения выходного вала.

## Глава 15

### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

#### 15.1. Классификация электромагнитов

Электромагнит (ЭМ) является наиболее распространенным преобразователем электрического сигнала в механическое движение. ЭМ получили применение в качестве приводных или управляющих устройств в ряде механизмов, электрических аппаратов и реле, например в подъемных и тормозных устройствах, приводах для включения и выключения коммутационных аппаратов, электромагнитных

контакторах, автоматических регуляторах, приводах для включения и отключения механических, пневматических, гидравлических цепей, а также для сцепления и расцепления вращающихся валов, открывания и закрывания клапанов, вентилях, заслонок, золотников на небольшое расстояние до нескольких миллиметров с усилием в несколько десятков ньютонов.

По назначению различают электромагниты:

*удерживающие*, которые служат для фиксации положения ферромагнитных тел (например, электромагниты, предназначенные для подъема предметов из ферромагнитного материала, электромагнитные плиты для фиксации деталей на металлообрабатывающих станках, электромагнитные станки). Эти ЭМ не совершают работы, от них требуется лишь определенная сила, на которую они рассчитываются;

*приводные*, которые служат для перемещений исполнительных устройств (например, клапанов, золотников, заслонок, железнодорожных стрелок), а также используются в контакторах, электромагнитных муфтах и др. Эти ЭМ совершают определенную работу и поэтому рассчитываются на определенную силу и перемещение;

*специальные*, которые используются в ускорителях элементарных частиц, медицинской аппаратуре и др.

По роду тока в обмотке различают ЭМ постоянного и переменного токов. ЭМ постоянного тока делят на *нейтральные*, не реагирующие на полярность управляющего сигнала, и *поляризованные*, реагирующие на полярность сигнала (когда на якорь действуют два независимых друг от друга потока).

По конструктивному исполнению различают следующие типы ЭМ.

*Клапанные* — с внешним притягивающим якорем (рис. 15.1, а...з), при этом магнитные системы могут иметь различную форму:

П-образный магнитопровод и сердечник круглого сечения;

П-образный магнитопровод и плоский якорь-ярмо;

Ш-образный магнитопровод и сердечник круглого сечения;

цилиндрический магнитопровод.

В клапанных ЭМ происходит небольшое перемещение якоря (несколько миллиметров), благодаря чему они развивают большие усилия и имеют высокую чувствительность.

*Прямоходовые* — с поступательным движением якоря. Используются они, как правило, в виде соленоидов и поэтому часто называются соленоидными ЭМ (рис. 15.1, д, е). Прямоходовые ЭМ имеют большой ход якоря, меньшие, чем клапанные, размеры и большее быстродействие, однако чувствительность у них меньше.

По своему назначению прямоходовые ЭМ выполняются в двух вариантах:

с неподвижным сердечником—«стопом» (см. рис. 10.1, о, е),

без сердечника со сквозным отверстием по оси катушки — так называемые длинноходовые электромагниты (см. рис. 15.1. е, показан пунктиром).

ЭМ с неподвижным сердечником создает большое усилие, значение которого возрастает по мере приближения якоря к сердечнику. Длинноходовые системы позволяют получить относительно большой ход якоря (до 200 мм) за счет удлинения катушки.



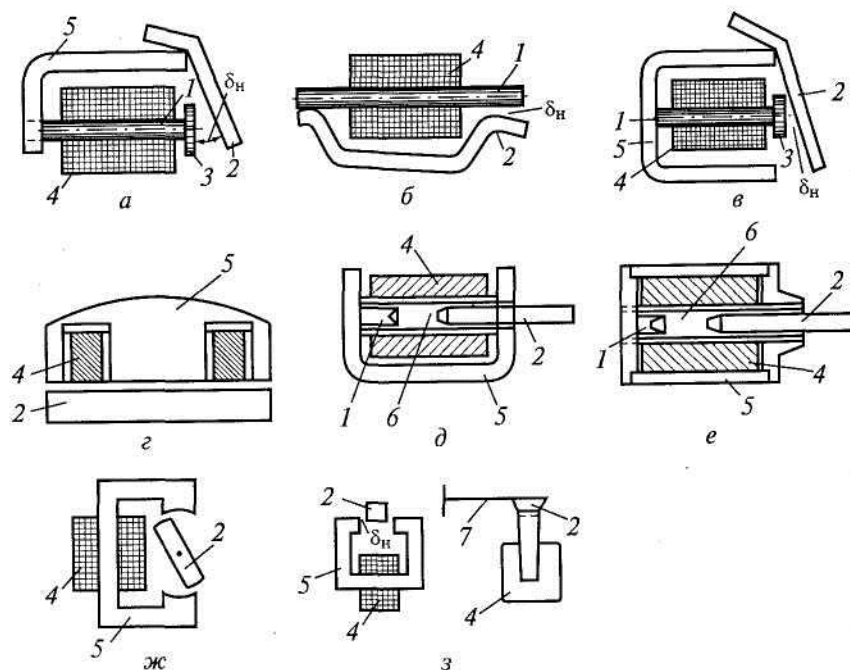


Рис. 15.1. Нейтральные электромагниты различных конструкций:  
*a ... з* — клапанные; *д, е* — прямоходовые; *ж, з* — с поперечным движением якоря;  
 1 — сердечник; 2 — якорь; 3 — полюсный наконечник; 4 — катушка; 5 —  
 ярмо; 6 — направляющая трубка; 7 — пружина;  $\delta_n$  — начальный воздушный зазор

Эти ЭМ применяются в установках, работающих в режиме кратковременной нагрузки, т.е. когда ток, проходящий через катушку, имеет большое значение, но не вызывает ее перегрева.

С поперечным движением — якорь движется в поперечном направлении к средней линии между полюсами. Практическое использование получили следующие формы магнитных систем:

с выступающим якорем (рис. 15.1, ж) — применяется при углах поворота якоря 25...40°;

с вытягивающимся якорем (рис. 15.1, з) — применяют при углах поворота якоря 10... 15°. Позволяют получить тяговую характеристику любой формы (возрастающую, спадающую с любым углом наклона), что обеспечивается соответствующим выбором профиля якоря.

В этих системах якорь подвешивается на пружине, а рабочий угол поворота якоря выбирается таким, чтобы он не занимал крайних положений против полюсов.

Рассмотренные системы с движущимся в поперечном направлении якорем применяются в автоматических регуляторах, когда требуется получить большое значение коэффициента возврата. Кроме того, их удобно использовать в устройствах, работающих на постоянном токе (при переменном токе могут возникнуть вибрации якоря, в то время как зазор между полюсами и якорем должен быть постоянным).

ЭМ состоит из магнитопровода и собственно катушки.

**Магнитопровод.** В ЭМ постоянного тока магнитопровод выполняется сплошным из полосового или круглого материала — технически чистого железа марок Э, ЭА и ЭАА. Высокочувствительные электромагниты имеют магнитопровод из железоникелевых и железоникелькобальтовых сплавов, это пермаллой марок 79НМ, 79НМА и гайперники марок 50НП, 45Н, 45НП. Широкое применение в магнитопроводах быстродействующих ЭМ нашли легированные кремнием стали марок Э11, Э21 и т.д. Легирование электротехнических сталей кремнием обуславливает значительное повышение электросопротивления. При этом уменьшаются потери энергии на вихревые токи, что позволяет применять сталь в более мощных устройствах, работающих на переменном токе.

Магнитопроводы ЭМ переменного тока выполняют шихтованными, т. е. собирают из пластин, штампуемых из листового материала толщиной 0,3...0,5 мм. Материалами могут быть: горяче- и холоднокатаная электротехническая сталь марок Э11... Э43, Э1100, Э310 и др.

В некоторых случаях магнитопроводы ЭМ постоянного тока также делают шихтованными для устранения вихревых токов, возникающих в процессе включения и выключения. Иногда в целях экономии небольшие ЭМ переменного тока изготавливают из сплошного материала толщиной 2...3 мм.

**Катушка.** По своей конструкции катушки бывают каркасными и бескаркасными, а по форме —

круглого и прямоугольного сечения. Каркасная катушка состоит из каркаса и обмотки. На одном каркасе может быть несколько обмоток, уложенных рядами. Бескаркасная катушка проще каркасной. Отсутствие каркаса позволяет полностью использовать намоточное окно.

## 15.2. Порядок расчета нейтрального электромагнита

В задачу расчета входит нахождение таких конструктивных размеров и параметров обмотки ЭМ, которые соответствовали бы заданным условиям работы устройства. Обычно в число исходных данных входят: противодействующая (механическая) характеристика, полученная расчетным или экспериментальным путем; напряжение и ток входного сигнала, подаваемого на обмотку; режим работы; временные параметры; габаритные размеры; вес; стоимость. Кроме того, необходимо учитывать основные условия эксплуатации: температуру окружающей среды, влажность, запыленность, наличие вибраций.

В результате расчета необходимо выбрать тип ЭМ (см. рис. 15.1), материал для магнитной цепи, определить геометрические размеры магнитопровода, катушки и ее электрические параметры. Создаваемая конструкция должна отвечать критерию оптимальности, или экономичности, т.е. обладать минимальными размерами, весом и стоимостью.

Расчет ЭМ включает в себя следующие этапы. 1. Выбор типа электромагнита и кинематической схемы соединения его с исполнительным механизмом. Форма магнитной цепи определяется назначением ЭМ в технологической цепи производства. Например, для больших усилий и больших ходов якоря рекомендуется использовать прямоходовые ЭМ (см. рис. 15.1, *e*), которые имеют минимальные размеры, вес и стоимость. При очень малом ходе якоря применяют клапанные электромагниты с цилиндрическим магнитопроводом (см. рис. 15.1, *z*).

Для каждой формы ЭМ имеются определенные соотношения между значениями электромагнитного усилия и ходом якоря, при которых вес сконструированного электромагнита получается минимальным. Для удобства выбора оптимальной формы ЭМ вводится понятие *конструктивного показателя* (КП), представляющего собой следующее отношение:

$$\text{КП} = \sqrt{F_{\text{э min}} / \delta_{\text{н}}},$$

где  $F_{\text{э min}}$  — электромагнитное усилие, которое должен развивать электромагнит при максимальном рабочем воздушном зазоре  $\theta_{\text{в}}$ , когда  $\theta_{\text{в}} = \theta_{\text{н}}$ .

Выбор КП определяется на основании следующих рассуждений: длина сердечника растет пропорционально увеличению магнитодвижущей силы, создаваемой обмоткой, а МДС, в свою очередь, определяется максимальным рабочим воздушным зазором  $\delta_{\text{в}}$ ; поперечное сечение сердечника определяется требуемым начальным электромагнитным усилием. Действительно, как было показано выше, электромагнитное усилие пропорционально сечению сердечника, т. е. квадрату его поперечного линейного размера. Поэтому поперечный размер сердечника пропорционален корню квадратному из тягового усилия.

На основании расчета были получены данные для выбора оптимальной формы ЭМ. Так, для прямоходового ЭМ без неподвижного сердечника (см. рис. 15.1, *e*) значение конструктивного показателя составляет  $400 \text{ Н}^{1/2}/\text{м}$ ; для клапанного ЭМ с цилиндрическим магнитопроводом (см. рис. 15.1, *г*) конструктивный показатель равен  $2900 \text{ Н}^{1/2}/\text{м}$ . В маломощных ЭМ практическое значение имеет не вес, а чувствительность, поэтому эти ЭМ выполняются клапанного типа (см. рис. 15.1, *a...z*). Конструктивный показатель для них равен  $800... 8000 \text{ Н}^{1/2}/\text{м}$ .

2. Предварительный расчет электромагнита проводят обычно в два этапа. Сначала выполняют ориентировочный расчет для определения в первом приближении основных размеров и параметров ЭМ. При таком расчете потери намагничивающей силы и утечки магнитного потока учитывают приближенно. Затем проводят точный расчет электромагнита, при этом найденные в предварительном расчете размеры магнитопровода позволяют с достаточной точностью учесть насыщение магнитопровода, потери магнитодвижущей силы и утечку магнитного потока. После проведения окончательного расчета проверяют рациональность принятой формы и найденных размеров ЭМ.

Порядок предварительного расчета применительно к прямоходовому ЭМ с неподвижным сердечником и клапанному ЭМ сводится к следующему:

выбирают значение *магнитной индукции* в рабочем зазоре при начальном его значении  $B_{\delta H}$ . Следует иметь в виду, что с ростом индукции уменьшаются размеры магнитопровода, но одновременно уменьшается и чувствительность ЭМ, так как возрастают потери магнитодвижущей силы и утечка магнитного потока. Учитывая наличие потоков рассеяния, магнитную индукцию  $B_{\delta H}$  выбирают в пределах 0,06... 1 Тл в зависимости от формы магнитопровода и условий работы ЭМ. Выбор  $B_{\delta H}$  определяется соотношением между заданным значением электромагнитного усилия  $F_{\varepsilon}$  при отпущенном якоре и ходом  $\delta$ ; причем с увеличением  $F_{\varepsilon}$  необходимо выбирать большие значения  $B_{\delta H}$ . Опытные и расчетные данные оптимальных значений  $B_{\delta H}$  удобно выражать в функции конструктивного показателя КП. На рис. 15.2 приведены зависимости величины  $B_{\delta H}$  и отношения длины обмотки  $l_{об}$  к ее ширине  $h_{об}$  от отношения  $\sqrt{F_{\varepsilon min}}/\delta H$  для некоторых типов ЭМ постоянного тока. Эти зависимости построены исходя из наиболее экономичного использования активных материалов (сталь, медь);

определяют *сечение участков магнитопровода*. Например, для клапанного ЭМ или прямоходового с плоским якром сечение рабочего зазора можно найти, воспользовавшись формулой

$$S_{\delta} = 2\mu_0 F_{\varepsilon min} / B_{\delta H}^2.$$

Причем требуемое значение электромагнитного усилия  $F_{\varepsilon min}$  принимают на 15...25 % больше заданного противодействующего усилия при  $\delta = \delta H$ . Для электромагнитов, не имеющих полюсного наконечника, найденное сечение рабочего зазора  $S_{\delta}$  соответствует сечению сердечника. При наличии полюсного наконечника, например в клапанных ЭМ (см. рис. 15.1, а, в), найденное сечение равно сечению полюсного наконечника.

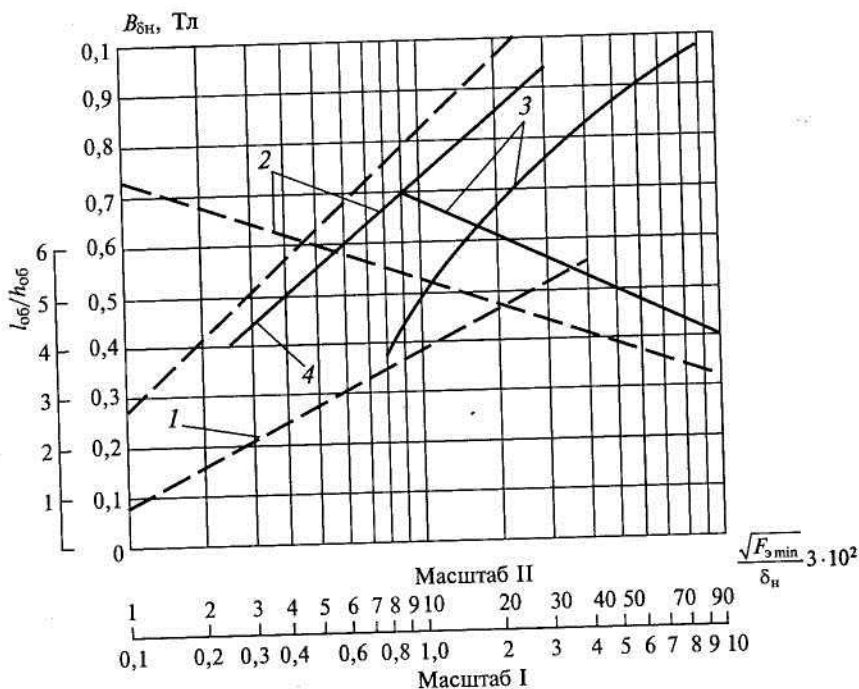


Рис. 15.2. Электрические зависимости для выбора оптимальных параметров магнитной цепи (кривые  $B_{\delta H}$  — возрастающие, кривые  $l_{об}/h_{об}$  — убывающие, сплошные линии — масштаб I, пунктирные линии — масштаб II):  
 1 — клапанный электромагнит; 2 — прямоходовой электромагнит с плоским якром; 3 — прямоходовой электромагнит с якром, имеющим конический конец с углом при вершине 45°; 4 — прямоходовой электромагнит с якром, имеющим конический конец с углом при вершине 60°

3. Определение длины  $l_{об}$  и толщины  $h_{об}$  обмотки. Предварительно задаются отношением длины обмотки к ее толщине, т.е.  $l_{об}/h_{об}$ . При изменении этого отношения получается разный расход меди и стали — активных материалов электромагнита. Так, с увеличением отношения  $l_{об}/h_{об}$  уменьшается расход меди (так как уменьшается объем меди, поверхность охлаждения катушки увеличивается), а расход стали растет (так как увеличивается длина магнитопровода). На практике установлено, что при относительно небольшом ходе якоря и малом значении усилия отношение  $l_{об}/h_{об}$  следует выбирать

большим, чем при увеличении усилия и уменьшении хода якоря.

Таким образом, с помощью отношения  $l_{об}/h_{об}$  также можно определить значения конструктивного показателя (см. рис. 15.2). Рекомендуется для клапанных ЭМ брать отношение  $l_{об}/h_{об} = 1... 8$ , а для прямоходовых — в пределах 5... 8.

### 15.3. Тяговая и механическая характеристики электромагнита

В соответствии со вторым законом Кирхгофа в любое мгновение переходного процесса при включении ЭМ выполняется следующее соотношение

$$U = IR + w \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $U$  — напряжение, подаваемое на зажимы обмотки (катушки) с числом витков  $w$  и активным сопротивлением  $R$ .

Умножив обе части этой формулы на  $I dt$ , получим уравнение энергетического баланса

$$UI dt = I^2 R dt + w I d\Phi,$$

где  $UI dt$  — электрическая энергия, поступившая в обмотку за время  $dt$ ;  $I^2 R dt$  — тепловые потери в активном сопротивлении;  $w I d\Phi$  — энергия, затраченная на создание магнитного поля ЭМ и механическую работу движения якоря.

После интегрирования приходим к выражению

$$\int_0^t UI dt = \int_0^t I^2 R dt + \int_0^{\Phi} w I d\Phi,$$

где  $t$ ,  $\Phi$  — текущие координаты.

Известно, что ток в обмотке ЭМ, включенной на постоянное напряжение, нарастает по экспоненциальному закону. В некоторый момент времени он достигает значения тока трогания, которому соответствует точка 1 на рис. 15.3. В это мгновение якорь приходит в движение, в процессе которого рабочий зазор уменьшается, индуктивность обмотки растет и ток в ней падает до тех пор, пока якорь не притянется к сердечнику, чему соответствует точка 3. Во время движения якоря связь между  $\Phi$  и  $wI$  определяется кривой 1—2—3. По окончании движения якоря ток опять начинает возрастать, достигая установившегося значения в точке 4.

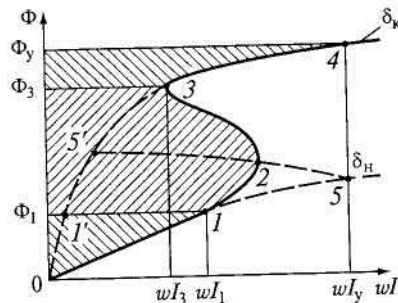


Рис. 15.3. Магнитные потоки в электромагните

Если якорь при срабатывании ЭМ находится в начальном положении и рабочий зазор  $\delta$  максимален ( $\delta = \delta_H$ ), то характеристика намагничивания при  $\delta = \delta_H = \text{const}$  имеет вид кривой 0—1—5 (см. кривую  $\delta_H$  на рис. 15.3), а в конечном положении якоря, когда он полностью притянут и  $\delta = \delta_K = \text{const}$  — вид кривой 0—1—3—4 (см. кривую  $\delta_K$  на рис. 15.3). Значит, динамическая характеристика намагничивания  $\Phi(wI)$  при срабатывании ЭМ состоит из участка 0—1 кривой  $\delta_H$ , переходной кривой 1—2—3 во время движения якоря ( $\delta = \text{var}$ ) и участка 3—4 кривой  $\delta_K$ .

Энергия  $W_{01234}$ , представленная в последней формуле вторым членом ее правой части и равная энергии, поступившей из сети, в течение нарастания МДС от 0 до  $wI_y$  при срабатывании ЭМ за вычетом тепловых потерь, пропорциональна площади, ограниченной кривой  $0-7-2-3-4-\Phi_y-0$ .

*Тяговой* (или *электромеханической*) характеристикой ЭМ называют зависимость  $Q_T(\delta)$  — тягового усилия от длины воздушного зазора при известном характере изменений тока обмотки и противодействующих усилий во время срабатывания.

Допустим, при подаче на обмотку напряжения трогания  $U_{тр}$  движение якоря ЭМ начинается по достижении током значения  $I_y$  и в процессе изменения длины зазора от начальной  $\delta_H$  до конечной  $\delta_K$  этот ток остается неизменным. Для ЭМ последовательного включения это условие естественное. В ЭМ параллельного включения ток в обмотке неизменный, если в любое мгновение срабатывания тяговое и противодействующее усилия равны друг другу, т. е. якорь перемещается бесконечно медленно, и, следовательно, инерция подвижных частей не проявляется. Поэтому снятая при таких условиях тяговая характеристика является статической. Другими словами, *статическая тяговая характеристика* — это зависимость электромагнитного усилия, действующего на неподвижный якорь, от его положения, исчисляемого значением рабочего зазора, при неизменной МДС.

Под *механической*, или *противодействующей*, характеристикой ЭМ понимают зависимость  $Q_{мех}(\delta)$  — результирующей силы сопротивления движению якоря, приложенной к нему и приведенной к рабочему зазору  $\delta$ , от длины последнего (или момента сопротивления от угла поворота якоря).

Множество различных механических характеристик объясняется многообразием конструктивного исполнения и параметров механических элементов ЭМ.

Построение механических характеристик ЭМ и согласование их с тяговыми характеристиками производятся так же, как для реле.

#### 15.4. Динамика электромагнита

Под инерционностью ЭМ понимают запаздывание перемещения якоря по сравнению с изменениями входного напряжения. Она определяется отставанием изменения тока в обмотке от изменения приложенного к ней напряжения и механической инерцией якоря и связанных с ним подвижных частей.

Динамические свойства ЭМ как элемента дискретного действия характеризуются двумя временными параметрами: *временем срабатывания*  $t_{сраб}$  и *временем отпускания*  $t_{отп}$ .

Время от подачи входного напряжения на зажимы обмотки ЭМ до полного притяжения якоря ( $\delta = \delta_K$ ) называют временем срабатывания  $t_{сраб}$ , а время от снятия входного напряжения до возвращения якоря в начальное положение ( $\delta = \delta_H$ ) — временем отпускания  $t_{отп}$ .

Если ввести обозначения  $t_{тр}$  и  $t'_{тр}$  для времени трогания соответственно при срабатывании (время от подачи входного напряжения  $U$  до начала движения, трогания якоря) и отпускании (от снятия  $U$  до начала движения якоря), можно записать:

$$t_{сраб} = t_{тр} + t_{дв}; \quad t_{отп} = t'_{тр} + t'_{дв},$$

где  $t_{дв}$ ,  $t'_{дв}$  — время движения якоря соответственно от  $\delta_H$  до  $\delta_K$ , и наоборот.

Значения  $t_{сраб}$  и  $t_{отп}$  обычно равны 0,05...0,15 с для ЭМ нормального быстрого действия.

Увеличить или уменьшить  $t_{сраб}$  и  $t_{отп}$  можно конструктивными и схемными способами. Конструктивные способы увеличения и уменьшения быстрого действия ЭМ заключаются в следующем.

Снижение  $t_{сраб}$  и  $t_{отп}$  достигается уменьшением вихревых токов в магнитопроводе и хода якоря, равного  $\delta_H - \delta_K$ ; выбором достаточно большого коэффициента запаса при срабатывании  $k_{зсрлб} = I_{уст}/I_{сраб}$  (чем больше  $k_{зсрлб}$ , тем надежнее удерживается якорь в притянутом положении); оптимизацией размеров обмотки и другими методами.

