

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

М. М. Кацман

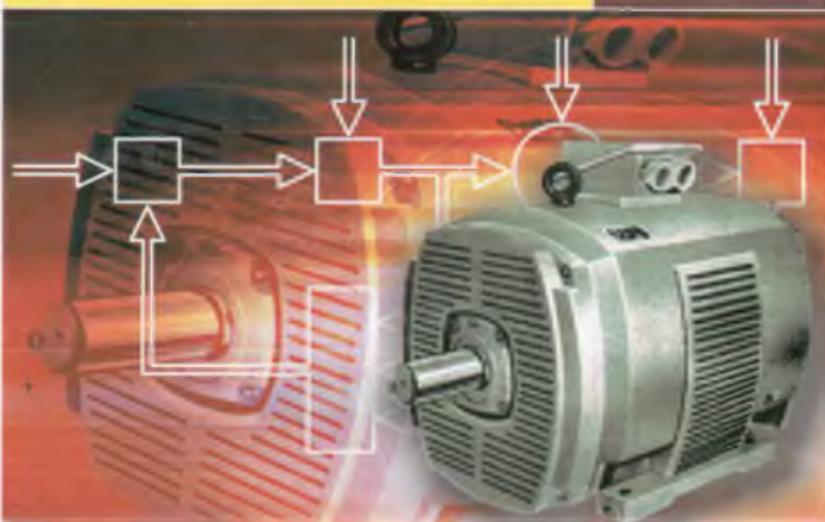
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

4-е издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ACADEMA

УЧЕБНИК



Приведение в действие рабочих машин и механизмов осуществляется посредством приводов — устройств, преобразующих какой-либо вид энергии в механическую энергию движения. Различают следующие приводы:

тепловой, в котором механическую энергию получают путем преобразования тепловой энергии, полученной при сгорании топлива, например двигатель внутреннего сгорания;

пневматический и гидравлический, в которых механическую энергию получают за счет энергии сжатого воздуха или жидкости под давлением;

электрический, в котором механическую энергию получают путем преобразования электрической энергии;

мускульный — ручной (например, ручная лебедка) или ножной (например, велосипед).

Из всех перечисленных приводов наибольшее распространение получил электрический привод. Это объясняется целым рядом преимуществ электропривода по сравнению с другими видами приводов: надежность и экономичность процесса преобразования электрической энергии в механическую, простота подачи электроэнергии к месту ее потребления, хорошие регулировочные свойства электропривода, экологическая чистота.

Электропривод — это электромеханическая система, осуществляющая преобразование электрической энергии в механическую энергию вращательного или поступательного движения и состоящая из взаимодействующих электромеханического преобразователя энергии, механического передаточного устройства и устройств управления.

В качестве электромеханических преобразователей энергии в электроприводах преимущественное применение получили электродвигатели.

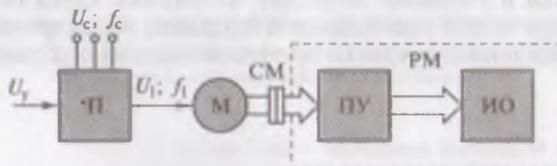


Рис. В.1. Блок-схема электропривода

Для пояснения принципа работы электропривода обратимся к его блок-схеме (рис. В.1). Управляющий электрический сигнал U_y подается на преобразователь П, который в соответствии с сигналом U_y осуществляет преобразование и передачу электроэнергии из питающей сети с постоянными параметрами напряжения U_c и частоты f_c на вход электродвигателя М с требуемыми значениями напряжения U_1 и частоты f_1 . Электроэнергия, поступившая в двигатель М, преобразуется в механическую энергию вращения. Посредством соединительной механической муфты СМ вращательное движение вала двигателя передается рабочей машине (механизму) РМ, где оно сначала проходит через механическое передаточное устройство ПУ для получения требуемых значений вращающего момента и частоты вращения или преобразования вращательного движения в поступательное, затем механическая энергия подается на исполнительный орган ИО рабочей машины, выполняющей технологическую операцию.

В качестве механического передаточного устройства ПУ обычно применяют механические передачи, позволяющие изменять параметры вращательного движения — частоту вращения с соответствующим изменением момента. В качестве таких механических передач наибольшее применение получили: ременная, зубчатая цилиндрическая (рис. В.2, а), зубчатая коническая (рис. В.2, б), червячная (рис. В.2, в) передачи.

При необходимости получения значительного передаточного отношения $i = \omega_{\text{вых}}/\omega_{\text{вх}}$ применяют *редуктор*, представляющий собой многоступенчатую зубчатую передачу (рис. В.3).

В некоторых приводах механическое передаточное устройство преобразовывает вращательное движение с угловой скоростью ω

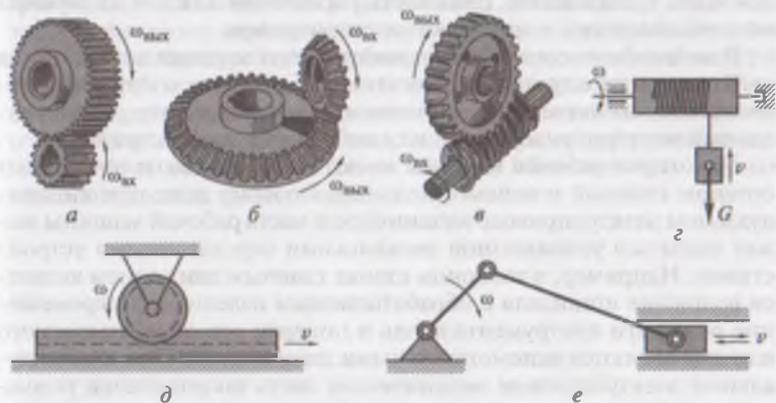


Рис. В.2. Механические передачи

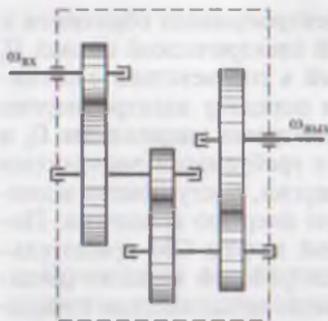


Рис. В.3. Редуктор на цилиндрических зубчатых колесах

поступательное с линейной скоростью v посредством винтовой пары («винт-гайка»), реечной передачи (рис. В.2, д) или кривошипно-шатунного механизма (рис. В.2, е). В подъемных механизмах преобразование вращательного движения в поступательное осуществляется посредством лебедки, состоящей из барабана с наматываемым на него тросом (рис. В.2, з). Существуют электроприводы без механических передаточных устройств, например электропривод вентилятора, у которого вращение вала двигателя передается непосредственно

на исполнительный орган (крыльчатку).

Управление электроприводами осуществляется посредством устройств, составляющих *аппаратуру управления*: коммутирующих, преобразовательных, измерительных и др. Будучи включенной по определенной схеме, эта аппаратура обеспечивает ручное или автоматизированное управление электроприводом.

В зависимости от способа передачи механической энергии от двигателя к передаточному устройству, а затем к исполнительному органу рабочей машины электроприводы разделяются на групповые, индивидуальные (одиночные) и многодвигательные.

В *групповом электроприводе* одним двигателем посредством трансмиссии приводятся в действие несколько рабочих машин. В настоящее время групповой электропривод имеет ограниченное применение из-за существенных недостатков: громоздкость и низкая надежность трансмиссии, сложность управления каждой из рабочих машин, входящих в групповой электропривод.

В *индивидуальном электроприводе* рабочая машина приводится в действие индивидуальным двигателем. Благодаря отсутствию недостатков, свойственных групповому электроприводе, индивидуальный электропривод получил наибольшее распространение.

Некоторые рабочие машины имеют несколько исполнительных органов: главный и вспомогательные. Поэтому даже при индивидуальном электроприводе механическая часть рабочей машины может оказаться усложненной несколькими передаточными устройствами. Например, в токарном станке главным движением является вращение шпинделя с обрабатываемым изделием, а перемещение режущего инструмента вдоль и поперек оси обрабатываемого изделия являются вспомогательными движениями. При индивидуальном электроприводе механическая часть такого станка усложнена передаточными устройствами от главного на вспомогательные движения. Этот недостаток отсутствует в *многодвигательном*

электроприводе, где каждый исполнительный орган рабочей машины имеет свой индивидуальный двигатель, что позволяет упростить механическую часть рабочей машины за счет устранения элементов распределения механической энергии между ее исполнительными органами. Кроме того, этот вид привода упрощает его автоматизацию за счет повышения управляемости отдельных элементов рабочей машины, снабженных индивидуальными двигателями. Многодвигательный электропривод обычно применяют в сложных агрегатах, имеющих несколько исполнительных органов (прокатные станы, подъемные краны, металлообрабатывающие станки и т.п.).

По виду приводного двигателя электроприводы разделяются на электроприводы постоянного тока с применением двигателей постоянного тока и электроприводы переменного тока с применением двигателей переменного тока (асинхронного или синхронного).

Управление электроприводами состоит в выполнении следующих операций: пуск, регулирование или поддержание неизменной скорости движения, торможение, реверсирование (изменение направления движения), остановка. Виды операций, их последовательность и продолжительность определяются требованиями технологических процессов, реализуемых в рабочей машине.

По способу управления электроприводы разделяются на ручной и автоматизированный. В ручном электроприводе все операции по управлению выполняются оператором вручную. В автоматизированном электроприводе операции управления выполняются без участия оператора, т.е. автоматически, с применением соответствующей аппаратуры.

Развитие и внедрение в производство автоматизированного электропривода с применением двигателей, обладающих высокими энергетическими параметрами, регулируемых преобразователей и надежной аппаратурой управления, способствуют повышению производительности труда и качества изготавливаемых изделий. В настоящее время разработаны и успешно применяются системы автоматизированного управления как отдельными рабочими машинами, так и комплексами таких машин, объединенных единым технологическим процессом.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ГЛАВА I

МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Основные понятия

Исполнительные органы рабочих машин совершают вращательное или поступательное движение. Однако преобладающим видом движения элементов электропривода является *вращательное*, что обусловлено применением в большинстве электроприводов в качестве электромеханического преобразователя электродвигателей с вращательным движением выходного вала. Существуют линейные электродвигатели, у которых подвижная часть совершает поступательное движение, но такие двигатели имеют пока весьма ограниченное применение. Для оценки скорости вращательного движения приняты понятия: *угловая скорость вращения* ω и *частота вращения* n .

Угловая скорость вращения является производной величиной международной системы (СИ) и измеряется в радиан в секунду (рад/с); обычно ее применяют при рассмотрении теоретических вопросов электропривода.

В технической документации (каталоги, справочники, технические условия и т. п.) и в практических расчетах обычно используют единицу частоты вращения «обороты в минуту». Угловая скорость вращения и частота вращения связаны зависимостью:

$$\omega = (2\pi/60)n = 0,105 n. \quad (1.1)$$

Для количественной оценки величин, характеризующих процессы в электроприводе, применяют обозначения и единицы измерения, приведенные в приложении I.

Работа электроприводов характеризуется рядом параметров, важнейшими из которых являются электромагнитный момент на валу двигателя M (Н·м) и частота вращения n (об/мин) или угловая скорость вращения ω (рад/с). Зависимость между этими параметрами $n = f(M)$ или $\omega = f(M)$, выраженная графически, представляет собой *механическую характеристику* электропривода. На рис. 1.1 представлен примерный вид механических характеристик

электроприводов с двигателями, получившими наибольшее применение.

При передаче вращательного движения рабочему механизму двигатель испытывает противодействие со стороны этого механизма, которое определяется *статическим моментом сопротивления* M_c . Статические моменты сопротивления разделяются на активные и реактивные.

Активный статический момент действует в одном неизменном направлении независимо от направления движения механизма. Такой момент сохраняет свое направление и величину даже в неподвижном механизме, так как он создается постоянно действующими внешними силами, независимыми от этого механизма. Примером такого статического момента является статический момент сопротивления подъемного механизма — лебедки (см. рис. В.2, *г*), создаваемый грузом G , подвешенным на тросе. Постоянно действующая на груз G гравитационная сила земного притяжения создает статический момент сопротивления независимо от направления вращения барабана лебедки, т.е. независимо от того, поднимается этот груз или опускается, или же он неподвижен. Величина активного статического момента сопротивления пропорциональна массе подвешенного груза m и определяется выражением, Н·м,

$$M'_c = gm(D_6/2), \quad (1.2)$$

где D_6 — диаметр барабана, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, которое является переводным коэффициентом между единицей силы ньютоном (Н) и единицей массы килограммом ($1 \text{ кг} = 9,81 \text{ Н}$).

Механическая характеристика активного статического момента $n = f(M_c)$ имеет вид прямой вертикальной линии (рис. 1.2, *а*), расположенной во втором и третьем квадрантах осей координат. Таким образом, при подъеме груза активный статический момент направлен *против* момента двигателя, вращающего барабан, а при опускании груза — *согласно* с этим моментом.

Реактивные статические моменты сопротивления действуют только в движущихся механизмах, при этом они направлены всегда противоположно этому движению. Если же направление движения изменится, то также изменит-

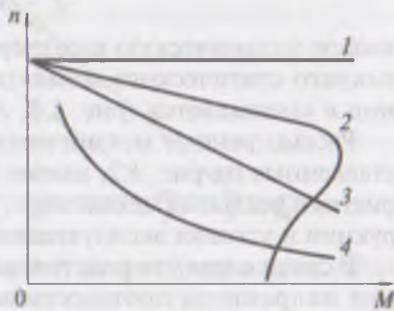


Рис. 1.1. Механические характеристики электроприводов с двигателями разного типа:

1 — синхронный двигатель; 2 — асинхронный двигатель; 3 — двигатель постоянного тока независимого возбуждения; 4 — то же, последовательного возбуждения

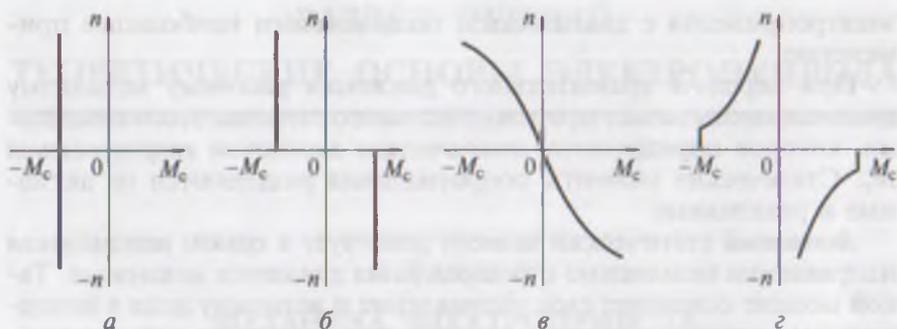


Рис. 1.2. Механические характеристики рабочих механизмов:

а — подъемный механизм (лебедка); *б* — силы трения, резания, пластической деформации любого механизма; *в* — центробежный вентилятор, дымосос, центробежный насос; *г* — станок металлообрабатывающий

ся направление реактивного статического момента. При неподвижном состоянии механизма статический реактивный момент сопротивления равен нулю ($M_c = 0$).

Например, механическая характеристика реактивного статического момента сопротивления, вызванного силами трения в движущихся частях механизма, имеет вид прямых вертикальных линий, расположенных во втором и четвертом квадрантах осей координат (рис. 1.2, б). Приблизительно такую же форму имеют механические характеристики статических моментов, обусловленных силами резания или пластической деформации.

Реактивные статические моменты большинства производственных механизмов зависят не только от направления, но и от скорости движения. При этом механические характеристики реактивных статических моментов могут иметь разную форму. Например, у *центробежных* вентиляторов, центробежных насосов и других аналогичных механизмов статический момент сопротивления пропорционален квадрату частоты вращения ($M \sim n^2$), поэтому механическая характеристика таких механизмов имеет вид *параболы* (рис. 1.2, в).

Металлорежущие станки при постоянной мощности

$$P \sim M_c n = \text{const}$$

имеют механическую характеристику, при которой с ростом реактивного статического момента сопротивления M_c частота вращения n уменьшается (рис. 1.2, г).

Рассмотренные механические характеристики механизмов, представленные на рис. 1.2, имеют приближенный вид, так как характеристики реальных механизмов, учитывающие особенности их конструкции и условия эксплуатации, имеют более разнообразную форму.

В связи с тем что реактивные статические моменты сопротивления направлены противоположно вращающему моменту двигате-

ля, величины статических реактивных моментов принимаются со знаком, противоположным знаку вращающего момента приводного двигателя. Например, если вращающий момент двигателя положительный, то статический реактивный момент сопротивления механизма отрицательный и его принимают со знаком минус.

1.2. Основное уравнение движения электропривода

Режим работы электропривода при равномерной частоте вращения называется *установившимся режимом*. В этом режиме вращающий момент двигателя M уравнивается реактивным статическим моментом сопротивления рабочего механизма M_c , а их сумма равна нулю:

$$M + (-M_c) = 0. \quad (1.3)$$

Соответствие выражения (1.3) установившемуся режиму подтверждается известным законом механики, согласно которому вращение тела вокруг оси будет *равномерным*, если алгебраическая сумма моментов, приложенных к нему, равна нулю. В установившемся режиме электропривод работает устойчиво.

Для пояснения обратимся к рис. 1.3, где в одних осях координат построены механическая характеристика двигателя (линия $СК$ в первом квадранте) и механическая характеристика реактивного статического момента сопротивления рабочего механизма (линия DE во втором квадранте). Суммируя абсциссы этих характеристик, получим *совместную характеристику электропривода* (график DF). В точке пересечения этой характеристики с осью ординат (точ-

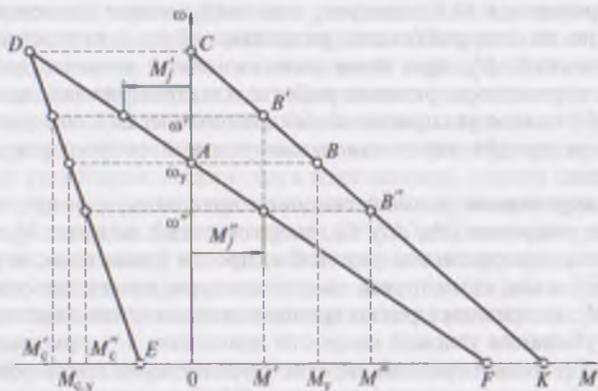


Рис. 1.3. Построение совместной характеристики электропривода и рабочего механизма

ка A) результирующий момент равен нулю, а точка A соответствует установившемуся режиму работы электропривода [см. (1.3)]. Этому режиму соответствует работа двигателя в режиме точки B (на механической характеристике двигателя) с координатами M_y и ω_y . При этом реактивный статический момент имеет величину M_{cy} .

Если же под действием каких-либо причин установившийся режим будет нарушен и изменится угловая скорость вращения, то наступит *переходный режим* работы электропривода и на вал двигателя начнет действовать еще один момент, обусловленный силами инерции вращающихся масс двигателя и механизма. Этот момент называется *динамическим моментом*, Н·м:

$$M_j = \pm J(d\omega/dt), \quad (1.4)$$

где J — момент инерции вращающихся элементов электропривода и рабочего механизма относительно оси вращения, кг·м²; ω — угловая скорость вращения, рад/с.

Переходя к частоте вращения n , об/мин, получим

$$M_j = 0,105J(dn/dt). \quad (1.5)$$

Величина $d\omega/dt$ представляет собой *угловое ускорение*. При установившемся режиме, когда $\omega = \text{const}$, угловое ускорение $d\omega/dt = 0$, а поэтому динамический момент отсутствует, т.е. $M_j = 0$. Но при переходном режиме на вал двигателя действуют три момента: M — вращающий момент двигателя, M_c — статический момент сопротивления и M_j — динамический момент. Эти моменты связаны уравнением:

$$M = M_c \pm M_j = M_c \pm J(d\omega/dt), \quad (1.6)$$

называемым *основным уравнением движения электропривода*.

Из уравнения (1.6) следует, что нагрузочные моменты, действующие на вал двигателя, разделяются на статический M_c и динамический M_j , при этом динамический момент действует лишь в переходном режиме работы электропривода, когда появляется угловое ускорение $d\omega/dt$. Динамический момент своим действием препятствует *изменению* угловой скорости вращения двигателя.

При *нарастании* угловой скорости вращения, т.е. при возникновении *ускорения* ($d\omega/dt > 0$), динамический момент M_j препятствует этому нарастанию угловой скорости [знак плюс в уравнении (1.6)] и он, суммируясь со статическим моментом сопротивления M_c , направлен против вращающего момента двигателя M .

При *убывании* угловой скорости вращения, т.е. при *замедлении* ($d\omega/dt < 0$), динамический момент препятствует этому убыванию скорости [знак минус в уравнении (1.6)] и, вычитаясь из статического момента M_c , он уменьшает противодействие вращающему моменту двигателя M . Эти действия динамического момента иллю-

стрируются *совместной характеристикой* двигателя и рабочего механизма (см. рис. 1.3, график DF), построенной по основному уравнению движения электропривода $\pm M_j = M - M_c$.

Механическая характеристика двигателя (график CK) построена в первом квадранте осей координат, а механическая характеристика рабочего механизма (график DE) — во втором квадранте, поскольку статический момент сопротивления имеет отрицательные значения. Допустим двигатель работал с угловой скоростью ω , в режиме точки B , т. е. в установившемся режиме. Затем произошло *увеличение* угловой скорости вращения до значения ω' , т. е. режим работы электропривода сместился в точку B' . В этих условиях возникнет динамический момент M'_j , направленный согласно со статическим моментом сопротивления M_c , и уравнение движения электропривода примет вид:

$$-M'_j = M'_c - M'.$$

При этом динамический момент препятствует нарастанию угловой скорости вращения.

Если же произошло *уменьшение* угловой скорости вращения до значения ω'' (точка B''), то возникший динамический момент M''_j направлен против статического момента M_c , т. е. согласно с вращающим моментом двигателя M ,

$$M''_j = M'' - M'_c,$$

а следовательно, он будет препятствовать уменьшению угловой скорости вращения.

Таким образом, часть DA совместной характеристики, расположенная во втором квадранте, соответствует нарастанию скорости относительно установившегося режима (точка B), а часть AF совместной характеристики, расположенная в первом квадранте, соответствует убыванию скорости. Нетрудно заметить, что именно при таком наклоне совместной характеристики относительно осей координат, когда нарастанию скорости соответствуют отрицательные значения динамического момента M_j , а убыванию скорости — положительные значения M_j , электропривод работает устойчиво. Анализируя изложенное, можно сделать вывод, что динамический момент, возникающий при переходном процессе электропривода, препятствуя изменениям скорости движения, оказывает на механическую систему электропривода замедляющее (демпфирующее) действие. Это действие усиливается с увеличением момента инерции движущихся частей электропривода.

Построение совместной характеристики приводного двигателя и рабочей машины необходимо при решении вопроса о возможности их устойчивой совместной работы. При проектировании электропривода механическая характеристика рабочей машины явля-

ется заданной. Поэтому двигатель, выбранный для этого электропривода, должен обладать механической характеристикой, допускающей его устойчивую совместную работу с данной рабочей машиной.

1.3. Приведение статических моментов сопротивления и моментов инерции к частоте вращения вала двигателя

Механическая мощность P , передаваемая валом, вращающимся с угловой скоростью ω , пропорциональна моменту M на этом валу,

$$P = M\omega, \quad (1.7)$$

откуда момент на валу

$$M = P/\omega. \quad (1.8)$$

Следовательно, если редуктор понижает угловую скорость вращения от $\omega_{\text{вх}}$ на входном валу до $\omega_{\text{вых}}$ на его выходном валу при передаточном отношении

$$i_{\text{ред}} = \omega_{\text{вх}}/\omega_{\text{вых}},$$

то приблизительно во столько же раз увеличивается момент на выходном валу этого редуктора по сравнению со значением момента на его входном валу, т. е. на валу двигателя. Некоторое уменьшение момента обусловлено действием сил трения.

Таким образом, при передаче вращающего момента от приводного двигателя к исполнительному органу рабочей машины через передаточное устройство (редуктор) изменяются угловая скорость вращения и, соответственно, величина вращающего момента: с ростом угловой скорости ω момент M уменьшается, и наоборот.

Для упрощения расчетов электропривода принято все статические моменты сопротивления и моменты инерции различных элементов электропривода, имеющих разные угловые скорости вращения, приводить к одной угловой скорости. Обычно приведение делают к скорости вращения вала приводного двигателя $\omega_{\text{д}}$. Таким образом, после операции приведения реальный электропривод, элементы которого вращаются с разными угловыми скоростями, условно заменяется упрощенной системой, в которой все вращающиеся массы сосредоточены на валу двигателя, т. е. вращаются с угловой скоростью вала двигателя $\omega_{\text{д}}$.

Если редуктор понижает угловую скорость вращения двигателя в i раз, то приблизительно во столько же раз увеличивается момент на выходном валу этого редуктора. С учетом КПД редуктора $\eta_{\text{р}}$ получим выражение статического момента сопротивления, приведенного к частоте вращения вала двигателя, $N \cdot \text{м}$,

$$M_c = M'_{c.p.}/(\eta_p i_p), \quad (1.9)$$

где $M'_{c.p.}$ — статический момент сопротивления на выходном валу передающего устройства (редуктора), вращающегося с угловой скоростью ω_p ; i_p — передаточное отношение редуктора, равное отношению угловой скорости вращения вала приводного двигателя ω_d к угловой скорости вращения выходного вала редуктора $\omega_{\text{вых.р.}}$, т. е.

$$i_p = \omega_d/\omega_{\text{вых.р.}}$$

В общем случае, при наличии N передач между валом двигателя и валом исполнительного органа рабочего механизма эквивалентный КПД всех передач равен произведению

$$\eta_s = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_N, \quad (1.10)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N$ — КПД механических передач.

Аналогично, эквивалентное передаточное отношение между валом двигателя и валом исполнительного органа рабочей машины при наличии N механических передач:

$$i_s = i_1 i_2 \dots i_N. \quad (1.11)$$

С учетом выражений эквивалентных значений КПД и передаточного отношения приведенное значение статического момента сопротивления

$$M_c = M'_c/(\eta_s i_s). \quad (1.12)$$

Момент инерции всех вращающихся частей системы электропривода, приведенный к угловой скорости вращения приводного двигателя, определяется суммой моментов инерции

$$J = J_d + J_{p.m.}, \quad (1.13)$$

где J_d — момент инерции ротора (якоря) двигателя и других элементов, расположенных на его валу, например, соединительной муфты; $J_{p.m.}$ — момент инерции всех элементов рабочей машины, приведенный к угловой скорости вращения двигателя ω_d :

$$J_{p.m.} = \frac{J'_1}{i_1^2} + \frac{J'_2}{i_1^2 i_2^2} + \dots + \frac{J'_N}{i_1^2 i_2^2 \dots i_N^2}, \quad (1.14)$$

где J'_1, J'_2, \dots, J'_N — моменты инерции движущихся элементов рабочей машины, не приведенные к угловой скорости вращения вала двигателя ω_d ; i_1, i_2, \dots, i_N — передаточные отношения механических передач рабочей машины.

Мерой инерции вращающихся тел является также величина GD^2 , называемая *маховым моментом*. Здесь G — вес вращающегося тела, Н; D — диаметр вращения, м. Следовательно, маховый момент

измеряется в $\text{Н} \cdot \text{м}^2$. Соотношение между моментом инерции ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$) и маховым моментом ($\text{Н} \cdot \text{м}^2$)

$$J = GD^2 / (4g). \quad (1.15)$$

Необходимо иметь в виду, что в каталогах на электрооборудование и другой технической документации иногда приводятся значения махового момента $(GD^2)_{\text{кат}}$ в устаревших единицах измерения ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$). В этом случае соотношение между моментом инерции ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$) и маховым моментом ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$)

$$J = (GD^2)_{\text{кат}} / 4. \quad (1.16)$$

Так как маховый момент пропорционален моменту инерции J , то по аналогии с (1.13) и (1.14) запишем выражение махового момента, приведенного к угловой скорости вращения вала двигателя ω_d :

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_{\text{р.м}}^2, \quad (1.17)$$

где GD_d^2 — маховый момент якоря (ротора) двигателя и соединительной муфты, $\text{Н} \cdot \text{м}^2$; $GD_{\text{р.м}}^2$ — маховый момент всех элементов рабочей машины, приведенный к угловой скорости вращения вала двигателя:

$$GD_{\text{р.м}}^2 = \frac{(GD_1^2)'}{i_1^2} + \frac{(GD_2^2)'}{i_1^2 i_2^2} + \dots + \frac{(GD_N^2)'}{i_1^2 i_2^2 \dots i_N^2}, \quad (1.18)$$

где $(GD_1^2)'$, $(GD_2^2)'$, ..., $(GD_N^2)'$ — значения маховых моментов вращающихся элементов рабочего механизма, не приведенные к угловой скорости вращения вала двигателя.

При поступательном движении исполнительного органа рабочей машины, например, как это имеет место в подъемном устройстве с вращающимся барабаном (лебедке) и подвешенным грузом G массой m (см. рис. В.2, з), статический момент при *подъеме* груза на вращающемся барабане, приведенный к угловой скорости вращения двигателя ω_d ,

$$M_{\text{с.п}} = \frac{gmv_{\text{п}}}{\omega_d \eta_p \eta_6} = \frac{9,55gmv_{\text{п}}}{n_d \eta_p \eta_6}, \quad (1.19)$$

где m — масса поступательно движущихся элементов рабочего органа (груза, троса, крюка) кг; $v_{\text{п}}$ — скорость поступательного движения груза при подъеме, м/с; η_p — КПД редуктора; η_6 — КПД барабана, обусловленный трением троса о барабан, обычно $\eta_6 = 0,97$.

Если же постепенно уменьшать вращающий момент двигателя, например, понижая подводимое к нему напряжение, то при некотором значении этого напряжения, под действием силы тяжести подвешенного груза начнется его *опускание* со скоростью v_0 (при

этом преодолеваются силы трения механизма и вращающий момент двигателя). Момент двигателя в этих условиях становится тормозным, т.е. направленным на подъем груза, и величина тормозного момента на барабане, приведенная к угловой скорости вращения двигателя,

$$M_{с.о} = \frac{gmv_0 \eta_p \eta_6}{\omega_d} = \frac{9,55gmv_0 \eta_p \eta_6}{n_d}. \quad (1.20)$$

Сравнивая выражения статических моментов при подъеме груза и при его опускании, видим, что момент при опускании груза меньше, чем при подъеме, в $(\eta_p \eta_6)^2$ раз, т.е. $M_{с.о} = M_{с.п} (\eta_p \eta_6)^2$.

Момент инерции движущегося поступательно груза массой m (кг) при его *подъеме* с линейной скоростью v_n (м/с), приведенный к вращающемуся валу двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_{\text{пост}} = \frac{mv_n^2}{\omega_d^2 \eta_p \eta_6} = \frac{91,2mv_n^2}{n_d^2 \eta_p \eta_6}. \quad (1.21)$$

В случае махового момента для поступательно движущегося поднимаемого груза приведенное значение махового момента, $\text{Н} \cdot \text{м}^2$,

$$GD_{\text{пост}}^2 = 4gJ_{\text{пост}} = 39,2J_{\text{пост}} = \frac{4gmv_n^2}{\omega_d^2 \eta_p \eta_6} = \frac{365gmv_n^2}{n_d^2 \eta_p \eta_6}. \quad (1.22)$$

Для расчета приведенного значения момента инерции всей системы электропривода, содержащей вращающиеся и движущиеся поступательно элементы, следует выражение (1.21) ввести в (1.14) в качестве еще одного слагаемого. Если же требуется определить приведенное значение махового момента всей системы электропривода, необходимо выражение (1.22) ввести в (1.18) в качестве еще одного слагаемого.

Из полученных выражений видим, что *уменьшение* момента инерции (махового момента) какого-либо движущегося элемента электропривода после приведения к угловой скорости вращения двигателя ω_d тем значительнее, чем меньше угловая скорость вращения ω этого элемента, т.е. чем больше передаточное отношение ($i = \omega_d/\omega$).

В практических расчетах иногда возникает необходимость в пересчете статического момента нагрузки M_c с одного вала на другой, вращающийся с другой угловой скоростью. Например, если на вал 1, вращающийся с угловой скоростью ω_1 , действует статический момент M_{c1} , то статический момент M_{c2} на валу 2, вращающийся с угловой скоростью ω_2 , равен, $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_{c2} = M_{c1}(\omega_1/\omega_2) = M_{c1}(\eta_1/\eta_2). \quad (1.23)$$

Если же на тело, движущееся поступательно со скоростью v , действует сила F , то она создаст на валу, вращающемся с угловой скоростью ω , момент, Н·м,

$$M = Fv/\omega, \quad (1.24)$$

или, переходя к частоте вращения (об/мин), получим, Н·м,

$$M = 9,55 Fv/n. \quad (1.25)$$

Если сила F создается подвешенным на тросе грузом массой m (кг), то она равна, Н,

$$F = gm.$$

Анализ практических расчетов показывает, что моменты инерции (маховые моменты) элементов системы, расположенные после приводного двигателя и соединительной муфты, в сумме составляют от 10 до 30 % момента инерции двигателя. Поэтому при приближенных расчетах моментов инерции и маховых моментов всей системы электропривода можно воспользоваться выражениями

$$J \approx (1,1 + 1,3)J_d \text{ или } GD^2 \approx (1,1 + 1,3)GD_d^2. \quad (1.26)$$

Если к валу приложен статический момент нагрузки M_c , то для вращения вала с угловой скоростью ω необходима мощность, Вт,

$$P = M_c \omega = 0,105 M_c n. \quad (1.27)$$

Если груз G под действием силы F поднимается со скоростью v , то при этом затрачивается мощность, Вт,

$$P = Fv. \quad (1.28)$$

Пример 1.1. Определить приведенные значения статического нагрузочного момента, махового момента и момента инерции для привода подъемного механизма (рис. 1.4) при подъеме и опускании груза G массой $m = 300$ кг. Параметры механизма: частота вращения вала двигателя $n_d = 600$ об/мин;

маховый момент якоря двигателя и деталей на его валу $GD_d^2 = 31,4$ Н·м²; КПД передачи $\eta_{пер} = \eta_p \eta_6 = 0,85$; диаметр зубчатого колеса на оси барабана $D_k = 300$ мм, его масса $m_k = 7$ кг; диаметр барабана $D_6 = 130$ мм, его масса 20 кг; частота вращения барабана $n_6 = 100$ об/мин.

Решение. 1. Передаточное отношение частот вращения двигателя и барабана

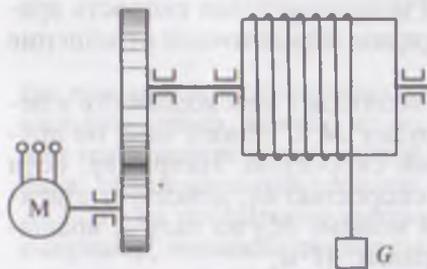


Рис. 1.4. К примеру 1.1

$$i_1 = n_d/n_6 = 600/100 = 6.$$

2. Маховый момент зубчатого колеса на оси барабана

$$(GD_1') = g_k m_k D_k^2 = 9,81 \cdot 7 \cdot 0,3^2 = 6,18 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

3. Маховый момент барабана

$$(GD_6^2)' = g m_6 GD_6^2 = 9,81 \cdot 20 \cdot 0,13^2 = 3,32 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

4. Сумма маховых моментов на оси барабана

$$(\sum GD^2)' = (GD_k^2)' + (GD_6^2)' = 6,18 + 3,32 = 9,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

5. Приведенные значения махового момента на оси барабана

$$\sum GD_6^2 = (\sum GD^2)' / i_1 = 9,5 / 6 = 1,58 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

6. Линейная скорость подъема груза G при частоте вращения барабана 100 об/мин:

$$v_n = \pi D_6 n_6 / 60 = 3,14 \cdot 0,13 \cdot 100 / 60 = 0,68 \text{ м/с}.$$

7. Приведенный маховый момент поступательно движущегося груза при его подъеме (1.22)

$$GD_{\text{пост}}^2 = \frac{4 g m v_n^2}{\omega_d^2 \eta_p \eta_6} = \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68^2}{63^2 \cdot 0,85} = 1,61 \text{ Н} \cdot \text{м}^2,$$

где

$$\omega_d = 0,105 n_d = 0,105 \cdot 600 = 63 \text{ рад/с}.$$

8. Маховый момент электропривода

$$GD^2 = GD_A^2 + \sum GD_6^2 + GD_{\text{пост}}^2 = 31,4 + 1,58 + 1,61 = 34,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

9. Момент инерции электропривода

$$J = (GD^2) / (4g) = 34,6 / (4 \cdot 9,81) = 0,88 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

10. Приведенное значение статического нагрузочного момента двигателя при подъеме груза (1.19)

$$M_{с.н} = \frac{9,55 g m v_n}{n_d \eta_{пер}} = \frac{9,55 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68}{600 \cdot 0,85} = 37,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

11. Приведенное значение статического момента двигателя при опускании груза со скоростью его подъема $v_o = v_n = 0,68 \text{ м/с}$ (1.20)

$$M_{с.о} = \frac{9,55 g m v_o \eta_{пер}}{n_d} = \frac{9,55 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68 \cdot 0,85}{600} = 27 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем достоинства электропривода по сравнению с другими видами приводов?

2. Перечислите основные элементы электропривода и объясните их назначение.

3. В каких случаях применяют многодвигательный электропривод?

4. Что такое статический момент сопротивления?
5. Какова разница между реактивным и активным статическими моментами сопротивления?
6. Напишите уравнение движения электропривода и объясните его физический смысл.
7. При каких условиях в электроприводе наступает переходный режим?
8. Как построить совместную характеристику электродвигателя и рабочего механизма?
9. Каково действие динамического момента при ускорении и замедлении вращения электропривода?
10. С какой целью статические моменты и моменты инерции приводят к одной частоте вращения?
11. Что такое маховый момент и какие свойства электропривода он характеризует?



ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Основные понятия

Двигатель постоянного тока представляет собой коллекторную электрическую машину, преобразующую электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию. Отличительным признаком этих двигателей является наличие у них *щеточно-коллекторного узла*, выполняющего функцию механического преобразователя постоянного тока питающей сети в переменный ток обмотки якоря.

В двигателях постоянного тока применяется электромагнитное и магнитоэлектрическое виды возбуждения. Двигатели с электромагнитным возбуждением в зависимости от схемы присоединения обмотки возбуждения разделяются на двигатели независимого (параллельного), последовательного и смешанного способов возбуждения. Двигатели постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока обладают хорошими пусковыми и регулировочными свойствами. Двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением не имеют обмотки возбуждения, и основной магнитный поток в них создается постоянными магнитами. Обычно это двигатели небольшой мощности.

Коллекторные двигатели постоянного тока по сравнению с асинхронными и синхронными двигателями имеют недостатки, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла. Основными из них являются пониженная надежность, высокая стоимость, необходимость обслуживания в процессе эксплуатации, невозможность эксплуатации в пожаро- и взрывоопасных зонах, радиопомехи. Перечисленные недостатки ограничивают применение двигателей постоянного тока. Однако двигатели постоянного тока имеют достоинства: хорошие регулировочные свойства и возможность получения большого пускового момента и частоты вращения более 3000 об/мин (при частоте тока в сети 50 Гц). Но несмотря на перечисленные достоинства, применение двигателей постоянного тока систематически сокращается, что объясняется нарастающей тенденцией применения в регулируемых электроприводах более дешевых и надежных короткозамкнутых трехфазных асинхронных двигателей в комплекте с регулируемым преобразователем частоты переменного тока.

Свойства электрических двигателей оцениваются характеристиками, представляющими собой графически выраженные зави-

симости параметров. Основными характеристиками двигателя, переменного в электроприводе, являются:

механические характеристики, представляющие собой зависимость частоты вращения n или угловой скорости ω от электромагнитного момента двигателя: $n = f(M)$ или $\omega = f(M)$ при неизменных значениях других параметров, способных влиять на частоту вращения и величину момента двигателя (напряжения питания, величины тока в обмотке возбуждения и т.п.); примерный вид механических характеристик двигателей, имеющих наибольшее применение в электроприводе, представлен на рис. 1.1;

электромеханические характеристики — зависимость частоты вращения от тока в обмотке якоря;

регулируемые характеристики — зависимость частоты вращения двигателя от какого-либо параметра, влияющего на частоту вращения (напряжения питания, величины тока в обмотке возбуждения, частоты переменного тока и т.д.);

энергетические характеристики, устанавливающие связь между частотой вращения и каким-либо энергетическим показателем двигателя — коэффициентом полезного действия (КПД), коэффициентом мощности и т.п.

Устойчивая работа электропривода, т.е. его работа при неизменных значениях частоты вращения и электромагнитного момента, происходит в *установившемся* режиме работы. Этому режиму соответствует точка на механической характеристике, в которой имеет место равенство между вращающим моментом двигателя и статическим моментом сопротивления рабочего механизма. Для определения координат точки установившегося режима следует воспользоваться механическими характеристиками электропривода и рабочего механизма, построив их в одних осях координат, но в разных квадрантах, как это было сделано на рис. 1.3. Однако можно упростить эти построения, изобразив в первом квадранте обе характеристики. Точнее, вместо механической характеристики статического момента сопротивления рабочей машины $n = f(-M_c)$ в первом квадранте осей координат строят зеркальное изображение характеристики $n = f(M_c)$. Точка пересечения этой механической характеристики с механической характеристикой электропривода (точка *B*) с координатами n_y и M_y и будет точкой установившегося режима (рис. 2.1, *a*).

При оценке характеристик употребляют понятие *жесткость характеристики*. Количественно жесткость определяется отношением разности моментов $\Delta M = M_2 - M_1$ (рис. 2.1, *б*), развиваемых двигателем, к соответствующей разности частот вращения $\Delta n = n_1 - n_2$,

$$\beta = \Delta M / \Delta n.$$

Для прямолинейной механической характеристики ее жесткость определяется тангенсом угла α наклона этой характеристики к оси ординат $\beta = \operatorname{tg} \alpha$. Если же механическая характеристика криволи-

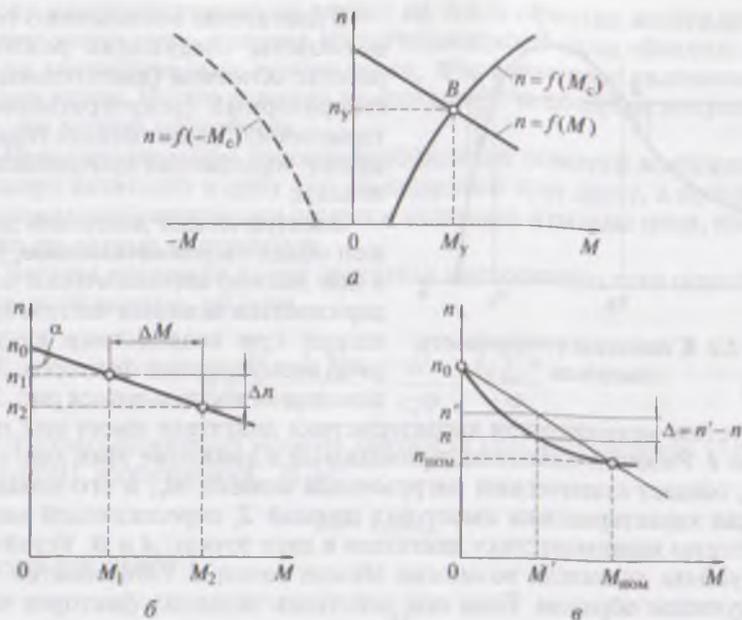


Рис. 2.1. К понятиям об установившемся режиме электропривода (а), жесткости характеристик (б) и нелинейности (в) механических характеристик

нейна, то ее жесткость β определяют в рабочей точке как тангенс угла α наклона касательной, проведенной в этой точке характеристике, к оси ординат. Чем больше угол α , тем жестче характеристика; при $\alpha = 90^\circ$ механическая характеристика расположена параллельно оси абсцисс и является *абсолютно жесткой* (см. рис. 1.1, график 1).

Другим показателем механической характеристики электропривода является ее *нелинейность*, определяющая степень отклонения реальной характеристики от прямой линии, проведенной через заданные точки на характеристике, например точку частоты вращения в режиме холостого хода n_0 и точку, соответствующую режиму номинальной нагрузки (рис. 2.1, в). Нелинейность характеристики δ равна отношению наибольшей разности между действительным значением частоты вращения n и ее значением, если бы механическая характеристика была прямой линией n' к действительной частоте вращения:

$$\delta = (\Delta/n),$$

где

$$\Delta = n' - n.$$

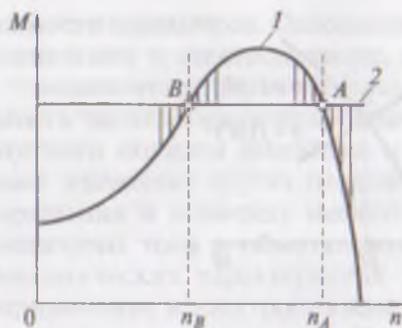


Рис. 2.2. К понятию устойчивости двигателя

Допустим механическая характеристика двигателя имеет вид графика *1*. Рабочий механизм, приводимый в движение этим двигателем, создает статический нагрузочный момент M_c , и его механическая характеристика имеет вид прямой *2*, пересекающей механическую характеристику двигателя в двух точках: *A* и *B*. Устойчивая работа двигателя возможна вблизи точки *A*. Объясняется это следующим образом. Если под действием внешних факторов частота вращения двигателя начнет *уменьшаться*, то произойдет увеличение вращающего момента двигателя. Возникший при этом избыточный момент вызовет увеличение частоты вращения до прежнего значения, и режим работы, соответствующий точке *A*, будет восстановлен. Если же под влиянием внешних факторов частота вращения двигателя начнет *увеличиваться*, то вращающий момент двигателя начнет убывать, что вызовет снижение частоты вращения двигателя, пока процесс не вернется в точку *A* и прежняя частота вращения не восстановится.

В окрестностях точки *B* двигатель не обладает устойчивостью, так как в этой точке уменьшение частоты вращения сопровождается уменьшением вращающего момента двигателя, в итоге частота вращения будет продолжать снижаться вплоть до остановки ротора. При увеличении частоты вращения момент двигателя также возрастает, что ведет к дальнейшему росту частоты вращения и т. д.

2.2. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Отличительным признаком двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения, существенно влияющим на их свойства, является независимость цепи обмотки возбуждения от цепи якоря. По этой причине изменение тока в обмотке

якоря непосредственно не влияет на ток в обмотке возбуждения. Имеет место лишь влияние магнитодвижущей силы обмотки якоря на магнитное поле возбуждения, обусловленное явлением реакции якоря. Но это влияние невелико и, с некоторым допущением, им можно пренебречь.

При параллельном способе возбуждения обмотки возбуждения и якоря включают в одну сеть параллельно друг другу, а при независимом возбуждении эти обмотки включают в разные цепи, иногда даже на разные напряжения.

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока определяется выражением, об/мин,

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{c_e \Phi} \quad (2.1)$$

Электромагнитный момент двигателя при независимом (параллельном) возбуждении, Н·м,

$$M = c_m \Phi I_a \quad (2.2)$$

откуда ток якоря I_a :

$$I_a = \frac{M}{c_m \Phi} \quad (2.3)$$

Подставив в (2.1) выражение тока якоря I_a по (2.3), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\sum r + r_{\text{доб}})}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (2.4)$$

где c_e и c_m — коэффициенты, постоянные для данного двигателя:

$$c_e = pN/(60a); \quad c_m = pN/(2\pi a) = 9,55c_e, \quad (2.5)$$

p — число пар полюсов двигателя; N — число активных проводников в обмотке якоря; a — число пар параллельных ветвей в обмотке якоря; $r_{\text{доб}}$ — сопротивление резистора (рис. 2.3) в цепи обмотки якоря, Ом; $\sum r$ — сумма сопротивлений элементов, включенных в цепь обмотки якоря: собственно обмотки якоря, щеток, обмотки добавочных полюсов, компенсационной обмотки (если она имеется), Ом.

Первое слагаемое уравнения механической характеристики (2.4) n_0 , равное

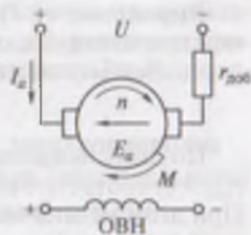


Рис. 2.3. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

$$n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}, \quad (2.6)$$

представляет собой *пограничную частоту вращения* (частоту вращения идеального холостого хода). Второе слагаемое уравнения (2.4) Δn — это *перепад частоты вращения* двигателя, вызванный изменением нагрузки двигателя, т.е. изменением электромагнитного момента на его валу:

$$\Delta n = \frac{M(\sum r + r_{\text{доб}})}{c_e c_m \Phi^2}. \quad (2.7)$$

При рассмотрении характеристик двигателей постоянного тока принято считать, что магнитный поток возбуждения не зависит от реакции якоря, хотя известно, что реакция якоря оказывает на магнитную систему электрической машины размагничивающее действие. Поэтому пренебрежение действием реакции якоря вносит некоторую погрешность в рассматриваемые зависимости, в том числе в зависимость $n = f(M)$. Другим допущением является подмена в некоторых случаях момента на валу M_2 , величина которого определяется полезной мощностью двигателя P_2 , электромагнитным моментом M , определяемым электромагнитной мощностью $P_{\text{эм}}$. Эти мощности различаются за счет механических потерь двигателя. Принято считать, что погрешности, обусловленные этими двумя допущениями, не выходят за пределы принятых в технических расчетах. В то же время они упрощают рассмотрение и анализ многих понятий и положений курса «Электрический привод». Например, при рассмотрении механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения указанные допущения позволяют представлять эти характеристики *прямолинейными*, что упрощает их расчет, построение и анализ.

Таким образом, как это следует из (2.4), механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения имеют вид прямых линий, пересекающих ось ординат в точке n_0 (рис. 2.4).

Выражение (2.7) показывает, что изменение частоты вращения двигателя Δn , обусловленное изменением его нагрузки, пропорционально сопротивлению цепи якоря

$$R = \sum r + r_{\text{доб}}.$$

Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря $R = \sum r$, когда $r_{\text{доб}} = 0$, соответствует наименьший перепад частоты вращения Δn_c . При этом механическая характеристика становится наиболее жесткой (график 1).

При введении в цепь якоря внешнего резистора сопротивлением $r_{\text{доб}}$ влияние нагрузки на перепад частоты вращения увеличивается и достигает значения $\Delta n_{\text{н}}$. При этом характеристики становятся менее

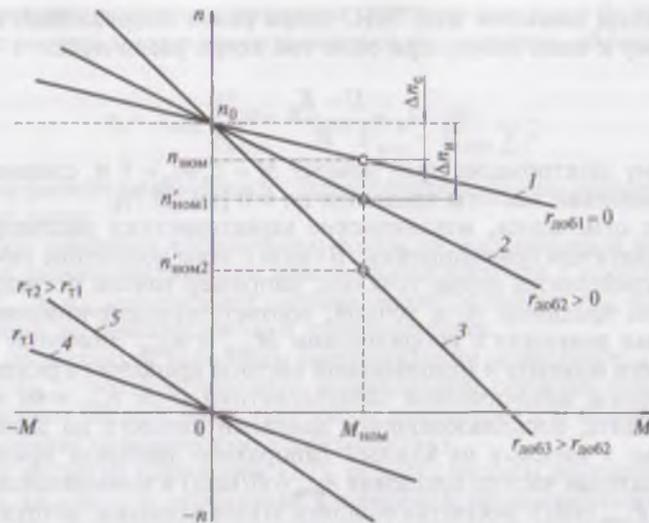


Рис. 2.4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в основном (двигательном) (1, 2, 3) и тормозном (4, 5) режимах

жесткими и угол их наклона к оси ординат уменьшается (графики 2 и 3). Таким образом, жесткость механических характеристик рассматриваемых двигателей можно регулировать изменением сопротивления резистора $r_{доб}$, включенного последовательно в цепь якоря.

Механические характеристики двигателя, полученные при номинальных значениях напряжения на обмотках якоря и возбуждения и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря, называют *естественными* (график 1). Если же хотя бы один из перечисленных параметров двигателя изменен (напряжение на обмотках якоря или возбуждения отличаются от номинальных значений, или же изменено сопротивление в цепи якоря), то механические характеристики называются *искусственными*. Искусственные механические характеристики, полученные введением в цепь якоря добавочного сопротивления $r_{доб}$, называют также *реостатными* (графики 2 и 3).

2.3. Расчет механических характеристик электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в основном (двигательном) режиме

Все механические характеристики рассматриваемого двигателя независимо от их жесткости пересекаются на оси ординат в точке пограничной частоты вращения ω_0 . Объясняется это тем, что при

идеальном холостом ходе ЭДС якоря равна напряжению, подведенному к цепи якоря, при этом ток якоря равен нулю:

$$I_a = \frac{U - E_a}{R} = 0,$$

поэтому электромагнитный момент $M = c_m \Phi I_a = 0$ и, следовательно, изменение частоты вращения $\Delta n = 0$ [см. (2.7)].

Как отмечалось, механические характеристики рассматриваемого двигателя прямолинейны. В связи с этим положение любой из них определяется двумя точками, например точкой пограничной частоты вращения n_0 и точкой, соответствующей номинальной нагрузке двигателя с координатами $M_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$. Значения номинального момента и номинальной частоты вращения в режиме естественной механической характеристики (при $r_{\text{доб}} = 0$) можно определить, воспользовавшись данными каталога на двигатель. Обычно в каталоге на каждый типоразмер двигателя приведены номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ (об/мин) и номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ (кВт). Воспользовавшись этими данными, нетрудно определить номинальный момент, Н·м,

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}. \quad (2.8)$$

Благодаря прямолинейности механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения нетрудно установить зависимость между частотой вращения, ЭДС и сопротивлением цепи якоря. Как отмечалось, при пограничной частоте вращения n_0 ЭДС якоря E_{a0} равна напряжению питающей сети U , т. е. пограничная частота вращения n_0 пропорциональна напряжению сети U . Тогда номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ эквивалентна ЭДС при номинальной нагрузке

$$E_{a\text{ном}} = U - I_{a\text{ном}} \sum r.$$

Если же в цепь якоря последовательно включен добавочный резистор сопротивлением $r_{\text{доб}}$, то ЭДС при номинальной нагрузке

$$E'_{a\text{ном}} \equiv U - I_{a\text{ном}} (\sum r + r_{\text{доб}}).$$

Таким образом, для рассматриваемого двигателя можно записать уравнение

$$\frac{n_0}{n'_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ном}}}{E'_{a\text{ном}}},$$

откуда частота вращения якоря двигателя при номинальной нагрузке в режиме естественной ($r_{\text{доб}} = 0$) или искусственной ($r_{\text{доб}} > 0$) механических характеристик, об/мин,

$$n'_{\text{ном}} = (n_0 / U_{\text{ном}}) [U_{\text{ном}} - I_{a\text{ном}} (\sum r + r_{\text{доб}})]. \quad (2.9)$$

Пограничная частота вращения соответствует $r_{\text{доб}} = 0$, поэтому для ее расчета можно воспользоваться выражением, об/мин,

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{а ном}}} = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{а ном}} \sum r}. \quad (2.10)$$

При расчете механических характеристик обычно решают одну из двух задач:

1) по заданным координатам точки на *искусственной* механической характеристике при номинальной нагрузке с координатами $M_{\text{ном}}$ и $n'_{\text{ном}}$ определяют сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, соответствующее этой искусственной характеристике;

2) по заданным значениям сопротивления резистора $r_{\text{доб}}$ и тока якоря $I_{\text{а ном}}$, соответствующего номинальной нагрузке двигателя, определяют частоту вращения якоря двигателя (2.9) и строят *искусственную* механическую характеристику.

Как видно из выражения (2.7), перепад частоты вращения двигателя $\Delta n = n_0 - n$, вызванный изменением его нагрузочного момента M_c , пропорционален сопротивлению цепи якоря двигателя $(\sum r + r_{\text{доб}})$. Исходя из этого, при заданном статическом моменте нагрузки отношение перепада частоты вращения, вызванного этой нагрузкой на вал двигателя, к соответствующему сопротивлению цепи якоря данного двигателя является величиной постоянной:

$$\frac{\Delta n_c}{\sum r} = \frac{\Delta n_{n1}}{\sum r + r_{\text{доб1}}} = \dots = \frac{\Delta n_{nN}}{\sum r + r_{\text{добN}}} = \text{const}. \quad (2.11)$$

Решая это уравнение относительно $r_{\text{доб}}$, получим формулу для расчета сопротивления резистора $r_{\text{доб}}$, который следует включить в цепь якоря для получения требуемой искусственной механической характеристики, т.е. заданного значения перепада частоты вращения Δn_i в режиме искусственной механической характеристики:

$$r_{\text{доб}} = \sum r [(\Delta n_i / \Delta n_c) - 1], \quad (2.12)$$

где $\Delta n_i = (n_0 - n'_{\text{ном}})$ — перепад частоты вращения в режиме искусственной механической характеристики; $\Delta n_c = (n_0 - n_{\text{ном}})$ — перепад частоты вращения в режиме естественной механической характеристики.

Введем понятие *номинального сопротивления двигателя*, представляющего собой сопротивление $R_{\text{ном}}$, каким должна обладать цепь якоря двигателя, чтобы при подведенном к *неподвижному* якорю напряжению $U_{\text{ном}}$ ток в цепи якоря был бы номинальным $I_{\text{а ном}}$:

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{а ном}}. \quad (2.13)$$

В действительности сопротивление цепи якоря намного меньше $R_{\text{ном}}$. Объясняется это тем, что при вращающемся якоре двигателя ток в его цепи ограничивается не только электрическим сопротивлением обмоток, но и ЭДС якоря E_a , которая в двигательном режиме машины постоянного тока является противо-ЭДС, т.е. направлена навстречу приложенному к цепи якоря напряжению.

Обычно в каталоге на выбранный тип двигателя постоянного тока указываются следующие номинальные данные: напряжение $U_{\text{ном}}$ (В), полезная мощность $P_{\text{ном}}$ (кВт), частота вращения $n_{\text{ном}}$ (об/мин), ток в цепи якоря $I_{a \text{ ном}}$ (А), КПД $\eta_{\text{ном}}$ (%), напряжение на обмотке возбуждения U_b (В), сопротивление обмоток в цепи якоря $\sum r$ и обмоток возбуждения r_b (Ом), маховый момент GD^2 ($\text{Н} \cdot \text{м}^2$) или момент инерции якоря J ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$).

Электрическое сопротивление обмоток двигателей, приводимых в каталогах, обычно соответствует температуре $+20^\circ\text{C}$. Но при расчетах характеристик и параметров двигателей сопротивления их обмоток необходимо приводить к рабочей температуре. В соответствии с действующим стандартом величина рабочей температуры принимается в зависимости от класса нагревостойкости электрической изоляции, примененной в двигателе, и составляет: при классе нагревостойкости В — 75°C , а при классах нагревостойкости F и H — 115°C . Пересчет сопротивлений обмоток на рабочую температуру выполняется путем умножения сопротивления обмотки при температуре 20°C на коэффициент нагрева K_r :

$$\sum r = \sum r_{20} K_r$$

Значения этого коэффициента приведены в табл. 2.1 в зависимости от назначения двигателей и их габаритов (высоты оси вращения).

Если сопротивление обмоток в цепи якоря в каталоге не указано, то их приведенное к рабочей температуре значение с некоторым приближением определяют по формулам, Ом:

Таблица 2.1

Значения коэффициента K_r

Тип двигателя	Высота оси вращения h , мм	K_r
Постоянного тока общего назначения	80—200	1,22
	225—500	1,38
Асинхронные общего назначения	50—132	1,22
	160—355	1,38
Специального назначения, с тяжелыми условиями эксплуатации (двигатели крановых и металлургических серий)	—	1,38

для двигателей независимого (параллельного) возбуждения

$$\sum r \approx 0,5R_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}}); \quad (2.14)$$

для двигателей последовательного возбуждения (см. 2.5)

$$\sum r \approx 0,75R_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}}). \quad (2.14a)$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети в номинальном режиме, Вт,

$$P_{\text{Iном}} = U_{\text{ном}}I_{\text{аном}}. \quad (2.15)$$

Откуда ток якоря в номинальном режиме, А,

$$I_{\text{аном}} = P_{\text{Iном}}/U_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/(U_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}). \quad (2.16)$$

Подставив в (2.2) $c_M = 9,55c_e$ по (2.5), получим формулу момента двигателя постоянного тока, Н·м,

$$M_{\text{ном}} = 9,55c_e\Phi I_{\text{аном}}. \quad (2.17)$$

Величину $c_e\Phi$ можно получить из выражения ЭДС якоря для номинального режима

$$E_{\text{аном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}}\sum r = c_e\Phi n_{\text{ном}},$$

откуда

$$c_e\Phi = (U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}}\sum r)/n_{\text{ном}}. \quad (2.18)$$

Пример 2.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет номинальные данные: мощность $P_{\text{ном}} = 42$ кВт; напряжение $U_{\text{ном}} = 440$ В; частота вращения $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин; сопротивление цепи обмотки якоря при рабочей температуре $\sum r = 0,17$ Ом; КПД $\eta_{\text{ном}} = 90,5\%$. Требуется определить сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, который следует включить последовательно в цепь якоря, чтобы при номинальном моменте нагрузки $M_{\text{ном}}$ частота вращения была $n'_{\text{ном}} = 0,5 n_{\text{ном}}$.

Решение. 1. Ток якоря в номинальном режиме

$$I_{\text{аном}} = P_{\text{ном}}/(U_{\text{ном}}\eta_{\text{ном}}) = 42\,000/(440 \cdot 0,905) = 105 \text{ А.}$$

2. Пограничная частота вращения (2.10)

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}}\sum r} = 3000 \frac{440}{440 - 105 \cdot 0,17} = 3126 \text{ об/мин.}$$

3. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 42\,000/3000 = 133,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

4. Координаты точки номинального режима на естественной механической характеристике

$$M_{\text{ном}} = 133,7 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/мин.}$$

5. Номинальное сопротивление двигателя (2.13)

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}} = 440/105 = 4,19 \text{ Ом.}$$

6. Сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, соответствующее искусственной характеристике (2.12) с ординатой частоты вращения,

$$n'_{\text{ном}} = 0,5 n_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 3000 = 1500 \text{ об/мин};$$

$$r_{\text{доб}} = \sum r \left[\left(\frac{\Delta n_m}{\Delta n_c} \right) - 1 \right] = 0,17 \left[\frac{3126 - 1500}{3126 - 3000} - 1 \right] = 2,0 \text{ Ом.}$$

7. Механические характеристики электропривода с рассматриваемым двигателем постоянного тока представлены на рис. 2.5 (графики 1 и 2).

Пример 2.2. Рассчитать координаты, необходимые для построения естественной и искусственной механических характеристик двигателя с независимым возбуждением типа ПБС-62, если внешнее сопротивление в цепи якоря $r_{\text{доб}} = 2,40 \text{ Ом}$. Номинальные данные двигателя: мощность $P_{\text{ном}} = 4,7 \text{ кВт}$; напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/мин}$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 87 \%$.

Решение 1. Номинальный ток якоря

$$I_{\text{а ном}} = P_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}) = 4700 / (220 \cdot 0,87) = 24,5 \text{ А.}$$

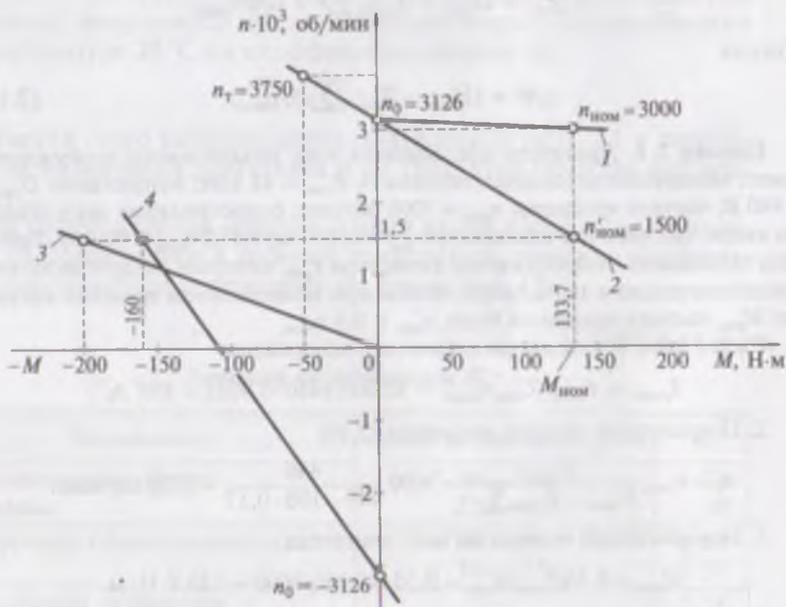


Рис. 2.5. Механические характеристики электропривода с двигателем постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в основном (двигательном) (1, 2) и тормозных (3, 4) режимах

2. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{а ном}} = 220/24,5 = 8,98 \text{ Ом.}$$

3. Сопротивление обмоток в цепи якоря (2.14)

$$\sum r = 0,5 R_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) = 0,5 \cdot 8,98 (1 - 0,87) = 0,58 \text{ Ом.}$$

4. Пограничная частота вращения (2.10)

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{а ном}} \sum r} = 1000 \frac{220}{220 - 24,5 \cdot 0,58} = 1069 \text{ об/мин.}$$

5. Номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 4,7/1000 = 44,9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Частота вращения в режиме искусственной механической характеристики при номинальном моменте нагрузки (2.9)

$$\begin{aligned} n'_{\text{ном}} &= (n_0/U_{\text{ном}}) [U_{\text{ном}} - I_{\text{а ном}} (\sum r + r_{\text{доб}})] = \\ &= (1069/220) [220 - 24,5 (0,58 + 2,40)] = 714 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

7. По координатам $n_0 = 1069$ об/мин, $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин и $M_{\text{ном}} = 44,9$ Н·м строят естественную механическую характеристику, а по координатам $n_0 = 1069$ об/мин, $n'_{\text{ном}} = 714$ об/мин и $M_{\text{ном}} = 44,9$ Н·м — искусственную механическую характеристику.

2.4. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в тормозных режимах

Генераторное (рекуперативное) торможение. Этот режим возможен в двигателях независимого (параллельного) и смешанного возбуждения, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения идеального холостого хода n_0 . Практически это происходит, если под действием внешнего вращающего момента, действующего на вал двигателя, частота вращения n увеличивается до значения, превышающего частоту вращения идеального холостого хода n_0 , т. е. когда $n > n_0$. В этих условиях ЭДС машины $E_a = c_e \Phi n$ увеличивается до значения, превышающего напряжение питающей сети ($E_a > U_{\text{ном}}$), при этом ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент меняют свое направление. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть. Электромагнитный момент M двигателя становится тормозящим, т. е. он противодействует внешнему вращающему моменту (рис. 2.6, а). Этот процесс торможения продолжается до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения n_0 . Для перехода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения не требуется схемных изменений электропривода.

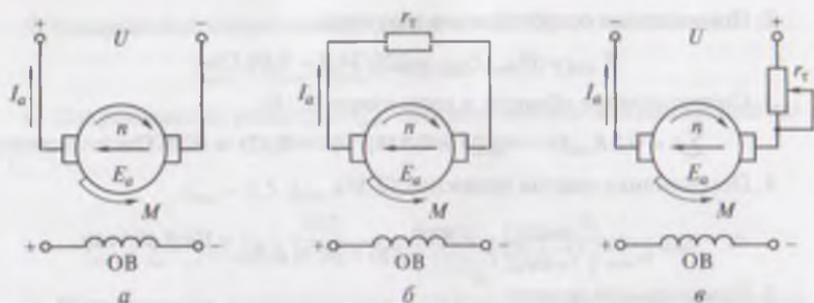


Рис. 2.6. Тормозные режимы двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Генераторное рекуперативное торможение — наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в современном электроприводе. Он целесообразен в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

Механические характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения в режиме генераторного рекуперативного торможения прямолинейны и являются продолжением механических характеристик двигательного режима во второй квадрант осей координат (см. рис. 2.4, графики 1, 2 и 3). Построение этих характеристик не вызывает затруднений. Возможен способ перевода двигателя в режим генераторного рекуперативного торможения и при установившейся частоте вращения якоря. Для этого необходимо увеличить в двигателе магнитный поток возбуждения, т.е. силу тока в обмотке возбуждения. Из выражения (2.10) следует

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{г ном}}} = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{c_e \Phi n_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ном}}}{c_e \Phi}, \quad (2.19)$$

т.е. значение пограничной частоты вращения n_0 обратно пропорционально магнитному потоку возбуждения Φ , а следовательно, силе тока в обмотке возбуждения.

Таким образом, при увеличении силы тока в обмотке возбуждения пограничная частота вращения снижается, в то время как частота вращения якоря за счет сил инерции вращающегося якоря остается практически неизменной. При некотором значении тока возбуждения фактическая частота вращения якоря превышает пограничную частоту вращения ($n > n_0$) и двигатель переходит в ре-

жим генераторного (рекуперативного) торможения. Необходимо иметь в виду, что такое явление наступает при достаточно быстром процессе увеличения тока возбуждения. Если же магнитный поток возбуждения нарастает медленно, а момент инерции вращающихся частей электропривода невелик, то снижение частоты вращения якоря двигателя может произойти и без перехода в рекуперативный режим, т. е. без отдачи энергии в сеть.

Динамическое торможение. Необходимость в таком торможении возникает, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться. Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор r_T , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не поступает обратно в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении

$$R = \sum r + r_T$$

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления, но так как якорь отключен от сети ($U = 0$), то источником тока якоря становится ЭДС E_a , которая в двигательном режиме направлена противоположно напряжению сети. В итоге ток в обмотке якоря при переходе в режим динамического торможения меняет свое направление

$$I_a = (U - E_a)/R = -E_a/R, \quad (2.20)$$

т. е. становится отрицательным. В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет *тормозящим* (рис. 2.6, б). Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения расположены во втором квадранте осей координат ($-M, n$). Они прямолинейны и выходят из начала координат (см. рис. 2.4, графики 4 и 5).

Сопротивление резистора r_T , на который следует замкнуть цепь якоря при динамическом торможении, определяется выражением, Ом,

$$r_T = (E_{aT}/I_{aT}) - \sum r, \quad (2.21)$$

где E_{aT} и I_{aT} — ЭДС и ток якоря в режиме динамического торможения.

Частота вращения в начале торможения n_T определяется частотой вращения в конце двигательного режима. Следовательно, ЭДС якоря в режиме динамического торможения, с учетом (2.2) и (2.5), можно определить по формуле, В,

$$E_{aT} = c_e \Phi n_T = 0,105 c_m \Phi n_T = 0,105 (M_{дв}/I_{a дв}) n_T, \quad (2.22)$$

где $M_{\text{дв}}$ и $I_{\text{а дв}}$ — момент на валу двигателя и ток якоря, соответственно, в конце двигательного режима, т.е. в начале режима динамического торможения.

Ток якоря, соответствующий началу торможения, обычно принимают равным:

$$I_{\text{ат}} = (1,1 + 1,8)I_{\text{аном}}. \quad (2.23)$$

Слишком маленький ток затягивает процесс торможения, делает его малоэффективным, а слишком большой ток может нарушить работу щеточно-коллекторного узла (сильное искрение или даже «круговой огонь» на коллекторе).

Тормозной момент в начале тормозного режима определяется выражением, Н·м,

$$M_{\text{т}} = -M_{\text{ном}}(I_{\text{ат}}/I_{\text{аном}}). \quad (2.24)$$

Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ($n = 0$).

Динамическое торможение может быть использовано в подъемном устройстве при опускании груза. В этом случае частота вращения меняет направление, т.е. становится отрицательной, а характеристики динамического торможения располагаются в четвертом квадранте осей координат ($M; -n$), являясь продолжением характеристик динамического торможения во втором квадранте (см. рис. 2.4, графики 4 и 5). Наклон этих характеристик к оси ординат зависит от сопротивления резистора $r_{\text{т}}$.

Пример 2.3. Определить сопротивление резистора $r_{\text{т}}$ для включения в цепь якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении (см. рис. 2.6, б). Торможение начинается при частоте вращения $n_{\text{т}} = 1500$ об/мин при номинальном моменте на валу двигателя. Технические данные двигателя: $U_{\text{ном}} = 440$ В; $\sum r = 0,17$ Ом; $I_{\text{аном}} = 105$ А; $M_{\text{ном}} = 133,7$ Н·м.

Решение. 1. ЭДС в режиме торможения (2.22)

$$E_{\text{ат}} = 0,105(M_{\text{ном}}/I_{\text{аном}}) n_{\text{т}} = 0,105(133,7/105)1500 = 200 \text{ В.}$$

2. Ток в начале торможения принимаем (2.23)

$$I_{\text{ат}} = 1,5I_{\text{аном}} = 1,5 \cdot 105 = 157,5 \text{ А.}$$

3. Сопротивление резистора (2.21)

$$r_{\text{т}} = (E_{\text{ат}}/I_{\text{ат}}) - \sum r = (200/157,5) - 0,17 = 1,1 \text{ Ом.}$$

4. Тормозящий момент (2.24)

$$M_{\text{т}} = -M_{\text{ном}}(I_{\text{ат}}/I_{\text{аном}}) = -133,7 \cdot 1,5 = -200 \text{ Н·м.}$$

5. Характеристика динамического торможения двигателя представлена на рис. 2.5, график 3.

Торможение противовключением. Допустим двигатель работает в основном (двигательном) режиме с номинальной нагрузкой (точка A_1 на графике 1, рис. 2.7). При отключении двигателя от сети вращающий момент $M = 0$, но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т.е. произойдет *выбег* двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют торможение противовключением. С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным ($-U_a$). Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря E_a также не меняет своего направления и действует согласно с напряжением на обмотке якоря ($-U_a$). При этом ток якоря создается суммой напряжения $-U_a$ и ЭДС якоря E_a (см. рис. 2.6, в):

$$I_a = (-U_a - E_a)/R = -(U_a + E_a)/R. \quad (2.25)$$

В этих условиях ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент становятся *отрицательными* и работа двигателя определяется режимом точки C_1 на характеристике 2 с координатами $n_{ном}$ и $-M_T$ во втором квадранте осей координат (см. рис. 2.7). Чтобы

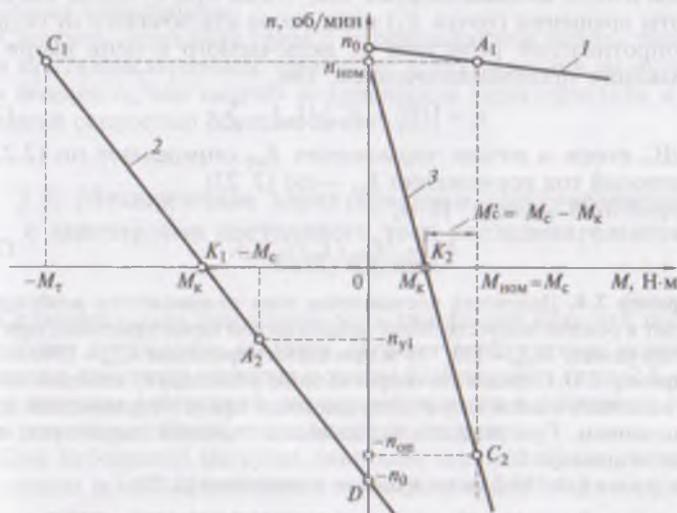


Рис. 2.7. Механические характеристики электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением

ток якоря в этих условиях не превысил допустимого значения, в цепь обмотки якоря включают резистор сопротивлением r_T . При этом ток якоря I_{aT} , согласно выражению (2.25), будет ограничен сопротивлением

$$R = \sum r + r_T. \quad (2.26)$$

Под действием тормозящего момента $-M_T$ частота вращения якоря уменьшается, достигнув нулевого значения (точка K_1). Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет *реверсирование* двигателя и его якорь под действием момента M_K начнет вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента. При этом работа двигателя будет происходить на участке K_1D механической характеристики 2, расположенном в третьем квадранте осей координат. Если статический момент на валу двигателя реактивный, то при достижении им значения M , равного статическому моменту сопротивления M_C , наступит установившийся режим работы с частотой вращения $-n_{y1}$. Если же статический момент сопротивления отсутствует (режим холостого хода), то частота вращения будет продолжать увеличиваться, пока не достигнет значения $-n_0$ (точка D).

Чтобы избежать реверсирования операцию торможения противовключением автоматизируют так, чтобы при нулевом значении частоты вращения (точка K_1) цепь якоря отключалась от сети.

Сопротивление резистора r_T , включаемого в цепь якоря при торможении противовключением, Ом,

$$r_T = [(U_a + E_{aT})/I_{aT}] - \sum r. \quad (2.27)$$

ЭДС якоря в начале торможения E_{aT} определяют по (2.22), а допустимый ток торможения I_{aT} — по (2.23)

Тормозной момент, Н·м,

$$M_T = M_{ном}(I_{aT}/I_{аном}). \quad (2.28)$$

Пример 2.4. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения работает в режиме искусственной механической характеристики, при этом нагрузка на валу $M_{ном} = 133,7$ Н·м при частоте вращения $n'_{ном} = 1500$ об/мин (см. пример 2.1). Определить сопротивление резистора r_T , который необходимо включить в цепь якоря этого двигателя при его торможении противовключением. При решении использовать значения параметров, полученные в примере 2.1.

Решение. 1. ЭДС якоря в начале торможения (2.22)

$$E_{aT} = 0,105(M_{ном}/I_{аном})n_{ном} = 0,105(133,7/105)1500 = 200 \text{ В.}$$

2. Допустимый ток торможения (2.23)

$$I_{aT} = 1,2 \cdot I_{аном} = 1,2 \cdot 105 = 126 \text{ А.}$$

3. Сопротивление тормозного резистора в цепи якоря (2.27)

$$r_T = [(U + E_{aT})/I_{aT}] - \sum r = [(440 + 200)/126] - 0,17 = 4,9 \text{ Ом.}$$

4. Момент торможения (2.28)

$$M_T = -M_{ном}(I_{aT}/I_{аном}) = 133,7(126/105) = -160 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Характеристика торможения противовключением представлена на рис. 2.5, график 4.

Торможение противовключением используется в подъемных устройствах, создающих активный момент сопротивления M_c приводному двигателю. Допустим двигатель такого устройства работает на *подъем* груза в установившемся номинальном режиме точки A_1 на естественной характеристике 1 (см. рис. 2.7). При этом электромагнитный момент двигателя равен статическому моменту сопротивления ($M_{ином} = M_c$). Для опускания груза G массой m (см. рис. 1.4) в цепь якоря двигателя вводят добавочный резистор сопротивлением r_T . При этом двигатель перейдет в режим *искусственной* механической характеристики 3 и статический момент сопротивления M_c , создаваемый грузом G , превысит наибольшее значение электромагнитного момента двигателя M_k на величину $M'_c = M_c - M_k$. Под действием этого избыточного момента груз будет опускаться, направление вращения якоря двигателя станет отрицательным $-n_{оп}$ (точка C_2). При этом электромагнитный момент двигателя станет тормозящим.

Скорость опускания груза с использованием метода торможения противовключением зависит от сопротивления резистора r_T ; чем больше r_T , тем «мягче» механическая характеристика и тем с большей скоростью опускается груз G .

2.5. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения

Отличительным признаком этих двигателей является последовательное соединение обмоток якоря и возбуждения, отчего ток нагрузки двигателя является и током возбуждения (рис. 2.8, а). По этой причине магнитный поток возбуждения в двигателях последовательного возбуждения зависит от нагрузки.

При небольшой нагрузке двигателя его магнитная система не насыщена и магнитный поток пропорционален току нагрузки

$$\Phi = c_\Phi I_a,$$

где c_Φ — коэффициент пропорциональности между током якоря I_a и потоком возбуждения Φ .

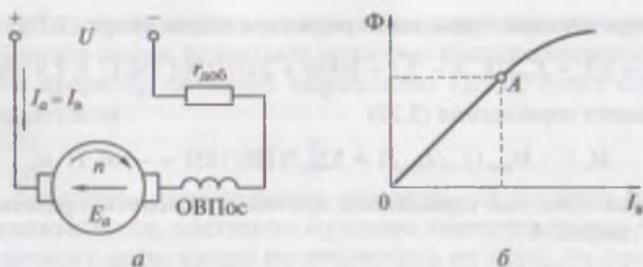


Рис. 2.8. Двигатель последовательного возбуждения:

а — схема соединений; *б* — график намагничивания

При этом вращающий момент двигателя равен

$$M = c_m \Phi I_a = c_m c_\Phi I_a^2. \quad (2.29)$$

Из (2.29) следует, что в двигателе с *ненасыщенной* магнитной системой электромагнитный момент M пропорционален квадрату тока нагрузки I_a^2 . Преобразовав (2.29), получим

$$I_a = \sqrt{M/(c_m c_\Phi)} = C M^{1/2}. \quad (2.30)$$

Подставив (2.29) и (2.30) в (2.1), после преобразования получим

$$n = \frac{CU}{\sqrt{M}} = C_1 M^{-1/2} - B, \quad (2.31)$$

где C , C_1 и B — коэффициенты, постоянные для данного двигателя последовательного возбуждения.

Из полученного уравнения, соответствующего ненасыщенной магнитной системе двигателя, следует, что зависимость $n = f(M)$, т.е. *механическая характеристика* двигателя последовательного возбуждения, представляет собой степенную функцию с отрицательным дробным показателем, т.е. эта характеристика *криволинейна* (рис. 2.9, график 1). Однако при нагрузке двигателя $M > 0,8 M_{\text{ном}}$ магнитная система насыщается (см. рис. 2.8, б, точка А) и зависимость $\Phi = f(I_a)$ изменяется. Поэтому приведенное выше уравнение (2.31) определяет форму механической характеристики лишь в ее начальной части, соответствующей нагрузке двигателя $M < 0,8 M_{\text{ном}}$. При дальнейшем увеличении нагрузки механическая характеристика становится более жесткой.

Изложенное о свойствах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения позволяет сделать следующие выводы:

1. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения *криволинейна*, при этом жесткость характеристики на разных ее участках неодинакова: при малых нагрузках частота вращения двигателя значительна и характеристика очень мягкая. С уве-

личением нагрузки механическая характеристика становится жестче, а при нагрузке, близкой к номинальной, характеристика становится более жесткой. Объясняется это тем, что при токе нагрузки $I_a > 0,8I_{a\text{ном}}$ магнитная система насыщается и магнитный поток возбуждения при дальнейшем увеличении нагрузки остается практически неизменным, не зависящим от тока нагрузки.

2. Механическая характеристика не пересекает ось ординат, так как при отсутствии нагрузки двигателя ($M \approx 0$) частота вращения возрастает неограниченно. По этой причине не допускается работа двигателей последовательного возбуждения при нагрузке, составляющей менее 25% от номинальной ($M < 0,25 M_{\text{ном}}$), а тем более в режиме холостого хода. Чтобы исключить возникновение режима холостого хода (что привело бы к «разносу» двигателя) в приводах с двигателями последовательного возбуждения не допустимо применение ременных передач и фрикционных муфт для передачи вращательного движения на рабочий механизм.

Преобразуя выражение (2.29), с использованием (2.30) получим выражение потребляемой двигателем мощности, Вт,

$$P_1 = UI_a = A\sqrt{M}, \quad (2.32)$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Из выражений (2.30) и (2.32) следует, что у двигателей последовательного возбуждения при изменениях момента нагрузки M в широких пределах потребляемая мощность P_1 и ток якоря I_a изменяются в *меньших* пределах, чем у двигателей независимого (параллельного) возбуждения, для которых выражение потребляемой мощности имеет вид

$$P_1 = UI_a = A_1 M, \quad (2.33)$$

где A_1 — коэффициент пропорциональности.

Например, в двигателе последовательного возбуждения при увеличении момента нагрузки в четыре раза потребляемая мощность P_1 возрастает лишь в два раза, а в двигателе независимого (параллельного) возбуждения — в четыре раза. Объясняется это тем, что при последовательном возбуждении увеличение нагрузки двигателя сопровождается одновременным ростом как тока якоря, так и магнитного потока возбуждения, и оба этих параметра

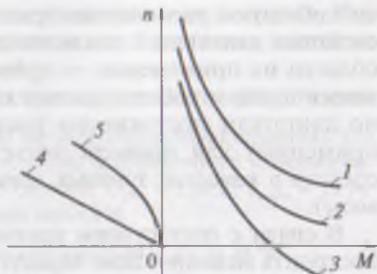


Рис. 2.9. Механические характеристики электропривода с двигателем последовательного возбуждения в основном (двигательном) (1, 2, 3) и тормозном (4, 5) режимах

способствуют увеличению вращающего момента [см. (2.29)]. Это свойство двигателей последовательного возбуждения определяет области их применения — привод механизмов с тяжелыми условиями пуска и работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Обычно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяют для привода подъемных устройств и транспортных средств в качестве тяговых двигателей (трамваи, метро, электро-возы).

В связи с отсутствием уравнений, позволяющих рассчитать и построить механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, для их построения пользуются *универсальными естественными характеристиками* (рис. 2.10). Универсальные характеристики построены в относительных единицах: тока $I^* = I/I_{a\text{ном}}$; момента $M^* = M/M_{\text{ном}}$; частоты вращения $n^* = n/n_{\text{ном}}$.

В связи с тем что механические характеристики рассматриваемых двигателей криволинейны, их построение более трудоемко, чем для двигателей независимого возбуждения. Для построения криволинейной характеристики необходимо не менее пяти точек (чем больше точек, тем точнее построение), в то время как прямолинейную характеристику строят по двум точкам.

Для построения естественной механической характеристики $n = f(M)$ двигателя последовательного возбуждения по универсальным характеристикам поступают следующим образом.

1. Определяют фактические номинальные значения тока I_a (А), момента M (Н·м) и частоты вращения n (об/мин).

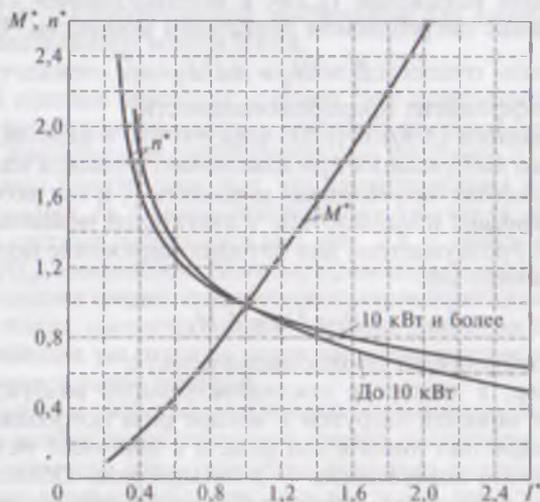


Рис. 2.10. Естественные универсальные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

2. Задаются рядом относительных значений тока нагрузки I^* и по рис. 2.10 определяют соответствующие относительные значения момента M^* и частоты вращения n^* .

3. Строят естественную механическую характеристику двигателя.

Пример 2.5. Построить естественную механическую характеристику для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с техническими данными: $P_{\text{ном}} = 3,0$ кВт; $n_{\text{ном}} = 1130$ об/мин; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $I_{\text{а ном}} = 19$ А.

Решение. 1. Номинальное значение момента

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 3,0 / 1130 = 25,35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Задаем относительными значениями тока нагрузки и по универсальным естественным характеристикам (см. рис. 2.10) определяем величины, необходимые для построения естественной механической характеристики двигателя сначала в относительных единицах, а затем в именованных:

I^*	2,0	1,5	1,0	0,50	0,35
M^*	2,5	1,65	1,0	0,40	0,35
n^*	0,60	0,80	1,0	1,5	2,0
$I_{\text{а}}, \text{А}$	38	28,5	19	9,50	6,5
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	63	38,5	25,35	10,1	6, 8,9
$n_{\text{е}}, \text{об/мин}$	678	904	1130	1695	2260

3. По полученным данным строим естественную механическую характеристику (рис. 2.11, график, проходящий через точку A_1).

При расчете искусственных механических характеристик двигателя последовательного возбуждения, так же как и двигателя неза-

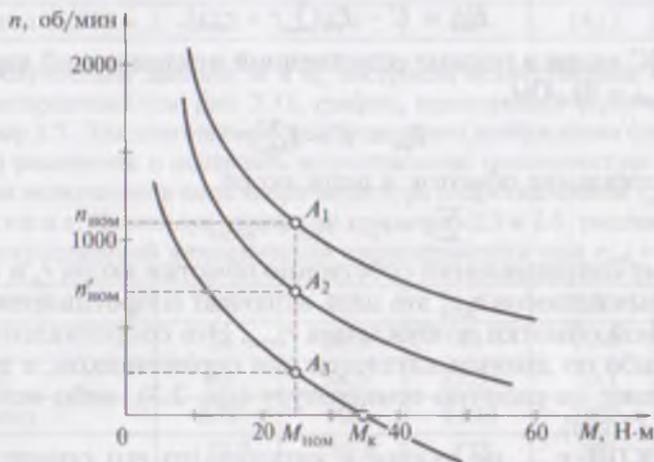


Рис. 2.11. Механические характеристики электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения

висимого возбуждения, решают одну из двух задач: либо по заданным координатам точки искусственной характеристики ($M; n$) определяют сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, необходимое для получения требуемой искусственной механической характеристики, либо по заданному сопротивлению резистора $r_{\text{доб}}$ определяют координаты точек искусственной характеристики.

Если заданы координаты точки на искусственной механической характеристике, то сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$ вычисляют по формуле, Ом,

$$r_{\text{доб}} = [1 - (n_n/n_c)](U_{\text{ном}}/I_{aи}) - \sum r, \quad (2.34)$$

где $I_{aи}$ — ток якоря, соответствующий режиму искусственной механической характеристике при частоте вращения n_n .

Если заданы координаты точки на искусственной характеристике, соответствующие номинальному моменту нагрузки ($M_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$), то в (2.34) применяют номинальные значения тока $I_{aи\text{ном}}$ и частоты вращения $n_{\text{ном}}$. Если же координаты заданной точки не соответствуют номинальному режиму, то, используя универсальные характеристики, определяют ток и частоту вращения, соответствующие заданной нагрузке. Затем рассчитывают $r_{\text{доб}}$ и определяют частоты вращения для ряда точек (не менее пяти) и строят искусственную механическую характеристику.

Если же задано сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, то определяют частоту вращения n_n для ряда значений тока нагрузки, об/мин,

$$n_n = n_c(E_{aи}/E_{ac}), \quad (2.35)$$

где $E_{aи}$ — ЭДС якоря в режиме искусственной механической характеристики, В,

$$E_{aи} = U - I_{aи}(\sum r + r_{\text{доб}}), \quad (2.36)$$

E_{ac} — ЭДС якоря в режиме естественной механической характеристики ($r_{\text{доб}} = 0$), Ом,

$$E_{ac} = U - I_a \sum r. \quad (2.37)$$

Сопротивление обмоток в цепи якоря

$$\sum r = r_a + r_{\text{д.п}} + r_{\text{посл}},$$

т. е., кроме сопротивлений собственно обмотки якоря r_a и обмотки добавочных полюсов $r_{\text{д.п}}$, эта цепь включает сопротивление последовательной обмотки возбуждения $r_{\text{посл}}$. Это сопротивление определяют либо по данным каталогов или справочников, а затем пересчитывают на рабочую температуру (см. 2.3), либо используют формулу (2.14а).

Если КПД $\eta_{\text{ном}}$ не указан в каталоге, то его определяют по формуле

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/(U_{\text{ном}} I_{aи\text{ном}}). \quad (2.38)$$

Пример 2.6. Для двигателя последовательного возбуждения (см. пример 2.5) определить сопротивление резистора $r_{доб}$, при включении которого в цепь якоря искусственная механическая характеристика пройдет через точку A_2 с координатами: $M_{ном} = 25,35 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $n'_{ном} = 750 \text{ об/мин}$ (см. рис. 2.11); построить эту характеристику.

Решение. 1. Номинальное сопротивление двигателя (2.13)

$$R_{ном} = 220/19 = 11,6 \text{ Ом.}$$

2. КПД в номинальном режиме (2.38)

$$\eta_{ном} = 3000/(220 \cdot 19) = 0,72.$$

3. Сопротивление обмоток в цепи якоря (2.14а)

$$\sum r = 0,75 \cdot 11,6(1 - 0,72) = 2,43 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора $r_{доб}$, соответствующее координатам $M_{ном}$ и $n'_{ном} = 750 \text{ об/мин}$ (2.34),

$$\begin{aligned} r_{доб} &= [1 - (n_n/n_c)] [(U_{ном}/I_a) - \sum r] = \\ &= [1 - (750/1130)] [(220/19) - 2,43] = 3,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Используя данные из примера 2.5, рассчитаем параметры, необходимые для построения искусственной механической характеристики двигателя при включении в цепь якоря резистора сопротивлением $r_{доб} = 0,31 \text{ Ом}$.

I^*	2,0	1,5	1,0	0,50	0,35
$I_a, \text{ А}$	38	28,5	19	9,50	65
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	63	38,5	25,35	10,1	8,90
$n_c, \text{ об/мин}$	678	904	1130	2007	2260
$E_{ac}, \text{ В (2.37)}$	127,7	150,8	173	200	204
$E_{ан}, \text{ В (2.36)}$	9,0	62,0	115,5	167,3	189
$n_n, \text{ об/мин (2.35)}$	47,8	371	750	1412	2094

По полученным данным M и n_n построена искусственная механическая характеристика (см. рис. 2.11, график, проходящий через точку A_2).

Пример 2.7. Для двигателя последовательного возбуждения (см. примеры 2.5 и 2.6) рассчитать и построить искусственную механическую характеристику при включении в цепь якоря резистора сопротивлением $r_{доб} = 6,0 \text{ Ом}$.

Решение. Используя данные из примеров 2.5 и 2.6, рассчитаем параметры искусственной механической характеристики при $r_{доб} = 6,0 \text{ Ом}$.

I^*	2,0	1,5	1,0	0,50	0,35
$I_a, \text{ А}$	38	28,5	19	9,50	65
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	63	38,5	25,35	10,1	8,90
$n_c, \text{ об/мин}$	678	904	1130	2007	2260
$E_{ac}, \text{ В}$	127,7	150,8	173	200	204
$E_{ан}, \text{ В}$	-100	-20	60	140	164
$n_n, \text{ об/мин}$	-532	-120	392	1404	1816

Искусственная характеристика представлена на рис. 2.11 (график, проходящий через точку A_3).

2.6. Электроприводы с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения в тормозных режимах

Режим генераторного рекуперативного торможения при последовательном возбуждении двигателя невозможен, так как двигатель в этом случае не может работать в режиме холостого хода: при $M = 0$ поток $\Phi = 0$, частота вращения неограниченно растет и двигатель идет «в разнос». Тем не менее рекуперативное торможение тяговых двигателей последовательного возбуждения применяется на электротранспорте, но в этом случае меняется схема соединений двигателя — он переключается на независимое возбуждение.

Динамическое торможение в двигателях последовательного возбуждения возможно по двум схемам включения: по схеме независимого возбуждения и по схеме самовозбуждения. При схеме независимого питания обмотки возбуждения (рис. 2.12, а) для ограничения тока в этой обмотке в цепь возбуждения последовательно включают резистор. Сопротивление этого резистора принимают таким, чтобы при торможении ток возбуждения был равен номинальному току двигателя. Процесс торможения протекает так же, как и в двигателе независимого возбуждения (см. 2.4). Механическая характеристика в этом случае прямолинейна, выходит из начала координат и расположена во втором квадранте (см. рис. 2.9, график 4).

Динамическое торможение по схеме с самовозбуждением (рис. 2.12, б) предусматривает отключение от сети обмотки возбуждения и подключение ее к якорию через резистор r_T таким образом, чтобы магнитный поток Φ при переходе в режим торможения не изменил своего направления, что привело бы к подавлению потока остаточ-

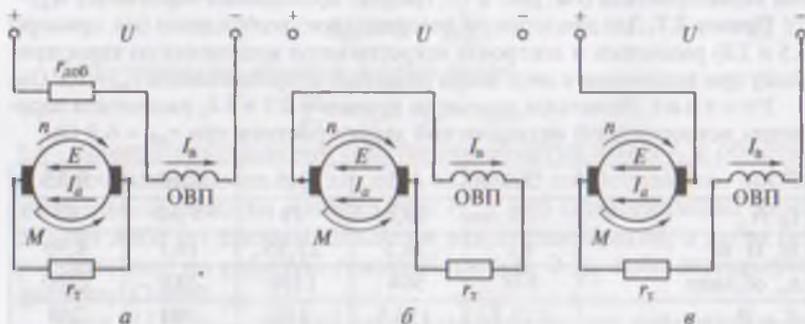


Рис. 2.12. Двигатель последовательного возбуждения в тормозных режимах: а, б — динамическом; в — противовключением

ного магнетизма и к полному размагничиванию двигателя. В этом случае ЭДС в обмотке якоря не будет индуцироваться и торможения не произойдет. Механическая характеристика динамического торможения по схеме с самовозбуждением криволинейна и располагается во втором квадранте (см. рис. 2.9, график 5). Торможение получается малоэффективным, так как по мере замедления вращения уменьшается ток якоря I_a одновременно с магнитным потоком Φ . Этот вид динамического торможения обычно применяют для аварийного торможения, например, при непредусмотренном отключении электропитания (как видно из схемы рис. 2.12, б, в процессе торможения напряжение сети не используется).

Торможение противовключением происходит так же, как и в двигателях с независимым возбуждением при изменении полярности напряжения на клеммах цепи якоря, при этом меняется направление тока в обмотке якоря, и если направление тока в обмотке возбуждения останется неизменным (рис. 2.12, в), электромагнитный момент поменяет свое направление и станет тормозящим.

Допустим двигатель работал в режиме точки A на естественной характеристике 1 (рис. 2.13). При переключении клемм обмотки якоря и введении в ее цепь резистора r_r момент M становится отрицательным и процесс переходит в точку B на характеристике 2 торможения противовключением. Торможение происходит на участке BC этой характеристики. При этом частота вращения понижается и в точке C якорь останавливается ($n = 0$). В этой точке двигатель следует отключить от сети, в противном случае произойдет его реверсирование.

Как и в двигателе с независимым возбуждением (см. 2.4), в двигателе последовательного возбуждения возможен режим торможения противовключением при опускании груза, подвешенного к тросу, наматываемому на барабан (см. рис. 1.4). В этом случае ЭДС якоря $E_{aоп}$ действует согласно с напряжением сети U и сопротивление резистора r_r , необходимого для опускания груза с заданной частотой вращения якоря двигателя n_r в режиме противовключения, определяется выражением

$$r_r = \frac{U + E_{aоп}}{I_a} - \sum r, \quad (2.39)$$

где $E_{aоп}$ — ЭДС якоря в режиме торможения противовключением при опускании груза, B ,

$$E_{aоп} = (n_{оп}/n_c)(U - I_{аоп} \sum r). \quad (2.40)$$

В этом выражении $I_{аоп}$ и $n_{оп}$ представляют собой ток нагрузки и час-

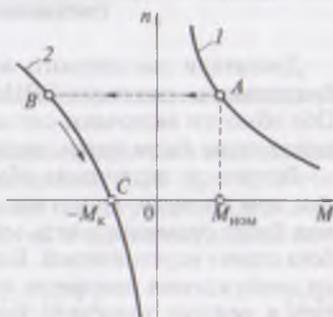


Рис. 2.13. Торможение противовключением электропривода с двигателем последовательного возбуждения

тоту вращения при опускании груза с заданной скоростью, соответствующую этому току нагрузки, но в режиме естественной механической характеристики (определяются по универсальным механическим характеристикам рис. 2.10).

Пример 2.8. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения с параметрами, приведенными в примерах 2.5, 2.6 и 2.7 ($P_{\text{ном}} = 3$ кВт; $n_{\text{ном}} = 1130$ об/мин; $I_{\text{а ном}} = 19$ А; $\eta_{\text{ном}} = 0,72$; $\sum r = 2,43$ Ом; $R_{\text{ном}} = 11,6$ Ом), работает в электроприводе лебедки на опускание груза в режиме торможения противовключением при частоте вращения якоря двигателя $n_{\text{оп}} = 0,5n_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 1130 = 565$ об/мин. Определить сопротивление резистора r_{τ} , который следует включить последовательно в цепь якоря двигателя, чтобы при опускании груза ток якоря был равен $I_{\text{а оп}} = 1,4$, $I_{\text{а ном}} = 1,4 \cdot 19 = 26,6$ А.

Решение. 1. По универсальным механическим характеристикам (см. рис. 2.10) определяем частоту вращения $n^* = 0,8$, соответствующую току якоря $I^* = 1,4$ в режиме естественной характеристики:

$$n_c = n^* n_{\text{ном}} = 0,8 \cdot 1130 = 904 \text{ об/мин.}$$

2. ЭДС якоря в режиме торможения противовключением при опускании груза

$$E_{\text{а оп}} = (n_{\text{оп}}/n_c)(U - I_{\text{а оп}} \sum r) = (565/904)(220 - 26,6 \cdot 2,43) = 97 \text{ В.}$$

3. Сопротивление резистора, включаемого в цепь якоря при опускании груза в режиме торможения противовключением,

$$r_{\tau} = \frac{U_{\text{ном}} + E_{\text{а оп}}}{I_{\text{а оп}}} - \sum r = \frac{220 + 97}{26,6} - 2,43 = 9,48 \text{ Ом.}$$

2.7. Электропривод с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения: независимую ОВН и последовательную ОВП (рис. 2.14, а). Обе обмотки включают согласованно, так, чтобы их намагничивающие силы были направлены в одну сторону.

Встречное включение обмоток возбуждения недопустимо, так как при нагрузке двигателя последовательная обмотка возбуждения будет размагничивать магнитную систему двигателя и его работа станет неустойчивой. Благодаря наличию независимой обмотки возбуждения двигателя смешанного возбуждения могут работать в режиме холостого хода, а следовательно, у них возможен генераторный рекуперативный режим торможения. На рис. 2.14, б показан примерный вид механических характеристик двигателя постоянного тока смешанного возбуждения, а на рис. 2.14, в для сравнения показаны механические характеристики двигателей по-

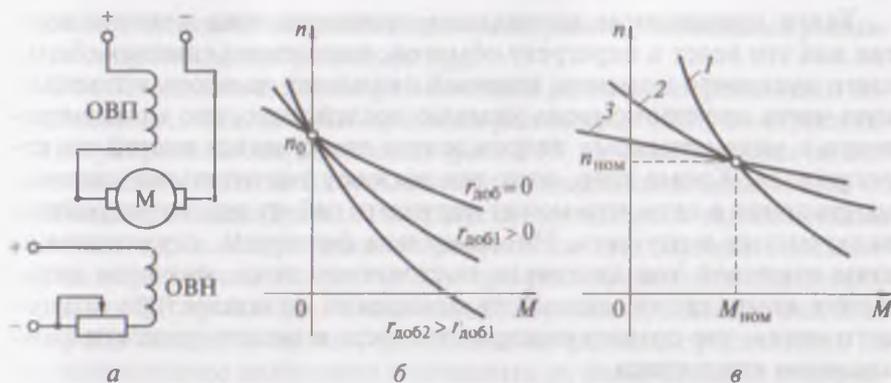


Рис. 2.14. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения:

a — принципиальная схема; *б* — механические характеристики; *в* — сравнение механических характеристик двигателей постоянного тока с разными способами возбуждения

стоянного тока последовательного (1), смешанного (2) и независимого (3) способов возбуждения.

Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения, так же как и при последовательном возбуждении, строят с помощью универсальных естественных характеристик.

Наличие двух обмоток возбуждения увеличивает габариты, массу и стоимость двигателей смешанного возбуждения по сравнению с двигателями независимого и последовательного возбуждения. Это оправдывает их применение только в тех случаях, когда от приводного двигателя требуется сочетание хороших регулировочных свойств с устойчивой работой при резких колебаниях нагрузки и перегрузке. Но и здесь целесообразность применения двигателей смешанного возбуждения должна быть подтверждена технико-экономическими расчетами.

2.8. Пуск электроприводов с двигателями постоянного тока

При включении в сеть двигателя постоянного тока в начальный момент якорь неподвижен, а следовательно, ЭДС $E_a = 0$. В этих условиях ток якоря (начальный пусковой ток) ограничивается лишь электрическим сопротивлением обмоток и щеточных контактов в цепи якоря

$$I_{aн} = (U - E_a) / \sum r = U / \sum r. \quad (2.41)$$

Величина $\sum r$ невелика, поэтому начальный пусковой ток двигателя достигнет значения в 10—40 раз, превышающего его номинальное значение. При этом двигателям большей мощности соответствует более высокая кратность пускового тока.

Такое превышение начального пускового тока недопустимо, так как это ведет к перегреву обмоток, появлению слишком большого пускового момента, который оказывает на якорь и подвижную часть электропривода ударное воздействие, что может привести к механическому повреждению движущихся частей электропривода. Кроме того, этот ток вызовет значительное падение напряжения в сети, что может нарушить работу других устройств, включенных в эту сеть. Но основным фактором, ограничивающим пусковой ток двигателя постоянного тока, является нарушение коммутации, опасность появления на коллекторе «кругового огня», что создает пожароопасность и может привести к *оплавлению* коллектора.

Перечисленные нежелательные последствия от столь значительных пусковых токов в цепи якоря вынуждают принимать меры к ограничению этого тока до значений, не способных вызвать нежелательных последствий. Однако следует иметь в виду, что слишком малая величина пускового тока также нежелательна, так как это приводит к снижению пускового момента, и следовательно, затягивает процесс пуска, а при значительном статическом моменте нагрузки на валу двигателя пуск может не состояться.

Из выражения (2.2) видим, что величина электромагнитного момента двигателя пропорциональна не только току якоря I_a , но и магнитному потоку возбуждения Φ . Поэтому для облегчения пуска двигателя необходимо на время пуска все резисторы в цепи обмотки возбуждения вывести или шунтировать, чтобы сопротивление в цепи возбуждения было *минимальным*.

Как следует из (2.41), уменьшение пускового тока возможно двумя способами: снижением напряжения питающей сети или повышением сопротивления цепи якоря. Первый способ возможен только при питании двигателя от индивидуального источника электроэнергии, допускающего регулирование подводимого к двигателю напряжения, например, от управляемого полупроводникового выпрямителя (см. гл. 8). Остановимся подробнее на втором способе ограничения пускового тока, основанном на увеличении сопротивления цепи якоря.

При введении в цепь якоря внешнего сопротивления в виде резистора $r_{доб}$ начальный пусковой ток равен [см. (2.41)]:

$$I_1 = U_{ном} / (r_{доб} + \sum r). \quad (2.42)$$

Таким образом, можно подобрать такое сопротивление резистора, при котором начальный пусковой ток I_1 не превысит допустимого значения. Однако выбранное сопротивление удовлетворит лишь началу пуска. Но как только якорь начнет вращение, в обмотке якоря будет индуцироваться ЭДС, которая ограничит величину тока якоря и соответственно уменьшит величину начального пускового момента. Чтобы поддержать пусковой ток, а следова-

тельно, и пусковой момент на прежнем уровне, необходимо уменьшить сопротивление резистора $r_{доб}$.

С этой целью в цепь якоря включают резистор переменного сопротивления, называемый *пусковым реостатом* (ПР) со ступенчатой регулировкой сопротивления (рис. 2.15, а). Такой реостат позволяет изменять внешнее сопротивление, вводимое в цепь якоря, от наибольшего значения в начале пуска до нулевого по окончании процесса пуска. Сопротивление реостата следует выводить медленно, по мере разгона якоря, так как при резком уменьшении сопротивления ПР произойдет значительный бросок пускового тока. В то же время следует помнить, что пусковые реостаты рассчитаны на кратковременное включение и оставлять их включенными в промежуточном положении на продолжительное время не следует.

Если процесс пуска двигателя автоматизирован, то переключение ступеней пускового реостата осуществляется посредством контакторов, которые своими контактами КМ1, КМ2, КМ3 шунтируют элементы (резисторы) пускового реостата при переключении его ступеней (рис. 2.15, б).

В электроприводах применяют два вида пуска двигателей: нормальный и форсированный. *Нормальным* считают пуск, не вызывающий быстрого ускорения электропривода. Такой пуск обычно используют в электроприводах, у которых он выполняется сравнительно редко: вентиляторные устройства, компрессоры, конвейеры и т.п. *Форсированный* пуск применяют в приводах с частыми включениями, требующими минимальной продолжительности пусковой операции: подъемные устройства, транспор-

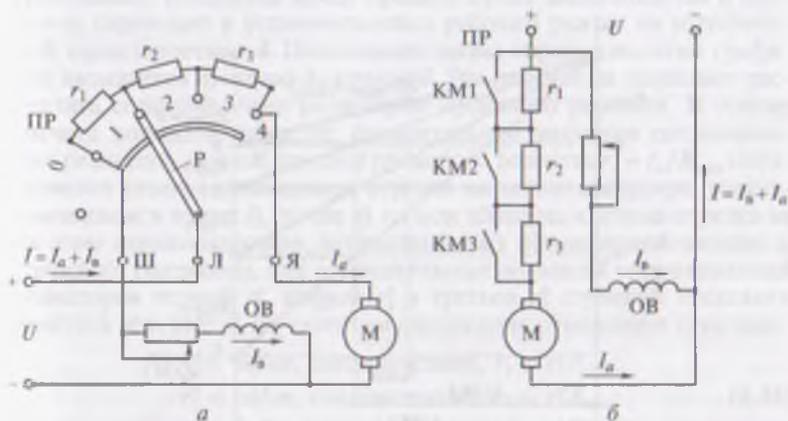


Рис. 2.15. Схемы включения пусковых реостатов при ручном (а) и автоматизированном (б) способах пуска электропривода с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения

тные средства, некоторые виды станков и т. п. Сокращение продолжительности пусковой операции при форсированном пуске достигается предельно допустимыми значениями начального пускового тока (момента) и минимальным числом ступеней пускового реостата.

При нормальном пуске величину пускового тока принимают обычно немного превышающей номинальный ток якоря двигателя, а при форсированном — ближе к предельно допустимому значению этого тока (по условиям коммутации или допустимому падению напряжения в питающей сети).

Двигатели независимого (параллельного) возбуждения. Рассмотрим подробнее процесс пуска двигателя постоянного тока на примере двигателя независимого (параллельного) возбуждения с применением пускового реостата на три ступени ($Z = 3$). Существует два метода расчета сопротивлений резисторов пускового реостата — графический и аналитический.

Графический метод. На рис. 2.15, б представлена схема включения пускового реостата на три ступени ($Z = 3$), а на рис. 2.16 — механические характеристики двигателя: искусственные 1, 2, 3 и естественная 4. Пусковой реостат состоит из трех резисторов r_1 , r_2 и r_3 , каждый из которых выводится путем шунтирования контактами контакторов (КМ1, КМ2 и КМ3).

В процессе пуска сила тока якоря двигателя изменяется от значения I_1 , называемого *начальным пусковым током*, до значения I_2 — *тока переключений*. При этом пусковой ток изменяется соответственно от I_1 до I_2 .

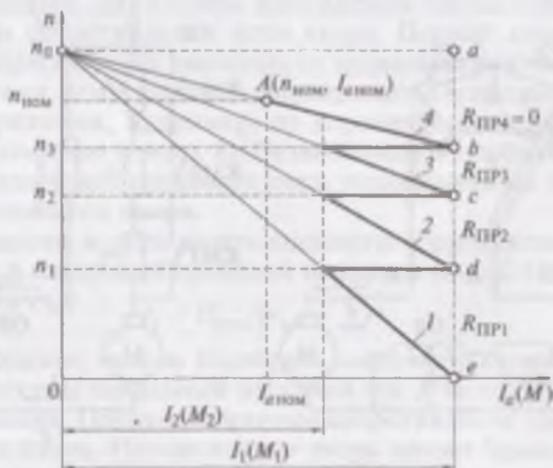


Рис. 2.16. Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Значения пусковых токов обычно принимают равными:

$$I_1 = (1,3 + 2,5)I_{\text{ном}};$$

$$I_2 = (1,0 + 1,3)I_{\text{ном}}.$$

Для двигателей специального назначения, предназначенных для тяжелых условий работы, например двигателей крановых и металлургических серий, указанные значения моментов могут быть увеличены.

Отложив на оси абсцисс значения токов I_1 и I_2 , в полученных точках восстанавливают перпендикуляры к оси абсцисс (см. рис. 2.16). Пуск начинают с первой ступени пускового реостата при всех введенных резисторах. При этом сопротивление реостата

$$R_{\text{пр1}} = r_1 + r_2 + r_3. \quad (2.43)$$

Начало процесса пуска происходит по искусственной механической характеристике 1. Якорь двигателя разгоняется, а пусковой ток (момент) убывает. Это объясняется действием противо-ЭДС E_a , индуцируемой в обмотке якоря E_a . При достижении частоты вращения якоря значения n_1 ток уменьшается до значения тока переключений I_2 , при этом срабатывает контактор КМ1 и своими контактами шунтирует резистор r_1 . Сопротивление пускового реостата уменьшается до значения

$$R_{\text{пр2}} = r_2 + r_3, \quad (2.44)$$

а ток увеличивается до значения I_1 . Пуск продолжается по механической характеристике 2. Затем, после срабатывания контактора КМ2, пуск продолжается по характеристике 3 и, наконец, когда срабатывает контактор КМ3, процесс пуска заканчивается и двигатель переходит в установившейся рабочий режим на естественной характеристике 4. Полученная таким образом система графиков называется *пусковой диаграммой*. Эта диаграмма позволяет рассчитывать сопротивления резисторов пускового реостата. В основу расчета положено понятие: относительное значение сопротивления резистора данной ступени пускового реостата $r_x^* = r_x/R_{\text{ном}}$ определяется отношением длины отрезка на перпендикуляре, восстановленном в точке I_1 (точка e) на оси абсцисс, к длине отрезка ae на этом перпендикуляре, эквивалентному пограничной частоте n_0 (точка a). Например, для относительных значений сопротивлений резисторов первой r_1^* , второй r_2^* и третьей r_3^* ступеней пускового реостата (см. рис. 2.16) получим следующие отношения отрезков:

$$\begin{aligned} r_1^* &= de/ae, \text{ следовательно, } r_1 = r_1^* R_{\text{ном}}; \\ r_2^* &= cd/ae, \text{ следовательно, } r_2 = r_2^* R_{\text{ном}}; \\ r_3^* &= bc/ae, \text{ следовательно, } r_3 = r_3^* R_{\text{ном}}, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}.$$

Сопротивления пускового реостата на всех его ступенях определяются выражениями:
на первой ступени

$$R_{ПР1} = (be/ae)R_{ном}; \quad (2.46)$$

на второй ступени

$$R_{ПР2} = (bd/ae)R_{ном}; \quad (2.47)$$

на третьей ступени

$$R_{ПР3} = (bc/ae)R_{ном}. \quad (2.48)$$

Если число ступеней пускового реостата Z было задано и при построении пусковой диаграммы оно было получено, то это свидетельствует о правильно выбранных значениях токов I_1 и I_2 . Если же при построении диаграммы заданное число ступеней не получено или значения тока переключений для разных ступеней реостата оказались неодинаковыми, то это свидетельствует о неправильно выбранном значении тока переключений I_2 . В этом случае следует повторить построение пусковой диаграммы, добившись такого ее вида, чтобы изменения тока якоря в процессе пуска происходили точно между перпендикулярами, восстановленными к оси абсцисс в точках I_1 и I_2 .

При расчете пускового реостата для *форсированного* режима пуска обычно величину начального пускового тока I_1 принимают близкой или равной предельно допустимому значению. В этом случае задаются числом ступеней пускового реостата Z и рассчитывают величину λ , определяющую рациональное соотношение между токами I_1 и I_2 :

$$\lambda_1 = \sqrt[2]{U_{ном}/(I_1 \sum r)}. \quad (2.49)$$

Затем рассчитывают значение тока переключений

$$I_2 = I_1/\lambda_1. \quad (2.50)$$

Если режим пуска *нормальный*, то задаются величиной тока переключений, а показатель степени корня принимают на единицу больше числа ступеней пускового реостата

$$\lambda_1 = {}^{(Z+1)}\sqrt{U_{ном}/(I_2 \sum r)}. \quad (2.49a)$$

После этого определяют начальный пусковой ток

$$I_1 = I_2 \lambda_2. \quad (2.50a)$$

Если же к данному электроприводу не предъявляют специальных требований, касающихся процесса пуска, то число ступеней реостата обычно принимают по аналогии с другими подобными приводами, используя опыт их эксплуатации.

Аналитический метод. В основе аналитического метода лежит рассмотренный графический метод, но для вычисления сопротивлений резисторов пускового реостата не требуется построения пусковой диаграммы. Расчет ведут по формулам:

$$\begin{aligned} r_3 &= \sum r (\lambda - 1); \\ r_2 &= r_3 \lambda; \\ r_1 &= r_2 \lambda. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Аналитический метод расчета точнее и проще графического, так как не связан с построением пусковой диаграммы, при выполнении которой неизбежны некоторые неточности.

Пример 2.9. Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат ($Z = 3$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{ном} = 7,1$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $n_{ном} = 750$ об/мин; $\sum r = 0,48$ Ом; $\eta_{ном} = 83,5\%$. Режим пуска *форсированный*.

Решение. Для решения задачи воспользуемся аналитическим методом.

1. Ток якоря в номинальном режиме

$$I_{aном} = P_{ном} / (U_{ном} \eta_{ном}) = 7100 / (220 \cdot 0,835) = 38,6 \text{ А.}$$

2. Принимаем значение начального пускового тока

$$I_1 = 1,4 I_{aном} = 1,4 \cdot 38,6 = 54 \text{ А.}$$

3. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{ном} = U_{ном} / I_{aном} = 220 / 38,6 = 5,7 \text{ Ом.}$$

4. Отношение начального пускового тока I_1 к току переключений при $Z = 3$

$$\lambda_1 = \sqrt[3]{U_{ном} / (I_1 \sum r)} = \sqrt[3]{220 / (54 \cdot 0,48)} = 2,05.$$

5. Сопротивления резисторов пускового реостата (2.51)

$$r_3 = \sum r (1 - \lambda) = 0,48 (2,05 - 1) = 0,50 \text{ Ом};$$

$$r_2 = r_3 \lambda = 0,50 \cdot 2,05 = 1,02 \text{ Ом};$$

$$r_1 = r_2 \lambda = 1,02 \cdot 2,05 = 2,09 \text{ Ом.}$$

Двигатели последовательного и смешанного возбуждения. Расчет пусковых сопротивлений для этих двигателей составляет определенные трудности, обусловленные нелинейностью их механических характеристик, т.е. отсутствием прямой пропорциональности между током возбуждения (током якоря) и магнитным потоком. По этой причине наибольшее применение получили графические методы расчета пусковых сопротивлений. Рассмотрим один из них, основанный на применении естественных универсальных механи-

ческих характеристик (см. рис. 2.10). Используя эти характеристики, строят график $n = f(I_a)$. Затем задаются величинами начального пускового тока $I_1 = (2,0+2,5)I_{aном}$ и тока переключений $I_2 = (1,1+1,3)I_{aном}$, откладывают их значения на оси абсцисс (рис. 2.17) и восстанавливают в этих точках перпендикуляры до пересечения с графиком $n = f(I_a)$ в точках 1 и 2. Проектируя эти точки на ось ординат, получают значения частот вращения, соответствующие этим точкам.

Ось абсцисс продолжают влево от начала координат и откладывают на ней шкалу сопротивлений. Отложив на этой оси величину сопротивления цепи якоря $\sum r$, в этой точке восстанавливают перпендикуляр и отмечают на нем точки A и B , соответствующие частотам вращения n_1 и n_2 . На оси сопротивлений (левая сторона оси абсцисс) отмечают две точки: точку C , соответствующую сопротивлению $R_1 = U/I_1$, и точку D , соответствующую сопротивлению $R_2 = U/I_2$.

Соединив точки A и C , а также точки B и D , получают две прямые линии AC и BD . Из точки C проводят ломаную линию $CEFGA$. Число горизонтальных отрезков этой линии (на рисунке их два) определяет количество ступеней пускового реостата, а длина этих отрезков в масштабе сопротивления m_R (Ом/мм) определяет сопротивление резисторов, составляющих эти ступени:

$$r_1 = m_R EF; \quad r_2 = m_R GA.$$

Если не удастся построить ломаную линию, приходящую в точку A , то, изменяя величину тока переключений I_2 , повторяют построение графика.

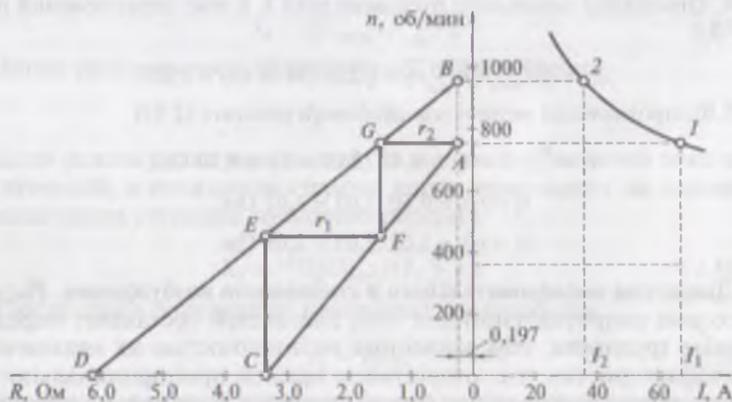


Рис. 2.17. Определение пусковых сопротивлений электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения графическим методом

Пример 2.10. Определить число ступеней пускового реостата и сопротивление резисторов этого реостата для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальными данными: $P_{ном} = 6$ кВт; $n_{ном} = 1000$ об/мин; $I_{aном} = 33,5$ А; $U_{ном} = 220$ В; $\sum r = 0,197$ Ом.

Решение. Принимаем начальный пусковой ток двигателя

$$I_1 = 2I_{aном} = 2 \cdot 33,5 = 67 \text{ А,}$$

ток переключений

$$I_2 = 1,08I_{aном} = 1,08 \cdot 33,5 = 36,2 \text{ А.}$$

Строим естественную характеристику $n = f(I_a)$ по данным табл. 2.2, полученной на основании универсальных характеристик (см. рис. 2.10).

Таблица 2.2

Характеристика двигателя

n^*	1,28	1,10	1,0	0,88	0,80	0,77	0,75
I^*	0,60	0,80	1,0	1,40	1,80	2,00	2,20
n , об/мин	1250	1100	1000	880	800	770	750
I_a , А	20,1	26,8	33,5	47	60,3	67	73,7

Частоты вращения, соответствующие токам I_1 и I_2 (см. рис. 2.17):

$$n_1 = 770 \text{ об/мин и } n_2 = 970 \text{ об/мин.}$$

Используя приведенную выше последовательность построений, строим все основные и вспомогательные графики. В результате получаем двухступенчатый пусковой реостат с резисторами на первой ступени $r_1 = 1,9$ Ом и $r_2 = 1,25$ Ом:

$$R_{ПР} = r_1 + r_2 = 1,9 + 1,25 = 3,15 \text{ Ом.}$$

Общее сопротивление цепи якоря на первой ступени реостата

$$R_{ПР1} + \sum r = 3,15 + 0,197 = 3,35 \text{ Ом.}$$

Следовательно, начальный пусковой ток

$$I_1 = 220/3,35 = 65,6 \text{ А,}$$

что менее чем на 2% отличается ранее принятого значения 67,0 А.

2.9. Регулирование частоты вращения электроприводов с двигателями постоянного тока

Частота вращения двигателей постоянного тока определяется выражением:

$$n = \frac{U - I_a(\sum r + r_{доб})}{c_e \Phi},$$

откуда следует, что регулирование частоты вращения возможно следующими способами: изменением сопротивления реостата $r_{доб}$

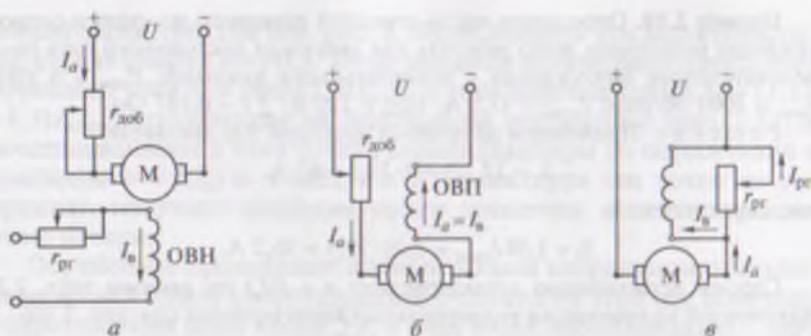


Рис. 2.18. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока независимого (параллельного) (а) и последовательного (б, в) возбуждения

в цепи якоря; изменением магнитного потока возбуждения Φ (изменением тока в цепи возбуждения I_b); изменением напряжения U , подводимого к обмотке якоря.

Способы регулирования оцениваются плавностью и диапазоном регулирования, экономичностью (величиной потерь и стоимостью применяемой аппаратуры).

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления реостата $r_{доб}$ в цепи якоря возможно только в сторону ее уменьшения «вниз» от номинальной (рис. 2.18, а и б). С увеличением сопротивления $r_{доб}$ уменьшается наклон искусственной механической характеристики к оси ординат, т. е. характеристика становится более мягкой, что ведет к увеличению перепада частоты вращения Δn при изменениях момента нагрузки M_c . Каждой механической характеристике соответствует точка устойчивой работы двигателя, полученная пересечением этой характеристики с механической характеристикой статического момента M_c рабочего механизма (рис. 2.19, а).

Для двигателя *последовательного* возбуждения механические характеристики с увеличением $r_{доб}$ также становятся более мягкими (рис. 2.19, б). Точки устойчивой работы двигателя последовательного возбуждения получены пересечением этих характеристик с механической характеристикой рабочего механизма с активным статическим моментом M_c .

Достоинства способа регулирования изменением сопротивления реостата $r_{доб}$ в цепи обмотки якоря — простота реализации и плавность (в зависимости от числа ступеней регулировочного реостата).

Недостатки — неэкономичность, обусловленная потерями в реостате $r_{доб}$, величина которых пропорциональна квадрату тока якоря ($I_a^2 r_d$), и, как следствие, уменьшение полезной мощности

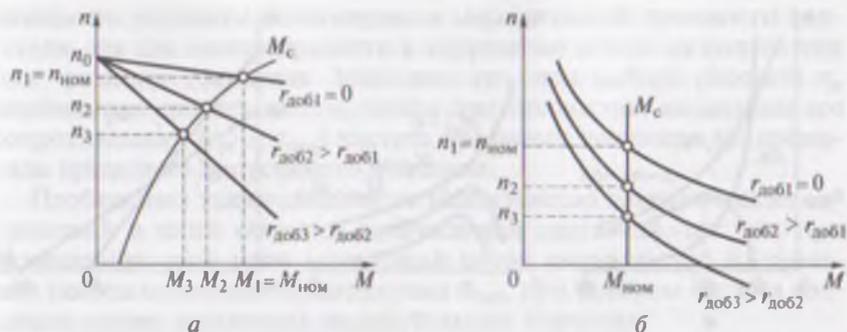


Рис. 2.19. Механические характеристики электропривода с двигателем независимого (а) и последовательного (б) возбуждения при регулировании частоты вращения изменением сопротивления в цепи якоря двигателя

двигателя за счет роста потерь; возможность регулировки частоты вращения только вниз от номинальной.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения Φ в двигателе независимого (параллельного) возбуждения реализуется посредством реостата $r_{рг}$ в цепи обмотки возбуждения (см. рис. 2.18, а). Так, при увеличении сопротивления этого реостата уменьшаются ток возбуждения и магнитный поток Φ , что сопровождается ростом частоты вращения [см. (2.1)]. Зависимость частоты вращения от потока возбуждения выражается *регулирующей характеристикой* двигателя $n = f(\Phi)$ при неизменных значениях нагрузки на валу двигателя $M_c = \text{const}$ и напряжении питания $U = \text{const}$.

Из уравнения механической характеристики двигателя независимого (параллельного) возбуждения (2.4):

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\sum r + r_d)}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

следует, что оба слагаемых, определяющих частоту вращения $n = n_0 - \Delta n$, являются гиперболическими функциями магнитного потока Φ . Что же касается графика $n = f(\Phi)$, то его получают вычитанием ординаты графика $\Delta n = f(\Phi)$ из ординаты графика $n_0 = f(\Phi)$ (рис. 2.20, а). Если уменьшать магнитный поток возбуждения Φ (увеличивать сопротивление резистора $r_{рг}$), то слагаемые n_0 и Δn будут увеличиваться. Но слагаемое $\Delta n = f(1/\Phi^2)$ возрастает быстрее слагаемого $n_0 = f(1/\Phi)$. Поэтому при некотором значении потока $\Phi = \Phi'$, соответствующем максимальной частоте вращения n_{max} , прирост слагаемого Δn начнет превышать прирост слагаемого n_0 . В итоге при дальнейшем уменьшении потока $\Phi < \Phi'$ частота вращения двигателя начнет убывать (см. рис. 2.20, а).

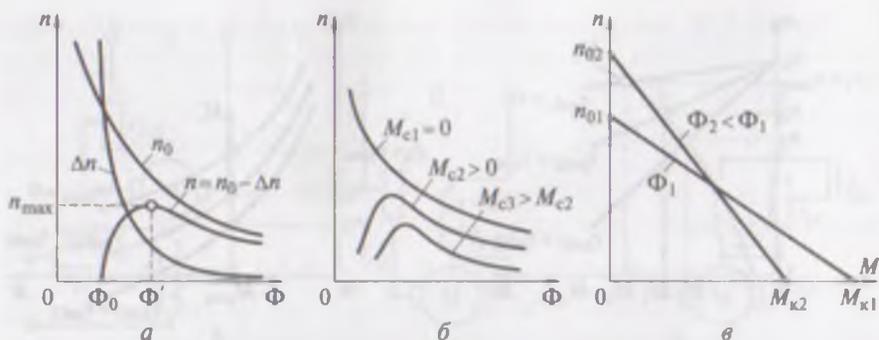


Рис. 2.20. Регулирование частоты вращения изменением основного магнитного потока двигателя независимого (параллельного) возбуждения

Величина магнитного потока Φ' , соответствующая частоте вращения n_{\max} , определяется выражением

$$\Phi' = \frac{2M_c \sum r}{9,55c_e U}. \quad (2.52)$$

При магнитном потоке возбуждения $\Phi_0 = 0,5\Phi'$ якорь двигателя останавливается ($n = 0$). Объясняется это тем, что при таком малом магнитном потоке ток якоря достигает значения, при котором падение напряжения в цепи якоря превышает противо-ЭДС E_a . Таким образом, при постепенном увеличении магнитного потока возбуждения Φ двигателя, нагруженного статическим моментом M_c , при магнитном потоке $\Phi < \Phi_0$ якорь двигателя остается неподвижным и лишь при потоке $\Phi > \Phi_0$ двигатель начинает вращение, в якоре наводится противо-ЭДС и процессы в двигателе начинают соответствовать зависимостям выражения (2.4). При этом частота вращения якоря вначале увеличивается до значения n_{\max} , при котором падение напряжения в якоре составляют половину подведенного к якору напряжения:

$$I_a \sum r = 0,5U,$$

т.е. напряжение сети поровну делится между падением напряжения в цепи якоря и противо-ЭДС E_a . Затем при дальнейшем росте потока Φ частота вращения убывает.

Величины максимальной частоты вращения n_{\max} и соответствующего ему потока Φ' зависят от статического момента нагрузки M_c : чем больше нагрузка M_c , тем меньше n_{\max} и больше Φ' (рис. 2.20, б).

В режиме холостого хода или при небольшом нагрузочном моменте на валу двигателя и небольшом потоке возбуждения Φ максимальная частота вращения n_{\max} во много раз превышает номинальную частоту вращения двигателя $n_{\text{ном}}$, что является недопус-

тимым по условиям коммутации и механической прочности двигателя, так как может привести к «круговому огню» на коллекторе или «разносу» двигателя. Учитывая это, при выборе реостата $r_{\text{рг}}$ необходимо следить за тем, чтобы при полностью введенном его сопротивлении ($r_{\text{рг}} = r_{\text{max}}$) частота вращения двигателя не превысила предельно допустимого значения.

Необходимо также следить за надежностью электрических соединений в цепи обмотки возбуждения двигателя, так как при размыкании этой цепи магнитный поток уменьшается до значения потока остаточного магнетизма $\Phi_{\text{ост}}$, при котором частота вращения может достигнуть недопустимого значения.

Регулировка тока возбуждения посредством реостата в двигателях независимого (параллельного) возбуждения происходит не в силовой цепи (цепи якоря), а в цепи возбуждения, где ток в двигателях большой и средней мощности не превышает 10—15 % от номинального тока якоря. В этих условиях потери в реостате $r_{\text{рг}}$ незначительны. Поэтому рассматриваемый способ регулирования частоты вращения экономичен.

Анализ уравнения механической характеристики двигателя постоянного тока [см. (2.4)] показывает, что пограничная частота вращения n_0 обратно пропорциональна магнитному потоку Φ . В то же время электромагнитный момент двигателя независимого (параллельного) возбуждения в режиме короткого замыкания ($n = 0$) $M_{\text{к}}$ пропорционален магнитному потоку возбуждения

$$M_{\text{к}} = c_{\text{м}} I_{\text{ак}} \Phi = c_{\text{м}} (U / \sum r) \Phi. \quad (2.53)$$

Поэтому при ослаблении магнитного потока пограничная частота увеличивается, а момент короткого замыкания $M_{\text{к}}$ уменьшается. Таким образом, при изменении магнитного потока Φ меняется угол наклона механических характеристик двигателя (характеристики перекрещиваются), т.е. меняется их жесткость (рис. 2.20, в), что может создать трудности в процессе работы электропривода.

Рассмотренный способ регулирования частоты вращения прост в реализации и применяется при необходимости регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока «*вверх*» от номинальной. Однако значительное уменьшение тока возбуждения ограничено, во-первых, как уже отмечалось, предельно допустимой частотой вращения по условиям коммутации и механической прочности двигателя и, во-вторых, значительное размагничивание двигателя при уменьшении тока возбуждения может привести к «опрокидыванию» магнитного поля машины, т.е. перемагничиванию ее полюсов. Причиной этому явлению служит действие реакции якоря по поперечной оси. Обычно допустимый диапазон регулирования частоты вращения изменением тока возбуждения указывается в каталоге на конкретный тип двигателя.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого к цепи якоря напряжения может происходить только «вниз» от номинальной частоты вращения, так как подавать на двигатель напряжение выше номинального недопустимо по условиям коммутации и электрической прочности изоляции.

Для выяснения вопроса о влиянии напряжения питания цепи якоря U на вид механических характеристик обратимся к уравнению механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\sum r + r_{\text{доб}})}{c_e c_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n,$$

из которого следует, что со снижением напряжения U пограничная частота n_0 уменьшается пропорционально этому снижению. Что же касается перепада частоты вращения Δn , вызванного нагрузкой двигателя, то он не зависит от напряжения U . Из этого следует, что с уменьшением напряжения U искусственные механические характеристики смещаются вниз по оси ординат, оставаясь параллельными естественной характеристике, при этом жесткость механических характеристик не изменяется.

Искусственные механические характеристики, полученные изменением напряжения питания цепи якоря двигателя, представлены на рис. 2.21, а.

Основным способом изменения напряжения, подводимого к двигателю в современном электроприводе, является его питание от управляемого преобразователя напряжения ПН. Питание цепей якоря и возбуждения в таком электроприводе должно быть отдельным (независимым), чтобы изменение напряжения в цепи якоря не сопровождалось изменением напряжения в цепи возбуждения.

Возможно также регулирование подводимого напряжения при питании двигателя от индивидуального генератора постоянного тока в системе «генератор—двигатель» (см. 8.2).

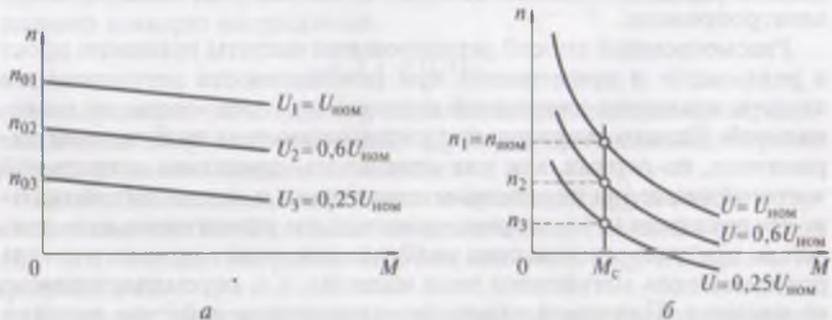


Рис. 2.21. Механические характеристики электропривода с двигателями независимого (а) и последовательного (б) возбуждения при изменении подводимого к цепи якоря напряжения

Достоинствами способа регулирования частоты вращения изменением напряжения являются: стабильность механических характеристик, плавность и широкий диапазон регулирования. Что же касается экономичности, то сам процесс регулирования экономичен, так как не сопровождается значительными потерями. Однако для его реализации требуются специальные электронные устройства. Но, несмотря на это, способ управления двигателями постоянного тока с использованием регулируемых преобразователей получил широкое применение, так как эти устройства обеспечивают не только регулирование частоты вращения, но и «мягкий» пуск двигателей без пусковых рывков.

При совместной работе нескольких однотипных двигателей последовательного возбуждения частоту вращения можно регулировать изменением схемы их включения (рис. 2.22). Так, при параллельном включении двигателей (верхнее положение рубильника) каждый из них оказывается под полным напряжением сети U , а при последовательном включении (нижнее положение рубильника) каждый из двигателей оказывается под напряжением $U/2$.

Если количество двигателей более двух, то возможно большее число вариантов их включения с более плавным переходом от минимального напряжения к максимальному. Этот способ регулирования применяется в магистральных электровозах, где одновременно работает несколько (шесть и более) тяговых двигателей, что позволяет получить большое число вариантов их включения.

2.10. Импульсное регулирование электропривода с двигателем постоянного тока

Принцип импульсного регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока состоит в том, что цепь якоря двигателя периодически подключается к сети напряжением U_n , а затем отключается (рис. 2.23, а). Выполняется это посредством ключа SA (обычно бесконтактного). Обмотка возбуждения ОВ двигателя при этом остается постоянно включенной в сеть постоянного тока на напряжение U_n и возбуждение двигателя не прерывается. На диаграмме рис. 2.23, б импульсы напряжения имеют прямоугольную форму высотой $U_{ном}$. При этом импульсы продолжительностью t_n чередуются с паузами продолжительностью t_p . За время импульса

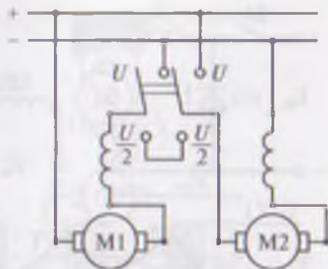


Рис. 2.22. Регулирование напряжения, подводимого к двигателям последовательного возбуждения методом переключения схем

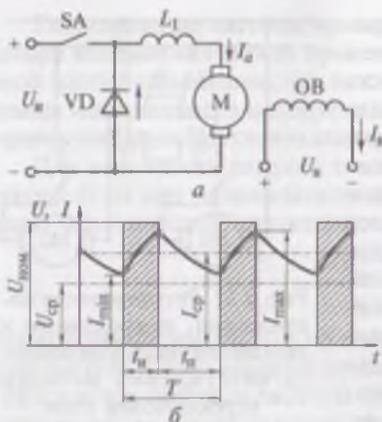


Рис. 2.23. Импульсное регулирование частоты вращения электропривода с двигателем постоянного тока

этом цепь якоря оказывается под некоторым постоянно действующим средним напряжением $U_{\text{ср}}$, величина которого, в

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ном}} t_n / T = \gamma U_{\text{ном}}, \quad (2.54)$$

где $\gamma = t_n / T$ — коэффициент управления (скважность).

Частота вращения двигателя при импульсном регулировании, об/мин,

$$n = \frac{\gamma U_{\text{ном}} - I \sum r}{c_e \Phi}. \quad (2.55)$$

Дроссель индуктивностью L_1 совместно с индуктивностью якоря $L_{\text{я}}$ снижает пульсации тока в цепи якоря. Если параметры схемы выбраны так, что пульсация тока не превышает 10% его номинального значения, то работа двигателя при импульсном управлении по величине потерь в цепи якоря практически не отличается от работы при постоянном напряжении. При большем значении пульсаций тока в цепи якоря возникают дополнительные потери.

2.11. Исполнительные двигатели постоянного тока

В системах автоматического управления электроприводом широко применяются управляемые электрические двигатели небольшой мощности, посредством которых происходит преобразование электрического сигнала (напряжения управления) в механическое перемещение — вращение вала. Такие двигатели называют *исполнительными*.

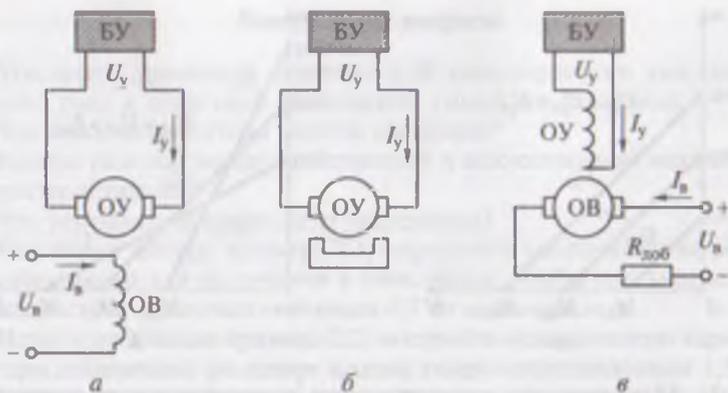


Рис. 2.24. Исполнительные двигатели постоянного тока с якорным (а, б) и полюсным (в) способами управления

К исполнительным двигателям предъявляется ряд особых требований, обусловленных спецификой их работы. Эти двигатели практически никогда не работают в номинальном режиме; для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы. Исполнительные двигатели должны обладать широким диапазоном регулирования частоты вращения. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых они почти постоянно находятся, исполнительные двигатели обычно выполняют малоинерционными. Очень важным требованием к исполнительным двигателям является *отсутствие самохода* — самоторможение двигателя при снятии сигнала управления. Механические характеристики исполнительных двигателей должны быть прямолинейными, пусковой момент максимальным.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с независимым электромагнитным возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. В исполнительных двигателях постоянного тока с электромагнитным возбуждением возможно применение как якорного, так и полюсного управления. В двигателях с возбуждением постоянными магнитами — только якорное управление (рис. 2.24).

При **якорном управлении** исполнительного двигателя с электромагнитным возбуждением (рис. 2.24, а и б) обмотка полюсов является обмоткой возбуждения ОВ, а обмотка якоря — обмоткой управления ОУ. Во время работы исполнительного двигателя к обмотке возбуждения подводится неизменное напряжение U_B , а на обмотку управления (обмотку якоря) подается управляющий сигнал (напряжение управления) U_y .

При якорном управлении механические характеристики прямолинейны и параллельны друг другу (рис. 2.25, а), а поэтому жесткость характеристик при разных значениях напряжения управле-

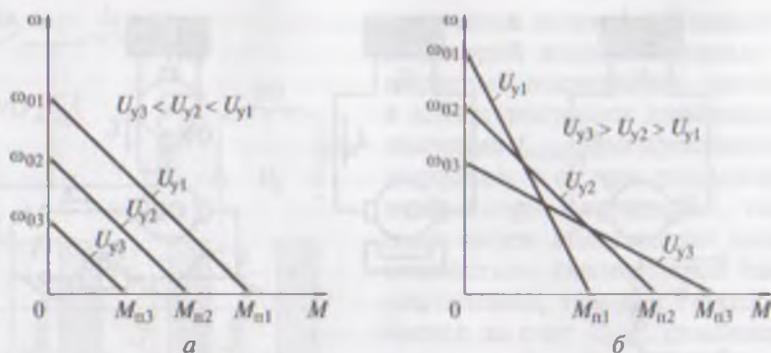


Рис. 2.25. Механические характеристики исполнительного двигателя постоянного тока при якорном (а) и полюсном (б) способах управления

ния одинакова; максимальный вращающий момент соответствует пуску двигателя, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к исполнительным двигателям.

При **полюсном управлении** обмоткой возбуждения является обмотка якоря (для ограничения тока в цепь этой обмотки включают резистор $R_{доб}$), а обмоткой управления является обмотка полюсов. При полюсном управлении механические характеристики хотя и прямолинейны, но не параллельны друг другу: с увеличением напряжения управления жесткость характеристик уменьшается. Существенный недостаток полюсного управления — возможность самохода. Причиной этому является магнитный поток остаточного магнетизма, под действием которого при снятии сигнала управления с обмотки возбуждения в двигателе продолжает действовать вращающий момент. Для устранения этого самохода при полюсном управлении необходимо на валу двигателя создать постоянно действующую механическую нагрузку, удерживающую ротор от самопроизвольного вращения при отсутствии сигнала управления.

Достоинством полюсного управления является независимость максимальной выходной механической мощности исполнительного двигателя от напряжения управления. Из этого следует, что даже при небольшом значении напряжения управления возможно управление двигателем значительной мощности. Другим достоинством полюсного управления является небольшая мощность управления, обычно не превышающая от 10 до 30 % от потребляемой двигателем мощности. Это позволяет применять в цепи управления исполнительных двигателей с полюсным управлением усилители мощности с небольшим коэффициентом усиления. При изменении сигнала управления жесткость механических характеристик исполнительных двигателей при полюсном управлении также меняется (рис. 2.25, б). Наибольшему значению сигнала управления соответствует максимальный пусковой момент.

Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока и объясните физический смысл его слагаемых.
2. Что такое пограничная частота вращения?
3. Какова разница между естественной и искусственной механическими характеристиками?
4. Что учитывает коэффициент нагревания?
5. Используя данные примера 2.1, определите сопротивление резистора, необходимого для включения в цепь якоря, чтобы при номинальной нагрузке частота вращения составила 0,7 от номинальной.
6. Используя данные примера 2.2, постройте механическую характеристику при добавочном резисторе в цепи якоря сопротивлением 1,5 Ом.
7. Какие тормозные режимы возможны в двигателе независимого возбуждения?
8. При каких условиях наступает режим рекуперативного торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
9. Используя данные примера 2.4, определите сопротивление резистора в цепи якоря при динамическом торможении, если началу торможения соответствует частота вращения 2000 об/мин.
10. Почему механические характеристики двигателя последовательного возбуждения криволинейны?
11. Почему двигатель последовательного возбуждения нельзя включать в сеть без нагрузки на валу?
12. Что представляют собой универсальные механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения?
13. Можно ли получить в двигателе последовательного возбуждения режим генераторного рекуперативного торможения?
14. Объясните назначение пускового реостата.
15. Каковы достоинства и недостатки регулирования частоты вращения изменением сопротивления резистора в цепи якоря?
16. Как определить координаты точки устойчивой работы приводного двигателя?
17. Чем ограничивается наибольшая частота вращения двигателя?
18. Каковы достоинства и недостатки регулирования частоты вращения изменением тока возбуждения?
19. Влияет ли величина магнитного потока возбуждения на жесткость механических характеристик?
20. Как регулируют величину магнитного потока возбуждения в двигателях последовательного возбуждения?
21. Каково влияние напряжения в цепи якоря на вид механических характеристик двигателя постоянного тока?
22. Как осуществляется импульсное регулирование частоты вращения двигателя?
23. Каковы достоинства и недостатки якорного и полюсного способов управления исполнительными двигателями?

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Основные понятия и соотношения для трехфазных асинхронных двигателей

Трехфазные асинхронные двигатели составляют основу современного электропривода. От двигателей постоянного тока их отличает простота конструкции, надежность, высокие технико-экономические показатели. Но наряду с этим асинхронные двигатели уступают двигателям постоянного тока по регулировочным свойствам. Применение в электроприводе управляемых электронных преобразователей (см. 8.5 и 8.6) способствует преодолению этого недостатка асинхронных двигателей.

По конструкции ротора асинхронные двигатели разделяются на двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Короткозамкнутый ротор (рис. 3.1, а) не имеет выводов, так как его обмотка выполнена в виде короткозамкнутой клетки: ряд медных или алюминиевых стержней, расположенных по периметру сердечника ротора, замкнуты с двух сторон кольцами. Конструкция этих двигателей предельно проста, что обеспечивает им высокую надежность, простоту обслуживания и невысокую стоимость.

Фазный ротор (рис. 3.1, б) имеет трехфазную катушечную обмотку, выполненную по типу обмотки статора. Одни концы этой обмотки соединены в нулевую точку, т. е. обмотка соединена «звездой», а другие — подключены к трем контактным кольцам, изо-

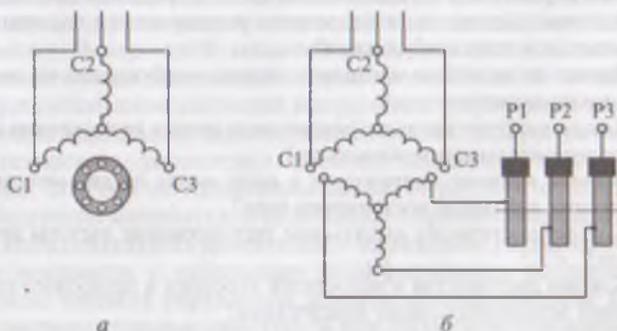


Рис. 3.1. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым (а) и фазным (б) роторами

лированным друг от друга и от вала. На кольца наложены щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой ротора. При такой конструкции фазного ротора возможно присоединение к обмотке ротора пускового или регулируемого реостата, позволяющего изменять электрическое сопротивление цепи ротора.

Асинхронные двигатели с фазным ротором более сложны, а следовательно, имеют более высокую стоимость, к тому же они нуждаются в периодическом уходе. По этим причинам двигатели с фазным ротором применяют лишь в случаях, когда двигатели с короткозамкнутым ротором по своим пусковым или регулируемым свойствам неприменимы.

Ротор асинхронной машины и вращающееся магнитное поле статора вращаются с разными скоростями, т.е. они вращаются *асинхронно*. В этих условиях вращающееся поле статора индуцирует ЭДС в обмотке ротора. В рабочих режимах разница в частотах вращения поля статора и ротора невелика и составляет лишь несколько процентов. При рассмотрении рабочих процессов асинхронного двигателя обычно пользуются понятием *скольжения* s , измеряемого в процентах или долях единицы (например, 2%, или 0,02):

$$s = (n_1 - n)/n_1, \quad (3.1)$$

откуда

$$n = n_1(1 - s), \quad (3.2)$$

где n_1 — синхронная частота вращения, т.е. частота вращения магнитного поля статора,

$$n_1 = 60f_1/p, \quad (3.3)$$

f_1 — частота переменного тока в сети, Гц; p — число пар полюсов в обмотке статора; n — частота вращения ротора ($n \neq n_1$).

При частоте переменного тока 50 Гц (промышленная частота) возможны следующие синхронные частоты вращения:

Число пар полюсов p	1	2	3	4	5	6
n_1 (об/мин).....	3000	1500	1000	750	600	500

Для трехфазных асинхронных двигателей справедливы следующие соотношения и зависимости.

1. Момент на валу двигателя в номинальном режиме, Н·м,

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}}, \quad (3.4)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя, кВт; $n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Номинальная мощность двигателя указана в каталоге, что же касается номинальной частоты вращения, то она либо указана в каталоге, либо в нем приведено номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$, тогда номинальную частоту вращения определяют по формуле (3.2).

2. Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется выражением, Н·м,

$$M = \pm \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2'/s)^2 (x_1 + x_2')^2]}, \quad (3.5)$$

где r_2' и x_2' — приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора, Ом; r_1 и x_1 — активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, Ом.

Число фаз в обмотке статора для трехфазного двигателя принимают $m_1 = 3$. Знак плюс в (3.5) соответствует значениям скольжения $s > 0$ (двигательный режим), а знак минус — значениям скольжения $s < 0$ (генераторный режим).

Значения сопротивлений обмоток асинхронного двигателя в каталогах не приводятся, что создает трудности при пользовании формулой (3.5) для расчета электромагнитного момента. Поэтому в практических расчетах пользуются упрощенной формулой

$$M \approx \frac{2 M_{\max}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}. \quad (3.6)$$

Возможная неточность при использовании этой формулы для расчета момента в пределах рабочего участка механической характеристики ($s < s_{\text{кр}}$) не превышает значений, допустимых для практических расчетов. Здесь $s_{\text{кр}}$ — критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту M_{\max} .

3. Номинальное значение тока в фазной обмотке статора, А,

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{m_1 U_1 \cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (3.7)$$

где $P_{\text{ном}}$ — мощность, потребляемая двигателем из сети в номинальном режиме, кВт,

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}}, \quad (3.8)$$

$\eta_{\text{ном}}$ — КПД двигателя в номинальном режиме; U_1 — напряжение, подведенное к обмотке статора (фазное значение), В; $\cos \varphi_{\text{ном}}$ — коэффициент мощности двигателя в номинальном режиме.

4. В каталогах на асинхронные двигатели приводятся значения ряда параметров в виде *кратности* по отношению к номинальному значению этого параметра:

кратность максимального момента $\lambda_M = M_{\max} / M_{\text{ном}}$;

кратность пускового момента $\lambda_M = M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$;

кратность пускового тока $\lambda_i = I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$;

кратность минимального момента $\lambda_{\text{мин}} = M_{\text{мин}} / M_{\text{ном}}$.

5. Рассчитав по (3.5) или (3.6) номинальный момент $M_{\text{ном}}$ и номинальное значение тока статора (3.7) асинхронного двигателя, используя данные каталога, определяют:

максимальный момент

$$M_{\max} = M_{\text{ном}} \lambda_m; \quad (3.9)$$

пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} \lambda_{\text{п}}; \quad (3.10)$$

пусковой ток

$$I_{\text{п}} = I_{\text{ном}} \lambda_{\text{т}}. \quad (3.11)$$

6. Критическое скольжение асинхронного двигателя

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r'_p}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}, \quad (3.12)$$

где

$$x_k = x_1 + x'_2.$$

Можно также воспользоваться упрощенной формулой

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}). \quad (3.13)$$

Номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$ обычно приводится в каталогах на асинхронные двигатели.

Пример 3.1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А180S4 по каталогу имеет номинальные данные: напряжение питания 380/660 В при частоте тока 50 Гц; полезная мощность 22 кВт; скольжение 2,0 %; КПД 90 %, коэффициент мощности 0,9; кратность пускового момента 1,4; кратность максимального момента 2,2; кратность пускового тока 7,0. Требуется определить: частоту вращения ротора и силу тока в обмотке статора при номинальной нагрузке двигателя, пусковой ток и пусковой момент, максимальный момент и соответствующую ему критическую частоту вращения $n_{\text{кр}}$.

Решение. 1. Двигатель четырехполюсный (последняя цифра в обозначении типоразмера), т.е. при частоте тока 50 Гц синхронная частота вращения $n_1 = 1500$ об/мин, при номинальном скольжении 2 %, т.е. 0,02, номинальная частота вращения (3.2)

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 1500(1 - 0,02) = 1470 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент (3.4)

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 22 / 1470 = 143 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Потребляемая из сети мощность в номинальном режиме (3.8)

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 22 / 0,9 = 24,44 \text{ кВт.}$$

4. Ток статора в номинальном режиме (3.7)

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}} \cdot 10^3}{m_1 U_1 \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{24,44 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,9} = 23,8 \text{ А.}$$

5. Максимальный момент (3.9)

$$M_{\max} = M_{\text{ном}} \lambda_m = 143 \cdot 2,2 = 314,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Пусковой момент (3.10)

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} \lambda_{\text{п}} = 143 \cdot 1,4 = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Пусковой ток (3.11)

$$I_{\text{п}} = I_{\text{ном}} \lambda_{\text{т}} = 23,8 \cdot 7 = 167 \text{ А}.$$

8. Критическое скольжение (3.13)

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,02(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,083.$$

9. Критическая частота вращения (3.2)

$$n_{\text{кр}} = n_1 (1 - s_{\text{кр}}) = 1500(1 - 0,083) = 1375 \text{ об/мин}.$$

В выражении электромагнитного момента асинхронного двигателя (3.5) единственной *переменной* величиной, влияющей на электромагнитный момент M , является скольжение s . Поэтому, задавшись рядом значений скольжения и рассчитав для каждого из них величину момента, а затем по (3.2) пересчитав эти значения скольжения на частоту вращения ротора n , получают данные для построения механической характеристики асинхронного двигателя $n = f(M)$. Анализируя полученную характеристику (рис. 3.2), видим, что в асинхронном двигателе возможно три режима работы:

- *двигательный (основной) режим* — при частоте вращения от 0 до n_1 (синхронная частота вращения);

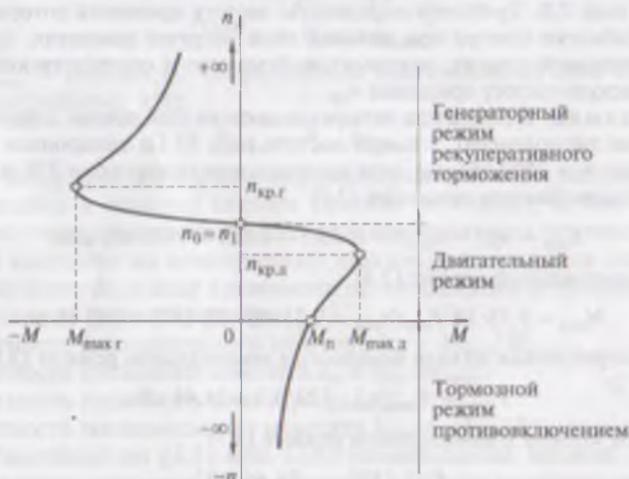


Рис. 3.2. Режимы работы асинхронного двигателя

- *генераторный режим* рекуперативного торможения при частоте вращения от n_1 до $+\infty$;
- *тормозной режим* противовключением — при частоте вращения от 0 до $-\infty$.

На механической характеристике отмечены следующие характерные точки:

- M_n — пусковой момент асинхронного двигателя;
- $M_{\max д}$ — максимальный момент двигательного режима;
- $n_{кр д}$ — критическая частота вращения двигательного режима, т.е. частота вращения, соответствующая максимальному моменту в двигательном режиме $M_{\max д}$;
- $M_{\max г}$ — максимальный момент генераторного режима (режима рекуперативного торможения);
- $n_{кр г}$ — критическая частота вращения генераторного режима, т.е. частота вращения, соответствующая максимальному моменту в генераторном режиме $M_{\max г}$;
- $n_0 = n_1$ — пограничная частота вращения, соответствующая переходу двигательного режима асинхронной машины в генераторный; представляет собой частоту вращения идеального холостого хода двигателя.

3.2. Механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном режиме

Участок механической характеристики *двигательного режима* $M = f(n)$ расположен в диапазоне частот вращения $0 \leq n \leq n_1$ (рис. 3.3) и имеет пять характерных точек:

- точка *A* с координатами $n = n_1$ и $M = 0$ (режим идеального холостого хода);
- точка *B* с координатами $n = n_{ном}$ и $M = M_{ном}$ (режим номинальной нагрузки);
- точка *C* с координатами $n = n_{кр}$ и $M = M_{\max}$ (критический режим работы);
- точка *K* с координатами $n = 0$ и $M = M_n$ (режим короткого замыкания — пуск двигателя);
- точка *E* — минимальный момент M_{\min} .

Участок *AC* называют *рабочим участком* механической характеристики, так как устойчивая работа асинхронного двигателя возможна

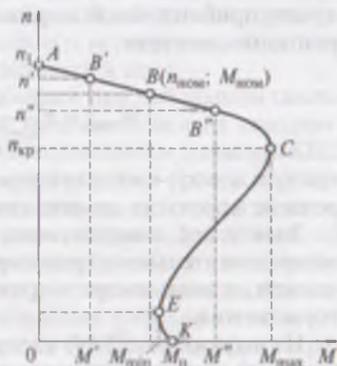


Рис. 3.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя в основном (двигательном) режиме

только на этом участке. Допустим, асинхронный двигатель работал в номинальном режиме точки B с координатами $n_{\text{ном}}$ и $M_{\text{ном}}$. Затем произошло некоторое *уменьшение* статического момента нагрузки M_c до значения M'_c . Это привело к увеличению частоты вращения ротора двигателя до значения n' и уменьшению электромагнитного момента до M' .

При этом устойчивая работа восстановится, но в режиме точки B' . Если же произошло *увеличение* статического момента нагрузки M_c до значения M'' , то это вызовет уменьшение частоты вращения до значения n'' , а электромагнитный момент увеличится до значения M'' , и устойчивая работа двигателя вновь восстановится, но в режиме точки B'' . При дальнейшем увеличении нагрузки устойчивая работа не нарушится. Но в режиме точки C , когда электромагнитный момент достигнет максимального значения M_{max} , наступит предел устойчивой работы, так как дальнейшее увеличение нагрузки вызовет уменьшение электромагнитного момента двигателя, что приведет к уменьшению частоты вращения, и так до тех пор, пока ротор двигателя не остановится (точка K). При этом наступит режим короткого замыкания. Таким образом, устойчивая работа асинхронного двигателя возможна лишь при статическом моменте нагрузки $M < M_{\text{max}}$. Для того чтобы работа двигателя была устойчивой и случайные кратковременные перегрузки не вызывали нарушения работы электропривода, необходимо, чтобы двигатель обладал *перегрузочной способностью* $\lambda_m = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$, обычно $\lambda_m = 1,7+3$.

Подставив значение критического скольжения из (3.12) в (3.5) после ряда преобразований, пренебрегая величиной активного сопротивления обмотки статора, которое в несколько раз меньше суммы индуктивных сопротивлений статора и ротора ($x_1 + x'_2$), получим приближенное выражение максимального момента асинхронного двигателя

$$M_{\text{max}} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x'_2)} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 x_2} \quad (3.14)$$

где $x_k = x_1 + x'_2$ — индуктивное сопротивление обмоток двигателя в режиме короткого замыкания.

Знак плюс в выражениях (3.12) и (3.14) соответствует основному (двигательному) режиму и тормозному режиму противовключения, а знак минус — режиму генераторного рекуперативного торможения.

Из выражения (3.14) следует, что максимальный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату подводимого к двигателю напряжения (U_1^2), и этот момент не зависит от активного сопротивления ротора r'_2 . В то же время критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ (критическая частота вращения $n_{\text{кр}}$), как это видно из выражения (3.12), пропорционально активному сопротивлению ротора r'_2 , но

не зависит от напряжения питания двигателя U_1 . Из этого следует, что если увеличивать активное сопротивление ротора r_2' при неизменном напряжении питающей сети U_1 , максимальный момент асинхронного двигателя M_{\max} будет оставаться неизменным, но критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ (критическая частота вращения $n_{\text{кр}}$) будет увеличиваться.

На рис. 3.4 показаны механические характеристики асинхронного двигателя для ряда нарастающих значений активного сопротивления ротора $r_{21}' < r_{22}' < r_{23}' < r_{24}'$. Из этого рисунка видим, что с ростом активного сопротивления ротора r_2' уменьшается угол наклона рабочего участка механических характеристик двигателя к оси ординат, одновременно протяженность этих участков увеличивается.

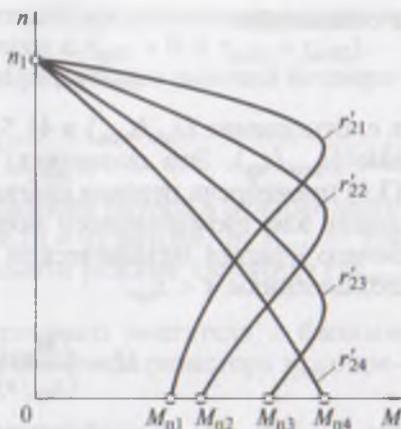


Рис. 3.4. Механические характеристики асинхронного двигателя в основном (двигательном) режиме при разных значениях активного сопротивления ротора $r_{21}' < r_{22}' < r_{23}' < r_{24}'$

При сопротивлении ротора r_{24}' вся механическая характеристика двигательного режима становится рабочим участком, а критическая частота вращения $n_{\text{кр}} = 0$.

В связи с тем что максимальный момент M_{\max} , а следовательно, и перегрузочная способность двигателя $\lambda_m = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ пропорциональны квадрату подводимого к двигателю напряжения U_1^2 [см. (3.14)], причиной нарушения устойчивой работы асинхронного двигателя может явиться не только его перегрузка, но и возможное уменьшение напряжения в питающей сети.

Обычно асинхронные двигатели работают при небольшом скольжении s (с частотой вращения, мало отличающейся от синхронной). Объясняется это, главным образом, стремлением повысить КПД двигателя, так как электрические потери в обмотке ротора пропорциональны скольжению. Это в первую очередь относится к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Для двигателей общего применения современных серий номинальное скольжение составляет $s_{\text{ном}} = 6,0 + 1,5\%$. При этом с ростом номинальной мощности двигателя его номинальное скольжение уменьшается.

Если сравнить величины отношений $(s/s_{\text{кр}})$ и $(s_{\text{кр}}/s)$ при работе двигателя в пределах номинального скольжения ($s \leq s_{\text{ном}}$), то окажется, что первое отношение во много раз меньше второго. Например, для двигателя 4A180S4 (см. пример 3.1) отношение

$$s_{\text{ном}}/s_{\text{кр}} = 0,02/0,083 = 0,24, \quad (3.15)$$

а отношение

$$s_{кр}/s_{ном} = 0,083/0,02 = 41,5, \quad (3.15a)$$

т.е. отношение ($s_{кр}/s_{ном}$) в $41,5/0,24 = 173$ раза превышает отношение ($s_{ном}/s_{кр}$). Это позволяет, с целью упрощения, в выражении (3.6) пренебречь первым слагаемым знаменателя и получить выражение электромагнитного момента, являющегося уравнением рабочего участка механической характеристики, соответствующего скольжениям $s < s_{кр}$,

$$M = \frac{2M_{max}}{(s_{кр}/s)} = \frac{2sM_{max}}{s_{кр}} = Ks, \quad (3.16)$$

где $K = 2M_{max}/s_{кр}$ — коэффициент, постоянный для данного двигателя.

Из выражения (3.16) следует, что рабочий участок механической характеристики представляет собой *прямую линию* и для его построения необходимы координаты двух точек: одной из них является точка холостого хода с координатами n_1 и $M = 0$, а в качестве другой можно использовать точку номинального режима работы двигателя с координатами $n_{ном}$ и $M_{ном}$. Построенная по этим точкам характеристика является *естественной механической характеристикой* асинхронного двигателя (рис. 3.5, график с $r_{доб1} = 0$).

Принято считать рабочий участок естественной механической характеристики прямолинейным в диапазоне частот вращения ротора от синхронной n_1 до частоты вращения, соответствующей статическому нагрузочному моменту $M_c = 0,7M_{ном}$.

Нетрудно заметить, что жесткость рабочего участка естественной механической характеристики асинхронного двигателя зависит от критического скольжения $s_{кр}$ (критической частоты вращения $n_{кр}$), а следовательно, от

активного сопротивления ротора r_2' [см. (3.12)]: чем меньше r_2' , тем меньше $s_{кр}$, а следовательно, жестче механическая характеристика.

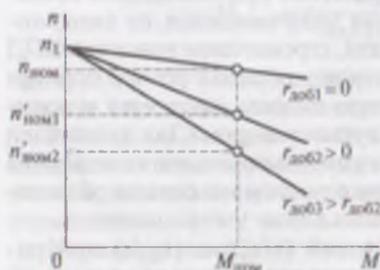


Рис. 3.5. Естественная и искусственные механические характеристики электропривода с асинхронным двигателем

В асинхронных двигателях с фазным ротором (см. рис. 3.1, б) конструкция ротора допускает включение в цепь обмотки ротора резистора сопротивлением $r_{доб}$. При этом активное сопротивление ротора:

$$R_2 = r_2 + r_{доб},$$

что позволяет получать в этих двигателях *искусственные механические характеристики* (рис. 3.5, графики с $r_{\text{доб}2} > 0$ и $r_{\text{доб}3} > r_{\text{доб}2}$).

Активное сопротивление обмотки ротора при рабочей температуре, Ом,

$$r_2 = s_{\text{ном}} E_2 / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}), \quad (3.17)$$

где E_2 — ЭДС (линейная) обмотки фазного ротора в режиме холостого хода ($I_2 = 0$) при неподвижном ($n = 0$) роторе, В; $I_{2\text{ном}}$ — ток (фазный) обмотки ротора в номинальном режиме двигателя ($M_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$), А.

Критическое скольжение асинхронного двигателя с фазным ротором при введении в цепь ротора внешнего резистора $r_{\text{доб}}$ определяется по формуле:

$$s_{\text{кр}} = \frac{(r_2 + r_{\text{доб}}) k_c^2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}, \quad (3.18)$$

где k_c — коэффициент трансформации между обмотками статора и ротора асинхронного двигателя с фазным ротором

$$k_c = 0,95 U_{1\text{н}} / E_2. \quad (3.19)$$

Значения E_2 и $I_{2\text{ном}}$ приводятся в каталогах на асинхронные двигатели с фазным ротором.

В связи с тем что рабочие участки механических характеристик асинхронных двигателей принято считать прямолинейными, то по аналогии с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения [см. (2.1)] можно сделать вывод: при заданном значении статического момента нагрузки на вал асинхронного двигателя отношение скольжения s к соответствующему сопротивлению цепи ротора данного двигателя является величиной постоянной:

$$\frac{s_e}{r_2} = \frac{s_{H1}}{r_2 + r_{\text{доб}1}} = \dots = \frac{s_{HN}}{r_2 + r_{\text{доб}N}} = \text{const.} \quad (3.20)$$

Решая это уравнение относительно сопротивления $r_{\text{доб}}$, получим формулу для расчета сопротивления добавочного резистора, необходимого для включения в цепь фазного ротора для получения заданной частоты вращения n_n (заданного скольжения s_n) в режиме искусственной механической характеристики при той же нагрузке, что и в режиме естественной механической характеристики:

$$r_{\text{доб}} = r_e \left(\frac{s_n}{s_e} - 1 \right). \quad (3.21)$$

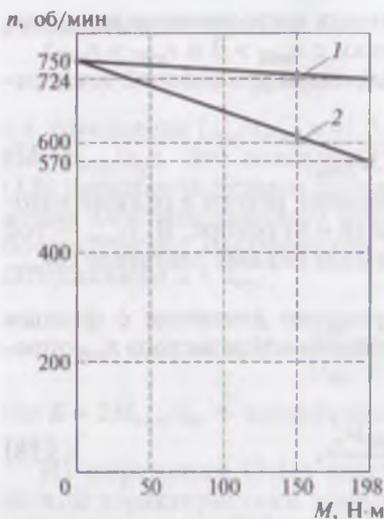


Рис. 3.6. Механические характеристики электропривода с двигателем 4АК200S8 (к примеру 3.2)

Если же сопротивление добавочного резистора $r_{доб}$ задано, то скольжение при заданной нагрузке, но в режиме искусственной механической характеристики $s_{и}$, равно:

$$s_{и} = s_e \left(\frac{r_{доб}}{r_2} + 1 \right). \quad (3.22)$$

Частота вращения, соответствующая скольжению $s_{и}$,

$$n_{и} = n_1(1 - s_{и}). \quad (3.23)$$

Пример 3.2. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором 4АК200М8 имеет технические данные: синхронная частота вращения 750 об/мин; номинальная мощность 15 кВт; КПД 86%; номинальное скольжение 3,5%; перегрузочная способность 3; ток ротора 28 А; ЭДС ротора 360 В. Требуется рассчитать данные

и построить естественную механическую характеристику и искусственную механическую характеристику при включении в цепь ротора добавочного резистора сопротивлением $r_{доб} = 1,50$ Ом.

Решение. 1. Номинальная частота вращения (3.2)

$$n_{ном} = n_1(1 - s) = 750(1 - 0,035) = 724 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент (3.4)

$$M_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 15 / 724 = 198 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Критическое скольжение в режиме естественной характеристики (3.13)

$$s_{кр} = s_{ном}(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,035(3 + \sqrt{3^2 - 1}) = 0,204.$$

4. Активное сопротивление фазы обмотки ротора (3.17)

$$r_2 = s_{ном} E_2 / (\sqrt{3} I_{2ном}) = 0,035 \cdot 360 / (1,73 \cdot 28) = 0,26 \text{ Ом.}$$

5. Скольжение в режиме искусственной механической характеристики при номинальном нагрузочном моменте и сопротивлении добавочного резистора $r_{доб} = 1,50$ Ом

$$s_{и} = s_{ном} \left(\frac{r_{доб}}{r_2} + 1 \right) = 0,035 \left(\frac{1,5}{0,26} + 1 \right) = 0,24.$$

6. Частота вращения при номинальном моменте в режиме искусственной характеристики (3.23)

$$n_{и} = n_1(1 - s_{и}) = 750(1 - 0,24) = 570 \text{ об/мин.}$$

7. Естественная 1 и искусственная 2 механические характеристики (рабочие участки) представлены на рис. 3.6.