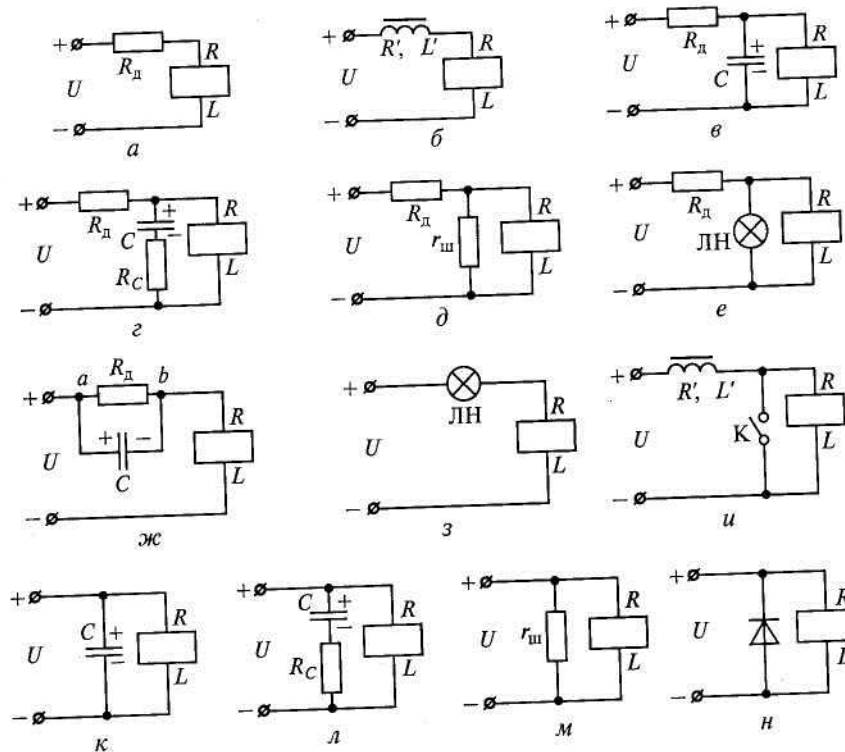


Рис. 15.4. Схемы изменения времени срабатывания и отпускания электромагнитов:  
*a...e* — увеличение  $t_{\text{сраб}}$ ; *ж...и* — уменьшение  $t_{\text{сраб}}$ ; *к...н* — увеличение  $t_{\text{отп}}$

Увеличение  $t_{\text{сраб}}$  и  $t_{\text{отп}}$  осуществляется с помощью электромагнитных, механических, пневматических и гидравлических демпферов, присоединяемых к якорю.

Электромагнитные демпферы выполняют в виде конструктивных элементов, изготовленных из электропроводящего материала и помещенных в магнитное поле (например, в счетчике электроэнергии в поле постоянного магнита вращающийся алюминиевый диск). Если требуется получить  $t_{\text{сраб}}$  и  $t_{\text{отп}}$  порядка одной или нескольких секунд, то прибегают к экранированию: на сердечнике размещают медную втулку, охватывающую все его сечение; возникающий при движении якоря ток экрана замедляет нарастание и спадание потока в магнитопроводе.

На рис. 15.4 показаны некоторые схемные способы изменения  $t_{\text{сраб}}$  и  $t_{\text{отп}}$ . Приведенные схемы обеспечивают стабильное снижение  $t_{\text{сраб}}$  нормальных по быстрдействию ЭМ до нескольких миллисекунд или увеличение их  $t_{\text{отп}}$  до нескольких секунд.

### 15.5. Электромагниты переменного тока

**Тяговая характеристика.** Якорь ЭМ притягивается к сердечнику при подаче в обмотку как постоянного, так и переменного тока. Считая поток в магнитопроводе синусоидальным, что справедливо при синусоидальном напряжении на зажимах обмотки с пренебрежимо малым активным сопротивлением, по формуле Максвелла найдем выражение для тягового усилия:

$$Q_T = \frac{\Phi_\delta^2}{2\mu_0 S} = \frac{(\Phi_{\text{max}} \sin \omega t)^2}{2\mu_0 S} = Q_{T \text{max}} \sin^2 \omega t,$$

где  $\Phi_\delta$  — магнитный поток в воздушном зазоре;  $S$  — поперечное сечение воздушного зазора;  $\omega$  — круговая частота питающего тока; ( $Q_{T \text{max}} = \Phi_{\text{max}}^2 / (2\mu_0 S)$  — амплитуда тягового усилия, неизменного по знаку и пульсирующего с удвоенной частотой (рис. 15.5)).

Притяжение якоря определяется средним значением тягового усилия  $Q_{\text{med}}$ , т.е. его постоянной составляющей (см. рис. 15.5, а). Пульсирующее тяговое усилие можно представить в виде двух составляющих следующим образом:

$$Q_T = Q_{Tmax} \sin^2 \omega t = 0,5 Q_{Tmax} (1 - \cos 2\omega t) = \\ = Q_{Tmed} (1 - 2 \cos 2\omega t) = Q_{Tmed} - Q_T^-,$$

где  $Q_{Tmed} = 0,5 Q_{Tmax} = \Phi_{max}^2 / (4\mu_0 S)$  — постоянная составляющая, т.е. среднее значение тягового усилия;  $Q_T^- = 0,5 Q_{Tmax} \cos 2\omega t = Q_{Tmed} \cos 2\omega t$  — переменная составляющая.

Из сравнения  $Q_{Tmed}$  и  $Q_T$  следует, что при  $\Phi_{max} = \Phi_\delta$  постоянная составляющая тягового усилия ЭМ переменного тока в два раза меньше тягового усилия ЭМ постоянного тока. Значит в общем случае ЭМ постоянного тока при прочих равных условиях развивает большую силу притяжения, чем ЭМ переменного тока.

Если при постоянном (установившемся) напряжении

$$I_{уст} = F/w = U/R = \text{const} \neq f(\delta),$$

то при переменном напряжении, так как от  $\delta$  зависит индуктивность  $L$ ,

$$I_{уст} = F/w = U/z = U/\sqrt{R^2 + x^2} = f(\delta),$$

где  $F$  — тяговое усилие;  $w$  — число витков в обмотке;  $U$  — напряжение питания магнита;  $z$  — полное сопротивление обмотки;  $R$  — активное сопротивление обмотки;  $\delta$  — воздушный зазор.

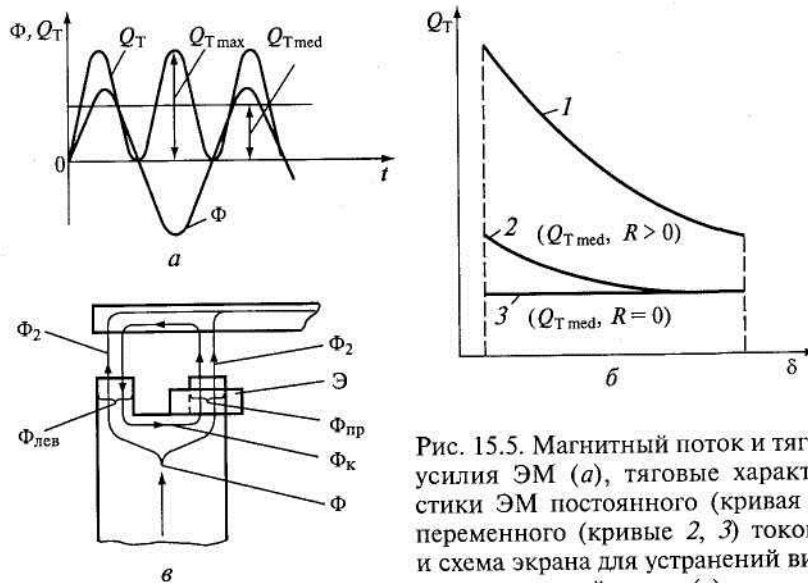


Рис. 15.5. Магнитный поток и тяговые усилия ЭМ (а), тяговые характеристики ЭМ постоянного (кривая 1) и переменного (кривые 2, 3) токов (б) и схема экрана для устранения вибраций якоря (в)

Разной зависимостью от  $\delta$  объясняется различие статических тяговых характеристик ЭМ постоянного и переменного токов, показанных на рис. 15.5, б. Если тяговая характеристика 1 электромагнита постоянного тока круто поднимается с уменьшением  $\delta$ , то тяговая характеристика 2 электромагнита, работающего на переменном токе, более пологая из-за роста индуктивности обмотки. Если  $R = 0$ , то согласно второму закону Кирхгофа приложенное к обмотке напряжение уравновешивается только ЭДС самоиндукции (е), т.е.

$$U = U_{max} \sin \omega t = -e = wd\Phi/dt.$$

При  $U_{max} = \text{const}$  и, следовательно,  $\Phi_{max} = \text{const}$  и  $\Phi_{max} \neq f(\delta)$  тяговая характеристика ЭМ имеет вид горизонтальной прямой 3. Таким образом, форма тяговой характеристики ЭМ переменного тока зависит от соотношения активного  $R$  и индуктивного  $X_L$  сопротивлений цепи его обмотки.

**Способы устранения вибрации якоря.** Как видно из рис. 15.5, а, в некоторые моменты времени тяговое усилие  $Q_T$  обращается в нуль. При наличии противодействующей силы  $Q_{Mex}$ , изменяющейся в соответствии с механической характеристикой ЭМ и стремящейся оторвать якорь от сердечника, это

может привести к вибрации якоря: когда  $Q_{\text{Мех}} > Q_T$  якорь отходит от сердечника, а при  $Q_T > Q_{\text{Мех}}$  снова притягивается. Если  $f = 50$  Гц, то якорь совершает 100 колебаний в секунду, что приводит к повышенному механическому износу и возникновению шума.

Эффективными средствами снижения вибрации якоря являются уменьшение пульсации тягового усилия с помощью магнитных экранов (короткозамкнутых витков), охватывающих часть сечения сердечника, и использование многофазных ЭМ.

На рис. 15.5, в приведена конструкция части магнитопровода ЭМ с экраном и показаны направления магнитных потоков при убывании основного потока  $\Phi$ . Тогда в соответствии с принципом Ленца поток  $\Phi_k$ , создаваемый током, наведенным в экране (Э) правым потоком  $\Phi_{\text{пр}}$ , будет направлен согласно с правым потоком  $\Phi_{\text{пр}}$ , т. е.  $\Phi_2 = \Phi_{\text{пр}} + \Phi_k$  и  $\Phi_1 = \Phi_{\text{лев}} - \Phi_k$ , где  $\Phi_1$   $\Phi_2$  — суммарные потоки в воздушных зазорах.

Для того чтобы исключить вибрацию якоря, можно также использовать двух- или трехфазный электромагнит с токами в катушках, сдвинутыми по фазе.

Если с якорем сочленены инерционные механизмы, то он утяжеляется, что предотвращает вибрацию с частотой  $2\omega$ . Однако чувствительность ЭМ при этом снижается.

### 15.6. Поляризованные электромагниты

Принципиальное отличие поляризованных электромагнитов (ПЭМ) от нейтральных состоит в существовании зависимости между направлением перемещения якоря и полярностью управляющего напряжения  $U_p$ , прикладываемого к рабочей обмотке. Эта зависимость достигается с помощью двух магнитных потоков: рабочего  $\Phi_r$ , создаваемого постоянным напряжением, полярность которого может изменяться, и поляризирующего  $\Phi_p$ , образуемого постоянным магнитом или электромагнитом постоянного тока с неизменной полярностью питающего напряжения (рис. 15.6).

Повышенное быстродействие ПЭМ (несколько миллисекунд) по сравнению с нейтральными ЭМ достигается не только конструктивными приемами (шихтованным магнитопроводом, небольшими ходом и массой якоря, малой постоянной времени обмотки), но и связано непосредственно с его принципом действия: при срабатывании и отпуске поток в магнитопроводе не возникает и не исчезает, а перераспределяется или изменяет свое значение. Еще одна особенность ПЭМ, обусловленная наличием постоянного магнита, заключается в возможности принятия якорем различных фиксированных положений при обесточенной рабочей обмотке.

Различают три основные конструктивные схемы магнитопроводов ПЭМ: последовательную, параллельную (дифференциальную) и мостовую.

Схема ПЭМ с *последовательной магнитной цепью*, в которой рабочий поток  $\Phi_r$ , создаваемый током рабочей обмотки, и поляризирующий поток  $\Phi_p$  постоянного магнита замыкаются в общем простом неразветвленном магнитопроводе  $I$ , показана на рис. 15.6, а вместе с его схемой замещения (в схеме замещения предполагается, что магнитная цепь не насыщена). При встречном действии потоков  $\Phi_r$  и  $\Phi_p$  якорь 2 оттянут пружиной 3. Изменение полярности рабочего напряжения вызывает притяжение якоря к сердечнику.



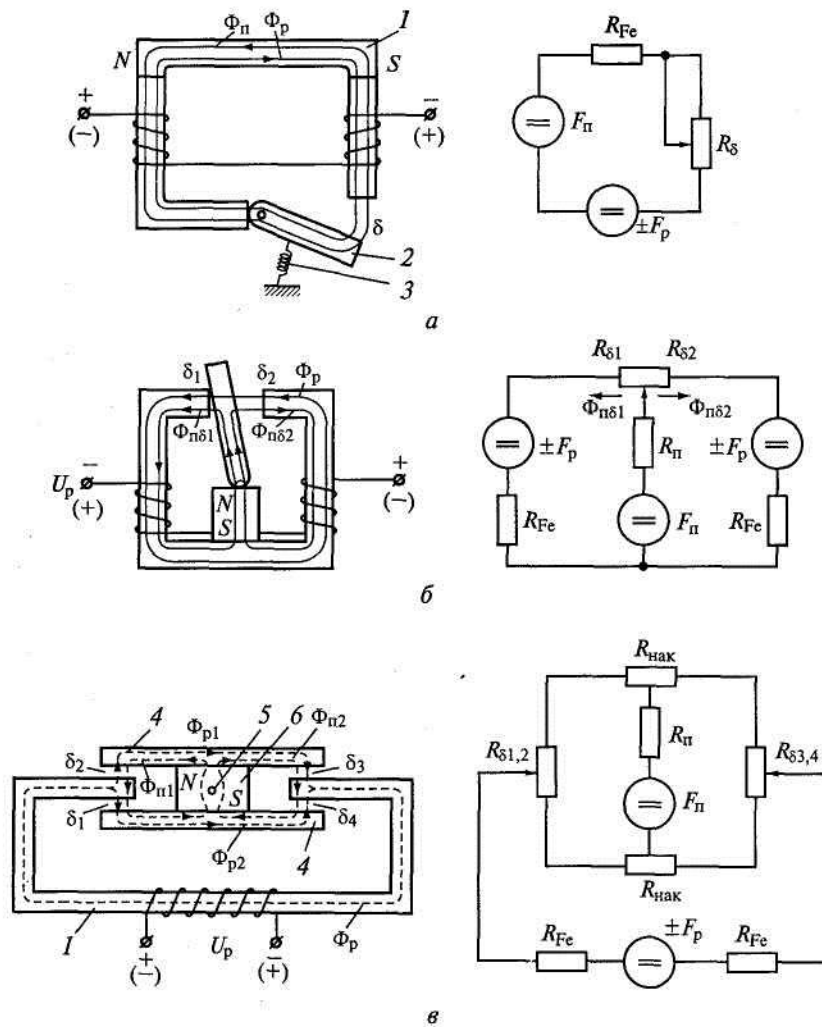


Рис. 15.6. Конструктивные и эквивалентные электрические схемы поляризованных электромагнитов:  
*a* — с неразветвленным магнитопроводом; *б* — с дифференциальной магнитной цепью; *в* — с мостовым магнитопроводом; *1* — магнитопровод; *2* — якорь; *3* — пружина; *4* — полюсные наконечники; *5* — ось; *б* — постоянный магнит

На рис. 15.6, б представлена одна из принципиальных схем ПЭМ с *дифференциальной (параллельной) магнитной цепью* и соответствующей схемой замещения. Здесь полярирующий поток  $\Phi_{\text{п}}$  разветвляется на два потока  $\Phi_{\text{п}\delta 1}$  и  $\Phi_{\text{п}\delta 2}$ , проходящих по сердечникам. Один из них при данной полярности рабочего напряжения действует с потоком  $\Phi_{\text{р}}$  согласно, а другой — встречно.

Якорь притягивается к левому или правому полюсу в зависимости от того, в каком из зазоров  $\delta_1$  или  $\delta_2$  рабочий и полярирующий потоки суммируются. Тяговое усилие определяется разностью сил притяжения в зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (откуда и название дифференциальный ПЭМ). При изменении полярности рабочего напряжения  $U_{\text{р}}$  якорь перебрасывается к противоположному полюсу.

Одна из конструктивных схем ПЭМ с *мостовым магнитопроводом* и соответствующая схема замещения изображены на рис. 15.9, в. Рабочий поток  $\Phi_{\text{р}}$ , проходящий по С-образному магнитопроводу *1*, разветвляется на два потока  $\Phi_{\text{р}1}$  и  $\Phi_{\text{р}2}$ , а полярирующий поток  $\Phi_{\text{п}}$  постоянного магнита *б* — на два потока  $\Phi_{\text{п}1}$  и  $\Phi_{\text{п}2}$ .

При данной полярности рабочего напряжения  $U_{\text{р}}$  потоки  $\Phi_{\text{п}1}$  и  $\Phi_{\text{р}2}$  в зазоре  $\delta_1$  и  $\Phi_{\text{р}1}$  и  $\Phi_{\text{п}2}$  в зазоре  $\delta_3$  суммируются, а  $\Phi_{\text{п}1}$  и  $\Phi_{\text{р}1}$  в зазоре  $\delta_2$  и  $\Phi_{\text{п}2}$  и  $\Phi_{\text{р}2}$  в  $\delta_4$  вычитаются, вследствие чего постоянный магнит *б* с полюсными наконечниками *4* поворачивается на некоторый угол против хода часовой стрелки вокруг оси *5*. Изменение полярности рабочего напряжения вызывает поворот магнита с полюсными наконечниками в обратном направлении.

Основные недостатки ПЭМ с последовательной магнитной цепью — это, во-первых, малая магнитная проницаемость магнито-твердого материала постоянного магнита, из-за чего снижается чувствительность ПЭМ и требуется повышенная МДС рабочей обмотки, а во-вторых, воздействие размагничивающей рабочей МДС на постоянный магнит, что неблагоприятно сказывается на

## Глава 16 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ

### 16.1. Классификация муфт

Передачу вращающего момента с ведущего входного вала (чаще всего вала приводного двигателя) на соосный ведомый входной вал (вал приводимого механизма, механической нагрузки) осуществляют с помощью муфт. Их классификация представлена на рис. 16.1. Первым классификационным признаком служит управляемость муфт, затем — род управляющей энергии, далее — характер связи входного и выходного валов и, наконец, — принцип управления.

Для быстрого включения, выключения и реверса приводимых механизмов, а также для регулирования их скорости и ограничения передаваемого момента применяют различные управляемые сцепные муфты. К ним относится большая группа *электромеханических муфт*, т.е. муфт, в которых для передачи механического момента исполнительному механизму используют электрический сигнал. Так как мощность этого сигнала меньше развиваемой на ведомом валу, то электромеханическую муфту можно рассматривать как усилитель с коэффициентом усиления по мощности.



Рис. 16.1. Схема классификации муфт

Коэффициент усиления по мощности

$$k_p = P_{\text{вык}} / P_{\text{вх}} = M\Omega / (UI),$$

где  $M$  — электромагнитный момент муфты;  $\Omega$  — установившаяся угловая частота вращения;  $U$  — напряжение питающей сети;  $I$  — установившееся значение тока в катушке.

В муфте-усилителе электрический сигнал управляет мощностью, передаваемой от ведущего вала ведомому.

Управляемые муфты по виду статической характеристики — зависимости скорости вращения ведомого вала от сигнала управления подразделяются на *релейные* и *аналоговые*. Первые после подачи сигнала управления осуществляют жесткое сцепление валов, а вторые — гибкое, при котором скорость ведомого вала связана плавной зависимостью с управляющим сигналом. Гибко сцепление позволяет в некоторых системах управления обойтись без управляемых исполнительных двигателей.

Приводы с управляемыми муфтами обладают большим быстродействием из-за меньшего момента инерции муфт по сравнению с исполнительными двигателями.

Управляемые электромеханические муфты применяют в регулируемых приводах в диапазоне

мощностей от нескольких ватт и до десятков мегаватт.

Рассмотрим несколько типов электромеханических муфт с электрическим управлением.

## 16.2. Фрикционные муфты

Фрикционные муфты (ФМ) предназначены в основном для жесткого сцепления валов. Гибкое соединение с их помощью возможно только путем импульсного управления, при котором частота вращения вала представляет собой функцию скважности импульсов напряжения, подаваемых на зажимы обмотки. Фрикционные муфты, или электромеханические муфты сухого трения, с механической связью (рис. 16.2) характеризуются большим разнообразием конструкций и схем управления.

На рис. 16.2, *a* показана однодисковая неререверсивная ФМ, состоящая из двух цилиндрических полумуфт. На ведущем валу 7 жестко посажена полумуфта 4, являющаяся сердечником и ярмом электромагнита. Его ярком служит полумуфта 2, которая соединена с ведомым валом 1 скользящей посадкой и, следовательно, может перемещаться в осевом направлении. С помощью колец 6 и щеток на обмотку 5 подается управляющее напряжение. Возникающее тяговое усилие вызывает притяжение якоря (полумуфты 2) к сердечнику (полумуфте 4) и плотное сцепление фрикционных дисков 3 из материалов с высоким коэффициентом трения (сталь — сталь, чугун — чугун, бронза — бронза, чугун — бронза, сталь — ферродо и др.), благодаря чему обеспечивается сцепление валов.

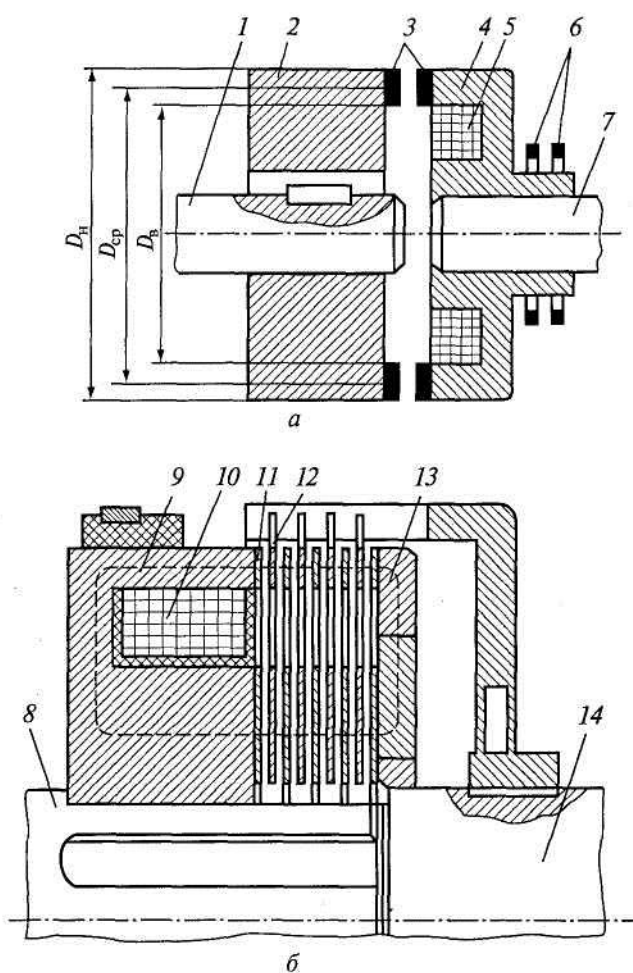


Рис. 16.2. Конструктивные схемы фрикционных муфт:  
*a* — однодисковой; *б* — многодисковой; 1, 14 — ведомый вал; 2, 4 — полумуфты;  
3, 11, 12 — фрикционные диски; 5, 10 — обмотка; 6 — кольца; 7, 8 — ведущий  
вал; 9 — сердечник; 13 — нажимная шайба

При обесточенной обмотке якорь оттягивается от сердечника пружиной (на рисунке не показана).

Основное достоинство однодисковой ФМ — простота, однако с ростом передаваемого вращающего момента значительно увеличиваются ее размеры.

Действительно, передаваемый муфтой момент, создаваемый силами трения фрикционных дисков,

определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 M &= (m-1) \int_{R_B}^{R_H} dN k_{\text{тр}} R = (m-1) \int_{R_B}^{R_H} (\sigma_{\text{доп}} 2\pi R dR) k_{\text{тр}} R = \\
 &= (m-1) 2\pi \sigma_{\text{доп}} k_{\text{тр}} \int_{R_B}^{R_H} R^2 dR = (2/3) \pi \sigma_{\text{доп}} k_{\text{тр}} (1 - k_R^3) (m-1) R_H^3 = \\
 &= 0,26 \sigma_{\text{доп}} k_{\text{тр}} (1 - k_R^3) (m-1) D_H^3,
 \end{aligned}$$

где  $m$  — число дисков;  $dN$  — сила прижатия дисков в элементарном слое  $2\pi R dR$ ;  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент трения;  $\sigma_{\text{доп}}$  — допустимое удельное давление ( $k_{\text{тр}}$  и  $\sigma_{\text{доп}}$  для каждой пары материалов имеют свои значения);  $k_R = R_B/R_H$ ;  $R_H, R_B$  — соответственно наружный и внутренний радиусы дисков;  $D_H$  — наружный диаметр диска ФМ.

Следовательно, больший передаваемый момент связан с необходимостью увеличивать наружный диаметр диска  $D_H$ . Если же в ФМ предусмотреть несколько фрикционных дисков ( $m > 2$ ), то при прочих равных условиях  $D_H$  существенно уменьшается с ростом  $m$ :

$$D_H = \sqrt[3]{M / [0,26 k_{\text{тр}} \sigma_{\text{доп}} (1 - k_R^3) (m-1)]}.$$

Одна из конструкций многодисковых ФМ показана на рис. 16.2, б, где фрикционные диски 11 соединены шлицами внутренней окружности с ведущим валом 8, а диски 12 с помощью шлицев на наружной окружности — с ведомым валом 14. При отключенной обмотке 10 чередующиеся диски 11 и 12 проскальзывают друг относительно друга. Подача управляющего напряжения обеспечивает прижатие дисков друг к другу вследствие притяжения к сердечнику 9 нажимной шайбы 13, являющейся якорем электромагнита. В результате возникает сцепление между дисками, необходимое для передачи заданного момента  $M$ .

При заданном наружном диаметре  $D_H$  фрикционной муфты можно найти число фрикционных дисков  $m$  для передачи требуемого вращающего момента  $M$  ведомому валу. Их немного ( $m = 6 \dots 10$ ), а значит, надежное и быстрое включение ФМ достигается при достаточно высоких значениях удельного давления на фрикционных поверхностях — 7,8...9,8 Па.

Из рис. 16.2, б, где штрихами условно показана средняя силовая линия верхней половины ФМ, видно, что по отношению к нажимной шайбе 14 фрикционные диски представляют собой магнитные шунты, по которым замыкаются потоки рассеяния, ослабляющие силу притяжения. Чтобы магнитное сопротивление в радиальном направлении стало значительно больше, чем в осевом, в дисках сделаны вырезы, приводящие к образованию узких легко насыщающихся перемычек. Таким приемом удается ограничить поток рассеяния через каждый диск в среднем до 2...4 %.

Обмотку ФМ обычно подключают к постоянному напряжению (или переменному через встроенный выпрямитель), чтобы использовать преимущества электромагнитов постоянного тока.

Тяговое усилие, которое должен развивать электромагнит, можно найти из выражения

$$Q_T = \sigma_{\text{доп}} \pi (R_H^2 + R_B^2) = \sigma_{\text{доп}} \pi (1 - k_R^2) R_H^2.$$

Для его создания в рабочем зазоре необходима магнитная индукция  $B_\delta$ , значение которой можно определить из формулы Максвелла:

$$B_\delta = 5,01 \cdot 10^{-3} \sqrt{Q_T / (10 S_\delta)},$$

где  $S_\delta$  — площадь поперечного сечения рабочего зазора.

Чтобы провести рабочий поток через рабочий зазор, в соответствии со вторым законом Кирхгофа для магнитных цепей требуется МДС

$$F_\delta = H_\delta l_\delta = B_\delta l_\delta / \mu_0 = B_\delta l_\delta / (4\pi \cdot 10^{-7}) \approx 1,6 \cdot 10^6 B_\delta \delta_p,$$

где  $H_\delta$  — напряженность магнитного поля в зазоре  $\delta$ ;  $l_\delta = 28r$  — длина рабочего зазора.

Для учета магнитного сопротивления магнитопровода и нерабочих зазоров найденное значение МДС увеличивают на 20... 30 %:

$$F = Iw = (1,2 \dots 1,3)F_\delta.$$

Площадь окна  $S_{ок}$  для размещения обмотки электромагнита находят из соотношения

$$S_{ок}k_3j = F,$$

где  $k_3$  — коэффициент заполнения окна медью;  $j$  — допустимая плотность тока в обмотке.

Окно выполняют прямоугольной формы с соотношением размеров в осевом и радиальном направлениях  $h/b = 2,5$ .

После такого ориентировочного расчета уточняют размеры магнитопровода, параметры электромагнита и данные обмотки.

Установившийся режим в приводах с электромагнитными муфтами наступает после окончания переходных процессов не только в муфте, но и в двигателе, и приводимом механизме. Поэтому переходные процессы рассматривают не собственно в муфте, а в системе двигатель—муфта—приводимый механизм.

При анализе переходных процессов во время пуска привода с ФМ можно выделить три временных интервала.

*Время  $t_{в.л}$  выборки люфта*  $\delta_\Delta = \delta_0 - \delta_k$ , где  $\delta_0$ ,  $\delta_k$  — длина воздушного зазора соответственно в оттянутом состоянии якоря при  $I = 0$  и притянута состоянии, когда якорь переместился до начала соприкосновения фрикционных поверхностей. Другими словами, этот период охватывает время  $t_{тр} + t_{дв1}$  где  $t_{тр}$  — время трогания якоря от подачи напряжения  $U$  на зажимы катушки до начала осевого движения якоря;  $t_{дв1}$  — время осевого движения якоря до соприкосновения фрикционных поверхностей. Время  $t_{в.л}$  определяется только параметрами ФМ. В этот период ведомый вал неподвижен, так как сцепления полумуфт еще нет.

*Время сцепления  $t_{сц} = t_{дв2}$*  — от момента соприкосновения до момента полного сцепления поверхностей трения. В это время диски проскальзывают друг относительно друга, пока еще не закончилось осевое движение якоря, а магнитный поток и электромагнитный момент продолжают расти. После начала вращения ведомого вала при  $M > M_c$  ( $M_c$  — момент сопротивления, создаваемый нагрузкой) частота вращения двигателя уменьшается, а частота вращения приводимого механизма увеличивается. Они становятся одинаковыми, когда наступает полное сцепление. Время  $t_{сц}$  определяется параметрами не только ФМ, но и двигателя и приводимого механизма.

*Время жесткого разгона  $t_{ж.р}$*  — от момента установления полного сцепления полумуфт до момента достижения установившегося значения частоты вращения. На этом этапе процесс протекает так же, как и при жестком соединении валов, и время  $t_{ж.р}$  определяется только параметрами двигателя и приводимого механизма.

### 16.3. Ферропорошковые муфты

Ферропорошковые муфты (ФПМ) предназначены в основном для гибкого сцепления валов, хотя могут применяться и для жесткого сцепления.

Конструктивное отличие ферропорошковых муфт с сухим или жидким наполнителем и электромагнитным управлением от рассмотренных ранее фрикционных муфт (ФМ) с таким же управлением заключается в том, что, во-первых, полумуфта на ведомом валу посажена жестко и, во-вторых, неизменный поэтому воздушный рабочий зазор заполнен магнетодиэлектриком. Последний представляет собой или смесь ферромагнитного порошка (стали, легированной хромом или никелем; карбонильного железа; пермаллоя и др.) с сухим диэлектриком (коллоидным графитом, тальком, тонкодисперсным стеклом и т.д.), называемым разделителем и служащим для предотвращения комкования и существенного уменьшения изнашивания муфты при высоких температурах, или взвесь ферромагнитного порошка (чаще всего карбонильного железа) в жидком диэлектрике (обычно

кремнийорганическом или минеральном масле), предохраняющем порошок от окисления и комкования.

Такие наполнители-магнитоэлектрики обладают свойством тиксотропии, т.е. способностью становиться студенистыми, все более загустевая вплоть до затвердевания по мере усиления магнитного поля, а при снятии его возвращаться в исходное состояние. Ориентируясь по силовым линиям поля, ферромагнитные частицы образуют цепочки — связи, сцепляющие ведущую и ведомую поверхности. Ведущая поверхность, увлекая ведомую, приводит ее в движение.

На рис. 16.3, а показана схема цилиндрической ФПМ с двумя концентрическими поверхностями 10 и 9. Кольцевое пространство между ними заполнено порошковой смесью 8. На внутренней — ведущей полумуфте расположена обмотка возбуждения 7, выведенная на контактные кольца 2, к которым прижимаются щетки 4. Крышки 5 и 14, изготовленные из немагнитного материала, позволяют направить большую часть магнитного потока через порошковый слой, уменьшив поток рассеяния, и снизить массу ведомой полумуфты.

Линейность зависимости  $M(I)$  при малых и больших значениях тока нарушается (рис. 16.3, б) из-за изменения плотности сцепляющего слоя и насыщения магнитопровода. При отсутствии тока в обмотке с ведущего вала 3 на ведомый вал 12 передается небольшой вращающий момент  $M_0$ , обусловленный силами трения в рабочем слое и уплотнениях муфты и остаточным магнитным потоком. Характеристика  $M(I)$  имеет магнитный и механический гистерезис (нисходящая ветвь показана штриховой линией). Отношение  $\Delta M/M_{max}$  колеблется в пределах 7... 15%, а  $M_0/M_{max}$  — в пределах 3... 10 %.

На рис. 16.3, в дан эскиз магнитной системы ФПМ с неподвижной обмоткой. Такие муфты называют еще бесконтактными из-за отсутствия скользящих контактов кольцо—щетка.

ФПМ обладают важным преимуществом по сравнению ФМ, так как в них осуществляется гибкое сцепление валов: образовавшиеся при данном токе магнитные связки выдерживают определенный предельный момент сопротивления  $M_c$ ; при  $M < M_c$  эти связки разрушаются, муфта начинает проскальзывать, затем связки опять восстанавливаются и рвутся и т.д. Из-за такого импульсного воздействия частоты вращения и ведущего  $n_1$  и ведомого  $n_2$  валов неравны, и последний вращается со скольжением

$$s = (n_1 - n_2)/n_1,$$

отличным от нуля. Таким образом, при гибком сцеплении валов  $n_2 < n_1$ . Проскальзывание ограничивает передаваемый момент  $M$  вплоть до остановки ведомого вала ( $s = 1$ ) при значительном превышении  $M_c$  над  $M$ .

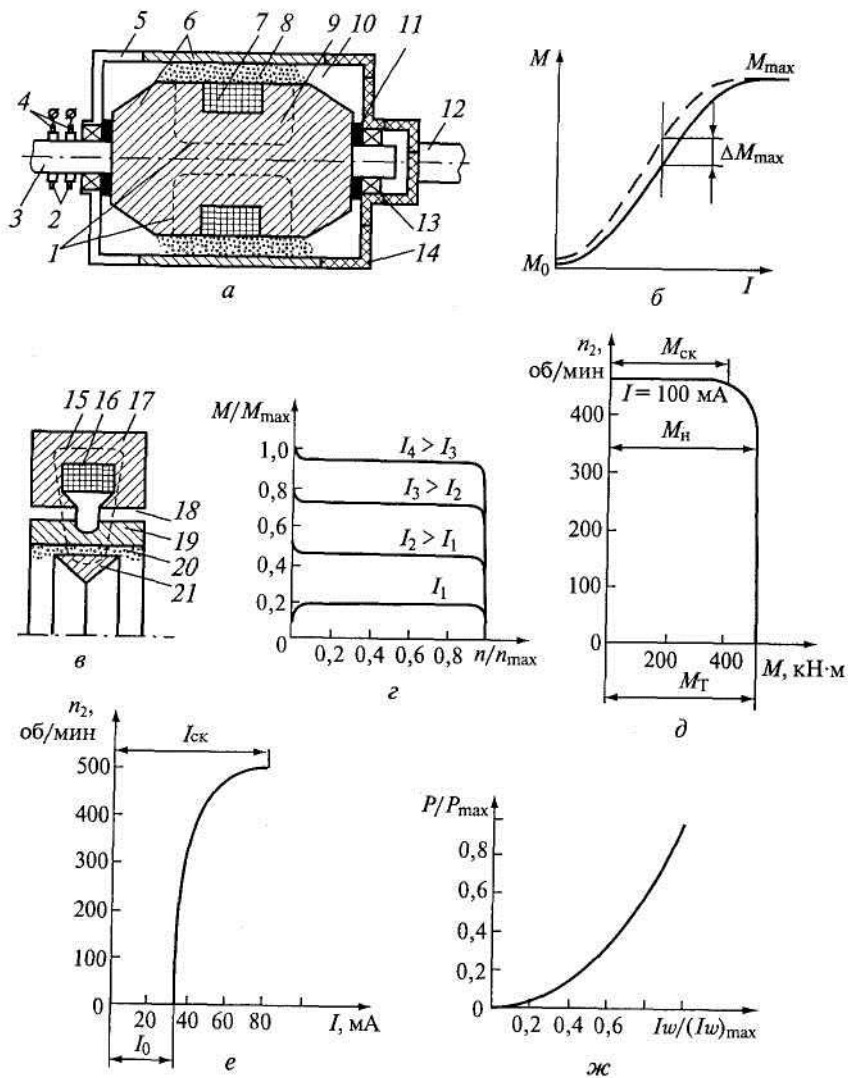


Рис. 16.3. Ферропорошковые муфты:

*a* — схема цилиндрической ФПМ; *б* — зависимость вращающего момента муфты от тока; *в* — магнитная система бесконтактной ФПМ; *г* — зависимость передаваемого момента от тока управления и частоты вращения; *д* — зависимость скорости ведомого вала от передаваемого момента; *е* — зависимость скорости ведомого вала от тока; *ж* — зависимость передаваемой мощности от МДС обмотки; 1, 15 — магнитные потоки; 2 — контактные кольца; 3 — ведущий вал; 4 — щетки; 5, 14 — крышки; 6 — детали, выполненные из ферромагнитных материалов; 7 — обмотка возбуждения; 8 — порошковая смесь; 9, 10 — концентрические поверхности; 11 — уплотнение; 12 — ведомый вал; 13 — подшипники; 16 — обмотка; 17 — неподвижная часть магнитопровода; 18 — нерабочий воздушный зазор; 19 — ведущая часть; 20 — рабочий зазор; 21 — ведомая часть

Рис. 16.3, *г* иллюстрирует одно из важнейших свойств ФПМ — независимость момента  $M$  на ведомом валу (передаваемого момента) от его частоты вращения при неизменном токе возбуждения (управления) обмотки.

На рис. 16.3, *д* показана зависимость  $n_2(M)$  для одной из ФПМ при  $I = 100 \text{ мА} = \text{const}$  и  $n_1 = 500 \text{ об/мин} = \text{const}$ . При  $M = M_{\text{ск}}$  скольжение начинается, а при  $M = M_{\text{т}}$  оно становится равным единице.

Для этой же муфты на рис. 16.3, *е* приведена зависимость  $n_2(I)$  при постоянном нагрузочном моменте  $M_{\text{н}} = 393 \cdot 10^3 \text{ Нм} = \text{const}$  и  $n_1 = 500 \text{ об/мин} = \text{const}$ . Кривую  $n_2(I)$  можно построить по зависимостям  $M(I)$  и  $n_2(M)$ . Из рисунка видно, что при достаточно большом токе валы сцеплены жестко ( $n_2 = n_1$ ,  $s = 0$ ). Уменьшение тока до значения  $I_{\text{ск}}$  вызывает проскальзывание муфты, вследствие чего  $n_2$  становится меньше  $n_1$ . Чем меньше  $I$ , тем больше  $s$ . Когда  $I$  достигает значения  $I_0$ , ведомый вал останавливается ( $n_2 = 0$ ,  $s = 1$ ).

Таким образом, ФПМ позволяет регулировать частоту вращения. Выделяемая при этом теплота рассеивается либо посредством специальной системы охлаждения, либо за счет увеличения размеров муфты и связанного с этим недоиспользования ее по  $M$ . Кроме того, на почти вертикальном участке характеристики  $n_2(I)$  поддерживать требуемую частоту вращения можно только с помощью достаточно

сложной системы автоматического регулирования. Следовательно, возможности ФПМ по регулированию частоты вращения в широком диапазоне ограничены.

На рис. 16.3, *ж* представлена зависимость  $P/P_{max} = f[I_w/(I_w)_{max}]$  передаваемой мощности от МДС обмотки муфты. Так как наполнитель практически безынерционен, каждому мгновенному значению тока соответствуют определенные поток  $\Phi$  и передаваемый момент  $M$ .

Поскольку наполнитель увеличивает магнитную проницаемость рабочего зазора в 4...8 раз, мощность управления снижается примерно вдвое по сравнению с ФМ. К преимуществу ФПМ относятся также их быстродействие (в 10... 15 раз больше, чем у ФМ), обусловленное неподвижностью обеих полумуфт в осевом направлении и практической безынерционностью наполнителя. Основным недостатком ФПМ — большие размеры и масса по сравнению с ФМ.

Часто ФПМ применяют в качестве сцепных, предохранительных, динамометрических и тормозных, а благодаря линейной зависимости  $M(I)$  — и в качестве усилителей мощности для сервоприводов и следящих систем.

#### 16.4. Муфты скольжения

Муфты скольжения (МС) предназначены в основном для гибкого сцепления валов и регулирования частоты вращения ведомого вала при нерегулируемом приводном двигателе. Их называют также асинхронными индукционными муфтами со связью через поле с электромагнитным управлением.

Из всего конструктивного и функционального многообразия МС рассмотрим широко распространенные *муфты индукторного типа с массивным якорем* как наиболее простые в изготовлении и эксплуатации.

Принцип действия таких МС поясним на примерах их конкретных исполнений, представленных на рис. 16.4.

На рис. 16.4, *а* показана схема муфты индукторного типа со скользящими токоподводящими контактами, основными частями которой являются якорь 4 и индуктор 6. Между двумя рядами зубцов 3 муфты размещена кольцевая обмотка 5, питание к которой подводится с помощью колец 2. Такую конструкцию называют одно-именнополюсной, потому что зубцы каждого ряда имеют одинаковую полярность. Индуктор с помощью шлицев соединяется с ведущим валом 1, а якорь посажен на ведомом валу 7. При вращении индуктора вследствие механического перемещения электромагнитов возникает вращающееся магнитное поле. Взаимодействие наводимых при этом в якоре вихревых токов с вращающимся магнитным полем движет якорь в сторону вращения индуктора.



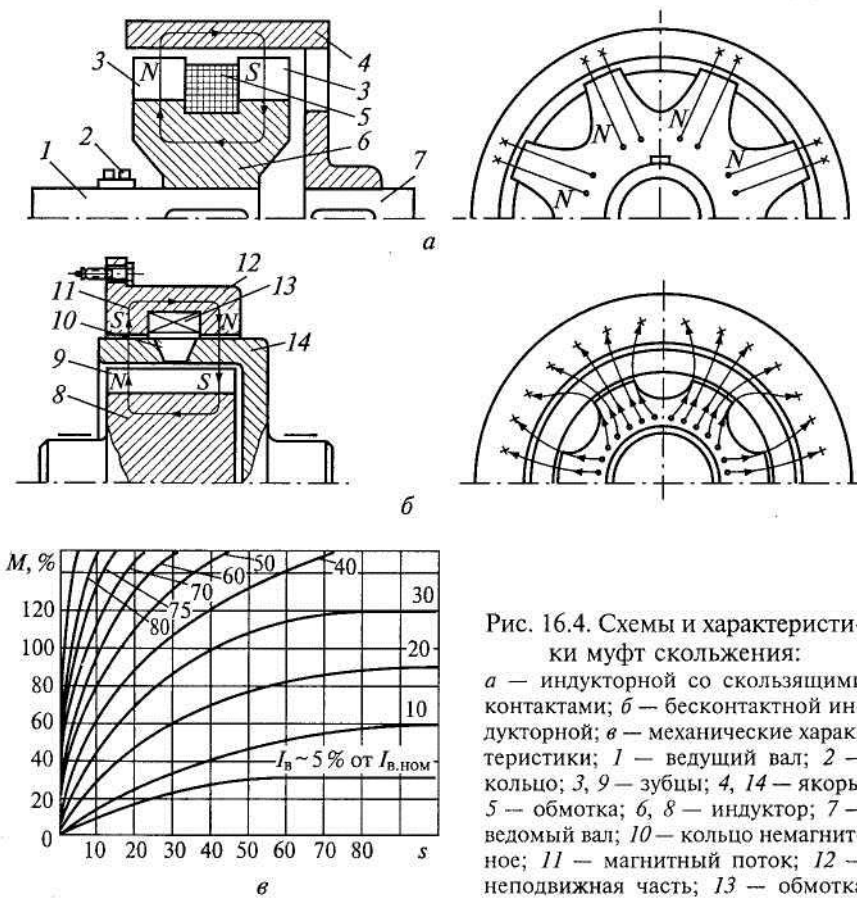


Рис. 16.4. Схемы и характеристики муфт скольжения: а — индукторной со скользящими контактами; б — бесконтактной индукторной; в — механические характеристики; 1 — ведущий вал; 2 — кольцо; 3, 9 — зубцы; 4, 14 — якорь; 5 — обмотка; 6, 8 — индуктор; 7 — ведомый вал; 10 — кольцо немагнитное; 11 — магнитный поток; 12 — неподвижная часть; 13 — обмотка

Выделим на внутренней поверхности якоря контуры, соответствующие очертаниям зубцов полюсов  $N$  и  $S$ . При вращении индуктора потокосцепления с выделенными контурами уменьшаются и в соответствии с законом электромагнитной индукции в якоря наводятся вихревые токи. Согласно принципу Ленца их направления должны быть такими, чтобы создаваемый ими магнитный поток был направлен согласно с магнитным потоком обмотки, а механические силы от взаимодействия последнего с вихревыми токами вызывали движение якоря за индуктором. Можно сказать, что на внутренней поверхности якоря против каждого полюса  $N$  индуктора возникает полюс  $S$ , а против полюса  $S$  индуктора — полюс  $N$  на якоря. Взаимное притяжение этих полюсов противоположных полярностей заставляет ведомый вал вращаться в сторону ведущего.

На рис. 16.4, б представлена схема магнитной системы бесконтактной МС индукторного типа. В неподвижной части 12 магнитопровода этой муфты размещена кольцевая обмотка 13. Якорь 14 состоит из двух ферромагнитных половин цилиндрической формы, которые соединяются немагнитным кольцом 10, препятствующим замыканию магнитного потока 11 по якорю. Проходя по индуктору 8, этот поток намагничивает зубцы 9. Если на внутренней поверхности якоря при вращении индуктора магнитная индукция по окружности изменяется, наводя вихревые токи в якоря, то на внешней его поверхности магнитное поле близко к однородному, благодаря чему якорь 14 практически не взаимодействует с неподвижной частью 12. Бесконтактное исполнение увеличивает эксплуатационную надежность МС, однако при этом неизбежны повышенный расход меди в обмотке и увеличенные размеры магнитной системы. Это объясняется необходимостью создания большей МДС для преодоления дополнительного, нерабочего зазора между неподвижной частью магнитопровода и внешней поверхностью якоря.

Для МС большой мощности, выполняемой с якорем в виде беличьей клетки, на рис. 16.4, в приведены механические характеристики зависимости момента от скольжения  $M(s)$  при неизменных токе возбуждения ( $I_b = \text{const}$ ) и частоте вращения приводного двигателя ( $n_1 = \text{const}$ ). Каждому значению тока возбуждения соответствует своя механическая характеристика. С ростом  $I_b$  уменьшается  $s$  вследствие большей связи якоря с индуктором через более сильное магнитное поле.

Важнейшие достоинства МС — простота конструкции и управления, низкая стоимость, отсутствие изнашивающихся деталей, что обуславливает повышенный эксплуатационный ресурс. Кроме отмеченных ранее гибкого сцепления и плавного регулирования частоты вращения в многообразных конструктивных исполнениях МС обеспечиваются ограничение вращающего момента, регулирование

тормозного усилия по любому закону, предохранение электропривода от поломок, пуск приводного двигателя вхолостую и с моментом сопротивления, превышающим пусковой момент. Основными недостатками МС являются значительные размеры, масса и потери энергии при длительной работе с большими скольжениями (мощность потерь пропорциональна  $s$ ).

## Глава 17 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 17.1. Общие сведения

В системах автоматики и телемеханики, в различных приборах исполнительные двигатели постоянного тока находят не менее широкое применение, чем исполнительные двигатели переменного тока.

К положительным качествам исполнительных двигателей постоянного тока относятся следующие:

- возможность получения теоретически любых, сколь угодно малых и больших частот вращения;
- возможность простого, плавного, экономичного и в широком диапазоне регулирования частоты вращения;
- устойчивость работы практически при любых частотах вращения;
- линейность механических, а в ряде случаев и регулировочных характеристик;
- отсутствие самохода;
- значительный пусковой момент;
- сравнительно небольшая электромеханическая постоянная времени;
- малые габаритные размеры и масса (значительно меньшие, чем у исполнительных двигателей переменного тока).

Основным недостатком наиболее широко распространенных *коллекторных (контактных) исполнительных двигателей постоянного тока*, ограничивающим области их применения, является наличие скользящих контактов — коллектора и щеток.

Непостоянство переходного сопротивления скользящих контактов приводит к нестабильности характеристик двигателя. Искрение под щетками приводит к подгоранию контактов коллектора и щеток, т. е. обуславливает необходимость систематического ухода за ними и недопустимость установки двигателей обычного использования во взрывоопасных помещениях. Коллектор и щетки являются источниками радиопомех, для подавления которых требуются специальные фильтры.

Коллекторные исполнительные двигатели имеют механический коллектор и щетки. Причем различают двигатели с ферромагнитными шихтованными (массовыми) якорями, имеющими пазы (рис. 17.1), или с гладкими (беспазовыми) якорями и малоинерционные двигатели, якоря которых не имеют магнитных магнитопроводов.

По способу возбуждения коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока могут быть с электромагнитным возбуждением (см. рис. 17.1) и возбуждением от постоянных магнитов.