3.3. Электродвиговые с асинхронными двигателями в тормозных режимах

3.3.1. Генераторное (рекуперативное) торможение

Условием перехода асинхронного двигателя в генераторный режим является превышение частоты вращения ротора относительно синхронной частоты вращения магнитного поля статора ($n > n_1$). В этих условиях электромагнитный момент двигателя становится отрицательным (см. рис. 3.2), а вырабатываемая электроэнергия отдается в сеть, т.е. наступает режим генераторного рекуперативного торможения. Практически этот режим можно получить, уменьшив синхронную частоту вращения n_1 в работающем двигателе. Из выражения синхронной частоты

$$n_1 = (f_1 \cdot 60) / p$$

видно, что это можно сделать двумя способами: либо изменением числа пар полюсов в обмотке статора p в сторону увеличения, либо уменьшением частоты f_1 питающего напряжения. Например, это возможно в двухскоростном двигателе с двумя обмотками на статоре с разным числом полюсов либо с одной обмоткой статора, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать разное число полюсов (число полюсов короткозамкнутого ротора всегда равно числу полюсов статора).

Для пояснения обратимся к рис. 3.7, где показаны две механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя: одна характеристика соответствует $p = 2$ (при частоте $f_1 = 50$ Гц $n_{11} = 1500$ об/мин), а другая — $p = 4$ ($n_{12} = 750$ об/мин). Допустим асинхронный двигатель работал при $p = 2$ в режиме номинальной нагрузки (точка B_1). Для генераторного торможения двигателя его обмотку статора переключили на число полюсов $p = 4$ (не отключая двигатель от сети). В начальный момент под действием сил инерции ротор двигателя продолжает вращение с прежней частотой, но режим работы двигателя переходит в точку B_2 на механической характеристике, соответствующей $p = 4$ (второй квадрант осей координат). При этом электромагнитный момент двигателя становится отрицательным $-M_2$, т.е. тормозящим. Под действием этого момента частота вращения уменьшится до значения $n_{ном2} < n_{ном1}$ и режим

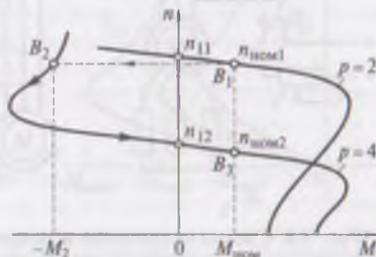


Рис. 3.7. Режим генераторного торможения асинхронного двигателя

работы двигателя перейдет в точку B_3 на механической характеристике при $p = 4$.

Генераторный режим торможения часто используется для «подтормаживания», т. е. для уменьшения скорости перед полной остановкой механизма. Делают это для того, чтобы избежать механических ударов и толчков при резком торможении. Например, «подтормаживание» применяют в электроприводах лифтов и других подъемных механизмах.

Синхронную частоту вращения n_1 можно также снижать путем уменьшения частоты переменного тока f_1 . Это возможно при питании асинхронного двигателя от управляемого преобразователя частоты ПЧ. Постепенно снижая частоту тока f_1 , можно уменьшить частоту вращения почти до полной остановки привода.

Генераторное рекуперативное торможение возможно также в подъемном устройстве с активным статическим моментом. При работе в режиме спуска под действием массы опускаемого груза частота вращения ротора, увеличиваясь, достигает значения, превышающего синхронную частоту вращения, и асинхронный двигатель переходит в генераторный тормозной режим. Вырабатываемая при этом электроэнергия поступает в сеть.

3.3.2. Динамическое торможение

Этот вид торможения наступает в трехфазном асинхронном двигателе при отключении двигателя от сети переменного тока и подключении его к источнику постоянного тока. Так, если асинхронный двигатель был посредством переключателя SA включен в трехфазную сеть (рис. 3.8, а, положение 1), то для его динами-

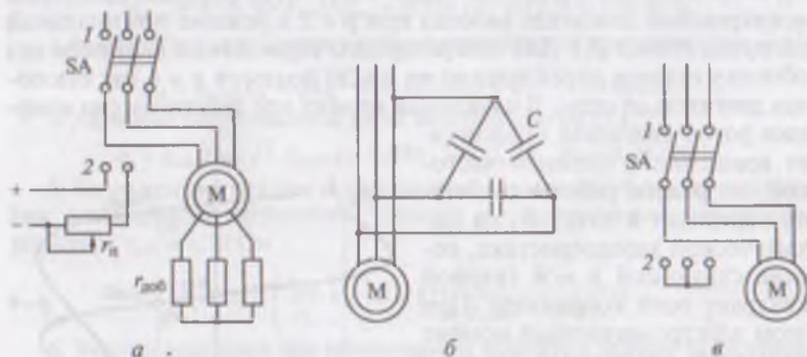


Рис. 3.8. Схемы включения асинхронного двигателя при динамическом торможении:

а — постоянным током; б — конденсаторное; в — магнитным потоком остаточного магнетизма

ческого торможения следует этот переключатель перевести в положение 2. При этом постоянный ток, проходящий по обмотке статора, создаст магнитное поле статора, постоянное по величине и неподвижное в пространстве. В этих условиях в обмотке вращающегося по инерции ротора будет индуцироваться переменная ЭДС E_2 . Следовательно, асинхронный двигатель в режиме динамического торможения работает как синхронный генератор. Так как обмотка ротора замкнута, то ЭДС E_2 создаст в обмотке ротора ток I_2 , который, взаимодействуя с полем статора, создаст на роторе *тормозной* электромагнитный момент, направленный против вращения ротора. В процессе динамического торможения механическая энергия вращающихся по инерции частей электропривода преобразуется в электрическую энергию, которая расходуется на нагрев обмотки ротора и резисторов, включенных в цепь ротора.

Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения по своей форме мало отличаются от механических характеристик двигательного режима. При введении в цепь фазного ротора резистора сопротивлением $r_{доб}$ максимальное значение момента остается неизменным, но он смещается в сторону большей частоты вращения. При остановившемся роторе момент динамического торможения равен нулю. Поэтому все механические характеристики динамического торможения сходятся в точке начала осей координат 0.

На рис. 3.9, а в первом квадранте показана естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором, на которой указана точка номинального режима работы двигателя с координатами $M_{ном}$ и $n_{ном}$. При переводе переключателя SA из положения 1 в положение 2 (см. рис. 3.8, а) наступает режим динамического торможения, который определяется гра-

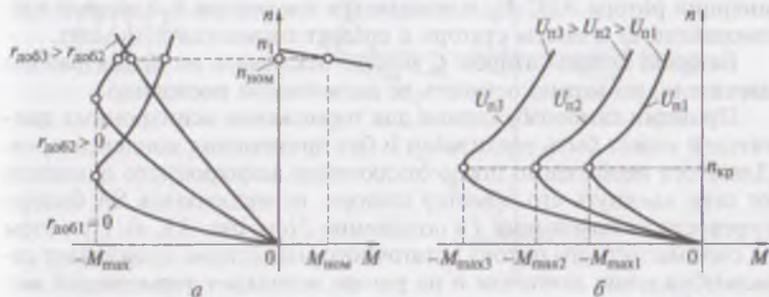


Рис. 3.9. Механические характеристики электропривода с асинхронным двигателем в режиме динамического торможения:

а — двигателя с фазным ротором; б — двигателя с короткозамкнутым ротором

фиками, расположенными во втором квадранте осей координат, где моменты имеют отрицательные значения. В двигателях с фазным ротором для плавности процесса торможения в цепь ротора вводят резистор $r_{\text{доб}}$ переменного сопротивления. В начале торможения следует установить наибольшее значение сопротивления $r_{\text{доб}}$, а затем постепенно уменьшать его. При этом максимум момента торможения будет смещаться в сторону меньшей частоты вращения.

При динамическом торможении двигателя с короткозамкнутым ротором эффективность торможения повышают увеличением напряжения постоянного тока $U_{\text{п}}$, подводимого к обмотке статора. При этом механические характеристики динамического торможения имеют вид, представленный на рис. 3.9, б. Из-за явления магнитного насыщения магнитопровода двигателя эффективность динамического торможения при увеличении напряжения постоянного тока оказывается недостаточной.

Следует помнить, что постоянный ток преодолевает лишь активное сопротивление обмотки статора, поэтому напряжение постоянного тока, подводимое к обмотке статора при динамическом торможении, должно быть ниже напряжения переменного тока, соответствующего работе двигателя, так, чтобы ток в обмотке статора не превышал номинального значения.

Разновидностью динамического торможения является **конденсаторное торможение**, основанное на явлении самовозбуждения. При отключении двигателя первоначальное самовозбуждение происходит за счет остаточного магнетизма магнитной системы. Благодаря наличию батареи конденсаторов C (см. рис. 3.8, б) происходит обмен реактивной энергией между магнитным полем двигателя и электрическим полем конденсаторов. В результате по обмотке статора проходит ток I_1 , в магнитопроводе двигателя возникает магнитный поток, который индуцирует в обмотке вращающегося по инерции ротора ЭДС E_2 , и появляется ток ротора I_2 , который взаимодействует с полем статора и создает тормозящий момент.

Батарею конденсаторов C можно отключать на время работы двигателя, но можно оставить ее включенной постоянно.

Принцип самовозбуждения для торможения асинхронных двигателей может быть реализован и без применения конденсаторов. Для этого необходимо после отключения асинхронного двигателя от сети замкнуть его обмотку статора: переключатель SA быстро перевести из положения 1 в положение 2 (см. рис. 3.8, в). При этом за счет магнитного потока остаточного магнетизма произойдет самовозбуждение двигателя и на роторе возникнет тормозящий момент. Хотя процесс этот весьма кратковременен, но все же эффективен и в некоторых случаях может оказаться достаточным. Однако основным способом динамического торможения все же является торможение постоянным током (см. рис. 3.8, а).

3.3.3. Торможение противовключением

Торможение противовключением позволяет получать большие тормозные моменты, поэтому его применяют при необходимости быстрой остановки электропривода. Для создания этого режима достаточно у работающего асинхронного двигателя изменить направление вращения поля статора путем переключения двух проводов, присоединяющих к сети обмотку статора. Например, прямой (рабочий) порядок следования фаз ABC заменить обратным порядком следования ACB (рис. 3.10, a).

На рис. 3.10, b показаны механические характеристики двигателя для прямого (первый квадрант) и обратного (второй и третий квадранты) порядков следования фаз. Допустим, двигатель работал в основном (двигательном) режиме номинальной нагрузки (точка A). При торможении противовключением изменяют порядок следования фаз питающего напряжения на обмотке статора, при этом рабочая точка сместится на характеристику обратного следования фаз и займет положение в точке B_1 . В результате на ротор двигателя будет действовать начальный тормозной момент $-M_T$, под действием которого частота вращения ротора n будет снижаться до нуля. При $n = 0$ (точка K) двигатель необходимо отключить от сети, иначе произойдет его реверсирование, т. е. двигатель после остановки ротора перейдет из тормозного в основной (двигательный) режим с противоположным направлением вращения ротора.

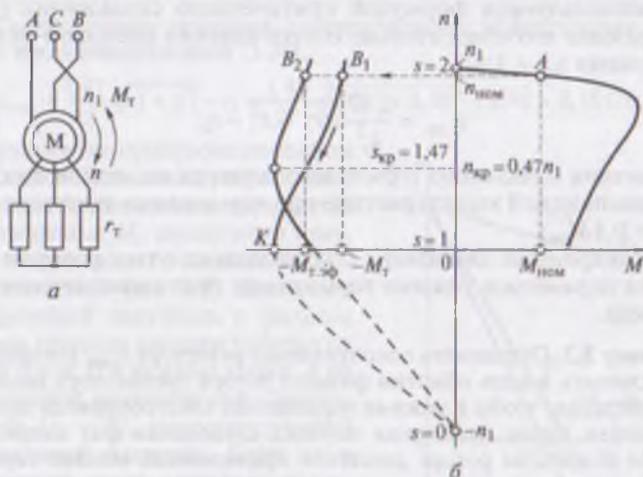


Рис. 3.10. Торможение противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором:

a — схема переключения фаз; b — механические характеристики в режиме торможения

В асинхронных двигателях с фазным ротором момент и ток торможения противовключением можно регулировать введением в цепь ротора реостата r_r . При изменении сопротивления этого реостата меняется жесткость механических характеристик в режиме торможения.

Искусственные механические характеристики двигателя в режиме торможения противовключением располагаются во втором и третьем квадрантах осей координат в диапазоне частот вращения от n_1 до $-n_1$, что соответствует изменению скольжения от 2 до 0 (см. рис. 3.10). В конце торможения, когда частота вращения $n = 0$ (точка K), скольжение $s = 1$. Изменяя сопротивление резистора r_r , включаемого в цепь фазного ротора, можно получить несколько искусственных механических характеристик с одинаковым максимальным моментом, но отличающиеся критическим скольжением $s_{кр}$.

Наиболее эффективным получается торможение противовключением на искусственной механической характеристике торможения с критическим скольжением $s_{кр} = 1,47$, так как в этом случае среднее значение момента торможения M_T в диапазоне частоты вращения при торможении от $n_{ном}$ до $n = 0$ получается наибольшим. Начальный тормозной момент в этом случае называют эффективным $M_{T,эф}$. Для определения значения сопротивления резистора $r_{T,эф}$, соответствующего эффективному торможению противовключением методом переключения фаз подводимого напряжения, воспользуемся формулой критического скольжения (3.18), преобразовав его относительно сопротивления внешнего резистора и приняв $s_{кр} = 1,47$:

$$r_{T,эф} = \frac{1,47}{k_e^2} \sqrt{r_1^2 + x_1^2} - r_2. \quad (3.24)$$

Величина начального тормозного момента на этой искусственной механической характеристике при торможении двигателя равна $M_{T,эф} = 0,8 M_{max}$.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором регулировка параметров режима торможения противовключением невозможна.

Пример 3.3. Определить сопротивление резистора $r_{T,эф}$, который следует включить в цепь обмотки фазного ротора трехфазного асинхронного двигателя, чтобы в режиме торможения электропривода противовключением путем изменения порядка следования фаз напряжения питания создать на роторе двигателя эффективный момент торможения $M_{T,эф}$.

Технические данные двигателя: номинальная мощность $P_{ном} = 45$ кВт; напряжение сети (линейное) $U_n = 380$ В; номинальный КПД $\eta_{ном} = 90,5\%$; номинальная частота вращения $n_{ном} = 970$ об/мин; перегрузочная способность $\lambda_{ом} = 2,5$; напряжения короткого замыкания $U_k = 0,2 U_n$;

ЭДС ротора $E_2 = 180$ В; номинальный ток ротора $I_{2\text{ном}} = 160$ А, коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$; обмотки статора соединены «звездой», частота вращения в начале торможения $n_T = n_{\text{ном}}$, коэффициент мощности в режиме короткого замыкания $\cos \varphi_k = 0,28$. Активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре $r_1 = 0,06$ Ом.

Решение. 1. Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 45\,000 / 970 = 443 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}}) / n_1 = (1000 - 970) / 1000 = 0,03.$$

3. Активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_2 = s_{\text{ном}} E_2 / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}) = 0,03 \cdot 180 / (1,73 \cdot 160) = 0,02 \text{ Ом}.$$

4. Номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (3 \eta_{\text{ном}} U_1 \cos \varphi_{\text{ном}}) = 45\,000 / (3 \cdot 0,905 \cdot 220 \cdot 0,87) = 86,6 \text{ А}.$$

5. Общее индуктивное сопротивление двигателя

$$x_k = (U_{1\text{н}} / I_{1\text{н}}) \sin \varphi_k = (0,20 \cdot 220 / 86,6) 0,96 = 0,49 \text{ Ом},$$

где $\sin \varphi_k = 0,96$.

6. Коэффициент трансформации ЭДС между обмотками статора и ротора (3.19)

$$k_e = 0,95 \cdot U_{1\text{н}} / E_2 = 0,95 \cdot 380 / 180 = 2,0.$$

7. Сопротивление резистора, соответствующее эффективному торможению противовключением (3.24),

$$r_{T\text{эф}} = \frac{1,47}{k_e^2} \sqrt{r_1^2 + x_1^2} - r_2 = \frac{1,47}{2^2} \sqrt{0,06^2 + 0,49^2} - 0,02 = 0,16 \text{ Ом}.$$

Торможение противовключением возможно в подъемном устройстве с активным статическим моментом сопротивления M_c , аналогично тому, как это происходит в двигателях постоянного тока (см. 2.4). Допустим асинхронный двигатель с фазным ротором привода лебедки работал на подъем груза G в режиме точки A на естественной механической характеристике ($r_T = 0$), соответствующей номинальной нагрузке. Если же в цепь ротора этого двигателя вклю-

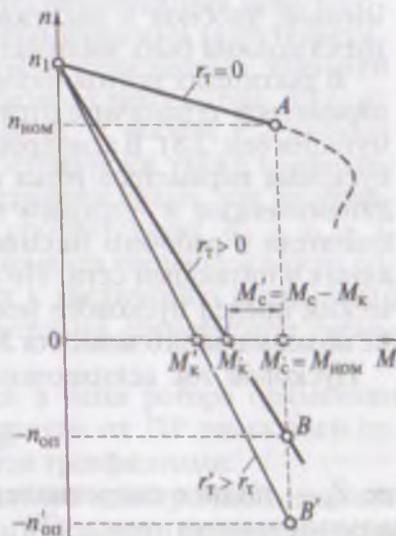


Рис. 3.11. Применение режима торможения противовключением в подъемном устройстве

чить резистор сопротивлением $r_T > 0$, то искусственная механическая характеристика примет вид, показанный на рис. 3.11. В этих условиях статический момент сопротивления, создаваемый грузом G , превысит наибольшее значение вращающего момента двигателя M_K и под действием избыточного статического момента

$$M'_c = M_c - M_K$$

начнется опускание груза со скоростью, соответствующей частоте вращения вала двигателя $-n_{оп}$. Изменением сопротивления r_T в цепи фазного ротора можно регулировать скорость опускания груза: с увеличением r_T скорость опускания груза возрастает. Например, при повышении сопротивления резистора до значения $r'_T > r_T$ скорость опускания груза увеличивается до $-n'_{оп}$.

3.4. Пуск электроприводов с асинхронными двигателями с фазным ротором

К пусковым свойствам асинхронных двигателей, как и к двигателям постоянного тока (см. 2.8), предъявляются следующие требования:

1. Двигатель должен создавать начальный пусковой момент, превышающий статический момент сопротивления, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной частоты вращения.

2. Пусковой ток не должен достигать значений, вызывающих повреждение двигателя, и не создавать в сети значительного падения напряжения, нарушающего работу других потребителей.

3. Схема пуска должна быть по возможности простой, экономичной, удобной в обслуживании, при этом продолжительность пуска должна быть минимальной.

В двигателях постоянного тока предельные значения пусковых параметров ограничиваются, главным образом, условиями коммутации (см. 2.8). В асинхронных двигателях предельные значения пусковых параметров (тока и момента) ограничиваются электродинамическим и тепловым воздействием на вращающиеся части двигателя и рабочего механизма, значительным падением напряжения в питающей сети. Но асинхронные двигатели имеют физический предел пускового момента, который не может быть больше максимального момента M_{max} (см. рис. 3.4).

Пусковой ток асинхронного двигателя, А,

$$I_n = U_1 / Z_k, \quad (3.25)$$

где Z_k — полное сопротивление обмотки статора двигателя в начальный момент пуска, Ом,

$$Z_k = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x_k^2}. \quad (3.26)$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 Z_k^2}. \quad (3.27)$$

Исходя из требований к пусковым свойствам двигателя, желательно ослабление пускового тока и усиление пускового момента. Однако эти требования противоречивы, так как обычно средства, способствующие повышению пускового момента, вызывают возрастание пускового тока, и наоборот.

Пусковые свойства и средства их улучшения в асинхронных двигателях с фазным и короткозамкнутым роторами различны, поэтому целесообразно их рассматривать отдельно. Рассмотрим вопросы пуска асинхронных двигателей с *фазным ротором*. Особенность конструкции этих двигателей позволяет включить в цепь ротора пусковой реостат, представляющий добавочный резистор с переменным активным сопротивлением $r_{доб}$. Благодаря этому, появляется возможность воздействовать на пусковые параметры двигателя. Так, с повышением активного сопротивления цепи ротора

$$R_2 = r_2 + r_{доб}$$

увеличивается критическое скольжение $s_{кр}$, а из выражения максимального момента асинхронного двигателя

$$M_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}$$

следует, что его значение не зависит от сопротивления цепи ротора $R_2 = r_2 + r_{доб}$. Это подтверждается механическими характеристиками двигателя, построенными для ряда нарастающих значений добавочного сопротивления в цепи фазного ротора (рис. 3.12, а). При этом пусковой момент двигателя M_n с ростом $r_{доб}$ сначала растет, а затем снижается. Это иллюстрируется также графиком $M_n = f(R_2)$, где $R_2 = r_2 + r_{доб}$. Из этого графика видно, что наибольшее значение пускового момента соответствует $R_2' = x_1 + x_2'$ (рис. 3.12, б). Увеличение пускового момента введением в цепь ротора добавочного резистора $r_{доб}$ ведет к увеличению внутреннего сопротивления двигателя Z_k , а следовательно, способствует уменьшению пускового тока [см. (3.25)].

В качестве добавочных резисторов в цепи ротора применяют пусковые реостаты ПР, которые в отличие от ПР двигателей постоянного тока (см. рис. 2.14) являются трехфазными.

Рассмотрим процесс пуска трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором с применением пускового реостата, управ-

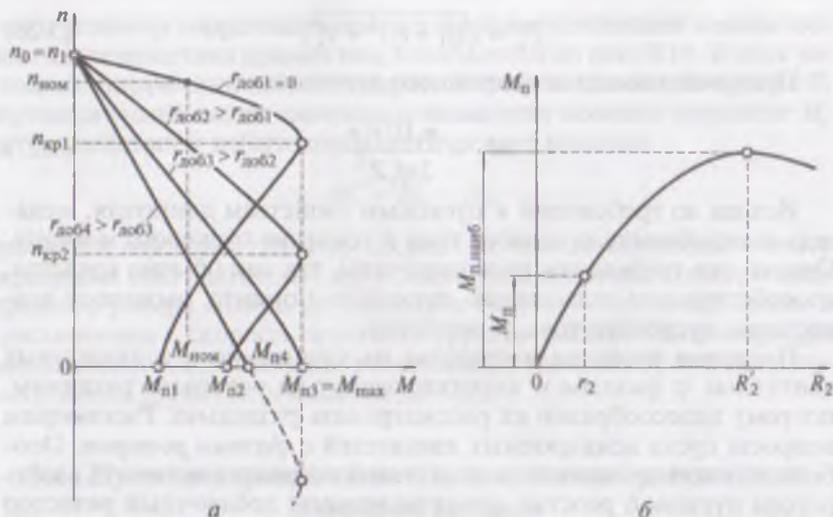


Рис. 3.12. Влияние сопротивления добавочного резистора $r_{доб}$ на пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором (а) и график $M_n = f(R_2)$ для асинхронного двигателя с фазным ротором (б)

ляемого контакторами КМ1, КМ2, и КМ3 (рис. 3.13, а). Механические характеристики асинхронного двигателя $n = f(M)$ при работе на разных ступенях ПР представлены на рис. 3.14. Сопротивления ступеней реостата и моменты времени их переключения подобраны таким образом, что пусковой момент двигателя меняется

от наибольшего значения $M_1 = (0,70 + 0,85)M_{max}$, называемого начальным пусковым моментом, до значения $M_2 = (1,0 + 1,2)M_{ном}$, называемого моментом переключений.

При включении двигателя в сеть контакторы КМ1, КМ2 и КМ3 отключены и сопротивление реостата на первой ступени максимально

$$R_{ПР1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3}.$$

При этом пуск двигателя происходит на реостатной механической характеристике с начальным пусковым моментом M_1 (рис. 3.14, график 4). Под действием момента M_1 ротор разгоняет-

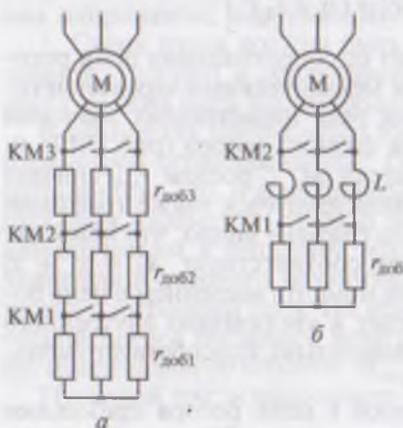


Рис. 3.13. Пусковые реостаты: а — трехступенчатый; б — двухступенчатый с дросселями

ся и при частоте вращения n_4 момент достигает значения момента переключений M_2 . При этом срабатывает контактор КМ1 и сопротивление пускового реостата уменьшается до значения $R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}$. После этого пуск продолжается на реостатной характеристике 3, а пусковой момент восстанавливается до значения M_1 . При частоте вращения n_3 срабатывает контактор КМ2 и сопротивление пускового реостата вновь уменьшается до значения $R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}}$. Пуск двигателя продолжается на реостатной характеристике 2, при этом пусковой момент восстанавливается до значения M_1 . И наконец, при частоте вращения n_2 срабатывает контактор КМ3, обмотка ротора замыкается накоротко ($R_{\text{ПР}} = 0$) и двигатель переходит в рабочий режим на естественной механической характеристике 1, при этом момент и частота вращения достигают установившихся значений, например, $M_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$.

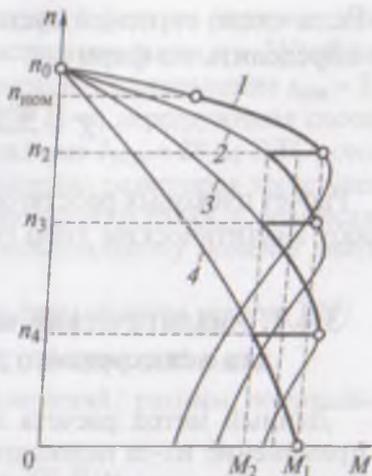


Рис. 3.14. Графики изменения пускового момента при реостатном пуске асинхронного двигателя с фазным ротором

При выборе числа ступеней Z пускового реостата следует иметь в виду, что с увеличением числа ступеней пуск двигателя получается более плавным, но повышается стоимость пусковой аппаратуры и возрастает продолжительность пусковой операции. Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором общего назначения обычно применяют реостаты на число ступеней $Z = 2 - 4$. Если же к пусковой операции предъявляются повышенные требования по ее плавности, то число ступеней увеличивают.

Понятия о форсированном и нормальном режимах пуска, рассмотренные применительно к двигателям постоянного тока (см. 2.8), относятся и к асинхронным двигателям.

Необходимая кратность отношения моментов M_1/M_2 :
для форсированного пуска

$$\lambda = z \sqrt{\frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}} M_1}}, \quad (3.28)$$

момент переключений $M_2 = M_1/\lambda$;
для нормального пуска

$$\lambda = z \sqrt{\frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}} M_2}}, \quad (3.29)$$

начальный пусковой момент $M_1 = M_2 \lambda$.

Если число ступеней пускового реостата не задано, то его можно определить по формуле:

$$Z = \frac{\lg[M_{\text{ном}} / (s_{\text{ном}} M_1)]}{\lg(M_1 / M_2)} \quad (3.30)$$

Расчет пусковых реостатов для асинхронных двигателей выполняются аналитическим либо графическим методом.

3.4.1. Аналитический метод расчета пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором

Данный метод расчета весьма прост, но имеет ограниченное применение из-за недостаточной точности. Это объясняется тем, что в основу метода положено допущение о прямолинейности естественной механической характеристики асинхронного двигателя. Для рабочего участка характеристики при скольжении, лишь немного превышающем номинальное значение, такое допущение не вызывает большой погрешности. Но при скольжении, близком к критическому, оно создает заметную ошибку, которая тем значительнее, чем ближе значение начального пускового момента M_1 к максимальному моменту M_{max} . Поэтому аналитический метод расчета рекомендуется применять лишь при значениях начального пускового момента $M_1 \leq 0,75 M_{\text{max}}$.

Активное сопротивление фазной обмотки ротора определяют по формуле (3.17).

Сопротивления резисторов на трех ступенях пускового реостата (см. рис. 3.13):

третьей

$$r_{\text{доб3}} = r_2(\lambda - 1);$$

второй

$$r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}}\lambda, \quad (3.31)$$

первой

$$r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}}\lambda,$$

где r_2 — активное сопротивление фазной обмотки ротора асинхронного двигателя (3.17).

Сопротивления пускового реостата на трех его ступенях:

первой

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}},$$

второй

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}, \quad (3.32)$$

третьей

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}}.$$

Пример 3.4. Для асинхронного двигателя с фазным ротором, номинальные данные которого: синхронная частота вращения $n_1 = 750$ об/мин; номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; номинальное скольжение $s_{\text{ном}} = 5\%$; номинальный момент двигателя $M_{\text{ном}} = 200$ Н·м; перегрузочная способность $\lambda_m = 3$; ток ротора в номинальном режиме $I_{2\text{ном}} = 28$ А; ЭДС ротора $E_2 = 360$ В. Требуется рассчитать сопротивления резисторов трехступенчатого ($Z = 3$) пускового реостата для нормального пуска. Статический момент сопротивления при пуске равен номинальному моменту двигателя.

Решение. 1. Активное сопротивление фазы обмотки ротора (3.17)

$$r_2 = s_{\text{ном}} E_2 / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}) = 0,05 \cdot 360 / (1,73 \cdot 28) = 0,37 \text{ Ом.}$$

Принимаем значение момента переключений, равным номинальному,

$$M_2 = 1,0 M_{\text{ном}} = 1,0 \cdot 200 = 200 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

2. Кратность отношения моментов M_1/M_2 (3.29)

$$\lambda = Z \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}} M_2}} = \sqrt[4]{\frac{200}{0,05 \cdot 200}} = 2,1.$$

3. Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \lambda = 200 \cdot 2,1 = 420 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т.е. $M_1/M_{\text{мах}} = 420/(3 \cdot 200) = 0,7$; это позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений резисторов пускового реостата.

4. Сопротивление резисторов на ступенях ПР (3.31):

$$r_{\text{доб3}} = r_2(\lambda - 1) = 0,37(2,1 - 1) = 0,41 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}} \lambda = 0,41 \cdot 2,1 = 0,86 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}} \lambda = 0,86 \cdot 2,1 = 1,80 \text{ Ом.}$$

5. Сопротивление ПР на ступенях (3.32):

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 1,80 + 0,86 + 0,41 = 3,07 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 0,86 + 0,41 = 1,27 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}} = 0,41 \text{ Ом.}$$

3.4.2. Графический метод расчета пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором

В основу метода положена фактическая (криволинейная) форма естественной механической характеристики асинхронного двигателя. Графический метод расчета, по сравнению с аналитическим, более трудоемок, поэтому его применение оправдано при начальном пусковом моменте $M_1 > 0,75 M_{\text{мах}}$, когда аналитический метод расчета даст заметную ошибку.

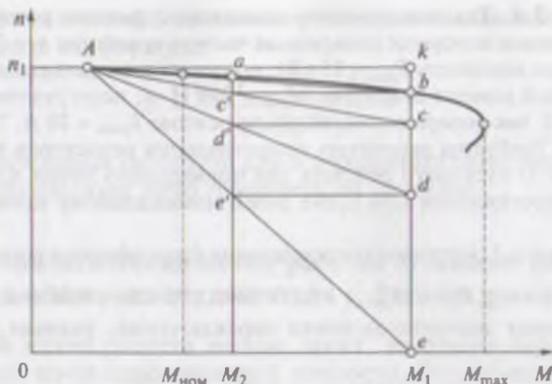


Рис. 3.15. Графический метод расчета резисторов пускового реостата электропривода с асинхронным двигателем с фазным ротором

Из точки n_1 на оси ординат проводят прямую, параллельную оси абсцисс, представляющую собой механическую характеристику двигателя в режиме идеального холостого хода, соответствующую неизменной синхронной частоте вращения $n_0 = n_1$. Значения начального пускового момента M_1 и момента переключений M_2 откладывают на оси абсцисс. В полученных точках восстанавливают перпендикуляры. Через точки a и b проводят прямую до пересечения с характеристикой идеального холостого хода. Полученная точка A называется *полюсом построения реостатных механических характеристик*, по которым проходит процесс пуска на ступенях пускового реостата.

Из точки A проводят лучи для реостатных характеристик, как это показано на рис. 3.15, и через полученные точки проводят ломаную линию $a b c' c d' d e' e$. Отрезки kb , bc , cd и de используют для расчета сопротивлений резисторов пускового реостата.

Сопротивления резисторов на ступенях:

первой

$$r_{\text{доб1}} = \frac{de}{bk} r_2; \quad (3.33)$$

второй

$$r_{\text{доб2}} = \frac{cd}{bk} r_2; \quad (3.34)$$

третьей

$$r_{\text{доб3}} = \frac{bc}{bk} r_2. \quad (3.35)$$

Сопrotивления реостатов на ступенях:

первой

$$R_{\text{ПР1}} = \frac{be}{bk} r_2; \quad (3.36)$$

второй

$$R_{\text{ПР2}} = \frac{bd}{bk} r_2; \quad (3.37)$$

третьей

$$R_{\text{ПР3}} = \frac{bc}{bk} r_2. \quad (3.38)$$

Пример 3.5. Используя данные примера 3.4, рассчитать трехступенчатый пусковой реостат, приняв $M_1 = 0,85 M_{\text{max}} = 0,85 \cdot 3 \cdot 200 = 510 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Пуск двигателя форсированный.

Решение. Так как принятое значение начального пускового момента M_1 превышает $0,7 M_{\text{max}}$, то задачу решаем графическим методом.

1. Требуемое отношение начального пускового момента и момента переключений при форсированном пуске (3.28)

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}} M_1}} = \sqrt[3]{\frac{200}{0,05 \cdot 510}} = 2,0,$$

следовательно, момент переключений

$$M_2 = M_1 / \lambda = 510 / 2 = 255 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Естественная механическая характеристика двигателя и все необходимые графические построения представлены на рис. 3.15.

2. Сопrotивление резисторов на ступенях пускового реостата (3.33) — (3.35):

$$r_{\text{доб1}} = \frac{de}{bk} r_2 = \frac{55}{11} 0,37 = 1,85 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{доб2}} = \frac{cd}{bk} r_2 = \frac{24}{11} 0,37 = 0,80 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{доб3}} = \frac{bc}{bk} r_2 = \frac{10}{11} 0,37 = 0,34 \text{ Ом}.$$

3. Сопrotивление пускового реостата на его ступенях (3.36) — (3.38):

$$R_{\text{ПР1}} = \frac{be}{bk} r_2 = \frac{89}{11} 0,37 = 2,99 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПР2}} = \frac{bd}{bk} r_2 = \frac{34}{11} 0,37 = 1,14 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{ПР3}} = \frac{bc}{bk} r_2 = \frac{10}{11} 0,37 = 0,34 \text{ Ом}.$$

Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором возможно применение пусковых устройств с дросселями (реакторами) L (см. рис. 3.13, б), обеспечивающими плавный пуск двигателя в две ступени. Здесь дроссели выполняют функцию автоматических регуляторов силы пускового тока: в начале пуска скольжение $s = 1$ и частота тока в роторе равна частоте тока в сети

$$f_{2п} = f_1 s = f_1,$$

при этом индуктивное сопротивление дросселей равно

$$x_L = 2\pi f_1 L,$$

что в значительной степени ограничивают начальный пусковой ток. По мере роста частоты вращения ротора (снижения скольжения) частота тока в обмотке ротора уменьшается, а следовательно, снижается индуктивное сопротивление дросселей x_L . В итоге нарастает сила пускового тока. По окончании процесса пуска частота тока в роторе составляет обычно 2—5 Гц, при этом индуктивное сопротивление дросселей $x_{Lр} = (0,02 + 0,1)x_{Lп}$. Пуск двигателя происходит в две ступени: сначала срабатывает контактор КМ1, а затем КМ2. При этом момент переключений по сравнению с трехступенчатым резисторным реостатом (см. рис. 3.13, а) уменьшается с $M_2/M_{ном} = 2,2$ до $M_2/M_{ном} = 1,75$. Таким образом, ограничение тока происходит за счет индуктивного сопротивления, что способствует снижению электрических потерь в двигателе во время пуска. Однако следует помнить, что дроссели дороже резисторов. Если же предъявляются повышенные требования к плавности пусковой операции электропривода, то применение дросселей в пусковом устройстве оправдано.

3.5. Пуск электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, по сравнению с двигателями других видов, являются наиболее дешевыми и надежными. Поэтому они составляют основу электроприводов всех отраслей промышленности. Основным недостатком этих двигателей является большой пусковой ток, который в 5—7,5 раз может превышать номинальный ток двигателя. Отсутствие скользящих контактов (коллектора или контактных колец) допускает в двигателях с короткозамкнутым ротором значительные кратности пускового тока.

Благодаря кратковременности процесса пуска, двигатель не успевает перегреваться. Исключение составляют приводы с частым включением или реверсированием. В остальных случаях основной причиной, ограничивающей прямое включение двигателя в сеть,

являются недостаточная мощность этой сети и ударное механическое воздействие на подвижные части двигателя рабочей машины.

Пуск непосредственным включением в сеть применяется для асинхронных двигателей малой, а иногда и средней мощности. Предельная мощность двигателя для прямого включения в сеть определяется в каждом конкретном случае, в зависимости от допустимой нагрузки для этой сети и условиями пуска двигателя (пуск в режиме холостого хода или под нагрузкой). Включение двигателей в сеть, питающую другие силовые и осветительные устройства, не должно вызывать падения напряжения, превышающее допустимого значения.

Из выражения (3.21) следует, что основным средством уменьшения пускового тока является временное (на время пуска) понижение напряжения U_1 , подводимого к обмотке статора. На этом основаны все специальные способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако следует помнить, что с понижением напряжения U_1 уменьшается пусковой момент двигателя, который пропорционален квадрату этого напряжения [см. (3.23)]. Поэтому **пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении** допускается лишь для случаев пуска без нагрузки или с небольшой нагрузкой на валу.

Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», обычно применяют метод пуска *переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»* (рис. 3.16). Во время подключения двигателя переключатель ставят в положение Y , при этом напряжение на фазных обмотках статора уменьшается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз понижается сила тока в фазных обмотках статора, но ток в линейных проводах уменьшается в 3 раза относительно значения линейного тока, соответствующего соединению обмотки статора в «треугольник». Объясняется это тем, что если бы обмотка статора была соединена в «треугольник», то линейный ток был бы больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, соединив обмотки статора «звездой», мы добились уменьшения линейного тока в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к установившейся, переключатель переводят в положение Δ . При

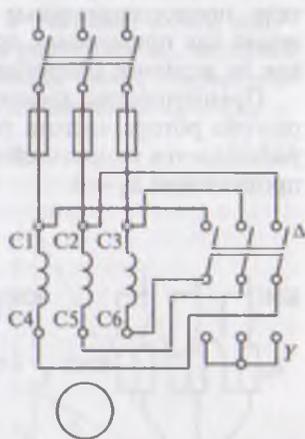


Рис. 3.16. Пуск электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

этом обмотки статора оказываются под линейным напряжением, что вызывает небольшой бросок тока. Однако следует иметь в виду, что при включении двигателя с соединением обмоток статора «звездой», когда напряжение на фазных обмотках уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент уменьшается в 3 раза. Применение рассмотренного способа пуска возможно лишь для двигателей, рассчитанных для работы при соединении обмотки статора «треугольником».

Более универсальным является метод пуска асинхронного двигателя при понижении напряжения посредством пусковых резисторов R_n или дросселей (реакторов) L , включаемых в линейные провода последовательно с обмоткой статора двигателя (рис. 3.17, а). Пуск двигателя происходит при срабатывании контактора КМ1 и разомкнутых контактах контактора КМ2. За счет падения напряжения в пусковых резисторах $I_n R_n$ напряжение на зажимах обмотки статора понижается до значения U_1' . После разгона ротора срабатывает контактор КМ2 и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети U_1 . При этом искусственный пусковой ток по сравнению с естественным снижается в $\alpha_i = (U_1'/U_1)$ раз, а искусственный пусковой момент по сравнению с естественным уменьшается в $\alpha_m = \alpha_i^2$ раз. Например, если напряжение было понижено в $\sqrt{3}$ раз, то искусственный пусковой ток будет уменьшен в $\sqrt{3}$ раз, а искусственный пусковой момент — в 3 раза. Аналогично происходят процессы при использовании дросселей L (рис. 3.17, б). Однако использование резисторов R_n вызывает значительные потери при пуске двигателя, пропорциональные квадрату пускового тока $P_n = I_n^2 R_n$, в то время как применение дросселей L таких потерь не вызывает, так как их активное сопротивление весьма незначительно.

Преимущество дросселей состоит еще и в том, что по мере разгона ротора частота тока в роторе снижается ($f_2 = f_1 s$) и также уменьшается сопротивление дросселя $x_L = 2\pi f_1 s$. В конце пуска сопротивление $x_L = 0$.

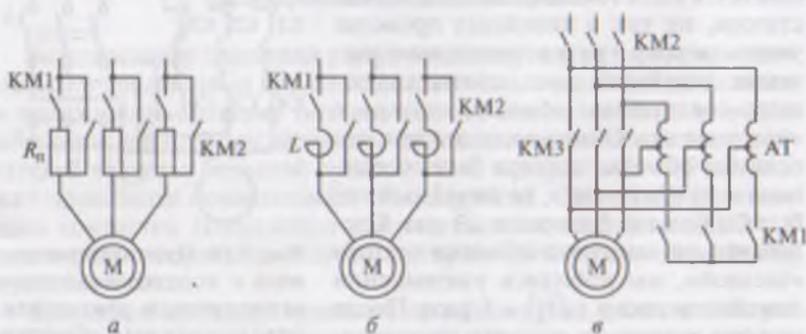


Рис. 3.17. Способы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

На рис. 3.18, *а* показан прямоугольный треугольник сопротивлений короткого замыкания асинхронного двигателя ABC . При этом начальный пусковой ток двигателя $I_n = U_1/Z_k$. Если для уменьшения начального пускового тока в линейные провода статора включить последовательно резисторы R_n , то катет активного сопротивления удлинится на величину R_n и треугольник примет вид ABC' , при этом полное сопротивление двигателя окажется равным Z'_k и искусственный пусковой ток $I'_n = U_1/Z'_k$. Таким образом, отношение искусственного пускового тока к его естественному значению обратно пропорционально отношению соответствующих полных сопротивлений:

$$I'_n/I_n = Z_k/Z'_k, \quad (3.39)$$

откуда

$$Z'_k = \frac{I_n}{I'_n} Z_k = \frac{Z_k}{\alpha_i}, \quad (3.40)$$

где

$$\alpha_i = I'_n/I_n$$

— коэффициент, показывающий до какого значения уменьшится пусковой ток I'_n после включения в линейные провода статора резисторов R_n .

Из треугольника ABC' получим:

$$Z_k'^2 = x_k^2 + (r_k + R_n)^2.$$

Решая это уравнение относительно R_n и учитывая (3.40), получим формулу для расчета сопротивления резистора R_n , который следует включить в линейные провода статора, чтобы искусственный пусковой ток двигателя уменьшился до значения $I'_n = I_n \alpha_i$:

$$R_n = \sqrt{(Z_k/\alpha_i)^2 - x_k^2} - r_k. \quad (3.41)$$

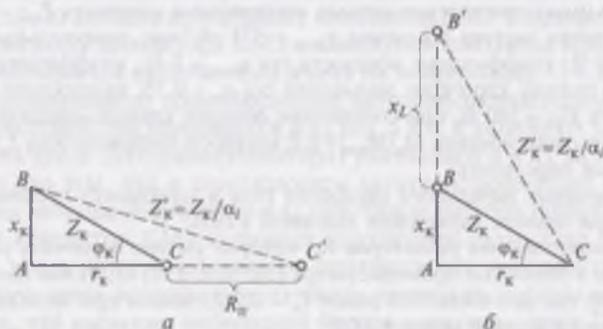


Рис. 3.18. Треугольники сопротивлений короткого замыкания при применении резисторов (*а*) и дросселей (*б*) в цепи статора для уменьшения пускового тока

Если для уменьшения пускового тока применены дроссели L (см. рис. 3.17, б), то, построив треугольник сопротивлений $AB'C$ (рис. 3.18, б) и проделав аналогичные преобразования, получим формулу для расчета индуктивного сопротивления дросселя, включение которых в линейные провода статора приведет к уменьшению пускового тока до требуемого значения $I'_n = I_n \alpha_i$:

$$x_L = \sqrt{(Z_k / \alpha_i)^2 - r_k^2} - x_k, \quad (3.42)$$

полное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания, Ом,

$$Z_k = U_1 / I_n,$$

где x_k и r_k — индуктивная и активная составляющие этого сопротивления:

$$r_k = \cos \varphi_k; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

Уменьшение пускового момента при включении R или L составит

$$M'_n = \alpha_m M_n,$$

где

$$\alpha_m = \alpha_i^2,$$

т. е. если $\alpha_i = 0,7$, то пусковой момент уменьшается до значения

$$M'_n = \alpha_i^2 M_n = 0,7^2 M_n \approx 0,5 M_n.$$

Таким образом, если задана α_m , определяющая величину искусственного пускового момента M'_n , то для расчета соответствующих значений R_n или x_L можно воспользоваться формулами (3.41) и (3.42), подставив в них вместо α_i^2 величину α_m .

Пример 3.6. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет технические данные: номинальная мощность $P_{ном} = 11$ кВт; номинальная частота вращения $n_{ном} = 975$ об/мин; номинальный КПД $\eta_{ном} = 86\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном} = 0,86$; коэффициент мощности в режиме короткого замыкания $\cos \varphi_k = 0,35$; напряжение питающей сети $U_{1n} = 380$ В, при соединении обмоток статора «звездой», кратность пускового момента $M_n / M_{ном} = 1,2$; кратность пускового тока $I_n / I_{ном} = 6$. Требуется определить:

1) значения начального пускового тока и начального пускового момента при прямом включении двигателя в сеть;

2) сопротивление резисторов R_n , которые следует включить последовательно в линейные провода статора (см. рис. 3.18, а), чтобы начальный пусковой ток двигателя был равен $I'_n = 0,7 I_n$; каким при этом окажется начальный пусковой момент M'_n ?

3) индуктивность дросселей L , которые следует включить в линейные провода статора этого двигателя (см. рис. 3.18, б) для получения пусковых параметров двигателя, указанных в п. 2.

Решение: 1. Номинальный ток статора

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (3\eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} U_1) = 11\,000 / (3 \cdot 0,86 \cdot 0,86 \cdot 220) = 22,5 \text{ А,}$$

где $U_1 = 380 / 1,73 = 220 \text{ В}$.

2. Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 11\,000 / 975 = 108 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Начальный пусковой ток при прямом включении двигателя в сеть

$$I_{\text{п}} = I_{\text{ном}} (I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}) = 22,5 \cdot 6 = 135 \text{ А.}$$

4. Начальный пусковой момент при прямом включении двигателя в сеть

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}) = 108 \cdot 1,2 = 130 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Сопротивления короткого замыкания двигателя:

полное $Z_{\text{к}} = U_1 / I_{\text{п}} = 220 / 135 = 1,63 \text{ Ом}$;

активное $r_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} = 1,63 \cdot 0,35 = 0,57 \text{ Ом}$;

индуктивное $x_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = 1,63 \cdot 0,94 = 1,53 \text{ Ом}$,

где $\sin \varphi_{\text{к}} = 0,94$.

6. Сопротивление резисторов $R_{\text{п}}$, включенных в линейные провода статора (см. рис. 3.17, а), для снижения пускового тока до $I'_{\text{п}} = 0,7 I_{\text{п}} = 0,7 \cdot 135 = 94,5 \text{ А}$, т.е. при $\alpha_i = 0,7$,

$$R_{\text{п}} = \sqrt{(Z_{\text{к}} / \alpha_i)^2 - x_{\text{к}}^2} - r_{\text{к}} = \sqrt{(1,63 / 0,7)^2 - 1,53^2} - 0,57 = 1,18 \text{ Ом.}$$

7. Индуктивное сопротивление дросселей, включенных в линейные провода статора (см. рис. 3.17, б),

$$x_L = \sqrt{(Z_{\text{к}} / \alpha_i)^2 - r_{\text{к}}^2} - x_{\text{к}} = \sqrt{(1,63 / 0,7)^2 - 0,57^2} - 1,53 = 0,72 \text{ Ом.}$$

8. Индуктивность дросселя в начале пуска, т.е. при $f = 50 \text{ Гц}$,

$$L = x_L / (2\pi f) = 0,72 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50) = 0,0023 \text{ Гн.}$$

При пуске двигателя через понижающий автотрансформатор (см. рис. 3.17, в) сначала срабатывает контактор КМ1 и при разомкнутых контактах контактора КМ3 и замкнутых контактах КМ2 двигатель оказывается включенным в сеть на напряжение $U'_1 = U_1 k_A$, где k_A — коэффициент трансформации автотрансформатора АТ. При этом пусковой ток понижается в k_A раз, а ток в линейных проводах сети (на входе автотрансформатора) уменьшается в k_A^2 раз. Объясняется это тем, что в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в k_A раз. После разгона ротора отключается контактор КМ1 и своими контактами размыкает обмотки АТ, в итоге автотрансформатор превращается в дроссель (реактор), при этом напряжение на входе двигателя несколько повышается, что вызывает небольшой бросок пускового тока. При достижении частоты вращения, близкой к номинальной, срабатывает контактор КМ3 и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети.

Как и при предыдущих способах пуска, основанных на понижении напряжения, автотрансформаторный пуск также сопровождается уменьшением пускового момента. В связи с повышенной стоимостью автотрансформатора этот способ обычно применяется для пуска асинхронных и синхронных двигателей значительной мощности, поскольку наличие автотрансформатора и большого количества коммутирующих устройств ведет к удорожанию электропривода.

Стремление улучшить пусковые свойства двигателей с короткозамкнутым ротором привело к созданию асинхронных двигателей с *улучшенными пусковыми свойствами*: с повышенным скольжением, широкопазных и двухклеточных.

У асинхронных двигателей с *повышенным скольжением* обмотка ротора имеет повышенное активное сопротивление, что эквивалентно введению в цепь ротора добавочного резистора $r_{доб}$, а следовательно, ведет к увеличению пускового момента (см. рис. 3.11). Следует иметь в виду, что эти двигатели имеют повышенные потери в обмотке ротора, поэтому их КПД и полезная мощность меньше, чем у асинхронных двигателей обычного исполнения.

В *глубокопазных* асинхронных двигателях используется эффект «вытеснения тока» в стержнях обмотки ротора. Стержни этой обмотки имеют вид узких высоких полос, замкнутых с двух сторон широкими кольцами.

При пуске двигателя, когда частота переменного тока в роторе равна частоте тока сети, индуктивное сопротивление в *нижних* слоях этих стержней повышено и ток ротора проходит, главным образом, по *верхним* слоям стержней, где индуктивное сопротивление стержней понижено из-за близости воздушного зазора. Это эквивалентно повышению активного сопротивления стержней ротора. По мере разгона ротора скольжение уменьшается, частота тока в обмотке ротора также понижается ($f_2 = f_1 s$) и эффект «вытеснения тока» ослабевает. По окончании процесса пуска, когда частота тока

Таблица 3.1

Сравнение технических данных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором разных конструкций

Тип ротора двигателя	Обычный	С повышенным скольжением	С глубокими пазами
Марка двигателя	АО2-91	АОС-91	АОП2-91
Мощность $P_{ном}$, кВт	75	61	75
Скольжение $s_{ном}$	2	6	1,6
$\eta_{ном}$, %	92,5	86	92
$I_{п}/I_{ном}$	7,0	7,0	7,5
$M_{п}/M_{ном}$	1,1	2,9	2,1

в роторе не превышает 7 Гц, ток равномерно распределяется по поперечному сечению стержней и двигатель работает как обычный.

На этом же принципе основана работа *двухклеточного* двигателя, у которого в сердечнике ротора расположены две обмотки (клетки): рабочая (в глубине сердечника) и пусковая (вблизи воздушного зазора). При этом рабочая обмотка изготовлена из меди, а пусковая — из латуни (сплава с повышенным удельным электрическим сопротивлением).

В табл. 3.1 для сравнения приведены технические данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серий АО2, АОС-91, АОП2-91 9-го габарита, синхронная частота вращения 1500 об/мин.

Сравнение приведенных данных показывает, что у двигателя с повышенным скольжением (АОС-91) КПД и полезная мощность, по сравнению с двигателями двух других типов, минимальны, но кратность пускового момента наибольшая. У двигателя с глубокопазым ротором (АОП-91) КПД практически такой же, как и у двигателя обычной конструкции (АО2-91), но кратность пускового момента почти в два раза больше.

Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами имеют более сложную конструкцию, поэтому их стоимость выше, чем двигателей обычной конструкции. Применение таких двигателей оправдано лишь в электроприводах с тяжелыми условиями пуска (большой статический момент нагрузки и значительный момент инерции вращающихся частей).

Таким образом, все рассмотренные способы улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором имеют недостатки.

Эффективным средством улучшения пусковых свойств электропривода является применение *защитно-пусковых устройств* (ЗПУ) (см. 9.5) и управляемых преобразователей частоты переменного тока (см. 9.6), которые обеспечивают плавный пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с ограничением пускового тока, защитой от перегрузки и перекоса фазных напряжений в трехфазной питающей сети.

3.6. Регулирование частоты вращения электроприводов с асинхронными двигателями

Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя

$$n = n_1(1 - s) = (f_1/60/p)(1 - s) \quad (3.43)$$

следует, что при постоянном статическом нагрузочном моменте M_c на валу двигателя частота вращения ротора n зависит от частоты

ты переменного тока в питающей сети f_1 , числа пар полюсов в обмотке статора p и скольжения s . Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей возможно изменением любого из перечисленных параметров.

3.6.1. Реостатное регулирование асинхронных двигателей с фазным ротором

В асинхронных двигателях с фазным ротором частоту вращения регулируют введением в цепь ротора резистора $r_{доб}$ в виде регулирующего реостата РР (рис. 3.19, а). При полностью выведенном РР двигатель работает в режиме естественной механической характеристики (рис. 3.19, б, график при $R_{PP} = 0$). При этом частота вращения максимальна и при номинальной нагрузке она равна $n_{ном}$. При увеличении сопротивления реостата возрастает критическое скольжение $s_{кр}$, при этом величина максимального момента M_{max} , а следовательно, перегрузочная способность двигателя остаются неизменными (см. 3.4). Двигатель при этом переходит в режим искусственной механической характеристики, и его частота вращения уменьшается до значения $n'_{ном}$. Диапазон регулирования получается широким, но изменение частоты вращения возможно только «вниз» от синхронной. Одновременно с уменьшением частоты вращения меняется жесткость механических характеристик — они становятся более мягкими. Однако следует помнить, что при увеличении сопротивления РР возрастают потери в цепи ротора, при этом КПД и полезная мощность двигателя уменьшаются. С увеличением числа ступеней РР повышается плавность регулирования, но при этом возрастает стоимость коммутирующих устройств.

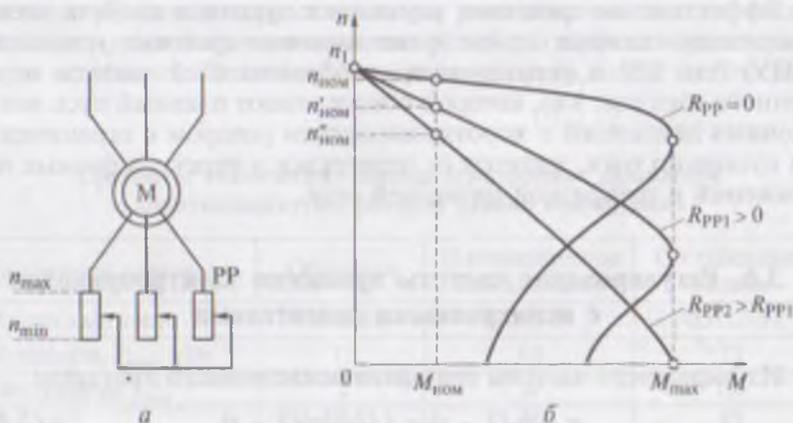


Рис. 3.19. Регулирование частоты вращения электропривода с асинхронным двигателем посредством регулирующего реостата РР в цепи ротора

3.6.2. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением числа полюсов в обмотке статора

С этой целью изготавливают *многоскоростные* асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В пазах сердечника статора такого двигателя располагают две независимые обмотки с разным числом полюсов либо одну полюснопереключаемую обмотку. Эта обмотка имеет конструкцию, которая позволяет методом переключения катушечных групп получать разное число полюсов (число полюсов короткозамкнутой обмотки ротора всегда равно числу полюсов статора). В трехскоростном двигателе на статоре располагают одну обмотку с фиксированным числом полюсов и одну полюснопереключаемую. Если же на статоре установить две полюснопереключаемые обмотки, то получим четырехскоростной двигатель. Рассмотрим некоторые схемы соединения катушечных групп обмоток статоров.

Схема «звезда/двойная звезда» (Y/YY) дает изменение числа пар полюсов в отношении 1:2 (рис. 3.20, а). Эти схемы обеспечивают асинхронному двигателю режим *постоянного момента*, т. е. при пе-

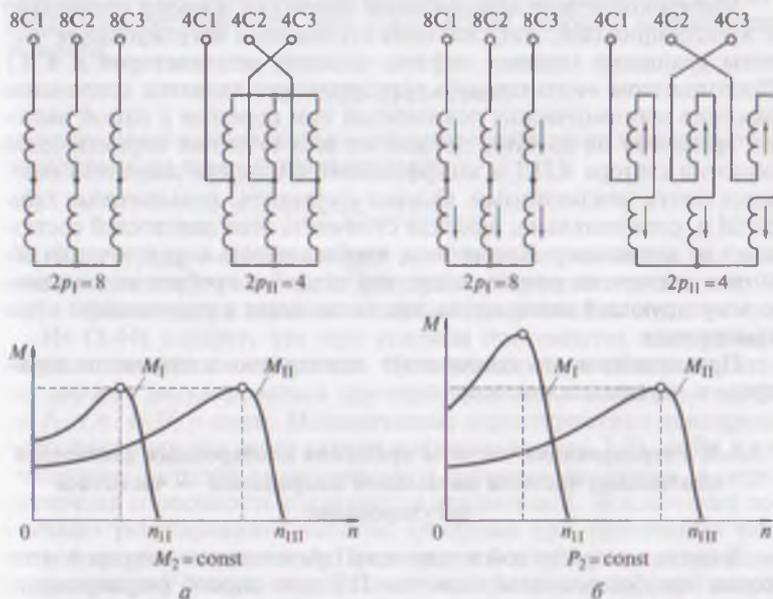


Рис. 3.20. Схемы соединения катушечных групп обмотки статора и механические характеристики в двухскоростном асинхронном двигателе: а — Y/YY (режим постоянного момента); б — Y/Y (режим постоянной мощности)

реключении обмотки статора с одной схемы на другую вращающий момент остается неизменным ($M = \text{const}$), а мощность изменяется пропорционально частоте вращения, т.е. в два раза ($P_{Y_{Y4}}/P_{Y_8} = 2$). Эти схемы переключения целесообразно применять в электроприводе с постоянно действующим моментом нагрузки при изменении частоты вращения. Механические характеристики асинхронного двигателя для рассмотренного случая представлены на рис. 3.20, а.

Схема «звезда/звезда» (Y/Y) также дает изменение числа пар полюсов в отношении 2:1 (рис. 3.20, б), но она создает в асинхронном двигателе режим *постоянной мощности*, т.е. при переключении обмотки мощность двигателя остается практически неизменной ($P = \text{const}$), а момент изменяется в два раза ($M_{Y_8}/M_{Y_4} = 2$). Эти схемы переключения следует применять в электроприводе, в котором момент нагрузки меняется обратно пропорционально частоте вращения. Механические характеристики двигателя для рассмотренных схем переключения числа полюсов представлены на рис. 3.20, б.

Приведенные на рис. 3.20 характеристики являются естественными, в них сохраняется жесткость рабочего участка и обеспечивается двигателю достаточная перегрузочная способность.

Многоскоростные асинхронные двигатели широко применяют в электроприводах, допускающих ступенчатое регулирование частоты вращения (привод лифтов, станков, вентиляторов и т.п.). Достоинством этого способа регулирования является сохранение высоких экономических показателей при переходе с одной частоты вращения на другую, так как на всех ступенях переключения обмотки статора КПД и коэффициент мощности двигателя остаются почти неизменными. Однако сложность, повышенные габариты и, следовательно, высокая стоимость этих двигателей составляют их недостатки. Кроме того, необходимость переключения обмоток статора на разное число пар полюсов требует усложнения коммутирующей аппаратуры, что также ведет к удорожанию электропривода.

Промышленность изготавливает асинхронные двигатели двух-, трех- и четырехскоростные.

3.6.3. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты питающего напряжения — частотное регулирование

В связи с разработкой и широким применением полупроводниковых преобразователей частоты ПЧ этот способ регулирования частоты вращения ротора асинхронных двигателей является наиболее перспективным.

При изменении частоты тока f_1 меняется синхронная частота вращения поля статора ($n_1 = f_1 60/p$), а следовательно, и частота

вращения ротора n . Преобразуя выражение максимального момента асинхронного двигателя (3.14) и принимая во внимание, что индуктивное сопротивление

$$x_k = 2\pi f_1 L_k,$$

получим еще одно *упрощенное* выражение максимального момента асинхронного двигателя:

$$M_{\max} = CU_1^2/f_1^2, \quad (3.44)$$

где $C = m_1 p / (8\pi^2 L_k)$ — постоянная для данного двигателя величина.

Из этого выражения следует, что с изменением частоты питающего напряжения f_1 меняется величина максимального момента двигателя, а следовательно, его перегрузочная способность $\lambda_M = M_{\max}/M_{\text{ном}}$. Поэтому, чтобы сохранить перегрузочную способность двигателя на требуемом уровне, необходимо одновременно с изменением частоты тока f_1 менять напряжение U_1 , подводимое к обмотке статора. Характер одновременного изменения f_1 и U_1 зависит от вида графика изменения статического момента нагрузки в конкретном электроприводе. Если статический момент M_c реактивный, т. е. его величина неизменна и частота вращения в электроприводе регулируется при соблюдении условия *постоянства момента*:

$$M = 9,55 P/n \approx \text{const},$$

то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты:

$$U_1 \approx U_{1\text{ном}}(f_1/f_{1\text{ном}}), \quad (3.45)$$

где $U_{1\text{ном}}$ и $f_{1\text{ном}}$ — номинальные значения напряжения и частоты тока, подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя; U_1 и f_1 — фактические значения напряжения и частоты тока.

Из (3.44) следует, что при условии постоянства электромагнитного момента напряжение U_1 , подводимое к обмотке статора, должно регулироваться пропорционально изменению частоты f_1 , т. е. $U_1/f_1 = \text{const}$. Механические характеристики асинхронного двигателя для этого случая показаны на рис. 3.21, а. Во всем диапазоне нагрузок характеристики остаются жесткими, а перегрузочная способность сохраняется неизменной. Исключение составляет регулирование частоты вращения при увеличении частоты f_1 выше номинальной. Предполагаемое при этом увеличение напряжения U_1 сверхноминального значения недопустимо по условиям эксплуатации двигателей. В этих условиях увеличение частоты тока не сопровождается повышением напряжения и его остаются равным номинальному значению. При этом частота вращения увеличивается, а максимальный момент M_{\max} , а следова-

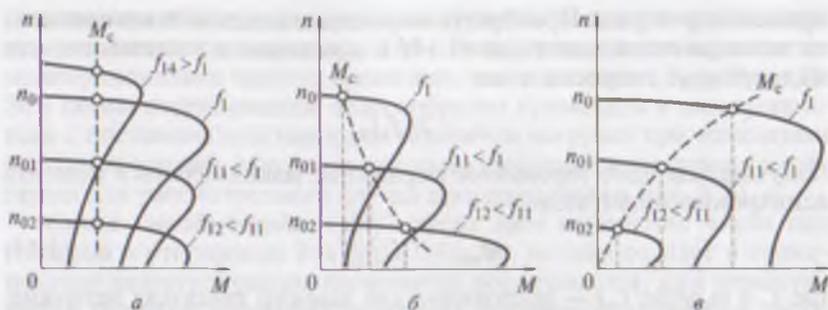


Рис. 3.21. Механические характеристики электропривода с асинхронным двигателем при условиях постоянства момента (а), постоянства мощности (б) и вентиляторной нагрузки (в)

тельно, и перегрузочная способность двигателя уменьшаются. Этому режиму на рис. 3.21, а соответствует механическая характеристика при частоте тока $f_{14} > f_1$. Потребляемая двигателем при этом способе регулирования мощность изменяется пропорционально изменению частоты вращения двигателя n .

Если же график статического момента нагрузки M_c имеет вид, показанный на рис. 3.21, б, и регулирование частоты вращения электропривода происходит при условии неизменной мощности двигателя, то соблюдается условие *постоянства мощности*, т. е.

$$P = 0,105 Mn = \text{const}, \quad (3.46)$$

и подводимое напряжение следует изменять в соответствии с выражением

$$U_1 = U_{1\text{ном}} \sqrt{f_1 / f_{1\text{ном}}}, \quad (3.47)$$

т. е.

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}. \quad (3.48)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя для условия постоянства мощности представлены на рис. 3.21, б. Электромагнитный момент в этом случае изменяется *обратно пропорционально* частоте вращения, т. е.

$$M = 9,55 P / n. \quad (3.49)$$

И наконец, случай *вентиляторного* характера нагрузки (рис. 3.21, в), когда напряжение U_1 , подводимое к обмотке статора, необходимо изменять пропорционально квадрату частоты переменного тока,

$$U_1 / f_1^2 = \text{const}. \quad (3.50)$$

3.6.4. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением подводимого напряжения

При изменении подводимого к обмотке статора напряжения U_1 максимальный момент M_{\max} меняется пропорционально квадрату этого напряжения [см. (3.14)], а критическое скольжение остается неизменным, так как его величина не зависит от напряжения U_1 [см. (3.12)]. В асинхронных двигателях общего назначения диапазон такого регулирования получается весьма узким, так как механические характеристики этих двигателей жесткие (рис. 3.22, а). Несколько лучше этот метод реализуется в асинхронных двигателях с повышенным скольжением (повышенным сопротивлением короткозамкнутой обмотки ротора), у которых механические характеристики менее жесткие (рис. 3.22, б).

Изменять подводимое к двигателю напряжение можно только вниз от номинального, напряжение свыше номинального недопустимо. Таким образом, при уменьшении напряжения U_1 частота вращения ротора n при неизменном нагрузочном моменте M_c уменьшается (скольжение увеличивается). Но при этом возрастают электрические потери в обмотке ротора, величина которых пропорциональна скольжению s :

$$P_{32} = sP_{3\text{м}}, \quad (3.51)$$

где $P_{3\text{м}}$ — электромагнитная мощность двигателя.

Это ведет к значительному снижению КПД двигателя, особенно при низких частотах вращения. Например, при уменьшении частоты вращения в два раза ($s = 0,5$) половина электромагнитной

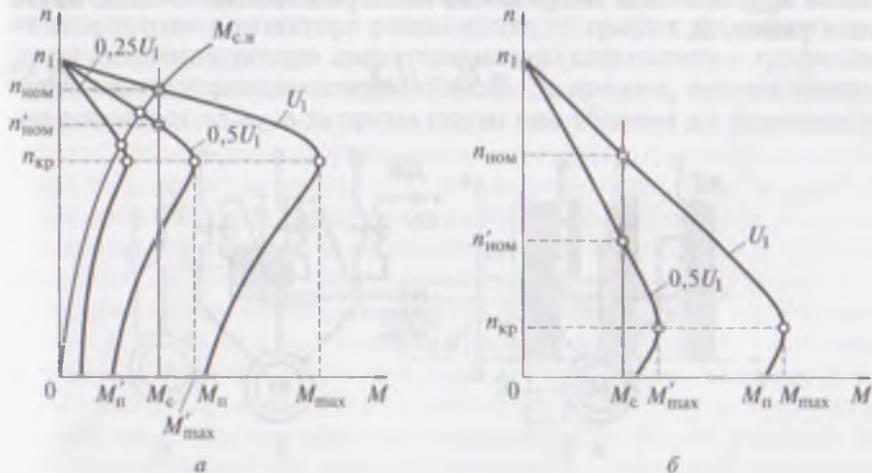


Рис. 3.22. Механические характеристики электропривода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения сети

мощности двигателя затрачивается на покрытие электрических потерь в роторе. А если учесть еще и потери в статоре, то КПД двигателя уменьшается более чем в два раза.

Такой неблагоприятный режим работы асинхронных двигателей при регулировании частоты вращения изменением напряжения U_1 обусловлен тем, что ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, пропорционален напряжению U_1 , а электромагнитный момент двигателя пропорционален квадрату этого напряжения. Поэтому по мере уменьшения напряжения электромагнитный момент двигателя M убывает быстрее, чем уменьшается ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, т. е. отношение этих величин (I_1/M) увеличивается. В итоге для получения небольшой частоты вращения требуется значительная сила тока I_1 . Следствием таких неблагоприятных соотношений являются большие потери в регулируемом двигателе и его чрезмерный перегрев.

Исключение составляет электропривод механизмов с *вентиляторной* нагрузкой, у которых статический момент нагрузки $M_{с.в}$ изменяется пропорционально квадрату частоты вращения $M_{с.в} \approx n^2$ (см. рис. 3.22, а). Следовательно, момент, требующийся при пуске двигателя и при небольшой частоте вращения, создается сравнительно небольшим током.

Изменять напряжение питания асинхронного двигателя можно посредством *регулируемого автотрансформатора* АТ, включенного в линейные провода между сетью и обмоткой статора (рис. 3.23, а).

Напряжение питания U_1 можно регулировать также трехфазным *дросселем насыщения* ДН (рис. 3.23, б). Рабочие обмотки дросселя РО создают в цепи питания двигателя индуктивное сопротивление $X_{р.о.}$, при этом напряжение непосредственно на входе двигателя равно, В,

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 - jI_1 X_{р.о.} \quad (3.52)$$

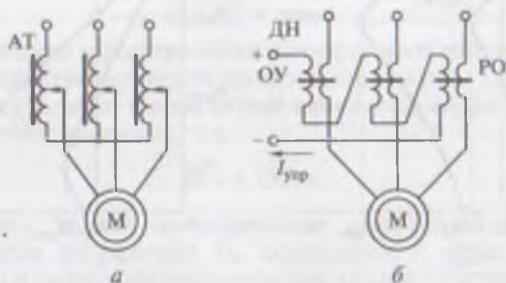


Рис. 3.23. Регулирование частоты вращения электропривода с асинхронным двигателем изменением напряжения питания

Обмотка управления ОУ подключена к источнику постоянного тока. Величина тока в обмотке управления влияет на индуктивное сопротивление рабочих обмоток. С увеличением тока управления усиливается магнитное насыщение сердечников дросселя и сопротивление $X_{p.o}$ рабочих обмоток уменьшается (напряжение повышается), и наоборот, с уменьшением тока управления сопротивление этих обмоток возрастает, что ведет к снижению напряжения на двигателе, а следовательно, к уменьшению частоты вращения. Громоздкие дроссели повышают габариты и удорожают электропривод, что является причиной, ограничивающей их применение.

Более рациональным является применение *тиристорного регулятора* напряжения ТРН. Подробнее устройство таких регуляторов и свойства асинхронных двигателей в системе ТРН — АД изложены в 8.6.

3.6.5. Импульсное регулирование

Этот способ регулирования в принципе не отличается от импульсного регулирования двигателей постоянного тока (см. 2.10). Импульсное регулирование осуществляется путем периодического включения двигателя в сеть и отключения его от сети или периодического шунтирования резисторов, включенных в цепь статора или ротора (для двигателей с фазным ротором). При этом двигатель постоянно находится в переходном режиме ускорения и замедления частоты вращения ротора.

В простейшем случае импульсное регулирование можно реализовать посредством контактора КМ (рис. 3.24, а), на обмотку которого подаются управляющие импульсы постоянного напряжения U_k продолжительностью t_n , чередующиеся с паузами продолжительностью t_p . Если принять, что время срабатывания и время отпускания контактора равны нулю, то график изменения частоты вращения ротора двигателя можно совместить с графиком чередования управляющих импульсов. За время t_n частота вращения нарастает до n_n , а за время паузы она убывает до значения n_p .

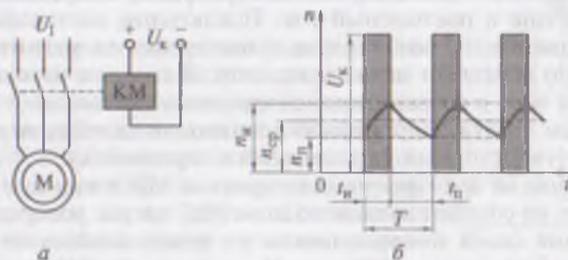


Рис. 3.24. Импульсное регулирование электропривода с асинхронным двигателем

(рис. 3.24, б). В итоге ротор вращается с некоторой средней частотой вращения:

$$n_{\text{ср}} = (n_{\text{и}} + n_{\text{п}})/2. \quad (3.53)$$

Средняя частота вращения ротора зависит от коэффициента управления $\gamma = t_{\text{и}}/T$: чем больше γ , тем больше частота вращения $n_{\text{ср}}$. Здесь $T = t_{\text{и}} + t_{\text{п}}$ называется *периодом*.

Диапазон колебаний частоты вращения при импульсном регулировании за время одного периода T составляет от $n_{\text{и}}$ до $n_{\text{п}}$, и эти колебания тем меньше, чем больше момент инерции вращающихся частей привода и чем больше частота следования импульсов $U_{\text{к}}$.

Импульсное регулирование посредством контактора КМ не обеспечивает достаточной надежности работы привода из-за быстрого выхода из строя контактов, коммутирующих силовую цепь двигателя. Более надежным является применение для этого бесконтактных устройств, например тиристорного ключа. По энергетическим показателям, импульсное регулирование частоты вращения эквивалентно регулированию частоты вращения изменением подводимого к обмотке статора напряжения.

3.7. Электропривод с синхронным двигателем

Характерным признаком синхронных двигателей является независимость частоты вращения ротора от нагрузки, т.е. эти двигатели имеют абсолютно жесткую механическую характеристику: ротор двигателя всегда вращается синхронно с полем статора $n_1 = f_1 60/p$.

Статор синхронного двигателя имеет такую же конструкцию, что и статор асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя обычно имеет явнополюсную конструкцию, на полюсах которого расположена обмотка возбуждения. При подключении этой обмотки к источнику постоянного тока в двигателе создается магнитное поле, т.е. двигатель возбуждается. Таким образом, для работы синхронного двигателя помимо трехфазного переменного тока требуется еще и постоянный ток. Исключение составляют синхронные двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами. Но обычно это двигатели малой мощности. В качестве источника постоянного тока в современных синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением обычно используется *тиристорный возбудитель* (тиристорный управляемый выпрямитель).

В отличие от асинхронных синхронные двигатели при включении в сеть не создают пускового момента, так как ротор двигателя по причине своей инерционности не может мгновенно достичь синхронной скорости вращения. Поэтому при пуске синхронного двигателя между полюсами возбужденного неподвижного ротора и вращающимся полем статора не появляется устойчивой магнит-

ной связи, необходимой для возникновения пускового момента. Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести его ротор во вращение до скорости, близкой к синхронной ($n \approx 0,95 n_1$). С этой целью в синхронных двигателях применяют *асинхронный пуск*, для чего на роторе двигателя располагают *пусковую обмотку* в виде латунных стержней, замкнутых с двух сторон кольцами.

Процесс асинхронного пуска протекает следующим образом (рис. 3.25). При включении обмотки статора синхронного двигателя в сеть вращающееся поле статора наводит в пусковой короткозамкнутой обмотке токи, которые, взаимодействуя с полем статора, создают на роторе асинхронный момент. Следовательно, при пуске синхронный двигатель работает как асинхронный. Для ограничения ЭДС, индуцируемой в обмотке возбуждения ОВ вращающимся полем статора, эту обмотку на время пуска замыкают на резистор r . При достижении скорости вращения ротора $n \approx 0,95 n_1$, что соответствует скольжению $s = 0,05$, переключателем SA обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. При этом двигатель возбуждается, между полюсами ротора и вращающимся полем статора устанавливается устойчивая магнитная связь и двигатель *втягивается в синхронизм*, т. е. его ротор начинает вращаться с частотой $n = n_1$. С увеличением нагрузки на валу двигателя пуск затрудняется, а при нагрузке, превышающей допустимую, он становится невозможным.

Синхронные двигатели изготавливают на большие мощности: от сотен до тысяч киловатт. Объясняется это тем, что при меньших мощностях применение синхронных двигателей в электроприводе нецелесообразно по технико-экономическим показателям. Обычно синхронные двигатели изготавливают на напряжения 6000 и 10 000 В. Лишь только некоторые типоразмеры синхронных двигателей серий СД2 и СД3 рассчитаны на напряжение 380 В.

Обычно серии синхронных двигателей имеют целевое назначение, т. е. каждая из серий разработана и применяется для привода конкретных рабочих механизмов. Например, серия СДК предназначена для привода компрессоров, серия СДМЗ — для привода шаровых мельниц, серия ВДС — для привода насосов и т. д. Исключение составляют серии СДН-2 и СДН3-2 на напряжение 6000 и 10 000 В мощностью от 315 до 1000 кВт, имеющие общее назначение.

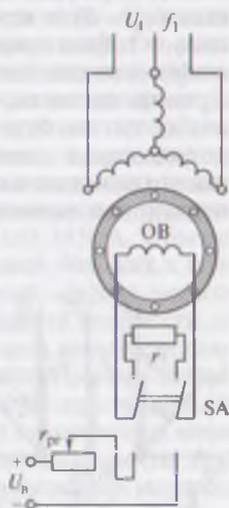


Рис. 3.25. Асинхронный пуск синхронного двигателя

Пуск является наиболее напряженным этапом работы синхронных двигателей, поэтому в сериях синхронных двигателей обычно оговариваются допустимые условия этой операции. Например, для серий СДН-2 и СДНЗ-2 указано, что пуск этих двигателей в холодном состоянии допускается на более двух раз с интервалом 5 мин, а в горячем состоянии — не более одного раза. При этом момент нагрузки на валу не должен превышать $0,4M_{ном}$. В некоторых сериях пуск допускается лишь при отсутствии нагрузки. Для ограничения пускового тока в синхронных двигателях применяют те же методы, что и в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором (см. 3.5). Перегрузочная способность синхронных двигателей составляет от 1,7 до 3,0.

По сравнению с асинхронными двигателями синхронные двигатели имеют более сложную конструкцию и, следовательно, их стоимость выше. Однако эти двигатели обладают способностью оказывать энергосберегающее влияние на участке электрической сети, в котором они работают. Дело в том, что если у работающего синхронного двигателя постепенно увеличивать ток в обмотке возбуждения I_B , то будет уменьшаться реактивная (индуктивная) составляющая тока статора I_{IP} . В результате будет уменьшаться угол фазового сдвига φ_1 между током статора I_1 двигателя и напряжением сети U_1 (рис. 3.26, а). При некотором значении тока в обмотке возбуждения I'_B синхронного двигателя реактивная составляющая тока статора уменьшится до нуля, ток статора станет чисто активным ($\varphi_1 = 0$) и коэффициент мощности синхронного двигателя $\cos \varphi_1 = 1$. Если продолжать увеличение тока возбуждения, т. е. *пере-возбуждать* двигатель, то реактивная составляющая тока статора I_{IP} вновь появится, но теперь она будет опережать по фазе напряжение, т. е. она будет *емкостной*. В результате этих процессов ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, при $I_B > I'_B$ начнет возрастать, как это показано на U -образных характеристиках (рис. 3.26, б), где пунктирной линией обозначены значения токов I'_B , соответствующие

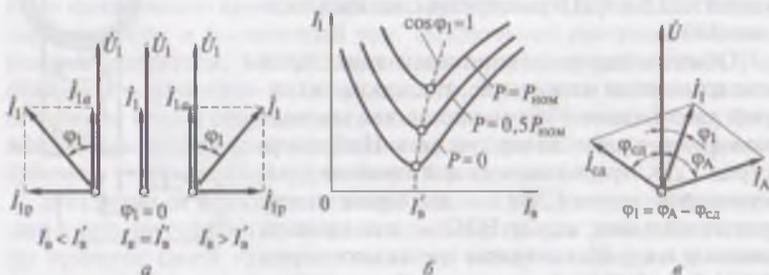


Рис. 3.26. Повышение коэффициента мощности сети посредством синхронного двигателя

щие работе синхронного двигателя с $\cos \varphi_1 = 1$ при разных значениях мощности нагрузки P двигателя ($P_{\text{ном}}, 0,5P_{\text{ном}}, 0$).

Асинхронные двигатели, трансформаторы и другие виды электромагнитных нагрузок создают в цепях переменного тока значительные индуктивные токи. Это приводит к снижению коэффициента мощности участка сети, в который включены эти устройства. В результате сила тока на этом участке сети увеличивается (за счет индуктивной составляющей), а потери, величина которых пропорциональна квадрату тока, возрастает.

Допустим в сеть с напряжением \dot{U}_1 включены асинхронные двигатели, суммарный ток которых \dot{I}_A , за счет значительной индуктивной составляющей, имеет большой фазовый сдвиг φ_A относительно напряжения сети \dot{U}_1 (рис. 3.26, в). Если же в эту сеть включить синхронный двигатель и создать в нем режим перевозбуждения, то потребляемый им ток $\dot{I}_{\text{сд}}$ будет опережать по фазе напряжением сети на угол $\varphi_{\text{сд}}$. При этом фазовый сдвиг результирующего тока $\dot{I}_1 = \dot{I}_A + \dot{I}_{\text{сд}}$ относительно напряжения сети \dot{U}_1 намного уменьшится: $\varphi_1 = \varphi_A - \varphi_{\text{сд}}$, а коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ возрастет. В итоге потери в рассматриваемой сети сократятся по сравнению с их величиной, если бы вместо синхронного двигателя в данную сеть включили еще один асинхронный двигатель.

В некоторых случаях для повышения коэффициента мощности в сети применяют синхронные компенсаторы СК, представляющие собой перевозбужденные синхронные двигатели специальной конструкции, работающие без нагрузки на валу. Синхронный компенсатор фактически используется как генератор реактивной мощности. Применяют синхронные компенсаторы для повышения коэффициента мощности (для уменьшения потерь мощности) на участках сетей со значительной электромагнитной нагрузкой (например, сети крупного промышленного предприятия с большим количеством трансформаторов и асинхронных двигателей), так как мощность изготавливаемых синхронных компенсаторов значительна и составляет от 16 до 160 МВ·А. Обычно коэффициент мощности повышают до значений, близких к единице, например до 0,95, что дает значительный эффект энергосбережения. Стремление увеличить коэффициент мощности до $\cos \varphi_c = 1$ ведет к значительному росту требуемой мощности синхронного компенсатора, и следовательно, капитальных затрат. Например, для повышения $\cos \varphi_c = 0,7$ до 0,95 при мощности потребителя 100 МВ·А требуется синхронный компенсатор мощностью 31 МВ·А. Для доведения коэффициента мощности этой сети до $\cos \varphi_c = 1$ требуется синхронный компенсатор мощностью 55 МВ·А в 1,8 раза больше.

Обычно процесс регулирования тока в обмотке возбуждения синхронного двигателя или компенсатора автоматизируют посредством системы автоматического регулирования возбуждения АРВ,

обмотки возбуждения (см. рис. 3.28, б), что объясняется простотой его реализации.

Следует иметь в виду, что КПД асинхронного исполнительного двигателя всегда ниже, чем у двигателя обычной конструкции. Объясняется это тем, что с целью устранения самохода двигателя (самопроизвольного вращения при снятии сигнала управления) обмотку ротора исполнительных двигателей выполняют с повышенным активным сопротивлением, чтобы критическое скольжение было не менее двух ($s_{кр} \geq 2$). В итоге электрические потери в роторе, величина которых пропорциональна скольжению, оказываются повышенными, что снижает КПД и полезную механическую мощность исполнительного двигателя. Однако в связи с наличием конденсатора в цепи обмотки управления коэффициент мощности двигателя при амплитудно-фазовом управлении достигает значения 0,85—0,90, что способствует повышению энергетических показателей исполнительного двигателя.

Механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя при амплитудно-фазовом управлении, в отличие от аналогичных характеристик исполнительных двигателей постоянного тока (см. 2.11), криволинейны. При этом, чем меньше напряжение управления, тем ниже частота вращения холостого хода, так как с уменьшением напряжения управления вращающееся поле статора становится все более эллиптическим, увеличивается обратная составляющая этого поля, создающая на роторе тормозной момент. Значение фазосдвигающей емкости C выбирается из условия получения кругового вращающегося поля только при пуске двигателя, поэтому в режиме холостого хода вращающееся поле двигателя становится эллиптическим.

Несмотря на отмеченные недостатки в энергетических показателях и механических характеристиках, исполнительные асинхронные двигатели получили широкое применение в автоматическом электроприводе, что объясняется прежде всего отсутствием щеточно-коллекторного узла и простотой схем управления этими двигателями.

3.9. Исполнительные шаговые двигатели

Шаговые двигатели преобразуют управляющие электрические импульсы в заданный угол поворота, обрабатываемый дискретно. Эти двигатели имеют статор, на магнитопроводе которого находятся две или три одинаковые пространственно сдвинутые обмотки, поочередно присоединяемые к источнику электрической энергии (рис. 3.29, а). От этих источников в обмотки статора поступают импульсы прямоугольной формы регулируемой частоты

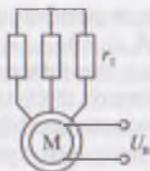


Рис. 3.27. Схема динамического торможения электропривода с синхронным двигателем

основным элементом которой является управляемый тиристорный выпрямитель.