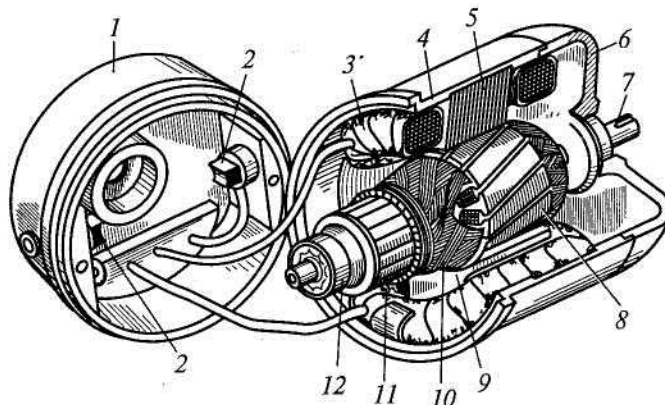


Рис. 17.1. Исполнительный коллекторный двигатель постоянного тока:  
1 — передний подшипниковый щит; 2 — щетки; 3 — обмотка полюса; 4 — корпус; 5 — статор в разрезе; 6 — задний подшипниковый щит; 7 — вал; 8 — сердечник якоря; 9 — полюс; 10 — обмотка якоря; 11 — коллектор; 12 — шариковый подшипник

У двигателей с электромагнитным возбуждением в качестве обмотки управления используется либо обмотка якоря — двигатели с якорным управлением (рис. 17.2, а), либо обмотка полюсов — двигатели с полюсным управлением (рис. 17.2, б). У двигателей, возбуждаемых постоянными магнитами, обмоткой управления является единственная их обмотка — обмотка якоря, поэтому они всегда работают при якорном управлении.

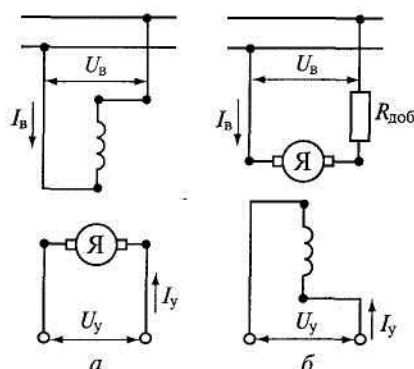


Рис. 17.2. Схемы включения исполнительных двигателей постоянного тока:  
а — якорное управление; б — полюсное управление

В схемах автоматики широко используются также *бесконтактные двигатели постоянного тока*, основные характеристики которых аналогичны характеристикам коллекторных исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением.

По конструкции коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока можно разделить на двигатели с якорем обычного исполнения — с полузакрытыми пазами на его цилиндрической поверхности; двигатели с гладким якорем, у которых обмотка якоря расположена на шихтованном гладком цилиндрическом яре и укреплена с помощью эпоксидных смол и бандажей; двигатели с малоинерционными якорями (цилиндрическими и дисковыми), у которых во время работы вращается лишь обмотка якоря с коллектором, а яро якоря остается неподвижным.

Особенностью исполнительных двигателей постоянного тока с изменяющимся по значению магнитным потоком возбуждения (в отличие от обычных силовых двигателей) является то, что они имеют шихтованные (набранные из тонких листов электротехнической стали) не только магнитопровод якоря, но и спинку статора и полюсы, что необходимо для уменьшения постоянной времени при быстром изменении магнитного потока, а также потерь в магнитопроводе при работе двигателя в переходных режимах, которые являются обычными для исполнительных двигателей.

По габаритным размерам и массе двигатели постоянного тока в два-три раза меньше асинхронных исполнительных двигателей той же мощности, но в то же время они больше обычных силовых двигателей постоянного тока. Последнее объясняется тем, что, во-первых, магнитная цепь исполнительных двигателей, как правило, менее насыщена, что вызвано желанием получить линейные характеристики и устранить влияние на них поля реакции якоря, во-вторых, меньшими плотностями токов в обмотках, что диктуется желанием уменьшить их перегрев. Последнее очень важно, так как исполнительные двигатели постоянного и переменного токов никогда не снабжаются встроенными вентиляторами, которые, во-первых, малоэффективны (так как исполнительные двигатели практически никогда не работают при постоянных значительных частотах вращения, а работают в режимах пусков, остановок, реверсов); во-вторых, вследствие значительной инерционности вентиляторы увеличивают постоянную времени двигателя, снижая его быстродействие.

## 17.2. Исполнительные двигатели с обычным и гладким беспазовым якорями. Бесконтактные двигатели

## Исполнительные двигатели с обычным якорем и электромагнитным возбуждением

Эти двигатели отличаются от обычных силовых двигателей постоянного тока тем, что имеют шихтованные из листовой стали не только магнитопроводы якоря, но и магнитопроводы спинки статора и полюсы, что обеспечивает повышение быстродействия при переходных процессах. Они менее насыщены (с целью повышения линейности основных характеристик), что приводит к увеличению их габаритных размеров по сравнению с силовыми двигателями тех же мощностей, а также имеют большее число секций якоря, а следовательно, и коллекторных пластин, что необходимо для улучшения коммутации особенно при переходных режимах, в которых постоянно работают исполнительные двигатели. В нашей стране выпускается несколько серий исполнительных двигателей постоянного тока с обычным якорем и электромагнитным возбуждением. Это двигатели серий СЛ (см. рис. 17.1), МИ, ПБС и др. Многие двигатели средней и большой мощностей выпускаются со встроенными тахогенераторами (МИ, ПБС).

## Исполнительные двигатели с обычным якорем и возбуждением от постоянных магнитов

Эти двигатели отличаются от рассмотренных двигателей обычного использования только тем, что основной их магнитный поток создается не обмоткой возбуждения, а постоянными магнитами, которые располагаются на статоре и заменяют обычные полюсы с обмоткой возбуждения.

Преимущества двигателей с постоянными магнитами по сравнению с двигателями постоянного тока, имеющими обмотки возбуждения, можно сформулировать следующим образом:

- отсутствие потерь мощности на возбуждение, что обуславливает более высокий КПД, достигающий даже у двигателей малых мощностей (в несколько ватт) 60...70%;
- отсутствие источника питания для обмотки возбуждения;
- практически полная независимость основного магнитного потока машины от изменений температуры и колебаний напряжения сети.

Эти преимущества двигателей с постоянными магнитами способствуют все более возрастающему их применению как в следящих системах, так и автоматизированных приводах. В последнее время в технике получают широкое применение не только двигатели с постоянными магнитами малых мощностей, но и двигатели средних и больших мощностей.

Отсутствие потерь мощности на возбуждение позволяет увеличить ток якоря и потери в его обмотке без увеличения температуры нагрева (а значит, без увеличения габаритных параметров якоря), что приводит к увеличению вращающего момента ( $M \approx \Phi I_{\text{я}}$ ), развиваемого двигателем, а следовательно, и отдаваемой им мощности  $P = Mn$ . Именно поэтому такие двигатели иногда называют *высокомоментными*.

С целью уменьшения искрения под щетками — получения удовлетворительной коммутации при увеличенных токах якоря, что имеет место в переходных режимах (при пуске, остановке, реверсе), в которых, как правило, большую часть времени работают исполнительные и высокомоментные двигатели автоматических систем, обмотки якорей выполняют с большим числом  $N_c$  секций, а коллекторы — с большим числом  $N_k$  коллекторных пластин ( $N_c = N_k$ ). Это позволяет уменьшить число витков в каждой из секций, а следовательно, и значения ЭДС ( $e_k$ ) коммутируемых секций, наводимых в них в процессе коммутации (ЭДС вращения  $e_{\text{вр}}$ , ЭДС самоиндукции  $e_L$ , ЭДС взаимной индукции  $e_m$  и ЭДС трансформации  $e_{\text{тр}}$ ).

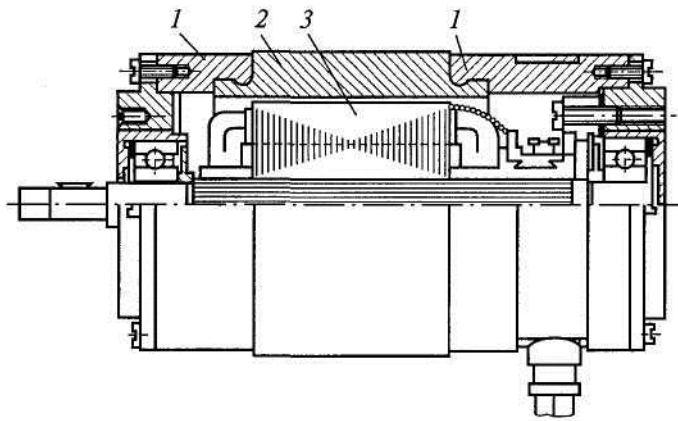


Рис. 17.3. Конструкция исполнительного двигателя с постоянным магнитом:  
 1 — концевые части из цинкового сплава; 2 — постоянный магнит; 3 — якорь с коллектором

Стоимость двигателей с постоянными магнитами, несмотря на кажущуюся их простоту, часто не ниже, а даже выше стоимости двигателей с обмоткой возбуждения. Объясняется это высокой стоимостью и дефицитностью целого ряда материалов, идущих на изготовление постоянных магнитов (например, самария, кобальта), а также трудностью их механической обработки, поэтому длительное время двигатели с постоянными магнитами выпускались на небольшие мощности. В последнее время получили широкое распространение недорогие ферритобариевые и другие магниты, обладающие высокой удельной энергией за счет большой коэрцитивной силы материалов. Это позволило проектировать и выпускать двигатели с постоянными магнитами большой номинальной мощности (на десятки киловатт). Двигатели некоторых серий большой мощности имеют встроенные тахогенераторы.

На рис. 17.3 представлена конструкция микродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом серии ДПМ, получившего широкое распространение. Его недостатками являются нетехнологичность и сравнительно дорогой кольцевой постоянный магнит из сплава типа ЮНДК.

В последние годы была разработана целая серия ДП микродвигателей постоянного тока исполнения Р09 с дешевыми феррито-бариевыми постоянными магнитами. По своим характеристикам такие двигатели весьма близки к двигателям серии ДПМ.

### Исполнительные двигатели с гладким беспазовым якорем

Исполнительные двигатели постоянного тока с гладким беспазовым якорем появились сравнительно недавно. Отличительной особенностью этих двигателей является то, что обмотка якоря у них располагается не в пазах (они отсутствуют), а укрепляется непосредственно на гладкой цилиндрической поверхности якоря с помощью клея-компаунда и бандажей. Такое расположение значительно уменьшает индуктивность обмотки, что приводит к улучшению коммутации и уменьшению электромеханической постоянной времени, т.е. повышению быстродействия двигателя. Недостатком двигателя с гладким беспазовым якорем является наличие значительного немагнитного промежутка на пути магнитного потока полюсов, который здесь складывается из воздушного зазора и толщины обмотки якоря. Исполнительные двигатели с гладким беспазовым якорем выпускаются как с электромагнитным возбуждением, так и с постоянными магнитами.

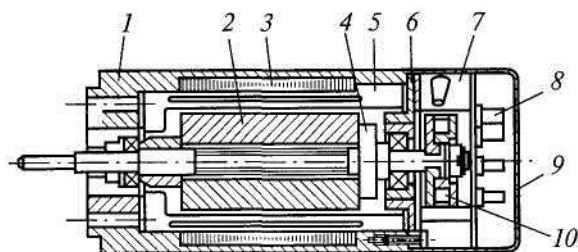


Рис. 17.4. Бесконтактный исполнительный двигатель типа ДБУ:  
 1 — корпус; 2 — индуктор — двухполюсный постоянный магнит; 3 — магнито-провод статора; 4 — вал; 5 — обмотка якоря; 6 — подшипниковый щит; 7 — обмотка датчика положения; 8 — контактная плата; 9 — кожух; 10 — сигнальный элемент (постоянный магнит)

### Бесконтактные исполнительные двигатели

Недостатком всех рассмотренных ранее исполнительных двигателей постоянного тока является наличие скользящих контактов — коллектора и щеток, которые значительно снижают надежность работы и ограничивают области их применения. С целью устранения этих недостатков в последнее время были разработаны и начали довольно широко применяться бесконтактные исполнительные (управляемые) двигатели постоянного тока, принципиально не отличающиеся от бесконтактных двигателей, рассмотренных ранее.

Эти двигатели (рис. 17.4) не имеют коллектора и щеток, что обеспечивает их более надежную работу в условиях тряски, вибрации, резко изменяющихся температур, при высоких частотах вращения, достигающих десятков и сотен тысяч оборотов в минуту, и значительно повышает срок службы.

#### 17.3. Малоинерционные двигатели постоянного тока

Одним из недостатков контактных исполнительных двигателей постоянного тока является то, что они имеют шихтованные из листов стали якоря с большим моментом инерции, что значительно снижает их быстродействие. Этих недостатков нет у разработанных сравнительно недавно, но получивших уже достаточно широкое применение так называемых малоинерционных двигателей.

Малоинерционные двигатели в зависимости от конструкции и технологии изготовления их якорей можно разделить на две группы: двигатели с печатной обмоткой якоря и двигатели с обмоткой якоря, выполненной из обычного изолированного провода. По своим пусковым и рабочим свойствам эти двигатели близки друг другу.

#### Малоинерционные двигатели с печатной обмоткой якоря

Двигатели с печатной обмоткой в настоящее время выпускаются в двух конструктивных вариантах: с дисковыми и цилиндрическими якорями.

*Дисковый якорь с печатной обмоткой* (рис. 17.5) выполняется в виде тонкого диска из изоляционного материала (например, стеклотекстолита), на обе стороны которого, обычно электрохимическим путем, наносятся соединяющиеся между собой части плоской (печатной) обмотки. Проводники секций (см. рис. 17.5, б) выполняются из медной фольги, с трех сторон окруженной воздухом (четвертой стороной фольга прилегает к диску). Все первые — начальные половины секций (на рисунке показаны толстой линией) располагаются на одной стороне диска. Все вторые половины секций (выполнены пунктиром) располагаются на другой стороне диска. Концы полусекций, расположенных на разных сторонах диска, соединяются между собой с помощью имеющихся в нем отверстий. Изоляцией между отдельными проводниками обмотки якоря служит материал диска.

Дисковый якорь вращается между полюсами, создающими поток, направленный в воздушном зазоре аксиально (рис. 17.6). К печатной обмотке якоря посредством щеток, скользящих по неизолированным поверхностям проводников секций якоря, подводится напряжение. В результате взаимодействия тока проводников обмотки якоря с магнитным полем полюсов создается вращающий момент, так же как и в обычном двигателе постоянного тока.

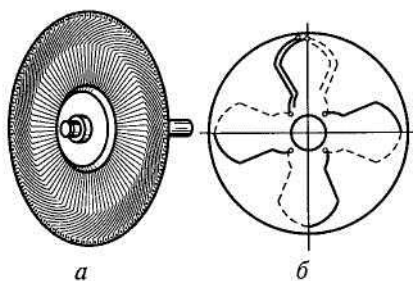


Рис. 17.5. Дискový якорь с печатной обмоткой:  
а — общий вид; б — устройство секций

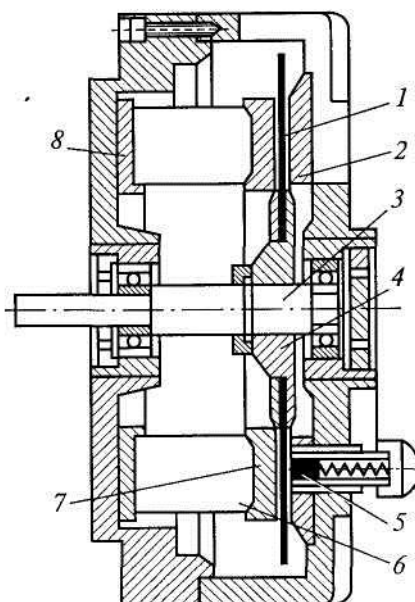


Рис. 17.6. Двигатель постоянного тока с дискovým якорем с печатной обмоткой:

1 — дискový якорь; 2, 8 — кольцевые магнитопроводы (ярма); 3 — вал; 4 — втулка; 5 — щетка; 6 — постоянный магнит; 7 — полюсный наконечник

Недостатком двигателей с дискowymi якорями является то, что при увеличении диаметра диска, вызванного необходимостью увеличения номинальной мощности двигателя, возрастает его момент инерции и ухудшается надежность работы вследствие возможного колебания диска при нагреве. Указанного недостатка лишены машины с полым цилиндрическим якорем, имеющим печатную обмотку.

Цилиндрический якорь с печатной обмоткой (рис. 17.7) изготавливается в виде полого цилиндра из изоляционного материала, на обе стороны которого (наружную и внутреннюю) наносятся соединяющиеся между собой части печатной обмотки. Концы секций обмотки выводятся к коллектору, расположенному на валу двигателя.

Наружная неподвижная часть двигателя с цилиндрическим якорем ничем не отличается от неподвижной части обычной машины постоянного тока. Она состоит из станины и полюсов, которые у исполнительных двигателей всегда выполняются шихтованными. Для уменьшения сопротивления на пути основного магнитного потока внутри полого цилиндрического якоря располагают сердечник внутреннего статора, который укрепляется либо на цилиндрическом выступе одного из подшипниковых щитов как внутренний статор асинхронного двигателя с полым ротором (см. рис. 17.4), либо с помощью подшипников на валу двигателя (см. рис. 17.7). Положительными качествами полого цилиндрического якоря с печатной обмоткой (по сравнению с дискovým) являются меньший момент инерции и большая механическая прочность.

Обычно двигатели с дискovým якорем рассчитывают на небольшие мощности — десятки, сотни ватт, двигатели же с цилиндрическим якорем — на мощности до 10 кВт.

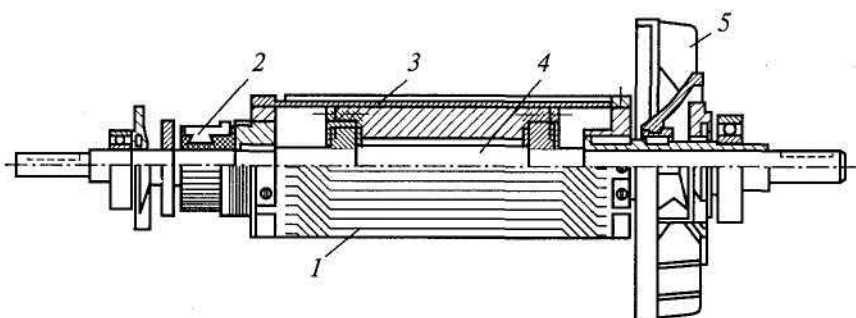


Рис. 17.7. Цилиндрический якорь с печатной обмоткой в сборе:  
1 — цилиндр из изоляционного материала с печатной обмоткой; 2 — коллектор;  
3 — сердечник внутреннего статора; 4 — вал; 5 — вентилятор

Положительными качествами исполнительных двигателей с дискovým и цилиндрическим якорями,

имеющими печатные обмотки, являются:

высокая технологичность якоря, позволяющая до минимума сократить ручной труд;

малый момент инерции якоря;

отсутствие потерь в стали двигателя, так как вращающийся якорь не имеет ферромагнитных частей; хорошая бесискровая коммутация вследствие малой самоиндукции и взаимоиндукции коммутируемых секций, окруженных воздухом;

отсутствие сил магнитного притяжения, действующих на якорь даже при неравномерном воздушном зазоре, что разгружает подшипники и сильно уменьшает механические потери;

хорошее охлаждение проводников обмотки якоря при вращении, что позволяет значительно повысить плотность Тока в обмотке якоря;

высокий КПД при возбуждении постоянными магнитами, что объясняется отсутствием потерь в стали и весьма незначительными механическими потерями (в двигателе практически имеются лишь потери в обмотке якоря);

отсутствие необходимости в межвитковой и пазовой изоляции.

К недостаткам малоинерционных двигателей с печатными обмотками относятся:

большой немагнитный промежуток на пути магнитного потока, состоящий из двух воздушных зазоров и толщины якоря, который не содержит ферромагнитных материалов;

недостаточная прочность конструкции якорей, что приводит к их колебанию при больших температурах;

ограниченное из-за технологических трудностей число витков обмотки якоря; что вынуждает всегда применять последовательную (волновую) обмотку и рассчитывать двигатели либо на работу от сетей с небольшим напряжением, либо на работу при больших частотах вращения.

Вследствие большого немагнитного промежутка на пути потока малоинерционные двигатели, как правило, возбуждаются постоянными магнитами, которые могут располагаться как внутри, так и снаружи полого якоря. Большой немагнитный промежуток в этом случае, хотя и ведет к необходимости увеличения объема магнитов, не приводит к увеличению потерь в двигателе.

### Малоинерционные двигатели с обычной обмоткой якоря

Эти двигатели отличаются от малоинерционных двигателей с печатной обмоткой якоря лишь конструкцией обмотки. Они также выпускаются как с цилиндрическими, так и с дисковыми якорями.

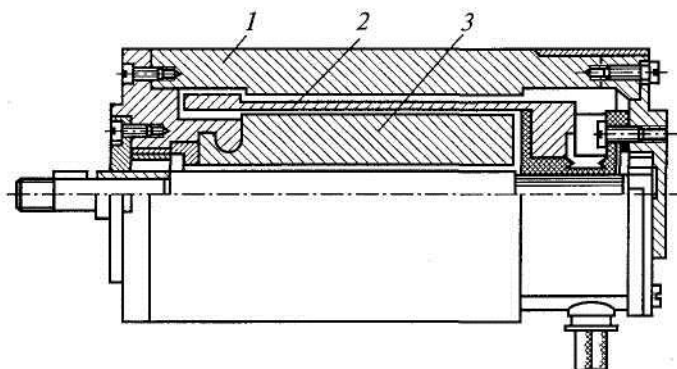


Рис. 17.8. Малоинерционный исполнительный двигатель постоянного тока серии ДПР:

1 — корпус (станина); 2 — полый якорь с обычной обмоткой; 3 — постоянный магнит

Обмотка якорей этих двигателей выполняется из обычного тонкого провода с эмалевой изоляцией, который в процессе изготовления якоря укладывается в виде секций на цилиндрический или плоский (дисковый) каркас, пропитывается термоактивным компаундом на основе эпоксидной смолы и после формовки и полимеризации компаунда превращается в монолитный цилиндр или диск, имеющий необходимую прочность. Концы секций обмотки якоря выводятся к пластинам коллектора. В отличие от якорей с печатными обмотками в этом случае число проводников обмотки якоря может быть значительно большим, что позволяет рассчитывать двигатели на более высокие напряжения и более низкие частоты вращения. Возбуждаются эти двигатели, как правило, постоянными магнитами.



Выпускается серия ДПР малоинерционных исполнительных двигателей с полыми цилиндрическими якорями, имеющими обычную обмотку (рис. 17.8). В двигателях этой серии магнит размещен внутри якоря. Это позволило значительно сократить потоки рассеяния магнита и лучше его использовать. Корпус двигателя одновременно служит и магнитопроводом. Серия ДПР охватывает диапазон мощностей от 0,12 до 37 Вт. КПД двигателей этой серии на 15... 25 % выше, чем у двигателей серии ДПМ, имеющих якорь обычной конструкции. Электромеханические постоянные времени двигателей серии ДПР от 15 до 20 мс, что в 2 — 2,5 раза меньше, чем у двигателей серии ДПМ.

## Глава 18

### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### 18.1. Основные типы двигателей Асинхронные микродвигатели

Самыми распространенными силовыми микродвигателями автоматики в настоящее время являются асинхронные двигатели. По своему устройству это двигатели с короткозамкнутым ротором, который чаще всего имеет обмотку, изготовленную в виде беличьей клетки. Реже ротор изготавливается массивным и полым из чугуна или стали, что делается либо для получения мягких механических характеристик, либо ради достижения особой механической прочности ротора, необходимой при высоких частотах вращения, либо с целью уменьшения акустического шума при работе двигателя. Асинхронные двигатели с фазовым ротором не выпускаются.

Классификация силовых асинхронных микродвигателей представлена на рис. 18.1.

В качестве силовых двигателей в схемах автоматики очень часто применяются трехфазные и однофазные асинхронные микродвигатели широкого применения, рассчитанные на работу от сети с частотой 50 Гц.

Так как механическая мощность асинхронного двигателя практически (при прочих равных условиях) прямо пропорциональна частоте питающего напряжения ( $P \sim Mn \sim Mnc \sim M60f/p \sim f$ ), а габаритные размеры определяются значением вращающего момента  $M$ , то в схемах автоматики очень часто применяют асинхронные двигатели, рассчитанные на работу от напряжений повышенной частоты  $f$ .

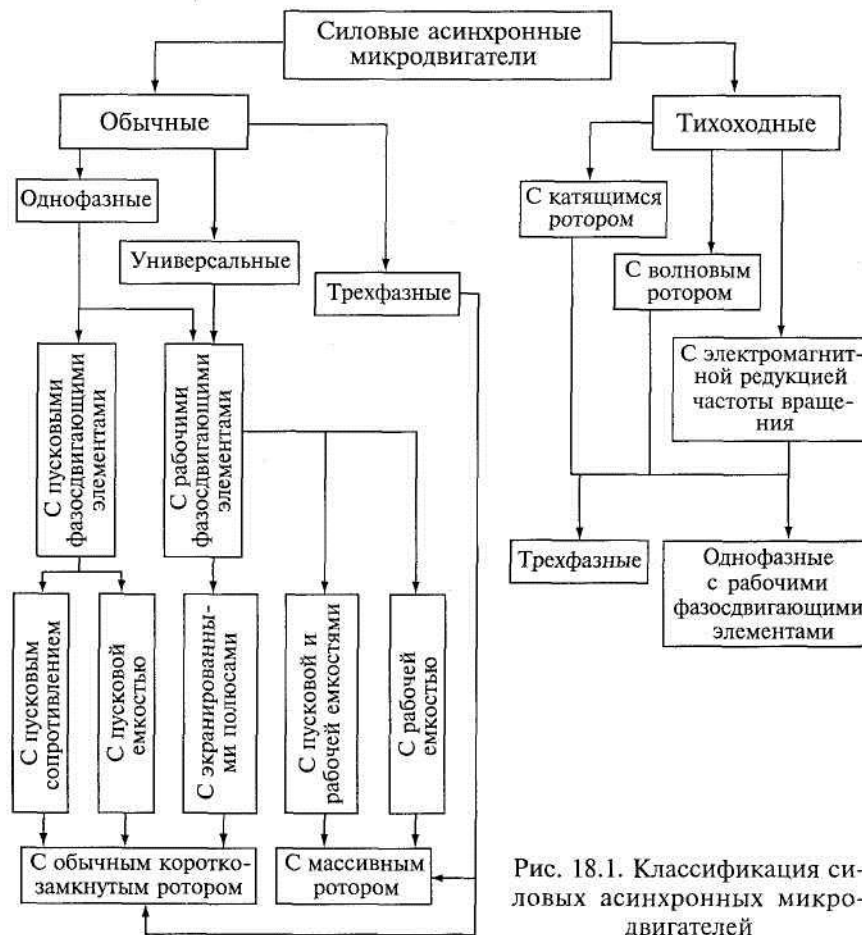


Рис. 18.1. Классификация силовых асинхронных микродвигателей

Применение асинхронных двигателей повышенной частоты в целом ряде случаев диктуется не только стремлением уменьшить габариты машины, но и рядом других соображений: необходимостью иметь более высокие угловые скорости вращения, работой автоматических систем от сетей повышенной частоты и др.

В ряде схем автоматики возникает обратная задача — необходимость получения малых частот вращения  $n$ . У асинхронных и синхронных двигателей переменного тока средних и больших мощностей этого можно легко достичь за счет увеличения числа пар полюсов  $p$ , так от этого зависит как синхронная частота вращения  $n_c$ :

$$n_c = 60f/p.$$

Для двигателей малых мощности и габаритных размеров этот способ практически неприемлем, особенно если они рассчитаны на работу от сетей повышенной частоты. При малых габаритах увеличение числа пар полюсов  $p$ , а следовательно, и числа пазов двигателя весьма затруднительно, а иногда и невозможно.

С целью получения низких частот вращения приходится применять специальные тихоходные двигатели либо с электромагнитной редукцией частоты вращения, либо с катящимся или волновым роторами.

В большинстве схем автоматики силовые двигатели питаются не от трехфазных, а однофазных сетей переменного тока. Именно поэтому в качестве силовых в основном используются однофазные двигатели. Трехфазные двигатели в схемах автоматики используются значительно реже.

Однофазные асинхронные двигатели по своему устройству в подавляющем большинстве случаев являются двухфазными. Они, как правило, имеют на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Одна обмотка называется рабочей, или главной. Она подключается непосредственно к однофазной сети. Другая обмотка называется пусковой, или вспомогательной. Она подключается к однофазной сети через фазосдвигающий элемент либо только на время пуска, либо постоянно. В некоторых двигателях вспомогательная обмотка вообще не подключается к сети, а ЭДС в ней наводится потоком главной

обмотки.

В зависимости от типа фазосдвигающего элемента, а также от способа использования вспомогательной (пусковой) обмотки силовые однофазные асинхронные (и синхронные) микродвигатели можно разделить на пять групп: с пусковым сопротивлением; пусковым конденсатором; пусковым и рабочим конденсатором; рабочим конденсатором; экранированными полюсами.

Кроме однофазных микродвигателей в системах автоматики в качестве силовых используются также универсальные асинхронные микродвигатели, которые, являясь по своему назначению трехфазными, при изменении схемы соединения обмоток — фаз и включении фазосдвигающих элементов могут работать и от однофазных сетей переменного тока.

### Синхронные микродвигатели

Основной особенностью синхронных микродвигателей, определяющей области их применения, является постоянство частоты вращения при неизменной частоте  $f$  питающей сети. Частота вращения ротора двигателя в синхронном режиме (при  $M_{\text{сопр}} < M_{\text{max}}$ ) не зависит от колебаний напряжения питания и момента сопротивления. Она равна частоте вращения магнитного поля, т.е. синхронной частоте вращения:

$$n_c = 60f/p.$$

В настоящее время в схемах автоматики синхронные микродвигатели применяются очень широко. По конструктивному исполнению они весьма разнообразны, особенно однофазные микродвигатели малых мощностей (от долей ватт до нескольких ватт).

Двигатели с номинальной мощностью от десятков до сотен ватт имеют обычное классическое исполнение. Они состоят из неподвижной части — статора, в пазах которого размещается трехфазная или двухфазная обмотка переменного тока, и вращающейся части — ротора, который у большинства двигателей имеет явно выраженные полюсы.

В зависимости от конструкции ротора различают синхронные микродвигатели с *электромагнитным возбуждением, постоянными магнитами, реактивные и гистерезисные*. На рис. 18.2 представлены основные конструктивные схемы синхронных микродвигателей.

Кроме двигателей обычного исполнения в схемах автоматики иногда встречаются обращенные синхронные микродвигатели, обмотка переменного тока которых размещается в пазах ротора.

Микродвигатели с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения постоянного тока на полюсах) вследствие сложности их конструкций и пуска, а также необходимости наличия источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения в схемах автоматики применяются очень редко.

Синхронные микродвигатели выпускаются как на промышленную частоту 50 Гц, так и на повышенные частоты 400, 500, 1000 Гц. Кроме обычных двигателей в схемах автоматики широко применяются тихоходные двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, работающие на зубцовых гармониках поля, и двигатели с катающимся или волновым роторами. Иногда для получения низких частот вращения используются обычные двигатели со встроенными редукторами.

Выпускаются несколько серий синхронных микродвигателей, которые широко применяются в приборах звуко- и видеозаписи, кино- и фотоаппаратуре, системах связи, всевозможных лентопротяжных устройствах и т. п.

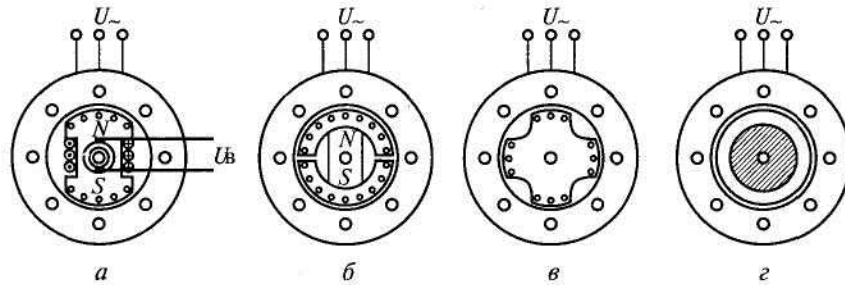


Рис. 18.2. Конструктивные схемы синхронных микродвигателей:  
 а — с электромагнитным возбуждением ( $2p = 2$ ); б — с постоянными магнитами ( $2p = 2$ ); в — реактивный ( $2p = 4$ ); г — гистерезисный.

К синхронным микродвигателям предъявляются как общие для всех электрических машин требования — высокие энергетические показатели ( $\eta$  и  $\cos\varphi$ ), малые габариты, масса и т.п., так и специфические для синхронных двигателей требования, которые зависят от схемы, в которой применяется двигатель. В одних схемах от двигателя требуется постоянство средней частоты вращения, в других — постоянство мгновенной частоты вращения в пределах одного оборота ротора и т. п.

Кроме синхронных микродвигателей непрерывного вращения нашли применение импульсные шаговые двигатели.

### Основные уравнения синхронных микродвигателей с возбужденными явно выраженными полюсами

Из общего курса электрических машин известно, что вращающий момент синхронного двигателя с возбужденными явно выраженными полюсами приближенно (без учета активного сопротивления обмотки статора) рассчитывается по формуле

$$M = \frac{mE_0U}{\omega_c x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_\varepsilon - M_{dq},$$

где  $m$  — число фаз обмотки статора;  $E_0$  — ЭДС, наводимая магнитным полем ротора в фазе обмотки статора в генераторном режиме ( $n = n_c$ ) при холостом ходе;  $U$  — напряжение питания, приходящееся на фазу обмотки статора;  $\omega_c$  — угловая синхронная скорость;  $x_d = 2\pi f w^2 \lambda_d$  — синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по продольной оси машины (оси, совпадающей с осью полюсов);  $x_q = 2\pi f w^2 \lambda_q$  — синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по поперечной оси машины (оси, направленной перпендикулярно оси полюсов);  $\lambda_d, \lambda_q$  — магнитные проводимости машины соответственно по продольной и поперечной осям;  $w$  — число витков фазы обмотки статора;  $\theta$  — угол между вектором ЭДС, наводимой потоком по продольной оси и вектором напряжения.

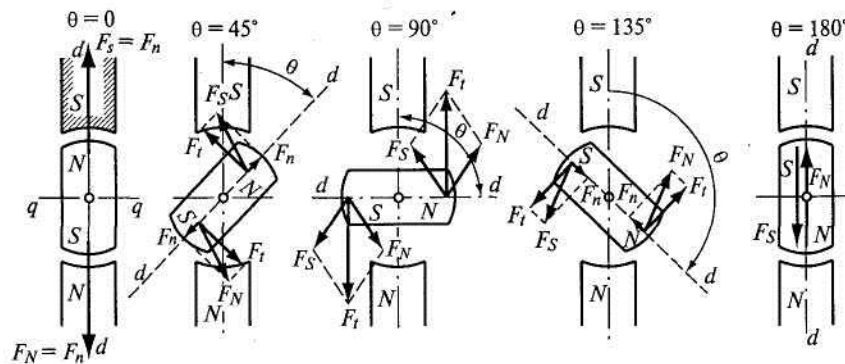


Рис. 18.3. Электромагнитные силы, действующие на возбужденный ротор без учета реактивного момента:

$F_S, F_N$  — силы, создаваемые северным и южным полюсами магнитов статора;  $F_S, F_n$  — то же, ротора;  $F_T, F_n$  — результирующие тангенциальные силы, создающие вращающий момент ротора

Вращающий момент  $M$  является суммой двух моментов: электромагнитного  $M_e$ , возникающего за счет взаимодействия вращающего поля статора с магнитным полем возбужденных полюсов ротора, и реактивного  $M_{dq}$ , обусловленного неравенством магнитных проводимостей машины по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям.

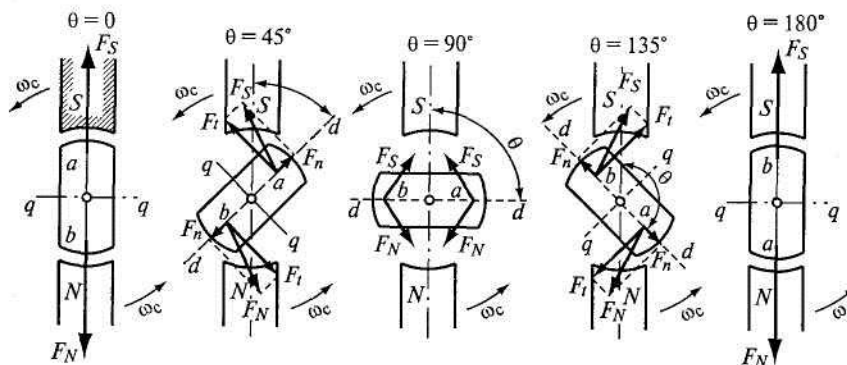


Рис. 18.4. Электромагнитные силы, действующие на невозбужденный ротор с явно выраженными полюсами

На рис. 18.3 и 18.4 схематично показана природа возникновения соответственно электромагнитного и реактивного вращающих моментов синхронного двигателя и их зависимость от угла  $\theta$ . Вращающееся магнитное поле двигателя представлено в виде двух (наружных) полюсов магнита.

## 18.2. Асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором

Двигатели с полым немагнитным ротором являются в настоящее время весьма распространенными исполнительными двигателями переменного тока. Они применяются в различных схемах автоматических устройств. Мощность двигателей с полым немагнитным ротором от десятых долей ватта до нескольких сотен ватт. Двигатели рассчитываются как для промышленной частоты (50 Гц), так и для повышенных частот (200, 400, 500 Гц). Частота вращения двигателей (синхронная) колеблется от 1500 до 30 000 об/мин.

Конструктивное устройство одного из двигателей с полым немагнитным ротором представлено на рис. 18.5. Внешний статор 4 такого двигателя ничем не отличается от статора обычного асинхронного двигателя. Он набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали. В пазах статора располагаются обмотки б управления и возбуждения, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Эти обмотки либо изолированы друг от друга, либо соединены по мостиковой схеме.

Мостиковая схема представляет собой замкнутую обмотку с отпайками через  $90^\circ$ . Она помогает достаточно просто осуществить точный пространственный сдвиг обмоток, способствует лучшему распределению токов и потерь в них. К недостаткам схемы следует отнести, во-первых, электрическую

связь цепей возбуждения и управления, во-вторых, большое число параллельных ветвей ( $2a$ ) и отпаек-концов при большом числе пар полюсов ( $2a = 2p$ ) и, в-третьих, постоянство коэффициента трансформации  $k = w_p/w_r$

Внутренний статор 5 набирается из листов электротехнической стали на цилиндрическом выступе одного из подшипниковых щитов. Он служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути основного (рабочего) магнитного потока, проходящего через воздушный зазор. Полый ротор двигателя 2 изготавливается в виде тонкостенного станка из немагнитного материала, чаще из сплавов алюминия. Своим дном ротор жестко укрепляется на оси 7, которая свободно вращается в подшипниках, расположенных в подшипниковых щитах 3. Толщина стенок ротора зависит от мощности двигателя и колеблется в пределах от 0,1 до 1 мм. Вследствие весьма малой массы ротор обладает незначительным моментом инерции, что является очень ценным свойством двигателя с полым немагнитным ротором, способствующим его широкому распространению. Между стенками ротора и статорами имеются воздушные зазоры, которые обычно составляют 0,15...0,25 мм.

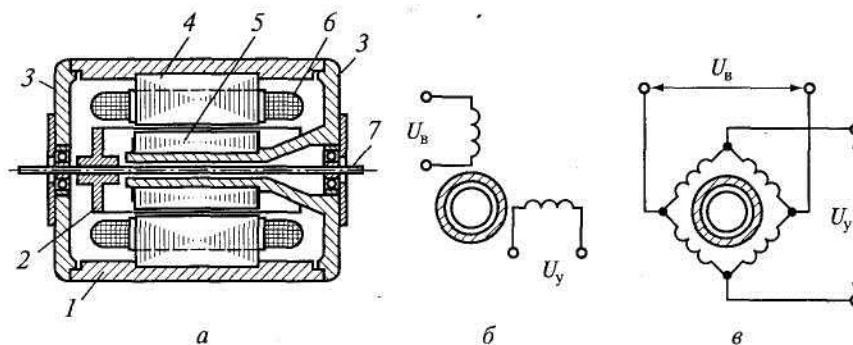


Рис. 18.5. Конструкция асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором:

*a* — поперечный разрез; *б* — раздельная электрическая схема обмотки статора; *в* — мостиковая электрическая схема обмотки статора; 1 — корпус; 2 — ротор (немагнитный полый цилиндр); 3 — щит подшипниковый; 4 — статор внешний; 5 — статор-сердечник внутренний; 6 — обмотка статора; 7 — ось

Двигатели мощностью менее 3 Вт изготавливаются несколько иначе. Их обмотки возбуждения и управления размещаются в пазах внутреннего статора, и тогда внешний статор не имеет пазов и служит лишь для уменьшения магнитного сопротивления. При такой конструкции весьма облегчается процесс укладки обмоток в пазы при малых диаметрах расточки статора и несколько повышается вращающий момент, но диаметр ротора для увеличения обмоточного пространства на внутреннем статоре приходится несколько увеличить, что обуславливает некоторое увеличение момента инерции ротора. Для устранения этого недостатка иногда используется третья конструктивная форма двигателя: одна из обмоток размещается на внутреннем, а другая — на наружном статоре.

Характерной особенностью двигателей с полым немагнитным ротором является большой магнитный промежуток  $\delta$  на пути потока между наружным и внутренним статорами, который состоит из двух зазоров:  $\delta_1$  — между внешним статором и ротором и  $\delta_2$  — между внутренним статором. Кроме того, ротор, будучи немагнитным, тоже является воздушным зазором  $\Delta$ . Таким образом, общий размер немагнитного воздушного промежутка между внешним и внутренним статорами  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \Delta$  составляет 0,4... 1,5 мм.

Из-за большого немагнитного промежутка двигателя с полым немагнитным ротором имеют большой намагничивающий ток  $(0,8... 0,9)I_n$  и низкий коэффициент мощности  $\cos\phi$ . Большая сила намагничивающего тока приводит к большим электрическим потерям в обмотках двигателя и значительно снижает его КПД. С целью уменьшения электрических потерь двигатели с полым немагнитным ротором обычно конструируют так, чтобы до 70 % площади поперечного сечения статора у них занимали пазы с обмотками.

В отличие от всех остальных типов роторов, применяемых для асинхронных исполнительных двигателей переменного тока, полый немагнитный ротор при большом активном сопротивлении  $r_p$  обладает весьма незначительным индуктивным сопротивлением  $x_p = (0,05...0,1)r_p$ . Это его свойство способствует значительному повышению линейности механических и регулировочных характеристик двигателей.

Принцип действия двигателя с полым немагнитным ротором состоит в следующем: переменный ток, протекая по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле, которое, пересекая полый ротор, наводит в нем вихревые токи; в результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем двигателя возникает момент, который, действуя на ротор, увлекает его в сторону этого поля.

К положительным свойствам двигателей с полым немагнитным ротором следует отнести:

малый момент инерции ротора, что в совокупности со значительным пусковым моментом обеспечивает быстрое действие двигателя. Электромеханические постоянные времени  $T_M$  подавляющего большинства современных двигателей не превышают 60 мс;

сравнительно хорошую линейность механических и регулировочных характеристик. У большинства двигателей нелинейность  $\zeta_0$  5 лежит в пределах от 0,05 до 0,15, что обеспечивает устойчивую работу двигателя почти при всех частотах вращения и кратность регулирования  $n_{max}/n_{min} = 100...200$ ;

высокую чувствительность — малый сигнал трогания, что обеспечивается малым моментом инерции ротора, малой его массой, большим пусковым моментом и отсутствием радиальных сил притяжения ротора к статору. Последнее объясняется тем, что ротор немагнитный;

плавность и бесшумность хода, постоянство пускового момента в любом положении ротора, что определяется отсутствием пазов на роторе, а следовательно, зубцовых гармоник поля.

К недостаткам двигателей с полым немагнитным ротором относятся:

низкий КПД; у большинства двигателей даже в номинальном режиме  $\eta_n = 0,2...0,4$  и значительно уменьшается при регулировании. Низкий КПД объясняется большими электрическими потерями в обмотке статора вследствие большого намагничивающего тока и полым роторе вследствие его большого активного сопротивления;

низкий коэффициент мощности ( $\cos\phi = 0,2...0,4$ ) вследствие большого немагнитного промежутка между наружным и внутренним статорами;

большие габариты и масса, обусловленные первыми двумя недостатками. По габаритам и массе двигатель с полым немагнитным ротором больше силовых асинхронных двигателей и исполнительных двигателей постоянного тока той же номинальной мощности в 2—4 раза.

Желание уменьшить габариты и массу приводит к тому, что подавляющее большинство двигателей с полым немагнитным ротором рассчитывается на работу от сетей с повышенной частотой (200... 1000 Гц). Двигатели с повышенной частотой напряжения питания имеют более высокую частоту вращения  $n = 60f(1 - s)/p$ , а следовательно, развивают те же механические мощности при меньших моментах на валу, значениями которых определяются габариты машин.

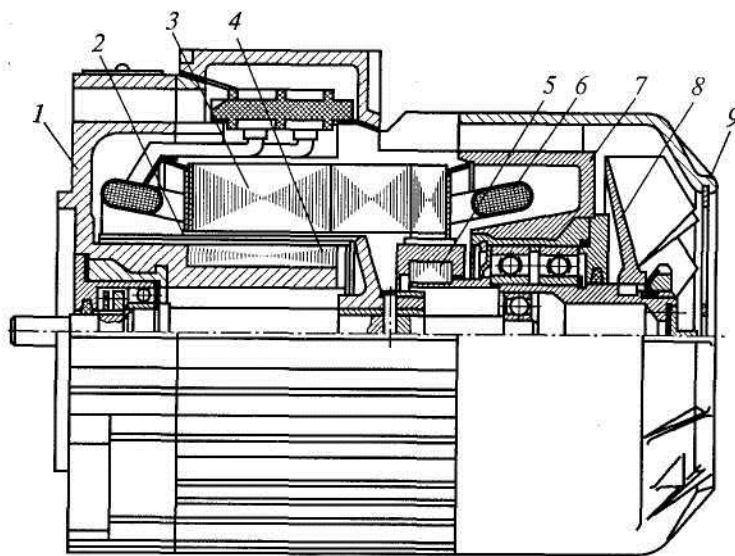


Рис. 18.6. Асинхронный исполнительный двигатель типа ДАУ-63П ( $P_n = 63$  Вт;  $n_n = 2500$  об/мин) с двумя роторами:

1 — передний подшипниковый щит; 2 — полый ротор исполнительного двигателя; 3 — наружный статор; 4 — внутренний статор исполнительного двигателя; 5 — короткозамкнутый ротор вентилятора; 6 — обмотки возбуждения и управления; 7 — задний подшипниковый щит; 8 — крыльчатка вентилятора; 9 — кожух вентилятора

В некоторых схемах исполнительные двигатели должны длительное время развивать вращающий

момент при неподвижном роторе, т.е. работать на упор (в режиме короткого замыкания). С целью необходимого при таком режиме отвода выделяемой в двигателях теплоты иногда выполняются двигатели с двумя развязанными в механическом отношении роторами, находящимися в расточке одного и того же статора. Один из них — ротор исполнительного двигателя, а другой — вентиляторного.

Двигатель такой конструкции представлен на рис. 18.6. Его можно рассматривать как два двигателя, исполнительный и вентиляторный, обмотки статоров которых соединены последовательно. В режиме короткого замыкания (при неподвижном роторе) входное сопротивление исполнительного двигателя весьма незначительно, поэтому большая часть приложенного напряжения приходится на вентиляторный двигатель, ротор которого вращается с большой частотой и хорошо охлаждает исполнительный двигатель. При возрастании частоты вращения ротора исполнительного двигателя вследствие увеличения его входного сопротивления происходит перераспределение напряжений: на исполнительном двигателе оно увеличивается, на вентиляторном — уменьшается.

### 18.3. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

По конструктивному исполнению и свойствам асинхронные исполнительные двигатели с обычным ротором, имеющим короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, можно разделить на две группы:

двигатели обычной конструкции, у которых механическая обработка всех деталей производится до сборки двигателя;

двигатели «сквозной» конструкции, у которых посадочные места под подшипники и внутренняя поверхность статора обрабатываются в полусобранном состоянии.

Двигатели первой группы имеют обычный для электрических микромашин воздушный зазор 0,15...0,25 мм; а двигатели второй группы — уменьшенный до 0,03...0,07 мм.

Двигатели обычной конструкции применяются чаще всего в обычной промышленной автоматике. Они имеют невысокую стоимость.

Двигатели сквозной конструкции применяются в особо ответственных схемах приборной автоматики. Они имеют лучшие характеристики, но и более высокую стоимость.

*Двигатели с ротором обычной конструкции* чаще всего применяются в тех схемах автоматики, где быстродействие системы не играет существенной роли. Поэтому в быстродействии ( $T = 0,2... 1,5$  с) эти двигатели, имеющие зазор 0,15...0,25 мм, значительно уступают двигателям с полым немагнитным ротором. Однако по некоторым свойствам они выгодно отличаются от последних.

Двигатель с обмоткой в виде беличьей клетки на роторе может быть выполнен со значительно меньшим, чем у двигателя с полым ротором, магнитным сопротивлением на пути рабочего потока, что позволяет снизить намагничивающий ток, электрические потери от него в обмотке статора, а следовательно, повысить  $\cos\phi$  и КПД.

В схемах промышленной автоматики в настоящее время большое распространение получил простой и дешевый асинхронный исполнительный двигатель типа РДМ-09 с короткозамкнутой выполненной в виде беличьей клетки обмоткой на роторе. Статор этого двигателя, набираемый из листов электротехнической стали, имеет восемь зубцов, на каждом из которых располагается по одной катушке. Четыре катушки (через одну) составляют обмотку возбуждения, последовательно с которой включается конденсатор емкостью 1 мкФ, четыре другие катушки — обмотку управления. Обе обмотки рассчитаны на напряжение питания 127 В и частоту питающей сети 50 Гц. Номинальная частота вращения двигателя 1200 об/мин.

В двигатель РДМ-09 встроен редуктор с передаточным отношением, соответствующим одному из восьми возможных вариантов, что позволяет изменять частоту вращения на выходе от 1,92 до 76,8 об/мин.

*Двигатели сквозной конструкции* (рис. 18.7) появились сравнительно недавно, но уже получили очень широкое распространение. Особенностью этих двигателей является то, что диаметр расточки под подшипники (в подшипниковых щитах) у них равен внутреннему диаметру статора, что позволяет производить окончательную обработку (шлифовку) внутренней поверхности статора и отверстий под подшипники после сборки (установки подшипниковых щитов) одновременно. Такая конструкция двигателя позволяет уменьшить воздушный зазор между статором и ротором до 0,03...0,05 мм, что способствует снижению намагничивающегося тока, потерь в обмотке статора, а следовательно,



повышает  $\cos\varphi$ , КПД и коэффициент использования двигателя.