До последнего времени синхронные двигатели применялись исключительно в нерегулируемом электроприводе. Однако в связи с созданием разнообразных электронных преобразователей частоты появилась возможность частотного регулирования скорости вращения (см. 3.6). Но частотное регулирование синхронных двигателей имеет некоторые особенности. Во-первых, обычно эти двигатели применя-

ют в приводах с большим моментом инерции рабочей машины, поэтому изменять частоту тока следует плавно, учитывая большой запас кинетической энергии вращающихся масс. В противном случае возможно «выпадение» двигателя из синхронизма, т.е. остановка двигателя или продолжение вращения его ротора с асинхронной скоростью. Во-вторых, следует учитывать сложность пуска синхронных двигателей. Начальная частота тока в цепи статора этих двигателей при пуске должна составлять доли герца, а затем следует *медленно* повышать частоту тока до требуемого значения.

Торможение синхронного двигателя возможно переводом его в генераторный режим с применением динамического торможения. В этом случае обмотку статора двигателя отключают от сети и замыкают на резисторы r_r (рис. 3.27). Ротор, вращаясь по инерции, своим магнитным потоком индуцирует в обмотке статора ЭДС. Так как эта обмотка замкнута, то в ней появляются токи, величина которых ограничивается сопротивлением резисторов r_r . Возникающий при этом на роторе электромагнитный момент, как и в любом генераторе, является тормозящим и способствует быстрой остановке ротора.

3.8. Исполнительные асинхронные двигатели

Наибольшее применение в качестве исполнительных двигателей получили двухфазные асинхронные двигатели. На статоре такого двигателя расположена двухфазная обмотка. Одна из фазных обмоток статора — это обмотка возбуждения ОВ. Она постоянно включена в сеть переменного тока на неизменное напряжение U_1 . Другая фазная обмотка статора — обмотка управления ОУ, на нее подают сигнал управления U_2 от блока управления БУ (рис. 3.28).

Для работы исполнительного асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотка статора создавала вращающееся магнитное поле. Условие возникновения такого поля — наличие в двигателе пространственного и временного сдвига МДС фазных обмоток статора.

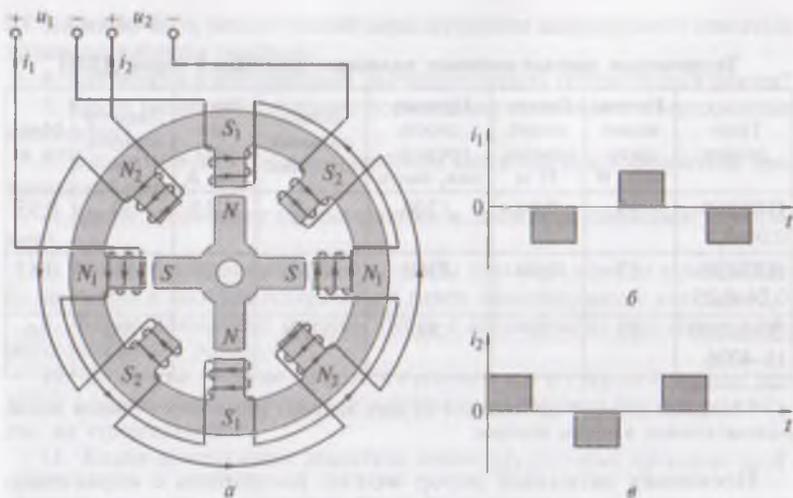


Рис. 3.29. Шаговый двигатель с активным ротором

(рис. 3.29, б, в). Под влиянием импульсов тока i_1 или i_2 полюсы статора соответственно намагничиваются с чередующейся полярностью $N_1 - S_1 - N_1 - S_1$ или $N_2 - S_2 - N_2 - S_2$. Изменение направления токов в обмотках статора приводит к соответствующему перемагничиванию полюсов и установлению в них новой (противоположной) полярности.

Явнополюсный ротор шагового двигателя может быть активным или реактивным. Активный ротор шагового двигателя имеет обмотку возбуждения постоянного тока, контактные кольца и щетки или же выполняется в виде постоянного магнита с полюсами чередующейся полярности, как это показано на рис. 3.29, а. Реактивный ротор выполняется без обмотки возбуждения с явно выраженными не намагничеными полюсами. Число полюсов ротора в два раза меньше числа полюсов статора.

Каждое переключение обмоток статора приводит к повороту результирующего магнитного поля двигателя и вызывает синхронное перемещение ротора на один шаг. Направление поворота ротора зависит от полярности импульса, поданного на соответствующую обмотку статора.

Угловой шаг ротора двигателя, град, определяют по формуле

$$\alpha_{\text{ш}} = 360 / (2p_2 m_1 k_{\phi}),$$

где $2p_2$ — число явных полюсов ротора; m_1 — число пространственно смещенных обмоток статора; k_{ϕ} — коэффициент, зависящий от способа включения фазных обмоток статора: при раздельном включении $k_{\phi} = 1$, при раздельно-совместном $k_{\phi} = 2$.

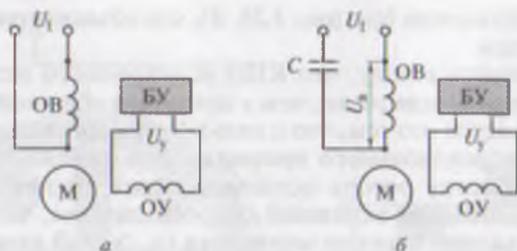


Рис. 3.28. Схемы управления асинхронным исполнительным двигателем:
 а — амплитудное; б — амплитудно-фазовое

Пространственный сдвиг МДС обеспечивается конструкцией двигателя: фазные обмотки статора расположены так, что их оси сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 90 эл. град. Временной (фазовый) сдвиг МДС создается включением фазных обмоток статора по специальным схемам, содержащим фазовращатель или фазосдвигающий конденсатор в цепи одной из обмоток.

Для управления асинхронными исполнительными двигателями применяют три способа: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый.

При *амплитудном управлении* (рис. 3.28, а) напряжение управления U_y независимо от его значения (амплитуды) имеет фиксированный фазовый сдвиг на 90° относительно напряжения возбуждения U_1 . Управление исполнительным двигателем выполняется путем изменения значения (амплитуды) напряжения управления U_y . Реверсирование двигателя достигается изменением фазы напряжения управления на 180° .

При *фазовом управлении* напряжение управления имеет постоянное значение (амплитуду), а управление двигателем выполняется путем изменения угла фазового сдвига этого напряжения U_y относительно напряжения U_1 посредством фазовращателя.

При *амплитудно-фазовом управлении* (рис. 3.28, б) в цепь обмотки возбуждения ОВ включают фазосдвигающий конденсатор С. При регулировании значения (амплитуды) напряжения управления U_y меняются токи в обмотках управления и возбуждения; это приводит к изменениям как величины напряжения на обмотке возбуждения U_{ϕ} , так и фазового сдвига между напряжениями U_y и U_{ϕ} .

Выбор способа управления асинхронным исполнительным двигателем определяется прежде всего требованиями системы автоматического управления, предъявляемыми к исполнительному двигателю. Наибольшее практическое применение получил амплитудно-фазовый способ управления асинхронными исполнительными двигателями с включением фазосдвигающего конденсатора в цепь

Технические данные шаговых волновых двигателей серии ДВШ

Типо-размер	Напряжение питания, В	Вращающий момент, Н·м	Приемистость предельная, шаг/с	Номинальный шаг, град	Номинальный ток, А	Диаметр корпуса, мм	Масса, кг
ДВШ50-0,04-0,5	12	0,04	1300	0,5	1,15	50	0,55
ДВШ50-0,04-0,25	12	0,04	2500	0,25	1,2	50	0,55
ДВШ200-16-4096	27	30*	200	0,088	5	200	16

* Момент, создаваемый спаркой из двух шаговых двигателей с общим валом, расположенных в одном корпусе.

Поскольку активный ротор можно выполнить с ограниченным числом явных полюсов $2p \leq 12$, а реактивный ротор без обмотки возбуждения — на значительно большее число полюсов, допуская минимальный шаг по окружности 2 мм, то шаговые двигатели с реактивным ротором позволяют осуществлять поворот ротора на доли градуса за один шаг, чего нельзя достичь при активном роторе.

Шаговые двигатели можно пускать и останавливать без потери шага, если частота следующих друг за другом импульсов не превышает предельную частоту, называемую *частотой приемистости* $f_{пр}$, которая может достигать 10 000 Гц.

Шаговые двигатели могут работать не только в режиме фиксации ротора в определенном положении после отработки ротором одного или нескольких импульсов, но и в режиме синхронного вращения при постоянной частоте подачи управляющих импульсов. В последнем случае ротор вращается с постоянной (синхронной) частотой вращения, пропорциональной частоте подачи импульсов f_1 на обмотки статора, об/мин,

$$n = \alpha_{ш} f_1 / 6.$$

В табл. 3.2 приведены технические данные шаговых волновых двигателей серии ДВШ, получивших широкое применение в автоматическом электроприводе. Такой двигатель представляет собой сочетание собственно шагового двигателя с волновым редуктором, что способствует получению значительных вращающих моментов при минимальном угловом шаге ротора.

Контрольные вопросы

1. Какие режимы работы возможны в асинхронных двигателях?
2. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя?

3. Какую часть механической характеристики асинхронного двигателя называют рабочим участком?
4. Как можно в асинхронном двигателе создать генераторный режим?
5. Какие виды динамического торможения применяют в асинхронных двигателях?
6. Как ограничить ток в асинхронном двигателе при торможении противоключением?
7. Какие требования предъявляются к пусковым свойствам двигателей?
8. Что необходимо предпринять, чтобы пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором был равен максимальному значению?
9. Какие применяют способы пуска в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором?
10. Во сколько раз уменьшаются пусковой ток и пусковой момент при пуске асинхронного двигателя переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»?
11. Какие асинхронные двигатели имеют улучшенные пусковые свойства?
12. В чем состоит реостатное регулирование асинхронного двигателя с фазным ротором?
13. Что такое режим постоянного момента в многоскоростном асинхронном двигателе?
14. Каковы достоинства и недостатки частотного регулирования?
15. Почему при изменении частоты тока в питающей сети необходимо одновременно менять величину напряжения?
16. Как выполняется условие постоянной мощности при частотном регулировании?
17. Почему при регулировании частоты вращения изменением подводимого напряжения диапазон регулирования получается узким?
18. Объясните процесс асинхронного пуска синхронного двигателя.
19. С какой целью в синхронных двигателях применяют режим перевозбуждения?
20. В чем особенность частотного регулирования синхронных двигателей?
21. Можно ли в синхронном двигателе применить регулирование изменением числа полюсов в обмотке статора?
22. Дайте сравнительную оценку свойств исполнительных двигателей постоянного тока и асинхронных.
23. Какие параметры шаговых двигателей являются основными?

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

4.1. Основные понятия

В процессе работы электропривода происходят изменения параметров его работы. Причиной этому могут быть преднамеренные действия, связанные с технологическим процессом рабочей машины: пуск двигателя, его остановка, торможение, реверсирование, регулирование частоты вращения. Возможны и случайные возмущения, приводящие к изменениям параметров работы электропривода, например колебания напряжения или частоты тока в питающей сети. При изменениях параметров электропривод переходит из одного установившегося состояния в другое, с другими значениями момента, скорости, силы потребляемого тока. Режим работы электропривода при переходе из одного установившегося состояния к другому, с другими значениями момента, частоты вращения, тока и других параметров называют *переходным режимом*. Явления, возникающие при переходных режимах, называют *переходными процессами*.

Технологические операции некоторых рабочих машин таковы, что они непрерывно создают в электроприводе переходные процессы (подъемные краны, дробилки, прокатные станы, прессы, транспортные средства и др.). В приводных двигателях переходные процессы разделяются на электромагнитные, механические и тепловые. Электромагнитные переходные процессы связаны с изменениями магнитных полей и ЭДС, индуцированными этими полями. Тепловые переходные процессы обусловлены, главным образом, колебаниями величин токов, тепловое действие которых вызывает изменения температуры нагрева двигателя. Механические переходные процессы обусловлены инерцией движущихся частей электропривода, они возникают при изменениях скорости движения этих частей.

Важнейшим параметром переходного процесса является его продолжительность. Электромагнитные переходные процессы в электродвигателе по сравнению с механическими переходными процессами имеют небольшую продолжительность, и в большинстве случаев они не оказывают значительного влияния на работу электропривода. Продолжительность тепловых переходных процессов, в силу их инерционности, во много раз больше механических. Из этого следует, что наибольшее влияние на работу электропривода

в переходных режимах оказывают механические переходные процессы, которые, применительно к электроприводу, принято называть *электромеханическими*.

Способ расчета продолжительности переходного процесса зависит от формы совместной характеристики (см. 1.3): при линейной форме характеристики (см. рис. 1.2) расчет проще, чем при криволинейной.

На характер протекания переходных процессов значительное влияние оказывает момент инерции ротора (якоря) двигателя. В двигателях небольшой мощности с малым моментом инерции ротора (якоря) переходные процессы кратковременны, не превышают нескольких периодов переменного тока. В двигателях большой мощности момент инерции ротора (якоря) значительно больше и переходные процессы в них более продолжительны.

4.2. Переходные процессы в электроприводе при линейной совместной характеристике

Совместная характеристика системы электропривода получается линейной при условии, если механические характеристики двигателя и рабочей машины прямолинейны. Такая характеристика была построена на рис. 1.2 (график DF). Воспользуемся этой характеристикой для дальнейших построений. Допустим, электропривод работал в режиме точки B_1 с координатами ω_1 и M_1 (рис. 4.1). Затем режим работы переместился в точку B_2 с координатами ω_2 и M_2 . Обозначив координаты точек, получим два подобных треугольника: abc и $ab'c'$, для которых справедливо равенство:

$$ac/ac' = cb/c'b',$$

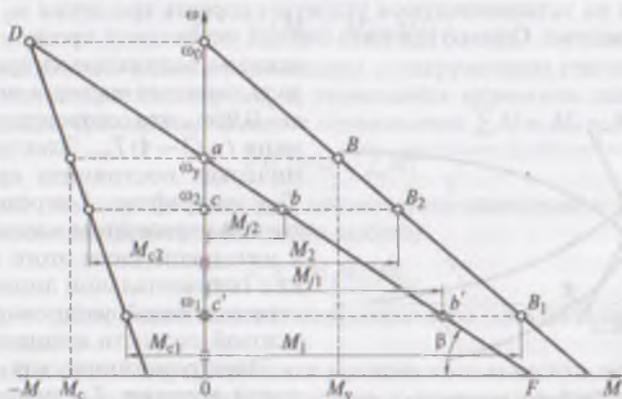


Рис. 4.1. Линейная совместная характеристика электропривода

или

$$\Delta\omega_2/\Delta\omega_1 = M_{j2}/M_{j1}, \quad (4.1)$$

где

$$\Delta\omega_2 = \omega_y - \omega_2; \quad \Delta\omega_1 = \omega_y - \omega_1; \quad M_{j2} = M_2 - M_{c2}; \quad M_{j1} = M_1 - M_{c1}.$$

Используя выражение (1.4) и подставив полученные значения динамических моментов в (4.1), после преобразования получим

$$J (\Delta\omega_1/M_{j1})(d\omega/dt) = \Delta\omega_2. \quad (4.2)$$

Обозначим $J (\Delta\omega_1/M_{j1}) = T_{эм}$ и, подставив его в (4.2), получим

$$T_{эм}(d\omega/dt) = \omega_y - \omega_2,$$

или

$$d\omega/dt + (\omega_2/T_{эм}) = (\omega_y/T_{эм}). \quad (4.3)$$

Получено линейное дифференциальное уравнение движения первого порядка. Если принять $\omega_2 = \omega_y$, а $\omega_1 = 0$, т.е. считать, что произошел пуск двигателя до установившейся угловой скорости ω_y , то решение уравнения (4.3) имеет вид:

$$\omega = \omega_y (1 - e^{-t/T_{эм}}), \quad (4.4)$$

где $e = 2,72$ — основание натурального логарифма.

Величину $T_{эм}$ в (4.4) называют *электромеханической постоянной времени*, измеряемой в секундах. Электромеханическая постоянная времени характеризует скорость протекания переходного процесса: чем меньше $T_{эм}$, тем быстрее протекает переходный процесс.

На рис. 4.2 показаны графики переходных процессов $\omega = f(t)$. График 1, имеющий вид экспоненты, соответствует *разгону двигателя* при включении в сеть. Как видно из этого графика, время t выхода на установившуюся угловую скорость вращения ω_y бесконечно велико. Однако принято считать переходной процесс закон-

ченным, если скорость вращения вала двигателя достигла значения $\omega = 0,95\omega_y$, что соответствует времени $t \approx (3 - 4)T_{эм}$. Электромеханическая постоянная времени $T_{эм1}$ на графике 1 определяется точкой пересечения касательной к начальной части этого графика с горизонтальной линией, соответствующей установившейся угловой скорости вращения ω_y .

Электромеханическая постоянная времени $T_{эм}$ пропорциональна моменту инерции систе-

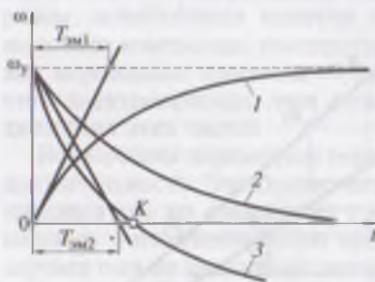


Рис. 4.2. Графики переходных процессов

мы электропривода J и тангенсу угла наклона β совместной характеристики к оси абсцисс $\operatorname{tg} \beta = \Delta\omega/\Delta M_j$ (см. рис. 4.1): $T_{эм} = J \operatorname{tg} \beta$. Чем больше угол β , тем продолжительнее переходный процесс:

$$T_{эм} = J \operatorname{tg} \beta = J \Delta\omega/\Delta M_j \quad (4.5)$$

График 2 определяет переходный процесс при остановке двигателя (отключении его от сети). Если же статический момент сопротивления рабочего механизма *активный* (см. рис. 1.2, а), что имеет место в подъемных устройствах, то при отключении двигателя, работавшего на подъем груза, его скорость уменьшается до нуля (точка К). Но если в это время не включить тормоз, удерживающий вал двигателя от вращения, то под действием активного статического момента вал двигателя начнет вращение в противоположную сторону (график 3).

Переходя к частоте вращения (об/мин), для практических расчетов времени переходного процесса (с) при линейной переходной характеристике можно воспользоваться следующими формулами:

время разгона от частоты вращения n_1 до n_2 , т.е. при перепаде частот вращения $\Delta n = n_2 - n_1$ и динамическом моменте $M_{jcp} = (M_{j1} + M_{j2})/2$:

$$t_p = 0,105 J \Delta n / M_{jcp}; \quad (4.6)$$

время пуска двигателя без нагрузки

$$t_{п0} = 0,105 J n_0 / (0,5 M_n); \quad (4.7)$$

время пуска двигателя с номинальной нагрузкой

$$t_{п.ном} = 0,105 J n_{ном} / (M_{п.ср} - M_c), \quad (4.8)$$

где

$$M_{п.ср} = (M_n + M_{ном})/2;$$

время динамического торможения с нагрузочным статическим моментом сопротивления M_c и тормозным моментом двигателя M_t , т.е. при суммарном моменте торможения $\sum M = M_t + M_c$,

$$t_{т.д} = 0,105 J n / \sum M; \quad (4.9)$$

время самоторможения при отключении двигателя в режиме холостого хода (время свободного выбега)

$$t_{выб} = 0,105 J n_1 / M_{тр}, \quad (4.10)$$

где $M_{тр}$ — статический момент сопротивления электропривода от сил трения.

При линейной характеристике статического момента линейная совместная характеристика возможна в приводах с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения.

В этом случае электромеханическая постоянная времени электропривода, с,

$$T_{эм} = J(\sum r + r_{доб}) / (c_c c_m \Phi)^2. \quad (4.11)$$

Это относится также к приводам с двигателями, чьи механические характеристики нелинейны, но могут быть частично или полностью *аппроксимированы*, т.е. представлены прямыми линиями при их незначительном отклонении от фактической нелинейной формы. Например, в электроприводах с трехфазными асинхронными двигателями в пределах рабочего участка их механической характеристики, который можно считать прямой линией (см. 3.2). Для этих двигателей электромеханическая постоянная времени, с,

$$T_{эм} = 0,105 n_1 J s_{ном} / M_{ном}. \quad (4.12)$$

Как видно из выражений (4.11) и (4.12), электромеханическая постоянная времени не зависит от нагрузки на валу двигателя. Кроме того, с повышением активного сопротивления в цепи якоря в двигателях постоянного тока или ротора в асинхронных двигателях (что эквивалентно увеличению скольжения) постоянная времени $T_{эм}$ возрастает. Последнее объясняется тем, что при повышении сопротивления в цепи якоря (ротора) уменьшается жесткость механических характеристик, т.е. увеличивается угол β (см. рис. 4.1), а следовательно, и $\operatorname{tg} \beta$, что способствует росту электромеханической постоянной времени [см. (4.5)].

4.3. Переходные процессы в электроприводе при нелинейной совместной характеристике

Если одна из составляющих совместную механическую характеристику нелинейная, то и совместная характеристика также нелинейная. В этом случае расчет переходного процесса затруднен тем, что дифференциальное уравнение движения не имеет универсального решения. Поэтому при определении времени протекания переходных процессов приходится идти на некоторые допущения (приближенность).

Наибольшее применение в практических расчетах переходных режимов получил *метод конечных приращений*. Сущность этого метода состоит в том, что нелинейную совместную характеристику электропривода *линеаризируют*, т.е. разделяют на x прямолинейных участков, на каждом из которых зависимость $\omega = f(M_j)$ линейна.

Таким образом, нелинейную совместную характеристику заменяют ступенчатой линией. При этом на каждом из вертикальных участков этой линии величина динамического момента неизменна. Пример такого построения показан на рис. 4.3, где изображены: нелинейная механическая характеристика $\omega = f(M)$ двигателя по-

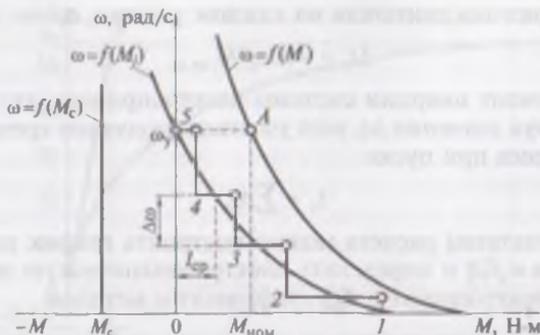


Рис. 4.3. К понятию о методе линейных приращений

стоянного тока последовательного возбуждения, линейная механическая характеристика активного статического момента сопротивления $\omega = f(M_c)$ и нелинейная совместная характеристика электропривода $\omega = f(M)$. Точка A на механической характеристике двигателя с координатами ω_y и $M_{ном}$ соответствует установившемуся режиму работы электропривода ($M = M_c$). В связи с тем что совместная характеристика нелинейная, формулы для расчета продолжительности переходных процессов, приведенные в 4.2, неприменимы.

Воспользуемся методом конечных приращений для определения продолжительности пусковой операции. С этой целью нелинейную совместную характеристику разделяем на $x = 4$ участка, т. е. заменяем ее ступенчатой ломаной линией, содержащей четыре участка, отмеченные точками: 1-2, 2-3, 3-4 и 4-5. Чем больше участков, тем точнее метод конечных приращений, но при этом возрастает объем выполняемой работы.

Для каждого участка определяют приращение угловой скорости вращения, рад/с,

$$\Delta\omega_x = h_{\omega x} m_{\omega}, \quad (4.13)$$

где $h_{\omega x}$ — высота участка ступенчатой линии, мм; m_{ω} — масштаб угловой скорости вращения, (рад/с)/мм.

Затем находят средние значения динамического момента, соответствующие каждому из участков, Н·м,

$$M_{j \text{ ср. } x} = l_{\text{ср. } x} m_m, \quad (4.14)$$

где $l_{\text{ср. } x}$ — среднее значение длины линии по оси абсцисс, соответствующее данному участку ступенчатой линии, мм,

$$l_{\text{ср. } x} = (l_{\text{нач. } x} + l_{\text{кон. } x})/2,$$

m_m — масштаб момента, (Н·м)/мм.

Время разгона двигателя на каждом участке, с,

$$\Delta t_x = J \Delta \omega_x / M_{j \text{ ср. } x}, \quad (4.15)$$

где J — момент инерции системы электропривода, кг·м².

Суммируя значения Δt_x всех участков, получают время переходного процесса при пуске:

$$t_{\text{п}} = \sum \Delta t_x. \quad (4.16)$$

По результатам расчета можно построить график переходного процесса $\omega = f(t)$ и определить электромеханическую постоянную времени электропривода $T_{\text{эм}}$ графическим методом.

Пример 4.1. В электроприводе подъемного механизма применен двигатель постоянного тока последовательного возбуждения. Технические данные двигателя: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 35,3$ кВт; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 525$ об/мин; номинальный момент $M_{\text{ном}} = 673$ Н·м; момент инерции двигателя $J_d = 3$ кг·м². Момент инерции рабочего механизма (приведенное значение) $J_{\text{р.м}} = 0,2J_d$; статический момент сопротивления (активный) механизма $M_c = -673$ Н·м.

Данные механической характеристики двигателя:

ω , рад/с	55	36,3	32	5	0
M , Н·м	673	960	1376	2048	2432

Требуется: 1) определить время переходного процесса электропривода при пуске до установившегося режима, применив метод конечных приращений; 2) построить график переходного процесса $\omega = f(t)$ и определить графическим методом электромеханическую постоянную времени при пуске электропривода $T_{\text{эм}}$.

Решение. 1. Номинальная угловая скорость вращения, рад/с,

$$\omega_{\text{ном}} = 0,105 n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 525 = 55 \text{ рад/с.}$$

2. Момент инерции системы электропривода

$$J = J_d + 0,2J_d = 1,2J_d = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \text{ кг·м}^2.$$

3. Принимаем масштаб момента $m_m = 32$ (Н·м)/мм и масштаб угловой скорости вращения $m_\omega = 1,1$ (рад/с)/мм; по приведенным выше данным

Таблица 4.1

Значения величин

Участки совместной характеристики	1—2	2—3	3—4	4—5
$\Delta \omega_x$, рад/с	5,0	15,0	15,0	20,0
$l_{\text{мш.д.}}$, мм	52	31	17	6
$l_{\text{кон.д.}}$, мм	31	17	6	0
$l_{\text{ср.д.}}$, мм	41,5	24	11,5	3
$M_{j \text{ ср. } x}$, Н·м	1328	768	368	96
Δt_x , с	0,014	0,075	0,160	0,751

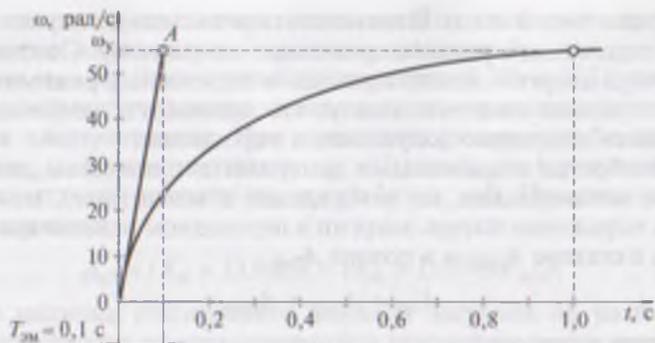


Рис. 4.4. График переходного процесса

строим механическую характеристику двигателя $\omega = f(M)$ и характеристику активного статического момента $\omega = f(M_c)$, используя которые, строим совместную характеристику электропривода $\omega = f(M_p)$ (см. рис. 4.3).

4. Линеаризуем нелинейный график совместной характеристики, разделив его на четыре участка (см. рис. 4.3); выполняем построения по приведенным ранее указаниям.

5. Измеренные и рассчитанные значения величин заносим в табл. 4.1.

6. Суммируя значения Δt_x , получаем время переходного процесса при пуске:

$$t_n = \sum \Delta t_x = 1,0 \text{ с} = 0,014 + 0,075 + 0,160 + 0,751 = 1,0 \text{ с.}$$

7. Запишем ряд нарастающих значений угловой скорости ω и соответствующие им нарастающие значения времени t :

ω , рад/с	5	20	35	55
t , с	0,014	0,089	0,249	1,0

По полученным данным строим график переходного процесса $\omega = f(t)$ (рис. 4.4).

8. Проводим касательную к начальной части графика переходного процесса до пересечения прямой, параллельной оси абсцисс в точке A, и определяем электромеханическую постоянную времени при пуске электропривода $T_{эм} = 0,1 \text{ с}$.

4.4. Потери энергии в электроприводе при переходных режимах

Переходные режимы в электроприводе (пуск, торможение, реверс) сопровождаются потерями энергии. На величину этих потерь влияет ряд параметров: продолжительность переходного режима, начальная и конечная частоты вращения, величина статической нагрузки, характер ее изменения, моменты инерции вра-

шающихся частей и т. п. Изменения перечисленных параметров за время переходного режима происходят по-разному. Поэтому расчет потерь энергии электропривода в переходных режимах представляет весьма сложную задачу, что приводит к необходимости принимать некоторые допущения и упрощения.

Пренебрегая постоянными потерями в приводном двигателе (потери механические, на возбуждения и магнитные), можно записать выражение потерь энергии в переходном режиме как сумму потерь в статоре $A_{1пер}$ и в роторе $A_{2пер}$:

$$A_{пер} = A_{1пер} + A_{2пер}.$$

Потери в статоре

$$A_{1пер} = A_{2пер}(R_1/R_2') = K_R A_{2пер}, \quad (4.17)$$

где $K_R = R_1/R_2'$ — коэффициент активных сопротивлений, равный отношению активного сопротивления цепи обмотки статора R_1 к приведенному значению активного сопротивления цепи обмотки ротора R_2' ; для конкретного двигателя K_R величина постоянная.

В процессе разгона ротора (якоря) двигателя до пограничной угловой скорости вращения ω_0 в режиме холостого хода ($M_c = 0$) затрачивается энергия, равная кинетической энергии всех вращающихся частей системы электропривода, обладающих моментом инерции J . Эта энергия и составляет потери при разгоне ротора (якоря) до скорости ω_0 :

$$A_{02пер} = J\omega_0^2/2. \quad (4.18)$$

Полные потери переходного режима при пуске вхолостую

$$A_{0пер} = A_{01пер} + A_{02пер} = (K_R + 1)J\omega_0^2/2. \quad (4.19)$$

При пуске под нагрузкой ($M_c > 0$), когда статический момент сопротивления $M_c = \text{const}$, среднее значение вращающего момента на валу двигателя $M_{ср} = \text{const}$, а угловая скорость вращения меняется от начального значения $\omega_{нач}$ до установившегося значения ω_y , величина потерь переходного процесса равна, Дж,

$$A_{пер} = A_{0пер}(s_{нач}^2 - s_y^2)[M_{ср}/(M_{ср} \pm M_c)], \quad (4.20)$$

или, переходя к частоте вращения $n = 0,105 \omega$, получим

$$A_{пер} = (K_R + 1)10^{-2}(Jn_0^2/2)(s_{нач}^2 - s_y^2)[M_{ср}/(M_{ср} \pm M_c)], \quad (4.21)$$

где $s_{нач}$ и s_y — скольжения при начальной и установившейся скоростях вращения,

$$s_{нач} = (\omega_0 - \omega_{нач})/\omega_0; \quad s_y = (\omega_0 - \omega_y)/\omega_0. \quad (4.22)$$

Среднее значение момента

$$M_{ср} = (M_n + M_{ном})/2. \quad (4.23)$$

Для двигателя постоянного тока вместо скольжения применяют понятие *относительной частоты вращения* $\delta_{\text{нач}} = s_{\text{нач}}$, $\delta_y = s_y$; при этом $\omega_0 = \omega_1$. Знак плюс в выражениях (4.20) и (4.21) соответствует режиму торможения, а знак минус — режиму пуска.

Пуск электропривода. При пуске электропривода *без нагрузки* $M_c = 0$; $\omega_{\text{нач}} = 0$, следовательно, $s_{\text{нач}} = 1$ или $\delta_{\text{нач}} = 1$, разгон происходит до угловой частоты ω_0 , когда $\delta_y = s_y = 0$. При этом потери энергии равны

$$A_{\text{п}0} = (K_R + 1)J\omega_0^2/2 = (K_R + 1)10^{-2}Jn_0^2/2. \quad (4.24)$$

При наличии статического момента нагрузки M_c разгон при пуске происходит до установившейся угловой скорости вращения ω_y , когда $\delta_y = s_y > 0$. Тогда потери энергии равны:

$$A_{\text{п}} = (K_R + 1)(J\omega_0^2/2)(1 - s_0^2)[M_{\text{ср}}/(M_{\text{ср}} - M_c)], \quad (4.25)$$

или, переходя к частоте вращения $n = 0,105 \omega$, получим

$$A_{\text{п}} = (K_R + 1)10^{-2}(Jn^2/2)(1 - s_y^2)[M_{\text{ср}}/(M_{\text{ср}} - M_c)]. \quad (4.26)$$

Анализ выражений (4.24) — (4.26) показывает:

1. При пуске двигателя со статической нагрузкой M_c , по сравнению с пуском в режиме холостого хода ($M_c = 0$), потери энергии увеличиваются.

2. Потери энергии при реостатном пуске не зависят от числа ступеней пускового реостата — при одноступенчатом реостате они такие же, что и при многоступенчатом; но потери энергии зависят от способа пуска — при реостатном пуске они больше, чем при пуске с понижением питающего напряжения (за счет потерь в резисторах реостата $I^2 R_{\text{ГР}}$).

3. Потери энергии пропорциональны моменту инерции J движущихся элементов системы электропривода, поэтому при уменьшении J потери энергии снижаются. Это возможно при использовании малоинерционных двигателей в качестве приводных, например двигателей с уменьшенным диаметром ротора (якоря).

4. Потери энергии пропорциональны ω_0^2 , поэтому с ростом частоты вращения потери энергии в переходном режиме значительно возрастают.

Потери энергии при пуске можно уменьшить, применив поэтапный пуск. Например, для двухскоростных асинхронных двигателей, у которых синхронные скорости вращения различаются в два раза ($\omega_{12} = 2\omega_{11}$), экономичнее пуск проводить в два этапа: на первом этапе двигатель разгоняется до скорости ω_{11} , а на втором — до скорости ω_{12} . В этом случае расход энергии сокращается в два раза. Для пояснения обратимся к рис. 4.5, где показаны графики зависимости мощности $P_{\text{п}}$, затрачиваемой при пуске двигателя в функции времени t , $P_{\text{п}} = f(t)$. При пуске двигателя без нагрузки ($M_c = 0$) в один этап, т. е. из неподвижного состояния ротор (якорь)

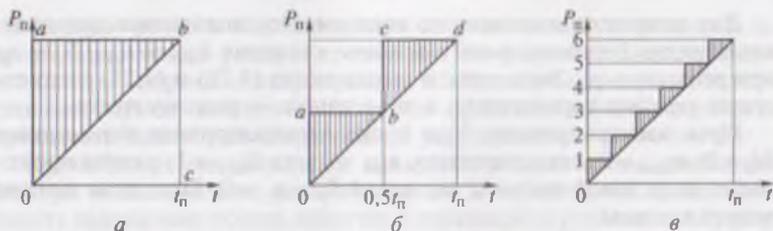


Рис. 4.5. Графики потерь энергии при разных способах пуска:

a — одноэтапный; *b* — двухэтапный; *v* — многоэтапный

сразу запускается до установившейся угловой скорости вращения ω_y . С некоторым допущением можно принять этот график прямолинейным. Площадь прямоугольника *Oabc* эквивалентна общему количеству энергии, затраченной при пуске двигателя,

$$A_n = P_n t_n,$$

при этом площадь треугольника *Obc* эквивалентна полезно затраченной энергии на разгон электропривода до установившейся скорости за время t_n , а площадь треугольника *Oab* эквивалентна потерям энергии при пуске. Если же пуск двигателя провести в два этапа, т.е. сначала до угловой скорости $0,5\omega_y$, а затем до скорости ω_y , то график $P_n = f(t)$ приобретет вид, показанный на рис. 4.5, б. В этом случае потери энергии при пуске эквивалентны сумме площадей треугольников *Oab* и *bcd*. Таким образом, энергия потерь при пуске в два этапа уменьшилась в два раза по сравнению с одноэтапным пуском. Полезно затраченная энергия в обоих случаях одинакова.

Если же еще увеличить число этапов при пуске, то потери энергии при таком пуске будут эквивалентны сумме площадей всех небольших треугольников (рис. 4.5, в). В итоге потери энергии станут еще меньше. В общем случае потери энергии при многоступенчатом пуске уменьшаются обратно пропорционально числу ступеней. Если же пуск двигателя проводить постепенно, плавно повышая подводимое к двигателю напряжение или частоту переменного тока, то энергия потерь при пуске окажется еще меньше. Однако такой экономичный способ пуска двигателя возможен только при работе этого двигателя в системе с регулируемым преобразователем напряжения или частоты (см. гл. 8).

Торможение электропривода. При торможении электропривода кинетическая энергия, запасенная в его подвижных элементах в процессе разгона, составляет потери энергии при торможении.

При способах торможения, когда обмотка статора двигателя остается включенной в сеть, потери энергии при торможении включают и потери в статоре, т.е. коэффициент активных сопротивлений $K_R = A_{1пер}/A_{2пер} > 1$.

При торможении до полной остановки угловая скорость вращения изменяется от установившейся ω_y , которой соответствует скольжение s_y , до конечной скорости $\omega_{\text{кон}} = 0$ при скольжении $s_{\text{кон}} = 1$. Поэтому при расчете потерь энергии торможения A_T следует в формулу расчета этих потерь ввести разность $(s_{\text{кон}}^2 - s_y^2) = 1 - s_y^2$.

При динамическом торможении тормозящий момент двигателя $M_{T,d}$ действует согласно со статическим нагрузочным моментом ($M_{T,d} + M_c$), что способствует уменьшению потерь энергии на торможение. С учетом этого потери энергии при динамическом торможении, Дж,

$$A_{T,d} = (K_R + 1)(J\omega_y^2/2)(1 - s_y^2)[M_{T,d}/(M_{T,d} + M_c)], \quad (4.27)$$

или

$$A_{T,d} = (K_R + 1)10^{-2}(Jn_y^2/2)(1 - s_y^2)[M_{T,d}/(M_{T,d} + M_c)]. \quad (4.28)$$

Для двухскоростных двигателей торможение в два этапа, т.е. сначала до скорости $\omega_{11} = 0,5\omega_{12}$, а затем до полной остановки $\omega = 0$, потери энергии, как и при пуске двигателя в два этапа, уменьшаются в два раза.

В связи с тем что при динамическом торможении обмотку статора отключают от сети, потери энергии не влияют на энергосбережение, так как эта энергия из сети не потребляется и в сеть не возвращается.

При торможении противовключением асинхронного двигателя меняют порядок следования фаз напряжения на обмотке статора. При этом изменяется направление вращения магнитного поля статора ω_1 и, если принять $\omega_2 \approx \omega_1$, скольжения оказываются равными:

$$s_{\text{нач}} = [(-\omega_1) - \omega_1]/\omega_1 = -2; \quad s_y = (\omega_1 - 0)/\omega_1 = 1.$$

Тогда

$$(s_{\text{нач}}^2 - s_y^2) = (-2)^2 - 1^2 = 3. \quad (4.29)$$

Потери энергии при торможении противовключением определяются выражением, аналогичным (4.27),

$$A_{T,n} = (K_R + 1)(J\omega_y^2/2)(1 - s_y^2)[M_{T,n}/(M_{T,n} + M_c)]. \quad (4.30)$$

Учитывая выражение (4.29), получим

$$A_{T,n} = 3A_{T,d},$$

т.е. потери энергии при торможении противовключением возрастают в три раза по сравнению с потерями при динамическом торможении. Этот вывод относится и к двигателям постоянного тока с независимым возбуждением.

При реверсе двигателя, когда $s_{\text{нач}} = -2$ или $\delta_{\text{нач}} = -2$, а $s_y = 0$ или $\delta_y = 0$, получим

$$s_{\text{нач}}^2 - s_y^2 = (-2)^2 - 0 = 4,$$

т.е. потери энергии при реверсе $A_p \approx 4A_{T,d}$ в четыре раза больше, чем при динамическом торможении.

Влияние *рабочего механизма* на величину потерь энергии при переходных режимах электропривода происходит через момент сопротивления $M_{\text{тр}}$, создаваемого силами трения в подвижных элементах рабочей машины электропривода, и момент инерции этих элементов $J_{\text{р.м}}$ (приведенное значение). Доля момента инерции $J_{\text{р.м}}$ в общем моменте инерции системы электропривода $J = J_{\text{д}} + J_{\text{р.м}}$ обычно составляет от 10 до 30 % от момента инерции двигателя [см. (1.26)]. Что же касается сил трения в движущихся элементах, то их величина зависит от технического состояния этих элементов: чистота контактируемых поверхностей, наличие смазки, качество подшипников и т. п. О силах трения можно судить по времени свободного выбега электропривода $t_{\text{выб}}$ (4.10): из нескольких однотипных рабочих механизмов силы трения меньше у того, чей электропривод имеет *большее время* свободного выбега.

Значительное влияние на потери энергии в переходных режимах оказывает момент инерции двигателя $J_{\text{д}}$. Важно при выборе двигателя не превышать требуемую мощность (см. гл. 5), так как моменты инерции двигателей даже смежных мощностей имеют заметную разницу в величине $J_{\text{д}}$. Например, двигатель постоянного тока независимого возбуждения типа 4ПО112М мощностью 14 кВт имеет момент инерции якоря $0,14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, а двигатель смежной мощности 19 кВт типа 4ПО112L имеет момент инерции якоря $0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, т. е. на 28 % больше.

В электроприводах, в которых питание двигателя осуществляется от управляемых преобразователей напряжения и частоты, переходные процессы протекают при плавном изменении регулируемых параметров: напряжения постоянного тока или напряжения и частоты переменного тока. В этих условиях потери энергии в переходных режимах в 3—5 раз меньше, чем при неизменных значениях этих параметров.

Пример 4.2. В электроприводе применен трехфазный асинхронный двигатель типа 4ACS4 с номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 21 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном}} = 1418 \text{ об/мин}$; $s_{\text{ном}} = 5,5 \%$; $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 2$; момент инерции $J_{\text{д}} = 0,19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Отношение активных сопротивлений $K_R = R_1/R_2 = 1,1$. Момент инерции рабочего механизма (приведенное значение) $J_{\text{р.м}} = 0,3J_{\text{д}}$; статический момент сопротивления $M_c = 0,9M_{\text{ном}}$; момент торможения динамический $M_{\text{т.д}} = 0,8 M_{\text{ном}}$.

Требуется определить: 1) время разгона и потери энергии при прямом пуске двигателя под нагрузкой; 2) время и потери энергии при динамическом торможении под нагрузкой.

Решение. 1. Номинальный момент асинхронного двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 21/1418 = 141 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = 2M_{\text{ном}} = 2 \cdot 141 = 282 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Момент инерции системы электропривода

$$J = J_d + J_{p,и} = 1,3J_d = 1,3 \cdot 0,19 = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

4. Время пуска при номинальной нагрузке (4.8)

$$t_{п,л} = 0,105 J n_{ном} / (M_{п,ср} - M_c) = 0,105 \cdot 0,25 \cdot 1418 / (211 - 127) = 0,44 \text{ с},$$

где

$$M_{п,ср} = (M_n + M_{ном})/2 = (282 + 141)/2 = 211 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Время динамического торможения (4.9)

$$t_{т,д} = 0,105 J n_{ном} / \sum M = 0,105 \cdot 1418 / 240 = 0,16 \text{ с},$$

где

$$\sum M = 0,8 M_{ном} + 0,9 M_{ном} = 1,7 M_{ном} = 1,7 \cdot 141 = 240 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Потери энергии при пуске под нагрузкой (4.25)

$$A_n = (K_R + 1) 10^{-2} (J n_{ном}^2 / 2) (1 - s_{ном}^2) [M_{ср} / (M_{ср} - M_c)] = \\ = (1,1 + 1) 10^{-2} (0,25 \cdot 1418^2 / 2) (1 - 0,055^2) [211 / (211 - 127)] = 13 \text{ 190 Дж},$$

где

$$M_c = 0,9 M_{ном} = 0,9 \cdot 141 = 127 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Потери энергии при динамическом торможении (4.28)

$$A_{т,д} = (K_R + 1) 10^{-2} (J n_{ном}^2 / 2) (1 - s_{ном}^2) [M_{т,д} / (M_{т,д} + M_c)] = \\ = (1,1 + 1) \cdot 10^{-2} (0,25 \cdot 1418^2 / 2) (1 - 0,055^2) [113 / (113 + 127)] = 2480 \text{ Дж},$$

где

$$M_{т,д} = 0,8 M_{ном} = 0,8 \cdot 141 = 113 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое переходный режим электропривода и когда он наступает?
2. В каких случаях переходная характеристика получается линейной?
3. Что такое электромеханическая постоянная времени электропривода?
4. Какой вид имеют графики разгона и торможения электропривода?
5. В каких случаях совместная характеристика электропривода нелинейная?
6. В чем состоит метод приращений и для чего он применяется?
7. Какие параметры электропривода влияют на величину потерь при пуске?
8. Во сколько раз уменьшаются потери при пуске многоскоростного двигателя в два этапа?
9. Во сколько раз увеличиваются потери при торможении противотключением?
10. В чем состоит влияние рабочего механизма на величину потерь электропривода в переходных режимах?

ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И РАСЧЕТ ИХ ТРЕБУЕМОЙ МОЩНОСТИ

5.1. Двигатели общего и специального назначений

Выбор двигателей является одним из наиболее ответственных этапов в проектировании электроприводов, так как от правильного выбора двигателя зависят надежность и экономичность не только собственно электропривода, но и рабочей машины (механизма). В то же время выбор двигателя представляет собой сложную задачу проектирования электропривода, так как при ее решении необходимо учитывать множество параметров, определяемых условиями эксплуатации, режимами работы, техническими параметрами, экономическими требованиями к проектируемому электроприводу.

Электрические двигатели изготовляют сериями. Серия представляет собой ряд двигателей возрастающей мощности, имеющих однотипную конструкцию. Электрические двигатели разделяют на двигатели общего назначения и двигатели специального назначения. *Двигатели общего назначения* — это серийные двигатели, конструкция и эксплуатационные характеристики которых позволяют эксплуатировать их в обычных условиях без каких-либо специальных ограничений. *Двигатели специального назначения* имеют специальную конструкцию и (или) специальные эксплуатационные характеристики, которые допускают применение этих двигателей в условиях, не попадающих под определение «обычные условия». Двигатели специального назначения могут быть как серийными, так и единичными, разработанными специально для конкретного электропривода со специфическими условиями эксплуатации.

Из производимых в настоящее время отечественной промышленностью двигателей общего назначения наиболее широкое применение получили трехфазные асинхронные двигатели следующих серий:

1. **Асинхронные двигатели серии АИ** (асинхронные Интерэлектро) имеют основное исполнение и ряд модификаций. Двигатели основного исполнения выполняют с короткозамкнутым ротором с высотами оси вращения от 50 до 355 мм мощностью от 0,37 до 315 кВт при напряжении питающей сети 220, 380 и 660 В переменного тока частотой 50 Гц на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000, 750 об/мин; возможно изготовление двигателей на частоту 60 Гц с синхронными частотами вращения, превышающими указанные на 20 %. Модификации двигателей включают:

двигатели с фазным ротором (в обозначении имеется буква Ф);
двигатели с повышенным скольжением (буква С);
однофазные двигатели (буква Е).

Двигатели серии АИ изготавливают как для внутреннего (АИР), так и для внешнего (АИС) рынка, которые соответствуют международным стандартам по привязке мощности двигателей к их установочным размерам.

2. **Трехфазные асинхронные двигатели серии 5А** соответствуют, в основном, российским стандартам по привязке мощности двигателей к их установочным размерам. Двигатели изготавливают с короткозамкнутым ротором (5А и 5АН) мощностью от 0,75 до 200 кВт при напряжении питания 220, 380, 660 В переменного тока частотой 50 Гц на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин. Двигатели с фазным ротором (5АНК) изготавливают мощностью от 45 до 400 кВт на синхронные частоты вращения 1500, 1000, 750 и 600 об/мин.

3. **Трехфазные асинхронные двигатели серии АОЗ** изготавливают с высотами оси вращения 315, 355, 400 мм мощностью от 45 до 400 кВт на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин. Напряжение питающей сети 220/380 или 380/660 В частотой 50 Гц. Возможно изготовление двигателей на частоту переменного тока 60 Гц с синхронными частотами вращения, на 20 % превышающими указанные выше.

В электроприводах значительной мощности применяют *высоковольтные асинхронные двигатели*, работающие от сети напряжением 6000 и 10 000 В.

4. **Трехфазные асинхронные двигатели серий А4 и ДАЗ04** с короткозамкнутым ротором изготавливают мощностью от 250 до 100 кВт на синхронные частоты вращения 1500, 1000, 750 и 600 об/мин. Напряжение питающей сети 6000 или 10 000 В частотой 50 Гц.

5. **Машины постоянного тока серии 2П** включает двигатели с высотами осей вращения от 90 до 315 мм диапазона мощностей от 0,37 до 200 кВт. Эти двигатели предназначены для работы в электроприводах с регулированием частоты вращения в широком диапазоне.

Двигатели специального назначения весьма разнообразны как по конструктивному исполнению, так и по техническим параметрам. Номенклатуру серий этих двигателей составляют:

а) серии асинхронных *крановых* и *металлургических* двигателей МТФ, МТКФ, МТН и МТКН, а также *краново-металлургические* двигатели постоянного тока серии Д, предназначенные для работы в электроприводах подъемных кранов, характеризующихся частыми пусками, реверсами, перегрузками, или электроприводах с тяжелыми условиями окружающей среды — повышенная температура, запыленность и т.д.;

б) серии асинхронных двухскоростных двигателей для привода лифтов;

в) серии *взрывозащищенных* двигателей, предназначенных для работы в условиях пожаро- и взрывоопасности для электроприводов механизмов химической, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и химической отраслей промышленности, для работы в шахтах и других областях производств, где возможно образование взрывоопасных газовых смесей;

г) серии *погружных* двигателей, работающих погруженными в скважины, заполненные водой, нефтью;

д) серии *тяговых* двигателей для привода колесных пар электрического транспорта (электровозы, метро, трамваи, троллейбусы);

е) серии *судовых* двигателей, предназначенных для работы в особо тяжелых климатических условиях (от полярных до тропических), при повышенных вибрациях и ударах (удары волн) и другие серии.

Серии двигателей специального назначения также многочисленны и разнообразны, как и условия, и режимы, в которых могут работать электроприводы.

Сведения о назначении, технических данных, габаритных и установочно-присоединительных размерах серий двигателей приводятся в каталогах и справочниках.

5.2. Нагревание и охлаждение электродвигателей

Все виды потерь в двигателе преобразуются в теплоту, которая частично идет на нагревание двигателя, а частично отдается в окружающую среду. Условно принято считать, что нагрев происходит равномерно по всему объему двигателя, а рассеивание теплоты — равномерно со всей его поверхности. В этих условиях уравнение теплового баланса имеет вид

$$qdt = mcd\tau + S\lambda dt, \quad (5.1)$$

где q — количество теплоты, выделяемое в двигателе в единицу времени, Дж:

$$q = \sum P;$$

$\sum P$ — суммарные потери мощности в двигателе, Вт; $mcd\tau$ — количество теплоты, расходуемое на нагревание двигателя; m — масса нагреваемого двигателя; c — удельная теплоемкость материала двигателя, т. е. количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг этого материала на 1 °C; τ — превышение температуры нагрева двигателя над температурой окружающей среды; $S\lambda t$ — количество теплоты, рассеиваемое с поверхности двигателя в окружающую

щее пространство в единицу времени; λ — коэффициент теплового рассеяния, т.е. количество теплоты, рассеиваемое с единицы поверхности двигателя в 1 с при превышении температуры на 1°C .

В начальный период работы двигатель имеет температуру нагрева, не отличающуюся от температуры окружающей среды θ_1 , т.е. температура перегрева $\tau = 0$. В этом случае рассеяния теплоты в окружающую среду не происходит, т.е. $S\lambda\tau_{\text{уст}}dt = 0$, и вся выделяемая в двигателе теплота идет на его нагревание. Затем, когда температура нагрева двигателя начинает превышать температуру окружающей среды, т.е. $\tau > 0$, часть теплоты, выделяемой в двигателе, начинает рассеиваться в окружающую среду. И наконец, когда температура нагрева двигателя достигает установившегося значения $\theta_{\text{уст}} = \text{const}$, вся выделяемая в двигателе теплота рассеивается в окружающую среду, т.е. наступает режим *теплового равновесия*:

$$qdt = S\lambda\tau_{\text{уст}}dt, \quad (5.2)$$

где

$$\tau_{\text{уст}} = \theta_{\text{уст}} - \theta_1. \quad (5.3)$$

Из (5.2) получим

$$\tau_{\text{уст}} = q/(S\lambda). \quad (5.4)$$

Выражение (5.4) позволяет сделать выводы:

- установившаяся температура перегрева не зависит от массы двигателя m , а определяется количеством теплоты q , выделяемой в двигателе в единицу времени, которое эквивалентно мощности потерь двигателя $\sum P$;

- установившаяся температура перегрева обратно пропорциональна площади охлаждаемой поверхности S и коэффициенту теплового рассеяния λ , т.е. зависит от интенсивности охлаждения двигателя — у двигателей со специальными способами охлаждения (искусственно вентилируемых) $\tau_{\text{уст}}$ меньше, чем у двигателей с естественной вентиляцией (при их одинаковой конструкции и условиях работы).

Если двигатель включается в сеть, когда его температура равна температуре окружающей среды θ_1 , то зависимость температуры перегрева этого двигателя τ от времени t выражается равенством:

$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_n}), \quad (5.5)$$

где $e = 2,718$ — основание натуральных логарифмов; T_n — *постоянная времени нагревания*, показывающая время (с), необходимое для нагревания двигателя до установившейся температуры, если бы не было теплового рассеяния с его поверхности.

График нагревания $\tau = f(t)$, построенный по (5.5), представляет собой экспоненциальную кривую, которая показывает, что двига-

тель нагревается до установившейся температуры перегрева $\tau_{уст}$ лишь спустя продолжительное время (рис. 5.1, а). Процесс нагревания сначала идет интенсивно, а затем, по мере приближения к установившейся температуре перегрева, замедляется.

Теоретически двигатель достигает установившейся температуры перегрева $\tau_{уст}$ за время $t = \infty$. Проведя касательную к графику нагревания в его начальной части, получим отрезок, который в масштабе времени определяет постоянную времени нагревания $T_{н}$. Таким образом, величину $T_{н}$ можно рассматривать как время, в течение которого превышение температуры достигло бы установившегося значения $\tau_{уст}$, если бы график нагревания представлял собой прямую линию, т.е. если бы отсутствовало бы рассеяние теплоты с поверхности двигателя в окружающую среду.

Если двигатель отключить от сети, прекратив этим его дальнейшее нагревание, то тепловое рассеяние с его поверхности будет происходить за счет накопленной в нем теплоты. При этом температура перегрева двигателя будет понижаться до $\tau = 0$, т.е. пока температура двигателя не станет равной температуре окружающей среды. Этот процесс остывания протекает по графику охлаждения (рис. 5.1, б), построенному по уравнению:

$$\tau = \tau_{уст} e^{-t/T_о}, \quad (5.6)$$

где $T_о$ — постоянная времени охлаждения, с.

Таким образом, постоянные времени нагревания и охлаждения характеризуют скорость процессов. Например, двигатель нагревается тем быстрее, чем меньше постоянная времени нагревания.

Итак, в процессе работы электродвигатель нагревается, при этом для разных частей двигателя установлены предельно допустимые температуры перегрева. Наиболее чувствительна к перегреву электрическая изоляция обмоток. Под действием температур, превышающих допустимые значения, ускоряется процесс теплового старения изоляции, ухудшающий ее изоляционные и механические свойства. Электроизоляционные материалы, применяемые в электротехнических изделиях, разделяются на пять классов нагревостойкости, обознача-

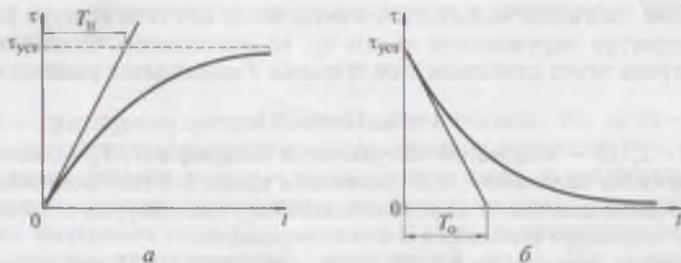


Рис. 5.1. Графики нагревания (а) и охлаждения (б) двигателя

емых буквами В, F, и Н, из которых в современных электродвигателях применяют изоляцию трех наиболее нагревостойких классов: В, F и Н. В процессе работы двигателя изоляция обмоток нагревается неравномерно, при этом измерение температуры нагрева в наиболее нагреваемых точках соприкосновения электрической изоляции с токопроводящими проводами технически невозможно. Поэтому, согласно действующему стандарту, предельные температуры нагрева обмоток принимают ниже предельно допустимых значений изоляции соответствующего класса нагревостойкости (табл. 5.1).

Чрезмерный перегрев двигателя неблагоприятно влияет и на другие его элементы, например подшипники, контактные кольца, коллектор.

Температура нагрева какой-либо части двигателя θ_2 при известной температуре ее перегрева τ и температуре окружающей среды $\theta_1 = 40^\circ\text{C}$:

$$\theta_2 = \tau_{\text{уст}} + \theta_1 = \tau_{\text{уст}} + 40. \quad (5.7)$$

Для двигателей, работающих в условиях повышенных температур окружающей среды, например в условиях тропического климата или металлургического производства, температуру θ_1 принимают более 40°C .

Эффективным средством понижения температуры перегрева двигателей, а следовательно, средством повышения их номинальной мощности при заданных габаритах является применение *вентиляции*. Сущность вентиляции состоит в искусственном создании газового потока (хладагента), проходящего либо через внутреннюю полость двигателя (внутренний продув), либо по его поверхности (наружный обдув) с целью интенсивного отбора теплоты и «выноса» ее за пределы двигателя или даже за пределы помещения, в котором этот двигатель находится. Вентиляция осуществляется устройствами — *вентиляторами*. Если вентилятор приводится во вращение вентилируемым двигателем, то имеет место *самовентиляция*, если же вентилятор приводится во вращение специальным двигателем, то вентиляцию называют *независимой*.

Таблица 5.1

Температурные параметры изоляции классов нагревостойкости В, F и Н

Класс нагревостойкости изоляции	В	F	Н
Предельно допустимая температура нагрева изоляции, $^\circ\text{C}$	130	155	180
Предельно допустимая температура нагрева обмоток двигателя, $^\circ\text{C}$	120	140	165
Предельно допускаемые превышения температуры обмоток $\tau_{\text{доп}}$ при $\theta_1 = 40^\circ\text{C}$	80	100	125

5.3. Конструктивные формы исполнения и способы охлаждения двигателей

Конструктивные формы исполнения двигателей определяются степенью защиты, способами охлаждения и монтажа, климатическими условиями и местом эксплуатации.

Степень защиты электродвигателей обозначается двумя буквами IP — начальные буквы слов International protection и двумя цифрами.

Первая цифра обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь двигателя твердых тел.

Вторая цифра обозначает степень защиты от попадания внутрь двигателя воды.

Для двигателей напряжением до 1000 В установлено шесть степеней защиты (первая цифра):

0 — защита отсутствует;

1 — защита от случайного соприкосновения большого участка человеческого тела с токоведущими и вращающимися частями; отсутствует защита от преднамеренного соприкосновения; имеется защита от попадания внутрь твердых тел диаметром более 50 мм;

2 — защита от соприкосновения пальцев человека с токоведущими и вращающимися частями и защита от попадания внутрь двигателя твердых тел диаметром более 12 мм;

3 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями инструмента, проволоки и других предметов, толщина которых превышает 2,5 мм; защита от попадания внутрь машины твердых тел диаметром более 2,5 мм;

4 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями предметов толщиной более 1 мм и защита от попадания внутрь двигателя твердых тел толщиной более 1 мм;

5 — полная защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и полная защита от вредных отложений пыли внутри машины.

Существует девять степеней защиты от проникновения воды внутрь двигателя (вторая цифра):

0 — защита отсутствует;

1 — защита от капель сконденсировавшейся воды, падающих вертикально;

2 — защита от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали;

3 — защита от дождя, падающего под углом не более 60° к вертикали;

4 — защита от брызг воды любого направления;

5 — защита от водяных струй в любом направлении;

6 — защита от воздействий, характерных для палубы корабля, включая захлестывание морской волной;

7 — защита при погружении в воду в течение времени и давления, указанных в стандарте;

8 — защита при погружении в воду на неограниченное время при давлении, указанном в стандарте.

Наиболее распространенные степени защиты двигателей на напряжение до 1000 В и их краткое описание приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика степени защиты двигателей

Обозначение	Характеристика
IP 00	Отсутствуют: специальная защита обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины, защита от попадания твердых тел внутрь корпуса и проникновения воды
IP 01	Машина, защищенная от капель воды, падающих вертикально на оболочку, и не имеющая специальной защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины, защита от попадания твердых тел внутрь корпуса
IP 10	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), твердых тел размером более 50 мм, защита от проникновения воды отсутствует
IP 11	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), твердых тел размером более 50 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку
IP 12	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), твердых тел размером более 50 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку при наклоне оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
IP 13	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела (например, руки), твердых тел размером более 50 мм и капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP 20	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, твердых тел размером свыше 12 мм, защита от проникновения воды отсутствует
IP 21	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку

Обозначение	Характеристика
IP 22	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих вертикально на оболочку при наклоне оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
IP 23	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм, твердых тел размером свыше 12 мм и капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP 43	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки проволоки, твердых тел размером более 1 мм и капель воды, падающих на оболочку под углом 60° от вертикали
IP 44	Машина, защищенная от проникновения внутрь оболочки проволоки, твердых тел размером более 1 мм и воды, разбрызгиваемой на оболочку в любом направлении
IP 54	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия) и воды, разбрызгиваемой на оболочку в любом направлении
IP 55	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделий) и защищенная от струй воды, выбрасываемых на оболочку в любом направлении
IP 56	Машина, не полностью защищенная от проникновения внутрь оболочки пыли (однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия) и защищенная от волн воды (вода при волнении не попадает внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения)

Способы охлаждения двигателей определены стандартом. Обозначение этих способов состоит из начальных букв IC слов International cooling и ряда букв и цифр, обозначающих способ охлаждения. Сначала указывается буква, обозначающая вид хладагента: А — воздух, Н — водород, W — вода и т. д.; если хладагентом является только воздух, то буква опускается. Затем идет несколько цифр: *первая цифра* условно обозначает устройство цепи охлаждения для циркуляции хладагента, например воздуха:

0 — хладагент свободно поступает в двигатель и свободно выводится из него;

3 — хладагент поступает в двигатель через подводящую трубу и выводится из нее через отводящую трубу;

4 — хладагент циркулирует в замкнутом объеме двигателя и отдает свою теплоту через поверхность корпуса (обычно ребристую) в окружающую среду;

7 — хладагент циркулирует по замкнутой системе, включающей охладитель, и отдает свою теплоту хладагенту охладителя, встроенному в двигатель;

8 — то же, что и 7, но охладитель установлен вне машины.

Вторая цифра обозначает способ перемещения хладагента:

0 — хладагент перемещается за счет свободной конвекции, вентилирующее действие ротора незначительно;

1 — хладагент перемещается вентилятором, расположенным на валу двигателя;

2 — хладагент перемещается вентилятором, расположенным не на валу двигателя, но вращаемым этим валом через передающее устройство, например зубчатую или ременную передачи;

3 — то же, что и 2, но вентилятор вращается отдельным двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемого двигателя;

7 — хладагент перемещается независимым вентилятором, установленным вне охлаждаемого двигателя и включенным в сеть, независимо от него;

8 — хладагент перемещается внутри двигателя за счет движения этого двигателя через хладагент, например двигатель, установленный на движущемся объекте.

Если двигатель имеет несколько цепей охлаждения (например, внутренняя вентиляция и наружный обдув), то в обозначении может быть четыре цифры: две — для обозначения наружной цепи охлаждения и две — для внутренней.

Ниже приведены примеры некоторых наиболее применяемых разомкнутых и замкнутых систем охлаждения электрических двигателей.

А. Разомкнутые системы охлаждения:

IC01 — защищенный двигатель с внутренней самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины;

IC31 — защищенный двигатель с самовентиляцией, вентилятор расположен на валу двигателя, воздух поступает в двигатель и удаляется из него с помощью подводящей и отводящей труб;

IC37 — защищенный двигатель с принудительной вентиляцией, воздух поступает в двигатель и удаляется из него с помощью подводящей и отводящей труб, вентилятор приводится во вращение отдельным двигателем;

IC0040 — закрытый двигатель с естественным охлаждением без внешнего вентилятора;

IC0141 — закрытый двигатель с самовентиляцией, ребристая или гладкая поверхность станины обдувается снаружи внешним вентилятором, расположенным на валу этого двигателя.

Б. Замкнутые системы охлаждения:

ICW37A81 — замкнутая система самовентиляции воздухом, водяной охладитель встроен в охлаждаемый двигатель;

ICW37A97 — замкнутая система принудительной вентиляции воздухом, водяной охладитель установлен отдельно от охлаждаемого двигателя;

ICW37A91 — замкнутая система самовентиляции воздухом, водяной охладитель установлен в фундаментной яме;

ICW37A86 — замкнутая система принудительной вентиляции воздухом, водяной охладитель установлен непосредственно на охлаждаемом двигателе.

Применяемые в электрических двигателях способы охлаждения находятся во взаимосвязи с конструктивными формами исполнения этих машин по способу защиты. Например, в машинах закрытого исполнения (IP44, IP54, IP55 и др.) используют либо естественное охлаждение IC0040, либо охлаждение наружным обдувом IC0141; в машинах защищенного исполнения (IP20, IP21, IP22, IP23) применяют охлаждение с внутренней вентиляцией IC01, IC31 или IC37.

Монтаж двигателей в местах их установки осуществляется обычно на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение оси вала машины.

Разновидности конструктивного исполнения двигателей по *способу монтажа* определены стандартом. При этом имеется в виду крепление двигателя на месте его установки и способ сочленения с рабочим механизмом.

Условное обозначение этого исполнения состоит из букв IM (начальные буквы слов International Mounting) и четырех цифр.

Первая цифра — способ крепления двигателя в месте его установки:

- 1 — на лапах с подшипниковыми щитами;
- 2 — на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном или двух щитах;
- 3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном или двух щитах;
- 4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 — без подшипниковых щитов;
- 6 — на лапах с подшипниковыми щитами со стояковыми подшипниками;
- 7 — на лапах со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 — с вертикальным валом, кроме позиций 1, 2, 3 и 4 данного перечня;
- 9 — специальное исполнение по способу монтажа.

Таблица 5.3

Описания некоторых видов исполнения электродвигателей по способам монтажа

Виды исполнений	Схема
<p align="center">IM1001</p> <p>С двумя подшипниковыми щитами на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом</p>	
<p align="center">IM1011</p> <p>С двумя подшипниковыми щитами на лапах, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз</p>	
<p align="center">IM2001</p> <p>С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с фланцем на одном щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом</p>	
<p align="center">IM2131</p> <p>С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с фланцем на одном щите, не доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх</p>	
<p align="center">IM3001</p> <p>Без лап, с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом</p>	

Вторая и третья цифры — пространственное положение машины и направление выступающего конца вала.

Четвертая цифра — исполнение конца вала (цилиндрический или конический, один или два выступающих конца вала).

Примеры наиболее распространенных видов исполнения двигателей по способу монтажа приведены в табл. 5.3.

Климатические условия внешней среды оказывают значительное влияние на надежность эксплуатации электрических двигателей. Климатические условия внешней среды определяются следующими параметрами: температура и диапазон ее колебаний, относительная влажность, атмосферное давление, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в окружающей среде коррозионно-активных материалов. Все эти факторы необходимо учитывать при выборе двигателя для электропривода. Климатическое исполнение двигателей обозначается буквами (табл. 5.4).

Место размещения электрических двигателей при эксплуатации обозначается цифрой:

Климатическое исполнение двигателей

Обозначение	Характеристика
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше и озерах для макроклиматических районов</i>	
У	с умеренным климатом
ХЛ	с холодным климатом
УХЛ	с умеренным и холодным климатом
ТВ	с влажным тропическим климатом
ТС	с сухим тропическим климатом
Т	как с сухим, так и с влажным тропическим климатом
О	для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом</i>	
М	с умеренно-холодным морским климатом
ТМ	с морским тропическим климатом, в том числе и на судах каботажного плавания
ОМ	на судах неограниченного района плавания
В	для всех макроклиматических районов на суше и на море

1 — на открытом воздухе;

2 — на открытом воздухе или в помещениях, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от этих параметров на открытом воздухе (отсутствуют солнечная радиация и атмосферные осадки);

3 — в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий;

4 — в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями;

5 — в помещениях с повышенной влажностью.

Пример обозначения типоразмера двигателя: АИР132М8У3 — трехфазный асинхронный двигатель серии АИР (основное исполнение), степень защиты IP44, охлаждение IC0141, высота оси вращения 132 мм, условная длина статора М, число полюсов 8 (синхронная частота вращения 750 об/мин), климатические условия У — умеренный климат, место размещения при эксплуатации 3 — в закрытом помещении с естественной вентиляцией.

5.4. Режимы работы электроприводов

Режим работы электропривода (двигателя) — это установленный порядок чередования периодов, характеризующихся величиной и продолжительностью нагрузки, отключений, торможения,

пуска и реверса во время его работы. Режимы работы двигателей электроприводов рабочих машин разнообразны и определяются технологическими процессами, реализуемыми этими рабочими машинами. Для иллюстрации этих режимов работы используют *нагрузочные диаграммы*. Такая диаграмма представляет собой зависимость параметра, характеризующего нагрузку приводного двигателя (полезной мощности P , момента M или силы потребляемого тока I) от продолжительности t отдельных циклов, составляющих работу электропривода в течение определенного периода времени.

В действительности нагрузочная диаграмма двигателя может иметь вид графика любого вида: прямой линии, если нагрузка двигателя в рассматриваемый отрезок времени не изменялась, либо кривой линии с плавным переходом от одного уровня нагрузки к другому, если нагрузка изменялась. Плавность перехода уровней нагрузки обусловлена инерционностью процессов в электроприводе. Для упрощения расчета требуемой мощности приводного двигателя криволинейный график нагрузочной диаграммы разбивают на прямолинейные участки, в пределах каждого из которых нагрузка условно остается неизменной (рис. 5.2). Чем больше таких прямолинейных участков, тем меньше ошибка такой замены, но тем сложнее последующие расчеты.

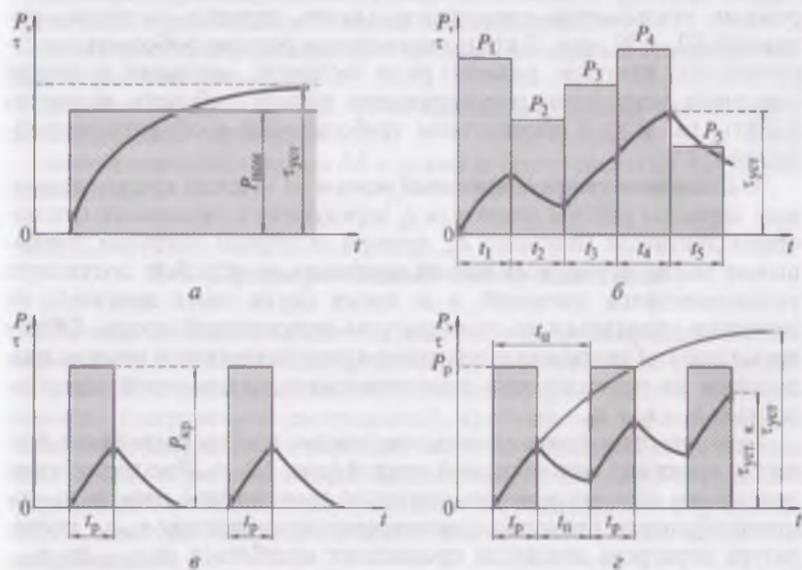


Рис. 5.2. Нагрузочные диаграммы при продолжительном неизменном (а), продолжительном переменном (б), кратковременном (в) и повторно-кратковременном (з) режимах работы двигателя

Согласно действующему стандарту, существует *три основных режима работы двигателей*, различающиеся характером изменения нагрузки:

1. **Продолжительный режим S1** — когда при неизменной нагрузке $P_{\text{ном}}$ работа двигателя продолжается так долго, что температура перегрева всех его частей успевает достигнуть установившихся значений $\tau_{\text{уст}}$. Различают продолжительные режимы с *неизменной нагрузкой* $P = \text{const}$ (рис. 5.2, а) и с *изменяющейся нагрузкой* (рис. 5.2, б). Например, электроприводы насосов, транспортеров, вентиляторов работают в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, а электроприводы металлорежущих станков и т. п. работают в продолжительном режиме с изменяющейся нагрузкой.

2. **Кратковременный режим S2** — когда периоды работы двигателя с неизменной нагрузкой t_p чередуются с периодами отключения двигателя (рис. 5.2, в). При этом периоды нагрузки двигателя t_p настолько кратковременны, что температуры нагрева всех частей двигателя не достигает установившихся значений, а периоды отключения двигателя настолько продолжительны, что все части двигателя успевают охладиться до температуры окружающей среды (допускается превышение температуры не более чем на 1°C). Стандартом установлена длительность периодов нагрузки 10; 30; 60 и 90 мин. В условном обозначении кратковременного режима указывается продолжительность периода нагрузки, например S2 — 30 мин. В кратковременном режиме работают электроприводы шлюзов, разного рода заслонок, вентилялей и других запорных устройств, регулирующих подачу рабочего вещества (нефть, газ и др.) посредством трубопровода к объекту потребления.

3. **Повторно-кратковременный режим S3** — когда кратковременные периоды работы двигателя t_p чередуются с периодами отключения двигателя (паузами) $t_{\text{п}}$, причем за период нагрузки превышение температуры всех частей двигателя не успевает достигнуть установившихся значений, а за время паузы части двигателя не успевают охладиться до температуры окружающей среды. Общее время работы двигателя в повторно-кратковременном режиме разделяется на периодически повторяющиеся циклы продолжительностью $t_{\text{ц}} = t_p + t_{\text{п}}$.

При повторно-кратковременном режиме график нагревания двигателя имеет вид пилообразной кривой (рис. 5.2, г). При достижении двигателем установившегося значения температуры перегрева, соответствующего повторно-кратковременному режиму $\tau_{\text{уст.к}}$, температура перегрева двигателя продолжает колебаться от $\tau_{\text{мин}}$ до $\tau_{\text{макс}}$. При этом $\tau_{\text{уст.к}}$ меньше установившейся температуры перегрева, которая наступила бы, если бы режим работы двигателя был продолжительным ($\tau_{\text{уст.к}} < \tau_{\text{уст}}$). Примерами повторно-кратковременно-

го режима являются работа электроприводов лифтов, подъемных кранов, экскаваторов и других устройств, для работы которых характерна цикличность (чередование периодов нагрузки с паузами). При этом продолжительность цикла не должна превышать 10 мин. Если $t_u > 10$ мин, то режим считают продолжительным.

Повторно-кратковременный режим характеризуется *относительной продолжительностью включения, %*,

$$ПВ = (t_p/t_u)100. \quad (5.8)$$

Действующим стандартом предусмотрены номинальные повторно-кратковременные режимы с ПВ 15, 25, 40 и 60 % (для продолжительного режима ПВ = 100 %). В условном обозначении повторно-кратковременного режима указывают величину ПВ, например S3 — 40 %.

Рассмотренные три режима считают основными. В каталогах на двигатели, предназначенные для работы в каком-либо из этих режимов, указаны номинальные данные, соответствующие режиму работы.

Помимо рассмотренных трех основных режимов стандартом предусмотрены еще пять дополнительных:

повторно-кратковременный режим S4 с частыми пусками, с числом включений в час 30, 60, 120 или 240;

повторно-кратковременный режим S5 с частыми пусками и электрическим торможением в конце каждого цикла;

переключающийся режим S6 с частыми реверсами и электрическим торможением;

переключающийся режим S7 с частыми пусками, реверсами и электрическим торможением;

переключающийся режим S8 с двумя и более разными частотами вращения.

5.5. Предварительный выбор двигателя

Расчету требуемой мощности двигателя должен предшествовать выбор типа двигателя: асинхронный, синхронный или постоянного тока. При этом руководствуются характером работы электропривода (нагрузочной диаграммой), требуемыми механическими характеристиками, номинальной частотой вращения и требуемым диапазоном ее регулирования. Кроме того, необходимо определить форму исполнения двигателя по степени защиты, способу охлаждения, способу монтажа, климатическое исполнение и условия эксплуатации.

Опыт проектирования и эксплуатации электроприводов позволил выработать рекомендации, которыми следует руководствоваться при выборе двигателя. Выбор типа двигателя следует начинать с

рассмотрения вопроса о возможности использования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, так как эти двигатели наиболее просты по устройству, надежны, имеют высокие энергетические показатели. Недостатки этих двигателей: сравнительно небольшой пусковой момент при большом пусковом токе. В электроприводе большой мощности оправдано применение трехфазных синхронных двигателей, имеющих наиболее высокие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности).

При необходимости регулирования частоты вращения следует рассмотреть вопрос о целесообразности применения в электроприводе трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором совместно с регулируемым преобразователем частоты (частотно-регулируемый электропривод), трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором или двигателя постоянного тока.

Основные недостатки двигателей постоянного тока: необходимость в источнике постоянного тока, повышенная стоимость по сравнению с асинхронными и синхронными двигателями, необходимость в уходе за щеточно-коллекторным узлом в процессе эксплуатации электропривода (периодическая чистка коллектора и щеток, замена щеток, регулировка их прижатия к коллектору и т. д.), недопустимость их применения во взрыво- и пожароопасных зонах. В современных разработках электроприводы с применением коллекторных двигателей постоянного тока не превышают 10 %.

Основным препятствием, ограничивающим применение частотно-регулируемого электропривода, является относительная сложность системы управления и, следовательно, повышенная стоимость. Разработка новых устройств частотно-регулируемых систем электропривода способствует повышению их надежности, но не снижает их стоимости.

Параметры питающей сети определяют выбор номинального напряжения и предельную токовую нагрузку, которая не вызвала бы в этой сети падения напряжения, превышающего допустимого значения.

Способ монтажа и внешние условия эксплуатации определяют конструктивное исполнение двигателя: степень защиты, способ охлаждения и способ монтажа (двигатель на лапах или двигатель фланцевого крепления, закрытого или защищенного исполнения) и его климатическое исполнение (для умеренного, холодного, тропического климата и т. п.).

В электроприводе с широким диапазоном регулирования частоты вращения «вниз» от номинальной эффективность самовентиляции при небольшой частоте вращения ротора (якоря) снижается. Поэтому в таких электроприводах целесообразно применение двигателей с независимой вентиляцией, например IC03 или IC07.

Требования к статическим свойствам двигателя определяются величиной статического момента сопротивления рабочей маши-

ны, номинальным значением частоты вращения, необходимостью ее регулирования вращения, возможностью кратковременных перегрузок и т. п. Требования к динамическим свойствам двигателя определяются частотой пуска, реверса и торможения. Например, при частых пусках, торможении или реверсе требуется двигатель с малым моментом инерции ротора (якоря).

Большое значение при выборе двигателя имеют экономические требования: стоимость двигателя, его КПД и коэффициент мощности, масса и габариты, расходы по эксплуатации и ремонту.

Двигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, должны иметь исполнение по степени защиты не менее IP44 или специальное исполнение, соответствующее условиям работы конкретного электропривода (например, двигатели для сельскохозяйственных или химических установок и т. п.).

Двигатели, устанавливаемые в помещениях, где возможно оседание на обмотках пыли, волокон или других частиц, нарушающих охлаждение, должны иметь закрытое исполнение по степени защиты не менее IP44 или защищенное исполнение при условии продувания внутренней полости двигателя чистым воздухом, поступающим извне по воздуховодам. При этом корпус продуваемого двигателя, воздухопроводы, все сопряжения и стыки должны иметь уплотнение, исключающее присос воздуха из помещения, где установлен собственно двигатель.

При установке двигателей в помещениях с температурой окружающей среды более 40 °С должны быть выполнены мероприятия, исключающие возможность недопустимого их перегрева. Например, применить двигатели, рассчитанные на температуру внешней среды, превышающую 40 °С (двигатели металлургических серий), или же использовать принудительную вентиляцию с подводом охлажденного воздуха и т. п.

Двигатели, устанавливаемые в сырых местах, должны иметь закрытое исполнение и влагостойкую изоляцию обмоток.

Для электроприводов с глубоким регулированием частоты вращения приходится делать выбор между двигателем постоянного тока и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при его питании от регулируемого преобразователя частоты, т. е. с применением частотного регулирования. Использование преобразователей частоты в современном электроприводе в ряде случаев сдерживается их повышенной стоимостью. При решении вопроса о применении преобразователя частоты не следует забывать об его энергосберегающем эффекте, снижающем эксплуатационные расходы электропривода, и возможностью «мягкого» пуска двигателя, что повышает надежность электропривода.

Окончательное решение о применении в регулируемом электроприводе двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя

ля в комплекте с преобразователем частоты должно основываться на экономических расчетах рассматриваемых вариантов с учетом не только капитальных затрат, но и расходов, связанных с эксплуатацией электропривода.

Исходя из характера работы электропривода, требуемых механических характеристик, номинальной частоты вращения и диапазона ее регулирования определяют тип двигателя: асинхронный, синхронный, коллекторный или вентильный двигатель постоянного тока (см. 9.1).

При проектировании электропривода с заданной скоростью движения рабочего органа возможен выбор двигателя с разным значением номинальной частоты вращения при соответствующем значении передаточного отношения редуктора. При этом необходимо иметь в виду, что двигатели одинаковой номинальной мощности, но разных частот вращения имеют неодинаковые габариты и стоимость: чем больше частота вращения, тем меньше габариты и стоимость двигателя. Однако быстроходные двигатели требуют применения редукторов с большим передаточным отношением, а следовательно, большими габаритами и стоимостью. При проектировании электроприводов с редкими пусками, когда продолжительность пусковой операции не имеет существенного значения, следует выбрать двигатель с такой частотой вращения, при которой суммарная стоимость двигателя и редуктора окажется минимальной. Для электроприводов с частыми пусками существенное значение имеет продолжительность пуска и торможения: с уменьшением времени пуска и торможения сокращается общее время переходных процессов, что ведет к росту производительности рабочей машины.

Для определения оптимального передаточного отношения редуктора, соответствующего минимальному времени переходных процессов в электроприводе при заданных значениях мощности двигателя и частоты вращения выходного вала редуктора, поступают следующим образом. Для ряда значений номинальной частоты вращения $n_{\text{ном}}$ двигателей одинаковой мощности $P_{\text{ном}}$ (ближайшая большая номинальная мощность относительно заданной для двигателей выбранной серии) определяют моменты инерции J_d и соответствующие этим частотам вращения передаточные отношения редуктора $i = n_{\text{ном}}/n_{\text{вых}}$. Затем рассчитывают величину произведения $i^2 J_d$. Оптимальным считают такое передаточное отношение редуктора $i_{\text{опт}}$, при котором произведение $i_{\text{опт}}^2 J_d$ минимально.

Пример 5.1. Определить оптимальное передаточное отношение редуктора $i_{\text{опт}}$, соответствующее минимальному времени переходных процессов при пуске и торможении в электроприводе барабана лебедки при следующих данных: требуемая частота вращения барабана лебедки (на выходе редуктора) $n_{\text{вых}} = 250$ об/мин при мощности 7,0 кВт (с учетом КПД редуктора).

Таблица 5.5

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей серии АИР
номинальной мощностью 7,5 кВт

Типоразмер	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$J_{\text{д}}$, кг·м ²	$i = \frac{n_{\text{ном}}}{250}$	i^2	$i^2 J_{\text{д}}$
АИР112М2	7,5	2895	0,012	11,58	134	1,61
АИР132S4	7,5	1440	0,028	5,76	33,17	0,928
АИР132М6	7,5	960	0,058	3,84	14,74	0,85
АИР160S8	7,5	727	0,12	2,91	8,46	1,01

Решение. Принимаем в качестве приводного трехфазные асинхронные двигатели серии АИР ближайшей большей номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт с номинальными частотами вращения 2895, 1440, 960 и 727 об/мин. В табл. 5.5 приведены необходимые данные каталога на указанные двигатели и результаты расчетов значений $i^2 J_{\text{д}}$. Из таблицы следует, что оптимальным передаточным отношением редуктора является $i_{\text{опт}} = 3,84$, при котором $i_{\text{опт}}^2 J_{\text{д}} = 0,85$. Следовательно, для электропривода барабана лебедки принимаем двигатель АИР132М6 с номинальной частотой вращения $n_{\text{ном}} = 960$ об/мин.

Большое значение при выборе двигателя имеют экономические показатели: стоимость двигателя, его КПД и коэффициент мощности, масса и габариты, расходы по обслуживанию и на ремонт. При оценке экономических показателей принимаемого варианта необходимо учитывать экономические показатели не только самого двигателя, но используемого для его управления пускорегулирующих устройств (статических выпрямителей, регулируемых преобразователей, устройств «мягкого» пуска, защиты и т. п.).

При выборе двигателя следует пользоваться каталогами на серию двигателей либо на отрезок серии. Такой каталог содержит сведения о назначении двигателей данной серии и области их применения; конструкции и формах исполнения по способам защиты, охлаждения, монтажа и климатическим условиям эксплуатации; технические данные, габаритные размеры и массу двигателя по каждому типоразмеру, а также ряд других сведений, необходимых при выборе двигателя.

5.6. Проверка двигателей на достаточность пускового момента и перегрузочную способность

Выбранный для электропривода двигатель необходимо проверить на достаточность начального пускового момента и перегрузочную способность.

Двигатели переменного тока (асинхронные и синхронные) имеют *физический предел* начального пускового и максимального моментов (см. рис. 3.3). Поэтому для заданного значения напряжения эти двигатели не могут создать моментов, превышающих значений, указанных в каталоге (исключение составляют асинхронные двигатели с фазным ротором, допускающие увеличение пускового момента до максимального). При превышении статическим моментом M_c начального пускового момента M_n при включении двигателя в сеть пуск не произойдет, а при превышении этим моментом максимального момента M_{max} устойчивая работа двигателя нарушится и ротор остановится.

В каталогах на асинхронные двигатели по каждому типоразмеру указаны значения кратности пускового момента $\lambda_n = M_n/M_{ном}$ и максимального момента $\lambda_m = M_{max}/M_{ном}$, где $M_{ном}$ — номинальный момент. Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором общего назначения $\lambda_n = 1,2+2,0$; $\lambda_m = 1,8+2,2$; для асинхронных двигателей с фазным ротором $\lambda_m = 1,7+3,5$; для двигателей крановых и металлургических серий $\lambda_m = 2,3+3,3$; для синхронных двигателей $\lambda_m = 2+3$.

Если на какой-либо ступени нагрузочной диаграммы мощность P_x отличается от номинальной, то частота вращения для этого *не номинального* режима, об/мин,

$$n_x = n_1 - \frac{P_x}{P_{ном}}(n_1 - n_{ном}). \quad (5.9)$$

Двигатели постоянного тока не имеют *физического предела* электромагнитного момента. Предельная допускаемая величина момента определяется степенью коммутации, которая может быть кратковременно допущена в этом двигателе, не вызывая необратимых процессов в щеточно-коллекторном узле (например, оплавление коллектора). Другими словами, предельные значения перегрузочной способности и пускового момента в двигателях постоянного тока определяются предельно допустимой величиной тока перегрузки (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Предельно допустимая перегрузка

Серия двигателя	Перегрузка
Общего назначения постоянного тока серий 2ПФ; 2ПО; 2ПБ	$2I_{ном}$ в течение 60 с; $3I_{ном}$ в течение 10 с (2ПФ и 2ПО); $4I_{ном}$ в течение 10 с (2ПБ)
Крановые и металлургические двигатели постоянного тока серии Д	До $3,5I_{ном}$ в течение 1 мин при последовательном возбуждении; до $3,0I_{ном}$ в течение 1 мин при смешанном возбуждении; до $2,5I_{ном}$ в течение 1 мин при независимом возбуждении

Допустимые значения тока перегрузки приводятся в каталогах на серии двигателей постоянного тока.

Проверка двигателей постоянного тока на перегрузочную способность состоит в сравнении наибольшей величины тока по нагрузочной диаграмме с предельно допустимым током для данного типоразмера двигателя, приведенного в каталоге.

При отсутствии в каталоге данных о допустимых перегрузках можно воспользоваться указаниями действующего ГОСТ на электродвигатели соответствующей категории

При токах, превышающих предельно допустимые значения, появляется опасность возникновения в двигателях постоянного тока кругового огня на коллекторе, что создает пожароопасность и опасность оплавления коллектора и выхода двигателя из строя.

Необходимо также иметь в виду, что в соответствии с действующим стандартом в сетях, питающих электродвигатели, допустимые отклонения напряжения от номинального составляют $\pm 5\%$. Как известно, пусковой и максимальный моменты асинхронных двигателей пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому при снижении напряжения сети на 5% указанные моменты и перегрузочная способность двигателя уменьшатся на $1 - (0,95)^2 = 0,1$, т.е. на 10% .

Если выбранный типоразмер двигателя не удовлетворяет требованиям электропривода, то следует принять следующий (смежный) типоразмер и произвести проверку по достаточности начального пускового момента и перегрузочной способности.

Если по условиям работы электропривода пуск двигателя осуществляется без нагрузки, то проверку на величину начального пускового момента не делают.

5.7. Расчет мощности двигателей для продолжительного режима работы

Расчет требуемой мощности приводного двигателя является наиболее ответственным моментом проектирования электропривода.

Завышение требуемой мощности двигателя ведет к ухудшению его энергетических показателей (КПД и коэффициента мощности) и, как следствие, увеличению непроизводительных потерь энергии и удорожанию эксплуатации электропривода.

Если же допустить *занижение* требуемой мощности двигателя, то работа его будет сопровождаться чрезмерным перегревом, что приведет к преждевременному выходу его из строя, непредвиденной остановке рабочего механизма, дополнительным расходам на ремонт электропривода. Таким образом, только правильный расчет и последующий выбор двигателя по мощности и исполнению (по защите, монтажу и климатическому исполнению) обеспечит

надежную работу электропривода с высокими экономическими показателями. Для обеспечения надежной работы электропривода необходимо также, чтобы перегрузочная способность и начальная величина пускового момента соответствовали предъявляемым требованиям.

В то же время необходимо иметь в виду, что выбрать двигатель точно по расчетной величине мощности практически невозможно. Дело в том, что номинальные значения мощностей двигателей, а также напряжения питания двигателей стандартизованы.

Для двигателей мощностью до 1000 кВт и напряжением питания до 1000 В установлен ряд номинальных мощностей, кВт:

0,06	0,18	0,55	1,5	4,0	11	22	45	90	160	315	630
0,09	0,25	0,75	2,2	5,5	15	30	55	110	200	400	800
0,12	0,37	1,1	3,0	7,5	18,5	37	75	132	250	500	1000

Номинальные напряжения питания двигателей низкого напряжения (до 1000 В):

сети постоянного тока, В, — 27; 110; 220; 440;

сети переменного тока, В, — 40; 220; 380; 660.

1. Нагрузка продолжительная неизменная (см. рис. 5.2, а). Расчетная мощность определяется по заданным значениям статического момента сопротивления рабочего механизма M_c (*приведенное значение*), частоты вращения n и КПД механизма, включая передаточное устройство (редуктор) $\eta_{\text{мех}}$, кВт,

$$P_{\text{расч}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M_c n / \eta_{\text{мех}} \quad (5.10)$$

Затем по каталогу на выбранную серию двигателей определяют типоразмер двигателя с большим ближайшим значением номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ требуемой частоты вращения.

При тяжелых условиях пуска и возможных перегрузках выбранный двигатель следует проверить на достаточность начального пускового момента и перегрузочную способность. Проверка двигателя на нагрев не требуется, поскольку нагрузка двигателя не превышает номинального значения, а условия эксплуатации соответствуют техническим условиям выбранной серии двигателей.

Пример 5.2. Определить расчетную мощность трехфазного асинхронного двигателя для привода механизма, работающего в продолжительном режиме S1. Привод нерегулируемый, статический нагрузочный момент механизма $M_c = 45 \text{ Н} \cdot \text{м}$, требуемая частота вращения $n = 1450 \pm 10 \text{ об/мин}$, КПД механизма $\eta_{\text{мех}} = 0,75$. По условиям эксплуатации требуется двигатель закрытого исполнения IP44; расположение вала горизонтальное; крепление двигателя фланцевое.

Решение: 1. Расчетная мощность двигателя (5.10)

$$P_{\text{расч}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M_c n / \eta_{\text{мех}} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 1450 / 0,75 = 9,14 \text{ кВт.}$$

2. По каталогу на асинхронные двигатели серии 4А (основное исполнение) выбираем двигатель 4А132М4У3 номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 11$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1458$ об/мин; $\eta_{\text{ном}} = 87,5\%$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,87$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,2$; кратности $\lambda_{\eta} = 2,0$; $\lambda_I = 7,5$; исполнение по способу монтажа 1М3031.

2. Нагрузка продолжительная переменная (см. рис. 5.2, б). Расчет номинальной мощности двигателя выполняют либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин (мощности, момента или тока).

Метод средних потерь. Используя нагрузочную диаграмму, определяют среднее значение мощности, кВт,

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_N t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}, \quad (5.11)$$

Мощность на участках P_x и их продолжительность t_x определяют по нагрузочной диаграмме. Затем по каталогу предварительно выбирают номинальную мощность двигателя, кВт,

$$P'_{\text{ном}} = (1,2 + 1,3) P_{\text{ср}}. \quad (5.12)$$

По каталогу определяют КПД в номинальном режиме для предварительно выбранного двигателя, а затем рассчитывают потери при номинальной нагрузке, кВт,

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right), \quad (5.13)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ — КПД двигателя в номинальном режиме.

Определяют потери ΔP_x на участках нагрузочной диаграммы $P_1, P_2 \dots P_N$:

$$\Delta P_x = P_x \left(\frac{1}{\eta_x} - 1 \right). \quad (5.14)$$

Если в каталоге или справочнике на выбранный типоразмер двигателя приведены график или таблица зависимости КПД от нагрузки, то определение η_x для разных значений мощности P_x не составляет труда. Если же таких данных нет, то полные потери $\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$ для разных значений коэффициента нагрузки по току

$$\beta = I_x / I_{\text{ном}}, \quad (5.15)$$

с некоторым приближением можно определить на участках нагрузочной диаграммы по формуле:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{ном}} (\gamma + \beta^2) / (\gamma + 1), \quad (5.16)$$

где γ — отношение постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ к переменным $\Delta P_{\text{пер}}$,

$$\gamma = \Delta P_{\text{пост}} / \Delta P_{\text{пер}}. \quad (5.17)$$

Приблизительные значения γ для различных двигателей:

Асинхронные двигатели общего назначения:

с короткозамкнутым ротором 0,5—0,7

Асинхронные двигатели крановые:

с короткозамкнутым ротором 0,4—0,5

с фазным ротором 0,6—0,9

Двигатели постоянного тока

независимого возбуждения 0,5—0,9

Двигатели постоянного тока

крановые 1,0—1,5

Примечание. Большие значения γ соответствуют двигателям большой мощности.

Затем в соответствии с нагрузочной диаграммой определяют средние потери двигателя, кВт,

$$\sum \Delta P_{\text{ср}} = \sum \Delta P_x t_x / \sum t_x, \quad (5.18)$$

где

$$\sum \Delta P_x t_x = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_N t_N. \quad (5.19)$$

Полученное значение $\Delta P_{\text{ср}}$ должно быть не больше номинальных потерь предварительно выбранного двигателя $\Delta P_{\text{ном}}$ [см. (5.13)]. Если же $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$, то выбирают двигатель смежного типоразмера большей мощности и повторяют расчет. Окончательно выбранный типоразмер двигателя следует проверить на величину начального пускового момента и перегрузочную способность. Поскольку средние потери в двигателе не превышают величину номинальных потерь выбранного двигателя, проверка двигателя на нагрев не требуется.

Пример 5.3. Для электропривода главного движения токарного станка необходим трехфазный асинхронный двигатель серии АИР (основное исполнение). Нагрузочная диаграмма этого привода имеет вид рис. 5.2, б; значения мощности на участках диаграммы P_x (кВт) и их продолжительность t_x (мин) составляют:

$$\begin{array}{ccccc} P_1 = 14; & P_2 = 10; & P_3 = 12; & P_4 = 17; & P_5 = 7; \\ t_1 = 6; & t_2 = 6; & t_3 = 4; & t_4 = 4; & t_5 = 8. \end{array}$$

Частота вращения $n_{\text{ном}} = 1460 \pm 5$ об/мин. Пуск двигателя выполняется без нагрузки.

Решение. Решаем задачу методом средних потерь.

1. Среднее значение мощности (5.11)

$$P_{\text{ср}} = \sum P_x t_x / \sum t_x = 320/28 = 10,7 \text{ кВт},$$

где

$$\sum P_x t_x = 14 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 12 \cdot 4 + 17 \cdot 4 + 7 \cdot 8 = 320;$$

$$\sum t_x = 6 + 6 + 4 + 4 + 8 = 28 \text{ мин.}$$

2. Принимаем предварительно двигатель номинальной мощностью (5.12)

$$P'_{\text{ном}} = 1,25 \cdot 10,7 = 13,4 \text{ кВт.}$$

По каталогу серии АИР (основное исполнение) принимаем двигатель АИР160S4У3 мощностью $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$, частотой вращения $n_{\text{ном}} = 1455 \text{ об/мин}$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 90\%$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,89$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,9$; кратность пускового момента $\lambda_{\text{п}} = 1,9$; кратность пускового тока $\lambda_I = 7,0$; исполнение по способу монтажа IM2031.

3. Коэффициент нагрузки β^2 для участков нагрузочной диаграммы (5.15)

$$\beta_1^2 = 0,93; \beta_2^2 = 0,66; \beta_3^2 = 0,80; \beta_4^2 = 1,13; \beta_5^2 = 0,47.$$

4. Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения принимаем $\gamma = 0,5$.

5. Потери при номинальной нагрузке (5.13)

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) = 15 \left(\frac{1}{0,90} - 1 \right) = 1,66 \text{ кВт.}$$

6. Определяем потери для участков нагрузочной диаграммы (5.16)

$$\Delta P_1 = 1,66(0,5 + 0,93)/(0,5 + 1) = 1,58 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_2 = 1,66(0,5 + 0,66)/1,5 = 1,28 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_3 = 1,66(0,5 + 0,80)/1,5 = 1,40 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_4 = 1,66(0,5 + 1,13)/1,5 = 1,79 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_5 = 1,66(0,5 + 0,47)/1,5 = 1,08 \text{ кВт.}$$

7. Средние потери двигателя (5.18)

$$\sum \Delta P_x t_x = 1,58 \cdot 6 + 1,28 \cdot 6 + 1,40 \cdot 4 + 1,79 \cdot 4 + 1,08 \cdot 8 = 38,56;$$

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum \Delta P_x t_x / \sum t_x = 38,56/28 = 1,38 \text{ кВт.}$$

В связи с тем что средние потери меньше номинальных потерь: $1,38 < 1,66$, пересчета мощности двигателя не требуется.

8. Наибольшая мощность по нагрузочной диаграмме равна 17 кВт, что превышает номинальную мощность выбранного двигателя. Поэтому требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Момент нагрузки двигателя на четвертом участке нагрузочной диаграммы при $P_4 = 17 \text{ кВт}$:

$$M_4 = 9,55 P_4/n_4 = 9,55 \cdot 17\,000/1449 = 112 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где частота вращения на четвертом участке диаграммы (5.9)

$$n_4 = n_1 - \frac{P_4}{P_{\text{ном}}} (n_1 - n_{\text{ном}}) = 1500 - \frac{17}{15} (1500 - 1455) = 1449 \text{ об/мин.}$$

Момент двигателя при номинальной мощности $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 15\,000/1455 = 98,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Таким образом, превышение момента на четвертом участке диаграммы составляет $112,5/98,5 = 1,15$. Перегрузочная способность выбранного двигателя при номинальной нагрузке равна 2,9. Следовательно, на чет-

вертом участке диаграммы перегрузочная способность двигателя составит $2,9/1,15 = 2,52$, т.е. устойчивая работа двигателя обеспечена.

Окончательно принимаем двигатель АИР160S4У3.

Следует отметить, что выбор мощности двигателя по участку нагрузочной диаграммы с наибольшим значением мощности (участок $P_4 = 17$ кВт) был бы ошибочным, так как в этом случае пришлось бы принять двигатель номинальной мощностью 18,5 кВт, что привело бы к значительному *недоиспользованию* мощности двигателя, а следовательно, к снижению его экономических показателей (КПД и коэффициента мощности).

Метод средних потерь универсален и применим для всех режимов работы двигателей. Он является более точным по сравнению с методом эквивалентных величин, хотя и более трудоемок.

Метод эквивалентных величин. Рассмотрим сначала *метод эквивалентного тока*, который основан на замене изменяющегося во времени тока нагрузки двигателя неизменным эквивалентным током,

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{(\sum I_x^2 t_x) / \sum t_x} \quad (5.20)$$

Предполагается, что эквивалентный ток создает в двигателе такие же потери, что и фактический ток нагрузки. Рассчитав эквивалентный ток, по каталогу выбирают двигатель, номинальный ток которого равен или несколько больше эквивалентного тока.

Выбранный двигатель следует проверить по перегрузочной способности.

Для двигателей, у которых величина момента пропорциональна току нагрузки и частота вращения не регулируется изменением магнитного потока возбуждения (двигатели постоянного тока независимого возбуждения), выбор двигателя можно вести по *эквивалентному значению момента*

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{(\sum M_x^2 t_x) / \sum t_x}, \quad (5.21)$$

или по *эквивалентному значению мощности*

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{(\sum P_x^2 t_x) / \sum t_x}. \quad (5.22)$$

Пример 5.4. Для условий примера 5.3 рассчитать требуемую мощность двигателя методом эквивалентной мощности.

Решение. Эквивалентная мощность (5.22)

$$\begin{aligned} \sum P_x^2 t_x &= 14^2 \cdot 6 + 10^2 \cdot 6 + 12^2 \cdot 4 + 17^2 \cdot 4 + 7^2 \cdot 8 = \\ &= 1176 + 600 + 576 + 1156 + 392 = 3920; \end{aligned}$$

$$\sum t_x = 28 \text{ мин};$$

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{3920/28} = 11,8 \text{ кВт}.$$

По каталогу на трехфазные асинхронные двигатели серии АИР (основное исполнение) выбираем двигатель ближайшей большей номинальной мощностью 15 кВт, типоразмер АИР160S4У3, такой же, что и в примере 5.3.

Расчет требуемой мощности двигателя методом эквивалентных величин менее трудоемок по сравнению с методом средних потерь, но уступает ему в точности.

5.8. Расчет мощности двигателей для кратковременного режима работы

Задача расчета сводится к определению мощности двигателя $P_{\text{ном.кр}}$, способного выдержать перегрузку $P_{\text{кр}}$, работая в кратковременном режиме в течение времени $t_{\text{кр}}$ (см. рис. 5.2, в). При этом перегрев двигателя не должен превышать значения $\tau_{\text{уст}}$, соответствующего продолжительному режиму работы этого двигателя с номинальной нагрузкой $P_{\text{ном}}$. Полученная в результате расчета мощность $P_{\text{ном.кр}}$ меньше мощности кратковременного режима $P_{\text{кр}}$ на величину коэффициента механической перегрузки p_m :

$$P_{\text{ном.кр}} = P_{\text{кр}}/p_m \quad (5.23)$$

Допустим, нагрузочная диаграмма кратковременного режима содержит две ступени нагрузки (рис. 5.3, а). В этом случае мощность $P_{\text{кр}}$ определяют методом средних потерь (5.18).

Коэффициент механической перегрузки по мощности определяют по графику $p_m = f(t^*)$ (рис. 5.3, б), где $t^* = t_p/T_n$ — относительное значение времени работы кратковременного режима $t_p = t_1 + t_2$; T_n — постоянная времени нагревания.

Установлено, что при $t^* < 0,35$ нагрузка двигателя в кратковременном режиме $P_{\text{кр}}$ превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{\text{ном}}$ в 2,5 раза и более. При этом перегрузочная

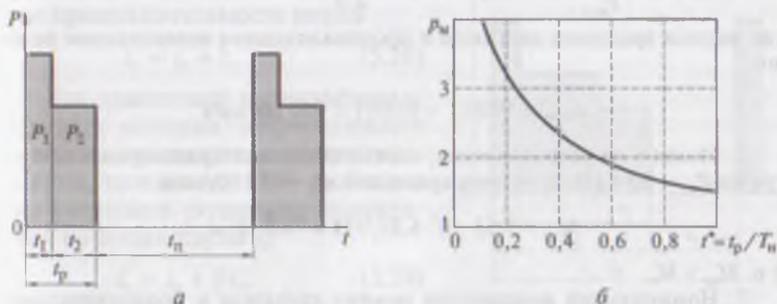


Рис. 5.3. Нагрузочная диаграмма кратковременного режима работы (а) и график для определения коэффициента механической перегрузки p_m (б)

способность двигателя обычно не удовлетворяет требованиям электропривода. Поэтому при $t^* \leq 0,35$ двигатель выбирают по требуемой для кратковременного режима перегрузочной способности двигателя λ_m . Например, если постоянная времени нагревания двигателя $T_n = 40$ мин, то при такой постоянной времени нагревания, начиная с $t_{кр} = 40 \cdot 0,35 = 14$ мин и меньше, двигатель следует выбирать по требуемой перегрузочной способности.

Пример 5.5. Для электропривода заслонки трубопровода требуется трехфазный асинхронный двигатель с частотой вращения 940 ± 10 об/мин. Режим работы кратковременный $t_p = 15$ мин, статический момент сопротивления реактивный $M_c = 70$ Н·м (приведенное значение); двигатель должен быть закрытого исполнения, способ монтажа IM1001, климатические условия и место установки УЗ.

Решение. 1. Требуемая мощность двигателя

$$P_{кр} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot M_{сн} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 930 = 6,84 \text{ кВт.}$$

2. Выбираем двигатель серии АИР (основное исполнение), степень защиты IP44; постоянная нагревания $T_n = 30$ мин, относительное значение времени рабочего цикла $t^* = t_p/T_n = 15/30 = 0,5$.

3. По графику рис. 5.3, б определяем коэффициент механической перегрузки $p_m = 2,1$; мощность двигателя продолжительного режима, используемого в кратковременном режиме (5.23),

$$P'_{ном кр} = P_{кр}/p_m = 6,84/2,1 = 3,25 \text{ кВт.}$$

4. По каталогу двигателей серии АИР (основное исполнение) принимаем двигатель типа АИР112МВ6УЗ номинальной мощностью $P_{ном} = 4,0$ кВт, номинальное скольжение 5,0%, перегрузочная способность 2,2; кратность пускового момента 2.

5. Учитывая перегрузку двигателя, определяем частоту вращения при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 7,0$ кВт (5.9):

$$n'_{ном} = n_1 - \frac{P_{кр}}{P_{ном}} (n_1 - n_{ном}) = 1000 - \frac{6,84}{4,0} (1000 - 950) = 913 \text{ об/мин,}$$

где частота вращения двигателя в продолжительном номинальном режиме

$$n_{ном} = 1000(1 - 0,050) = 950 \text{ об/мин.}$$

6. Момент на валу двигателя, соответствующий кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт и частоте вращения $n_{кр} = 913$ об/мин,

$$M_{кр} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 6,84/913 = 71,5 \text{ Н·м,}$$

т.е. $M_{кр} > M_c$.

7. Номинальный вращающий момент двигателя в продолжительном режиме

$$M_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 P_{ном}/n_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 4,0/950 = 40,2 \text{ Н·м.}$$

8. Максимальный момент

$$M_{\max} = 40,2 \cdot 2,2 = 88,44 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

9. Действительная перегрузочная способность двигателя

$$M_{\max}/M_c = 88,44/70 = 1,26.$$

При возможном уменьшении напряжения сети на 5% перегрузочная способность составит $1,26 \cdot 0,95^2 = 1,13$.

10. Пусковой момент двигателя $M_n = 40,2 \cdot 2 = 80,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что превышает статический момент $M_c = 70 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по пусковому моменту и перегрузочной способности.

5.9. Расчет мощности двигателей для повторно-кратковременного режима работы

В общем случае, каждый период работы t_p нагрузочной диаграммы повторно-кратковременного режима (ПКР) может иметь несколько ступеней (рис. 5.4). Для приведения такой диаграммы к виду рис. 5.2, г, рассчитывают эквивалентную по нагреву мощность только периодов работы (без учета паузы t_n):

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\sum P_x^2 t_x / t_p}, \quad (5.24)$$

где

$$\sum P_x^2 t_x = P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_N^2 t_N; \quad (5.25)$$

$$t_p = t_1 + t_2 + \dots + t_N. \quad (5.26)$$

Расчетное значение относительной продолжительности включения

$$\text{ПВ}' = (t_p / t_u) 100, \quad (5.27)$$

где продолжительность цикла

$$t_u = t_p + t_n. \quad (5.28)$$

Для двигателей с самовентиляцией, у которых эффективность охлаждения зависит от частоты вращения, при расчете $\text{ПВ}'$ необходимо учитывать ухудшение охлаждения во время паузы t_n :

$$t_u = t_p + \beta t_n, \quad (5.29)$$

где β — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателей.

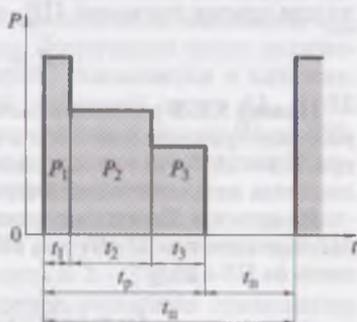


Рис. 5.4. Трехступенчатая нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима

При частоте вращения $n \leq 0,2 n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = \beta_0$; при частоте вращения $0,8 n_{\text{ном}} \geq n \geq 0,2 n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = 0,5(1 + \beta_0)$; при $n \geq 0,8 n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = 1$.

Значения β_0 зависят от исполнений двигателей по способам защиты и охлаждения:

закрытый с независимой вентиляцией	1
закрытый с естественным охлаждением	0,97
закрытый с самовентиляцией	0,5
защищенный с самовентиляцией	0,3

При $PВ' < 10\%$ расчет мощности ведут как для *кратковременного* режима работы, а если $PВ' > 60\%$ или продолжительность цикла $t_{\text{ц}} > 10$ мин, расчет мощности двигателя ведут как для *продолжительного* режима работы с переменной нагрузкой. Если же $10\% \leq PВ' \leq 60\%$, то эквивалентную мощность $P_{\text{эк}}$ пересчитывают на номинальную мощность повторно-кратковременного режима $P_{\text{пкр}}$, соответствующую ближайшему номинальному значению $PВ = 15; 25; 40$ или 60%

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \sqrt{PВ'/PВ}. \quad (5.30)$$

По полученным значениям $P_{\text{пкр}}$ и $PВ$ выбирают двигатель постоянного или переменного тока серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, например двигатель краново-металлургической серии постоянного тока или асинхронный. Эти двигатели обладают повышенной перегрузочной способностью и большим пусковым моментом при сравнительно небольших пусковых токах. Пониженная величина момента инерции ротора (якоря) обеспечивает этим двигателям улучшенные динамические свойства, что является важным качеством при повторно-кратковременном режиме работы. В каталогах этих серий указана номинальная мощность при $PВ = 40\%$. При необходимости выбора мощности двигателя для других значений $PВ_x$ следует воспользоваться формулой:

$$P_x = P_{40} \sqrt{40/PВ_x}. \quad (5.31)$$

Пример 5.6. В результате расчета по (5.30) получена мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{\text{пкр}} = 23$ кВт при $PВ = 25\%$, частотой вращения 700 ± 20 об/мин. Требуется выбрать двигатель металлургической серии МТКН.

Решение. По каталогу указанной серии выбираем двигатель МТКН 412-8 мощностью 22 кВт при $PВ = 40\%$. По (5.31) пересчитаем эту мощность на $PВ = 25\%$:

$$P_{25} = 22 \sqrt{40/25} = 22 \cdot 1,26 = 27,7 \text{ кВт.}$$

Для уточнения пересчитаем на $PВ = 25\%$ двигатель меньшей смежной мощности МТКН 411-8 мощностью 15 кВт при $PВ = 40\%$:

$$P_{25} = 15 \cdot 1,26 = 18,9 \text{ кВт.}$$

Таким образом, окончательно принимаем двигатель МТКН 412-8 номинальной мощностью 27,7 кВт при ПВ = 25 %, с номинальной частотой вращения 700 об/мин.

В некоторых случаях расчет необходимой мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы целесообразнее вести по эквивалентному значению момента. Объясняется это тем, что при повторно-кратковременном режиме работы возрастает влияние переходных процессов (частые пуски, изменения частоты вращения и т. д.). Расчет эквивалентного значения момента $M_{эк}$ ведут по формулам, аналогичным (5.24)–(5.26), но вместо значений мощности следует ввести значения момента M .

Как известно, пуск и торможение двигателей происходят при токах, превышающих их номинальные значения, поэтому при частых пусках и торможениях происходит интенсивный перегрев двигателя. Особенно сильно влияние этих процессов в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, у которых пусковой ток в 5–7 раз превышает номинальный. В связи с этим для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, вводится понятие *допустимого числа включений в час*, которое приводится в каталогах на двигатели, предназначенные для работы при частых включениях.

После выбора двигателя по каталогу и проверки его на величину пускового момента и перегрузочную способность определяют число включений в час,

$$h = 3600/t_{ц},$$

где $t_{ц}$ — продолжительность цикла (5.29), с.

Затем сравнивают его с допустимым числом пусков данной серии $h_{доп}$. Действующим стандартом установлены допустимые значения $h_{доп} = 30; 60; 120$ и 240 вкл/ч. Если фактическое число включений в час оказалось больше допустимого значения, то нужно выбрать двигатель другого типоразмера с достаточным значением $h_{доп}$ и проверить его на возможный перегрев. Допустимое число включений, определяемое разработчиком серии, указывается в каталоге. Например, у асинхронных двигателей лифтовой серии 4А...НЛБ для привода лифтов допустимое число пусков в час от 90 до 200. При этом 200 пусков в час допускается лишь при независимой вентиляции от постороннего вентиляторного двигателя.

Если режим работы предусматривает электрическое торможение, особенно противовключением, то допустимое число пусков, указанное в каталоге, следует уменьшить в 2–3 раза.

При отсутствии значительных нагрузок возможно применение в электроприводах с повторно-кратковременным режимом работы двигателей общепромышленного назначения, для продолжительного режима работы. В этом случае номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, указанная в каталоге, должна быть увеличена

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{ном}} K_p, \quad (5.32)$$

где

$$K_p = \sqrt{100/\text{ПВ}}. \quad (5.33)$$

Использование двигателей продолжительного режима в повторно-кратковременном режиме вместо специальных двигателей, рассчитанных для этого режима, ведет к снижению надежности электропривода и его энергетических показателей. Объясняется это тем, что двигатели для продолжительного режима, по сравнению с двигателями для повторно-кратковременного режима, имеют меньшие значения пускового момента и перегрузочной способности, больший момент инерции ротора (якоря), меньший диаметр вала и меньший ресурс подшипников.

Пример 5.7. Для электропривода подъемного механизма необходимо рассчитать мощность двигателя методом эквивалентного момента и выбрать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для повторно-кратковременного режима работы S3 в соответствии с нагрузочной диаграммой, аналогичной представленной на рис. 5.4, где вместо значений мощности следует подставить значения моментов $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_2 = 130 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_3 = 164 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $t_1 = 4 \text{ с}$; $t_2 = 20 \text{ с}$; $t_3 = 15 \text{ с}$; $t_n = 120 \text{ с}$; частота вращения $700 \pm 10 \text{ об/мин}$; пуск двигателя под нагрузкой.

Решение. 1. Эквивалентный момент [формулы, аналогичные (5.24) — (5.31)],

$$\sum M_i^2 t_i = 327^2 \cdot 4 + 130^2 \cdot 20 + 164^2 \cdot 15 = 1\,167\,356;$$

$$t_p = 4 + 20 + 15 = 39 \text{ с},$$

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{1167356/39} = 173 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Эквивалентная мощность двигателя

$$P_{\text{эк}} = 0,105 M_{\text{эк}} n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 173 \cdot 700 = 12715 \text{ Вт}, \text{ или } 12,7 \text{ кВт}.$$

3. Продолжительность цикла при $\beta = 0,5$ (5.29)

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta t_n = 39 + 0,5 \cdot 120 = 99 \text{ с}.$$

4. Расчетное значение ПВ (5.27)

$$\text{ПВ}' = (t_p/t_{\text{ц}})100 = (39/99)100 = 39 \text{ \%}.$$

5. Мощность двигателя при ПВ = 40% (5.30)

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \sqrt{\text{ПВ}'/40} = 12,7 \sqrt{39/40} = 12,22 \text{ кВт}.$$

6. По каталогу краново-металлургической серии МТКН выбираем асинхронный короткозамкнутый двигатель МТКН 411-86: $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$ при ПВ = 40%; 220/380 В; $n_{\text{ном}} = 695 \text{ об/мин}$; $n_1 = 750 \text{ об/мин}$; $M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 15\,000/695 = 206 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{max}} = 670 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_n = 650 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

7. Частота вращения на ступени диаграммы $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$ по аналогии с (5.9)

$$n = n_1 - \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} (n_1 - n_{\text{ном}}) = 750 - \frac{327}{206} (750 - 695) = 663 \text{ об/мин.}$$

8. Наибольший нагрузочный момент $327 \text{ Н} \cdot \text{м}$, меньше пускового момента

$$M_{\text{наиб}} < M_{\text{п.}}$$

9. Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda_m = M_{\text{макс}}/M_1 = 670/327 = 2,05.$$

Таким образом, выбранный двигатель по величинам пускового момента и перегрузочной способности удовлетворяет заданным условиям.

5.10. Проверка выбранного двигателя по нагреву

При работе двигателя в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, не превышающей номинальную мощность двигателя, проверки двигателя по нагреву не требуется. Если же двигатель работает с переменной нагрузкой, когда токи в обмотках двигателя в процессе работы изменяются, а следовательно, меняются потери и температура нагрева, проверка двигателя по нагреву необходима. Существует несколько методов такой проверки, наибольшее применение получил *метод эквивалентного тока*. Эквивалентный ток рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{эк}} = \frac{\sqrt{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_N^2 t_N}}{\beta(t_1 + t_2 + \dots + t_N)}. \quad (5.34)$$

Эквивалентный ток для повторно-кратковременного режима определяют только за время работы. Ухудшение условий охлаждения двигателей в переходных режимах учитывают введением коэффициента ухудшения теплоотдачи β в соответствии с указаниями, приведенными на с. 164.

Полученное значение эквивалентного тока сравнивают с номинальным значением тока $I_{\text{ном}}$ при тех же условиях работы (при той же относительной продолжительности включения). Например, если в каталоге указано номинальное значение тока для ПВ_{кат}, то при фактической продолжительности включения ПВ_{фак} номинальное значение тока для двигателей краново-металлургических серий равно:

$$I'_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{кат}}/\text{ПВ}_{\text{фак}}}. \quad (5.35)$$

Этим же выражением можно пользоваться и для двигателей других серий, если они не имеют особых условий охлаждения во время паузы, например наличие независимого вентилятора.

При проверке двигателей по нагреву превышение эквивалентного тока над номинальным значением неприемлемо, а недогрузка двигателя в пределах 10—15% считается нормальной.

Для двигателей постоянного тока независимого (параллельно-го) возбуждения и асинхронных при нагрузке в пределах номинальной, у которых электромагнитный момент пропорционален току, проверку по нагреву можно производить методом эквивалентного момента.

При решении вопроса о допустимых перегрузках двигателей следует руководствоваться не только допустимым нагревом двигателя, но специфическими свойствами двигателей. Так, перегрузка двигателей постоянного тока может быть ограничена ухудшением коммутации, а перегрузка асинхронных двигателей может быть ограничена его перегрузочной способностью.

Если выбранный двигатель не проходит по условиям нагрева, т. е. если $I_{\text{эк}} > I_{\text{ном}}$ или $I_{\text{эк}} \ll I_{\text{ном}}$, то выбирают двигатель другого типоразмера номинальной мощностью $P'_{\text{ном}}$, используя соотношение:

$$P'_{\text{ном}} \approx P_{\text{ном}} (I_{\text{эк}} / I_{\text{ном}}). \quad (5.36)$$

Затем все расчеты мощности двигателя и требуемые проверки выполняют заново.

5.11. Электропривод с маховиком

Маховик — это колесо с массивным ободом, устанавливаемое на валу машины и используемое в качестве аккумулятора (накопителя) механической энергии.

Маховик I применяют в рабочих машинах (РМ) с прерывистым режимом нагрузки для устранения ударного воздействия этой нагрузки на приводной двигатель (рис. 5.5, а). К подобным машинам относятся прессы, штампы, гильотинные ножницы, прокатные станы и т. д., в которых периоды отсутствия нагрузки чередуются с кратковременными периодами резко возрастающей пиковой нагрузки, оказывающей на приводной двигатель ударное действие. Благодаря наличию вращающегося маховика с накопленной в нем за время отсутствия нагрузки механической энергии, т. е. маховика, «раскрученного» приводным двигателем до частоты вращения n_{max} , статический момент сопротивления M_c , созданный ударной нагрузкой, лишь частично воздействует на двигатель, снижаясь до значения M_1 (рис. 5.5, б). При этом график нагрузочной диаграммы получается сглаженным и нагрузка на двигатель практически утрачивает ударное воздействие. За время рабочего цикла частота вращения маховика снижается до значения n_{min} (рис. 5.5, в). По окончании рабочего цикла нагрузка на вал двигателя убывает

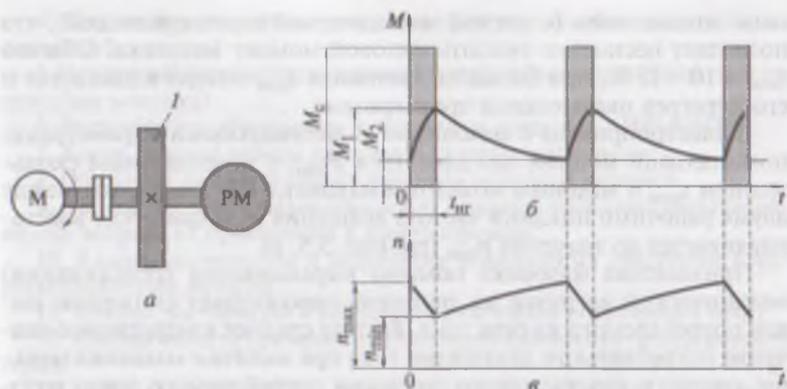


Рис. 5.5. Электропривод с маховиком

также постепенно, так как часть механической энергии двигателя в этот период расходуется на «раскручивание» маховика до прежней частоты вращения n_{\max} .

Таким образом, за время рабочего цикла $t_{\text{кр}}$ частота вращения маховика изменяется от n_{\max} до n_{\min} и количество накопленной в нем кинетической энергии сокращается на, Дж,

$$\Delta A = A_1 - A_2 = 11 \cdot 10^{-3} J_{\text{м}} \frac{n_{\max}^2 - n_{\min}^2}{2}, \quad (5.37)$$

где ΔA — кинетическая энергия, израсходованная маховиком за время рабочего цикла, Дж; A_1 и A_2 — кинетическая энергия маховика в начале и в конце рабочего цикла соответственно, Дж; $J_{\text{м}}$ — момент инерции маховика, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Переходя к маховому моменту маховика GD^2 ($\text{Н} \cdot \text{м}^2$) и учитывая соотношение между моментом инерции и маховым моментом (см. 1.15)

$$J_{\text{м}} = GD^2 / (4g),$$

получим

$$\Delta A = A_1 - A_2 = 0,14 \cdot 10^{-3} GD^2 (n_{\max}^2 - n_{\min}^2). \quad (5.38)$$

Таким образом, требуемый маховой момент маховика при заданной разности квадратов частот вращения ($n_{\max}^2 - n_{\min}^2$) за время рабочего цикла определяется выражением, $\text{Н} \cdot \text{м}^2$,

$$GD^2 = \frac{7143(A_1 - A_2)}{n_{\max}^2 - n_{\min}^2}, \quad (5.39)$$

Для электроприводов с ударной нагрузкой и маховиком обычно применяют асинхронные двигатели с повышенным номиналь-

ным скольжением (с мягкой механической характеристикой), что позволяет несколько снизить маховой момент маховика. Обычно $s_{\text{ном}} = 10 - 15 \%$, при больших значениях $s_{\text{ном}}$ потери в двигателе и его перегрев оказываются чрезмерными.

В электроприводе с маховиком и оптимальными параметрами: номинальной мощностью двигателя $P_{\text{ном}}$, с номинальным скольжением $s_{\text{ном}}$ и маховым моментом маховика GD^2 , за период между двумя рабочими циклами частота вращения вала двигателя восстанавливается до значения n_{max} (см. рис. 5.5, в).

Применение маховика помимо выравнивания (сглаживания) механической нагрузки на двигатель способствует снижению пиков потребляемого из сети тока. В итоге среднее квадратичное значение потребляемого двигателем тока при наличии маховика меньше среднего квадратичного значения потребляемого тока, который был бы при отсутствии маховика. Это ведет к снижению потерь двигателя и температуры его перегрева. Таким образом, маховик является также средством энергосбережения. В некоторых случаях оказывается возможным, применив маховик, уменьшить мощность приводного двигателя. Маховик обычно располагают на валу с наибольшей частотой вращения, т.е. на валу, частота вращения которого равна частоте вращения двигателя.

При расчете мощности асинхронного двигателя для электропривода с ударной нагрузкой сначала определяют предварительное значение номинального момента двигателя:

$$M'_{\text{ном}} \approx 1,2 M_{\text{ср}},$$

где $M_{\text{ср}}$ определяют по графику нагрузки рис. 5.5, б:

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_1 + M_2}{2}.$$

Предварительное значение требуемой номинальной мощности, кВт,

$$P'_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 10^{-3} M'_{\text{ном}} n_{\text{ном}},$$

где за $n_{\text{ном}}$ принимают частоту вращения n_{max} по графику рис. 5.5, в. Затем по каталогу на выбранную серию асинхронных двигателей выбирают типоразмер двигателя с номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$, ближайшей большей к $P'_{\text{ном}}$ с заданными значениями скольжения, частоты вращения, напряжения и т.п.

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеют графики нагревания и охлаждения двигателей?
2. Что такое постоянные времени нагревания и охлаждения двигателей?
3. Какие части двигателя наиболее чувствительны к перегреву?

4. Каковы формы исполнения двигателей по способам защиты и охлаждения?

5. Чем различаются конструктивные формы исполнения двигателей по способам монтажа?

6. Расшифруйте обозначение типоразмера двигателя АИР160М4У3.

7. Какие режимы работы двигателей считают основными?

8. Объясните вид нагрузочных диаграмм основных режимов.

9. В какой последовательности следует рассматривать двигатели при решении вопроса их применения в электроприводе?

10. Каковы достоинства и недостатки асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором?

11. Каковы достоинства и недостатки двигателей постоянного тока?

12. Каковы области применения двигателей краново-металлургических серий?

13. В чем сущность средних потерь при расчете мощности двигателя?

14. Можно ли расчетную мощность двигателя определять как мощность наиболее нагруженной ступени нагрузочной диаграммы?

15. Что учитывает коэффициент β при определении времени цикла повторно-кратковременного режима работы двигателя?

16. В каталоге указана номинальная мощность двигателя 30 кВт при ПВ = 40 %; какой будет номинальная мощность этого двигателя при ПВ = 60 %?

17. Каковы недостатки при использовании в повторно-кратковременном режиме двигателей, предназначенных для продолжительного режима?

18. Объясните назначение маховика в электроприводе с ударной нагрузкой.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

ГЛАВА 6

УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ЗАЩИТЫ

6.1. Контактные коммутирующие устройства

Коммутация — это изменение соединений в электрической цепи: включение, отключение и переключение ее составляющих частей посредством коммутирующих устройств — рубильников, выключателей, переключателей, командоаппаратов, реле, контакторов, пускателей и т. п.

В зависимости от напряжения электрической сети коммутирующие устройства подразделяют на устройства низкого (до 1000 В) и высокого (более 1000 В) напряжений. В данной главе рассмотрены коммутирующие и защитные устройства низкого напряжения. В зависимости от рода тока их разделяют на устройства постоянного и переменного тока; по способу реализации коммутационных операций — на контактные и бесконтактные. В *контактном* коммутирующем устройстве операция включения (отключение) реализуется путем плотного соединения (разъединения) поверхностей двух проводников, называемых контактами. В каждой паре контактов один контакт неподвижный, а другой — подвижный, перемещением которого и осуществляется процесс коммутации путем соединения либо разъединения контактов. *Бесконтактные* коммутирующие устройства управляют током в электрической цепи без ее механического разрыва путем дискретного (скачкообразного) изменения электрического сопротивления элемента, включенного последовательного с управляемым аппаратом. При коммутации посредством бесконтактного устройства ток в цепи не прекращается, а уменьшается до таких минимальных значений, что ими можно пренебречь. Примером бесконтактного коммутирующего устройства может служить тиристор, который имеет два устойчивых состояния: «открыто» и «закрыто» (см. 8.4).

Коммутирующие устройства бывают ручными и автоматическими. К ручным относятся коммутирующие устройства, управляемые оператором: рубильники, переключатели, пакетные выключатели (переключатели), кнопки, контроллеры.

Рубильники и переключатели применяют в сетях напряжением до 660 В. Их устанавливают на панелях распределительных щитов, в шкафах и ящиках. Они могут быть одно-, двух- и трехполюсными.

Кроме того, их подразделяют на рубильники с центральной (рис. 6.1, *а*) или боковой (рис. 6.1, *б*) рукоятками. Наиболее безопасны для обслуживающего персонала рубильники с рычажным приводом (рис. 6.1, *в*).

Рубильник имеет два фиксированных положения: «включено» (верхнее положение рукоятки) и «отключено» (нижнее положение рукоятки). Наиболее ответственной является операция отключения рубильника, когда разрывается цепь электрического тока и между размыкающимися контактами возникает электрическая дуга. Обычно каждый полюс рубильника снабжается дугогасительным моментным ножом с пружиной, обеспечивающей мгновенное разведение контактов, независимо от скорости перемещения рукоятки рубильника. В некоторых случаях рубильник комплектуют дугогасительной камерой.

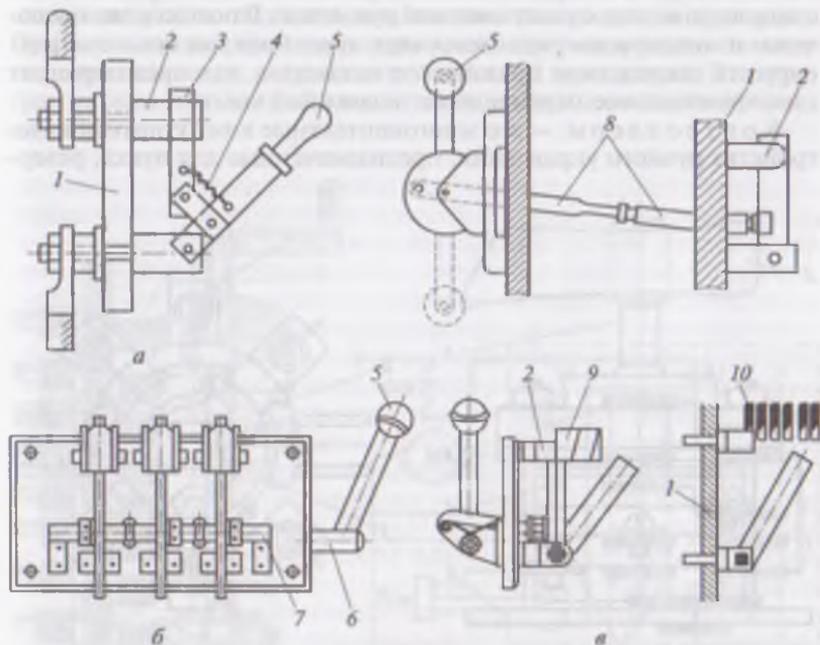


Рис. 6.1. Рубильники:

а — с центральной рукояткой; *б* — с боковой рукояткой; *в* — с рычажным приводом; 1 — основание; 2 — неподвижный контакт (стойка); 3 — моментный нож; 4 — пружина; 5 — рукоятка; 6 — вал; 7 — изоляционный валик; 8 — система рычагов; 9 — дугогасительная камера; 10 — дугогасительные пластины

Переключатели в отличие от рубильников имеют два комплекта неподвижных контактов и, соответственно, три положения: «вперед», «назад» и нейтральное положение «выключено». Переключатели применяют в схемах реверсирования двигателей, при пуске асинхронных двигателей методом переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник» и в других случаях, связанных с переключением проводов с одного элемента схемы, например обмотки двигателя, на другой, либо с изменением полярности подводимого напряжения или порядка следования фаз.

Пакетные выключатели и переключатели по назначению аналогичны рубильникам, но имеют более компактную и закрытую конструкцию. Их применяют на напряжение до 660 В при токе до 400 А. Элементами такого выключателя являются «пакеты», состоящие из системы неподвижных и подвижных контактов и фибровых пластин, предназначенных для гашения электрической дуги (рис. 6.2). Все пакеты разделены друг от друга изоляционными прокладками и собраны в корпусе двумя стяжными шпильками в единую конструкцию. Подвижные контакты перемещаются с помощью валика с пластмассовой рукояткой. В положениях «включено» и «отключено» подвижная часть пакетного выключателя фиксируется посредством пружинного механизма, что предотвращает самопроизвольное перемещение подвижной части.

Контроллеры — это многоконтактные коммутирующие устройства ручного управления, предназначенные для пуска, ревер-

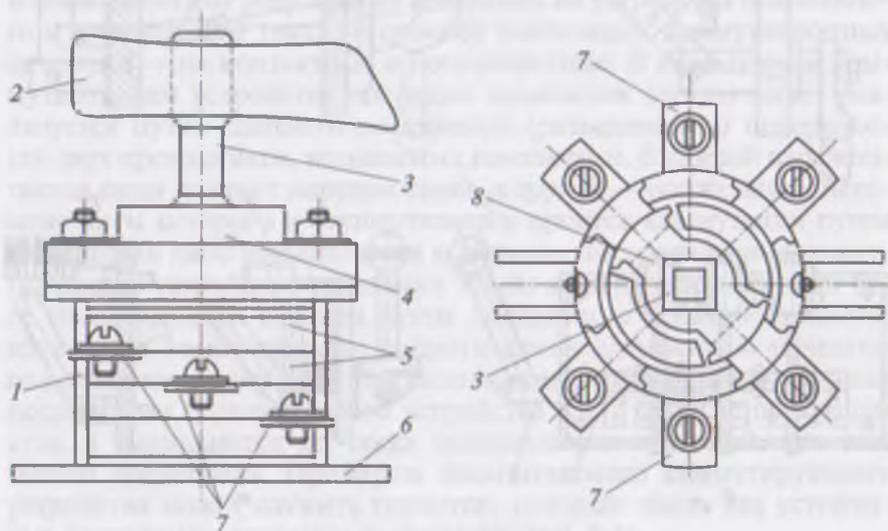


Рис. 6.2. Пакетный выключатель:

1 — стяжная шпилька; 2 — рукоятка; 3 — валик для переключения подвижных дисков; 4 — корпус; 5 — пакеты; 6 — основание; 7 — винтовые контакты для подключения проводов; 8 — подвижные диски с контактами

сирования, торможения и регулирования частоты вращения двигателей постоянного и переменного тока путем переключения их обмоток или включением в цепи этих обмоток резисторов. Рассмотрим принцип работы на примере барабанного контроллера (рис. 6.3, а). На валу 3, изготовленного из изоляционного материала, закреплены медные сегменты 4 различной длины, смещенные относительно друг друга под различными углами. Эти сегменты, выполняющие роль подвижных контактов, определенным образом соединены между собой. Подвижная часть контроллера называется барабаном. Напротив каждого сегмента расположены неподвижные контакты в виде плоских металлических пластин 2, укрепленных на изоляционном основании 1. Каждая из этих пластин (пальцев) расположена строго на уровне соответствующего сегмента. Внешняя управляемая контроллером электрическая цепь присоединена к неподвижным контактам.

Посредством рукоятки вал 3 можно поворачивать, при этом сегменты 4 в определенной последовательности приобретают контакт с пластинами 2 либо утрачивают его, в зависимости от взаимного углового смещения сегментов относительно друг друга. При этом во внешней цепи происходят переключения элементов электрических устройств по заданной программе. Эта программа задается длиной сегментов и углами их взаимного смещения.

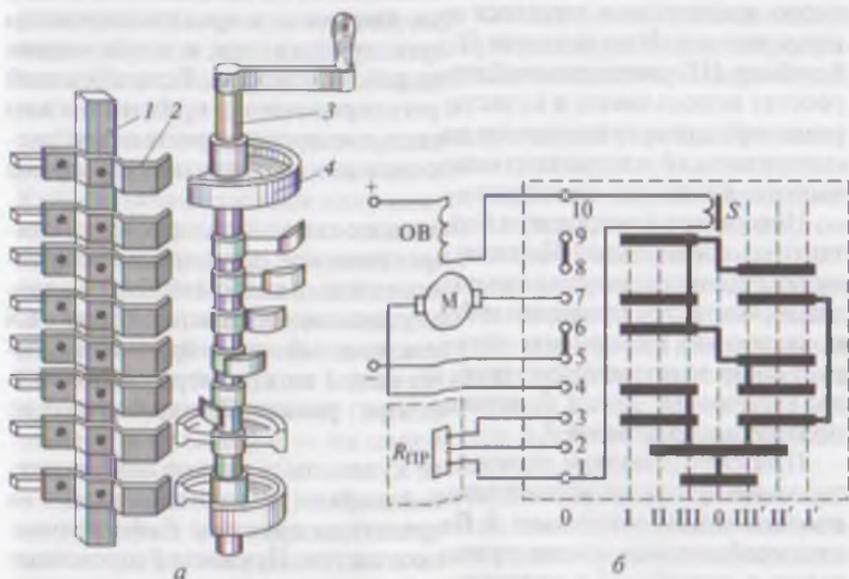


Рис. 6.3. Контроллер барабанного типа:

а — устройство; б — схема включения

На рис. 6.3, б представлена развернутая в плоскости схема контроллера (обведена штриховой линией) для управления двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Сегменты изображены отрезками толстых линий, соединенных между собой определенным образом. Барабан контроллера имеет семь положений: одно нейтральное 0, положения I, II и III при повороте барабана по часовой стрелке (относительно нейтрального положения) и положения I', II' и III' при повороте барабана против часовой стрелки. При нейтральном положении барабана двигатель выключен. При положении барабана I происходит соединение неподвижных контактов 9—8—7—6—5, а также 4—3. Электрический ток проходит от клеммы «плюс» через обмотку возбуждения ОВ, через катушку дугогашения S на контакт 1, через резисторы пускового реостата $R_{пр}$, через контакты 3—4, по обмотке якоря и через замкнутые клеммы 7—6—5 на клемму «минус». При этом начинается пуск двигателя. При повороте барабана в положение II его сегменты замыкают клеммы 2—3 и шунтируют первую ступень пускового реостата. Пуск двигателя продолжается при уменьшенном сопротивлении пускового реостата. При повороте барабана в положение III замыкаются контакты 1—2, шунтируется вторая ступень пускового реостата, процесс пуска заканчивается и двигатель переходит в рабочий режим.

Если барабан повернуть в положение I', то направление тока в якоря изменится и начнется пуск двигателя в противоположном направлении. В положении II' пуск продолжится, а в положении барабана III' двигатель выйдет на рабочий режим. Если пусковой реостат использовать в качестве регулировочного, применив в нем резисторы, рассчитанные на длительное протекание тока, то рассматриваемый контроллер можно использовать для регулирования частоты вращения двигателя.

Недостаток контроллера барабанного типа — ненадежность контактных соединений. Поэтому практическое применение получили командоконтроллеры кулачкового типа, в которых вместо скользящих контактов применен набор кулачковых элементов. На рис. 6.4 показано два кулачковых элемента, каждый из которых коммутирует свою электрическую цепь. На валу 1 контроллера расположены кулачковые диски 2, которые через ролики 7 воздействуют на подвижные контакты 3.

При определенном положении кулачковых дисков эти контакты замыкаются на неподвижные контакты 4, расположенные на изоляционном основании 5. Посредством пружины 6 обеспечивается необходимое усилие сжатия контактов. Пружина 8 прижимает рычаг с роликом 7 к кулачкам, обеспечивая замыкание или размыкание контактов в строгом соответствии с формой и положением кулачковых дисков 2. Кулачковые диски командоконтролле-

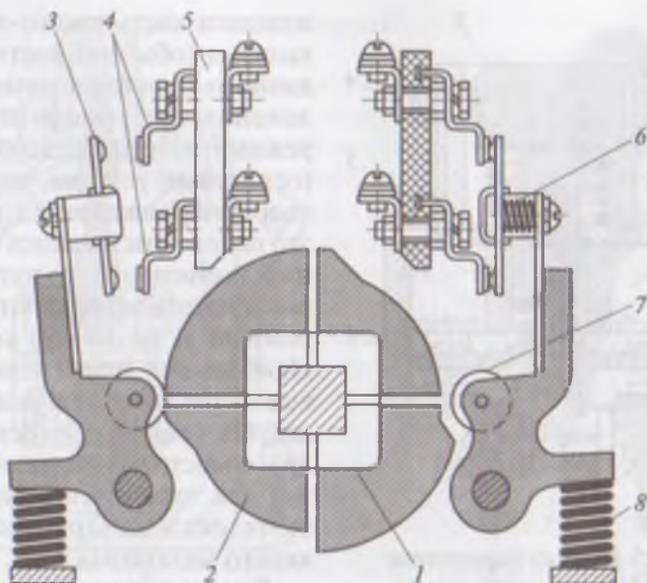


Рис. 6.4. Кулачковые элементы командоконтроллера:

1 — вал; 2 — кулачковый диск; 3 — подвижный контакт; 4 — неподвижный контакт; 5 — изоляционная пластина неподвижных контактов; 6 — пружина; 7 — ролик; 8 — пружина для прижатия ролика к кулачковому диску

ров можно настроить на требуемую последовательность команд и таким образом задать необходимую программу работы электропривода. Число коммутируемых цепей в командоконтроллере может достигать 12.

Кнопки управления применяют в цепях управления электроприводами для включения электромагнитных и других устройств. Кнопки обычно имеют одну или две пары контактов. Управление кнопкой осуществляется нажатием на толкатель, который, совершая поступательное движение, замыкает или размыкает контакты (рис. 6.5). Кнопки бывают с самовозвратом толкателя или без самовозврата. В последнем случае возврат толкателя кнопки возможен либо его вытягиванием, либо повторным его нажатием. Способ воздействия на толкатель кнопки влияет на ее размеры и расположение. Например, ножные кнопки находятся на полу, ладонные и пальцевые — на панели или в другом удобном и безопасном месте.

Несколько кнопок, собранных в одном корпусе, образуют кнопочный пост управления («кнопочная станция»). Такие кнопочные посты устанавливают на диспетчерском пульте для дистанционного управления электроприводом.

Путевые переключатели (выключатели) — это контактные устройства, переключающие электрические цепи, когда дви-

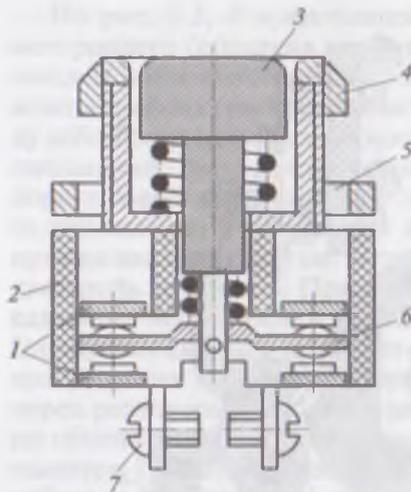


Рис. 6.5. Кнопка управления:

1 — контакты неподвижные; 2 — корпус; 3 — толкатель; 4 и 5 — гайки крепления кнопки; 6 — контакты подвижные; 7 — винтовые зажимы

штокового путевого выключателя типа ВК. При воздействии объекта на шток 1 подвижные контакты 3, перемещаясь вниз, размыкают одну пару неподвижных контактов (верхнюю) и замыкают другую пару контактов (нижнюю). Когда шток освобождается от механического воздействия объекта, подвижные контакты под действием пружины 2 возвращаются в исходное положение.

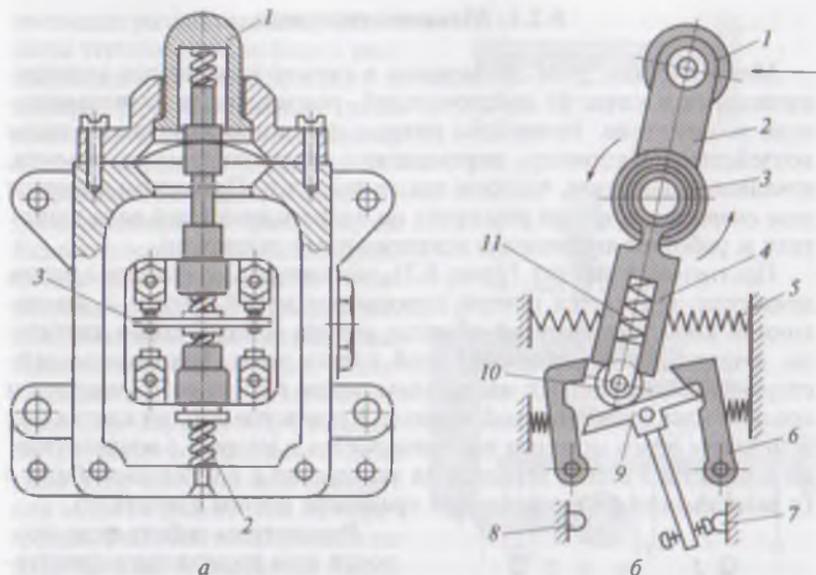
Основной недостаток путевого выключателя штокового типа — скорость перемещения контактов зависит от скорости перемещения контролируемого объекта, механически воздействующего на шток. Поэтому при малой скорости контакты размыкаются медленно, что приводит к возникновению электрической дуги на размыкающихся контактах и их быстрому разрушению.

Этот недостаток устранен у путевых выключателей *рычажного* типа, имеющих контактный механизм моментного действия, скорость срабатывания которого не зависит от скорости перемещения объекта (рис. 6.6, б). При нажатии на ролик 1 рычаг 2 поворачивается на оси и через систему спиральных пружин 3 поворачивает поводок 4. При этом ролик 10, сжимая пружину 11, перемещается по планке 9 вправо и нажимает на собачку 6, а пружины 5 перемещаются влево в свое исходное положение. В итоге подвижный контакт размыкается с контактом 7 и замыкается с контактом 8.

Существуют и другие разновидности путевых выключателей, например, *микрорелепереключатели*, применяемые для коммутации

жущаяся часть какого-либо механизма (объекта) достигнет заданного пространственного положения, требующего изменения режима работы электропривода (остановки, реверса, изменения скорости движения и т. п.). Если это положение является предельным (конечным), то путевой переключатель используют как аварийный и называют *конечным*. Наибольшее применение путевые переключатели получили в лифтах (этажные переключатели), в мостовых подъемных кранах для ограничения хода моста, тележки или грузозахватывающего механизма.

В зависимости от способа механического воздействия путевые выключатели подразделяют на штоковые и рычажные. На рис. 6.6, а показано устройство



6.6. Путьевые переключатели штокового (а) и рычажного (б) типов

цепей управления напряжением до 380 В при токе до 3 А. Они выполняются в пластмассовом корпусе и имеют минимальные размеры, что облегчает их установку. Шток микропереключателя имеет вид небольшой кнопки, ход которой не превышает 1 мм.

6.2. Реле управления

Реле являются наиболее распространенными элементами, применяемыми в цепях управления электроприводами для выполнения функций управления и защиты. Принцип действия любого реле состоит в том, что при внешнем воздействии реле дискретно (скачкообразно) переходит из одного устойчивого состояния в другое, при этом исполнительный орган реле — контактная группа — замыкает, размыкает или переключает электрические контакты.

Физическое воздействие, на которое реагирует (срабатывает) реле, определяет принцип действия и название реле. Наибольшее применение в управляющих цепях электропривода получили реле: *механические*, реагирующие на механическую силу; *тепловые*, реагирующие на температуру нагрева какого-либо объекта; *электромагнитные*, реагирующие на магнитное поле, создаваемое электрическим током, проходящим по катушке (обмотке) реле.

6.2.1. Механические реле

Механические реле применяют в схемах управления электроприводами в качестве выключателей, реагирующих на механическое воздействие. Возможны разные причины, вызвавшие такое воздействие. Например, перемещение контролируемого объекта, изменение давления, частоты вращения и т.п. Примером является *реле скорости*, которое реагирует на частоту вращения вала двигателя и работает аналогично асинхронному двигателю.

Постоянный магнит 1 (рис. 6.7), вал которого соединен с валом двигателя, вращается внутри короткозамкнутой клетки 2, аналогичной короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя, и индуцирует в стержнях этой клетки токи. Токи взаимодействуют с вращающимся магнитным полем постоянного магнита и создают электромагнитный момент. Короткозамкнутая клетка под действием этого момента поворачивается и упором 6 воздействует на контакты 5 или 7, вызывая их замыкание с контактами 4 или 8 (в зависимости от направления вращения ротора двигателя).

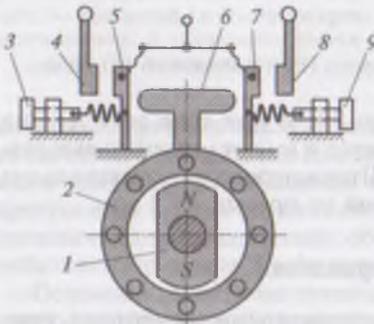


Рис. 6.7. Механическое реле скорости

Рассмотрим работу реле скорости при торможении двигателя противовключением (см. 3.3). При торможении двигателя частота вращения постоянного магнита 1 уменьшается и при достижении значения, равного 5—10% от номинальной частоты вращения двигателя, электромагнитный момент, действующий на подвижную часть реле скорости, уменьшается до значения, при котором замкнутая пара контактов под действием пружин, соединенных с винтами 3 или 9, размыкается. При этом процесс

торможения прекращается, исключая возможность реверсирования двигателя. Частоту вращения, при которой срабатывает реле, можно устанавливать посредством регулировочных винтов пружин 3 и 9.

К механическим реле можно также отнести и путевые выключатели (см. 6.1).

6.2.2. Тепловые реле

Принцип работы теплового реле основан на тепловом действии электрического тока. В качестве чувствительного элемента такого реле обычно применяют биметаллическую пластину, состоящую из двух сваренных друг с другом полос разных сплавов,

имеющих различные коэффициенты теплового линейного расширения (например, сталь и инвар). При нагревании такая пластина изгибается в сторону



полосы металла с меньшим коэффициентом теплового линейного расширения (рис. 6.8, а). Если тепловое реле используется для защиты двигателя от перегрева чрезмерно большим током, то применяют нагреватель, выполненный проводом, намотанным на биметаллическую пластину. На рис. 6.8, б показано устройство теплового реле типа РТ, которое используют для защиты двигателей от перегрузки. Рабочий ток, проходя по нагревателю 1, нагревает биметаллическую пластину 2, вызывая ее изгиб. Пластина 2 опирается на винт 3 защелки 4, которая удерживает скобу 5, не позволяя ей повернуться под действием пружины 6 против часовой стрелки. Однако при превышении током допустимого значения изгиб биметаллической пластины 2 оказывается настолько значительным, что защелка 4 опускается вниз и освобождает скобу 5, которая, повернувшись против часовой стрелки, поднимает подвижной контакт 8 относительно неподвижного контакта 9, размыкая электрическую цепь катушки контактора или магнитного пускателя (см. 6.4). В результате двигатель будет отключен от сети. Через 1—1,5 мин биметаллическая пластина остынет и вернется в свое прежнее состояние. Для возврата скобы 5 в исходное положение, при котором контакты реле вновь окажутся замкнутыми, следует нажать на кнопку 7.

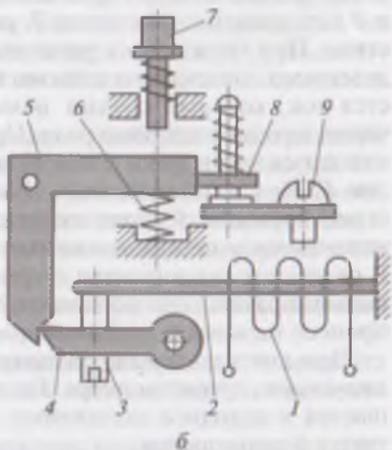


Рис. 6.8. Тепловое реле типа РТ

6.2.3. Электромагнитные реле

Электромагнитные реле составляют наиболее многочисленную группу приборов, применяемых для коммутации устройств управления электроприводом. Электромагнитные реле являются устройствами *дистанционного управления*, так как ими можно управлять, находясь от них на значительном расстоянии, путем подачи в их катушку электрического сигнала (напряжения).

Рассмотрим принцип действия электромагнитного контактного реле управления (рис. 6.9). Такое реле представляет собой сочетание электромагнита и контактной группы. Электромагнит состоит из катушки 2, сердечника 1 с подвижной частью, называемой якорем 3. Якорь 3 и полюс сердечника 1 разделены воздушным зазором δ . Контактная группа состоит из неподвижных контактов 6 и 8 и подвижных контактов 7, расположенных на контактном мостике. При подаче электрического сигнала (напряжения) U определенного значения на клеммы катушки 2 в этой катушке появляется ток, который создает намагничивающую силу Iw , где w — число витков в катушке реле. При этом в магнитной системе реле наводится магнитный поток Φ и на якоре появляется тяговое усилие F . Под действием силы F якорь 3, преодолевая противодействие пружины 9, притягивается к сердечнику, т.е. происходит механическое перемещение якоря 3 на размер воздушного зазора δ . В результате поднимается стержень с подвижными контактами 7, вызывая замыкание контактов 6 и 7 и размыкание контактов 7 и 8. Этот процесс называют *срабатыванием* реле.

При снятии сигнала (напряжения) U с клемм катушки 2 реле *отпускает*, при этом якорь 3 под воздействием пружины 9 возвращается в исходное положение, контакты 8 замыкаются, а контакты 6 размыкаются.

Таким образом, реле может находиться в одном из двух устойчивых состояний: состояние «сработано», при наличии на клеммах катушки напряжения определенного уровня, и состояние «отпущено», когда напряжение на клеммах катушки реле отсутствует или его величина меньше установленного значения.

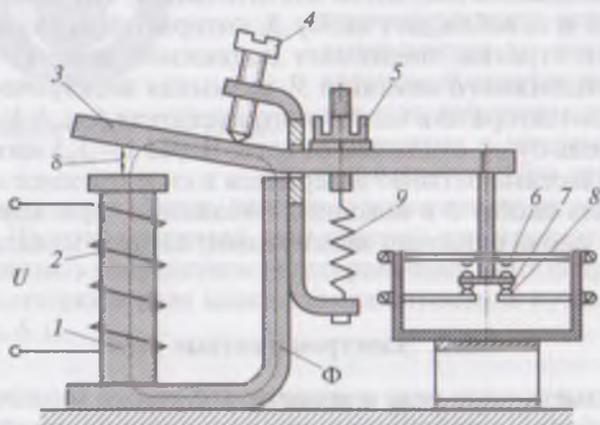


Рис. 6.9. Электромагнитное реле:

1 — сердечник; 2 — катушка; 3 — якорь; 4 — регулировочный винт; 5 — регулировочная гайка; 6 и 8 — неподвижные контакты; 7 — подвижные контакты; 9 — возвратная пружина

Электромагнитное реле характеризуется следующими параметрами.

Напряжение (ток) срабатывания реле — наименьшее значение напряжения на клеммах катушки или наименьшее значение тока в ней, при которых якорь надежно притягивается к сердечнику, а контакты переходят из разомкнутого состояния в замкнутое, и наоборот. В паспорте реле указано номинальное напряжение, на которое рассчитано включение катушки, несколько превышающее напряжение срабатывания. Этим обеспечивается надежность срабатывания реле.

Напряжение (ток) отпускания реле — наибольшее напряжение на клеммах катушки или наибольший ток в ней, при которых тяговое усилие, действующее на якорь, уменьшается до значения, необходимого для надежного отпадания якоря от сердечника, а контакты переходят из замкнутого состояния в разомкнутое, и наоборот.

Коэффициент возврата реле — отношение напряжения (тока) отпускания к напряжению (току) срабатывания.

Время срабатывания реле — промежуток времени с момента подачи напряжения срабатывания на катушку реле до момента переключения его контактов.

Время отпускания реле — промежуток времени с момента снятия напряжения с катушки реле до момента возвращения контактов в исходное положение.

Уставка реле — величина напряжения или тока, на которые отрегулировано реле и при которых оно срабатывает или отпускает.

По времени срабатывания $t_{ср}$ или времени отпускания $t_{отп}$ реле подразделяют на быстродействующие ($t_{ср} < 50$ мс) и нормальные ($t_{ср} = 50 + 250$ мс). Для получения времени срабатывания или отпускания больше 250 мс применяют специальные реле, называемые *реле времени*.

Регулируемыми элементами реле являются винт 4 и гайка 5. Так, при затяжке пружины 9 гайкой 5 увеличивается усилие, противодействующее повороту якоря при срабатывании реле, что ведет к повышению напряжения (тока) срабатывания. Таков же эффект и от увеличения воздушного зазора δ посредством винта 4.

В зависимости от рода тока, проходящего по катушке реле, последние подразделяют на реле постоянного и переменного тока. В реле *постоянного тока* сердечник и якорь изготовляют из полосы электротехнической стали сплошного сечения.

В реле *переменного тока* в связи с изменением направления мгновенных значений тока при смене положительных полупериодов отрицательными сердечник электромагнита систематически перемагничивается и в нем возникают вихревые токи, вызывающие его нагревание. Для ослабления вихревых токов сердечники реле

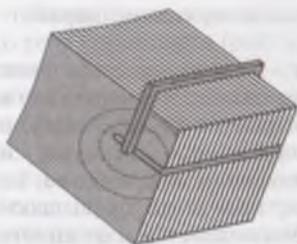


Рис. 6.10. Короткозамкнутый виток реле переменного тока

переменного тока делают *шихтованными*, т.е. набирают из тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга. Другой конструктивной особенностью реле переменного тока является наличие короткозамкнутого витка в торце сердечника (рис. 6.10), охватывающего $1/3$ площади торца. Этот виток, исполняя роль демпфера (успокоителя), позволяет избежать вибраций якоря, вызываемых нулевыми значениями переменного тока в катушке реле. В результате индуцирования в этом витке тока якорь в моменты нулевых значений тока в катушке реле удерживается притянутым к сердечнику.

Реле постоянного тока подразделяют на нейтральные и поляризованные. В *нейтральных* реле направление тока в катушке не влияет на процесс срабатывания реле. В *поляризованных* реле при одном направлении тока в катушке якорь притягивается к одной стороне сердечника и при этом срабатывают контакты одной группы, а при другом направлении тока в катушке якорь притягивается к другой стороне сердечника и при этом срабатывает другая группа контактов.

Надежность работы реле в основном определяется надежностью контактов, которые предназначены для коммутации электрических цепей и должны без вибрации и с требуемым усилием сжатия замыкать электрические цепи определенной мощности без оплавления и подгорания, обеспечивая тем самым малое переходное сопротивление.

Контакты реле управления обычно укрепляются на упругих плоских пластинах, чем достигается смягчение ударов при замыкании контактов (рис. 6.11).

Применяют также мостиковый контактный узел, в котором размыкание цепи происходит на двух контактах (рис. 6.12). В более мощных реле, а также в контакторах и пускателях используют ры-

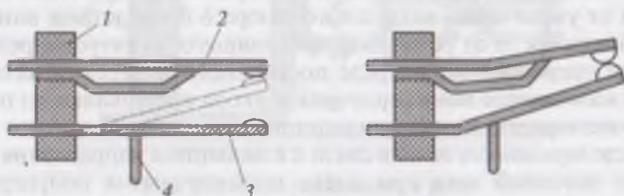


Рис 6.11. Рычажный контактный узел:

1 — основание; 2 — неподвижный контакт; 3 — подвижный контакт; 4 — упор

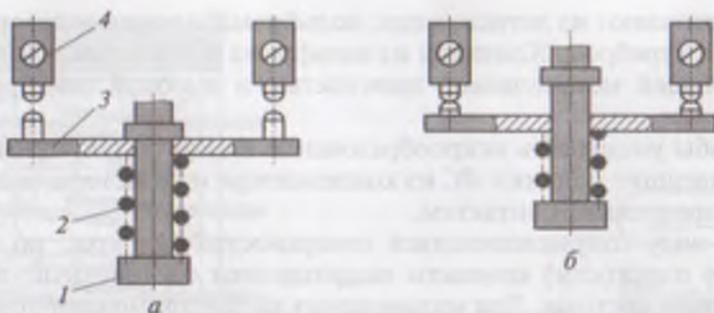


Рис. 6.12. Мостиковый контактный узел:

a — разомкнутый; *b* — замкнутый; 1 — упор; 2 — пружина сжатия контактов; 3 — мостик с подвижными контактами; 4 — неподвижные контакты

чажный контактный узел с шарнирным креплением подвижного контакта (рис. 6.13). При замыкании подвижный контакт этого узла перекачивается по неподвижному, что способствует очищению контактных поверхностей от оксидных пленок.

Надежность контактов зависит от материалов, из которых они изготовлены. Для контактов обычно применяют материалы, обладающие достаточной механической прочностью, высокой температурой плавления, электропроводностью. Контакты реле малой мощности изготавливают из серебра, платины, золота, платино-иридиевого и других сплавов. Эти материалы создают малое переходное сопротивление контакта. Контакты реле большей мощнос-

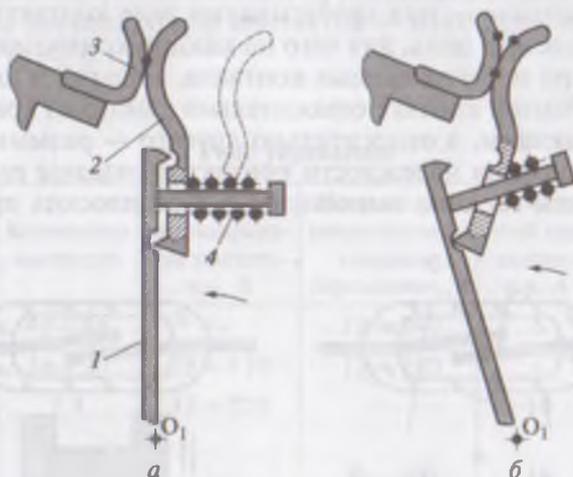


Рис. 6.13. Рычажный контактный узел с перекачивающимися контактами:

a — разомкнутый; *b* — замкнутый; 1 — рычаг; 2 — подвижный контакт; 3 — неподвижный контакт; 4 — пружина; O_1 — ось поворота рычага

ти изготавливают из латуни, меди, вольфрама, а также сплавов вольфрама с серебром. Контакты из вольфрама и его сплавов обладают наибольшей механической прочностью и высокой температурой плавления.

Чтобы уменьшить искрообразование на контактах, применяют искрогасящие цепочки RC из конденсатора и резистора, включаемые параллельно контактам.

По виду соприкасающихся поверхностей (в точке, по линии или по плоскости) контакты подразделяют на точечные, линейные и плоскостные. Для маломощных цепей применяют точечные контакты, которые обеспечивают очищение контактов от пленки оксидов на контактных поверхностях, а также равномерный износ контактов. Наиболее тяжелым режимом работы контактов является размыкание цепей постоянного тока (особенно большой мощности), так как при этом на контактах возникает и поддерживается некоторое время электрическая дуга. При размыкании цепей переменного тока дуга на контактах гаснет намного быстрее, так как в течение каждого периода переменный ток дважды проходит через нулевые значения. Поэтому с помощью одних и тех же контактов можно разрывать цепи переменного тока с мощностью, в 3 — 4 раза превышающей мощность цепей постоянного тока.

По своему назначению контакты реле подразделяют на:

замыкающие (включающие) — при срабатывании реле контакты замыкаются, а при отпущенном состоянии реле они разомкнуты;

размыкающие (выключающие) — при срабатывании реле контакты размыкаются, а при отпущенном состоянии реле они замкнуты;

переключающие — при срабатывании реле контакты переключают управляемую цепь, для чего на каждой коммутируемой цепи находятся три переключаемых контакта, средний и два крайних; при этом средний контакт относительно одного из крайних является замыкающим, а относительно другого — размыкающим.

Для повышения надежности контактов созданы *реле на герконах*. Контакты геркона выполнены в виде плоских пружинящих

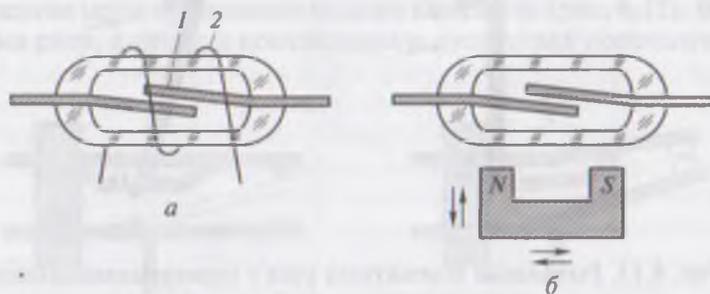


Рис. 6.14. Герконовое реле:

1 — контакты; 2 — обмотка

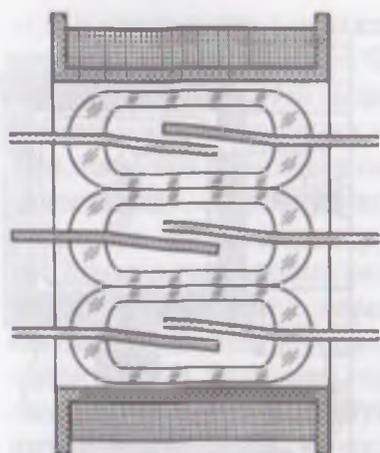


Рис. 6.15. Многоконтактное герконовое реле

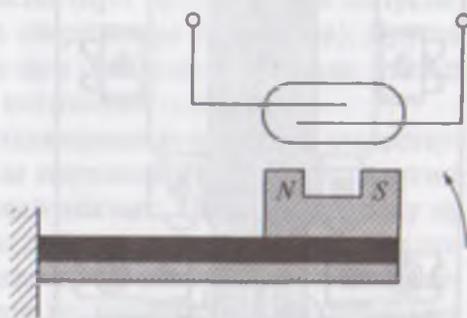


Рис. 6.16. Термореле на герконах

пластин (полос) из сплава пермаллой, обладающего высокой магнитной проницаемостью, запаянных в герметичную стеклянную колбу (рис. 6.14, а). Если геркон поместить вблизи постоянного магнита или внутрь катушки с током, то магнитный поток, проходя по контактам (пластинам) геркона, вызовет их смыкание так, чтобы магнитное сопротивление этому потоку было минимальным. В итоге герконовое реле сработает. При отключении катушки или удалении постоянного магнита контакты геркона, благодаря своей упругости, разомкнутся, т.е. реле отпустит (рис. 6.14, б). Если в катушку поместить несколько герконов, то получим реле на несколько пар контактов — многоконтактное герконовое реле (рис. 6.15).

Таблица 6.1

Реле управления

Тип реле управления	Количество контактов	Номинальное напряжение постоянное, В	Номинальное напряжение на контактах переменное, В	Длительный ток контактов, А	Допустимая частота срабатываний в час
ПЭ-20	4р + 4з	—	12—240	5	—
ПЭ-23	3р + 3з	12—110	12—240	4	3000
РП-41, РП-42	8,4	12—220	—	10	—
ЭП-41В	3—6	—	36—500	16	1200
РПМ-0	4—12	—	12—500	12	2000
МКУ-48с	2—6	12—220	24—380	5	3600

Примечание. р — размыкающие, з — замыкающие.

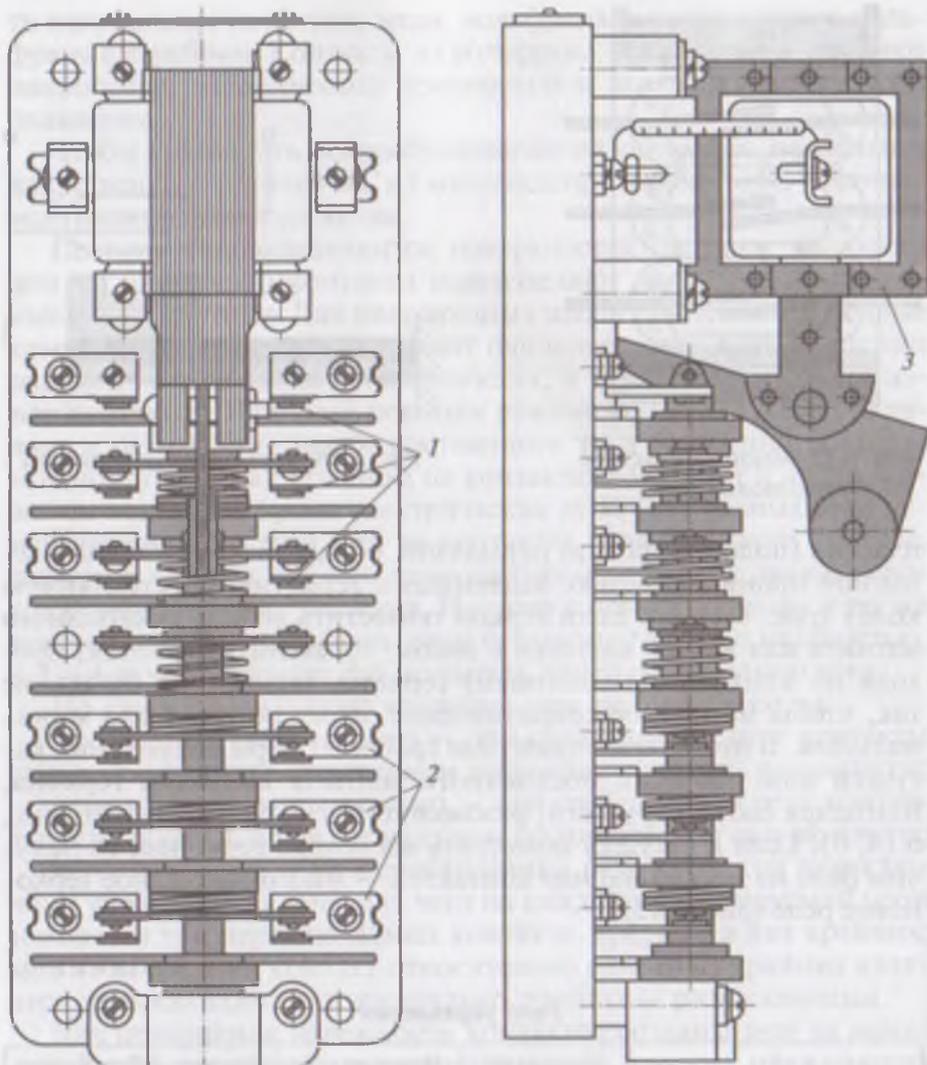
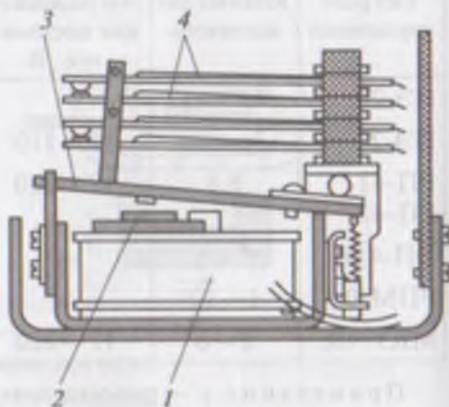


Рис. 6.17. Промежуточное реле
ЭП-41:

1 — нормально разомкнутые блок-контакты; 2 — нормально замкнутые блок-контакты; 3 — электромагнит со втягивающимся сердечником

Рис. 6.18. Малогабаритное реле
МКУ-48:

1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — якорь;
4 — контакты



По сравнению с обычными электромагнитными реле герконовые реле имеют высокое быстродействие и более надежную работу контактов. Основной недостаток герконовых реле — малая допустимая токовая нагрузка на контакты (при превышении допустимой нагрузки возникает опасность сваривания контактов). Другой недостаток — «дребезг» контактов при срабатывании реле, т. е. их вибрация, вызванная упругостью контактов геркона.