Ротор для уменьшения момента инерции обычно изготавливается малого диаметра. Необходимая мощность обеспечивается за счет увеличения его длины. Обычно отношение длины ротора к его равно 2...3.

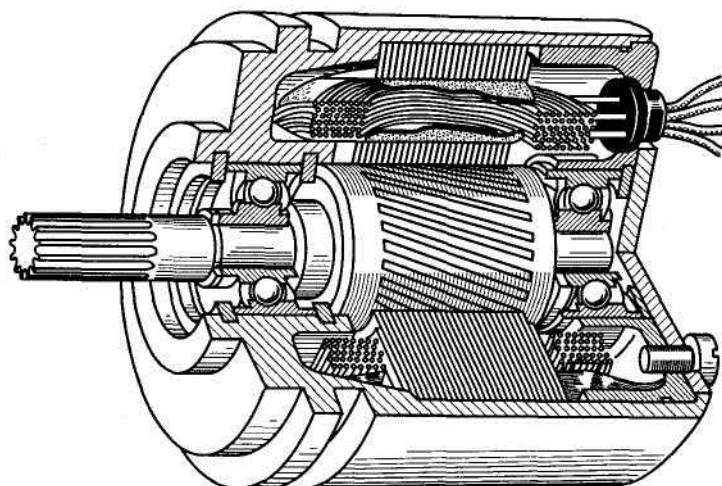


Рис. 18.7. Асинхронный исполнительный двигатель сквозной конструкции

Увеличение (за счет уменьшения воздушного зазора) вращающего (крутящего) момента  $M_k$ , развиваемого двигателем, и уменьшение (за счет диаметра ротора) момента инерции ротора  $J_p$  позволяют значительно снизить электромеханическую постоянную времени двигателя  $T_m \approx J_p/M_k$ .

Преимущество исполнительных двигателей сквозной и обычной конструкции типа беличьей клетки ротора по отношению к двигателям с полым немагнитным ротором особенно ощутимо при очень малых мощностях — от сотых долей ватта до 3... 5 Вт и больших мощностях — свыше 200...300 Вт, когда в процентном отношении потери от намагничивающего тока у двигателей с полым ротором особенно велики.

К положительным свойствам двигателей сквозной конструкции следует отнести: более высокие  $\cos\varphi$  и КПД; меньшие массу и габаритные размеры в определенных диапазонах номинальных мощностей.

Недостатками двигателей с обычным короткозамкнутым ротором являются:

сравнительно большой момент инерции ротора, что ведет к увеличению электромеханической постоянной времени;

сравнительно большой сигнал трогания, что обусловлено массой ротора, наличием действующих на ротор радиальных сил одностороннего магнитного притяжения к статору из-за ферромагнитных свойств ротора;

наличие высших зубцовых гармоник поля.

#### 18.4. Асинхронные двигатели с полым ферромагнитным ротором

В системах автоматики иногда в качестве исполнительных, а также силовых применяют двигатели с полым (а иногда и с массивным) ферромагнитным ротором. Статоры таких двигателей ничем не отличаются от статоров обычных двухфазных асинхронных машин, а роторы изготавливаются в виде полых ферромагнитных цилиндров с толщиной стенок от 0,3 до 3 мм (рис. 18.8). Так как ротор ферромагнитный, то магнитный поток замыкается непосредственно по ротору. Таким образом, в отличие от двигателя с полым немагнитным ротором здесь нет необходимости в наличии внутреннего статора. Воздушный зазор между ротором и статором в этих двигателях небольшой (0,2...0,3 мм), поэтому его намагничивающая сила невелика. В этом отношении двигатель с ферромагнитным ротором выгодно отличается от двигателя с немагнитным ротором. Однако суммарная магнитодвижущая сила, а следовательно, и намагничивающий ток ( $I_\mu$ ) двигателя практически не отличается от МДС и  $I_\mu$  двигателя с полым немагнитным ротором. Причиной этого является то, что магнитная проводимость полого ферромагнитного ротора вследствие его малой толщины весьма незначительна.

Как результат наличия большого намагничивающего тока, коэффициент мощности двигателя с полым ферромагнитным ротором практически такой же, как у двигателя с полым немагнитным ротором

( $\cos \varphi = 0,3 \dots 0,5$ ), причем значение его уменьшается при увеличении частоты питающей сети.

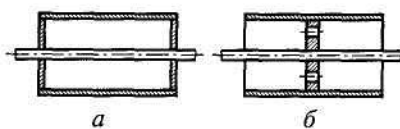


Рис. 18.8. Полый ферромагнитный ротор с двумя торцевыми пробками (а) и с одной пробкой, имеющей вентиляционные отверстия (б)

Активное сопротивление полого ферромагнитного ротора весьма значительно. Это объясняется, во-первых, тем, что ферромагнитные материалы, из которых изготавливается ротор, обладают значительно большим удельным сопротивлением, чем медь и алюминий, а во-вторых, тем, что при работе машины вследствие эффекта вытеснения ток ротора протекает лишь по небольшому поверхностному слою, толщина которого зависит от материала и частоты тока.

Вследствие большого активного сопротивления ротора критическое скольжение двигателей с полым ферромагнитным ротором значительно больше единицы, поэтому эти двигатели не имеют самохода и устойчиво работают во всем диапазоне скоростей — от нуля до синхронной. По этой же причине механические и регулировочные характеристики двигателей с полым ферромагнитным ротором весьма близки к линейным, т.е. они более линейны, чем характеристики двигателей с полым немагнитным и обычным короткозамкнутым роторами. Линейность характеристик двигателя увеличивается с увеличением частоты питающей сети.

У некоторых двигателей вследствие большого активного сопротивления ротора уменьшается КПД. С целью уменьшения активного сопротивления производят омеднение ротора, т.е. цилиндрическую поверхность ротора гальваническим путем покрывают слоем меди толщиной  $0,05 \dots 0,1$  мм, что способствует увеличению момента и мощности на валу двигателя. Омеднение торцевых поверхностей ротора более эффективно. Оно способствует увеличению не только момента и мощности на валу двигателя, но и его КПД. Исполнительные двигатели с полым и массивным ферромагнитным роторами иногда используются при высоких температурах окружающей среды, особенно при необходимости обеспечения высоких и сверхвысоких ( $60000 \dots 100000$  об/мин) частот вращения.

### 18.5. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами

В схемах автоматики применяется большое количество различных типов синхронных микродвигателей с постоянными магнитами, отличающихся друг от друга по способу запуска, конструктивному исполнению, способу питания и т.п. Все синхронные двигатели с постоянными магнитами, если их классифицировать по одному из основных показателей — способу запуска, можно разделить на три группы: самозапускающиеся микродвигатели; двигатели с асинхронным пуском; двигатели с гистерезисным пуском.

*Самозапускающиеся синхронные микродвигатели с постоянными магнитами* находят в настоящее время очень широкое применение в схемах автоматики. Они используются для привода часовых механизмов, механизмов реле, всевозможного рода программных устройств и т.п. Номинальные мощности таких двигателей обычно не превышают долей ватта. Они имеют большое число полюсов и небольшие синхронные частоты вращения (обычно  $n_c = 60f/p \leq 375$  об/мин).

Двигатели часто рассчитываются на работу от однофазных сетей переменного тока. Их магнитное поле либо пульсирующее, либо резко выраженное эллиптическое (у двигателей с расщепленными экранированными полюсами). Пуск этих двигателей часто осуществляется в течение полупериода изменения тока за счет всегда существующего в синхронных двигателях пульсирующего момента. Самозапускающиеся двигатели рассчитываются либо на малоинерционную нагрузку, либо за счет специального устройства, развязывающего ротор и вал на время пуска, пускаются вхолостую, а затем нагружаются. Для обеспечения пуска таких двигателей широко используют различные устройства с пружинами, храповиками и иными приспособлениями, обеспечивающими вращение ротора в заданном направлении и блокирующими обратный ход.

Самозапускающиеся синхронные микродвигатели с постоянными магнитами обычно выпускаются плоскими, т. е. имеют относительно большой диаметр и малую длину. Их обмотка возбуждения имеет вид кольца, а магнитная цепь статора, изготовленная зачастую из одного листа стали, имеет клювообразные полюсы, расщепленные у двигателей с экранированными полюсами. КПД таких двигателей невелик — 3... 5 %. На рис. 18.9 представлена схематично конструкция одного из таких микродвигателей.

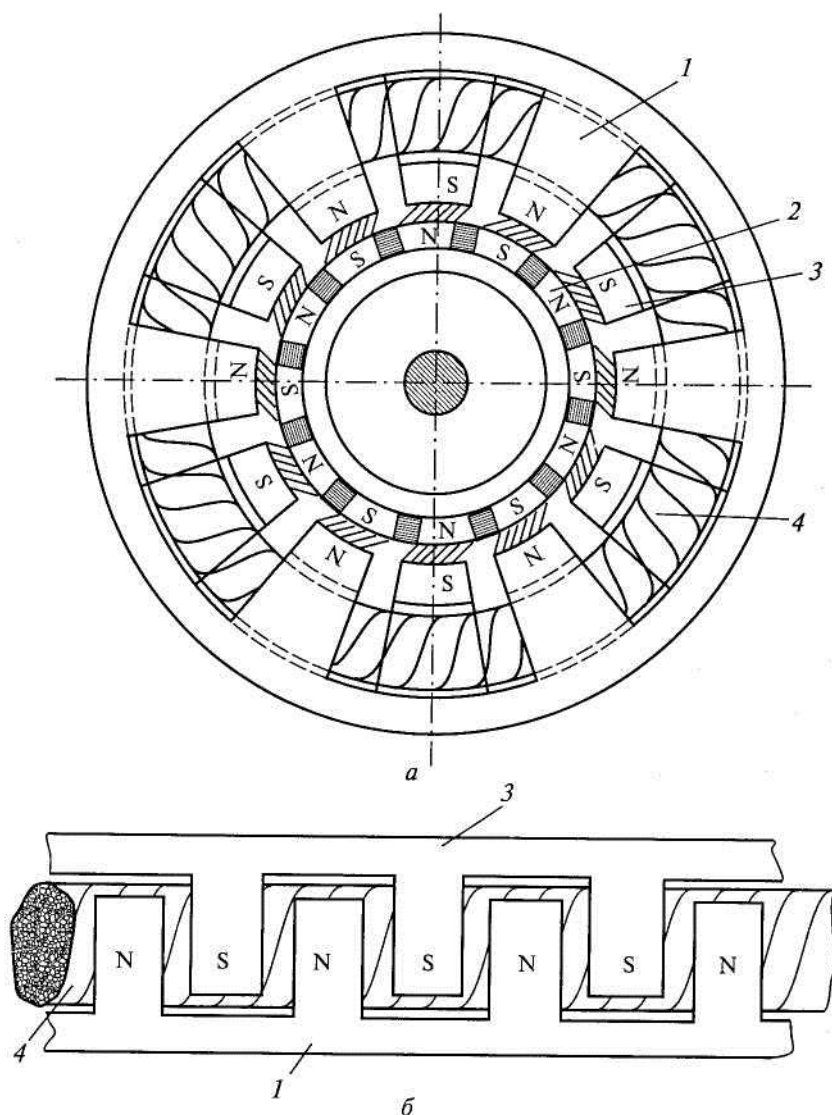


Рис. 18.9. Конструктивная схема самозапускающегося однофазного синхронного микродвигателя с постоянными магнитами:  
*a* — общий вид; *б* — развертка статора; 1 — передняя часть магнитопровода статора; 2 — ротор; 3 — задняя часть магнитопровода статора; 4 — обмотка тороидальная

Основной массовой серией однофазных самозапускающихся синхронных двигателей с постоянными магнитами, выпускаемых в России, длительное время являлась серия ДСМ. Двигатели этой серии (рис. 18.10) рассчитаны на работу от сети с  $f = 50$  Гц напряжением 200, 127, 36, 24, 12 В. Они выпускались как без редуктора, так и с различными понижающими механическими редукторами. Частота вращения выходного вала такого двигателя — 375 об/мин; частота вращения выходного редуктора — 60; 2; 0,2; 1/300 об/мин. Эти двигатели выпускались с правым и левым вращением вала. Мощность, потребляемая ими от сетей, не превосходила 4 Вт. Двигатели серии ДСМ выпускались в больших количествах и в настоящее время еще работают во всевозможных устройствах. Но с началом выпуска и расширением производства новых серий двигателей с лучшими показателями — ДСО, ДСОР, ДСК, ДСКР — выпуск двигателей серии ДСМ сокращается.

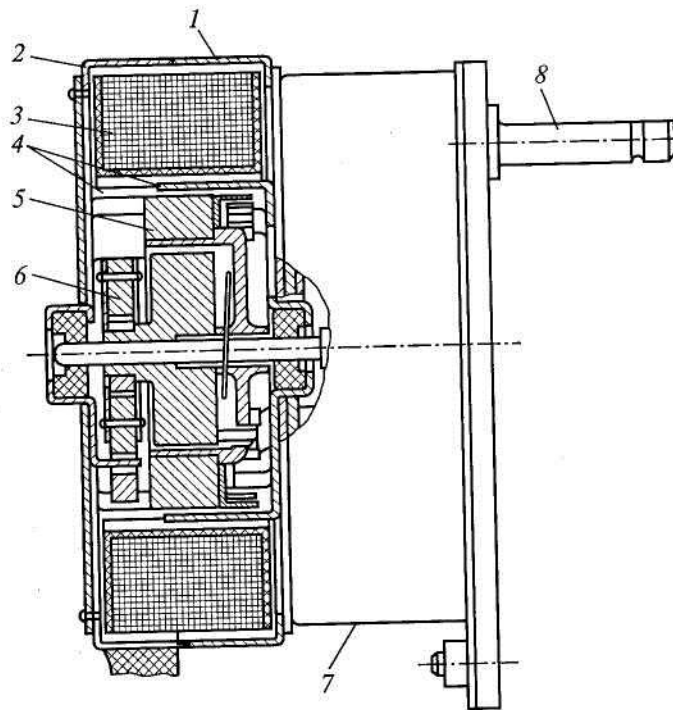


Рис. 18.10. Самозапускающийся синхронный двигатель серии ДСМ:  
 1, 2 — передняя и задняя части магнитопровода статора; 3 — обмотка возбуждения; 4 — клювообразные полюса; 5 — ротор; 6 — муфта с пружиной, обеспечивающая одностороннее вращение ротора; 7 — редуктор; 8 — выходной вал

**Тихоходные однофазные микродвигатели типов ДСО** (двигатели синхронные однофазные) — это многополюсный двигатель, рассчитанный для работы от однофазных сетей переменного тока с частотой 50 или 60 Гц, с надежными однонаправленным пуском и вращением, предназначенный для работы в различных промышленных и бытовых приборах.

Конструкция двигателя типа ДСО-32 (рис. 18.11) весьма проста и технологична. Статор состоит из намотанной в виде кольца катушки 7, залитой и соответствующим образом отформованной литейной пластмассой. Отформованная катушка 7 является основой двигателя. Справа и слева к катушке прилегают магнитопроводы 4, имеющие по восемь клювообразных полюсов 6 определенной длины, направленных аксиально и полученных путем неполной выштамповки и отгибки пластин 10 правого и левого магнитопроводов. При этом полюсы одного магнитопровода располагаются между полюсами другого магнитопровода. Магнитопроводы одновременно служат подшипниковыми щитами. В их центральных отверстиях располагаются подшипники скольжения 2, изготовленные путем заливки из литейного сополимера. Медные пластины 3 особой конфигурации, прилегающие изнутри к правому и левому магнитопроводам (по две штуки к каждому), экранируют определенную часть полюсов статора, выполняя роль короткозамкнутых витков, что обеспечивает при питании катушки статора переменным током через зажимы 9 создание вращающегося в пространстве магнитного поля (не кругового, а эллиптического).

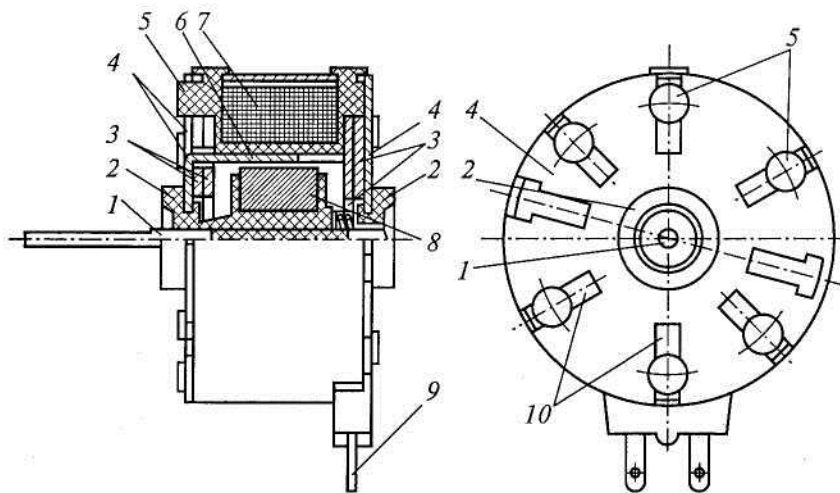


Рис. 18.11. Однофазный многополюсный двигатель типа ДСО-32 с экранированными полюсами:

1 — вал; 2 — подшипники скольжения; 3 — медная пластина; 4 — магнитопроводы; 5 — шпильки; 6 — полюс; 7 — катушка; 8 — постоянный магнит; 9 — зажимы; 10 — пластины

Магнитный поток, созданный обмоткой статора, замыкаясь вокруг нее, проходит по левому магнитопроводу, его клювообразным полюсам, цилиндрическому магниту 8 ротора, клювообразным полюсам правого магнитопровода, правому магнитопроводу и замыкается на внешнем магнитопроводе, соприкасающемся с левым и правым магнитопроводами.

Цилиндрический ротор двигателя состоит из кольцевого ферри-то-бариевого магнита 8 марки МШИ, впрессованного литьевым сополимером на стальном валу 1. Цилиндрический магнит ротора имеет 16 полюсов, полученных путем радиального намагничивания.

Двигатель имеет закрытое исполнение с одним выходным концом вала. Подшипниковые щиты, которыми являются торцевые магнитопроводы, и внешний магнитопровод закрепляются на основной части двигателя — катушке, залитой пластмассой, с помощью цилиндрических пластмассовых выступов (шпилек) 5, концы которых после сборки двигателя оплавляются. Конструкция двигателя весьма технологична, что очень важно при массовом производстве. Двигатели ДСО-32 выпускаются на номинальные напряжения 12, 24, 40, 110 (127), 220 В. Для работы при напряжениях свыше 220 В рекомендуется включать последовательно с двигателем гасящие напряжение элементы (резисторы или конденсаторы). Режим работы двигателей серии ДСО продолжительный или повторно-кратковременный с частыми пусками, когда продолжительность включения составляет до 60 % от общего времени работы, а частота включения — до 3600 включений в час. Направления вращения — левое или правое в зависимости от исполнения. Двигатели ДСО-32 выпускаются и для работы от сети с частотой 60 Гц. В этом случае они имеют маркировку ДСО-32-0,08-0,450.

Маркировка ДСО-32Р означает, что к двигателю типа ДСО-32 присоединен понижающий механический редуктор, имеющий определенное передаточное число.

**Конденсаторные тихоходные двигатели** типов ДСК и ДСКР разработаны взамен устаревших двигателей типов ДСД, ДСДР.

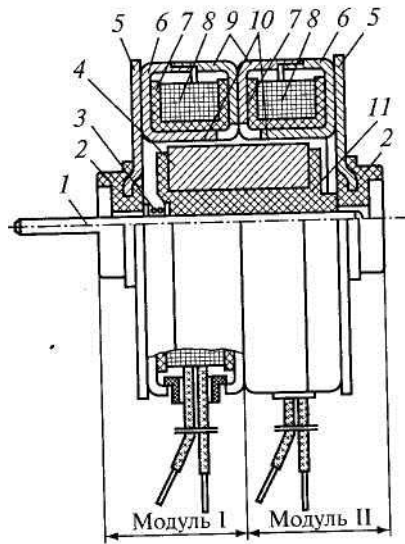


Рис. 18.12. Конденсаторный многополюсный двигатель ДСК-32-0,25-0,375:

1 — вал; 2 — подшипник скольжения; 3 — пружина; 4 — постоянный магнит; 5 — щиты подшипниковые; 6 — магнитопровод внешний; 7 — изоляция; 8 — катушки; 9 — магнитопроводы внутренние; 10 — полюсы; 11 — опрессовка полиамидная

Рассмотрим устройство и принцип работы базового конденсаторного двигателя ДСК-32-0,25-0,375, схема которого приведена на рис. 18.12. Цифры в маркировке двигателя означают: 32 — наружный диаметр, мм; 0,25 — пусковой и номинальный моменты, Н-см; 0,375 — частота вращения, тыс. об/мин. Статор имеет два одинаковых модуля I и II, представляющих собой две независимые одинаковые по конструкции фазные системы, каждая из которых состоит из внешнего 6 и внутреннего 9 одинаковых по конструкции штампованных магнитопроводов, имеющих чашеобразную форму, и сосредоточенной обмотки, выполненной в виде кольцевой каркасной катушки 8, размещенной между внешним и внутренним магнитопроводами. Кольцевой каркас катушки выполнен из литьевого сополимера типа дифлон. Внешние 6 и внутренние 9 магнитопроводы каждого модуля выполнены штамповкой из стали марки П-ВГ-08КП. Магнито-провод изолирован от катушки изоляцией 7. Аксиальному перемещению ротора препятствует пружина 3.

Полюсная система внешних и внутренних магнитопроводов статора состоит из 16 клювообразных полюсов 10 чередующейся полярности, равномерно расположенных по окружности. Формирование полюсов 10 обеспечивается путем просечек при штамповке листовой заготовки и последующей отгибки полюсов под углом  $90^\circ$  к торцевым частям внешних и внутренних магнитопроводов.

Передний и задний подшипниковые щиты 5 двигателя имеют форму дисков с отверстиями в центральной части, в которых из литьевого сополимера типа СФД или полиамида формируются подшипники скольжения 2. Подшипниковые щиты и внешние магнитопроводы механически скрепляются между собой точечной сваркой. Также точечной сваркой скрепляются между собой внутренние магнитопроводы модулей, предварительно сдвинутые между собой на  $90^\circ$  (электрических).

Ротор двигателя состоит из кольцевого ферритобариевого постоянного магнита 4 марки ФБИ-1а, который опрессован полиамидом 77 на валу 7. Магнит 4 ротора намагничен в радиальном направлении и имеет 16 неявно выраженных полюсов чередующейся полярности.

Частота вращения ротора базового двигателя 375 или 450 об/мин при частотах питающего напряжения соответственно 50 или 60 Гц. Базовый электродвигатель имеет различные исполнения на напряжения 12, 24, 110, 127, 220 В, которые отличаются друг от друга лишь числом витков обмотки статора.

Наряду с возможностью работы от двухфазной симметричной сети (со сдвигом напряжений фаз во времени на четверть периода —  $90^\circ$ ) базовый двигатель ДСК-32-0,25-0,375 предназначен для работы от однофазной сети с постоянно включенным последовательно с одной из его фаз (обмоток) конденсатором. При этом для номинальных напряжений сети 12, 24 и 40 В используется схема с

параллельным включением обмоток, а для напряжений ПО В и выше — с последовательным. Реверс двигателя достигается посредством переключения конденсатора из цепи одной обмотки в цепь другой.

На базе двигателя ДСК-32-0,25-0,375 разработана серия однофазных реверсивных конденсаторных тихоходных синхронных двигателей с механическими редукторами типа ДСКР-32, которые работоспособны в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок. Серии двигателей ДСК-32 и ДСКР-32 имеют 180 исполнений, в том числе различные климатические.

**Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском** отличаются от других типов синхронных двигателей с постоянными магнитами наличием на роторе короткозамкнутой обмотки типа беличьей клетки, предназначенной, во-первых, для пуска двигателя, во-вторых, для стабилизации его частоты вращения — демпфирования качаний ротора при резких изменениях нагрузки.

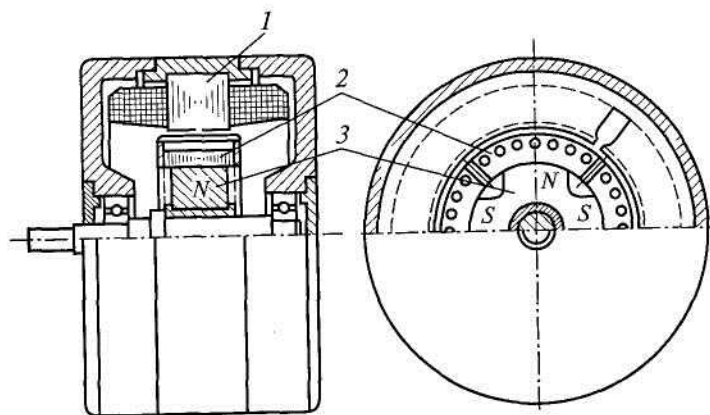


Рис. 18.13. Синхронный двигатель с радиальным расположением постоянного магнита и пусковой короткозамкнутой обмотки:  
1 — статор; 2 — шихтованная часть ротора с короткозамкнутой обмоткой; 3 — постоянный магнит

В последнее время наибольшее распространение получили синхронные двигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным (рис. 18.13, 18.14) и аксиальным расположениями постоянного магнита и пусковой короткозамкнутой обмотки.