Помимо герконовых реле с замыкающими контактами существуют герконовые реле с *размыкающими контактами*. Такое реле кроме катушки включает в себя постоянный магнит. Пока на катушку не подан сигнал, контакты геркона под действием магнитного поля постоянного магнита замкнуты. С появлением сигнала в катушке магнитное поле катушки накладывается на поле магнита и ослабляет его, при этом силами упругости контакты размыкаются. С прекращением действия сигнала в катушке магнитное поле постоянного магнита восстанавливается и контакты вновь замыкаются. Герконы изготовляют на ток до 2 А напряжением до 300 В. Применение герконов возможно в путевых выключателях. В этом случае на контролируемом объекте должен быть помещен постоянный магнит, при приближении которого к геркону контакты последнего срабатывают. Герконы применяют и в тепловых реле. В этом случае постоянный магнит помещают на биметаллической пластине, которая при нагревании изгибается в сторону геркона, и его контакты замыкаются (рис. 6.16).

В табл. 6.1 приведены данные некоторых часто применяемых электромагнитных реле управления. Реле типов РП-41, РП-42 и ЭП-41 (рис. 6.17) называют *промежуточными*, так как их обычно применяют для размножения сигналов управления, т. е. для увеличения числа контактов, если количество контактов какого-либо реле в схеме управления недостаточно или допустимый ток на его контактах слишком мал. Контакты реле ЭП-41 мостикового типа рассчитаны на ток до 16 А, поэтому его можно использовать непосредственно для включения двигателей небольшой мощности (до 0,6 кВт). Реле типа МКУ-48 (рис. 6.18) является малогабаритным чувствительным реле с малым потреблением мощности (ток до 5 мА при напряжении 220 В).

6.3. Реле времени

Реле времени (реле замедления) предназначено для создания временной задержки при воздействии одного элемента схемы управления на другой. Время от момента подачи управляющего сигнала на катушку реле до момента срабатывания реле называют *выдержкой времени реле при срабатывании*, а время от момента снятия управляющего сигнала до момента времени отпускания реле — *выдержкой времени реле при отпуске*.

Наиболее простым средством получения замедления при срабатывании и отпуске реле является применение в реле постоянного тока конденсатора, включенного параллельно катушке этого реле. При подаче напряжения на катушку происходит заряд конденсатора и лишь после этого реле срабатывает. При снятии напряжения с катушки наступает разряд конденсатора, за счет чего отпущение реле задерживается и оно происходит, лишь когда напряжение на клеммах катушки станет меньше напряжения отпущения. Однако получаемые при этом замедления невелики.

Величина выдержки зависит от способа ее получения. Исходя из этого, реле времени разделяют на реле, название которых указывает на способ получения замедления: с электромагнитным замедлением, пневматическое, с анкерным механизмом, моторное и др.

Реле времени с электромагнитным замедлением. Электромагнитное замедление основано на применении демпфера — элемента, замедляющего электромагнитные процессы. В качестве такого демпфера используют медную или алюминиевую гильзу 3 (кольцо), надетую на стержень магнитопровода 2 (рис. 6.19) или непосредственно на катушку реле. Выдержка времени в этом реле создается в процессе его отпущения. При отключении катушки 1 реле уменьшающийся магнитный поток Φ в магнитопроводе индуцирует в гильзе (демпфере) ЭДС.

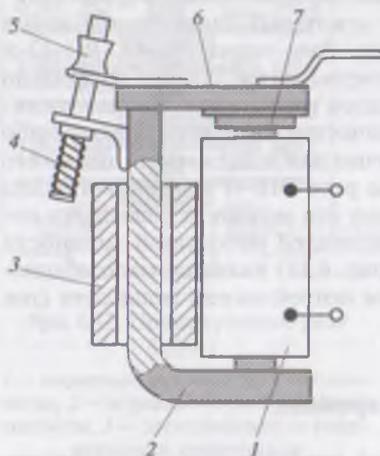


Рис. 6.19. Реле постоянного тока с электромагнитным замедлением:

1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — гильза; 4 — возвратная пружина; 5 — регулировочная гайка; 6 — якорь; 7 — прокладка немагнитная

Согласно правилу Ленца, ток в гильзе от этой ЭДС имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток направлен согласно с убывающим потоком Φ . Это замедляет убывание потока в магнитопроводе реле так, что он достигает величины, при которой реле отпускает за время большее, чем при отсутствии демпфера. Это иллюстрируется графиками убывания магнитного потока (рис. 6.20) при отсутствии демпфера (график 1) и при наличии демпфера (график 2). Сравнивая эти графики, видим, что время отпущения реле с демпфером $t_{отт2}$ больше времени отпущения этого реле без демпфера $t_{отт1}$.

Время отпущения реле (см. рис. 6.19) можно регулировать, изменяя толщину латунной (не-

магнитной) прокладки 7 на якоре б: с уменьшением толщины прокладки $t_{отп2}$ увеличивается. Объясняется это тем, что с сокращением немагнитного зазора δ (см. рис. 6.9) магнитное сопротивление потоку понижается и величина его возрастает, поэтому время на его уменьшение до значения $\Phi_{отп}$, при котором происходит отпускание реле, увеличивается. Еще одним средством регулирования $t_{отп}$ является изменение натяжения возвратной пружины 4 посредством гайки 5: чем меньше натяжение пружины, тем больше $t_{отп}$ (рис. 6.20, график 3).

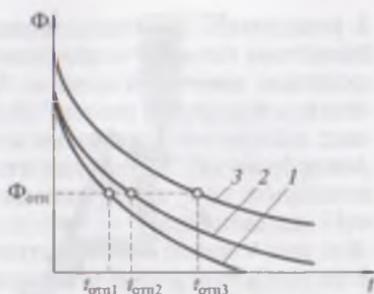


Рис. 6.20. Влияние демпфера на время отпускания реле

Электромагнитное замедление применяют только в реле постоянного тока. Поэтому если это реле используют в цепи переменного тока, то для питания катушки реле необходим выпрямитель.

Реле постоянного тока с электромагнитным замедлением типа РЭВ 810 имеет диапазон замедления от 0,25 до 3,8 с.

Реле времени пневматическое. В этом реле используют пневматический замедлитель в виде камеры, разделенной эластичной мембраной 4 (рис. 6.21). При подаче напряжения на катушку 2 якорь электромагнита втягивается в сердечник 1. При этом шток 10 под действием силы собственного веса и пружины 9 опускается. Но процесс этот происходит медленно, по мере заполнения верхней части пневматической камеры 8 воздухом через калибровочное дроссельное отверстие 6. Когда шток 6 опустится на якорь электромагнита, он своим рычагом 3 вызовет замыкание контактов 12. Таким образом произойдет замедление реле при срабатывании. При снятии напряжения с обмотки электромагнита якорь вместе со штоком 10 под действием возвратной пружины 11 поднимется, т. е. вернется в исходное положение. Этот процесс проходит быстро, благодаря открытию обратного клапана 7, так что воздух из камеры 8 будет выходить не только через отверстие 6, но и через отверстие обратного клапана 7.

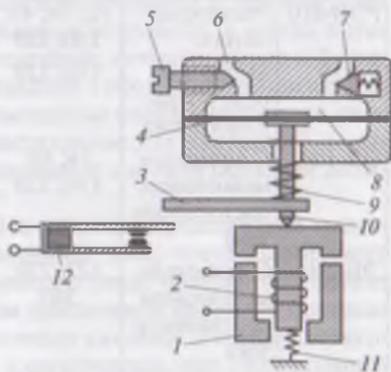


Рис. 6.21. Пневматическое реле времени

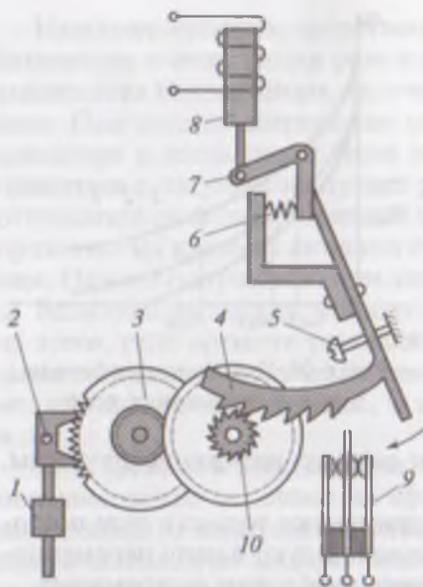


Рис. 6.22. Реле времени с анкерным механизмом

Уставка времени срабатывания пневматического реле выполняется посредством винта 5, путем изменения размера дроссельного отверстия 6: чем меньше отверстие, тем больше время срабатывания. Пневматическое реле времени типа РВП даст замедление до 3 мин.

Реле времени с анкерным (часовым) механизмом. При подаче напряжения на катушку электромагнита соленоидного типа сердечник 8 втягивается (рис. 6.22) и через рычаг 7 стремится переместить рейку с косыми зубьями 4 по часовой стрелке в направлении контактов 9. При этом пружина 6 сжимается. Рейка 4 своими зубьями зацеплена с храповым колесом 10, которое через систему зубчатых колес 3

Таблица 6.2

Реле времени

Тип	Замедление	Напряжение, В	Диапазон выдержки времени, с	Количество контактов зам./разм.	Допустимый ток через контакты (длительный), А
РЭВ-810	Электромагнитное	12; 24; 48; 110; 220	0,25—3,8	1,2/1,2	10
Е-510	Моторное реле постоянного тока	110; 220	1—360	—/4	5
ЭВ-100	С анкерным механизмом постоянного тока	24; 48; 110; 220	0,1—20	1/—	3—5
ЭВ-200	С анкерным механизмом переменного тока	127; 220; 380	0,1—20	1/1	2,5
РВ-4	Моторное реле переменного тока	127; 220; 380	1—360	1/1	—

удерживается от быстрого перемещения анкерным механизмом 2. Скорость вращения шестерни 3 определяется частотой колебаний маятника 1, подвешенного к оси 2: за одно колебание маятника шестерня поворачивается на один зуб. Частота колебаний маятника зависит от положения груза 1: чем выше груз, тем меньше длина маятника и тем больше частота его колебаний. Таким образом, при поднятии груза 1 время прохождения рейки 4 до замыкания контактов сокращается, а при опускании — увеличивается. При снятии напряжения с обмотки электромагнита рейка 4 под действием пружины 6 возвращается в исходное положение. Этот процесс происходит без замедления, так как косые зубья рейки и храпового колеса этому не препятствуют. Таким образом, в реле времени с анкерным механизмом замедление происходит лишь при срабатывании. Уставка времени рассматриваемого реле выполняется перемещением груза 1 на маятнике и винтом 5, который определяет величину хода рейки 4.

При необходимости получить замедление в несколько минут применяют **моторное реле времени**. Основным элементом этого реле является электродвигатель, который через редуктор с большим передаточным отношением вращает сектор с шипом, воздействующим на контактную группу. В табл. 6.2 приведены технические данные некоторых типов реле времени.

6.4. Контакторы и магнитные пускатели

Контакторы — это электромагнитные устройства, предназначенные для дистанционного управления включением и отключением силовых электрических цепей. В электроприводе контакторы применяют для дистанционного управления включением и отключением двигателей либо других исполнительных устройств, в цепях которых проходят токи, измеряемые десятками, сотнями ампер и более.

В принципе контактор представляет собой электромагнитное реле, но отличается от него более мощным электромагнитом, способным создать тяговое усилие, достаточное для надежного замыкания контактной системы, рассчитанной на токи большой величины (до 2500 А).

Контакторы постоянного тока. На рис. 6.23 представлена конструктивная схема контактора постоянного тока, предназначенного для включения двигателей постоянного тока. Контактор состоит из электромагнита 1 с поворотным движением якоря 10 (клапанного типа) и катушки 2. При включении катушки 2 создается тяговое усилие и якорь притягивается к сердечнику, при этом возвратная пружина 12 сжимается, а контакты 5 и 7 замыкаются. Коммутируемый ток главной цепи 1 проходит через верхний провод (шину), дугогасительную катушку 4, неподвижный контакт 5,

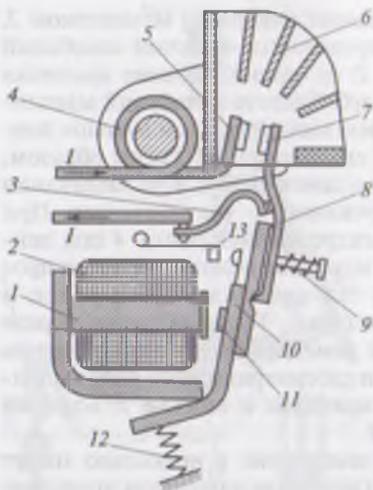


Рис. 6.23. Контактор постоянного тока

подвижный контакт 7, гибкую медную ленту («косичку») 3 и нижний провод (шину). Сила прижатия подвижного контакта 7, расположенного на рычаге 8, к неподвижному контакту 5 определяется упругостью пружины 9. Замыкание главных контактов 5 и 7 происходит с проскальзыванием и перекатыванием (см. рис. 6.13), что обеспечивает очистку их поверхностей от оксидов и нагара. Контактор имеет еще и блокировочные контакты 13, используемые в схеме управления контактором. Эти контакты рассчитаны на небольшие токи, поэтому они меньше главных контактов.

При отключении катушки 2 якорь 10 действием возвратной пружины 12 возвращается в исходное положение и контакты 5 и 7 размыкаются. Чтобы исключить «прилипание» якоря к сердечнику за счет магнитного потока остаточного магнетизма, на якоре имеется немагнитная (латунная) прокладка 11. При размыкании главных контактов между ними появляется электрическая дуга, которая возникает и поддерживается электродвижущей силой самоиндукции, возникающей в коммутируемых катушках двигателя. В этих условиях промежуток между контактами становится токопроводящим и прохождение тока в главной цепи при отключении контактора не прекращается. Электрическая дуга перегревает и оплавляет контактные поверхности главных контактов. Для гашения этой дуги в контакторе применяют дугогасительную камеру, назначение которой, во-первых, оградить от действия электрической дуги элементы контактора, расположенные вблизи главных контактов, а во-вторых, создать условия для быстрого гашения дуги.

Дугогасительную камеру изготавливают из асбестоцемента, материала, сочетающего электроизоляционные и термостойкие свойства. Во внутренней полости этой камеры имеются поперечные изоляционные перегородки 6. Между каждой парой изоляционных перегородок расположены несколько металлических перегородок. Эти перегородки разбивают дугу на ряд мелких дуг, что облегчает гашение дуги. Смещение дуги с поверхности размыкающихся контактов в верхнюю полость дугогасительной камеры обеспечивается магнитным «дутьем», создаваемым дугогасительной катушкой 4, по которой проходит ток главной цепи.

Контакты постоянного тока изготовляют одно- или двухполюсными; их магнитная система выполняется из магнитно-мягкой электротехнической стали сплошного сечения.

При выборе контактора постоянного тока необходимо, чтобы напряжение срабатывания контактора было не более 0,8 номинального напряжения сети U_c , а допускаемый ток на главных контактах — не меньше предельного значения рабочего тока двигателя либо другого устройства, коммутируемого этими контактами.

Контакты переменного тока. Контакты переменного тока изготовляют обычно с числом главных контактов не более трех; в некоторых типах контакторов их число увеличено до четырех или даже до пяти. Магнитную систему этих контакторов с целью уменьшения потерь от вихревых токов выполняют шихтованной из листовой электротехнической стали. Для получения достаточного усилия на якоре контакты переменного тока делают трехстержневыми, при этом на торцах крайних стержней (полюсов) расположены короткозамкнутые витки (см. рис. 6.11), предназначенные для устранения вибраций якоря при срабатывании контактора. На рис. 6.24 показана магнитная система контактора переменного тока клапанного типа.

При подаче на катушку 1 напряжения в магнитопроводе 2 наводится магнитный поток, якорь 3 действием тягового усилия притягивается к сердечнику и поворачивает валик привода главных и блокировочных подвижных контактов.

В связи с тем что тяговое усилие значительно, притяжение якоря сопровождается сильным ударом. Для предотвращения нежелательных последствий такого удара в некоторых конструкциях крепление контакторов выполняют на амортизационных пружинах.

Процесс гашения дуги на контактах в контакторах переменного тока облегчен. Объясняется это тем, что при нулевых значениях переменного тока дуга гаснет и при следующем полупериоде не возобновляется.

Контакты переменного тока небольшой мощности изготовляют с магнитной системой *прямоходового* типа с мостиковыми контактами (см. рис. 6.12), обеспечивающими двукратный

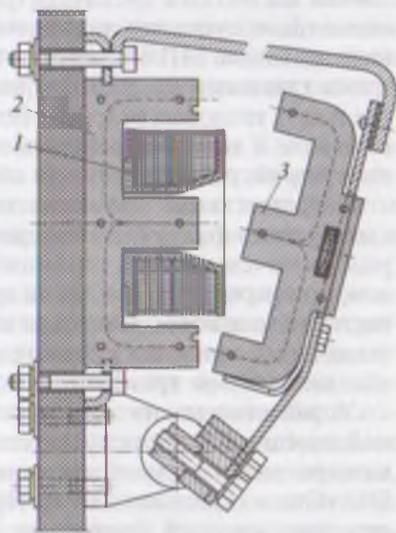


Рис. 6.24. Магнитная система контактора переменного тока клапанного типа

разрыв цепей главных контактов. Благодаря меньшей мощности и применению мостиковых контактов процесс гашения дуги на главных контактах при их размыкании облегчен, что позволяет не использовать в этом контакторе дугогасительные камеры. Габариты такого контактора существенно уменьшены.

Катушка контактора выполняется обмоточным проводом с большим числом витков, и ее полное сопротивление переменному току $Z = r + jx_L$ определяется не только активным r , но и индуктивным x_L сопротивлениями. В начальный момент включения контактора магнитная система электромагнита разделена воздушным зазором между полюсами и якорем, поэтому магнитный поток ослаблен и индуктивное сопротивление катушки сравнительно невелико. Этим объясняется значительный бросок тока в цепи катушки контактора при его включении. В следующий момент времени контактор срабатывает, магнитная система замыкается, и индуктивное сопротивление катушки возрастает. При этом ток в катушке снижается до установившегося значения. Изготавливают также контакторы переменного тока с катушками постоянного тока. Такие контакторы предназначены для применения в схемах управления постоянного тока, но их главные (силовые) контакты коммутируют цепи переменного тока.

Магнитные пускатели — это электромагнитные устройства для дистанционного управления и защиты от перегрузок трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. *Нереверсивный* магнитный пускатель (рис. 6.25, а) состоит из собственно магнитного пускателя и кнопочной станции. Собственно магнитный пускатель МП состоит из контактора переменного тока КМ с тремя главными (силовыми) контактами, от 1 до 5 блок-контактов и двух тепловых реле КК. Возможно применение одного теплового реле с двумя нагревательными элементами. Все перечисленные устройства размещены в общем корпусе.

Нагревательные элементы тепловых реле включены в линейные провода фаз последовательно, а размыкающие контакты этих реле включены в цепь питания катушки контактора. Таким образом, при перегрузке двигателя срабатывают тепловые реле, их контакты размыкаются и катушка контактора КМ оказывается отключенной. Это приводит к размыканию силовых контактов КМ в цепи обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя.

Управление магнитным пускателем осуществляется от кнопочной станции КС. Если пускатель *нереверсивный*, то управление пускателем ведется двумя кнопками: кнопка SB1 «Пуск» и кнопка SB2 «Стоп» (красного цвета). При нажатии на кнопку SB1 замыкается цепь катушки контактора КМ, который срабатывает и своими силовыми контактами подключает двигатель к питающей сети. Одновременно блок-контакт КМ шунтирует кнопку SB1. Поэтому при отпускании указанной кнопки цепь катушки контактора КМ

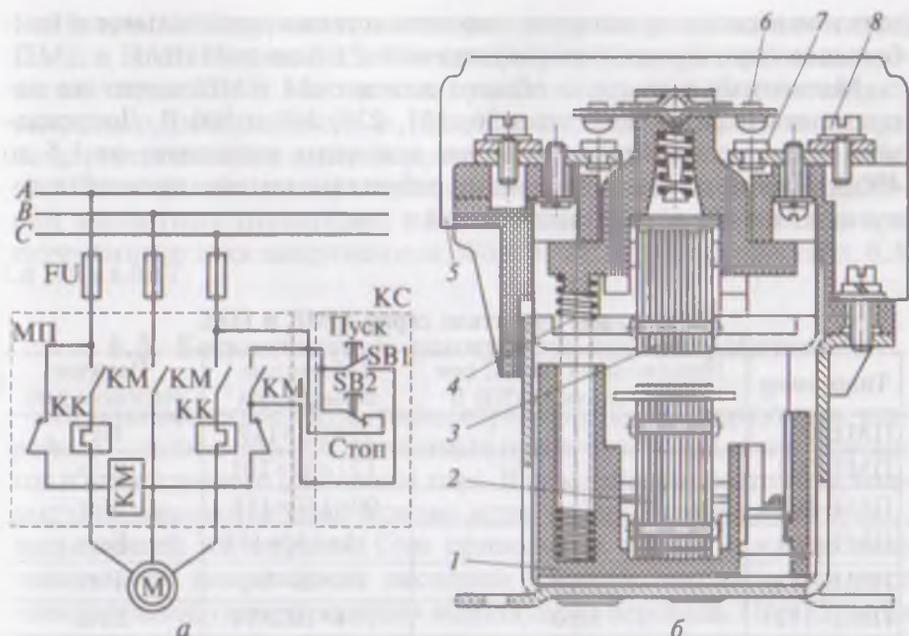


Рис. 6.25. Магнитный пускатель переменного тока:

1 — основание; 2 — сердечник; 3 — якорь; 4 — возвратная пружина; 5 — дугогасительная камера; 6 — главный подвижный контакт; 7 — главный неподвижный контакт; 8 — присоединительный зажим

не размыкается и двигатель остается включенным в сеть. Для остановки двигателя достаточно нажать кнопку SB2 «Стоп». При этом размыкается цепь катушки контактора KM и двигатель отключается от питающей сети.

Вследствие значительной тепловой инерции реле КК обеспечивают отключение двигателя лишь при перегрузках, но не защищают двигатель от короткого замыкания. Для этого вида защиты применяют группу плавких предохранителей FU, включенных в линейные провода питающей сети.

Если магнитный пускатель *реверсивный*, то он содержит два контактора переменного тока, включенные таким образом, что порядок следования фаз на их контактах разный. При этом в схеме включения этих контакторов имеется электрическая блокировка, исключающая их одновременное включение, что привело бы к короткому замыканию в питающей сети. В некоторых конструкциях реверсивных пускателей применена механическая блокировка, состоящая из системы рычагов, блокирующих главные контакты одного из контакторов, если включен другой. Если пускатель *реверсивный*, то управление ведется тремя кнопками: «Вперед», «Назад» и «Стоп». При выборе контакторов и пускателей учитывают номинальное напряжение катушки, которое должно соответство-

вать номинальному напряжению сети, а также номинальное и наибольшее (при пуске, реверсе) значения токов двигателя.

Магнитные пускатели общего назначения изготавливают на напряжения переменного тока 36, 127, 220, 380 и 500 В. Допускаемое значение тока через силовые контакты составляет от 1,5 до 400 А. При номинальном режиме работы магнитные пускатели допускают от 150 до 1200 включений в час.

Таблица 6.3

Магнитные пускатели серий ПМЕ и ПАЕ

Типоразмер	Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
ПМЕ-001	3/1,5	75×65×119	Нет
ПМЕ-002	3/1,5	121×83×101	Есть
ПМЕ-003	3/1,5	90×150×118	Нет
ПМЕ-004	3/1,5	135×150×118	Есть
ПМЕ-111	10/6	68×85×84	Нет
ПМЕ-112	10/6	154×102×91	Есть
ПМЕ-113	10/6	164×90×106	Нет
ПМЕ-114*	10/6	232×90×107	Есть
ПМЕ-211	25/14	102×90×118	Нет
ПМЕ-212	25/14	195×98×126	Есть
ПМЕ-213	25/14	130×205×155	Нет
ПМЕ-214*	25/14	180×205×155	Есть
ПАЕ-311	40/21	214×114×144	Нет
ПАЕ-312	40/21	275×114×121	Есть
ПАЕ-313	40/21	214×239×114	Нет
ПАЕ-314*	40/21	264×239×121	Есть
ПАЕ-411	63/35	290×183×135	Нет
ПАЕ-412	63/35	290×183×135	Есть
ПАЕ-413	63/35	275×343×135	Нет
ПАЕ-414*	63/35	275×343×135	Есть
ПАЕ-511	110/61	335×200×156	Нет
ПАЕ-512	110/61	335×200×156	Есть
ПАЕ-513	110/61	320×338×170	Нет
ПАЕ-514*	110/61	320×338×170	Есть
ПАЕ-611	146/80	380×230×190	Нет
ПАЕ-612	146/80	380×230×190	Есть
ПАЕ-613	146/80	385×435×190	Нет
ПАЕ-614*	146/80	385×435×190	Есть

* Реверсивные.

Получили широкое применение магнитные пускатели серий ПМЕ и ПАЕ. На рис. 6.25, б показано устройство магнитного пускателя серии ПМЕ. Магнитные пускатели этих серий изготавливают открытого, защищенного и пылевлагодонепроницаемого исполнения; реверсивными и нереверсивными; с тепловой защитой и без нее. Технические данные некоторых типоразмеров указанных серий магнитных пускателей, рассчитанных для включения в сеть переменного тока напряжением 380 и 500 В, приведены в табл. 6.3.

6.5. Бесконтактные коммутирующие устройства

Основной недостаток рассмотренных коммутирующих устройств — контакторов и магнитных пускателей — наличие контактов в цепи главного (силового) тока. В разомкнутом состоянии контакты подвергаются химическому воздействию окружающей среды, вызывающей их *коррозию*. Это приводит к тому, что контактные поверхности покрываются оксидной пленкой, что вызывает рост электрического сопротивления контактного перехода. Процессы на контактах при их размыкании, сопровождаемые появлением искр и электрических дуг, приводят к *эрозии* контактов, т.е. их разрушению. Применение дугогасительных устройств и специальных схем лишь ослабляет процесс эрозии, но не устраняет его. Все это снижает надежность контактных коммутирующих устройств, а следовательно, и надежность электроприводов, в которых эти устройства применены. Стремление избавиться от перечисленных недостатков привело к созданию бесконтактных коммутирующих устройств.

Основными элементами бесконтактных коммутирующих устройств являются управляемые силовые полупроводниковые приборы, в качестве которых обычно применяют тиристоры, реже — транзисторы в ключевых режимах.

На рис. 6.26 представлена принципиальная электрическая схема однофазного тиристорного контактора переменного тока. Для пуска контактора необходимо включить в сеть катушку реле КМ. Через контакты этого реле резисторы R_1 , R_2 и диоды VD_1 , VD_2 будут поданы сигналы в цепи управления тиристорами VS_1 и VS_2 . При положительной полуволне синусоидального напряжения (плюс на клемме 1 и минус на клемме 2) на анод тиристора VS_1 будет подан

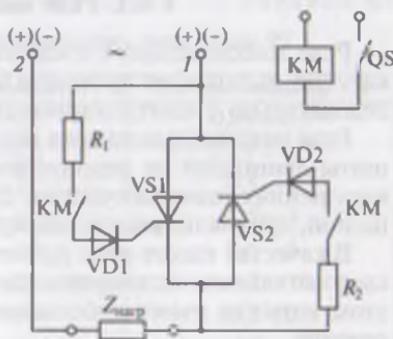


Рис. 6.26. Принципиальная электрическая схема тиристорного контактора

положительный потенциал, а на анод тиристора VS2 — отрицательный потенциал. При этом откроется тиристор VS1 и в нагрузке $Z_{нагр}$ появится ток положительной полуволны (тиристор VS2 останется закрытым). Затем последует отрицательная полуволна переменного напряжения (плюс на клемме 2 и минус на клемме 1), при которой закроется тиристор VS1 и откроется тиристор VS2, через который пройдет ток нагрузки отрицательной полуволны. Для того чтобы отключить нагрузку $Z_{нагр}$, следует выключить катушку реле КМ, при этом прекратится подача сигналов на управляющие электроды тиристоров и они окажутся запертыми.

Промышленность выпускает тиристорные контакторы на номинальное напряжение 380 В типа ТКЕО-250/380 на номинальный ток 250 А и типа ТКЕП-100/380 на ток 100 А. Изготавливают также тиристорные пускатели серии ПТ на напряжение 380 В и номинальный ток 16 и 40 А.

Следует иметь в виду, что в закрытом состоянии тиристоров цепь тока нагрузки не размыкается (как это имеет место в обычных контакторах) и по этой цепи проходит ток закрытого состояния тиристора, который обычно не превышает 10 мА. На работу потребителя такой ток не оказывает влияния, но это имеет значение для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала.

6.6. Устройства защиты

К устройствам защиты двигателей и других элементов электропривода относятся: реле максимального тока, реле напряжения, автоматические выключатели, тепловые реле и плавкие предохранители.

6.6.1. Реле максимального тока

Реле максимального тока реагирует на силу тока, поэтому его катушку выполняют проводом большого сечения и включают последовательно с контролируемым устройством.

Реле максимального тока используют в электроприводах для защиты двигателей от недопустимых перегрузок, возникающих при нарушениях технологического процесса, реализуемого рабочей машиной, при заклинивании движущихся частей этого механизма и т. п.

В качестве такого реле применяют электромагнитное реле с последовательным включением катушки в контролируемую цепь. При этом катушка имеет небольшое число витков провода большого сечения.

Рассмотрим конструкцию реле максимального тока серии РТ (рис. 6.27), применяемого в цепях переменного тока для защиты асинхронных двигателей от перегрузки. Катушка реле 5 состоит из

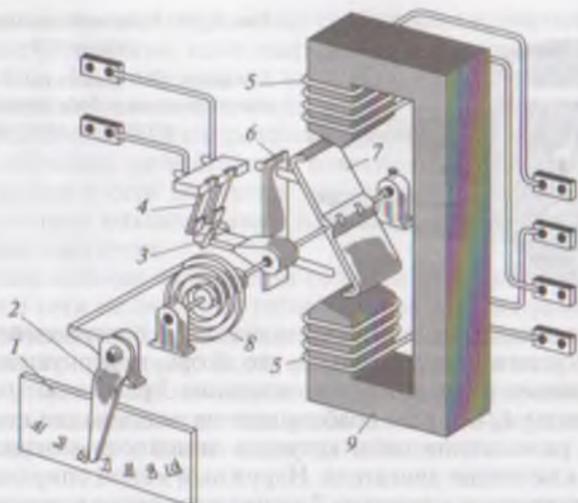


Рис. 6.27. Реле максимального тока серии РТ

двух одинаковых частей, каждая из которых располагается на своем полюсе шихтованного сердечника 9. Якорь 7 выполнен в виде тонкой стальной пластины, что обеспечивает реле повышенную чувствительность.

При прохождении тока по катушкам 5 якорь 7, закрепленный на оси, поворачивается по часовой стрелке и стремится занять положение, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению межполюсного промежутка. При этом он преодолевает механическое противодействие спиральной пружины 8. При токе,

Таблица 6.4

Технические данные реле максимального тока серии РТ

Типоразмер	Пределы уставок, А	Ток срабатывания*, А
РТ 40/0,2	0,05—0,2	0,05—0,1
РТ 40/0,6	0,15—0,6	0,15—0,3
РТ 40/2	0,5—2	0,5—1
РТ 40/6	1,5—6	1,5—3
РТ 40/10	2,5—10	2,5—5
РТ 40/20	5—20	5—10
РТ 40/50	12,5—50	12,5—25
РТ 40/100	25—100	25—50
РТ 40/200	50—200	50—100

* При последовательном соединении катушек.

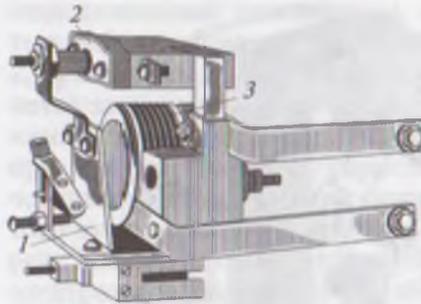


Рис. 6.28. Реле максимального тока серии РЭ:

1 — якорь; 2 — контакты; 3 — катушка, намотанная «на ребро» проводом прямоугоньного сечения

достигшем предельно допустимого значения, противодействие пружины преодолевается настолько, что якорь, повернувшись вместе с осью, своими подвижными контактами 3 размыкает неподвижные контакты 4, т.е. реле срабатывает на размыкание контактов и вызывает размыкание цепи катушки линейного контактора, что ведет к отключению двигателя. Наружный конец спиральной пружины 8 прикреплен к поводку 2, меняя положение которого, можно изменять уставку реле на разные значения тока срабатывания по шкале 1. Например, реле типа РТ 40/100 имеет диапазон уставок от 25 до 100 А при параллельном соединении частей 5 катушки реле (табл. 6.4) или 12,5 до 50 А при последовательном соединении этих частей катушки.

Положения якоря 7 ограничиваются штырями пластины 6.

В цепях постоянного тока применяют реле максимального тока серии РЭ (рис. 6.28).

При определении величины тока уставки реле необходимо учитывать наибольшее значение тока переходного процесса двигателя (пуск, реверс и т.п.) так, чтобы при указанных операциях реле не срабатывало. Например, уставка для реле максимального тока при защите асинхронного двигателя:

$$I_{y,т} \approx (1,3+1,5)I_{пер}. \quad (6.1)$$

Для двигателей постоянного тока

$$I_{y,т} \approx (1,5+2,0)I_{пер}, \quad (6.2)$$

но эта уставка не должна превышать значения тока, допустимого по условиям коммутации.

6.6.2. Реле напряжения

Реле напряжения реагируют на значения напряжения сети, поэтому их катушки выполняют из провода малого сечения с большим числом витков и включают параллельно контролируемому устройству.

Реле максимального напряжения срабатывает и отключает контролируемое устройство, если напряжение сети превысит допустимое значение. Поэтому уставка на срабатывание реле максимального напряжения несколько выше предельно допустимого значения напряжения и пока напряжение в питающей сети не превысило этого значения, реле остается в отпущенном состоянии. Если же напряжение в сети достигнет значения уставки реле на срабатывание, то реле максимального напряжения сработает и вызовет отключение двигателя.

Реле минимального напряжения остается включенным, пока напряжение в сети не окажется ниже минимально допустимого значения. Поэтому уставка реле минимального напряжения несколько ниже этого значения. Если же напряжение в сети упадет до значения уставки реле на отпускание, то оно отключится и своими размыкающими контактами разомкнет цепь катушки контактора, что приведет к отключению двигателя.

6.6.3. Автоматические выключатели

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для защиты потребителей электроэнергии от короткого замыкания и перегрузки, от снижения напряжения в сети до значения, ниже допустимого. Они могут применяться также в качестве коммутирующих устройств при сравнительно редких включениях и отключениях потребителей, например, для включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах компрессоров, воздуходувок, вентиляторов, насосов и т. п.

Отключение автоматических выключателей при возникновении короткого замыкания или перегрузки потребителя происходит под воздействием специальных устройств, называемых *механизмами свободного расцепления*. Если автоматический выключатель используется для защиты потребителя от короткого замыкания, то в нем используется *электромагнитный расцепитель*, состоящий из системы рычагов, пружин и электромагнита. Катушка электромагнита включена последовательно в цепь главных контактов автомата, и по ней проходит рабочий ток потребителя, например двигателя. В верхнем положении рукоятки 6 (рис. 6.29, а) автомат включен, его контакты 1 и 2 замкнуты и удерживаются в таком состоянии рычагами 5, соединенными шарнирно, и упора 4; при этом пружина 3 растянута.

При коротком замыкании в сети или в устройстве, получающем питание через главные контакты автомата, ток в катушке 8 достигает значения, при котором якорь 9 выталкивается вверх и своим штоком 7 ударяет по рычагам 5, «переламывая» их в шарнире. Пружина 3, лишенная упора рычагами 5, сжимается и размыкает контакты 1 и 2 (рис. 6.29, б). До тех пор пока ток в катушке не

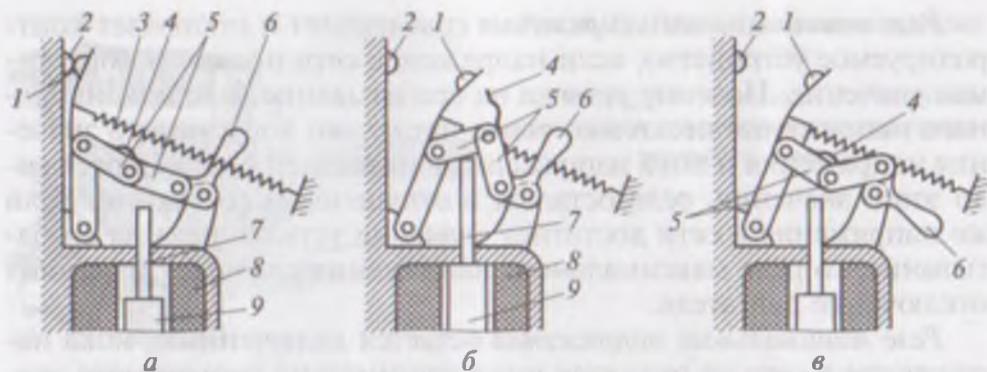


Рис. 6.29. Электромагнитный механизм свободного расцепления

снизится до значения менее уставки автомата, шток 7 не допустит включения автомата. После устранения короткого замыкания автомат следует включить. Для этого рукоятку 6 необходимо отвести вниз (рис. 6.29, в), при этом рычаги 5 выпрямятся, а упор 4 будет удерживать их в таком состоянии. Затем рукоятку следует перевести в верхнее положение, при котором контакты 1 и 2 замкнутся, а пружина 3 окажется натянутой. В некоторых конструкциях возможно дистанционное управление автоматом посредством электромагнита или двигателя. В этом случае включение и отключение автомата выполняются кнопками «Пуск» и «Стоп» (красного цвета).

Для защиты электродвигателей от перегрева, вызванного большим током перегрузки, автоматические выключатели снабжаются тепловым расцепителем. Основным элементом такого расцепителя является биметаллическая пластина; его работа аналогична тепловому реле (см. 6.2.2).

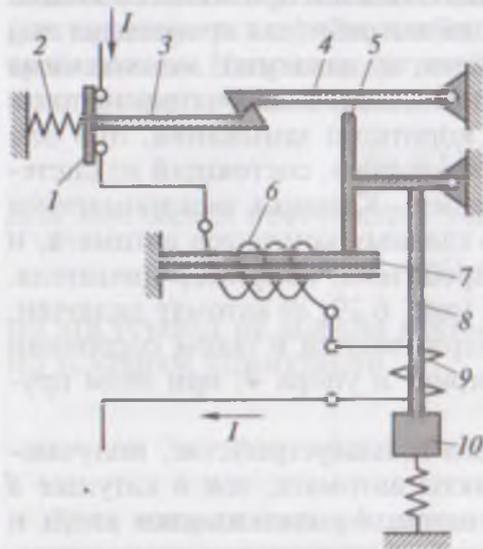


Рис. 6.30. Комбинированный расцепитель

Рассмотрим работу автоматического выключателя с *комбинированным расцепителем*, обеспечивающего защиту потребителя как от короткого замыкания, так и от перегрузки (рис. 6.30).

Ток I главных контактов 1 последовательно проходит через нагреватель 6 биметаллической пластины 7 и катушку 9 электромагнита с сердечником 10. В рабочем состоянии автоматического выключателя цепь тока замкнута мостиковым контактом 1, который удерживается в этом состоянии защелками 3 и 4, а пружина 2 остается в растянутом состоянии. При корот-

ком замыкании сердечник 10 втягивается в катушку 9 электромагнита и толкатель 8 через Т-образный рычаг 5 разъединяет защелки 3 и 4. Освободившаяся пружина 2 размыкает мостиковый силовой контакт 1, т.е. размыкает цепь тока I . Если же произойдет перегрузка потребителя, то ток I , величина которого превысила допустимое длительное значение, проходя по нагревателю 6, вызовет интенсивный нагрев биметаллической пластины 7. Эта пластина, изогнувшись вверх, поднимет Т-образный рычаг 5, который разъединит защелки 3 и 4. Пружина 2 разомкнет силовой мостиковый контакт автомата и потребитель будет отключен. В некоторых конструкциях нагреватель 6 отсутствует, а ток I пропускают непосредственно через биметаллическую пластину 7, вызывая ее нагрев.

Автоматы разных типов отличаются числом полюсов (фаз), номинальными значениями токов и напряжений, видами защит (только от коротких замыканий или еще и от перегрузки), быстродействием.

Автоматы могут быть укомплектованы расцепителями минимального напряжения, и тогда при напряжении сети ниже уставки по минимальному напряжению автомат будет отключен. Для гашения дуги на размыкающихся силовых контактах автоматы снабжаются дугогасительными устройствами в виде фибровых пластин или дугогасительных камер.

Расцепители минимального напряжения выполняются электромагнитного типа и регулируются на напряжение отключения от 0,3 до 0,7 $U_{ном}$. Автоматические выключатели серий АК, АЕ, АС и АП с тепловыми, электромагнитными и комбинированными расцепителями получили наибольшее применение в электроприводах. Технические данные автоматических выключателей некоторых типов размеров указанных серий приведены в табл. 6.5.

Рассмотрим устройство и работу **автоматического выключателя серии АП-50** (рис. 6.31). Все части автомата крепятся на пластмассовом основании (цоколе) 1. Кроме основного коммутирующего устройства, состоящего из неподвижных контактов 3, подвижных контактов 5 и дугогасительной камеры 4, автомат снабжен дополнительным устройством с блок-контактами, используемыми в цепях управления. Гибкие проводники 6 соединяют подвижные контакты 5 с тепловыми расцепителями (биметаллическими пластинами) 11, которые, в свою очередь, соединены с электромагнитными расцепителями 10. Корпус автомата 2 пластмассовый, управление — кнопочное. Если в какой-либо фазе защищаемой цепи возникнет перегрузка или короткое замыкание, срабатывает соответствующий тепловой расцепитель 11. При этом рейка 9 поворачивается и вызывает срабатывание свободного электромагнитного расцепителя 10, общего для всех фаз. Для включения автомата следует нажать кнопку 7. При этом пружина, отключающая автомат, взво-

Технические данные автоматических выключателей некоторых типоразмеров серий АК, АЕ, АС и АП

Типоразмер	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключений, кА		Время отключения, с	Привод	Габариты
					постоянный	переменный			
АК-63	63	200—400	2; 3	0,63—63	5	9	0,03	Ручной	145×68×124
АК-50	50	320—400	2; 3	2—50	4,5	9	0,04	»	113×81×117
АП-50	50	220—500	2; 3	1,6—50	1,252	0,3—2	0,02	»	210×160×143
А-63	25	110—220	1	0,63—25	2	2,5	—	»	134×28×88
АЕ-1000	25	240	1	6—25	—	1,5	—	»	90×21×77
АЕ-2000	25; 63; 100	220—500	1; 2; 3	—	10	16	—	»	220×112×115
АС-25	25	220—380	2; 3	1—20	3,2	2	—	»	73×90×109
АСТ-2/3	25	380	2; 3	—	90	—	0,8	Электромагнитный	120×75×95
АЕ-2443	16; 20; 25; 5; 31; 40; 50; 63	380	3	—	—	—	—	Ручной	—

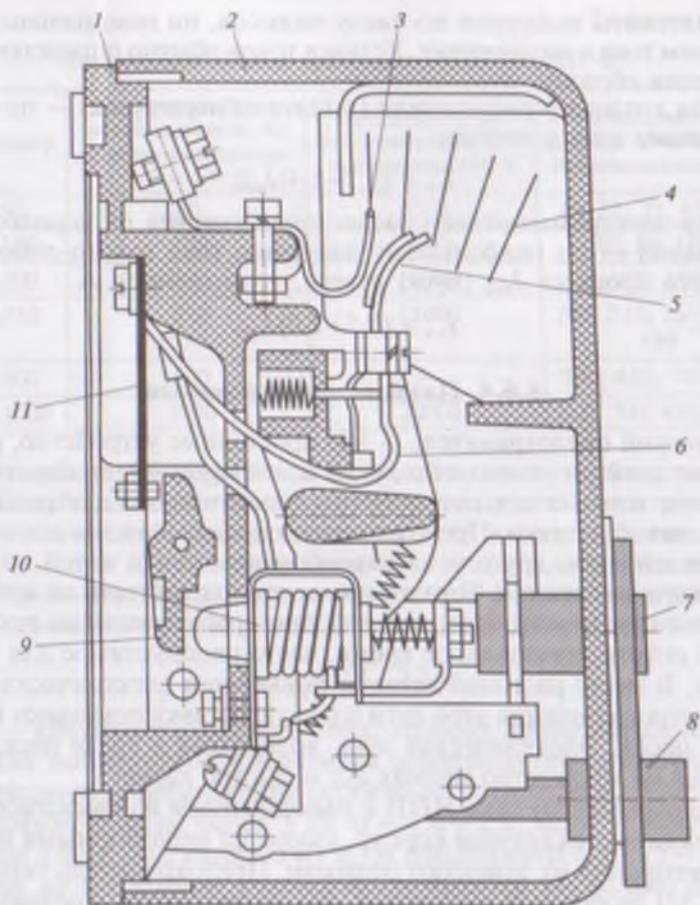


Рис. 6.31. Устройство автомата серии АП-50

дится и удерживается в этом состоянии. Для размыкания силовых контактов, т.е. для отключения электродвигателя, следует нажать кнопку 8.

Номинальный ток тепловых расцепителей можно регулировать в сторону уменьшения на 30—40 % относительно номинального значения. При выборе автомата следует иметь в виду кратность пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, чтобы кратность срабатывания электромагнитного расцепителя составляла 6—8. При несоблюдении этого условия пуск двигателя будет вызывать отключение автомата.

Автоматы серии АП-50 применяют на напряжение до 500 В переменного тока и до 220 В постоянного тока; номинальный ток расцепителей до 50 А.

Автоматы выбирают по числу полюсов, по номинальным значениям тока и напряжения. Уставки токов обычно определяют следующим образом:

для теплового расцепителя (защита от перегрузок) — по номинальному току двигателя, А,

$$I_{y.t} \geq (1,2+1,4)I_{ном}; \quad (6.3)$$

для электромагнитного расцепителя (защита от короткого замыкания) — по наибольшему значению тока какого-либо переходного процесса $I_{пер}$ (пуск, реверс, торможение), А,

$$I_{y.z} \geq (1,5+2,0)I_{пер}. \quad (6.4)$$

6.6.4. Плавкие предохранители

Плавкий предохранитель — это простейшее устройство, разрывающее электрическую цепь, если в ней произойдет короткое замыкание и ток достигнет значения, достаточного для расплавления плавкой вставки. Предохранители предназначены для защиты двигателей либо другого электрооборудования и сетей от токов короткого замыкания. В то же время предохранители не являются защитой при перегрузках, так как они срабатывают на ток перегрузки спустя значительное время, часто недопустимое для потребителя. В месте расплава вставки появляется электрическая дуга. Для быстрого гашения этой дуги плавкую вставку помещают в кварцевый песок. Электрическая дуга, возникшая в среде песка, разбивается на множество мелких дуг и быстро гаснет.

Предохранители типа НПН с наполнителем из кварцевого песка, имеющие стеклянный корпус, являются неразборными и в случае перегорания их заменяют целиком. Предохранитель типа ПР-2 (рис. 6.32) разборный трубчатый, без наполнителя, состоящий из цилиндрической керамической втулки 1, калиброванной плавкой вставки 2 из легкоплавкого металла (обычно цинк) и двух ножей 3, вставляемых в зажимы 4.

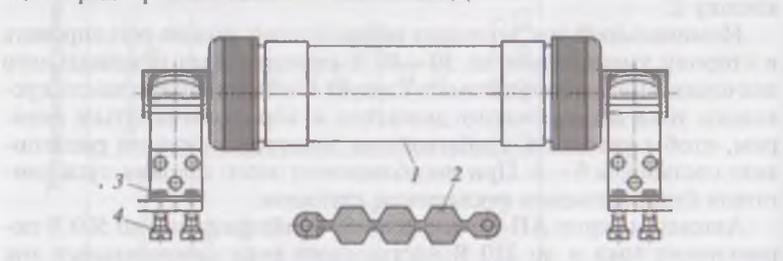


Рис. 6.32. Предохранитель типа ПР-2

Технические данные предохранителей типа ПР-2

Типоразмер	Номинальный ток предохранителя, А, при напряжении не более 500 В	Предельный ток отключения, А, при напряжении 500 В	Номинальные токи плавких вставок для предохранителя, А
ПР-2-60	60	3500	20; 25; 35; 45; 60
ПР-2-100	100	5000	60; 80; 100
ПР-2-200	200	10000	100; 125; 150; 200
ПР-2-350	350	11000	200; 225; 260; 300; 350
ПР-2-600	600	—	350; 430; 500; 600
ПР-2-1000	1000	20000	600; 700; 850; 1000

При выборе предохранителя (плавкой вставки) необходимо учитывать наибольшее значение тока на данном участке электрической цепи, защищаемой предохранителем: если в сеть включен двигатель, то следует иметь в виду пусковой ток этого двигателя или ток реверсирования. Для защиты асинхронного двигателя предохранителем номинальный ток плавкой вставки принимают равным, А,

$$I_{\text{ном.пл}} = (I_{\text{ном}}\lambda_i)/\alpha, \quad (6.5)$$

где λ_i — кратность пускового тока, которая принимается по каталогу для выбранного типоразмера асинхронного двигателя; α — коэффициент, учитывающий особенности пуска: $\alpha = 2,5$, если пуск кратковременен (не более 5 с); $\alpha = 1,6—2,0$, если условия пуска тяжелые (пуск под нагрузкой) и он продолжается до 15—20 с.

Если же на данном участке цепи имеется несколько двигателей, то плавкую вставку нужно выбирать из расчета пуска двигателя с наибольшим пусковым током при предварительном включении всех остальных двигателей и прочих нагрузок.

Технические данные некоторых предохранителей типа ПР-2 приведены в табл. 6.6. Выбирают предохранители по номинальному току плавкой вставки, который принимается в зависимости от тока потребителя с учетом возможных его бросков в процессе работы и других потребителей, защищаемых данным предохранителем.

6.7. Силовые резисторы

Для регулирования или ограничения токов в цепях обмоток статора и ротора двигателей переменного тока или цепях обмоток якоря и возбуждения двигателей постоянного тока применяют силовые резисторы. Силовыми их называют потому, что они расчи-

Сплавы с высоким удельным электрическим сопротивлением

Сплав	Удельное электрическое сопротивление, (Ом·м)·10 ⁻⁶ , при 20 °С	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	Допустимая рабочая температура, °С
Константан	0,45—0,50	5·10 ⁻⁶	300
Манганин	0,42—0,50	4·10 ⁻⁵	300
Нейзильбер	0,30—0,40	30·10 ⁻⁵	250
Нихром	1,02—1,18	0,17·10 ⁻³	1000
Фехраль	1,10—1,25	0,05·10 ⁻³	850
Чугун	0,7—0,8	—	300

таны на значительные токи в отличие от резисторов, применяемых в цепях электронных устройств.

Силовой резистор состоит из резистивных элементов, соединяя которые последовательно, параллельно или смешанно, получают резистор требуемых значений сопротивления и допустимого тока. В большинстве случаев эти элементы изготовляют в виде круглой проволоки или ленты из сплавов, обладающих повышенным удельным электрическим сопротивлением ρ : константан, нихром, манганин и т.д. (табл. 6.7). Константан (55 % меди, 40 % никеля, остальное примеси) в отличие от других сплавов обладает низким температурным коэффициентом, поэтому резисторы из него имеют стабильное сопротивление, почти не зависящее от температуры нагрева.

Из проволоки или ленты изготовляют резистивные элементы в виде открытых бескаркасных спиралей (рис. 6.33, а) либо, с целью устранения возможного межвиткового замыкания, эти элементы делают рамочными и каркасными, в которых проволока

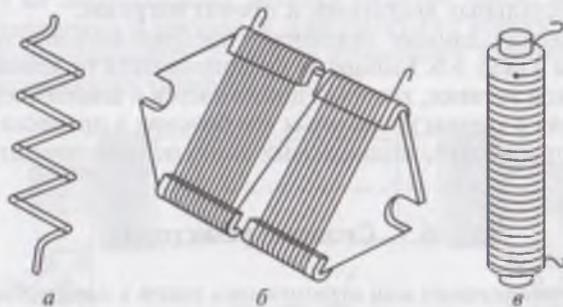


Рис. 6.33. Резистивные элементы:

а — спираль; б — рамка; в — спираль на каркасе

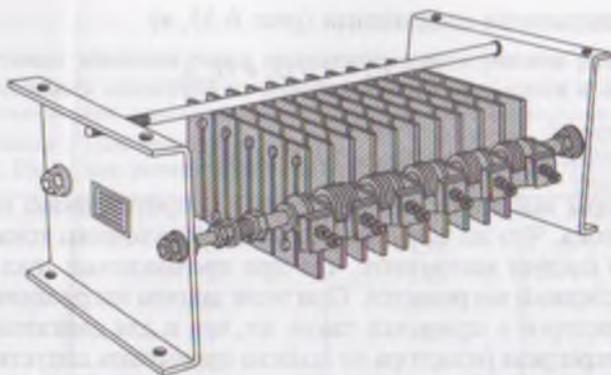


Рис. 6.34. Ящик с резистивными чугуными элементами

или лента закрепляется на керамическом основании в натянутом состоянии (рис. 6.33, б и в). Керамическое основание в этом случае выполняет также роль теплоотвода.

В силовых цепях двигателей значительной мощности в качестве резистивных элементов применяют литые чугунные пластины зигзагообразной формы (рис. 6.34) либо штампованные элементы из листовой электротехнической стали.

Для получения резистора требуемого сопротивления резистивные элементы собирают в блоки или ящики (см. рис. 6.34), в которых набор элементов электрически соединяют между собой параллельно, последовательно или смешанно.

При последовательном соединении (рис. 6.35, а) сопротивление резистора, Ом,

$$R = R_a + R_b + R_c.$$

При параллельном соединении (рис. 6.35, б)

$$R = 1/(G_a + G_b + G_c),$$

где G_a , G_b и G_c — проводимости резисторов,

$$G_a = 1/R_a; \quad G_b = 1/R_b; \quad G_c = 1/R_c.$$

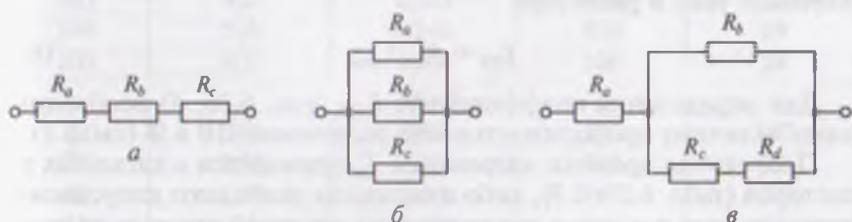


Рис. 6.35. Схемы соединения резистивных элементов

При смешанном соединении (рис. 6.35, в)

$$R = R_u + 1/(G_b + G_{c,d}),$$

где

$$G_{c,d} = 1/(R_c + R_d).$$

Резисторы выбирают по требуемому сопротивлению и допустимой силе тока. Что же касается допустимой величины тока через резистор, то следует напомнить, что при прохождении тока через резистор последний нагревается. При этом законы нагревания и охлаждения резисторов в принципе такие же, что и для двигателей, и температура перегрева резистора не должна превышать допустимого значения. Основные режимы работы резисторов (продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный) и соответствующие нагрузочные диаграммы, рассмотренные применительно к двигателям, справедливы и для резисторов. Поэтому при включении резистора в цепи статора, ротора или якоря двигателя, работающего в продолжительном режиме, электрический ток в постоянно включенном резисторе (например, добавочный резистор $r_{доб}$ для получения искусственной механической характеристики) не должен превышать допустимого значения, указанного в каталоге на этот резистор. Если же резистор включают только на время пуска, торможения и т.п., то его режим работы является кратковременным, даже если режим работы двигателя продолжителен. В этом случае допускаемый ток в резисторе должен быть увеличен. Поэтому при выборе резистора по допускаемому току следует воспользоваться коэффициентами перегрузки, учитывающими кратковременный или повторно-кратковременный режим работ резисторов. При кратковременном режиме для определения допускаемого тока $I_{кр}$ следует допускаемый ток резистора для продолжительного режима $I_{прод}$ увеличить в $K_{кр}$ раз:

$$I_{кр} = K_{кр} I_{прод}. \quad (6.6)$$

При этом значение коэффициента $K_{кр}$ выбирают в зависимости от постоянной времени нагревания элемента T_n для разных значений времени рабочего цикла $t_{раб}$ (рис. 6.36, а).

При повторно-кратковременном режиме работы допускаемое значение тока в резисторе

$$I_{пв} = K_{пв} I_{прод}. \quad (6.7)$$

Для определения коэффициента $K_{пв}$ (рис. 6.36, б) необходимо знать величину продолжительности включения ПВ в % (см. 5.8).

Постоянная времени нагревания T_n приводится в каталогах резисторов (табл. 6.8 и 6.9), либо в каталогах указывают допускаемые значения тока резистора для различных значений времени их включения.

Таблица 6.8

Допустимые значения токов продолжительного режима рамочных резистивных элементов из константановой проволоки и ленты

Сопротивление элемента, Ом	Диаметр проволоки или размер ленты, мм	Постоянная времени нагревания, с	Допустимый ток длительного режима, А
<i>Проволока</i>			
18	1,0	132	4,4
12	1,2	145	5,4
8	1,3	152	6,6
5,8	1,4	168	7,7
4,4	1,6	203	8,9
3,5	1,8	235	10,1
2,8	2,0	282	11,2
1,95	1,2	145	13,8
1,45	1,4	168	15,4
1,1	1,6	203	17,7
0,9	1,8	235	19,9
0,7	2,0	282	22,3
<i>Лента</i>			
0,64	10×0,3	100	23
0,48	10×0,4	110	27
0,40	10×0,5	132	30
0,32	10×0,6	148	33
0,26	10×0,8	180	37
0,20	10×1,0	222	42

Таблица 6.9

Технические данные ящиков сопротивлений типов ЯС-1 и ЯС-2

Тип и номер ящиков	Сопротивление ящика, Ом	Сопротивление одного элемента, Ом	Постоянная времени нагревания, с	Допустимый длительный ток, А
ЯС-1				
75	3,0	0,075	532	39
105	4,2	0,105	400	33
140	5,6	0,140	520	29
200	8,0	0,200	386	24
ЯС-2				
20	0,40	0,02	575	107
28	0,56	0,028	432	91
40	0,80	0,04	547	76
55	1,1	0,055	420	64
110	2,2	0,11	423	46

Пример 6.1. Для получения требуемой искусственной механической характеристики в цепь якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения мощностью 4,7 кВт включен резистор сопротивлением $r_{доб} = 2,4$ Ом (см. пример 2.2), режим работы двигателя продолжительный, а номинальный ток якоря $I_{\sigma ном} = 24,5$ А. Необходимо подобрать тип и схему соединения резистивных элементов.

Решение. По табл. 6.8 выбираем резистивный элемент из константановой ленты сечением $10 \times 0,4$ мм, сопротивлением 0,48 Ом, длительно допускаемым током 27 А.

Пример 6.2. Для динамического торможения трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором необходимо в цепь ротора включить три резистора с активным сопротивлением по $r_r = 0,2$ Ом (см. рис. 3.8, а); ток ротора при торможении $I_2 = 300$ А; время торможения $t_{раб} = 5$ с. Требуется выбрать резистивные элементы.

Решение. Предварительно в качестве резистивного элемента принимаем элемент из константановой ленты (см. табл. 6.8) сечением $10 \times 1,0$ мм с постоянной времени нагревания $T_n = 222$ с и допустимым током длительного режима 42 А. По рис. 6.36, а определяем коэффициент перегрузки $K_{кр} = 6$. Тогда кратковременно допустимый ток элемента (6.6)

$$I_{кр} = 6,3 \cdot 42 = 265 \text{ А.}$$

Так как кратковременный ток по условию задачи 300 А превышает допустимый 265 А, то выбираем другой вариант: принимаем элемент из константановой ленты сечением $10 \times 0,5$ мм, сопротивлением 0,4 Ом, с

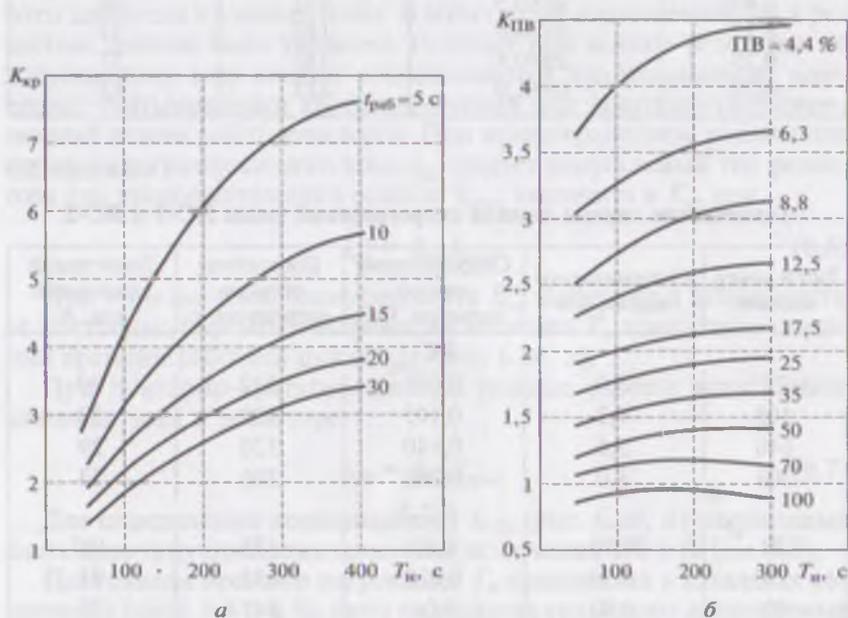


Рис. 6.36. Графики для определения коэффициентов перегрузки в кратковременном (а) и повторно-кратковременном (б) режимах работы

постоянной времени нагревания $T_n = 132$ с и длительно допускаемым током 30 А.

По рис. 6.36, а определяем коэффициент перегрузки $K_{кр} = 5,2$.

По (6.6) определяем кратковременно допускаемый ток

$$I_{кр} = 5,2 \cdot 30 = 156 \text{ А.}$$

В каждую фазу ротора включаем резистор из двух элементов и соединяем их параллельно. В этом случае сопротивление резистора

$$r_r = 0,4/2 = 0,2 \text{ Ом,}$$

а допускаемый кратковременно ток

$$I_{кр} = 156 \cdot 2 = 312 \text{ А.}$$

Таким образом, окончательно выбраны шесть элементов (по два на фазу) из константановой ленты сечением $10 \times 0,5$ мм, сопротивлением 0,4 Ом, допускаемым кратковременным током 156 А. В каждой фазе два элемента соединены параллельно, создавая сопротивление 0,2 Ом с кратковременно допускаемым током 312 А > 300 А, что удовлетворяет условиям задачи.

6.8. Реостаты

Реостат — это устройство (аппарат) переменного электрического сопротивления для регулирования тока в цепи какой-либо обмотки двигателя. Реостаты подразделяют на пусковые, регулировочные, пускорегулирующие и регуляторы напряжения. Конструктивно реостаты состоят из двух основных частей: резисторов и переключающего устройства. В процессе работы реостаты нагреваются и для того чтобы перегрев реостата не превысил допустимые пределы, в нем применяют охлаждение. Реостаты бывают с естественным воздушным охлаждением и масляным охлаждением. Последние разделяют на реостаты с естественным охлаждением масла, путем отдачи теплоты в окружающую среду через металлические стенки бака, и с водяным охлаждением масла. Масло обладает большой теплоемкостью и обеспечивает интенсивный отбор теплоты от резисторов. По сравнению с воздушными масляные реостаты имеют меньшие габариты.

Пусковые реостаты и пусковая часть пускорегулирующих реостатов работают в кратковременном режиме. Условия работы этих реостатов наиболее тяжелые, так как за короткое время пуска вся теплота, выделяемая в резисторах проходящим по ним током, почти полностью идет на нагрев резисторов, так как никакого отвода теплоты за такое короткое время не происходит. К тому же нужно иметь в виду, что пусковой ток в 5—10 раз превышает номинальное значение тока двигателя.

Переключатели ступеней реостата должны обеспечить плавный переход с одной ступени на другую без разрыва цепи. Переключающие устройства могут быть плоскими и барабанными.

Применяют пусковые реостаты, укомплектованные реле защиты. На рис. 6.37 представлена функциональная схема пускового реостата типа РЗП со встроенным контактором, применяемого для пуска двигателей постоянного тока. Переключатель ступеней плоского типа с рукояткой Р.

При пуске двигателя рукоятку Р переводят с контакта 0 на контакт 1. При этом катушка реле напряжения КV оказывается подключенной к сети. Реле сработает, и его контакты КV замкнутся. При этом обмотка якоря (Я1 и Я2) и обмотка возбуждения (Ш1 и Ш2) окажутся подключенными к сети и якорь двигателя начнет вращение. Рукоятку Р следует плавно перемещать по часовой стрелке, при этом сопротивление пускового реостата будет уменьшаться. При этом положении рукоятки Р в крайнем правом положении резисторы реостата будут полностью выведены и процесс пуска закончится.

Если в процессе работы двигатель окажется перегруженным, то сработает реле максимального тока КА и его контакты разомкнутся. При этом будет отключена катушка реле КV и двигатель будет отключен. Резистор r ограничивает ток в катушке КV до значения, меньшего силы тока срабатывания, поэтому повторное включение двигателя возможно лишь при переводе рычага Р в положение контакта 1, когда напряжение на катушку КV будет подано в обход

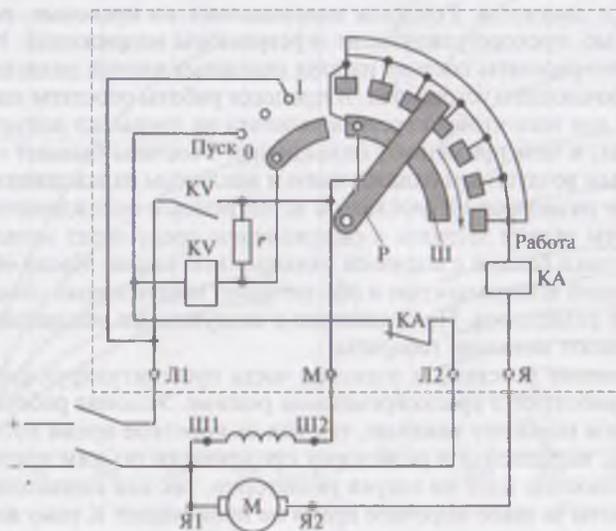


Рис. 6.37. Функциональная схема пускового реостата типа РЗП

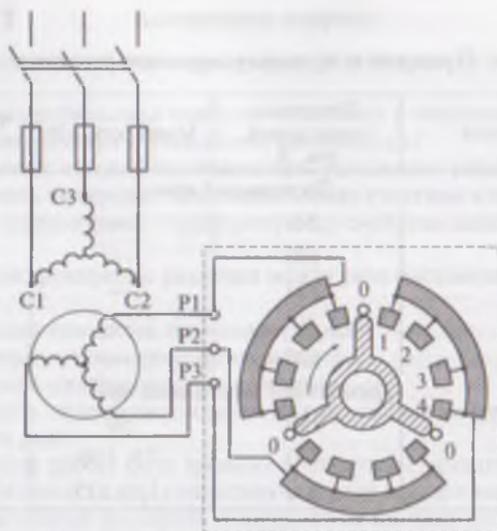


Рис. 6.38. Трехфазный пусковой реостат

резистора r . Обмотка возбуждения двигателя получает питание через шину Ш пускового реостата. Благодаря этому, при отключении двигателя обмотка возбуждения оказывается замкнутой на резисторы реостата и энергия магнитного поля, запасенная в обмотке возбуждения, расходуется на создание тока и нагрев этих резисторов. Если бы пусковые реостаты не имели шины Ш, то значительная по величине ЭДС самоиндукции, наведенная в обмотке возбуждения при ее размыкании, могла вызвать пробой изоляции этой обмотки.

Пусковые реостаты трехфазных асинхронных двигателей имеют более сложную конструкцию и большие габариты. Это вызвано тем, что такой реостат содержит три ветви резисторов с контактами 1—4 в каждой ветви, трехлучевой рычаг и тройную систему контактов (рис. 6.38).

Пусковые реостаты рассчитаны на кратковременное включение, чем достигается уменьшение их габаритов, массы и стоимости. Поэтому во избежание перегорания пускового реостата его переключающий рычаг не следует долго задерживать на промежуточных контактах.

Пускорегулирующие реостаты предназначены для продолжительной работы. В связи с этим их габариты больше, чем у пусковых реостатов.

В табл. 6.10 приведены технические данные некоторых типов пусковых и пускорегулирующих реостатов для двигателей постоянного тока и пусковых реостатов для трехфазных асинхронных двигателей.

Пусковые и пускорегулирующие реостаты

Тип реостата	Предельно допустимый ток, А	Мощность, кВт	Число ступеней пуск./регул.
<i>Постоянный ток</i>			
РП-2522	50	—	9/—
РП-2531	100	—	12/—
РЗП-4	200	—	12/—
РЗР-21	40	—	6/10
РЗР-31	120	—	7/15
<i>Трехфазный переменный ток</i>			
РМ-1530	250	50	8
РМ-16540	400	75; 100	9
РМ-1651	500	150; 175	9

В автоматизированном электроприводе в качестве пусковых реостатов используют резисторы и соединяют их по требуемым схемам, шунтируя их контактами контакторов, катушку которых включают в схемы управления электроприводом (см. рис. 3.13).

Регуляторы напряжения включаются в цепь независимой (параллельной) обмотки возбуждения двигателей постоянного тока. Эти реостаты имеют плоскую переключающую систему с большим количеством контактов переключения. Скользящий контакт

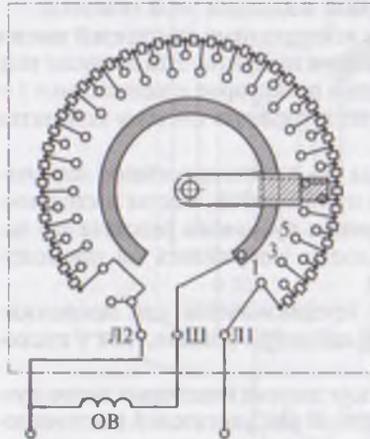


Рис. 6.39. Регулятор возбуждения

рычага должен одновременно перекрывать не менее двух контактов. Делается это для того, чтобы исключить размыкание цепи возбуждения при переводе рычага с одного контакта на другой (рис. 6.39), что могло бы привести к значительному перенапряжению в цепи независимой (параллельной) обмотки возбуждения, а также создало бы опасность «разноса» двигателя.

Широкое применение получили реостаты возбуждения типа РПВ. Например, реостат РПВ-11 мощностью 0,9 кВт с предельно допускаемым током 10 А имеет 34 ступени.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды коммутирующих устройств и каково их назначение?
2. Какой вид рубильника наиболее безопасен в обслуживании?
3. Каково назначение и устройство контроллера?
4. Как работает путевой переключатель рычажного типа?
5. Какую роль выполняет биметаллическая пластина в тепловом реле?
6. Какими параметрами характеризуются свойства электромагнитного реле?
7. В чем конструктивные различия между реле постоянного и переменного тока?
8. Какие виды контактов применяют в реле?
9. Каково назначение промежуточных реле?
10. Объясните назначение реле времени.
11. Объясните назначение металлического кольца на сердечнике электромагнитного реле.
12. Объясните работу реле времени с анкерным механизмом.
13. В чем разница между контактором и реле управления?
14. Чем магнитный пускатель отличается от контактора?
15. Объясните назначение и устройство реле максимального тока.
16. Объясните работу механизма свободного электромагнитного расцепления.
17. Как работает комбинированный расцепитель?
18. Как определяют уставки токов в автомате с комбинированным расцеплением?
19. Могут ли плавкие предохранители защитить потребитель от перегрузки?
20. Какие виды резистивных элементов применяют в силовых резисторах?

ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

7.1. Основные понятия

Работа электроприводов рабочих машин, реализующих какие-либо технологические процессы, неизбежно связана с решением разнообразных задач регулирования различных технологических параметров. Такими параметрами могут быть: величина подачи режущего инструмента и скорость движения обрабатываемого изделия в станках, создание или поддержание заданных значений давления воздуха, уровня жидкости, натяжения проволоки, толщины пленки и др. Для решения перечисленных и других технологических задач необходима в первую очередь информация о фактическом значении регулируемого параметра. С этой целью в систему электропривода включают информационные устройства.

Информационными называют устройства, предназначенные для получения электрических сигналов, несущих сведения о фактическом состоянии контролируемых параметров какого-либо объекта, входящего в систему электропривода и рабочей машины (механизма). Если электропривод не автоматизирован, то сигналы от информационных устройств, будучи усиленными, поступают на световое (сигнальное) табло и информируют оператора о возникших отклонениях контролируемых параметров от заданных, с тем чтобы оператор выполнил требуемые регулировки. Если же электропривод автоматизирован, то указанные сигналы поступают на сравнивающее устройство и в случае их отклонения от заданных значений на элементы управления электроприводом поступают корректирующие сигналы, устраняющие возникшие отклонения в технологическом процессе.

Информационные устройства, выдающие электрический сигнал о состоянии контролируемого параметра, называют *электрическими датчиками*.

По своему назначению датчики весьма разнообразны и составляют самую многочисленную группу чувствительных элементов. Если же классифицировать датчики по принципу действия, то их можно разделить на электромагнитные, тензометрические, пьезодатчики, полупроводниковые, электромагнитные, емкостные, датчики ЭДС Холла, электромашинные и др. В данной главе будут рассмотрены лишь некоторые из перечисленных датчиков, получившие наибольшее применение в системах электроприводов.

7.2. Электромашинные датчики

В системах электропривода применяют электромашинные датчики, составляющие группу *информационных электрических машин*. Эти датчики преобразуют механические величины (частоту вращения, угол рассогласования, угол поворота и т. п.) в электрический сигнал. В группу информационных электрических машин входят тахогенераторы, сельсины и вращающиеся трансформаторы.

7.2.1. Тахогенераторы

Тахогенераторы преобразуют частоту вращения какого-либо вала в электрический сигнал (выходное напряжение).

Зависимость выходного напряжения тахогенератора $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения ротора (якоря) n определяется выходной характеристикой. Уравнение идеальной выходной характеристики тахогенератора:

$$U_{\text{вых}} = C_U n, \quad (7.1)$$

где C_U — крутизна выходной характеристики, определяющая чувствительность тахогенератора к изменениям частоты вращения, В/(об/мин).

Тахогенераторы должны удовлетворять ряду специфических требований. Выходная характеристика тахогенератора, представляющая собой зависимость напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ от частоты вращения n , должна максимально приближаться к прямой линии и иметь наибольшую крутизну. При этом на форму выходной характеристики практически не должны влиять внешние факторы (температура, влажность, давление и т. п.). Напряжение на выходе тахогенератора при $n = 0$, называемое *остаточным*, должно быть минимальным. Напряжение $U_{\text{вых}}$ должно быть симметричным, т. е. при вращении тахогенератора с одинаковой частотой, но в разные стороны, абсолютные значения выходных напряжений тахогенератора должны быть одинаковы. При нарушении этого условия появляется *ошибка несимметрии* тахогенератора.

Выходная мощность тахогенератора должна быть достаточной для работы подключаемых к нему приборов, а пульсация выходного напряжения тахогенератора, обусловленная электромагнитными процессами в нем, должна быть минимальной.

По принципу действия и устройству тахогенераторы бывают переменного и постоянного тока. Наибольшее применение в устройствах автоматики получили асинхронные тахогенераторы и тахогенераторы постоянного тока.

Асинхронный тахогенератор представляет собой двухфазную асинхронную машину весьма малой мощности, работающую в режиме генератора. Одна из обмоток статора, называемая об-

моткой возбуждения (ОВ), включена в сеть переменного тока (рис. 7.1, а), а с зажимов другой обмотки, называемой генераторной (ОГ), снимается напряжение $U_{\text{вых}}$. Величина этого напряжения пропорциональна частоте вращения ротора тахогенератора n .

Свойства тахогенератора определяются его выходной характеристикой $U_{\text{вых}} = f(n)$. Выходная характеристика идеального тахогенератора представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (рис. 7.1, б, график 1). Однако из-за погрешностей реального тахогенератора его выходная характеристика совпадает с идеальной лишь вначале и с ростом частоты вращения она становится криволинейной (график 2). Это приводит к *амплитудной погрешности* тахогенератора:

$$\Delta U_{\Delta} = U_{\text{вых,и}} - U_{\text{вых,р}}, \quad (7.2)$$

где $U_{\text{вых,и}}$ и $U_{\text{вых,р}}$ — напряжение на выходе идеального и реального тахогенераторов при заданной частоте вращения.

Основная причина амплитудной погрешности состоит в том, что напряжение $U_{\text{вых}}$ отличается от ЭДС за счет падения напряжения в генераторной обмотке тахогенератора $I_r Z_r$. С ростом частоты вращения ток в генераторной обмотке тахогенератора увеличивается, что ведет к росту падения напряжения $I_r Z_r$, и амплитудная погрешность возрастает. Амплитудную погрешность выражают в процентах относительно напряжения на выходе идеального тахогенератора при номинальной частоте вращения $U_{\text{вых,и}}$:

$$\Delta u_{\Delta} = (\Delta U / U_{\text{вых,и}}) 100. \quad (7.3)$$

Достоинство асинхронного тахогенератора — отсутствие скользящих контактов, что обеспечивает ему эксплуатационную надеж-

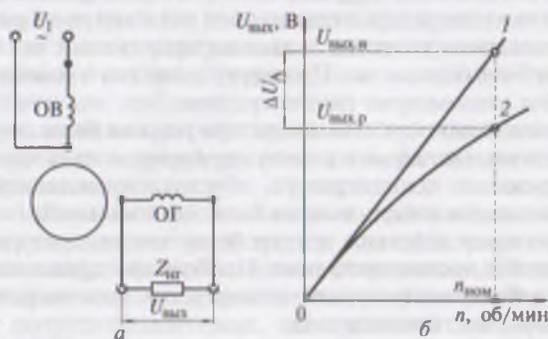


Рис. 7.1. Асинхронный тахогенератор:

а — схема включения; б — выходные характеристики

Технические данные асинхронных тахогенераторов

Типо-размер	Максимальная частота вращения, об/мин	Частота тока, Гц	Крутизна выходной характеристики, В/(об/мин)	U_n , В	I_n , А	Δu_n , %	Масса, кг
ТГ-4	6000	400	0,0100	115	0,30	2,5	0,3
ТГ-5А	9000	400	0,1100	110	0,06	2,5	0,3
ТД-1	2400	50	0,0080	110	0,15	1,5	3,0
ТД-2	2400	50	0,0080	127	0,13	1,5	3,0

ность и стабильность выходной характеристики. *Недостатки* — нелинейность выходной характеристики, а следовательно, повышенное значение амплитудной погрешности, малая мощность на выходе, повышенные габариты (больше, чем у тахогенераторов постоянного тока, в 2—3 раза). Несмотря на перечисленные недостатки, асинхронные тахогенераторы применяют в системах электропривода, что объясняется их высокой эксплуатационной надежностью. В табл. 7.1 приведены технические данные некоторых типов асинхронных тахогенераторов.

Тахогенератор постоянного тока — это машина постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением постоянными магнитами, работающая в генераторном режиме. По конструкции он отличается от машин постоянного тока традиционной конструкции лишь весьма малыми габаритами.

На рис. 7.2 показаны принципиальные схемы тахогенераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением (рис. 7.2, а) и возбуждением постоянными магнитами (рис. 7.2, б). В случае электромагнитного возбуждения обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока.

Тахогенератор возбуждается, и если его якорь привести во вращение, то на его выходе появится напряжение, В:

$$U = \frac{c_e \Phi n}{1 + (r_a / R_{нр})} = C_U n, \quad (7.4)$$

где r_a — сопротивление обмотки якоря, Ом; $R_{нр}$ — сопротивление нагрузки тахогенератора, представляющей собой устройство, включенное на выходные зажимы обмотки якоря, Ом; n —

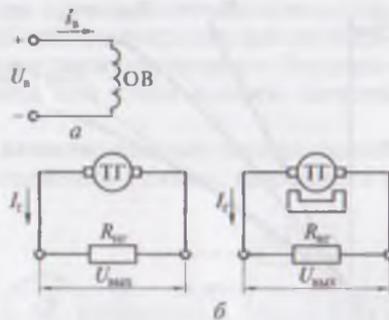


Рис. 7.2 Принципиальные схемы включения тахогенераторов постоянного тока

частота вращения якоря тахогенератора, об/мин; C_U — крутизна выходной характеристики тахогенератора, В/(об/мин):

$$C_U = \frac{c_s \Phi}{1 + (r_a / R_{нг})}. \quad (7.5)$$

Выражение (7.4) представляет собой уравнение выходной характеристики тахогенератора. Из выражения (7.5) следует, что чем больше сопротивление нагрузки $R_{нг}$, тем больше крутизна выходной характеристики C_U . Наибольшая крутизна выходной характеристики соответствует режиму холостого хода тахогенератора, когда обмотка якоря разомкнута ($R_{нг} = \infty$). С ростом тока нагрузки I_t (уменьшением сопротивления $R_{нг}$) крутизна выходной характеристики снижается (рис. 7.3, а). У современных тахогенераторов постоянного тока крутизна выходной характеристики C_U больше, чем у асинхронных тахогенераторов.

Выходная характеристика тахогенератора постоянного тока [см. (7.4)] — прямая линия. Однако опыт показывает, что выходная характеристика прямолинейна только в начальной части (при малых частотах вращения), а с ростом частоты вращения она становится криволинейной (рис. 7.3, а). Криволинейность характеристики усиливается при уменьшении сопротивления нагрузки $R_{нг}$ и увеличении частоты вращения n . Это объясняется размагничивающим действием реакции якоря в тахогенераторе. Для снижения криволинейности выходной характеристики не следует использовать тахогенератор на его предельных частотах вращения и применять в качестве нагрузки приборы с малым внутренним сопротивлением.

Другой причиной, вызывающей погрешность тахогенераторов постоянного тока, является падение напряжения в щеточном кон-

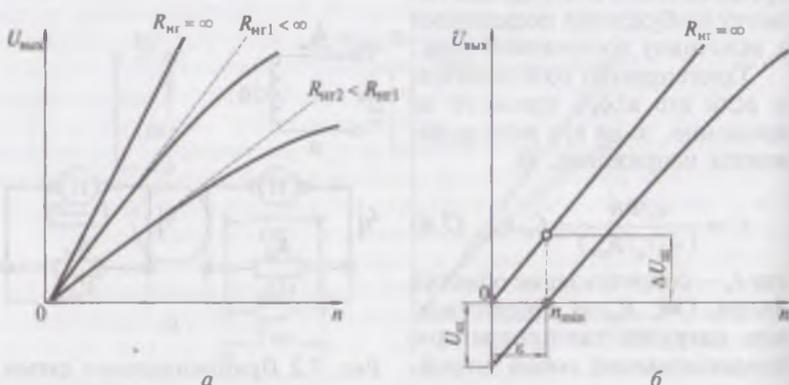


Рис. 7.3. Выходные характеристики тахогенераторов постоянного тока

Технические данные тахогенераторов постоянного тока

Типоразмер	Максимальная частота вращения, об/мин	Крутизна характеристики, В/(об/мин)	Напряжения возбуждения, В	Ток генераторной обмотки, А	Масса, кг
ТГ-3	4000	0,015	27	0,1	0,5
ТД-201	1100	0,13	110	0,2	—
ТД-103ПМ	1000	0,10	—	0,1	—
ТД-201ПМ	1000	0,20	—	0,2	—

такте $\Delta U_{\text{ш}}$. По этой причине характеристика выходит не из начала осей координат, а из точки, отстоящей от начала координат на величину $\epsilon = n_{\text{min}}$ (рис. 7.3, б).

Достоинства тахогенераторов постоянного тока — малые габариты и масса при значительной выходной мощности; возможность применения для возбуждения постоянных магнитов, что позволяет обойтись без источника питания для возбуждения. **Недостатки** — наличие скользящего щеточно-коллекторного контакта, что снижает эксплуатационную надежность и вносит дополнительную погрешность, пульсация выходного напряжения, обусловленная магнитной несимметрией якоря (магнитное сопротивление сердечника якоря по разным его осям неодинаково) и процессом коммутации. Для сглаживания пульсаций напряжения тахогенератора постоянного тока применяют фильтры RC и RLC. Но несмотря на перечисленные недостатки, тахогенераторы постоянного тока, особенно с возбуждением постоянными магнитами, получили широкое применение в электроприводе.

В табл. 7.2 приведены технические данные некоторых типов тахогенераторов постоянного тока.

В электроприводе тахогенераторы применяют в качестве датчиков частоты вращения. Некоторые электродвигатели при изготовлении комплектуются встраиваемыми тахогенераторами. Это упрощает автоматизацию регулирования или стабилизацию частоты вращения этих двигателей.

Тахогенераторы применяют в качестве датчика максимальной скорости для предотвращения аварийного режима, связанного с увеличением частоты вращения сверхдопустимого значения. Если частота вращения контролируемого объекта, например, двигателя М (рис. 7.4) превысит допустимую величину, то напряжение $U_{\text{вых}}$ тахогенератора BR достигнет значения, до-

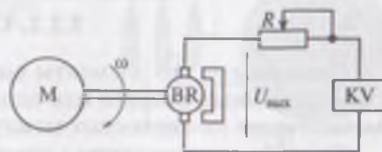


Рис. 7.4. Реле скорости

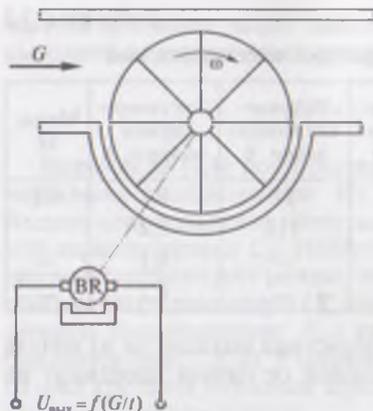


Рис. 7.5. Расходомер

своими контактами размыкает цепь катушки контактора.

Другим примером применения тахогенератора является *расходомер* с крыльчаткой, предназначенный для измерения расхода рабочего вещества, подаваемого по трубопроводу (газ, жидкость, сыпучий материал). На пути прохождения рабочего вещества в трубопроводе устанавливают крыльчатку — колесо с лопастями (рис. 7.5). Рабочее вещество, попадая на лопасти, вращает крыльчатку. Чем больше скорость прохождения вещества в трубопроводе, а следовательно, чем больше его расход, тем больше частота вращения крыльчатки. Вращающийся вал этой крыльчатки соединен с тахогенератором BR, на выходе которого появляется электрический сигнал $U_{\text{вых}}$, величина которого является функцией частоты вращения крыльчатки, т.е. скорости прохождения вещества в трубопроводе, $U_{\text{вых}} = f(G/t)$. Зная диаметр трубопровода, нетрудно по скорости прохождения вещества определить его расход G за определенное время, например за смену или сутки.

Тахогенераторы применяют в замкнутых автоматических системах электропривода в качестве *датчиков обратной связи по скорости* (см. 11.2).

7.2.2. Сельсинны

Сельсинны — это элементы синхронной связи, обеспечивающие одновременный поворот или одновременное вращение нескольких, механически не связанных между собой валов.

Сельсин конструктивно представляет собой асинхронную машину с фазным ротором. Одна из обмоток расположена на стато-

ре, а другая — на роторе и соединена с внешней цепью через контактные кольца и щетки. Если одна из обмоток однофазная, то сельсина называют однофазным.

Рассмотрим работу *индикаторной системы синхронной связи*, состоящей из двух однофазных сельсинов: сельсина — датчика СД и сельсина — приемника СП (рис. 7.6). При этом однофазные обмотки включены в сеть переменного тока и являются обмотками возбуждения, а трехфазные обмотки, называемые обмотками синхронизации, соединены друг с другом линией связи и образуют цепь синхронизации. Переменный ток обмоток возбуждения наводит в сельсинах магнитные потоки возбуждения $\Phi_{в.д}$ и $\Phi_{в.п}$, которые индуцируют в обмотках синхронизации сельсинов ЭДС: в датчике — $E_{А.д}$, $E_{В.д}$ и $E_{С.д}$; в приемнике — $E_{А.п}$, $E_{В.п}$ и $E_{С.п}$. Величина ЭДС той или иной фазы обмотки синхронизации зависит от ее пространственного расположения относительно обмотки возбуждения. Если фазы обмоток синхронизации датчика и приемника расположены одинаково относительно соответствующих обмоток возбуждения, т.е. $\alpha_д = \alpha_п$, то в соединенных линией связи фазах обмоток синхронизации индуцируются одинаковые и встречно направленные ЭДС. Эти ЭДС уравниваются друг друга, и в цепи обмоток синхронизации ток отсутствует. Такое положение роторов сельсинов называется *согласованным*.

Если ротор датчика поворотом на некоторый угол $\alpha_д$ вывести из согласованного положения, то равновесие ЭДС, индуцируемой в фазах обмоток синхронизации, нарушится. При этом в обмотках синхронизации и линии связи появятся уравнивательные токи. В результате взаимодействия этих токов с потоком обмотки возбуждения сельсина-приемника возникает вращающий (синхронизирующий) момент, который будет поворачивать ротор приемника до тех пор, пока он не придет в согласованное с ротором датчика положение, т.е. пока его ротор не повернется на угол $\alpha_п = \alpha_д$. Точ-



Рис. 7.6. Индикаторная схема синхронной связи

ной отработке заданного угла α_d ротором сельсина-приемника мешают силы трения в подшипниках и на контактных кольцах. Ошибка в воспроизведении угла α_d , заданного на датчике, определяется углом рассогласования

$$\theta = \alpha_d - \alpha_n. \quad (7.6)$$

Таким образом, если ротор сельсина-датчика продолжать поворачивать, то ротор сельсина-приемника будет следовать за ротором датчика, но ошибка рассогласования будет сохраняться.

Точность передачи угловых перемещений индикаторной системы зависит от погрешности самих сельсинов, длины линии связи и нагрузки на вал сельсина-приемника. Величина ошибки рассогласования собственно сельсинов-приемников может составлять от $\pm 1,5$ до $\pm 2,5^\circ$, в зависимости от класса точности. Возможна работа нескольких сельсинов-приемников от одного сельсина-датчика. При этом точность воспроизведения угла снижается пропорционально количеству сельсинов-приемников, работающих от одного датчика.

Некоторые особенности работы индикаторной системы дистанционной передачи угла:

- если поменять местами любую пару проводов, присоединяемых к фазам обмотки синхронизации сельсина-приемника, то направление поворота ротора приемника при отработке заданного угла станет противоположным, т. е. при задании на сельсине-датчике угла в направлении часовой стрелки он будет воспроизведен сельсином-приемником в направлении против часовой стрелки;

- если на одном из сельсинов, например у приемника, поменять местами провода, присоединяемые к обмотке возбуждения, то фаза тока в этой обмотке изменится на 180° ; в итоге система будет работать с постоянным рассогласованием положений роторов датчика и приемника на 180° , т. е. согласованное состояние системы будет соответствовать углу рассогласования $\theta = 180^\circ$.

С помощью индикаторной системы сельсин-приемник может лишь фиксировать угол поворота, заданный сельсином-датчиком. Но для того чтобы повернуть вал рабочего механизма на угол,

Таблица 7.3

Основные параметры сельсинов

Типоразмер	U_1 , В	f_1 , Гц	M_{max} , Н·м	Масса, кг	Конструкция сельсина
СС440	110	50	0,021	0,8	Контактный
СС410	55	50	0,021	0,8	»
СС501	110	50	0,172	2,8	»
БС405А	110	50	0,023	1,25	Бесконтактный
БС501А	110	50	0,172	4,0	»

заданный на сельсине-датчике, индикаторная система непригодна, так как момент на роторе приемника весьма мал.

Для этой цели применяют *трансформаторную систему дистанционной передачи угла* (см. 11.5).

По своей конструкции сельсины разделяются на контактные и бесконтактные. Последние не имеют контактных колец и щеток, но, по сравнению с контактными сельсинами, они более громоздки и дорогостоящие.

В табл. 7.3 приведены основные параметры некоторых типов сельсинов.

7.2.3. Вращающиеся трансформаторы

Вращающиеся (поворотные) трансформаторы ВТ предназначены для получения переменного напряжения, находящегося в функциональной зависимости от угла поворота ротора. По назначению ВТ относятся к информационным электрическим машинам и применяются в системах автоматического регулирования в качестве элементов (датчиков угла) для измерения рассогласования между двумя вращающимися осями. Вращающийся трансформатор конструктивно представляет собой электрическую машину индукционного типа малой мощности. Наибольшее применение получили двухполюсные ВТ с двумя парами одинаковых взаимно перпендикулярных обмоток: обмотки w_1 и w_k (С1—С2 и С3—С4) расположены на статоре; обмотки w_2 и w_3 (P1—P2 и P3—P4) — на роторе (рис. 7.7).

Обмотка возбуждения (С1—С2) включается в сеть переменного тока, компенсационная обмотка С3—С4 замыкается накоротко или на резистор. Обмотки на роторе называют вторичными: синусной P1—P2 и косинусной P3—P4. Электрический контакт с обмотками ротора осуществляется либо с помощью контактных колец и щеток (аналогично контактному сельсину), либо посредством спиральных пружин. В последнем случае угол поворота ротора ВТ ограничивается максимальным углом закручивания спиральных пружин.

Принцип работы вращающихся трансформаторов основан на взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора, которая изменяется в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора. Электродвижущие силы, наводимые пульсирующим магнитным по-

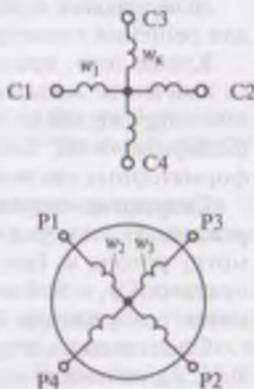


Рис. 7.7. Принципиальная схема вращающегося трансформатора

током возбуждения в обмотках ротора, строго следуют этой зависимости.

Если ВТ используют в качестве измерительного элемента, то поворот ротора осуществляется посредством редукторного механизма высокой точности, который либо встраивается в корпус ВТ, либо монтируется отдельно от ВТ и соединяется с его валом. Если ВТ предназначен для работы в режиме поворота ротора в пределах определенного угла, то в качестве обмоток возбуждения и компенсационной используют обмотки статора, а в качестве вторичных — обмотки ротора.

Если ВТ работает в режиме непрерывного вращения ротора, то обычно применяют «обратное» использование обмоток: обмотки ротора используют в качестве обмоток возбуждения и компенсационной, а обмотки статора — в качестве вторичных. Если компенсационная обмотка замыкается накоротко, то при «обратном» использовании обмоток на роторе применяют лишь два контактных кольца, что упрощает конструкцию, повышает надежность и точность ВТ.

В зависимости от графика функциональной зависимости ЭДС вторичной обмотки от угла поворота ротора вращающиеся трансформаторы разделяют на следующие типы:

синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) — у него напряжение U_2 на выходе обмотки w_2 , находится в синусной зависимости от угла поворота ротора α , а напряжение U_3 на выходе обмотки w_3 — в косинусной зависимости от угла поворота ротора α ;

линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) — у него выходное напряжение U_2 находится в прямолинейной зависимости от угла α ;

вращающийся трансформатор-построитель (ВТП) предназначен для решения геометрических задач.

Кроме того, вращающиеся трансформаторы могут применяться в качестве *масштабных трансформаторов (МВТ)* для согласования напряжений отдельных каскадов автоматического устройства, *фазовращателей, электрических машин синхронной связи* в трансформаторных системах дистанционной передачи угла.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусном режиме. В этом режиме работы используют только синусную обмотку ротора w_2 (рис. 7.8, а). При включении в сеть обмотки возбуждения w_1 в ней появляется ток I_1 , который создает магнитный поток возбуждения Φ_B .

Сцепляясь со вторичной обмоткой w_2 , поток Φ_B наводит в ней ЭДС E_2 , величина которой зависит от угла поворота ротора α . В режиме холостого хода ($I_2 = 0$) напряжение на выходе синусной обмотки

$$U_2 = U_{2\max} \sin \alpha, \quad (7.7)$$

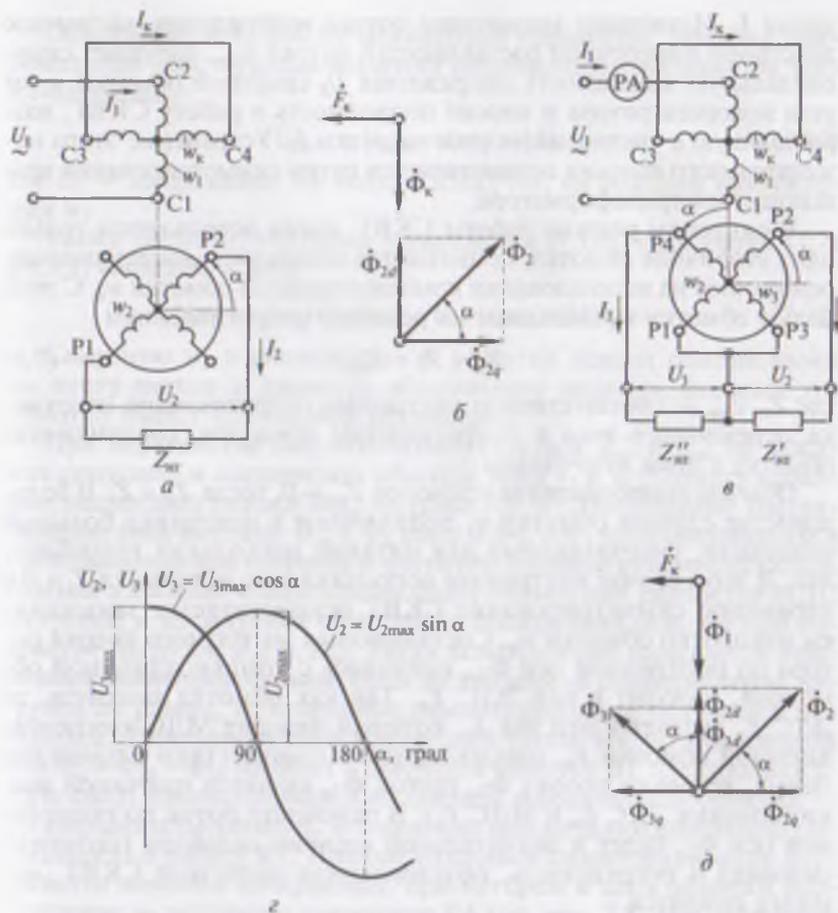


Рис. 7.8. Схемы и диаграммы синусно-косинусного вращающегося трансформатора в синусном (а, б) и синусно-косинусном (в, з, д) режимах

где $U_{2\max}$ — максимальное действующее значение напряжения на выходе синусной обмотки, соответствующее углу поворота ротора $\alpha = 90^\circ$.

При подключении нагрузки $Z_{нл}$ к зажимам P1—P2 синусной обмотки в ее цепи появится ток I_2 . Созданный ток магнитный поток $\dot{\Phi}_2$ можно разложить на составляющие: по продольной оси, направленную встречно потоку возбуждения $\dot{\Phi}_{2d} = \dot{\Phi}_2 \sin \alpha$, и по поперечной оси $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$, вызывающую искажение магнитного потока возбуждения (рис. 7.8, б).

Размагничивающее влияние составляющей потока по продольной оси $\dot{\Phi}_{2d}$ компенсируется увеличением тока в обмотке возбуж-

дения I_1 . Искажение магнитного потока возбуждения, вызванное действием поперечной составляющей потока Φ_{2q} , нарушает синусоидальную зависимость напряжения U_2 синусной обмотки w_2 от угла поворота ротора и вносит погрешность в работу СКВТ, возрастающую с увеличением тока нагрузки I_2 . Устранение этого нежелательного явления осуществляется путем симметрирования вращающегося трансформатора.

В синусном режиме работы СКВТ, когда используется только одна вторичная обмотка, применяется *первичное симметрирование*, основанное на использовании компенсационной обмотки w_k . С этой целью обмотку w_k замыкают на резистор сопротивлением

$$Z_k = Z_i + Z_{пр}, \quad (7.8)$$

где Z_i , $Z_{пр}$ — соответственно внутреннее сопротивление источника переменного тока и сопротивление проводов, соединяющих обмотку с этим источником.

Обычно сопротивление проводов $Z_{пр} = 0$, тогда $Z_k = Z_i$. В большинстве случаев обмотку w_1 подключают к источнику большой мощности, рассчитанному для питания нескольких потребителей. В этом случае внутреннее сопротивление источника $Z_i = 0$ и первичное симметрирование СКВТ осуществляется замыканием накоротко обмотки w_k . Составляющая магнитного потока ротора по поперечной оси Φ_{2q} , сцепляясь с компенсационной обмоткой, наводит в ней ЭДС E_k . Так как обмотка замкнута, то ЭДС E_k создает в ней ток I_k , который наводит МДС компенсационной обмотки F_k , направленную в соответствии с правилом Ленца, встречно потоку Φ_{2q} (поток Φ_{2q} является причиной возникновения ЭДС E_k и МДС F_k). В результате поток по поперечной оси Φ_{2q} будет в значительной степени ослаблен (скомпенсирован) и погрешность, обусловленная нагрузкой СКВТ, намного снизится.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме. В этом режиме используют обе вторичные обмотки w_2 и w_3 , смещенные в пространстве относительно друг друга на 90° (рис. 7.8, в). Зависимость напряжения U_2 на выходе обмотки w_2 от угла поворота ротора определяется формулой (7.7), а зависимость напряжения на выходе обмотки w_3 — выражением, учитывающим угловой сдвиг этой обмотки относительно обмотки w_2 на 90° :

$$U_3 = U_{3\max} \sin(90 + \alpha) = U_{3\max} \cos \alpha, \quad (7.9)$$

где $U_{3\max}$ — максимальное действующее значение напряжения в обмотке w_3 при ее соосном положении с обмоткой возбуждения w_1 .

Из (7.7) и (7.9) следует, что на выходе СКВТ получают два напряжения, одно из которых пропорционально $\sin \alpha$, а другое — $\cos \alpha$ (рис. 7.8, з).

Обмотки w_2 и w_3 имеют одинаковые параметры, поэтому максимальные действующие значения напряжений этих обмоток также одинаковы:

$$U_{2\max} = U_{3\max} = (w_2/w_3)U_1, \quad (7.10)$$

где U_1 — напряжение на входе СКВТ, т.е. на обмотке возбуждения w_1 .

Таким образом, учитывая зависимость (7.10), выражения (7.7) и (7.9) запишем в виде

$$U_2 = (w_2/w_3)U_1 \sin \alpha; \quad U_3 = (w_2/w_3)U_1 \cos \alpha. \quad (7.11)$$

Синусную w_2 и косинусную w_3 обмотки делают одинаковыми по числу витков и диаметру обмоточного провода, поэтому эти обмотки имеют одинаковые параметры.

При неравенстве сопротивлений нагрузок $Z'_{нг}$ и $Z''_{нг}$ на зажимах синусной и косинусной обмоток токи I_2 и I_3 создадут неравные магнитные потоки $\Phi_{2н}$, Φ_3 (рис. 7.8, д). Поперечные составляющие этих потоков $\Phi_{2q} = \Phi_2 \cos \alpha$ и $\Phi_{3q} = \Phi_3 \sin \alpha$ направлены в противоположные стороны и частично взаимно компенсируются. Полная взаимная компенсация будет только при равенстве МДС синусной и косинусной обмоток по поперечной оси, т.е. при равенстве нагрузок $Z'_{нг}$ и $Z''_{нг}$. Такая компенсация называется *вторичным симметрированием*. Если же указанные сопротивления нагрузок не равны, то вторичное симметрирование получается неполным. Результирующий магнитный поток ВТ по поперечной оси $\Phi_q = \Phi_{2q} - \Phi_{3q}$ наводит в синусной обмотке ВТ электродвижущую силу, пропорциональную $\cos^2 \alpha$, а в косинусной обмотке — пропорциональную $\sin^2 \alpha$. Это явление вносит дополнительную погрешность в работу ВТ. Полное вторичное симметрирование достигается *методом амперметра*, при котором в цепь обмотки возбуждения w_1 включают амперметр РА (см. рис. 7.8, е) и сопротивления нагрузок $Z'_{нг}$ и $Z''_{нг}$ подбирают такими, чтобы при повороте ротора в любую сторону показания амперметра РА оставались неизменными.

Более точный метод вторичного симметрирования — *метод вольтметра*. Так как при полном вторичном симметрировании поперечные составляющие потоков синусной и косинусной обмоток взаимно уравновешиваются, то в компенсационной обмотке они не наводят ЭДС. Следовательно, сопротивления нагрузок $Z'_{нг}$ и $Z''_{нг}$ подбираются такими, чтобы показание вольтметра, включенного на выводы разомкнутой компенсационной обмотки СЗ—С4, было нулевым в любом положении ротора.

Точность вращающегося трансформатора в режиме СКВТ определяется следующими показателями: погрешностью воспроизведения синусной (косинусной) зависимости; асимметрией нулевых точек; электродвижущей силой компенсационной обмотки; оста-

точной ЭДС; разностью коэффициентов трансформации между обмоткой возбуждения и вторичными обмотками.

Погрешность воспроизведения синусной (косинусной) зависимости, %:

$$\epsilon_{\text{СКВТ}} = \Delta U \cdot 100 / U_{\text{max}}, \quad (7.12)$$

где ΔU — наибольшее среднее отклонение напряжения на выходе СКВТ от расчетного синусоидального (косинусоидального) закона зависимости выходного напряжения за полные обороты ротора по часовой стрелке ΔU_1 и против часовой стрелки ΔU_2 :

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2). \quad (7.13)$$

Асимметрия нулевых точек при питании СКВТ со стороны каждой из первичных обмоток:

$$\Delta \alpha_0 = 0,5(\Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2), \quad (7.14)$$

где $\Delta \alpha_1$ и $\Delta \alpha_2$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения ротора СКВТ от углов, кратных 90° , соответствующих минимальным значениям ЭДС вторичных обмоток E_2 и E_3 .

Электродвижущая сила компенсационной обмотки, % от номинального напряжения возбуждения U_1 :

$$e_k = E_k \cdot 100 / U_1, \quad (7.15)$$

где E_k — ЭДС компенсационной обмотки, измеренная на выводах С3—С4 при номинальном напряжении U_1 на обмотке возбуждения.

Остаточная ЭДС в нулевых точках, % от максимально действующего выходного напряжения U_{max} :

$$e_{\text{ост}} = E_{\text{ост}} \cdot 100 / U_{\text{max}}, \quad (7.16)$$

где $E_{\text{ост}}$ — остаточная (минимальная) ЭДС, измеренная на выводах вторичной обмотки при положениях ротора в нулевых точках,

Таблица 7.4

Классы точности СКВТ и соответствующие им значения видов погрешностей

Вид погрешности	Класс точности					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
$\epsilon_{\text{СКВТ}}, \%$	+0,005	+0,01	$\pm 0,02$	+0,05	+0,1	$\pm 0,02$
$\Delta \alpha_0, \text{с}$	± 10	+20	+40	+100	+200	± 400
$e_k, \%$, не более	0,04	0,08	0,12	0,3	0,6	1,2
$e_{\text{ост}}, \%$, не более	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,10
$\Delta k, \%$, не более	0,005	0,001	0,02	0,05	0,1	0,2

в которых ЭДС (теоретически) должна быть равна нулю.

Разность коэффициентов трансформации определяет отклонение в параметрах синусной и косинусной обмоток СКВТ, %:

$$\Delta k = (k_{\max} - k_{\min})100/k_{\max}, \quad (7.17)$$

где k_{\max} и k_{\min} — наибольшее и наименьшее значения коэффициентов трансформации между обмотками.

Существует шесть классов точности СКВТ, которые характеризуются допустимыми показателями, приведенными в табл. 7.4.

В приборных устройствах, наряду с рассмотренными двухполюсными ВТ, применяют многополюсные вращающиеся трансформаторы. Их обычно используют в устройствах точного отчета, а также в схемах с малым углом поворота. Такие ВТ выполняют плоскими с относительно большим диаметром (рис. 7.9), что позволяет применить в них обмотки с большим числом полюсов. Благодаря небольшим габаритам и специальной конструкции эти ВТ встраивают непосредственно в измерительное устройство. При этом статор 1 и ротор 2 многополюсных ВТ закрепляют на частях прибора, относительное угловое перемещение которых они должны регистрировать.

Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ). Зависимость выходного напряжения U_2 линейного вращающегося трансформатора от угла поворота ротора имеет вид

$$U_2 = (w_2/w_1) \frac{U_1 \sin \alpha}{1 + m \cos \alpha}, \quad (7.18)$$

где m — постоянная величина, определяемая магнитными и электрическими параметрами ЛВТ.

Если $m \approx 0,54$, то зависимость $U_2 = f(\alpha)$ линейна с погрешностью не более 1% в пределах изменения угла поворота ротора от 0 до $\pm 60^\circ$ (рис. 7.10, а). Для получения указанной зависимости применяют схему включения обмоток ЛВТ, показанную на рис. 7.10, б. Сопротивление нагрузки в цепи косинусной обмотки Z_c выбирают таким, чтобы обеспечить полное вторичное симметрирование ЛВТ при заданном сопротивлении $Z_{нг}$. Для определения значения сопротивления Z_c используют выражение

$$Z_c = 2(Z_2 + Z_k + Z_{нг}) - Z_3. \quad (7.19)$$

Однако полное вторичное симметрирование обмоток ЛВТ возможно лишь при неизменной нагрузке $Z_{нг} = \text{const}$. В случае пере-

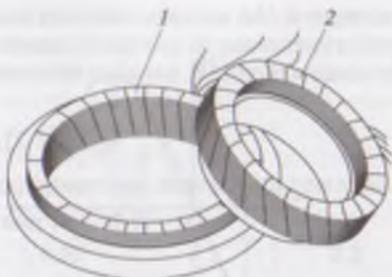


Рис. 7.9. Статор 1 и ротор 2 многополюсного встраиваемого вращающегося трансформатора

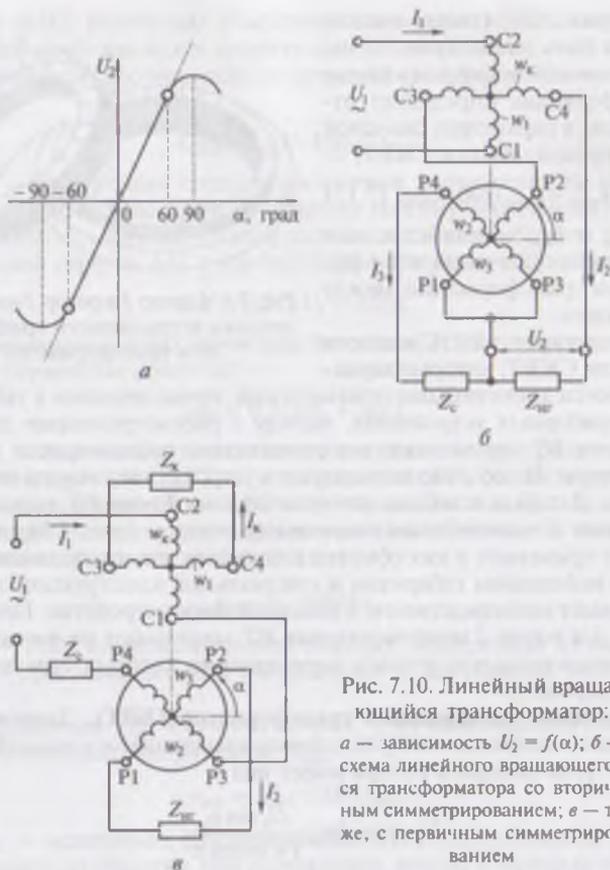


Рис. 7.10. Линейный вращающийся трансформатор:
 а — зависимость $U_2 = f(\alpha)$; б — схема линейного вращающегося трансформатора со вторичным симметрированием; в — то же, с первичным симметрированием

менной нагрузки применяют схему первичного симметрирования (рис. 7.10, в), в которой обмотка возбуждения включена последовательно с косинусной обмоткой и сопротивлением Z_c , а компенсационная обмотка замкнута на сопротивление Z_k . Сопротивления Z_c и Z_k выбирают такими, чтобы магнитные потоки компенсационной обмотки Φ_k и косинусной обмотки по поперечной оси Φ_{3q} были взаимно скомпенсированы при любом значении угла поворота ротора α . Точность ЛВТ определяется погрешностью воспроизведения линейной зависимости выходного напряжения от угла поворота ротора в диапазоне $\pm 60^\circ$. Погрешность воспроизведения линейной функции, %

$$\epsilon_{\%} = \Delta U \cdot 100 / U_{\text{нлх}}, \quad (7.20)$$

где среднее значение максимальных положительных ΔU_1 и отрицательных ΔU_2 отклонений выходного напряжения от расчетного при повороте ротора ЛВТ на 60° по часовой стрелке и против часовой стрелки равно

$$\Delta U = 0,5(\Delta U_1 + \Delta U_2).$$

Линейные вращающиеся трансформаторы делятся на три класса точности:

Класс точности	0,05	0,1	0,2
Погрешность воспроизведения линейной функции $\epsilon_{\text{л}}$, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
Остаточная ЭДС $e_{\text{ост}}$, %	0,025	0,05	0,1

Промышленность изготавливает вращающиеся трансформаторы на частоту переменного тока 400 и 1000 Гц.

7.3. Электромагнитные датчики

Электромагнитные датчики представляют собой преобразователи неэлектрических величин (линейные размеры, давление, уровень жидких или сыпучих материалов, температура и т. п.) в электрический параметр: электрическое индуктивное сопротивление или напряжение.

Наибольшее применение получили *индуктивные датчики* в качестве бесконтактных датчиков перемещения объекта и контроля размеров изделия. Простейшим датчиком перемещения контролируемого объекта является путевой выключатель (см. 6.1), основные недостатки которых — ограниченная надежность, обусловленная наличием контактной группы, и механическое воздействие контролируемого объекта непосредственно на путевой выключатель.

Все индуктивные датчики работают на переменном токе, а поэтому, с целью уменьшения потерь, их магнитную систему делают шихтованной. Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении их основного параметра — индуктивного сопротивления катушки при пространственном перемещении якоря (рис. 7.11). По этой причине они относятся к категории параметрических датчиков. Индуктивный датчик состоит из сердечника 1, катушки 2

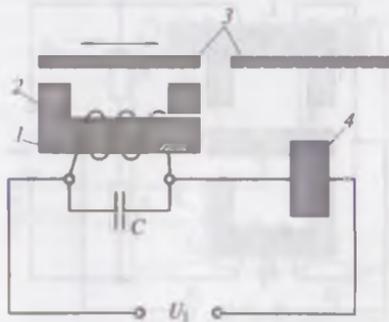


Рис. 7.11. Индуктивный (одинарный) датчик

с числом витков w_k , последовательно с которой включено чувствительное реле 4. Если якорь 3 находится вдали от сердечника 1, то магнитный поток в нем ослаблен значительным магнитным сопротивлением воздушного зазора между полюсами сердечника. В этих условиях индуктивное сопротивление катушки 2 невелико, ток в цепи имеет наибольшее значение и реле 4 срабатывает. Если же якорь 3 расположится над сердечником 1, магнитный поток Φ в сердечнике возрастет и индуктивное сопротивление катушки 2 увеличится:

$$x_L = 2\pi f_1 L_k \approx (2\pi w_k^2 \mu_0 S_c) / (2\delta), \quad (7.21)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость воздуха; S_c — площадь поперечного сечения полюсов сердечника, м²; δ — воздушный зазор между якорем и полюсом сердечника, м.

Параллельно катушке w_k включен конденсатор C , емкость которого должна быть, мкФ:

$$C \approx 10^6 / (2\pi f_1 x_L). \quad (7.22)$$

Поэтому при совмещении якоря с сердечником в цепи наступает состояние, близкое к резонансу токов, при котором ток в цепи реле 4 резко уменьшается, реле отпускает и своими контактами замыкает цепь управления.

Рассмотренный индуктивный датчик называется одинарным. В принципе этот датчик представляет собой электромагнит, создающий на якоре значительную силу притяжения к сердечнику, которая может внести в работу датчика погрешность. По этой причине датчики такой конструкции целесообразно применять лишь в качестве путевых и концевых бесконтактных выключателей для контроля объектов, имеющих большое перестановочное усилие (несравнимо больше силы притяжения якоря датчика к сердечнику).

Например, такие датчики применяют в лифтах, мостовых кранах и т. п.

Рассмотренный датчик является нереверсивным, т. е. при изменении направления перемещения якоря выходной параметр датчика не изменяется.

Перечисленные недостатки отсутствуют в *дифференциальном индуктивном датчике*. Такой датчик состоит из двух одинаковых сердечников 1 и 3 с обмотками и одного якоря 2, расположенного между ними (рис. 7.12). Силы магнитного притяжения,

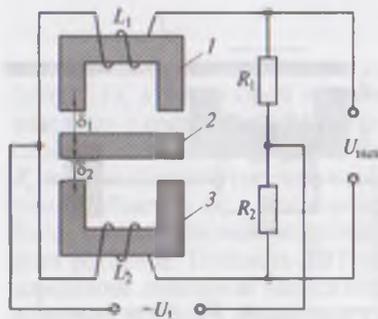


Рис. 7.12. Дифференциальный индуктивный датчик

действующие на якорь, в этом датчике взаимно компенсируются. При нейтральном (среднем) положении якоря зазоры между якорем 2 и полюсами сердечников одинаковы ($\delta_1 = \delta_2$), а поэтому индуктивные сопротивления обмоток обоих сердечников также одинаковы.

В этих условиях токи в резисторах R_1 и R_2 также равны и в течение каждого полупериода направлены встречно и взаимно компенсируются, поэтому напряжение на выходе датчика $U_{\text{вых}} = 0$. Но если якорь сместить, например, вверх, то зазор δ_1 уменьшится, а зазор δ_2 увеличится. При этом индуктивность L_1 и индуктивное сопротивление катушки сердечника 1 увеличатся, а индуктивность L_2 и индуктивное сопротивление катушки сердечника 3 уменьшатся. Это приведет к тому, что токи в резисторах окажутся неравными: $I_1 < I_2$. Падения напряжения на резисторах R_1 и R_2 также будут неравными, и на выходе датчика появится напряжение $U_{\text{вых}}$. Это напряжение тем больше, чем больше смещение якоря от нейтрального положения. Если же якорь 2 сместить вниз от нейтрального положения, то увеличится индуктивность L_2 и уменьшится индуктивность L_1 . При этом на выходе датчика вновь появится напряжение $U_{\text{вых}}$, но фаза этого напряжения окажется противоположной. Поэтому если на выходе датчика включить фазочувствительный выпрямитель, то полярность клемм на выходе этого выпрямителя будет зависеть от направления перемещения якоря. В этом случае датчик станет реверсивным и будет давать информацию не только о величине перемещения, но и о его направлении. Дифференциальные индуктивные датчики имеют еще и то преимущество, что на их точность не влияют колебания питающего напряжения.

Получили применение *индуктивные датчики плунжерного типа*, у которых сердечник в виде стального стержня, механически связанный с контролируемым объектом, может перемещаться внутри двух симметричных катушек (рис. 7.13).

Индуктивности этих катушек L_1 и L_2 зависят от положения сердечника (плунжера): при его положении точно посередине между катушками индуктивности катушек одинаковы, токи в резисторах R_1 и R_2 также одинаковы и напряжение на выходе датчика $U_{\text{вых}} = 0$. При перемещении якоря влево или вправо на выходе датчика появляется напряжение, величина и фаза которого зависят от величины и направления перемещения якоря.

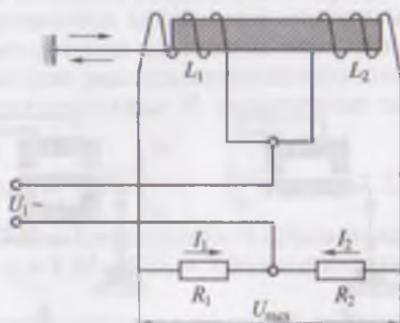


Рис. 7.13. Индуктивный датчик плунжерного типа

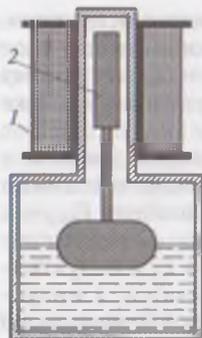


Рис. 7.14. Измерение уровня жидкости

Примером применения датчика плунжерного типа является контроль за уровнем жидкости в какой-либо емкости посредством поплавкового уровнемера (рис. 7.14). При этом, если жидкость химически агрессивна и емкость герметически закрыта, то контроль уровня жидкости можно вести с помощью поплавка с плунжером 2, находящемся внутри емкости, и катушек 1, находящихся вне этой емкости.

Возможность применения индуктивных датчиков для контроля размеров обрабатываемого (контролируемого) изделия иллюстрируется схемами на рис. 7.15. В конструкциях этих устройств измерение линейного размера контролируемого изделия сводится к измерению либо размеров воздушных зазоров δ_0 (рис. 7.15, а), либо зазоров δ_1 и δ_2 в дифференциальном индуктивном датчике повышенной чувствительности (рис. 7.15, б), либо площади зазора S_δ (рис. 7.15, в). При измерениях линейной величины, изменяющейся в широком диапазоне, целесообразно применение прибора с индуктивным дифференциальным датчиком плунжерного типа (7.15, г).

Получили применение *трансформаторные датчики*, принцип действия которых основан на изменении взаимной индукции катушек, расположенных на одном сердечнике (рис. 7.16). При перемещении якоря, т. е. при изменении зазора δ , меняется взаимная индуктивность катушек w_1 и w_2 , являющихся обмотками однофазного трансформатора. В результате напряжение на выходе вторичной катушки будет изменяться. Конструкции индуктивных и трансформаторных датчиков весьма схожи. Следует все же иметь в виду, что индуктивный датчик является параметрическим, а трансформаторный — генераторным.

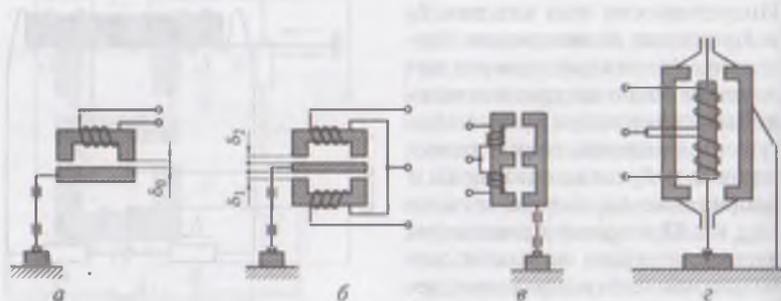


Рис. 7.15. Применение индуктивных датчиков для контроля размеров изделий

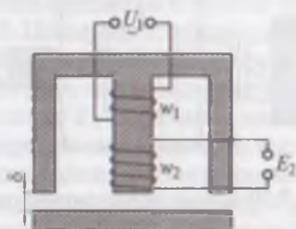


Рис. 7.16. Трансформаторный датчик

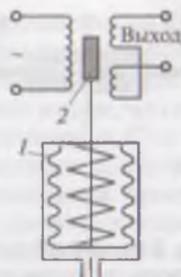


Рис. 7.17. Пневмоэлектрический преобразователь

В качестве примера применения трансформаторного датчика рассмотрим устройство *пневмоэлектрического преобразователя* типа ППЭ (рис. 7.17), предназначенного для преобразования давления газа в электрический сигнал. Под действием давления газа перемещается подвижное дно сильфона 1 и связанный с ним плунжер 2 дифференциально трансформаторного датчика плунжерного типа. Это приводит к изменению напряжения на выходе вторичной двухсекционной обмотки. Ход плунжера 5 мм, максимальная погрешность преобразования $\pm 1\%$.

Индуктивные и трансформаторные датчики широко применяются в замкнутых автоматических системах электропривода в качестве *датчиков обратной связи по положению*. По сравнению с датчиками другого принципа действия, эти датчики отличаются простотой конструкции и высокой надежностью.

7.4. Емкостные датчики

Для автоматического контроля толщины различных материалов и покрытий в процессе их изготовления применяют *емкостные датчики*. Принцип действия такого датчика основан на изменении емкости конденсатора. Электрическая емкость простейшего конденсатора из двух плоских пластин площадью S , разделенных зазором d , равна, Φ :

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d, \quad (7.23)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, например, воздуха; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — диэлектрическая постоянная.

Емкостный датчик для измерения толщины ленты из диэлектрика показан на рис. 7.18. Между обкладками 2 конденсатора с помощью роликов 1 протягивается контролируемая лента 3. Таким

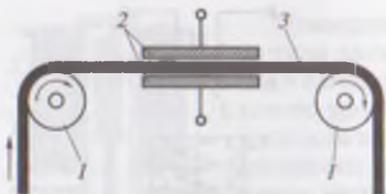


Рис. 7.18. Емкостный датчик для контроля толщины ленты

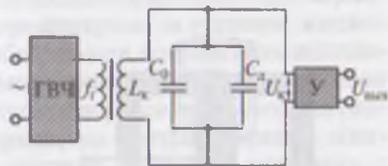


Рис. 7.19. Схема включения емкостного датчика

образом, датчик представляет собой плоский конденсатор с двухслойным диэлектриком, состоящим из воздуха и материала контролируемой ленты с диэлектрической проницаемостью ϵ_n . Емкость датчика равна

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d - (1 - 1/\epsilon_n) \delta}, \quad (7.24)$$

где S — площадь обкладок конденсатора, m^2 ; δ — толщина контролируемой ленты, м.

Чем меньше воздушная прослойка между обкладками, т. е. чем большее место между обкладками занимает контролируемый материал, тем выше чувствительность датчика.

Емкостные датчики работают на повышенной частоте переменного тока и получают питание от генератора высокой частоты (ГВЧ). Схема включения рассматриваемого датчика показана на рис. 7.19.

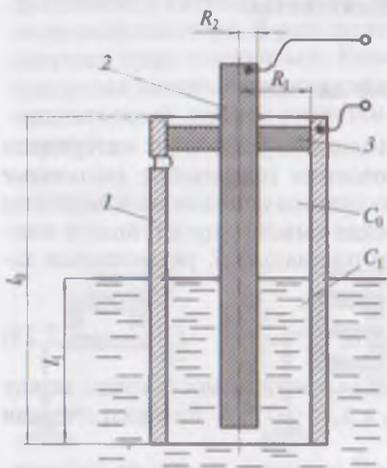


Рис. 7.20. Емкостный измеритель уровня

Такая схема называется резонансной и обеспечивает высокую чувствительность, а следовательно, и высокую точность контроля. Помимо емкости рассматриваемого датчика C_d , в схеме имеется подстроечный конденсатор C_0 . Посредством этого конденсатора контур, состоящий из индуктивности L_k и двух емкостей (C_0 и C_d), настраивается на частоту f_k , близкую частоте генератора f_g . Сигнал U_k , полученный на выходе датчика, подается на усилитель (У), а затем поступает в автоматическую систему управления электроприводом.

На рис. 7.20 показано устройство емкостного датчика для измерения уровня жидких или сы-

пучих неэлектропроводящих материалов. Металлический электрод 2 жестко соединен с полым цилиндром 1 через изоляционное кольцо 3. Цилиндр 1 заполнен жидкостью, обладающей свойством диэлектрика. При анализе конструкции датчика видим, что он состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов C_1 и C_0 . Конденсатор C_1 образован нижней частью электрода 2, стенками цилиндра 1 ниже уровня жидкости и заполняющим пространство между ними диэлектриком — жидкостью, уровень которой контролируется. Конденсатор C_0 образован непогруженной в жидкость верхней частью электрода 2, стенками цилиндра 1 выше уровня жидкости и заполняющим пространство между ними воздухом.

Емкость рассматриваемого датчика определяется выражением

$$C = C_1 + C_0 = \frac{2\pi[\epsilon_1 l_1 + (l_0 - l_1)\epsilon_0]}{\ln(R_1/R_2)}, \quad (7.25)$$

где ϵ_1 и ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость жидкости и воздуха соответственно; l_1 , l_0 , R_1 и R_2 — размеры датчика, показанные на рис. 7.20.

7.5. Датчики температуры

Датчики температуры предназначены для получения и передачи электрического сигнала, являющегося функцией температуры какого-либо объекта, т.е. для дистанционного измерения температуры. Применяют два вида температурных датчиков: терморезисторы (параметрические датчики) и термопары (генераторные датчики).

Терморезисторы бывают металлические и полупроводниковые. Температурный коэффициент сопротивления чистых металлов, применяемых в качестве терморезисторов (медь, платина), положительный, а поэтому с ростом температуры электрическое сопротивление такого датчика увеличивается. Датчик (рис. 7.21) состоит из чувствительного элемента 1 (собственно терморезистора) в виде тонкой медной или платиновой проволоки, намотанной на стеклянную пластину. Чувствительный элемент 1 проводами 2 присоединен к клеммам 5. Все перечисленные элементы помещены в корпус 3 — металлическую трубку и изолированы от ее стенок фарфоровой изоляцией. Для измерения (контроля) температуры

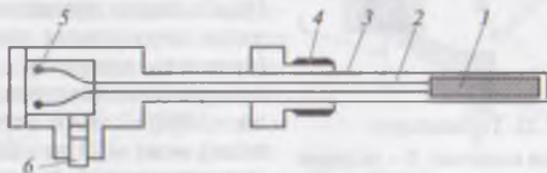


Рис. 7.21. Терморезистор

корпус 3 вставляют внутрь технологического объекта и крепят к его стенке посредством штуцера 4. Провода, присоединяемые к клеммам 5 датчика, пропускают через штуцер 6. Длина такого датчика (монтажная длина) может быть от 80 до 3150 мм. Пределы измерения температуры: платиновые терморезисторы — от -200 до $+700$ °С; медные терморезисторы — от -50 до $+180$ °С.

Полупроводниковые терморезисторы (термисторы) имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, а поэтому с ростом температуры их сопротивление уменьшается. Их чувствительность к изменению температуры на порядок выше, чем у чистых металлов.

Серийно выпускают медно-марганцевые (ММТ) и кобальто-марганцевые (КМТ) термисторы. Их изготавливают в виде бусинок, дисков, стерженьков (рис. 7.22). Термисторы применяют для измерения температур в диапазоне от -70 до $+250$ °С.

Ток, проходящий через термистор, нагревает его, что ведет к уменьшению сопротивления термистора, а следовательно, к дальнейшему росту тока. Чтобы исключить это явление, последовательно с термистором включают резистор $R_{доб}$, сопротивление которого мало зависит от температуры.

Термопара состоит из двух спаянных одним концом разнородных проводников. Другие концы этих проводников соединены через измерительную схему.

Спаянные концы помещают в среду, температуру которой необходимо контролировать. При наличии разности температур спая и концов, присоединенных к измерительной схеме, в цепи термопары появляется термо-

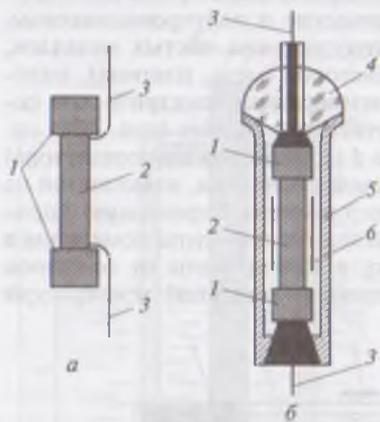


Рис. 7.22. Термисторы:

1 — платиновые колпачки; 2 — полупроводник; 3 — токогводы; 4 — стеклянный изолятор; 5 — чехол; 6 — фольга

ЭДС, величина которой находится в определенной функциональной зависимости от разности температур: чем больше разность температур, тем больше термо-ЭДС. Конструктивно термопара устроена аналогично терморезистору (см. рис. 7.21). Диапазон измеряемых температур зависит от вида термопары. Наибольшее применение получили термопары типов: ТХА (хромель-алюмель), диапазон измеряемых температур от -20 до $+1000$ °С; ТХК (хромель-копель) — от -50 до $+600$ °С; ТПР (платинородий-платина) — от -20 до $+1800$ °С.

Особенность использования термопар для измерения температур состоит в необходимости *компенсации* температуры холодных концов термопары, т.е. температуры в месте ввода термо-ЭДС в измерительную схему или месте установки измерительного прибора. Дело в том, что градуировка термопар выполняется в расчете на температуру холодного спая (места установки прибора) $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$. В реальных условиях эта температура не равна 0°C . Если температура холодного спая известна, то ее добавляют к температуре измеренной термопарой, или к величине термо-ЭДС следует добавить поправку, соответствующую термо-ЭДС при температуре холодного спая, взятую из градуировочной кривой. Если термо-ЭДС вводится в измерительную схему, то поправка учитывается при настройке этой схемы. Если же термо-ЭДС вводится в измерительный прибор, то присоединение этого прибора к термопаре выполняется специальными компенсационными проводами.

7.6. Контактные датчики давления и уровня дискретного действия

Особенностью рассматриваемых датчиков является то, что они фиксируют лишь крайние значения измеряемого параметра, обычно минимальное и максимально допустимые, т.е. действуют дискретно (релейно).

Датчики давления применяют в компрессорных и насосных установках для автоматического включения-отключения установки в зависимости от давления. Такой датчик состоит из чувствительной части, реагирующей на контролируемый параметр — давление газа или жидкости, и исполнительной контактной части. На рис. 7.23 показано устройство датчика давления *манометрического типа*. Чувствительная часть датчика не отличается от трубчатого манометра и выполнена на основе трубчатой одновитковой пружины 1, в которую через нижний конец поступает рабочее вещество — газ или жидкость. Другой ее конец запаян, поэтому при повышении давления газа или жидкости в этой трубчатой пружине происходит упругая деформация и она разгибается. При этом свободный конец трубки перемещается и через тягу 2 и передаточный меха-

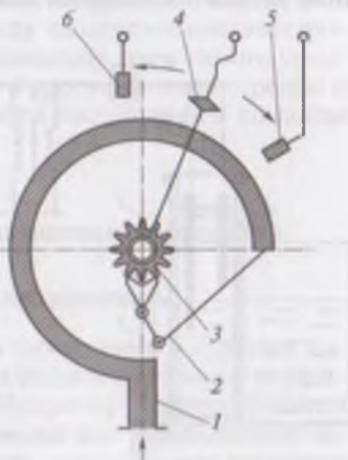


Рис. 7.23 Датчик давления манометрического типа

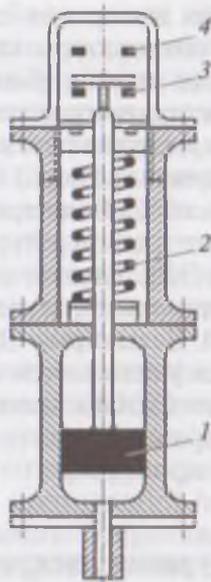


Рис. 7.24. Датчик давления поршневого типа

При давлении, превышающем максимально допустимое, замыкаются контакты 4, вызывая отключение электропривода. При понижении давления поршень под действием пружины 2 опускается и при достижении давлением минимально допустимого значения замыкаются контакты 3, вызывая включение электропривода.

Используют также датчики давления, в которых чувствительным элементом является сильфон (см. рис. 7.17).

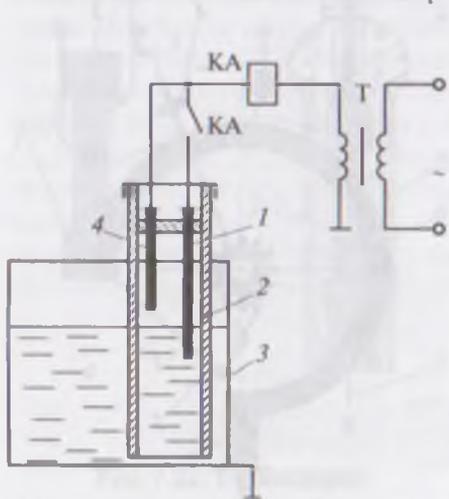


Рис. 7.25. Уровнемер токопроводящей жидкости

низ 3 приводит в движение подвижный контакт 4. Контактная система датчика регулируется таким образом, что при давлении, превышающем максимально допустимое, замыкаются подвижный 4 и неподвижный 5 контакты, что вызывает отключение компрессора или гидронасоса. При понижении давления до минимально допустимого значения подвижный контакт 4 замыкается с неподвижным контактом 6, что вызывает включение компрессора или гидронасоса.

Получил применение датчик давления *поршневого типа* (рис. 7.24), в котором рабочее вещество, поступив в датчик, своим давлением перемещает поршень 1 вверх, сжимая возвратную пружину 2.

При давлении, превышающем максимально допустимое, замыкаются контакты 4, вызывая отключение электропривода. При понижении давления поршень под действием пружины 2 опускается и при достижении давлением минимально допустимого значения замыкаются контакты 3, вызывая включение электропривода.

Используют также датчики давления, в которых чувствительным элементом является сильфон (см. рис. 7.17).

Датчики уровня контактного типа применяют в насосных установках, закачивающих жидкость в резервуар. Если жидкость электропроводна (например, солевой раствор), то возможно использование *электродного* датчика уровня, погруженного в резервуар 3 (рис. 7.25). При достижении уровнем жидкости значения, превышающего предельно допустимое, электрод 4, вставленный в трубку 2, оказывается погруженным в жидкость и в цепи вторичной обмотки трансформатора Т появляется ток. Проходя по обмотке реле КА, этот ток вызывает его срабаты-

вание. Одни контакты этого реле (на рисунке не показаны) вызовут отключение электропривода, а другие контакты КА, замкнувшись, ставят реле на подпитку через удлиненный электрод *1*. Поэтому когда уровень жидкости убывает реле КА остается включенным. Лишь после того как уровень жидкости станет меньше минимально допустимого и электрод *1* потеряет контакт с жидкостью, цепь тока разомкнется, реле КА отпустит и его контакты подпитки разомкнутся. При этом электропривод насоса будет включен и уровень жидкости начнет повышаться.

Если жидкость, закачиваемая в резервуар, не электропроводна, а резервуар имеет открытую конструкцию, то для контроля уровня жидкости применяют *поплачковое реле* (рис. 7.26). Чувствительным элементом этого реле является поплавок *1*, подвешенный на гибком тросе, перекинутом через колесо *3* с желобом для этого троса. На противоположном конце троса подвешен груз *6*, уравнивающий поплавок. На тросе закреплены упорные кольца *2* и *5*.

При повышении уровня поплавок *1* поднимается и при достижении им максимально допустимого значения упорное кольцо *2* поднимает левую сторону «коромысла» *4*. Подвижные контакты *8* замыкают контакты *9* и выдают команду на отключение электропривода. С понижением уровня до минимально допустимого упорное кольцо *5* поворачивает коромысло *4* против часовой стрелки и замыкает контакты *7*, что сопровождается поступлением команды на включение двигателя насоса.

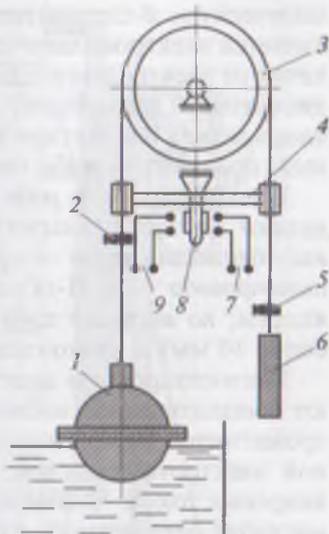


Рис. 7.26. Уровнемер поплавковый

7.7. Исполнительные электромагнитные устройства

7.7.1. Исполнительные электромагниты

Электромагниты, применяемые для приведения в действие каких-либо регулирующих элементов или создания силового воздействия, называют исполнительными. Например, исполнительные электромагниты могут быть использованы для перемещения заслонки трубопровода, поворота вентиля, перемещения шестерни в коробке переключения передач и т.п. Таким образом, электромагнит осуществляет преобразование электрической энергии в ме-

ханическую, а следовательно, он, так же как и электродвигатель, является электромеханическим преобразователем энергии. Но в отличие от электродвигателей электромагниты являются устройствами дискретного (релейного) действия, так как их подвижная часть — якорь может находиться лишь в одном из двух устойчивых состояний: притянутом либо отпущенном.

В зависимости от *рода тока в катушке* электромагниты подразделяют на электромагниты постоянного и переменного тока; *по виду движения якоря* — прямоходовые и клапанные; *по форме магнитопровода* — с П-образным, Ш-образным и цилиндрическим якорем; *по величине хода якоря* — короткоходовые (ход якоря не более 10 мм) и длинноходовые (ход якоря до 150 мм).

Магнитопроводы электромагнитов постоянного тока выполняют монолитными из магнитно-мягкой стали. Магнитопроводы электромагнитов переменного тока делают шихтованными из листовой электротехнической стали, что позволяет снизить потери от вихревых токов. Чтобы избавиться от вибраций якоря, в электромагнитах переменного тока в торце якоря размещают короткозамкнутый виток (см. рис. 6.10).

Основными параметрами электромагнита являются ход якоря и тяговое усилие на якорь. Электромагниты переменного тока при одинаковых габаритах с электромагнитами постоянного тока развивают тяговое усилие в два раза меньше. Рассмотрим устройство и работу некоторых видов исполнительных электромагнитов.

Электромагнитный тарельчатый клапан (рис. 7.27) применя-

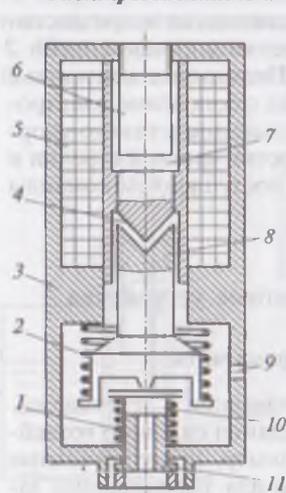


Рис. 7.27. Электромагнитный клапан

ют для управления потоком жидкости. Он состоит из прямоходового электромагнита постоянного тока с коническим стопом и запорного устройства, расположенных в общем корпусе 3. При отключенной катушке электромагнита тарель 10 действием запорной пружины 2 прижата к соплу 11 и поток жидкости перекрыт. При подаче напряжения на обмотку 5 якорь 8 втягивается, сжимая запорную пружину 2, и освобождает тарель 10, которая под действием пружины 1 и давления жидкости поднимается и открывает сопло 11. Жидкость заполняет полость клапана и выходит через отверстие 9. Для закрытия клапана необходимо отключить обмотку электромагнита. Для регулировки величины хода клапана в пределах немагнитного зазора 7 служит регулировочный винт 6, фиксирующий положение конического стопа 4.

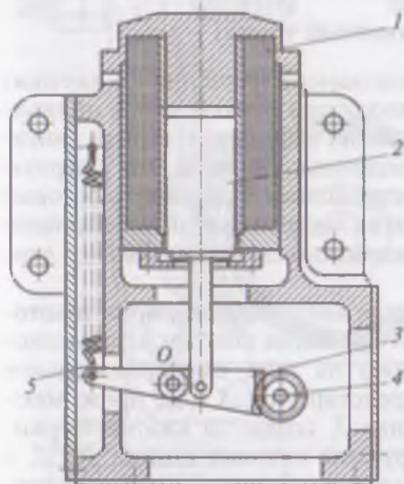


Рис. 7.28. Электромагнит с преобразованием движения

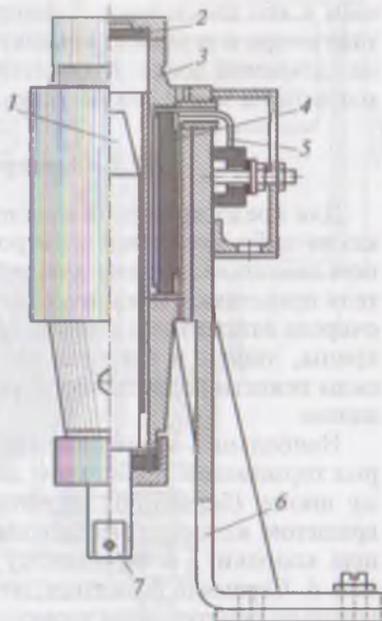


Рис. 7.29. Электромагнит длинноходовой

Электромагнит с преобразованием движения. При необходимости получить на выходе электромагнита *вращательное движение* в пределах ограниченного угла электромагнит дополняют передаточным механизмом (рис. 7.28), состоящим из зубчатого сектора 3 и зубчатого колеса 4. Здесь применен прямоходовой электромагнит постоянного тока с плоским стопом с сердечником цилиндрической формы. При подаче напряжения на катушку 1 якорь 2 втягивается и посредством тяги, преодолевая противодействие пружины 5, поворачивает сектор 3 вокруг оси O . Сектор 3, находясь в зацеплении с зубчатым колесом 4, вызывает его поворот на угол, определяемый величиной хода якоря 2. При этом пружина 5 растягивается. При отключении катушки 1 действием пружины 5 сектор 3 возвращается в исходное положение, вновь поворачивая колесо 4, но теперь уже в обратном направлении.

Рассмотренные электромагниты являются короткоходовыми. На рис. 7.29 показана конструкция **длинноходового электромагнита** постоянного тока, применяемого для отпирания дверей шахты лифта.

При подключении катушки 4 якорь 1 под действием тягового усилия перемещается вверх вместе с устройством, прикреплен-

ным к его хвостовику 7. Амортизационная прокладка 2 смягчает удар якоря о верхнюю крышку 3. Выводы 5 катушки расположены на клеммной доске. Кронштейн 6 служит для крепления электромагнита на месте его монтажа.

7.7.2. Электромагнитный тормоз

Для предотвращения самопроизвольного вращения (движения) каких-либо элементов электропривода при отключенном приводном двигателе, а также для ограничения свободного выбега двигателя применяют механические колодочные тормоза. Это в первую очередь относится к подъемным устройствам, например мостовые краны, лифты и т.п., так как в этих механизмах под действием силы тяжести подвешенного груза возможно самопроизвольное движение.

Наибольшее применение получили *колодочные тормоза*, в которых торможение происходит за счет прижатия колодок к тормозному шкиву (барбану), закрепленному на валу, самопроизвольное вращение которого необходимо предотвратить. Сила, прижимающая колодки 1 к тормозному шкиву 3, создается сжатой пружиной 6. Стремясь разжаться, эта пружина сжимает стойки 2 и 7, к которым прикреплены тормозные колодки 1 (рис. 7.30). Такой тормоз называют нормально замкнутым колодочным тормозом.

При включении приводного двигателя должно произойти растормаживание, для чего необходимо сжать пружину 6 и освободить тормозные колодки. В рассматриваемом тормозном устройстве для этого необходимо приложить силу F к рычагу 4 (стрелка на рисунке). При этом пружина окажется сжатой между стойкой 7 и

запорной шайбой 5 и колодки 1 освободят тормозной шкив 3. В зависимости от того, чем будет создано растормаживающее усилие F , тормоза бывают электромагнитными, гидравлическими или пневматическими.

В электроприводе применяют, в основном, *электромагнитные тормоза*, в которых растормаживающее усилие создается за счет тягового усилия на якоре 5 электромагнита 4 (рис. 7.31). Поэтому одновременно с включением приводного двигателя включается обмотка электромагнита и тяговым усилием на его якоре раздвигаются стойки 3, освобождая

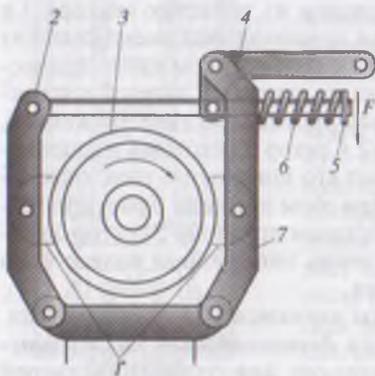


Рис. 7.30. Устройство колодочного тормоза

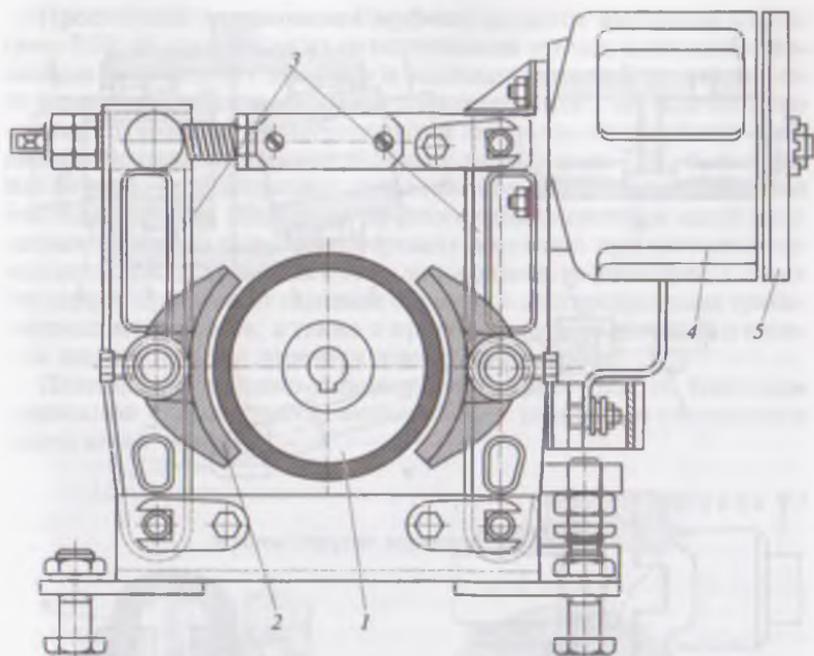


Рис. 7.31. Электромагнитный тормоз

от колодок 2 шкив 1. В тормозах используют как электромагниты постоянного (серия тормозов ТКП), так и переменного тока (серия тормозов ТКТ).

7.8. Муфты электроприводов

7.8.1. Механические муфты

Муфты электроприводов предназначены для механического соединения валов в целях передачи вращательного или тормозного момента от одного вала к другому. Муфты применяют также для компенсации некоторых погрешностей, возникших при сборке, монтаже электродвигателя или в процессе эксплуатации электропривода, например нарушение соосности валов, возникновение вибраций и т. п. Иногда муфты используют в качестве предохранительных элементов для прекращения передачи движения в случае нарушения какого-либо параметра, например превышение вращающим моментом предельно допустимого значения или увеличение частоты вращения ведущего вала сверхпредельно допустимого.

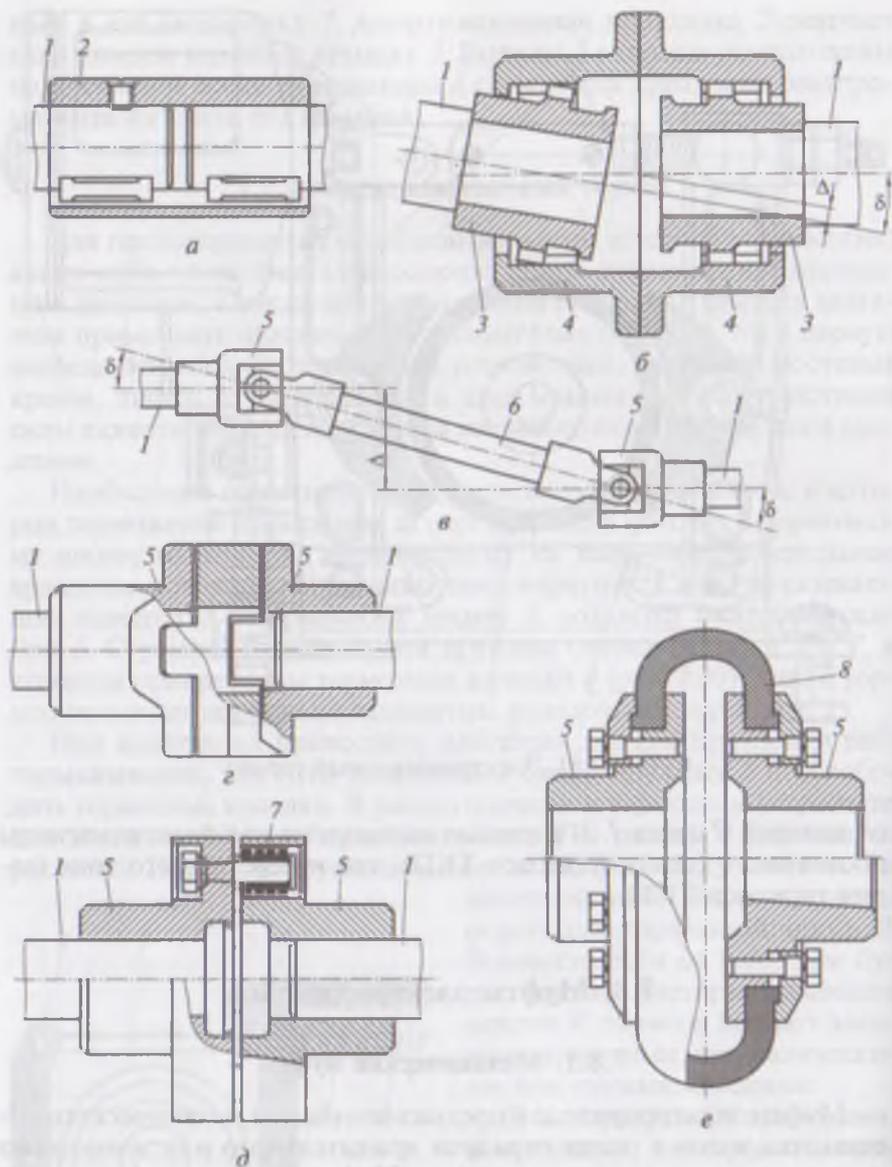


Рис. 7.32. Механические муфты для электроприводов:

1 — соединяемые валы; 2 — втулка муфты; 3 — втулки с наружными зубьями; 4 — обоймы с внутренними зубьями; 5 — полумуфты; 6 — промежуточный вал; 7 — резиновая втулка; 8 — торообразная оболочка; Δ — поперечное смещение валов; δ — угловое смещение валов

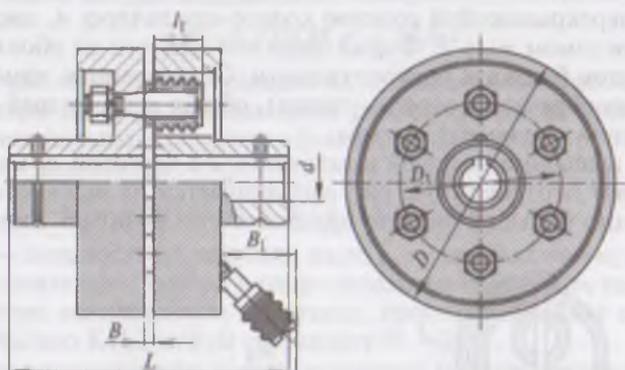
мого значения. Муфты электроприводов разделяют на механические, гидродинамические, самоуправляющиеся и электромагнитные.

Простейшей *механической муфтой* является *втулочная муфта* (рис. 7.32, а), состоящая из металлической втулки, имеющей шпоночные соединения с ведущим и ведомым валами. Эта муфта имеет ограниченное применение в электроприводе, так как не компенсирует возможных погрешностей монтажа, не ослабляет вибраций. Жесткая подвижная *зубчатая муфта* (рис. 7.32, б) в отличие от втулочной допускает расположение сопрягаемых валов под некоторым углом. *Шарнирные муфты с промежуточным валом* (карданная передача) допускают передачу вращения при непараллельных валах, расположенных к тому же на разных уровнях (рис. 7.32, в). Эту муфту применяют главным образом в электроприводах транспортных механизмов, а также в приводе прокатных станов в качестве шпинделей для передачи движения на валки.

Плавающая кулачково-дисковая муфта (рис. 7.32, г), благодаря подвижной средней части, компенсирует некоторую несоосность сопрягаемых валов.

Таблица 7.5

Муфты упругие втулочно-пальцевые



Типоразмер	d , мм	D , мм	l , мм	B , мм	B_1 , мм	l_1 , мм	n_{\max} об/мин	M , Н м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²
МУВП1-22	22	100	104	1-4	28	25	5600	54	2,14	0,002
МУВП1-28	28	120	125	1-5	42	32	4750	127	4,40	0,006
МУВП1-32	32	140	165	1-5	42	32	4000	235	7,33	0,014
МУВП1-38	38	140	165	1-5	42	32	4000	235	6,97	0,014
МУВП1-42	42	170	226	2-6	55	42	3350	440	13,27	0,039
МУВП1-45	45	170	226	2-6	55	42	3350	440	12,93	0,039
МУВП1-48	48	190	226	2-6	55	42	3000	685	18,04	0,064
МУВП1-55	55	190	226	2-6	55	42	3000	685	17,12	0,064
МУВП1-60	60	220	286	2-6	55	42	2650	1080	27,95	0,13
МУВП1-65	65	220	286	2-6	55	42	2650	1080	27,17	0,13
МУВП1-70	70	250	288	2-8	70	58	2240	1960	38,43	0,24
МУВП1-75	75	250	288	2-8	70	58	2240	1960	37,29	0,24
МУВП1-80	80	320	350	2-10	85	75	1700	3920	83,23	0,81

В упругой втулочно-пальцевой муфте передача вращения происходит через упругие резиновые втулки, надетые на металлические пальцы (рис. 7.32, д). Такая муфта обладает компенсирующими свойствами: устраняет последствия небольшой несоосности валов, возникшей из-за погрешностей монтажа и прогиба тяжелых валов под действием собственной массы, не передает вибрации ведущего вала на ведомый. Из механических муфт в электроприводе эта муфта получила наибольшее применение (табл. 7.5).

Компенсирующими свойствами обладает муфта с торообразной эластичной оболочкой (рис. 7.32, е); некоторая сложность и недостаточная надежность ограничили использование этой муфты в электроприводе.

7.8.2. Гидродинамическая муфта

В электроприводе получила применение гидродинамическая муфта, в которой (рис. 7.33, а) вращающий момент передается от ведущего вала 1 к ведомому 5 посредством жидкости (обычно масла) под давлением. Рабочее колесо 2 типа крыльчатки гидронасоса, закрепленное на ведущем валу 1, образует герметичный кожух 3, перекрывающий соосное колесо-крыльчатку 4, закрепленное на ведомом валу 5. Форма лопастей каждого из обоих колес-крыльчаток близка к полуокружности. Образованная этими колесами торообразная полость (улитка), общая для ведущей и ведомой частей, заполнена маслом.

При вращении ведущей крыльчатки 2 с частотой n_1 масло под давлением центробежных сил выталкивается на периферию, при достаточно большой частоте вращения оно начинает циркулиро-

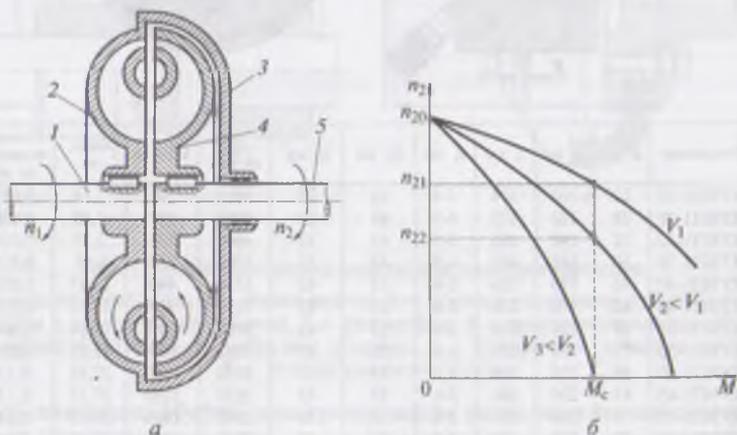


Рис. 7.33. Гидродинамическая муфта

вать (на рисунке показано стрелками) и, оказывая давление на ведомую крыльчатку 4, силами трения приводит ее во вращение с частотой n_2 . При этом частота вращения ведомой крыльчатки всегда остается меньше частоты вращения ведущей. Другими словами, ведомая крыльчатка всегда вращается асинхронно относительно ведущей. Непременное отставание ведомой крыльчатки от ведущей вытекает из самого принципа работы гидродинамической муфты. Если предположить, что обе крыльчатки будут вращаться одинаково, то прекратится трение частиц масла о стенки ведомой крыльчатки 4. Это исключит воздействие ведущей крыльчатки на ведомую и последняя начнет отставать. В итоге передача вращающего момента от ведущей крыльчатки к ведомой восстановится.

Гидродинамическая муфта обеспечивает плавное ускорение ведомому валу, так как связь между полумуфтами «эластичная». Кроме того, при малой частоте вращения ведущая крыльчатка может вращаться вхолостую, не приводя в движение ведомую крыльчатку, и лишь достигнув достаточной частоты вращения (создав достаточное давление масла), ведущая крыльчатка передает вращающий момент ведомой. Таким образом, в рассматриваемой муфте имеют место потери мощности:

$$\Delta P = 0,105(M_1 n_1 - M_2 n_2),$$

но, так как моменты на ведущем M_1 и ведомом M_2 валах одинаковы, потери ΔP обусловлены лишь разностью частот вращения и пропорциональны скольжению (аналогично потерям в роторе асинхронного двигателя):

$$\Delta P = 0,105 M_1 (n_1 - n_2) = 0,105 M_1 n_1 s_m = P_1 s_m, \quad (7.26)$$

где P_1 — мощность на ведущем валу; s_m — скольжение муфты.

Следовательно, потери в гидродинамической муфте, так же как и в роторе асинхронного двигателя, пропорциональны скольжению. Обычно КПД муфты составляет 95—98 %.

Гидродинамическая муфта допускает регулирование частоты вращения ведомого вала при неизменной частоте вращения ведущего вала. Регулирующим параметром является объем рабочей жидкости V , заполняющей полость муфты. При полностью заполненной полости муфты V_1 частота вращения ведомого вала при заданном статическом моменте нагрузки M_c равна n_{21} (рис. 7.33, б). С уменьшением объема заполнения $V_2 < V_1$ частота вращения ведомого вала уменьшится до значения n_{22} и т.д.

7.8.3. Самоуправляющиеся муфты

Эти муфты выполняют соединение или разъединение валов при достижении каким-либо параметром заранее заданного значения: максимальной или минимальной частоты вращения, изменения

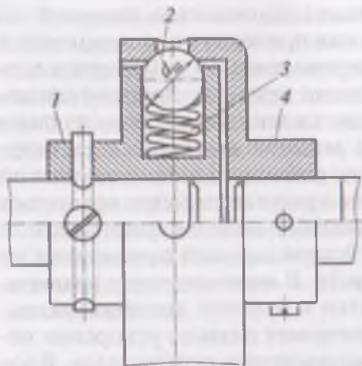


Рис. 7.34. Предохранительная муфта

жесткости пружин 3. Если статический момент на ведомой полумуфте превысит максимально допустимое значение, шарики проскальзывают и ведомая полумуфта останавливается. При снижении нагрузки до допустимого значения шарики вновь западают в отверстия на ведомой полумуфте и передача вращающего момента возобновляется. Предельное значение статического момента нагрузки возрастает с увеличением упругости пружин 3.

Центробежная муфта обеспечивает передачу вращающего момента при частотах вращения ведущего вала, превышающих установленное значение. Передача вращающего момента в таких муфтах происходит через колодки 1, подпираемые пружиной 2 (рис. 7.35, а). При небольших частотах вращения колодки проскальзывают, так

направления вращения, внезапной остановки механизма и т.п.

Предохранительная муфта прекращает передачу вращающего момента на ведомый вал, если нагрузка на нем превысит максимально допустимое значение. Это происходит благодаря подпружиненным металлическим шарикам 2, частично запавшим в отверстия на ведомой полумуфте, обеспечивая этим механическое соединение ведущей 1 и ведомой 4 полумуфт (рис. 7.34). Требуемая сила прижатия шариков устанавливается подбором

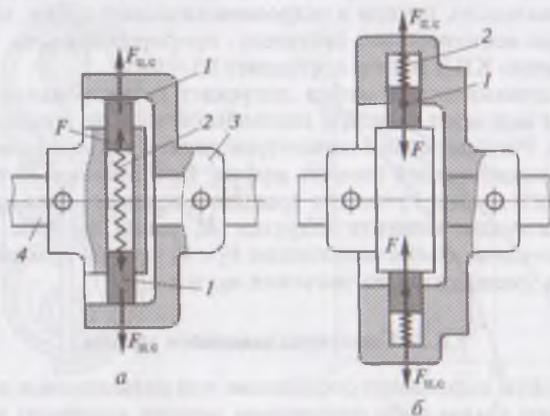


Рис. 7.35. Центробежные муфты

как сила прижатия колодок к внутренней поверхности цилиндрической части ведомой полумуфты за счет пружины недостога. При этом передачи движения на ведомую полумуфту 3 не происходит. По мере увеличения частоты вращения ведущей полумуфты 4 центробежная сила, действующая на колодки 1, усиливается и при установленной минимально допустимой частоте вращения центробежные силы

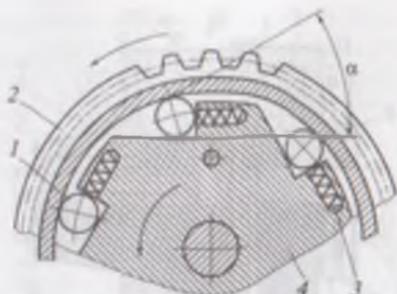


Рис. 7.36. Обгонная муфта

на колодках $F_{\text{ц.с}}$, складываясь с силой прижатия колодок пружинной F , обеспечивают сцепление этих колодок с ведомой полумуфтой, достаточное для передачи вращающего момента.

Муфта, устройство которой показано на рис. 7.35, б, передает вращение на ведомый вал лишь при частоте вращения, не превышающей установленного значения. Здесь центробежные силы $F_{\text{ц.с}}$ направлены встречно силам F , создаваемым пружинами. Поэтому при частоте вращения, превышающей максимально допустимое, результирующая сила прижатия колодок ($F - F_{\text{ц.с}}$) уменьшается настолько, что колодки проскальзывают и передача вращающего момента на ведомую полумуфту прекращается. При снижении частоты вращения до допустимого значения сила прижатия колодок увеличивается и передача вращательного движения на ведомый вал возобновляется.

Обгонная муфта обеспечивает передачу вращения лишь в одном направлении. Как показано на рис. 7.36, если ведущая полумуфта 2 вращается против часовой стрелки, то происходит заклинивание шариков (роликов) 1 в угловых зазорах и через них происходит передача движения на ведомую полумуфту 4. Если же ведущая полумуфта 2 начнет вращаться по часовой стрелке, то шарики (ролики) 1, преодолев сопротивление пружин 3, выйдут из угловых зазоров и механическая связь между полумуфтами исчезнет. Для надежной работы обгонной муфты необходимо, чтобы угол заклинивания $\alpha = 7 + 10^\circ$. Пружины 3 обеспечивают быстрое действие муфты при переходе к прежнему направлению частоты вращения.

Самоуправляющиеся муфты применяют главным образом в электроприводах небольшой мощности.

7.8.4. Электромагнитные муфты

Основное свойство электромагнитных муфт — это возможность автоматического и дистанционного управления электроприводами. Ниже рассматривается три вида электромагнитных муфт, получивших наибольшее применение в автоматизированном элект-

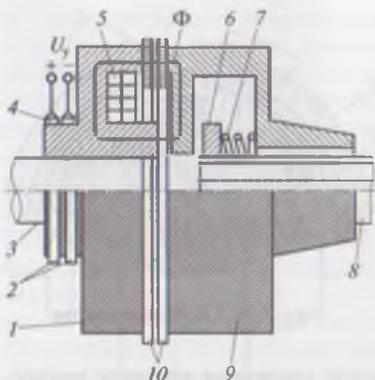


Рис. 7.37. Электромагнитная фрикционная муфта

Устройство электромагнитной фрикционной муфты показано на рис. 7.37. Через контактные кольца 2 и щетки 4 напряжение управления муфтой U_y подводится к катушке 5. Возникший при этом ток в катушке наводит в магнитной системе муфты поток Φ . Замыкаясь через якорь, роль которого выполняет ведущая полумуфта 9, этот поток создаст на нем тяговое усилие. Крепление якоря (ведущая полумуфта) на валу таково, что оно допускает небольшое осевое перемещение. В результате якорь 9, преодолев сопротивление возвратной пружины 7, упирающейся в кольцо 6, окажется притянутым к сердечнику 1 (ведущая полумуфта) и поверхности фрикционных дисков 10 сомкнутся. При этом вращение с ведущего вала 8 передается на ведомый вал 3 за счет сил трения между фрикционными дисками. При необходимости отключить муфту следует снять напряжение с контактных щеток. При этом под действием пружины 7 якорь сместится вправо, поверхности фрикционных дисков разомкнутся и вращение ведомого вала прекратится. Для увеличения передаваемого вращающего момента в некоторых конструкциях используют несколько пар фрикционных дисков, количество которых тем больше, чем больше передаваемый момент.

Основной недостаток рассмотренной муфты — наличие скользящего контакта «щетки — контактные кольца», что снижает надежность муфты.

Бесконтактная электромагнитная фрикционная муфта состоит из трех основных элементов (рис. 7.38). Неподвижный элемент 2 с катушкой 3 посажен на ведомый вал через шарикоподшипник 1. Благодаря такой конструкции при передаче вращения на ведомый вал эта часть муфты остается неподвижной, что позволяет катушку 3 непосредственно включить в сеть, не применяя скользящих контактов, как это сделано в контактной фрикционной

роприводе: фрикционная (контактная и бесконтактная), порошковая и асинхронная (муфта скольжения).

В **контактной электромагнитной фрикционной муфте** передача вращающего момента с ведущей полумуфты на ведомую происходит за счет сил трения между контактирующими поверхностями фрикционных дисков, из которых один расположен на ведущей полумуфте, а другой — на ведомой. Эти диски изготовлены из материала с высоким коэффициентом трения.

Устройство электромагнитной

муфте (см. рис. 7.37). Элемент 5 представляет собой ведущую полумуфту, посаженную на ведущий вал посредством шпонки 6. Конструкция этого элемента аналогична ведущей полумуфте контактной фрикционной муфты, т.е. он имеет возможность небольшого осевого перемещения, преодолевая сопротивление возвратной пружины (на рис. 7.38 не показана). Элемент 4 рассматриваемой муфты является промежуточным, способным благодаря шпонке 7 передать вращение на ведомый вал,

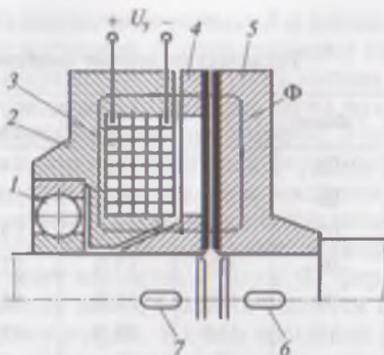


Рис. 7.38. Бесконтактная электромагнитная фрикционная муфта

т.е. этот элемент представляет собой ведомую полумуфту. При включении катушки 3 в сеть в магнитной системе муфты, составленной из трех элементов, возбуждается магнитный поток Φ , замыкающийся по контуру Φ и создающий на ведущей полумуфте 5, являющейся якорем электромагнита, тяговое усилие, которое смещает эту полумуфту влево вдоль ведущего вала. При этом фрикционные диски смыкаются и вращающийся момент с ведущего вала передается на ведомый вал. Чтобы магнитный поток не замыкался в промежуточном элементе 4, что нарушило бы работу муфты, этот элемент имеет «окна» по периметру цилиндрической катушки 3. При снятии напряжения питания катушки 3 тяговое усилие исчезает и под действием возвратной пружины (не показанной на рисунке) элемент 5 смещается вправо, при этом фрикционные диски размыкаются.

Для уменьшения магнитных потерь во вращающихся частях бесконтактной муфты эти части иногда делают шихтованными. Бесконтактная электромагнитная муфта сложнее и дороже контактной, но отсутствие в ней скользящего контакта делает ее более надежной.

Промышленность выпускает электромагнитные фрикционные муфты серии ЭИТМ. Полная номенклатура электромагнитных муфт этой серии содержит 10 габаритов (от 0,5 до 14) в нескольких конструктивных модификациях: с контактным токоподводом ЭИТМ...2; с бесконтактным токоподводом ЭИТМ...4; с бесконтактным токоподводом на подшипниках ЭИТМ...4П. Муфты рассчитаны на включение в сеть постоянного тока напряжением 24 В и имеют исполнение по степени защиты IP00.