Статоры двигателей обоих конструктивных исполнений ничем не отличаются от статоров обычных синхронных и асинхронных машин. В пазах шихтованных статоров располагаются трехфазные или двухфазные обмотки переменного тока. Роторы двигателей сочетают в себе элементы синхронного двигателя — постоянные магниты и асинхронного двигателя — короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, располагающуюся в пазах.

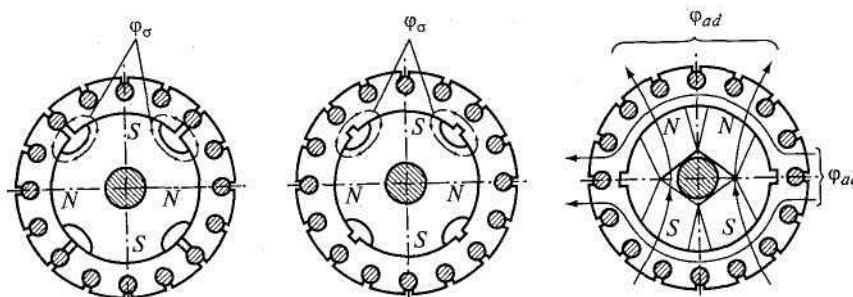


Рис. 18.14. Различные конструкции роторов синхронных микродвигателей с радиальным расположением постоянных магнитов и пусковой короткозамкнутой обмотки

Двигатели с радиальным расположением постоянного магнита и пусковой обмотки имеют кольцевой пакет стали ротора, напрессованный на постоянный магнит-звездочку, в пазах которого располагается короткозамкнутая обмотка. В стали магнитопровода ротора имеются междупольные прорезы, размеры которых выбираются из условия хорошего асинхронного пуска и оптимального использования энергии постоянного магнита в синхронном режиме, т. е. из условия уменьшения потока рассеяния магнита.

Пакет стали ротора с короткозамкнутой обмоткой предохраняет магнит от размагничивания в режиме пуска (короткого замыкания).

С целью предохранения магнита от размагничивания, а также увеличения асинхронного момента, необходимого для пуска, междуполусную прорезь желателно выбирать минимально возможной. Исследования показывают, что оптимальный размер прорези увеличивается с увеличением мощности двигателя. Иногда с целью улучшения пусковых свойств двигателя и увеличения механической прочности его ротора между полюсными наконечниками оставляют небольшие перемычки — мостики насыщения (см. рис. 18.14).

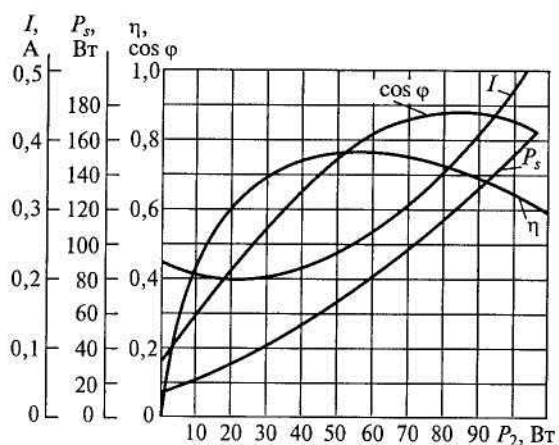


Рис. 18.15. Рабочие характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами ( $P_2$  — мощность на валу двигателя)

Синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском в ряде случаев имеют существенные преимущества по сравнению с синхронными реактивными и гистерезисными двигателями: более высокие энергетические показатели — КПД и  $\cos \varphi$  (рис. 18.15); большую удельную мощность  $P_s$  — мощность на единицу массы (особенно при мощностях в десятки и сотни ватт и большом числе пар полюсов); повышенную перегрузочную способность, стабильность частоты вращения; хорошую синфазность вращения, что часто требуется в групповых приводах. В некоторых системах автоматики применяются синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и гистерезисным пуском.

### 18.6. Синхронные реактивные микродвигатели

Благодаря простоте конструкции, невысокой стоимости, необходимости лишь одного источника питания, высокой надежности, стабильности характеристик синхронные реактивные микродвигатели, несмотря на сравнительно невысокие энергетические показатели, находят широкое применение во всевозможных схемах автоматики, физических приборах, приборах магнитной записи, связи и др. В настоящее время известно много различных вариантов конструктивного выполнения синхронных реактивных микродвигателей. Конструкция определяется назначением, частотой вращения, системой питания и целым рядом других факторов.

Наибольшее распространение в настоящее время нашли синхронные микродвигатели, которые конструктивно мало отличаются от трехфазных и однофазных асинхронных микродвигателей. Их статоры аналогичны статорам асинхронных двигателей. Роторы же синхронных реактивных микродвигателей весьма разнообразны (рис. 18.16). До последнего времени наибольшее распространение имел ротор, представленный на рис. 18.16, а, отличающийся от обычного короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя лишь наличием впадин — вырезов из цилиндрической поверхности, с помощью которых образуются явно выраженные полюсы, необходимые для работы двигателя в синхронном режиме.

Принцип действия синхронного реактивного двигателя весьма прост. Ротор разгоняется до подсинхронной скорости за счет асинхронного момента, а затем втягивается в синхронизм за счет синхронизирующего момента, возникающего вследствие разности магнитной проводимости по



продольной и поперечной осям.

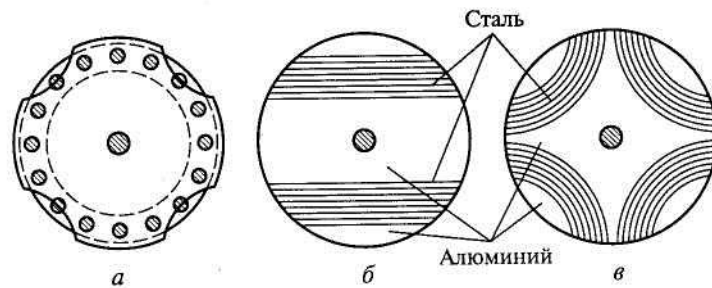


Рис. 18.16. Некоторые виды (а ... в) роторов синхронных реактивных двигателей

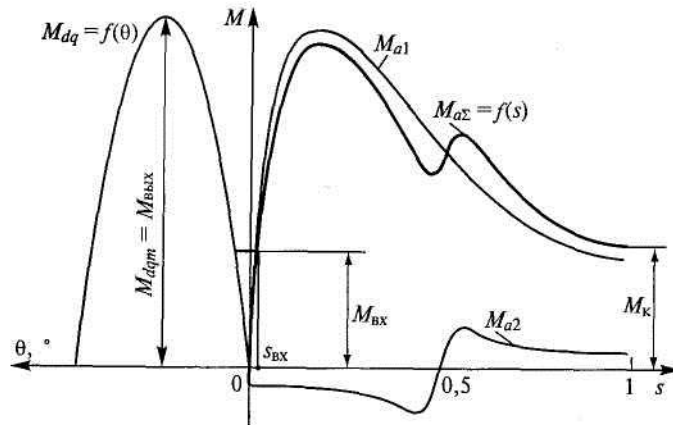


Рис. 18.17. Графики зависимости вращающих моментов синхронного реактивного двигателя в синхронном  $M_{dq} = f(\theta)$  и асинхронном  $M_{a\Sigma} = f(s)$  режимах

Значение вращающего момента  $M_{a\Sigma}$  при пуске (в асинхронном режиме) определяется основным асинхронным моментом  $M_{a1}$  и моментом от обратнорвращающегося поля ротора  $M_{a2}$  (рис. 18.17), возникающего вследствие несимметрии сопротивления его корот-козамкнутой обмотки.

Пусковые свойства двигателя характеризуются его пусковым током, начальным пусковым моментом  $M_n$  и моментом входа  $M_{вх}$ . При выборе активного сопротивления обмотки типа беличьей клетки руководствуются теми же соображениями, что и при выборе сопротивления обмотки ротора двигателей с постоянными магнитами.

Особенностью реактивного двигателя является то, что его момент как в синхронном, так и асинхронном режимах прямо пропорционален квадрату приложенного напряжения. Это свойство обуславливает высокую чувствительность двигателя к колебаниям напряжения сети. Так, при уменьшении напряжения на 15 % ( $U = 0,85 U_H$ ) вращающий момент уменьшается на 28% ( $M \approx U_2 \approx 0,85^2 U_H^2 \approx 0,72 M_H$ ).

Так как вращающий момент реактивного двигателя в синхронном режиме прямо пропорционален разности магнитных проводимостей ротора по продольной  $\lambda_d$  и поперечной  $\lambda_q$  осям или разности индуктивных сопротивлений ( $x_d - x_q$ ), то казалось бы, что для увеличения момента необходимо как можно больше увеличивать эту разность, т.е. делать впадины на роторе как можно шире и глубже. На самом деле это не так. Дело в том, что увеличение впадин у широко распространенных роторов (см. рис. 18.16), способствуя увеличению максимального синхронизирующего момента, в то же время приводит к уменьшению момента в асинхронном режиме, как начального пускового (при  $n = 0$ ), так и подсинхронного (при  $n \approx n_c$ ), значение которого во многом определяет момент входа двигателя в синхронизм.

Уменьшение момента в асинхронном режиме при увеличении впадин объясняется увеличением среднего воздушного зазора, что вызывает увеличение намагничивающего тока, падение тока на значительном в микродвигателях сопротивлении обмотки статора и, следовательно, уменьшение основного магнитного потока двигателя. Значение подсинхронного момента при увеличении впадин уменьшается, кроме того, за счет наблюдающегося при этом увеличения асимметрии сопротивлений стержней обмотки ротора. Увеличение впадин в синхронном режиме приводит к уменьшению  $\cos\phi$  при

моментах нагрузки, близких к максимальным (при  $\theta = 35...40^\circ$ ), вследствие того, что основному магнитному потоку статора приходится проходить по пути с большим магнитным сопротивлением.

В реальных двигателях, роторы которых изготавливаются аналогично ротору, представленному на рис. 18.16, а обычно отношение полюсной дуги к полюсному делению выбирается равным 0,5...0,6, а отношение  $\delta_{\max}/\delta_{\min}$  — равным 10... 12. Однако даже двигатели с оптимальной шириной и глубиной впадины имеют сравнительно низкие пусковые и энергетические показатели и развивают в два-три раза меньшую мощность, чем одинаковые с ними по габаритам асинхронные двигатели ( $M_k/M_n = 1... 1,5$ ;  $M_{\text{ex}}/M_n = 1..1,5$ ;  $M_m/M_n = 1,2...2,2$ ;  $\eta = 0,05...0,5$ ;  $\cos \varphi = 0,2...0,5$ ), причем свойства двигателей ухудшаются с уменьшением их номинальной мощности.

Появившиеся в последние годы синхронные реактивные двигатели с роторами новой конструкции позволили значительно улучшить пусковые и рабочие свойства двигателей. Особенностью усовершенствованных роторов является то, что у них разность магнитных проводимостей, а следовательно, и синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям создается не за счет наружных междуполюсных впадин, а в основном за счет внутренних вырезов в пакете стали ротора, которые позволяют получить значительную разность ( $x_d - x_q$ ) при сравнительно небольшой величине среднего воздушного зазора и сравнительно небольшой асимметрии сопротивлений пусковой обмотки ротора. Пакеты стали таких роторов обычно заливаются сплавом алюминия, который, скрепляя их, одновременно выполняет функции проводника токов ротора, проходящих здесь не только по стержням наружных пазов.

Применение роторов усовершенствованных конструкций позволило значительно улучшить свойства синхронных реактивных двигателей. Так, например, замена обычного ротора, изображенного на рис. 18.16, новым усовершенствованным ротором в двигателе, изготовленном на базе асинхронного двигателя АОЛ 021/4, позволила увеличить момент выхода из синхронизма на 50%, момент входа в синхронизм на 80 %; начальный пусковой момент на 40 %; максимальный  $\cos \varphi$  на 40 %; максимальный КПД на 30 %.

### 18.7. Синхронные гистерезисные двигатели

В настоящее время в схемах автоматики получили весьма широкое распространение синхронные гистерезисные микродвигатели. Статор обычного гистерезисного двигателя ничем не отличается от статоров синхронных и асинхронных машин. Пакет статора набирается из изолированных листов электротехнической стали. В полузакрытых (с неширокой прорезью) пазах располагается обычная трехфазная или двухфазная (в конденсаторных двигателях) обмотка, которая при подключении к сети переменного тока создает вращающееся магнитное поле. Ротор большинства гистерезисных двигателей представляет собой сплошной или шихтованный полый цилиндр из магнитотвердого материала, имеющего широкую петлю гистерезиса (обладающего большой остаточной намагниченностью), и располагается на магнитной или немагнитной втулке. Магнитные схемы гистерезисных двигателей с различными роторами представлены на рис. 18.18.

Принцип действия гистерезисного двигателя рассмотрим на примере двигателя со сплошным массивным ротором (рис. 18.19). Вращающий момент такого двигателя можно представить как сумму двух моментов: основного гистерезисного  $M_{\Gamma}$ , обусловленного наличием большой остаточной намагниченности, и момента от вихревых токов  $M_{\text{в}}$ :  $M = M_{\Gamma} + M_{\text{в}}$ .

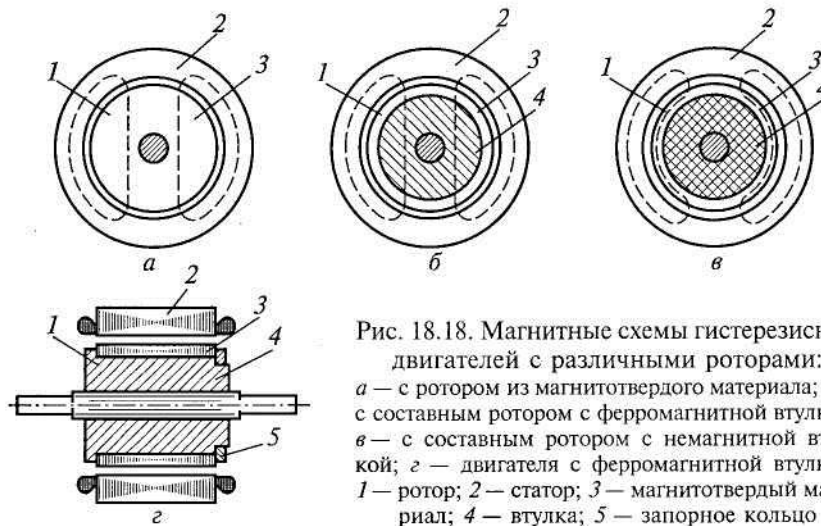


Рис. 18.18. Магнитные схемы гистерезисных двигателей с различными роторами: *а* — с ротором из магнитотвердого материала; *б* — с составным ротором с ферромагнитной втулкой; *в* — с составным ротором с немагнитной втулкой; *г* — двигателя с ферромагнитной втулкой; 1 — ротор; 2 — статор; 3 — магнитотвердый материал; 4 — втулка; 5 — запорное кольцо

Момент от вихревых токов возникает в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля двигателя с вихревыми токами ротора. По своей природе это асинхронный момент. Он равен нулю при синхронизме и вследствие большого активного сопротивления массивного ротора максимален при пуске ( $n = 0$ ). Если бы двигатель обладал только моментом от вихревых токов, то его механическая характеристика не отличалась бы ничем от механической характеристики обычного асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением ротора, имеющего  $s_K > 1$ .

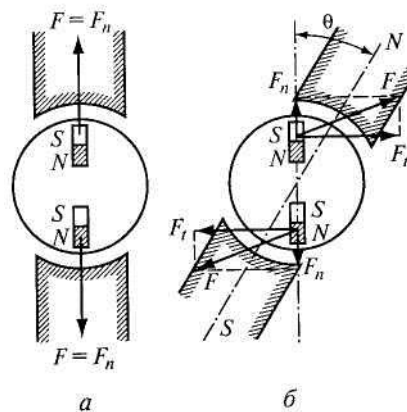


Рис. 18.19. Принцип действия гистерезисного двигателя: *а* — схема сил при неврещающемся магнитном поле; *б* — схема сил при вращающемся магнитном поле

Возникновение гистерезисного момента объясняется наличием у материала ротора широкой петли гистерезиса. При асинхронной скорости вращения ротор, находясь в магнитном поле, все время перемагничивается. При этом ось поля ротора, изготовленного из магнитотвердого материала, при наличии момента сопротивления на валу отстает от оси вращающегося магнитного поля на некоторый угол  $\theta$ . В результате взаимодействия поля ротора с опережающим его вращающимся магнитным полем статора возникает вращающий гистерезисный момент  $M_H$ .

Если ротор гистерезисного двигателя поместить в магнитное поле, то он намагнитится, его области спонтанной намагниченности — элементарные магнитики будут ориентированы по силовым линиям магнитного поля. На рис. 18.19 схематично показаны два элементарных магнитика. В результате взаимодействия внешнего поля, которое для наглядности представлено в виде двух полюсов магнита, с элементарными магнитиками ротора возникнут силы  $F = F_n$  которые в положении ротора, соответствующем, показанному на рис. 18.18, *а*, будут направлены радиально. Момент, действующий на ротор в этом случае, будет равен нулю.

Если полюсы магнита, а следовательно, внешнее магнитное поле вращать относительно ротора, то

элементарные магнитики будут поворачиваться вслед за полем полюсов, однако вследствие молекулярного трения, которое у магнитотвердых материалов весьма значительно, они будут отставать от поля полюсов на некоторый угол  $\theta$ . Силы взаимодействия  $F$  между элементарными магнитиками и полем полюсов магнита в этом случае (см. рис. 18.19, б) кроме радиальных составляющих  $F_n$  будут иметь еще тангенциальные составляющие  $F_t$ , которые и создадут вращающий гистерезисный момент.

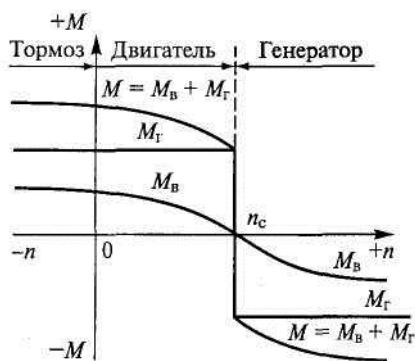


Рис. 18.20. Механические характеристики гистерезисного двигателя

На рис. 18.20 представлены механические характеристики гистерезисного двигателя — зависимости гистерезисного момента  $M_G$ , момента от вихревых токов  $M_e$  и суммарного момента  $M = M_G + M_e$  от частоты вращения  $n$  при круговом поле, синусоидально распределенном в пространстве. У гистерезисных двигателей с шихтованным ротором вихревые токи практически отсутствуют, поэтому  $M_e = 0$  и механическая характеристика  $M = M_G = f(n)$  имеет вид прямой линии.

Роторы гистерезисных двигателей по конструктивному исполнению можно разделить на три группы.

1. Роторы (сплошные или шихтованные), целиком изготовленные из магнитотвердого материала (см. рис. 18.18, а).

2. Сборные роторы, состоящие из полого цилиндра (сплошного или шихтованного), изготовленного из магнитотвердого материала и ферромагнитной втулки (см. рис. 18.18, б). Такие роторы обычно применяются в случае, если магнитотвердый материал имеет малую магнитную проницаемость  $\mu$  (сравнительно небольшую индукцию насыщения  $B_m$  при большой коэрцитивной силе  $H_c$ ).

3. Сборные роторы, состоящие из активной части — полого (сплошного или шихтованного) цилиндра из магнитотвердого материала — и немагнитной ( $\mu = 1$ ) втулки из алюминия или пластмассы (см. рис. 18.18, в). Такие роторы применяются в том случае, когда магнитотвердый материал имеет сравнительно большую магнитную проницаемость  $\mu$  (большую  $B_m$  при сравнительно небольшой  $H_c$ ).

Наибольшее распространение в настоящее время получили роторы второй и третьей групп. В некоторых двигателях активная часть ротора изготавливается не из листов, а из проволоки, полос или пресс-порошка.

Положительные качества синхронных гистерезисных двигателей следующие:

- большие пусковой момент и момент входа в синхронизм;
- независимость момента входа в синхронизм от момента инерции;
- плавность входа в синхронизм — отсутствие рывка;
- незначительное изменение тока — на 20... 30 % от пуска ( $n = 0$ ) до холостого хода ( $n = n_c$ ) и на 1... 3 % от холостого хода до номинальной нагрузки;
- сравнительно высокий КПД, достигающий в некоторых двигателях 60%;
- малое время разгона;
- большая механическая прочность и симметрия ротора, что позволяет создавать высокоскоростные двигатели, в том числе гидродвигатели;
- способность одного и того же ротора работать в магнитных полях различной полюсности — полисинхронизм ротора, позволяющий создавать многоскоростные синхронные двигатели, хотя и неравноценные по качеству на различных скоростях из-за различного намагничивания активного материала ротора;
- высокая температурная стабильность пусковых и рабочих характеристик, обусловленная тем, что изменение температуры влияет лишь на значение активного сопротивления обмотки статора;

высокая надежность, малый уровень шума и сравнительно небольшие габариты и масса. Недостатки синхронных гистерезисных двигателей, ограничивающие области их применения, сводятся к следующим:

низкий коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), не превосходящий 0,3...0,45;

малая стабильность мгновенной скорости вращения — качание ротора при резко изменяющихся нагрузках;

большой технологический разброс характеристик двигателя, объясняющийся тем, что даже незначительные отклонения от установленного режима термической обработки ведут к значительным изменениям свойств магнитотвердых материалов;

высокая стоимость магнитотвердых материалов и сложность их механической обработки.

## Глава 19 ШАГОВЫЕ И МОМЕНТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 19.1. Принцип действия шаговых двигателей

В схемах автоматики, телемеханики и вычислительной техники наряду с автоматическими системами непрерывного действия, которые выполняются с помощью рассмотренных выше обычных двигателей, широко применяются системы дискретного (импульсного) действия. В таких системах используются специальные исполнительные двигатели, которые получили название шаговых.

*Шаговые двигатели* — это электромеханические устройства, которые преобразуют электрические импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые и линейные перемещения ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях.

Первые шаговые двигатели изготовлялись в виде электромагнита, приводящего во вращение храповое колесо (рис. 19.1), которое за одно включение электромагнита под напряжение (за один такт) перемещалось на вполне определенный угол — шаг, величина которого определяется величиной зубцового шага храпового колеса.



Рис. 19.1. Шаговый двигатель с электромагнитом и храповиком

Для обеспечения реверса на валу двигателя устанавливалось два храповых колеса, повернутых на  $180^\circ$  друг относительно друга, и двигатель снабжался двумя электромагнитами. Несмотря на наличие ряда недостатков храповых шаговых двигателей, они и в настоящее время находят довольно широкое применение в схемах автоматики.

### 19.2. Шаговые двигатели с пассивным ротором

Применяемые в настоящее время шаговые двигатели в большинстве являются многофазными и многополюсными синхронными электрическими машинами. В отличие от обычных синхронных двигателей роторы шаговых двигателей не имеют пусковой короткозамкнутой обмотки, что объясняется частотным (а не асинхронным) их пуском. Роторы двигателей могут быть возбужденными (активными) и невозбужденными (пассивными).

На рис. 19.2 изображены схемы работы  $m$ -фазного шагового двигателя. Для упрощения анализа физических процессов рассмотрим работу этого двигателя с простейшим невозбужденным ротором,

имеющим два полюса.

Питание обмоток статора может быть либо *однополярным*, либо *двухполярным*. При однополярном питании напряжение изменяется от нуля до  $+U$ ; при двухполярном — от  $+U$  до  $-U$ .

Современные электронные коммутаторы могут обеспечивать питание обмоток статора либо порознь, либо группами в различных сочетаниях. Каждому состоянию — такту коммутации, число которых зависит от способов включения обмоток, соответствует вполне определенная величина и направление вектора  $F$  результирующей МДС двигателя, а следовательно, и вполне определенное положение ротора в пространстве. Так, если обмотки двигателя питать поочередно (1, 2, 3, ...,  $m$ ) однополярными импульсами, то ротор двигателя будет иметь  $m$  устойчивых положений, которые совпадают с осями обмоток (см. рис. 19.2, *а*). На практике с целью увеличения результирующей МДС статора, а следовательно, и магнитного потока, а также синхронизирующего момента обычно одновременно питают две, три и большее число обмоток. При этом ротор двигателя при холостом ходе занимает положения, в которых его ось совпадает с результирующим вектором МДС.

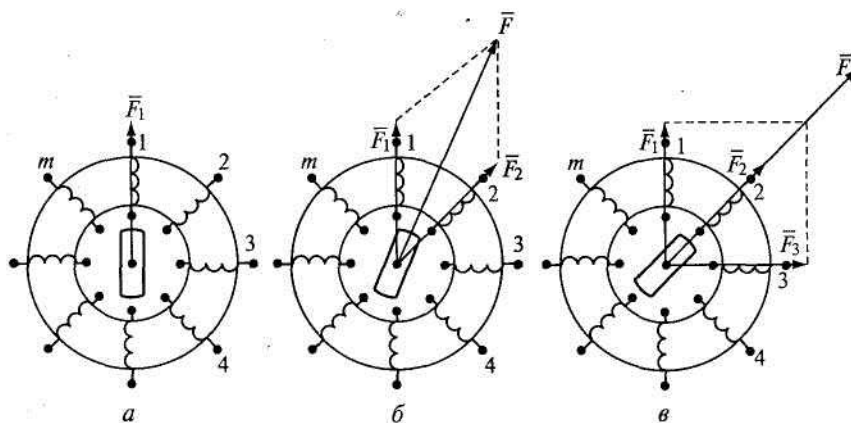


Рис. 19.2. Схемы работы  $m$ -фазного шагового двигателя:  
*а* — поочередное питание однополярными импульсами; *б* — питание четного числа обмоток; *в* — питание нечетного числа обмоток

В том случае, когда питается четное число обмоток, положения результирующего вектора МДС и ненагруженного ротора совпадают с линией, проходящей между двумя средними обмотками (см. рис. 19.2, *б*). В том случае, когда питается нечетное число обмоток, устойчивые положения ротора совпадают с осью средней обмотки (см. рис. 19.2, *в*). Таким образом, в обоих случаях (при четном и нечетном числе питаемых обмоток) ротор двигателя будет иметь  $m$  устойчивых положений. Однако соседние положения в этих случаях будут смещены на угол  $2\pi/(2m) = \pi/m$ .

Если поочередно включать то четное, то нечетное число обмоток (например, 1 — 2, 1 — 2 — 3, 2 — 3, 2 — 3 — 4 и т.д.), то число устойчивых положений ротора  $n$  увеличится вдвое:  $n = 2m$ .

На практике управление двигателем, при котором обмотки включаются поочередно равными группами по две, три и т.д., называют *симметричным*. Поочередное включение неравных групп обмоток называют *несимметричным* управлением.

Кроме однополярного и двухполярного, симметричного и несимметричного способов управления шаговыми двигателями различают еще потенциальный и импульсный способы управления.

При *потенциальном управлении* напряжения на обмотках изменяются только в момент поступления управляющего сигнала — команды. При отсутствии последующего сигнала управления одна обмотка или группа обмоток, возбужденные предшествующим сигналом, остаются под напряжением и ротор занимает вполне определенное фиксированное положение.

При *импульсном управлении* любая обмотка (или группа обмоток), возбужденная сигналом — импульсом управления, по истечении некоторого времени, определяемого длительностью импульса, автоматически обесточивается. Фиксация положения ротора в период паузы между импульсами обеспечивается либо внутренним реактивным моментом (при наличии активного ротора), либо специальными магнитными, электромагнитными или механическими фиксирующими устройствами.

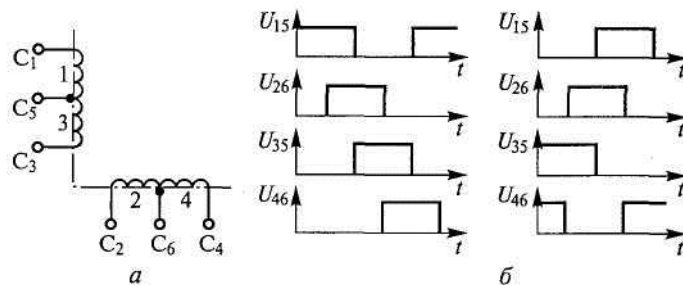


Рис. 19.3. Схема обмоток (а) и порядок коммутации (б) шагового двигателя типа ШД-2-1

На рис. 19.3 показан принцип работы двухфазного шагового двигателя типа ШД-2-1. Обмотки этого двигателя имеют выводы средних точек, что приводит к их расщеплению на две полуфазы и превращает двигатель из двухфазного в четырехфазный. В отличие от двигателей с обычной двухфазной обмоткой, управление которыми должно осуществляться разнополярными импульсами, управление рассматриваемого двигателя осуществляется однополярными импульсами, что значительно упрощает коммутатор.

### 19.3. Шаговые двигатели с активным ротором

Шаговые двигатели по существу являются синхронными двигателями, работающими в несколько иных (необычных) режимах. Последнее накладывает отпечаток на их конструктивное исполнение. В отличие от обычных синхронных двигателей они для обеспечения нужных динамических и статических характеристик имеют минимальные диаметры ротора, выполняются без пусковой короткозамкнутой обмотки, рассчитываются на большие электромагнитные нагрузки и т. п. В настоящее время известно множество конструктивных форм шаговых двигателей.

1. По числу фаз (обмоток управления) шаговые двигатели можно разделить на однофазные, двухфазные и многофазные.
2. По типу роторов — на активные (возбужденные) и пассивные (невозбужденные). Активные шаговые двигатели можно в свою очередь разделить на двигатели с постоянными магнитами (магнитоэлектрические) и двигатели с обмотками возбуждения (электромагнитные), а пассивные — на индукторные и реактивные.
3. По числу пакетов стали магнитопровода двигатели делятся на однопакетные, двухпакетные и многопакетные.
4. По способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления различают двигатели с внутренней и внешней фиксацией.

Шаговые двигатели можно разделить на группы также по типу магнитной системы и другим признакам.

Описание всех конструкций шаговых двигателей, применяемых в настоящее время на практике, весьма затруднительно, поэтому далее рассматриваются лишь некоторые наиболее типичные из них.

*Однопакетные шаговые двигатели с активным ротором* по своей конструкции (рис. 19.4) мало отличаются от обычных синхронных двигателей. Их роторы чаще возбуждаются постоянными магнитами, реже — обмоткой возбуждения постоянного тока. Роторы имеют явно выраженные полюсы. С целью уменьшения шага их изготавливают многополюсными в виде магнитов-звездочек. Малые диаметры не позволяют значительно увеличить число полюсов, что приводит к сравнительно крупному шагу таких двигателей, который обычно находится в пределах от 15 до 90°. Уменьшение шага у этих двигателей возможно лишь за счет увеличения числа фаз статора и тактов коммутации. Стремление уменьшить шаг приводит к тому, что обмотки статора обычно выполняются с минимальным числом пазов, приходящихся на полюс и фазу  $q = 1$ .

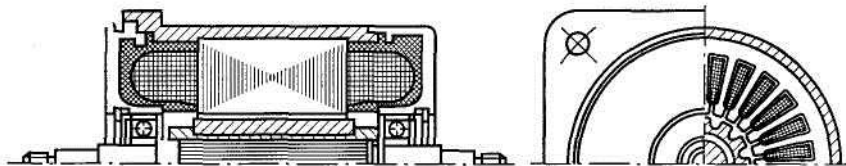


Рис. 19.4. Шаговый двигатель типа ШД-2 с активным ротором в виде магнита-звездочки

Двигатели, от которых не требуется фиксации ротора в обесточенном состоянии, обычно изготавливаются со скосом пазов статора. Последнее способствует устранению зубцовых гармоник в кривой момента  $M = f(\theta)$ .

При необходимости фиксации ротора в обесточенном состоянии статоры изготавливаются без скоса пазов. Для увеличения фиксирующего момента пазы статора обычно имеют значительные прорези. Наличие такой внутренней фиксации ротора, не требующей конструктивных усложнений и дополнительной мощности извне, является несомненным достоинством магнитоэлектрических шаговых двигателей. Для обеспечения минимального зазора шаговые двигатели часто имеют сквозную конструкцию. Выпускается несколько серий шаговых двигателей с активным ротором — ДШ-А, ШДА, ШДА-3, ДША и др.

Кроме однопакетных шаговых двигателей с активным ротором на практике можно встретить двух-, трех- и *многопакетные двигатели*. У двухпакетного двигателя в одном корпусе имеется два совершенно одинаковых пакета стали ротора с одинаковыми обмотками. Пакеты стали смещены в пространстве на половину зубцового деления, что обеспечивает соответствующий сдвиг обмоток в пространстве и расширяет возможности двигателя — ведет к уменьшению шага без увеличения диаметра ротора и т.п. Оба ротора-звездочки располагаются на одном валу и не имеют пространственного сдвига, т. е. оси их полюсов совпадают.

Иногда для индикаторных целей (работы практически без момента сопротивления) применяются *гистерезисные шаговые двигатели*, у которых ротор не имеет явно выраженных полюсов и возбуждается полем статора. Шаг таких двигателей определяется числом пазов статора.

#### 19.4. Индукторные шаговые двигатели

Шаговые двигатели индукторного типа имеют следующие отличительные признаки:

1. Пакеты их статоров и роторов изготавливаются из листов магнито-мягкой электротехнической стали.
2. Пазы ротора открытые.
3. Ротор пассивный.
4. Статор имеет два вида пазов: большие полуоткрытые, в которых размещается обмотка, и малые открытые, выполняемые на зубцах, образуемых большими пазами (рис. 19.5). Совокупность открытых пазов статора, расположенных на одном большом зубце, называется гребенчатой зоной. Число пазов статора и ротора и их геометрические размеры выбираются такими, чтобы обеспечить необходимый шаг и достаточный синхронизирующий момент при заданном виде коммутации токов.

Основной особенностью индукторных двигателей является то, что магнитный поток в их воздушном зазоре при работе двигателя содержит постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая потока возбуждается либо постоянной составляющей тока обмоток управления — у двигателей с самовозбуждением, либо специальной обмоткой возбуждения — у двигателей с независимым возбуждением, либо постоянными магнитами — у магнитоэлектрических двигателей.

Переменная составляющая магнитного поля, вращающегося в пространстве в соответствии с частотой тактов коммутации, создается импульсами тока обмоток управления, поступающими от электронного коммутатора.

На рис. 19.6, а представлена схема четырехфазного индукторного шагового двигателя с самовозбуждением. Здесь постоянная составляющая магнитного потока в воздушном зазоре создается непосредственно однополярными импульсами управления с помощью шунтирующих обмотки управления встречных диодов. Двигатели с самовозбуждением просты по устройству, не требуют



сложного коммутатора. Благодаря ряду положительных качеств они получили широкое применение. Выпускается несколько серий таких двигателей: ШДР, ДШИ, РШД. Недостатком индукторных двигателей с самовозбуждением является отсутствие внутренней магнитной фиксации ротора при обесточенных обмотках статора.

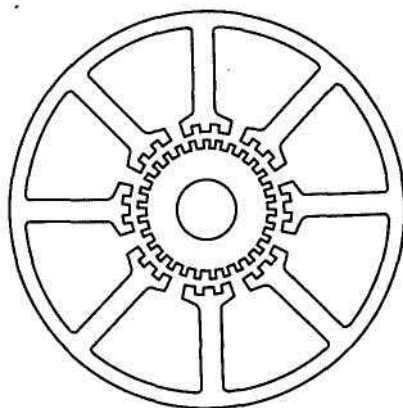


Рис. 19.5. Листы стали статора и ротора шагового двигателя индукторного типа

На рис. 19.6, б изображена схема четырехфазного индукторного шагового двигателя с независимым электромагнитным возбуждением. Постоянный поток возбуждения здесь создается специальной обмоткой (ОВ), питаемой постоянным током, который минует коммутатор. Этот двигатель в отличие от предыдущего имеет внутреннюю магнитную фиксацию роторов при отсутствии токов в обмотках управления (ОУ). Буквами Н и К обозначены начала и концы обмоток ОВ и ОУ. Положительным качеством такого двигателя является также то, что ток возбуждения, минуя коммутатор управления, позволяет тем самым уменьшить его установленную мощность.

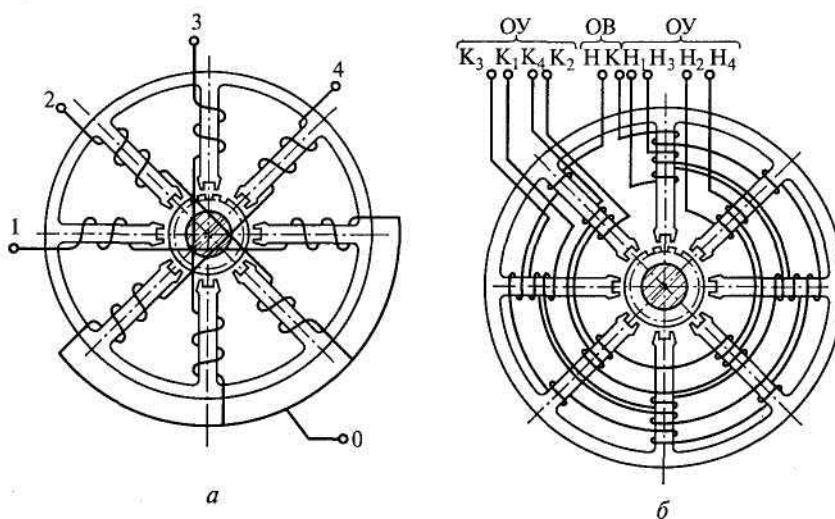


Рис. 19.6. Схемы четырехфазных шаговых двигателей индукторного типа с самовозбуждением (а) и с независимым возбуждением (б)

### 19.5. Шаговые реактивные двигатели

Шаговые реактивные двигатели, так же как и индукторные, имеют невозбужденный (пассивный) ротор (рис. 19.7, а). Конструктивно они весьма схожи с индукторными двигателями, имеющими электромагнитное возбуждение, однако они не имеют обмоток возбуждения и постоянной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре. По своим энергетическим показателям и величине синхронизирующего момента они уступают индукторным двигателям аналогичной конструкции. Одним из недостатков реактивных шаговых двигателей является отсутствие внутренней магнитной фиксации ротора при обесточенных обмотках статора.

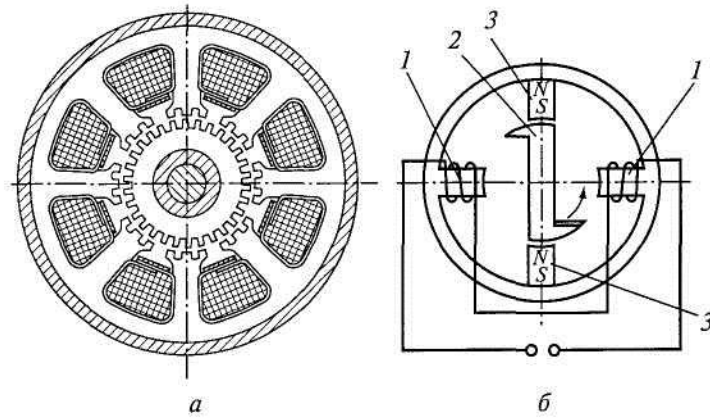


Рис. 19.7. Схемы шаговых реактивных двигателей:  
*a* — четырехфазного; *б* — однофазного двухполюсного; 1 — обмотки управления;  
 2 — ротор; 3 — постоянные магниты

*Однофазные* шаговые двигатели наряду с многофазными находят довольно широкое применение в приборах автоматики и вычислительной техники. Обычно они применяются там, где не требуется больших синхронизирующих моментов и высоких скоростей. Они просты по устройству и управлению, не требуют сложных коммутаторов и чаще всего имеют одно направление вращения (не имеют реверса). Главная трудность при создании однофазных двигателей состоит в получении пускового момента однонаправленного действия.

На рис. 19.7, *б* схематично представлен простейший однофазный шаговый двигатель, пусковой момент однонаправленного действия у которого создается с помощью клювообразных несимметричных полюсов. В обесточенном состоянии обмоток управления 1 ротор 2 удерживается постоянными магнитами 3 во вполне определенном положении. При подаче импульса управления ротор поворачивается в направлении, показанном стрелкой. При повороте ротора на  $90^\circ$  напряжение с обмоток управления снимается и ротор, продолжая вращаться под действием сил инерции, приходит в положение, соосное с полюсами постоянных магнитов.

Кроме рассмотренных конструкций в последнее время появился ряд новых шаговых двигателей: шаговые двигатели с катящимися и волновыми роторами, шаговые двигатели с печатными обмотками и др.

### 19.6. Моментные двигатели

В моментных двигателях ротор, развивая необходимый момент, поворачивается лишь на весьма малые углы, составляющие долю его оборота. Таким образом, двигатель работает практически неподвижным ротором или, как говорят, в режиме короткого замыкания.

В качестве моментных могут быть использованы двигатели различного типа как постоянного, так и переменного токов. Например, у двигателя постоянного тока независимого возбуждения момент короткого замыкания пропорционален приложенному напряжению. У асинхронного двигателя (трехфазного или двухфазного) момент определяется квадратом напряжения в цепи статора, причем в двухфазном двигателе достаточно регулировать ток в одной обмотке (обмотке управления) и изменять момент за счет внесения асимметрии.



Рис. 19.8. Схема моментного двигателя с двумя обмотками (1, 2)

Наиболее рациональным является двухфазный синхронный двигатель с возбуждением от постоянного магнита и питанием обмотки статора постоянным током (рис. 19.8), в котором изменяя соотношение токов от  $I_1 = \max$ ,  $I_2 = 0$  до  $I_1 = 0$ ,  $I_2 = \max$ , можно обеспечить поворот ротора в пределах  $90^\circ$ . При  $I_1 = \max$  положение ротора будет совпадать с осью обмотки 1, при  $I_2 = \max$  — с осью обмотки 2.

Системы с моментными двигателями отличаются повышенным быстродействием. Поскольку двигатель не вращается, то его механическая инерция не влияет на динамику системы, а переходные процессы определяются в основном электромагнитной инерцией обмоток. Так как электромагнитная постоянная двигателя обычно существенно меньше электромеханической, то переходные процессы в них завершаются быстрее, чем при обработке перемещений.

### 19.7. Двигатели для микроперемещений

В приводах подачи прецизионных шлифовальных станков, приборов точной механики и оптики часто требуется обработка перемещений, составляющих несколько микрометров, а иногда и десятые доли микрометра. При использовании для этой цели шаговых двигателей как обладающих малым угловым шагом все же необходима механическая передача с большим передаточным отношением, которой свойственны существенные погрешности. Так как в перечисленных установках очень высоки точностные требования, то применение шаговых двигателей практически исключается. Частичным решением задачи может быть использование шаговых двигателей с электрическим дроблением шага, когда посредством специальной электронной схемы при подаче очередного импульса обеспечивается перемещение не на полный шаг, а только на его часть. По сути дела в этом случае от дискретного управления переходят к непрерывному. Однако и здесь не обойтись без механической передачи.

В связи с этим для микроперемещений необходимы двигатели, выполненные на иной физической основе. Принципиально возможно построение двигателей на основе теплового расширения тела, электромагнитного взаимодействия, магнитострикций, обратного пьезоэффекта.

Двигатели для микроперемещений, построенные на тепловом расширении тела, не используются из-за большой инерционности и отрицательного влияния температурных полей на окружающие приборы и узлы.

Двигатели, выполненные как втяжные или поворотные электромагнитные устройства, иногда находят применение, однако очень трудно в них обеспечить тяговое усилие, слабо зависящее от перемещения. Кроме того, такой двигатель весьма инерционен из-за большой индуктивности тяговой катушки. Полоса пропускания управляющего сигнала в нем составляет 10...20 Гц. Положительное качество двигателя — обеспечение достаточно больших перемещений, определяемых ходом электромагнита (ход может составлять несколько миллиметров). В большинстве случаев в прецизионных установках наряду с микроперемещениями необходимы и относительно большие юстировочные подачи.

Более широко применяют *магнитострикционные двигатели*, в которых используется свойство стержня из ферромагнитного материала изменять длину под воздействием магнитного поля. Максимальное относительное изменение продольных размеров стержней из таких материалов, как никель, железоникелевые, желе-зохромникелевые и железокобальтовые сплавы, сплавы типа инвар и другие, может составлять  $(20... 50) \cdot 10^{-6}$ . Следовательно, при длине 100 мм свободный конец стержня может перемещаться на 2... 5 мкм. Пороговая чувствительность составляет 0,05... 0,10 мкм. Недостаток магнитострикционного двигателя, так же как и электромагнитного, — инерционность, обусловленная процессами, происходящими в намагничивающей катушке. Однако индуктивность ее несколько меньше, так как зазора в магнитной цепи может не быть. Все же полоса пропускания и в этом случае не превышает 30 Гц. На точность работы двигателя существенно влияют внешнее тепловое поле и нагрев стержня. Следует иметь в виду, что намагничивающая катушка двигателя сама создает ощутимое тепловое поле, так как ее размеры и потребление энергии достаточно велики.

Наиболее предпочтителен *пьезоэлектрический двигатель*, выполняемый обычно как столбик из пьезокерамических шайб, склеенных между собой. Исходным материалом для пьезокерамики служат оксиды металлов (титанат бария, цирконат-титанат свинца и др.). Когда к торцевым поверхностям шайб приложено напряжение, то в зависимости от ориентации электрического поля столбик сжимается или удлиняется. В некоторых пределах зависимость удлинения от напряженности электрического поля

носит линейный характер. Максимальное относительное удлинение может составлять  $(5...7) \cdot 10^{-4}$ . Следовательно, пьезостолбик длиной 50 мм может обеспечить перемещение до 25 мкм, т. е. примерно на порядок больше, чем в магнестрикционных двигателях. Напряжение, подаваемое на шайбу, достаточно велико — до 300 В. Потребление энергии незначительно.

Существенное достоинство пьезоэлектрического двигателя — быстродействие. Полоса пропускания достигает 1000 Гц. К недостаткам как магнестрикционного, так и пьезоэлектрического двигателей относится наличие петли гистерезиса в характеристиках. Ширина петли может достигать 20... 30 % максимального перемещения. В пьезоэлектрических двигателях влияние гистерезиса можно несколько ослабить предварительным сжатием столбика шайб.

Усилия, которые могут создавать магнестрикционный и пьезоэлектрический двигатели, естественно, зависят от размеров стержня и шайб и в реальных двигателях составляют несколько сотен ньютонов.

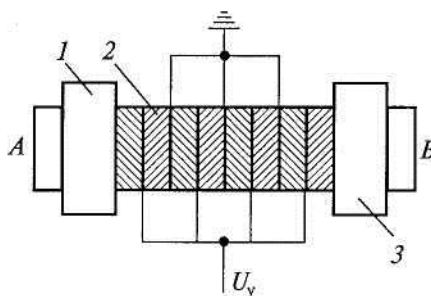


Рис. 19.9. Схема шагового пьезоэлектрического двигателя:  
1, 3 — зажимные устройства; 2 — шайба пьезоэлектрическая

Часто максимальные перемещения, которые могут обеспечить магнестрикционный и пьезоэлектрический двигатели, недостаточны. Тогда приходится прибегать к шаговым двигателям, построенным на тех же принципах. Работу *шагового пьезоэлектрического двигателя* поясняет рис. 19.9. Двигатель состоит из столбика пьезоэлектрических шайб 2 и двух зажимных устройств 1 и 3 на его концах. При нормальной работе в непрерывном режиме зажимное устройство 3 зафиксировано, а устройство 1 свободно. В зависимости от напряжения, поданного на шайбы, осуществляются микроперемещения конца A. При использовании возможного ресурса перемещений и соответственно при достижении напряжением предельного значения зажим 1 фиксирует конец A, напряжение с шайб снимается, а зажим 3 освобождает конец B. При этом столбик шайб сжимается до исходной длины (конец B подтягивается). После этого зажим 3 вновь фиксируется, а зажим 1 отпускает конец A; далее вновь подается напряжение на шайбы и двигатель начинает работать, перемещая конец A, соответственно управляя объектом, механически связанным с двигателем. Если одного шага перемещения оказывается недостаточно, то цикл повторяется. Зажимными устройствами управляют с помощью специального коммутатора. Для того чтобы зафиксировать конец столбика шайб, можно установить механические устройства (например, цанговые зажимы) с управлением от магнитов или тех же пьезокерамических элементов — шайб.

Шаговый магнестрикционный двигатель работает по тому же принципу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко А. Г. Основы микросхемотехники. — М.: Радио и связь, 1978.
2. Армейский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические микромашины. — М.: Высш. шк., 1985.
3. Бабилов М.А., Косинский А. В. Элементы и устройства автоматики. — М.: Высш. шк., 1975.
4. Горошков Б. И. Элементы радиоэлектронных устройств. — М.: Радио и связь, 1988.
5. Емельянов А. И., Емельянов В. А., Калинина С. А. Практические расчеты в автоматике. — М.: Машиностроение, 1967.
6. Зимодро А. Ф., Скибинский Г.Л. Основы автоматики. — Л.: Энергоатом-издат, 1994.
7. Квартин М. И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики: Учебник. — М.: Высш. шк., 1989.

8. *Миловзоров В. П.* Электромагнитные устройства автоматики: Учебник. — М.: Высш. шк., 1983.
9. *Никифоров Г. Н., Котылев Г. В.* Конструкция самолетных агрегатов. — М.: Машиностроение, 1989.
10. *Обухов А. О.* Теория элементов автоматики. — Минск: Наука и техника, 1989.
11. *Подлипенский В. С., Сабинин Ю. А., Юрчук Л. Ю.* Элементы и устройства автоматики / Под ред. Ю. А. Сабинина. — СПб.: Политехника, 1995.
12. Приборостроение и средства автоматики: Справочник / Под ред. А.Н.Гаврилова. — М.: Машиностроение, 1964.
13. *Таев И. С.* Электрические аппараты автоматики и управления. — М.: Высш. шк., 1985.
14. *Шавров А. В., Коломнец А. П.* Автоматика. — М.: Колос, 1999.
15. *Шило В. Л.* Линейные интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 1982.
16. Энциклопедия современной техники: Автоматизация производства и промышленная электроника / Под ред. А. И. Берг и В. А. Трапезникова. — М.: Сов. энцикл., 1998.
17. *Юферов Ф. М.* Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высш. шк., 1998.