Технические данные электромагнитных муфт трех модификаций серии ЭИТМ приведены в табл. 7.6, где $M_{ном}$ — передаваемый вращающийся момент; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения; n_{max} —

Технические данные электромагнитных муфт серии ЭИТМ

Габарит	$M_{\text{ном}}$ Н·м	P_{20} , Вт ЭИТМ...2	P_{20} , Вт ЭИТМ...4	P_{20} , Вт ЭИТМ...4П	$n_{\text{ном}}$ об/мин	$n_{\text{тах}}$ об/мин
05	16	11,6	14,3	22,2	1500	4500
06	25	13,5	20,4	21,5	1500	4000
07	40	17,6	24,0	29,0	1500	3500
08	63	17,0	21,9	44,3	1000	3000
09	100	30,0	42,9	47,1	1000	2800
10	160	39,0	43,9	60,1	1000	2500
11	250	41,0	55,4	70,6	1000	2000
12	400	56,0	83,5	96,5	750	1700
13	630	68,5	89,0	122,3	750	1500
14	1000	86,4	122,4	140,0	750	1350

предельно допустимая частота вращения; P_{20} — мощность, потребляемая катушкой электромагнита в холодном состоянии (при температуре 20 °С). Из приведенных в таблице значений мощности P_{20} видим, что потребляемая бесконтактными муфтами мощность больше, чем у контактной муфты, что объясняется наличием двух воздушных зазоров в бесконтактных муфтах (см. рис. 7.38).

Принцип действия *электромагнитной порошковой муфты* основан на свойстве жидкого или порошкообразного ферромагнитного вещества (наполнителя муфты) под действием магнитного поля увеличивать свою вязкость и прочно прилипать к стенкам намагниченных элементов. В принципе порошковая муфта является фрикционной. Однако, в отличие от последней, передача вращающего момента от ведущей части муфты к ведомой в порошковой муфте происходит не за счет

сил трения сжимаемых поверхностей, а за счет повышения вязкости ферромагнитного наполнителя муфты.

На рис. 7.39 показано устройство контактной порошковой муфты. Ведущая часть муфты состоит из зубчатого колеса 1, поллого ферромагнитного стального цилиндра 3 и крышки 7. Ведомая часть муфты состоит из ведомого вала 9, на котором жестко закреплен ферромагнитный сердечник 2 с катушкой 4.

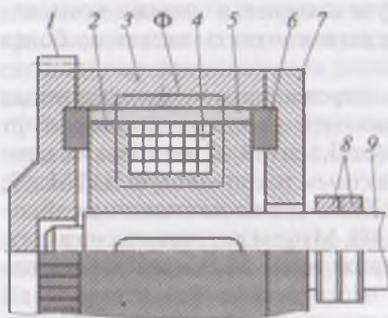


Рис. 7.39. Электромагнитная порошковая муфта

Питание в катушку подается через контактные кольца δ и щетки. Провода, соединяющие кольца δ с катушкой 4 , прокладывают по поверхности вала 9 . При подаче напряжения на катушку магнитный поток Φ , замыкаясь в магнитопроводе, проходит через воздушный зазор, разделяющий ведущую и ведомую части муфты. Этот зазор заполнен смесью, содержащей порошкообразный ферромагнитный материал 5 (на рисунке показан точками). При отключенной катушке 4 указанная смесь практически не создает связи между ведущей и ведомой частями муфты. Когда же в катушке появляется ток и в магнитопроводе возникает магнитный поток Φ , ферромагнитные частицы 5 , заполняющие зазор, намагничиваются и создают жесткую связь между частями муфты. В итоге вращение с ведущей части муфты передается на ведомый вал 9 . Уплотнители 6 необходимы для удержания наполнителя в рабочем объеме.

Существует бесконтактная конструкция ферромагнитной муфты, в которой электромагнит с катушкой неподвижен, а ведущая и ведомая части муфты отделены от него и друг от друга зазорами. При этом зазор между ведущей и ведомой частями муфты заполнен ферромагнитной смесью.

Отечественная промышленность изготавливает электромагнитные порошковые муфты серии БПМ.

Обладая высоким быстродействием (ферромагнитная смесь практически безынерционна), что является достоинством порошковой муфты, эти муфты имеют недостаток, обусловленный сложностью конструкции: необходимость защиты подшипников от попадания в них порошка и периодической замены ферромагнитного наполнителя из-за постепенного его «старения» и утраты ферромагнитных свойств.

Электромагнитная асинхронная муфта состоит из индуктора 6 с катушкой возбуждения 3 на ведомом валу 5 и якоря 2 на ведущем валу 1 (рис. 7.40, а). Катушка питается от источника постоянного тока через контактные кольца (изолированные от вала и друг от друга) и щетки 4 . Якорь 2 вращается вместе с ведущим валом 1 в магнитном поле индуктора. При этом магнитное поле индуцирует в массивном якоре 2 вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с полем индуктора на индукторе возникает вращающий момент, направленный в сторону вращения якоря. Под действием этого момента индуктор приходит во вращение, т. е. вращение якоря передается на индуктор. Вращающий момент, переданный таким образом с якоря на индуктор, является асинхронным, т. е. в рассматриваемой муфте имеет место скольжение, а следовательно, частота вращения ведомого вала n_2 всегда меньше частоты вращения ведущего вала n_1 , так как только при этом условии в якоре индуцируются вихревые токи.

Свойства рассмотренной электромагнитной муфты во многом схожи со свойствами асинхронного двигателя и определяются ее

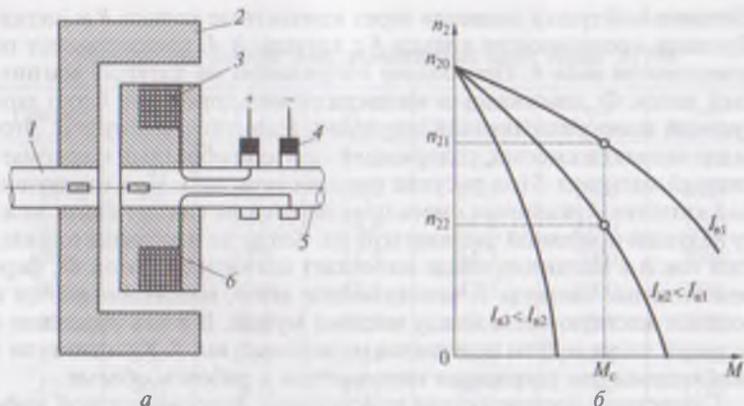


Рис. 7.40. Электромагнитная асинхронная муфта

механической характеристикой (рис. 7.40, б). С увеличением статического нагрузочного момента M_c на ведомом валу частота вращения снижается. Механическая характеристика муфты мягкая и зависимость частоты вращения от нагрузки в асинхронной муфте более значительна, чем в асинхронном двигателе. Изменяя ток в индукторе I_0 , можно менять частоту вращения ведомого вала. Плавная (мягкая) передача вращения с ведущей полумуфты на ведомую делает асинхронную муфту схожей с гидродинамической муфтой (см. 8.2).

Достоинства муфты: плавность передачи вращающего момента на ведомый вал; простота конструкции, возможность регулирования частоты вращения ведомого вала, отсутствие изнашиваемых элементов.

Недостатки муфты: низкий КПД из-за значительных потерь на вихревые токи, низкие габаритно-массовые показатели.

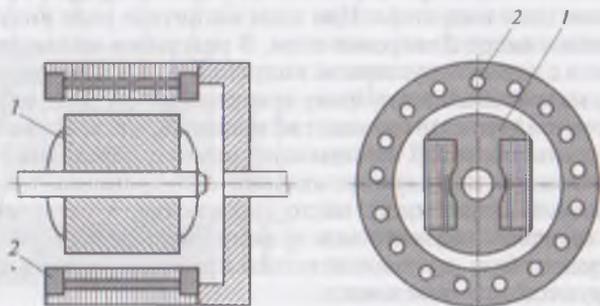


Рис. 7.41. Асинхронная муфта с короткозамкнутой обмоткой

В целях повышения КПД в некоторых конструкциях на якоре асинхронной муфты располагают короткозамкнутую обмотку 2, аналогичную обмотке ротора асинхронного двигателя, а сердечники индуктора 1 и якоря делают шихтованными (рис. 7.41).

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называют информационными?
2. Чем вызваны погрешности асинхронного тахогенератора?
3. Каковы причины погрешностей в тахогенераторах постоянного тока?
4. Почему выходная характеристика тахогенератора постоянного тока нелинейна?
5. Объясните работу индикаторной системы синхронной связи.
6. От чего зависит точность индикаторной системы синхронной связи?
7. Объясните работу одинарного индуктивного датчика перемещений.
8. Как работает дифференциальный индуктивный датчик?
9. Приведите примеры применения индуктивных датчиков.
10. В чем сходство и различие между индуктивными и трансформаторными датчиками?
11. Каково назначение подстроечного конденсатора в емкостном датчике?
12. Какова разница в свойствах терморезисторов и термисторов?
13. Как работает уровнемер токопроводящей жидкости?
14. Как работает тарельчатый клапан?
15. Объясните назначение и работу тормозного устройства в электроприводе.
16. Каково назначение муфт в электроприводе?
17. Как работает гидродинамическая муфта?
18. Объясните работу и назначение предохранительной муфты?
19. Какие функции выполняют центробежные муфты?
20. Что такое обгонная муфта и как она работает?
21. Дайте сравнительную оценку фрикционной и асинхронной электромагнитным муфтам.
22. Объясните достоинства и недостатки электромагнитных порошковых муфт.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

8.1. Основные понятия

В данной главе рассматриваются преобразовательные устройства, входящие в силовую часть электропривода в качестве источника электроэнергии для питания электродвигателей.

Преобразователи подразделяют на управляемые и неуправляемые. В управляемых преобразователях возможно при неизменных параметрах на входе преобразователя изменять параметры на его выходе: напряжение постоянного или переменного тока, число фаз, форму графиков напряжения и тока, частоты переменного тока; возможно одновременное изменение нескольких параметров, например, напряжения и частоты переменного тока. Первоначально в качестве управляемых преобразователей применяли исключительно электромашинные. Такой преобразователь состоит из механически соединенных друг с другом двигателя переменного тока (обычно трехфазного асинхронного) и генератора постоянного тока независимого возбуждения. Однако основу современного электропривода составляют *полупроводниковые преобразователи*, выполненные на полупроводниковых элементах: неуправляемых диодах, управляемых диодах — тиристорах, транзисторах в ключевом режиме. Полупроводниковые преобразователи силовой части электроприводов подразделяют на:

- неуправляемые выпрямители, преобразующие переменный ток в постоянный, при неизменных параметрах на выходе;
- управляемые выпрямители, в которых возможно изменение напряжения на выходе при неизменных параметрах на входе;
- управляемые преобразователи частоты переменного тока;
- регуляторы напряжения переменного тока.

8.2. Электромашинный преобразователь и система «генератор — двигатель»

Электромашинный преобразователь представляет собой двигатель — генераторный агрегат, в котором происходит двойное преобразование энергии: трехфазный асинхронный или синхронный двигатель потребляет из сети электрическую энергию переменного тока и преобразует ее в механическую энергию,

приводя во вращение якорь генератора постоянного тока, который в свою очередь механическую энергию преобразует в электрическую энергию постоянного тока с регулируемым напряжением.

Обмотка якоря управляемого двигателя постоянного тока М своими выводами «напрямую» соединена с выводами обмотки якоря генератора постоянного тока G. Таким образом, цепи якорей генератора G и двигателя М образуют замкнутую друг на друга силовую цепь без каких-либо регулирующих элементов (рис. 8.1). Полученный агрегат представляет собой систему «генератор — двигатель». Для питания обмоток возбуждения генератора и управляемого двигателя постоянного тока независимого возбуждения применен возбуждатель В — генератор постоянного тока параллельного возбуждения небольшой мощности, приводимый во вращение тем же двигателем переменного тока АД. Иногда для питания цепей возбуждения используют статические полупроводниковые выпрямители, включаемые в сеть переменного тока.

При необходимости пуска двигателя М предварительно выставляют регулировочный реостат r_{prG} в цепи возбуждения генератора G в положение наибольшего сопротивления, а регулировочный реостат r_{prM} в цепи возбуждения двигателя М — в положение наименьшего сопротивления. Затем включают асинхронный двигатель АД преобразователя. В этих условиях напряжение на выходе якорной цепи генератора минимально и пуск двигателя М начинается при небольшом пусковом токе. Затем постепенно уменьшают сопротивление реостата r_{prG} в цепи возбуждения генератора, вызывая этим увеличение напряжения в якорной цепи генератора G и двигателя М. При этом частота вращения двигателя увеличивается, достигая установившегося значения при номинальном напряжении в цепи якорей генератора и двигателя. Таким образом, пуск двигателя М происходит без применения пускового реостата, а регулировка величины пускового тока перенесена в цепь возбуждения генератора G. В итоге пусковой процесс двигателя протекает плавно с минимальными потерями.

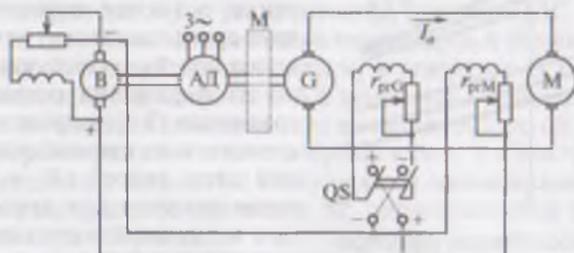


Рис. 8.1. Система «генератор — двигатель»

Механические характеристики двигателя М при регулировании частоты вращения «вниз» от номинальной путем изменения тока в цепи якорей генератора G и двигателя М имеют вид прямых параллельных линий (рис. 8.2). Для пояснения обратимся к выражению механической характеристики двигателя М в системе «генератор — двигатель»:

$$n_M = \frac{E_G}{c_{eM}\Phi_M} - \frac{M(R_G + R_M)}{c_{eM}c_{mM}\Phi_M^2} = n_{0M} - \Delta n_M, \quad (8.1)$$

где E_G — ЭДС якоря генератора постоянного тока G; c_{eM} и c_{mM} — постоянные коэффициенты двигателя М; Φ_M — магнитный поток возбуждения двигателя М; R_G и R_M — сопротивления в цепях якоря генератора G и двигателя М соответственно; n_{0M} — пограничная частота вращения двигателя М; Δn_M — перепад частоты вращения двигателя М, вызванный изменением нагрузки на его валу.

Это выражение аналогично уравнению (2.4) с той лишь разницей, что в рассматриваемой системе «генератор — двигатель», кроме сопротивления цепи якоря двигателя R_M в формуле следует учесть еще и сопротивление цепи якоря генератора R_G и вместо напряжения сети U , подводимого к цепи якоря двигателя, следует применить ЭДС генератора G:

$$E_G = c_{eG}\Phi_G n_G.$$

При увеличении магнитного потока возбуждения генератора Φ_G растет ЭДС генератора E_G и, следовательно, увеличивается пограничная частота вращения двигателя n_{0M} , что ведет к смещению механических характеристик двигателя М вдоль оси ординат (графики 1, 2 и 3 на рис. 8.2). Это подтверждается выражением первого слагаемого выражения (8.1):

$$n_{0M} = \frac{E_G}{c_{eM}\Phi_M} = \frac{c_{eG}\Phi_G n_G}{c_{eM}\Phi_M}. \quad (8.2)$$

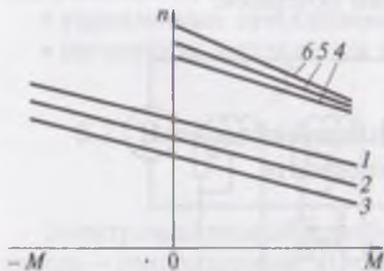


Рис. 8.2. Механические характеристики двигателя М в системе «генератор — двигатель»

При увеличении нагрузки на вал двигателя М эти характеристики остаются параллельными друг другу, поскольку угол их наклона при $\Phi_M = \text{const}$, как это видно из выражения слагаемого Δn уравнения (8.1), определяется исключительно суммой сопротивлений цепи якорей ($R_G + R_M$), которая является для данного агрегата величиной постоянной.

Следует также отметить, что естественная механическая харак-

теристика двигателя М в системе «генератор—двигатель» мягче аналогичной характеристики при работе двигателя от сети постоянного тока. Объясняется это также повышенным сопротивлением цепи якорей в этой системе за счет сопротивления якоря генератора.

При регулировке частоты вращения двигателя М «вверх» от номинальной путем уменьшения магнитного потока возбуждения Φ_M двигателя М механические характеристики имеют разный наклон (рис. 8.2, характеристики 4, 5 и 6). Объясняется это тем, что слагаемое выражения (8.1) Δl обратно пропорционально магнитному потоку возбуждения двигателя Φ_M . Поэтому с уменьшением Φ_M величина Δl увеличивается не только за счет роста момента на валу двигателя М, но и за счет уменьшения магнитного потока возбуждения двигателя постоянного тока Φ_M . В связи с этим с уменьшением потока Φ_M наклон механических характеристик возрастает.

Диапазон регулирования частоты вращения двигателя М в рассматриваемой системе может достигать 1:150 и более. Наибольшая частота вращения ограничивается условиями коммутации и неустойчивой работой двигателя при малых значениях потока возбуждения, а наименьшая — условиями охлаждения двигателя М (если двигатель самовентилирующийся).

Реверсирование двигателя М осуществляется изменением направления тока в обмотке возбуждения генератора G посредством переключателя QS.

Если двигатель М работает в условиях резко изменяющейся нагрузки, то на вал асинхронного двигателя помещают маховик М, который запасает кинетическую энергию в период снижения нагрузки на двигатель М и отдает ее в период возрастания нагрузки (см. 5.10).

В системе «генератор—двигатель» возможно генераторное торможение двигателя с отдачей электроэнергии в сеть. Это достигается тем, что при вращении якоря двигателя М по инерции с частотой вращения n_M уменьшают ток возбуждения генератора G и увеличивают ток возбуждения двигателя М. При этом понижается ЭДС генератора E_G и увеличивается противо-ЭДС двигателя E_M . В итоге двигатель М переходит в генераторный режим и момент на его якоре становится тормозящим, а генератор G по отношению к асинхронному двигателю АД переходит в двигательный режим. Что же касается асинхронного двигателя АД, то он переходит в генераторный режим и отдает энергию в сеть, т. е. наступает процесс рекуперации. На рис. 8.2 этому режиму соответствуют механические характеристики двигателя М, расположенные во втором квадранте осей координат.

К недостаткам системы «генератор—двигатель» следует отнести громоздкость установки и сложность ее обслуживания, боль-

шой шум, значительные габариты, массу и стоимость, низкий КПД (не более 60—70 %). Последнее объясняется тем, что в системе «генератор—двигатель» происходит *трехкратное* преобразование энергии, а КПД системы из трех электрических машин определяется произведением КПД всех этих машин. Если предположить, что КПД каждой из этих машин равен 88 % (мощности машин приблизительно одинаковы), то КПД установки составит всего лишь 68 %.

Другим недостатком рассматриваемой системы является ее значительная электромагнитная инерционность, замедляющая переходные процессы в двигателе. Это обусловлено большой индуктивностью обмотки возбуждения генератора, через которую осуществляются все регулировки двигателя М при переходных процессах (пуск, торможение, реверсирование). Электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения генератора большой мощности может достигать нескольких секунд. Такое замедление при использовании системы для привода прокатных станков, где число реверсов двигателя составляет до 20 в минуту, недопустимо. Для преодоления этого недостатка приходится применять специальные меры, например, *форсировку* возбуждения генератора. Сущность этого метода можно пояснить графиками нарастания тока возбуждения генератора $I_{вГ}$ в функции времени t (рис. 8.3, а).

График 1 нарастания тока возбуждения при номинальном напряжении возбуждения $U_{в.ном}$ показывает время t_1 , за которое этот ток достигает установившегося значения $I_{в.ном}$. График 2 нарастания тока возбуждения при напряжении возбуждения, равном удвоенному номинальному напряжению ($2U_{в.ном}$), показывает время $t_2 < t_1$ достижения током возбуждения генератора того же номинального значения $I_{в.ном}$. В рассмотренном случае коэффици-

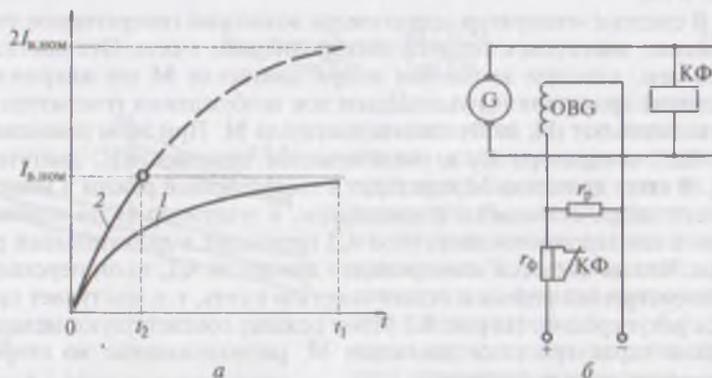


Рис. 8.3. Форсировка возбуждения генератора в системе «генератор—двигатель»

ент форсировки $k_{\Phi} = 2$. Но так как ток возбуждения в обмотке ОВГ не должен превышать номинального значения, параллельно обмотке якоря генератора включают катушку реле форсировки КФ (реле максимального напряжения). При достижении напряжением якоря номинального значения $U_{\text{аном}}$ реле КФ срабатывает и вызывает *размыкание* контактов КФ, шунтирующих резистор r_{Φ} (рис. 8.3, б), который ограничивает ток возбуждения в ОВГ, так что он не превышает номинального значения. Резистор r_p называют разрядным, на него замыкается обмотка ОВГ при ее отключении. Эта мера позволяет избежать возникновения чрезмерной величины ЭДС самоиндукции в ОВГ, опасной для межвитковой изоляции обмотки.

Систему «генератор—двигатель» применяют в электроприводах прежних разработок: прокатных станов, на морских судах для привода гребных винтов, в тепловозах, в крупных экскаваторах (привод генератора Г в этих случаях выполняется дизельным двигателем) и т. п. В новых разработках электроприводов систему «генератор—двигатель» не используют.

8.3. Неуправляемые полупроводниковые выпрямители

Неуправляемый выпрямитель в общем случае состоит из следующих элементов (рис. 8.4): трансформатора Т, обеспечивающего при напряжении сети U_1 получение требуемого напряжения U_2 на входе полупроводникового блока выпрямителя В. На выходе блока В создается постоянное напряжение U_d с определенной частотой и глубиной пульсаций, для сглаживания которых применен фильтр Ф. При повышенных требованиях к стабильности напряжения на выходе выпрямителя применяют стабилизатор напряжения Ст, обеспечивающий постоянство напряжения на выходе выпрямителя. В реальных неуправляемых выпрямителях, в зависимости от предъявляемых требований, возможно отсутствие стабилизатора или даже фильтра.

Существующие схемы выпрямления разделяют на однофазные и трехфазные, однополупериодные и двухполупериодные, с нулевым выводом и мостовые. Наибольшее применение получили схемы выпрямления: однофазная мостовая, трехфазная с нулевым выводом и трехфазная мостовая (рис. 8.5).

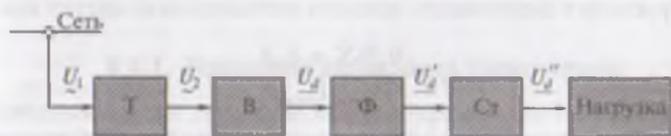


Рис. 8.4. Блок-схема неуправляемого выпрямителя

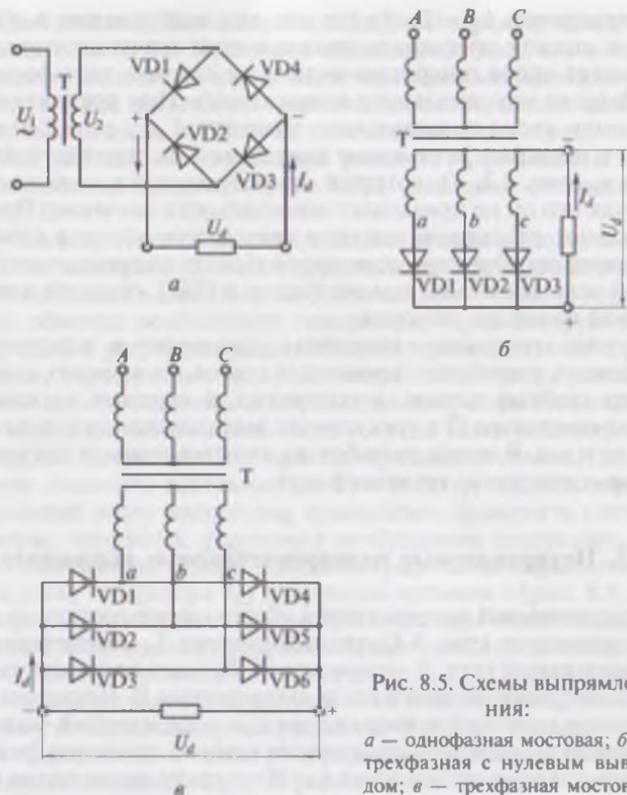


Рис. 8.5. Схемы выпрямления:

a — однофазная мостовая; *б* — трехфазная с нулевым выводом; *в* — трехфазная мостовая

Переменное напряжение на входе собственно выпрямителя $U_{2\text{ном}}$ и постоянное напряжение на выходе выпрямителя $U_{d\text{ном}}$ при номинальной нагрузке трансформатора находятся во взаимосвязи:

$$U_{2\text{ном}} = k_U U_{d\text{ном}}, \quad (8.3)$$

где k_U — коэффициент напряжений.

Эффективность использования мощности трансформатора в схеме выпрямления определяется коэффициентом типовой мощности:

$$k_T = \frac{0,5(S_I + S_{II})}{U_{d\text{ном}} I_{d\text{ном}}}, \quad (8.4)$$

где S_I и S_{II} — номинальные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора, соответственно.

Таблица 8.1

Основные параметры схем выпрямления

Схемы выпрямления	Значения параметров схемы выпрямления		
	k_U	k_T	$f_{\text{пульс}}$
Однофазная однополупериодная	2,22	3,09	$f_1/2$
Однофазная двухполупериодная мостовая	1,11	1,23	$2f_1$
Однофазная двухполупериодная с нулевым выводом	1,11	1,48	$2f_1$
Трехфазная с нулевым выводом	0,855	1,345	$3f_1$
Трехфазная мостовая	0,427	1,05	$6f_1$

Примечание. f_1 — частота тока в сети.

Чем ближе к единице значение k_T , тем лучше используется мощность трансформатора в данной схеме выпрямления, а следовательно, она экономичнее.

Другим важным показателем свойств схемы выпрямления является частота пульсаций выпрямленного напряжения $f_{\text{пульс}}$. Чем больше частота пульсаций, тем меньше глубина пульсаций, а следовательно, тем ближе график выпрямленного напряжения к идеальному.

В табл. 8.1 приведены параметры некоторых схем выпрямления. Из этой таблицы следует, что наилучшие параметры имеют мостовые схемы выпрямления, особенно трехфазная мостовая схема (см. рис. 8.5, в).

8.4. Управляемые полупроводниковые выпрямители для электроприводов постоянного тока

Управляемые выпрямители допускают регулирование напряжения постоянного тока на выходе при неизменном напряжении переменного тока на входе. Это свойство обеспечивается применением управляемых полупроводниковых диодов — *тириستоров*.

Выпрямители, построенные на этих полупроводниковых элементах, принято называть тиристорными преобразователями ТП. Что же касается схем построения ТП, то они остаются теми же, что и в неуправляемых выпрямителях. Разница состоит лишь в том, что эти схемы дополняются цепями управления тиристорами.

8.4.1. Принципы управления тиристорами

Основной частью тиристора является кремниевая пластина, имеющая четырехслойную структуру. При этом слои с электронной *n*-проводимостью чередуются слоями с дырочной *p*-проводимостью (рис. 8.6, а). Эти

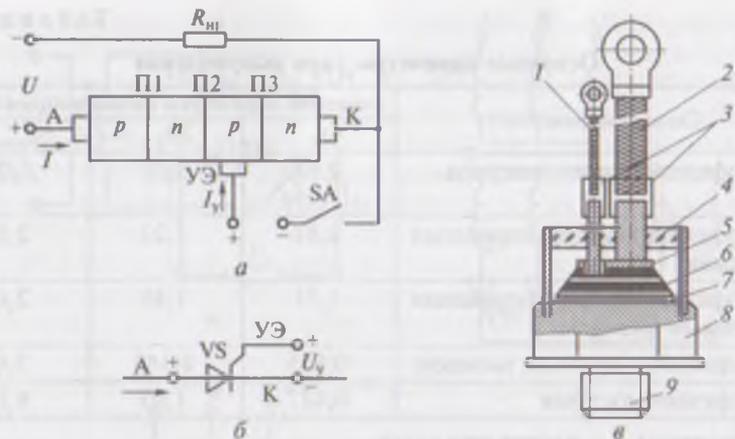


Рис. 8.6. Тиристор:

a — к принципу работы тиристора; *б* — изображение на схемах; *в* — устройство тиристора: 1 — вывод управляющего электрода; 2 — вывод катода; 3 — переходные втулки выводов; 4 — стеклоизолятор; 5, 7 — вольфрамовые диски; 6 — четырехслойная структура *p-n-p-n*; 8 — основание из меди; 9 — анод

четыре слоя образуют три перехода: П1, П2 и П3. От среднего слоя *p* имеется вывод, представляющий собой управляющий электрод УЭ. Если управляющий электрод не подключен или на него не подан управляющий сигнал, а между анодом А и катодом К приложено напряжение от источника постоянного тока U прямой полярности («плюс» на аноде), то переходы П1 и П3 будут открыты, т.е. их сопротивление прямому току весьма мало. Что же касается перехода П2, то он включен в обратном направлении (*n-p*), поэтому его электрическое сопротивление значительно и практически все напряжение U окажется приложенным к переходу П2. При этом величина тока через тиристор будет весьма незначительной ($I = 0$).

Если же к УЭ и катоду К приложить напряжение управления U_y («плюс» на управляющем электроде), т.е. замкнуть ключ SA, то в переходе П3 возникнет ток управления I_y и появятся дополнительные носители зарядов. В итоге слой *n-p* перехода П2 станет электропроводящим, т.е. тиристор откроется и под действием напряжения U через все слои тиристора будет проходить рабочий ток I . Такое управление тиристором называют **катодным**.

После этого влияние управляющего электрода на электропроводность тиристора прекращается, так как при снятии управляющего сигнала ток через тиристор не прекращается. Свойства тиристора иллюстрируются его вольт-амперной характеристикой. Для того чтобы ток через тиристор прекратился, необходимо либо разомкнуть электрическую цепь рабочего тока I , либо подать на анодную цепь тиристора импульс обратного напряжения («минус» на аноде). Для повторного открывания тиристора необходимо вновь приложить некоторое напряжение между анодом и катодом и

подать хотя бы кратковременно управляющий сигнал U_y между управляющим электродом и катодом. Таким образом, после того как тиристор открыт, его электропроводность не зависит от величины или полярности управляющего напряжения. Другими словами, тиристор работает дискретно и имеет два устойчивых состояния: закрытое и открытое. В этом отношении тиристоры аналогичны электромагнитным реле. Устройство тиристора большой мощности представлено на рис. 8.6, в.

Тиристоры обладают высоким КПД, малой мощностью управления и неограниченным сроком службы. В связи с тем что тиристор создает прямому току в рабочей цепи некоторое электрическое сопротивление, то в процессе работы он нагревается. Для улучшения условий охлаждения тиристоры снабжаются ребристыми радиаторами.

Если тиристор включить в цепь переменного тока, то при подаче положительного потенциала на управляющий электрод во время положительной полуволны напряжения тиристор откроется и в нем появится ток. После прекращения положительной полуволны напряжения переменного тока тиристор закроется. При следующей положительной полуволне для открывания тиристора необходимо вновь подать положительный потенциал на управляющий электрод. Таким образом, тиристоры можно применять в цепях как постоянного, так и переменного тока.

По быстродействию тиристоры подразделяют на низкочастотные и высокочастотные. Диапазон выпрямленных (средних) значений токов силовых тиристоров составляет от 10 до 5000 А; диапазон допускаемых обратных напряжений — от нескольких десятков до 5000 В.

Запирание тиристора. Для запирания тиристора недостаточно снять напряжение с его управляющего электрода или поменять полярность этого напряжения. Для того чтобы прекратился ток в анодной цепи тиристора необходимо, хотя бы временно, разомкнуть эту цепь посредством ключа SA (рис. 8.7, а). Однако такой метод возможен лишь при ручном управлении электроприводом. В автоматизированном электроприводе необходимо схемное решение. Один из возможных вариантов представлен на рис. 8.7, б.

Тиристор VS1 — главный рабочий тиристор, а тиристор VS2 — вспомогательный и применен в схеме для запирания главного тиристора. При подаче управляющего сигнала $U_{упр}$ главный тиристор VS1 открывается и в его анодной цепи появляется ток нагрузки $I_{нр}$. Этот ток проходит от клеммы «плюс» через нагрузку $R_{нр}$, главный тиристор VS1 на клемму «минус». Одновременно происходит заряд конденсатора C. При этом зарядный ток $i_{зар}$

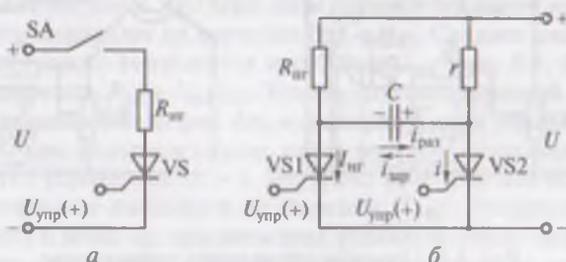


Рис. 8.7. Схемы запирания тиристора

проходит от клеммы «плюс» через резистор r , конденсатор C , главный тиристор VS1 на клемму «минус». После того как конденсатор зарядится, этот ток прекратится. В заряженном конденсаторе левая пластина имеет потенциал «минус», а правая — потенциал «плюс». Для того чтобы запереть тиристор VS1, т. е. прекратить ток в анодной цепи этого тиристора, следует открыть вспомогательный тиристор VS2. С этой целью на его управляющий электрод подают сигнал $U_{упр}$. При этом напряжение на пластинах конденсатора C оказывается приложенным к рабочему тиристору VS1 с обратной полярностью, т. е. «плюс» на катоде, а «минус» на аноде. Другими словами, напряжение конденсатора направлено встречно току нагрузки $I_{нр}$. Это приведет к тому, что рабочий ток временно прекратится и главный тиристор VS1 будет заперт. Одновременно произойдет перезарядка конденсатора C : левая пластина приобретет потенциал «плюс», а правая — «минус».

Вспомогательный тиристор VS2 выбирают маломощным, и ток в его цепи благодаря значительному сопротивлению резистора r незначителен по сравнению с током нагрузки $I_{нр}$ в главном тиристоре. Поэтому включение тиристора VS2 не вызывает заметных потерь.

При необходимости вновь включить главный тиристор VS1 подают на его управляющий электрод сигнал $U_{упр}$. При этом тиристор открывается и напряжение на конденсаторе C запирает тиристор VS2. Сравнивая схемы *a* и *б* на рис. 8.7, можно сделать вывод, что вспомогательный тиристор VS2 совместно с конденсатором C выполняет роль ключа, так как он позволяет при необходимости запирает рабочий тиристор VS1.

Существуют и другие схемы запираания тиристорov, большинство из которых основано на принципе подачи обратного напряжения на анодную цепь тиристора.

Следует иметь в виду, что специальные меры для запираания тиристорov необходимы лишь в цепях постоянного тока. В цепях переменного или пульсирующего тока, когда электрический ток в цепи в определенные моменты времени достигает нулевого значения, ток в анодной цепи прекращается, т. е. наступает естественная коммутация тиристора.

Амплитудное управление тиристором. На рис. 8.8, *a* представлена схема включения тиристора VS с питанием цепи управления через потенцио-

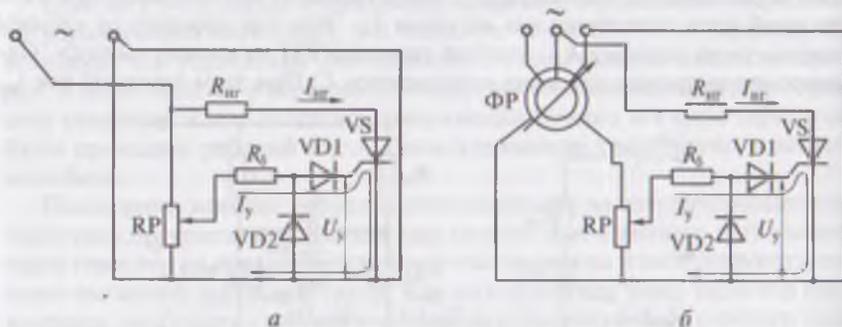


Рис. 8.8. Способы управления тиристором:

a — амплитудное; *б* — фазовое

метр RP и диод VD1. Резистор R_0 предназначен для ограничения тока управления I_y , а диод VD2 защищает тиристор от попадания отрицательного потенциала на управляющий электрод тиристора. Величина (амплитуда) напряжения управления регулируется потенциометром RP.

Значение анодного напряжения, при котором возможно открывание тиристора, зависит от напряжения управления U_y , подводимого к управляющему электроду тиристора. При анодном напряжении, изменяющемся по синусоидальному закону $u_a = f(\omega t)$ (рис. 8.9, а, график 1), график минимальных значений напряжения управления $U_{y \min} = f(\omega t)$ (график 2), при которых возможно открывание тиристора, имеет седлообразный вид.

Пока тиристор закрыт, все напряжение сети приложено к его анодной цепи ($U_a = U_c$), так как при отсутствии тока в цепи падение напряжения на нагрузке $R_{нr}$ равно нулю.

Допустим, на управляющий электрод тиристора в начале полупериода анодного напряжения u_a (точка A_1) подано напряжение управления U_{y1} , вызывающее открывание тиристора даже при минимальном анодном напряжении. В этих условиях тиристор будет открыт практически в течение всего полупериода напряжения, а среднее значение напряжения непосредственно на нагрузке за полупериод составит $U_{cp1} = (2/\pi)U_{\max}$. В нагрузке $R_{нr}$ появится ток, среднее значение которого $I_{cp1} = (2/\pi)I_{\max}$. В этих условиях средняя мощность, выделяемая в нагрузке $R_{нr}$, равна $P_{cp1} = U_{cp1}I_{cp1}$.

Если же напряжение управления уменьшить до значения U_{y2} , то тиристор откроется не в начале полупериода анодного напряжения u_a , а несколько позже (в точке A_2). При этом среднее значение напряжения в анодной цепи понизится до значения $U_{cp2} < U_{cp1}$. Среднее значение тока в анодной цепи также уменьшится и составит I_{cp2} (рис. 8.9, б), а среднее значение мощности $P_{cp2} = U_{cp2}I_{cp2}$. Угол α_2 , соответствующий открыванию тиристора, показанный на рис. 8.6, а, называют *углом управления (открывания)* тиристора. В первом случае, когда тиристор открывался напряжением U_{y1} , угол управления $\alpha_1 \approx 0$. Нетрудно заметить, что если напряжение управления еще уменьшить до значения U_{y3} , то открывание тиристора произойдет в точке A_3 , при этом угол управления будет равен α_3 , среднее значение напряжения в анодной цепи понизится до значения U_{cp3} , среднее значение тока в нагрузке уменьшится и составит I_{cp3} (рис. 8.9, в).

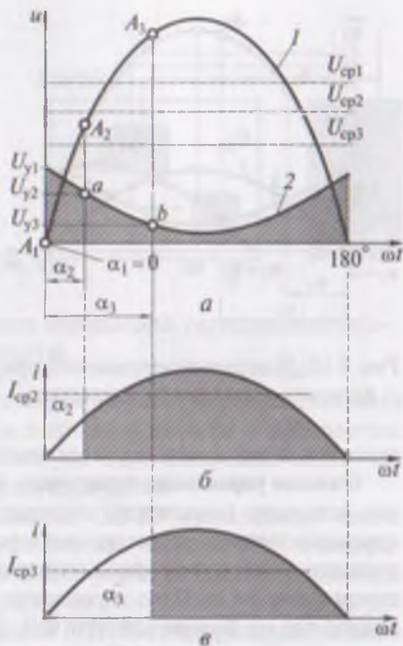


Рис. 8.9. Диаграммы напряжений и токов при амплитудном управлении тиристором

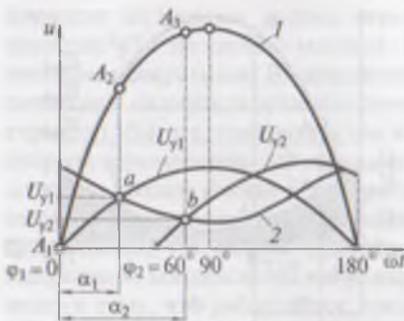


Рис. 8.10. Диаграмма напряжений при фазовом управлении тиристора

чивается, а ток и мощность уменьшаются.

Фазовое управление тиристором. Суть фазового управления состоит в том, что величину (амплитуду) напряжения управления, достаточную для открывания тиристора, сохраняют неизменной, а управление тиристором выполняют изменением фазы напряжения управления. Для пояснения обратимся к рис. 8.8, б. Цепь управления тиристора в этом случае получает электропитание от фазорегулятора ФР. Это позволяет создавать фазовый сдвиг напряжения управления U_y по отношению к напряжению анодной цепи. Допустим, в цепь управления подан синусоидальный сигнал U_{y1} , совпадающий по фазе с напряжением в анодной цепи ($\varphi_1 = 0^\circ$). В этом случае начало положительного полупериода напряжения управления практически совпадет с началом положительного полупериода напряжения в анодной цепи (рис. 8.10) и открывание тиристора происходит в точке a , когда напряжение управления достигнет значения, достаточного для открывания тиристора. Этой точке соответствует угол открывания $\alpha_1 = 37^\circ$, а величина мгновенного значения анодного напряжения u_a соответствует точке A_1 . Среднее значение мощности в нагрузке $R_{нr}$, по аналогии с рассмотренным ранее амплитудным управлением (см. рис. 8.9), равно $P_{cp1} = U_{cp1} I_{cp1}$. Если же в цепь управления тиристора подать сигнал U_{y2} , со сдвигом по фазе относительно напряжения анодной цепи на угол $\varphi_2 = 60^\circ$, то тиристор откроется при угле регулирования $\alpha_2 = 77^\circ$ (точка b), когда напряжение управления достигнет значения, равного минимальному значению U_{ymin} , достаточного для отпирания тиристора. В итоге средние значения напряжения и тока в анодной цепи уменьшатся, а средняя мощность в нагрузке составит $P_{cp2} = U_{cp2} I_{cp2}$. Таким образом, изменяя фазовый сдвиг φ напряжения в цепи управления относительно напряжения в анодной цепи тиристора, получаем возможность регулировать ток и мощность в анодной цепи тиристора в широком диапазоне.

Для управления тиристорами применяют систему импульсно-фазового управления (СИФУ) кратковременными сигналами (импульсами) амплитудой, достаточной для открывания тиристора. Импульсы посылают в цепь управления с интервалом в половину периода ($T/2$) (рис. 8.11, а). Такая необходимость вызвана тем, что каждые полпериода переменное напряжение в анодной цепи проходит нулевое значение, и если в этот

Это приведет к снижению мощности, выделяемой на нагрузке $R_{нr}$, до значения $P_{cp3} = U_{cp3} I_{cp3}$.

Таким образом, суть амплитудного управления тиристора состоит в том, что с изменением величины напряжения управления U_y изменяется угол управления α , ток в анодной цепи тиристора, а следовательно, и мощность, выделяемая в нагрузке. С повышением напряжения U_y угол управления α уменьшается, при этом ток и мощность в анодной цепи тиристора увеличиваются, а с понижением U_y угол управления α увели-

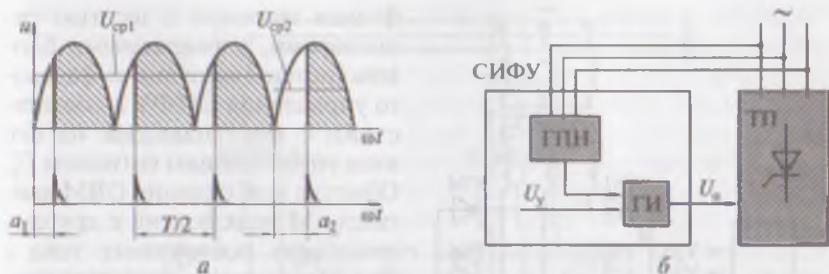


Рис. 8.11. Принцип импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем

момент не подать на управляющий электрод тиристора положительный импульс, то тиристор не откроется и ток в анодной цепи не возобновится. При необходимости изменить угол управления α для изменения силы тока в анодной цепи тиристора изменяют фазу импульса.

Система импульсно-фазового управления СИФУ представляет собой блок, состоящий из генератора пилообразного напряжения ГПН и генератора импульсов ГИ (рис. 8.11, б). Основой для формирования отпирающих импульсов является напряжение, состоящее из положительных полупериодов пилообразной формы, вырабатываемое ГПН. Это напряжение подается в ГИ, который под воздействием управляющего сигнала U_y , поступившего из системы автоматического регулирования, вырабатывает управляющие положительные импульсы с необходимым углом регулирования α . Эти импульсы поступают в преобразователь ТП на управляющие электроды тиристоры и отпирают их в требуемой последовательности.

Помимо рассмотренного тиристора существуют *симисторы* (симметричные тиристоры). По своим свойствам симистор является эквивалентом встречно параллельного соединения двух тиристоры и способен при подаче импульсов управляющего сигнала (в открытом состоянии) пропускать ток в обоих направлениях. Симисторы применяют в преобразователях, регуляторах напряжения, бесконтактных выключателях и других устройствах.

Разработана разновидность тиристоры — *запираемые тиристоры*. Для открывания такого тиристора достаточно подать в цепь управления кратковременный импульс требуемой амплитуды, так как появившийся при этом ток в анодной цепи не прекращается до момента запираания тиристора. Запираание таких тиристоры возможно короткими по длительности импульсами напряжения U_y обратной полярности.

Основная область применения тиристоры в электроприводах — силовые преобразовательные устройства.

8.4.2. Нереверсивный управляемый тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный

На рис. 8.12 показана схема управляемого тиристорного преобразователя (ТП) для питания якорных цепей двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Схема выпрямления трех-

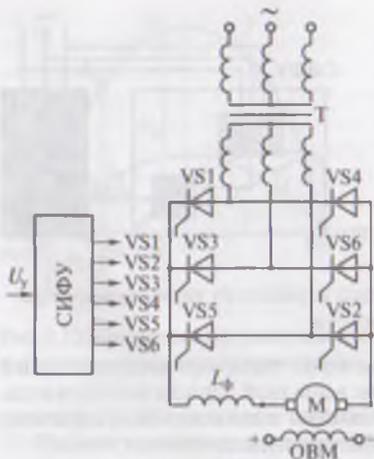


Рис. 8.12. Нереверсивный управляемый тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный

выходе ТП зависит от угла регулирования α и определяется выражением

$$U_{cp} = U_{cp0} \cos \alpha, \quad (8.5)$$

где U_{cp0} — среднее значение напряжения на выходе ТП при $\alpha = 0$:

$$U_{cp0} = U_{2\phi} / k_U, \quad (8.6)$$

$U_{2\phi}$ — действующее фазное значение напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора; k_U — коэффициент напряжений, определяющий соотношение между напряжениями на выходе выпрямителя U_d и на выводах вторичной обмотки трансформатора U_2 при $\alpha = 0$ и зависящий от схемы выпрямления (см. табл. 8.1).

Для представленной на рис. 8.12 трехфазной мостовой схемы $k_U = 0,427$, что соответствует напряжению на выходе ТП при $\alpha = 0$:

$$U_d = U_{2\phi} / 0,427.$$

Схемы выпрямления, получившие наибольшее применение (см. рис. 8.5), также широко используются и в управляемых преобразователях. Ниже приведены предельные значения мощностей, рекомендуемые для указанных схем выпрямления, кВт:

Однофазная мостовая схема	до 10
Трехфазная схема с нулевым выводом	до 50
Трехфазная мостовая схема (схема Ларионова)	до 3000

фазная мостовая с шестью тиристорами, управляемыми блоком системы импульсно-фазового управления СИФУ в соответствии с поступающим на его вход управляющим сигналом U_γ . Обмотка возбуждения ОВМ двигателя М подключена к другому источнику постоянного тока с фиксированным напряжением. Для ослабления пульсаций тока в цепь якоря включен дроссель, выполняющий функцию сглаживающего фильтра L_ϕ .

Тиристорный преобразователь обеспечивает регулирование подключенного к нему двигателя постоянного тока за счет изменения среднего значения напряжения U_{cp} , подводимого к цепи якоря. Это напряжение на

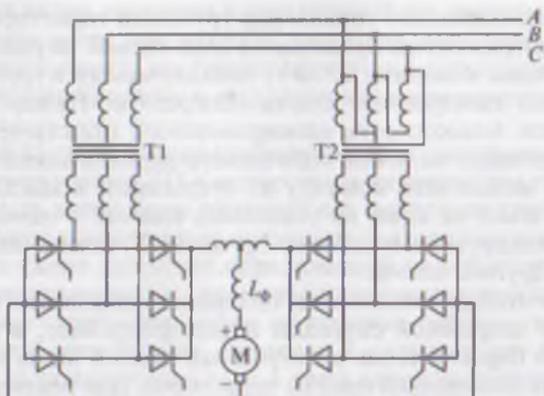


Рис. 8.13. Схема управляемого тиристорного преобразователя постоянного тока большой мощности

При мощностях, превышающих 3000 кВт, применяют более сложные схемы выпрямления, например, трехфазную мостовую схему с уравнительным реактором. Эта схема состоит из двух трехфазных мостовых схем, фазные напряжения которых сдвинуты по фазе относительно друг друга на 30° (из-за разных схем соединения обмоток трансформаторов) и работают на общую нагрузку (рис. 8.13). Данная схема имеет еще и то достоинство, что пульсации тока на ее выходе минимальны и соответствуют двенадцати-фазной системе. По этой причине схему часто называют условно двенадцатифазной.

8.4.3. Реверсивный управляемый тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный ток

Тиристорный управляемый преобразователь, выполненный по схеме рис. 8.12, обладает односторонней проводимостью, поэтому постоянный ток в обмотке якоря двигателя не может изменить своего направления. Такой ТП не допускает реверсирования двигателя постоянного тока и исключает возможность рекуперативного торможения (см. 2.4). Для создания реверсивного тиристорного преобразователя постоянного тока применяют две группы тиристоров с разным направлением тока на выходе. Управление этими группами тиристоров в реверсивном преобразователе может быть:

- раздельное, при котором одновременно работает только одна группа тиристоров;
- совместное, при котором одновременно работают обе группы тиристоров.

Вариант раздельного управления группами тиристоров в реверсивном преобразователе представлен блок-схемой на рис. 8.14. Здесь применен один комплект СИФУ, подключаемый к группам тиристоров через электронные ключи «Вперед» и «Назад». При этом исключается возможность одновременного подключения обоих ключей благодаря наличию логического переключающего устройства ЛПУ, выдающего команду на открывание в каждый момент времени только на один из указанных ключей с одновременной выдачей блокирующего сигнала $U_{бл}$ на ЛПУ, исключающего подключение другого ключа.

Для того чтобы переключение полярности на клеммах цепи якоря не вызвало аварийной ситуации в электроприводе, в схеме предусмотрено переключение электронных ключей лишь при отключении ранее работавшей группы тиристоров. Для реализации этого в схеме имеется устройство — переключатель характеристик (ПХ), на который поступают сигналы от электронных ключей об их состояниях.

Изменение направления тока якоря двигателя связано с переходом двигателя в режим рекуперативного торможения с отдачей энергии, запасенной во вращающихся частях двигателя и механизма, обратно в питающую сеть переменного тока. Для этого необходимо, чтобы при переключении групп тиристоров включаемая группа работала в режиме инвертора (преобразователя посто-

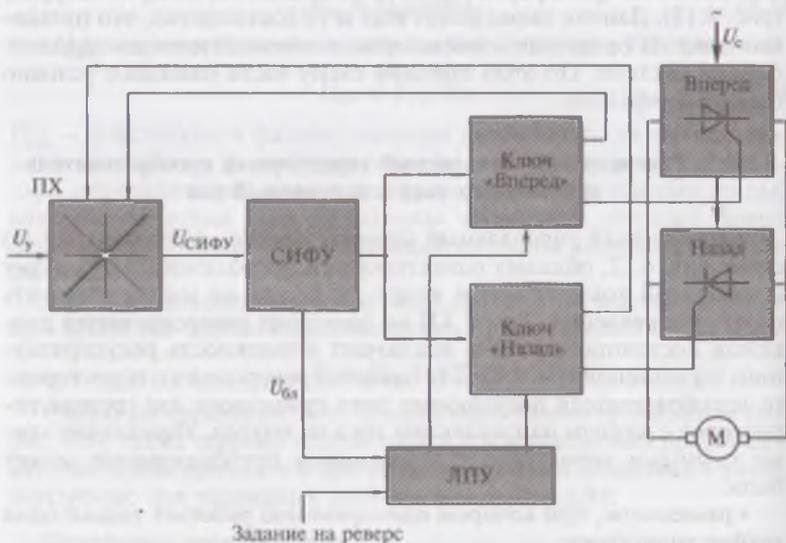


Рис. 8.14. Блок-схема реверсивного тиристорного преобразователя постоянного тока

янного тока якоря двигателя в переменный ток частоты питающей сети). И лишь после того как ЭДС двигателя уменьшится до значения напряжения сети, эта группа тиристоров перейдет в основной (выпрямительный) режим и тогда произойдет реверсирование двигателя.

На рис. 8.15 представлена наиболее распространенная схема трехфазного реверсивного ТП с совместным управлением групп тиристоров. Шесть тиристоров образуют две группы по три тиристора. Каждая группа обеспечивает получение выпрямленного напряжения в цепи якоря двигателя определенной полярности. Дроссели L_1 и L_2 предназначены для ограничения уравнильных токов между комплектами тиристоров, один из которых работает выпрямителем, а другой инвертором. Дроссель L_Φ служит для ослабления пульсаций выпрямленного тока в цепи якоря двигателя. Обмотка возбуждения двигателя подключена к другому (нерегулируемому) выпрямителю.

В табл. 8.2 приведены технические данные некоторых серий тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока.

Управляемый преобразователь переменного тока в постоянный и двигатель постоянного тока составляют силовую часть электропривода. Уравнение механической характеристики системы, состоящей из двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения и тиристорного преобразователя, аналогично уравнению механической характеристики системы «генератор—двигатель» [см. (8.1)], с той лишь разницей, что

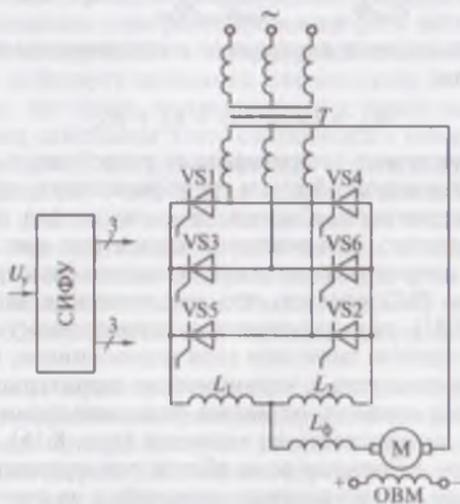


Рис. 8.15. Реверсивный тиристорный преобразователь постоянного тока

Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока

Тип	Назначение	Напряжение питания, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Номинальное выпрямленное напряжение, В
АТ, АТП	Питание якорных цепей двигателей постоянного тока (Р — реверсивный)	220; 380; 6000; 10000	100—1600	230; 460
АТО, АТОР	Питание якорных цепей ДТП в схемах автоматизированного электропривода	220; 380	6,3—50	115; 230; 460
КТЭ	Комплектные электроприводы для механизмов в металлургии	380; 6000; 10000	100—1600	230; 460
ЭТРП	Электроприводы металлорежущих станков	380	10—200	220; 440

вместо ЭДС генератора E_G в уравнении применено напряжение $U_{ср} = U_{ср0} \cos \alpha$:

$$n = \frac{U_{ср0} \cos \alpha}{c_{\epsilon} m \Phi_M} - \frac{M(R_{г.п} + R_M)}{c_{\epsilon} m c_{MM} \Phi_M} = n_0 - \Delta n, \quad (8.7)$$

где $R_{г.п}$ — эквивалентное внутреннее сопротивление тиристорного преобразователя:

$$R_{г.п} = (x'_2 m / 2\pi) + R'_2 + R_L, \quad (8.8)$$

x'_2 и R'_2 — индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, приведенные к числу витков первичной обмотки; m — число фаз, зависящие от схемы выпрямления, для мостовой схемы (см. рис. 8.12) $m = 6$; R_L — активное сопротивление сглаживающего фильтра (дресселя).

Из формулы (8.7) следует, что механические характеристики двигателя $n = f(M)$, подключенного к тиристорному преобразователю при неизменном значении угла управления α , прямолинейны. При увеличении угла α механические характеристики смещаются вниз по оси ординат, оставаясь параллельными друг другу, а следовательно, их жесткость не меняется (рис. 8.16). Исключение составляет лишь небольшая зона вблизи оси ординат (на рисунке не показана), где характеристики нелинейны за счет уменьшения их жесткости. Объясняется это пульсацией тока на выходе выпря-

мителя, особенно проявляемая в однофазных схемах выпрямления, в которых пульсации выпрямленного тока значительны. Однако для трехфазной двухполупериодной схемы (см. рис. 8.12) эти пульсации ослаблены и практически не влияют на форму механических характеристик. Но все же эти пульсации тока имеют место и их нежелательное влияние может проявиться в нарушении работы щеточного контакта и возникновении дополнительных потерь в двигателе, снижающих его КПД и вызывающих дополнительный нагрев. Ослаблению этих нежелательных явлений способствует включение в цепь якоря двигателя сглаживающего фильтра L_{ϕ} .

Наличие в цепи якоря двигателя сопротивления тиристорного преобразователя $R_{\Gamma П}$ делает механические характеристики двигателя в системе «ТП—ДПТ» менее жесткими по сравнению с естественной характеристикой двигателя при его работе непосредственно от сети постоянного тока (график 1 на рис. 8.16).

При значении угла регулирования $\alpha = 90^\circ$ напряжение $U_{ср} = 0$ и двигатель работает в режиме динамического торможения. При дальнейшем увеличении угла регулирования ($\alpha > 90^\circ$) тиристорный преобразователь переходит в *инверторный* режим. Если при этом на двигатель действует активный статический момент нагрузки M_c , например, вес груза, подвешенного к тросу подъемного устройства, то под действием этого статического момента сопротивления вал двигателя начнет вращение в направлении, противоположном прежнему ($-\pi$). В этих условиях двигатель перейдет в генераторный режим, а вырабатываемый им постоянный ток в тиристорном преобразователе, работающем в инверторном режиме, будет преобразован в переменный ток и возвращен в питающую сеть переменного тока. Таким образом, наступит режим генераторного рекуперативного торможения (график при $\alpha = 120^\circ$ на рис. 8.16).

Механические характеристики двигателя постоянного тока при его работе с реверсивным преобразователем (см.рис. 8.15) располагаются во всех четырех квадрантах осей координат и имеют вид, представленный на рис. 8.17. В этом случае возможен режим рекуперативного торможения, применяемый при необходимости торможения двигателя для ограничения его свободного выбега.

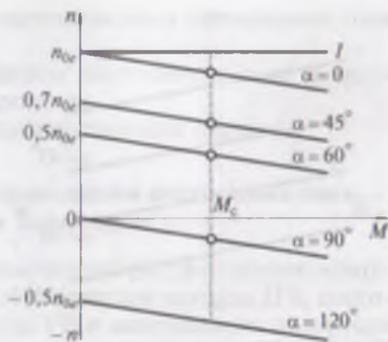


Рис. 8.16. Механические характеристики электропривода постоянного тока с нереверсивным тиристорным преобразователем

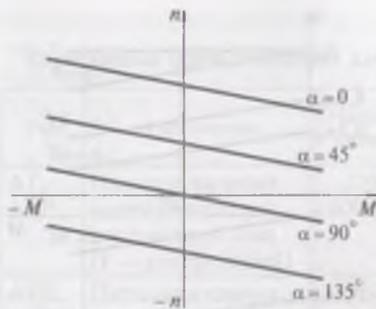


Рис. 8.17. Механические характеристики реверсивной системы «тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока»

К *достоинствам* совместной работы тиристорного преобразователя и двигателя постоянного тока следует отнести: широкий диапазон регулирования частоты вращения двигателя; линейность и жесткость механических характеристик; высокий КПД, компактность установки и высокая надежность, простота обслуживания. *Недостатками* системы являются: пульсации напряжения и тока якоря (особенно при однофазном питании), неблагоприятно влияющие на работу щеточного контакта двигателя; снижение коэффициента мощности

установки $\cos \varphi$, обусловленного уменьшением угла управления α . С некоторым приближением считают $\cos \varphi \approx \cos \alpha$.

По своему быстродействию тиристорные преобразователи намного превышают электромашинные преобразователи. Так, если электромагнитная постоянная времени в системе «генератор — двигатель» составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд, то в системе «тиристорный преобразователь — двигатель» электромагнитная постоянная времени не превышает нескольких сотых долей секунды.

Система «тиристорный преобразователь — двигатель» в настоящее время является основным видом регулируемого электропривода постоянного тока, применяемым в широком диапазоне мощностей: от привода металлорежущих станков и подъемных устройств до привода крупных прокатных станов.

8.5. Полупроводниковые преобразователи частоты переменного тока

В силовой части электроприводов переменного тока для частотного регулирования асинхронных двигателей (см. 3.6.3) применяют полупроводниковые преобразователи частоты ПЧ. Основу этих преобразователей составляют *инверторы*, выполняемые на тиристорах или транзисторах.

Если в управляемых тиристорных выпрямителях в процессе регулирования напряжения на выходе изменяют угол регулирования α в диапазоне от 0 до 90° , то в инверторах управление тиристорами осуществляют изменением угла регулирования α в диапазоне от 90° до 180° .

Полупроводниковые преобразователи частоты переменного тока разделяют на две группы:

- преобразователи частоты со звеном постоянного тока и автономным (независимым) инвертором;
- преобразователи частоты с непосредственной связью.

8.5.1. Преобразователи частоты со звеном постоянного тока и автономным инвертором

Наибольшее применение для частотного регулирования асинхронных двигателей получили преобразователи частоты ПЧ, состоящие из управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ.

Возможность преобразования постоянного тока в трехфазную систему переменного тока заданной частоты можно показать на примере автономного инвертора, выполненного на шести тиристорах, соединенных по схеме трехфазного моста. На вход инвертора через сглаживающий дроссельный фильтр подается постоянное напряжение U_d (рис. 8.18). Тиристоры VS1, VS3 и VS5 образуют анодную группу, так как их узловая точка соединяет аноды тиристоров, а тиристоры VS2, VS4 и VS6 образуют катодную группу, поскольку их узловая точка соединяет катоды тиристоров. Будем считать токи, проходящие через тиристоры анодной группы, *положительными*, а токи, проходящие через тиристоры катодной группы, *отрицательными*. На выходе инвертора включен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Фазные обмотки статора этого двигателя, обладающие сопротивлением Z_A , Z_B и Z_C , соединены «звездой».

На выходе рассматриваемого инвертора требуется получить симметричную трехфазную систему синусоидальных токов, графики

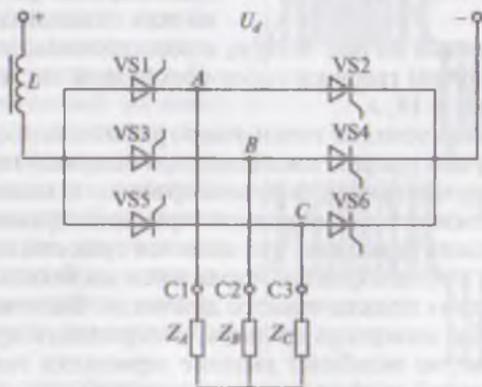
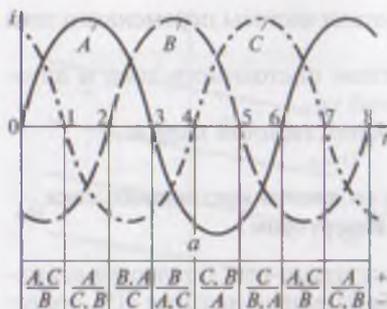


Рис. 8.18. Схема автономного инвертора, работающего от сети постоянного тока



A,C	A	B,A	B	C,B	C	A,C	A
B	C,B	C	A,C	A	B,A	B	C,B

б

Номера открытых тиристоров

1,4,5	1,4,6	1,3,6	2,3,6	2,3,5	2,4,5	1,4,5	1,4,6
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

1		2		1	
4		3		4	
5	6	5	6	5	6

в

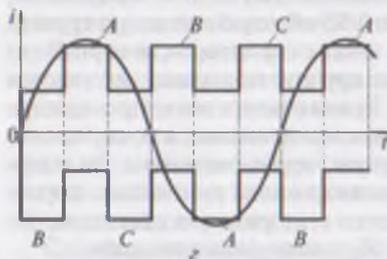


Рис. 8.19. К принципу действия автономного инвертора

мени, показанных на рис. 8.19, а, и воспользовавшись схемами на рис. 8.20, получим графики токов трехфазной системы, представленные на рис. 8.19, з.

Соединив синусоидой точки этого графика, относящиеся к току фазы А, получим график тока основной (первой) гармоники этой фазы. Аналогично можно получить графики основной гармоники фаз В и С. Помимо токов основной гармоники фазные токи содержат токи высших гармоник, что является существенным недостатком, так как неблагоприятно отражается на технико-экономических показателях подключенного двигателя. Включение в каждую фазу на выходе инвертора фильтра, содержащего дроссель и конденсатор, заметно ослабляет высшие гармоники токов и приближает фактический график тока к синусоиде.

Рассмотренные процессы дают лишь принципиальное представление о работе инвертора. В действительности процессы, сопро-

которых показаны на рис 8.19, а. На отрезке времени 0—1, отложенном на оси времени t , токи в фазах А и С должны быть положительными, а ток в фазе В отрицательным (рис. 8.19, б). Из схемы инвертора (см. рис. 8.18) следует, что это возможно, если в течение указанного отрезка времени 0—1 будут открыты тиристоры с номерами 1, 4 и 5 (рис. 8.19, в). Направления токов в фазных обмотках двигателя на отрезке времени 0—1 показаны на рис. 8.20: токи в фазах А и С положительны, так как они направлены в нулевую точку, а ток в фазе В — отрицателен, так как он выходит из нулевой точки. При этом $I_B = I_A + I_C$.

На отрезке времени 1—2 ток в фазе А должен быть положительным, а токи в фазах С и В отрицательными. Для этого необходимо открыть тиристоры 1, 4 и 6. Направления токов в фазных обмотках двигателя для времени 1—2 также показано на рис. 8.20. При этом $I_A = I_B + I_C$. Проанализировав работу инвертора на всех остальных отрезках вре-

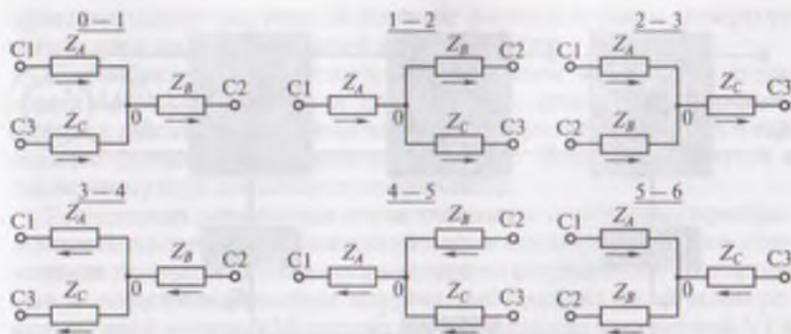


Рис. 8.20. Направления токов в фазных обмотках двигателя в различные моменты времени работы инвертора (см. рис. 8.19)

вождающие работу инвертора, намного сложнее. Управляя этими процессами, можно повлиять на ослабление высших гармоник на выходе инвертора. Так, если изменять ширину следующих друг за другом импульсов тока при неизменной частоте, то можно получить ток, среднее значение которого будет практически синусоидальным (рис. 8.21, а). Такой способ называют *широтно-импульсной модуляцией* (ШИМ). Возможна так же *частотно-импульсная модуляция* (ЧИМ), когда ширина импульсов остается неизменной, а изменяются интервалы между ними, т.е. частота импульсов (рис. 8.21, б).

На рис. 8.22 представлена функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока. Управляемый выпрямитель УВ получает питание из трехфазной сети напряжением U_c частотой f_c и в результате преобразования на его выходе создается постоянное напряжение U_d . Фильтр Φ , состоящий из конденсатора C_Φ и дросселя L_Φ , сглаживает это напряжение, т.е. частично устраняет его гармонические составляющие. В автономном инверторе это постоянное напряжение преобразуется в трехфазное переменное напряжение требуемого значения U_1 частотой f_1 .

Управление преобразователем осуществляется с помощью блока управления преобразова-

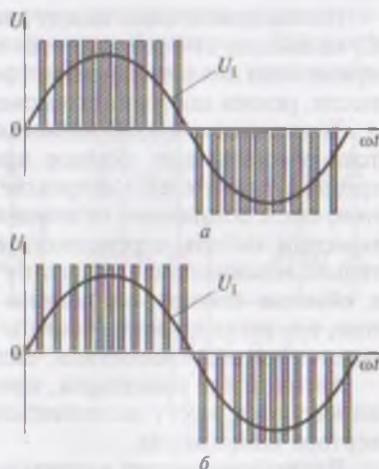


Рис. 8.21. Виды модуляции, применяемые в инверторах

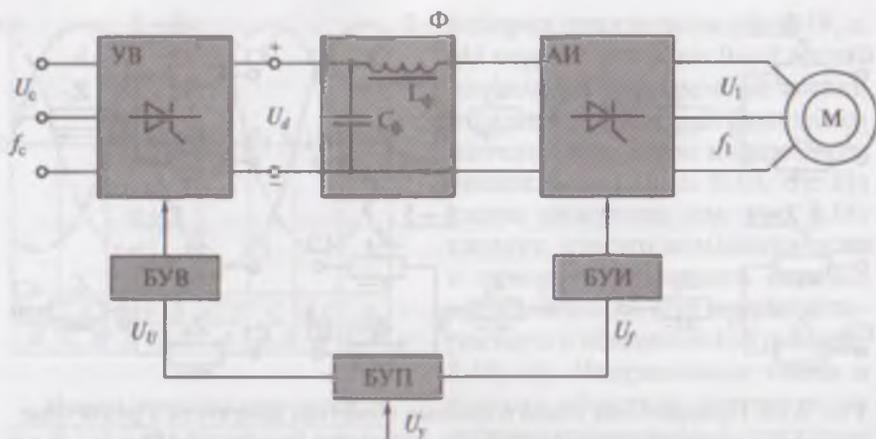


Рис. 8.22. Функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока

телем БУП, на вход которого подается сигнал управления U_{γ} . Он либо поступает из автоматизированной системы электропривода, либо создается с помощью потенциометра РР. Этот сигнал определяет параметры на выходе преобразователя частоты — напряжение и частоту. На выходе БУП создается два управляющих сигнала: сигнал U_{θ} , который через блок БУВ управляет работой выпрямителя УВ, создавая на его выходе требуемое постоянное напряжение U_d , и сигнал U_f , который управляет работой инвертора АИ, создавая на его выходе параметры U_1 и f_1 требуемых значений.

Необходимая связь между значениями частоты f_1 и напряжения U_1 на выходе ПЧ регулируется его параметрами, в соответствии с принятыми для регулирования режимами: режим постоянной мощности, режим постоянного момента и т. п. (см. 3.6.3).

Тиристорные преобразователи частоты со звеном постоянного тока обеспечивают плавное изменение частоты вращения асинхронных двигателей в широком диапазоне как в сторону повышения, так и понижения от номинального значения. Однако при изменении частоты переменного тока в сторону увеличения относительно номинального значения (50 Гц), напряжение, подводимое к обмотке статора, не должно превышать номинального значения, т. е. регулирование частоты вращения двигателя в этом случае ведется только изменением частоты переменного тока.

Автономные инверторы, применяемые в ПЧ со звеном постоянного тока, могут выполняться по схемам инвертора тока и инвертора напряжения.

В преобразователях частоты с автономным инвертором тока АИТ управляемыми параметрами, воздействующими на свойства двигателя, являются частота и сила тока статора, т. е. АИТ выполняет

функцию источника тока. В качестве фильтра в таком инверторе используют дроссель большой индуктивности.

В преобразователях частоты с автономным инвертором напряжения АИН управляемыми параметрами, воздействующими на свойства двигателя, являются частота и напряжение, т.е. АИН выполняет функцию источника напряжения. В качестве фильтра в таком инверторе используют конденсатор.

В последних разработках отечественных и зарубежных преобразователей частоты для электроприводов преимущественное применение получили автономные инверторы напряжения, выполняемые на полупроводниковых модулях, работающих в ключевом режиме. Такой модуль VM состоит из биполярного транзистора VT с изолированным затвором и встроенного обратного диода VD (рис. 8.23, а). Схема силовой части автономного инвертора напряжения на модулях-ключах представлена на рис. 8.23, б. Здесь автономный инвертор напряжения питается постоянным напряжением U_d от управляемого или неуправляемого выпрямителя, либо от автономного источника постоянного напряжения. Конденсатор С выполняет функцию сглаживающего фильтра. Диоды в модулях-ключах предназначены для возврата энергии в сеть, когда ток через ключ имеет направление, противоположное направлению напряжения на нем, что имеет место при активно-реактивной нагрузке. Регулирование частоты трехфазного напряжения на выходе АИН осуществляется путем изменения частоты переключений модулей-ключей. Для улучшения формы переменного напряжения на выходе АИН применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока современных серий дополнены функцией *энергосбережения*. Работая в режиме энергосбережения, такой преобразователь частоты отсле-

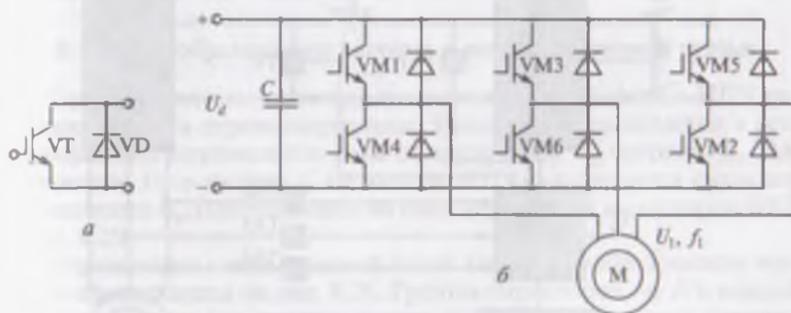


Рис. 8.23. Схема модуля-ключа из биполярного транзистора и обратного диода (а) и схема силовой части автономного инвертора напряжения, выполненного на этих модулях (б)

живает силу потребляемого двигателем тока и, если нагрузка электропривода снижается, напряжение на выходе ПЧ понижается до минимально допустимого значения для данной нагрузки двигателя. Это способствует уменьшению потерь и повышению КПД электропривода. Функция энергосбережения наиболее эффективна в электроприводах, работающих с переменной нагрузкой. Экономия электроэнергии в этом случае может достигать 50 %.

В качестве примера рассмотрим преобразователи частоты ПЧ серии «Универсал», предназначенные для регулирования частоты вращения насосов, вентиляторов, компрессоров, буровых, судовых и других механизмов, использующих в качестве приводных асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Преобразователи «Универсал» выпускают в диапазоне мощностей от 0,55 до 160 кВт. Они обеспечивают: регулирование напряжения на выходе от $0,05 U_{ном}$ до $U_{ном}$ и регулирование частоты этого напряжения от 2 до 512 Гц; кратность регулирования частоты вращения составляет 1:10 в электроприводах без обратной связи и до 1:30 при наличии обратной связи по скорости (см. гл. 11).

На рис. 8.24 представлена блок-схема преобразователя, где показаны его основные элементы.

Помимо блоков управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ, преобразователь содержит комплекс измерительных трансформаторов тока ТА и трансформатор напряжения ТВ. Сигналы с выхода данных устройств, несущие информацию о фактической токовой нагрузке автономного инвертора АИ и двигателя М, поступают на блок управления БУ, в котором формируются сигналы управления, соответствующие нагрузке двигателя. Это обеспечивает преобразователю энергосберегающие и защитные функции, а также «мягкий» пуск двигателя с заданными значения-

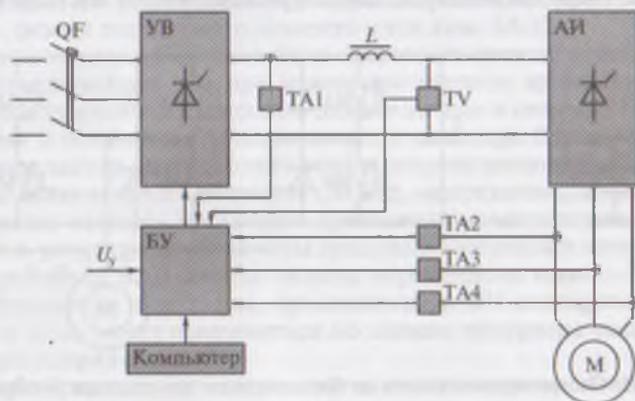


Рис. 8.24. Блок-схема преобразователя частоты серии «Универсал»

ми пусковых токов. Вырабатываемые блоком управления БУ сигналы поступают на вход преобразователя, создавая оптимальный режим его работы. Блок управления допускает подключение компьютера, что обеспечивает ПЧ дополнительные возможности, в частности работу преобразователя в соответствии с технологической компьютерной программой.

В настоящее время промышленность выпускает большую номенклатуру преобразователей частоты, что позволяет для каждого конкретного электропривода выбрать наиболее рациональный вариант преобразователя как по техническим, так и по экономическим показателям.

Работа асинхронного двигателя с частотным управлением при минимальной частоте вращения ограничивается ухудшением условий охлаждения двигателей с самовентиляцией, к которым относится большинство асинхронных двигателей мощностью до 300 кВт.

Применяемые в настоящее время ПЧ, укомплектованные выпрямителями постоянного тока УВ, обеспечивают работу двигателя переменного тока во всех четырех квадрантах осей координат, т.е. они допускают реализацию электроприводом всех режимов работы и торможения.

Асинхронные двигатели совместно с ПЧ применяют в приводе подъемных механизмов, буровых станков, металлообрабатывающих станков, прокатных станов и т.п., обеспечивая электроприводу высокие технико-экономические параметры, надежность, простоту монтажа, наладки и обслуживания. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, работающих совместно с ПЧ, получается плавным, без резких бросков тока, а следовательно, экономичным. Электроприводы, укомплектованные такими преобразователями частоты, не нуждаются в применении защитно-пусковых устройств (см. 8.7).

8.5.2. Преобразователи частоты с непосредственной связью

Преобразователи частоты с непосредственной связью НПЧ работают от сети переменного тока. Инвертор И включается в сеть трехфазного переменного тока напряжением U_c частотой f_c . Напряжение U_1 и частота f_1 на выходе НПЧ регулируется сигналом управления U_y , поступающим на блок управления инвертором БУИ (рис. 8.25).

Упрощенная схема силовой части такого преобразователя частоты представлена на рис. 8.26. Группы тиристоров I и II в каждой фазе инвертора (на рисунке группа одной фазы обведена штриховой линией) соединены по встречно-параллельной схеме. При этом положительная полуволна напряжения каждой фазы формируется группой тиристоров I, а отрицательная полуволна этого напряже-

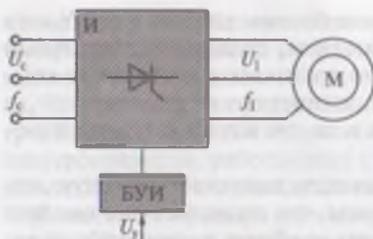


Рис. 8.25. Функциональная схема преобразователя частоты с непосредственной связью

ния — группой тиристоров II. При одновременном управлении группами тиристоров уравнивающий ток между ними, возникший из-за неравенства мгновенных значений напряжения, ограничивается уравнивающими реакторами $L_{ур}$. При раздельном управлении группами тиристоров уравнивающие токи не возникают и дроссели $L_{ур}$ отсутствуют. Однако схема управления при этом усложняется.

Преобразователи частоты с непосредственной связью проще и дешевле преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока, но особенность их работы такова, что они допускают регулирование частоты от 0 не более чем до 20 Гц. При более высокой частоте переменного тока на выходе НПЧ несинусоидальность напряжения настолько значительна, что становится причиной не-

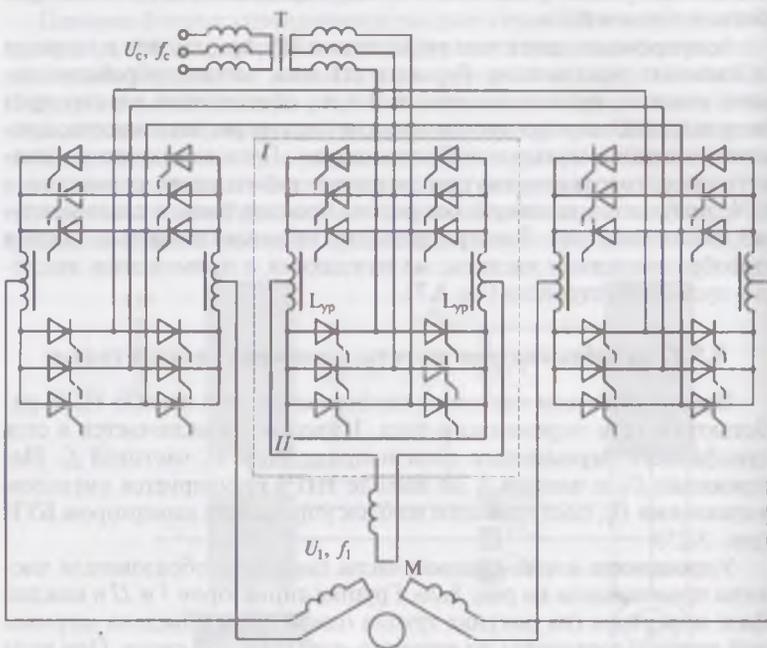


Рис. 8.26. Силовая часть схемы преобразователя частоты с непосредственной связью

допустимо больших потерь в двигателе и возможных нарушений нормальной работы электропривода. Это свойство ограничивает применение НПЧ в регулируемом электроприводе переменного тока.

8.6. Тиристорный регулятор напряжения переменного тока

При регулировании частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением подводимого к обмотке статора напряжения (см. 3.6.4) применяют тиристорные регуляторы напряжения ТРН. Силовая часть такого регулятора состоит из шести тиристоров (по два в каждой фазе), включенных по встречно-параллельной схеме (рис. 8.27), которая обеспечивает прохождение тока в течение обоих полупериодов (положительный полупериод тока через один тиристор, а отрицательный — через другой, встречный). Регулирование напряжения на выходе ТРН производится методом фазового сдвига электрических импульсов, поступающих из системы импульсно-фазового регулирования СИФУ на управляющие электроды тиристоров в каждой фазе с требуемым углом управления α , задаваемым сигналом управления U_y , поступающим из системы автоматического управления. Если угол управления $\alpha = 0^\circ$, то напряжение на выходе ТРН практически равно напряжению на входе (падение напряжения на тиристорах практически равно нулю). При углах управления $\alpha > 0^\circ$ напряжение U_2 на выходе ТРН уменьшается.

Схема ТРН намного упрощается, если вместо тиристоров применить симисторы, обеспечивающие прохождение тока в обоих направлениях. При этом также упрощается схема СИФУ за счет уменьшения числа каналов управления.

Для создания реверсивного ТРН необходимо применить пять пар тиристоров, включенных встречно-параллельно. Такой ТРН обеспечивает пуск асинхронного двигателя при любом направлении вращения ротора, реверсирование, торможение противовключением (см. 3.3.3). Управление реверсивным ТРН осуществляется импульсами СИФУ, схема которого в этом случае усложняется возросшим до 10 количеством каналов управления тиристорами. Для вращения ротора двигателя в одну сторону («Вперед») управляющие им-

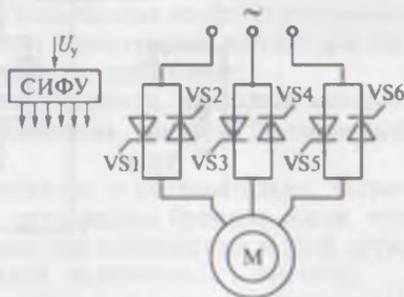


Рис. 8.27. Неревверсивный тиристорный регулятор напряжения переменного тока

пульсы подаются на открывание первой, третьей и пятой пар тиристоров в фазах *A*, *B* и *C*. При этом тиристоры второй и четвертой пар должны быть заперты (рис. 8.28). В этом случае к обмоткам статора двигателя будет приложено напряжение в последовательности фаз *a*, *b*, *c*.

Для реверсирования двигателя, т. е. для вращения ротора двигателя в другую сторону («Назад»), нужно подать импульсы управления на первую, вторую и четвертую пары тиристоров, а тиристоры третьей и пятой пар должны быть заперты. Теперь напряжение на выходе ТРН (на входе двигателя) будет иметь последовательность фаз *a*, *c*, *b*.

Для динамического торможения двигателя (см. 3.3.2) в схеме применен резистор R_T . Во всех двигательных режимах этот резистор шунтирован тиристорами первой группы и поэтому на работу двигателя он не оказывает влияния. Если же после вращения ротора двигателя в направлении «Вперед» необходимо создать режим динамического торможения, то следует закрыть тиристоры первой пары и тогда шунтирование резистора R_T прекратится, а резисторы обратного направления тока в парах 3 и 5 закрыть. В этом случае тиристоры в фазах *B* и *C* будут работать как выпрямители (тиристоры второй и четвертой пар закрыты). В таком состоянии тиристоров по обмоткам статора двигателя проходит тормозной постоянный ток, величина которого ограничивается резистором R_T (сравните схему рис. 8.28 со схемой динамического торможения на рис. 3.8, *a*).

Основной недостаток ТРН — несинусоидальность напряжения на выходе, которое кроме основной синусоидальной составляющей

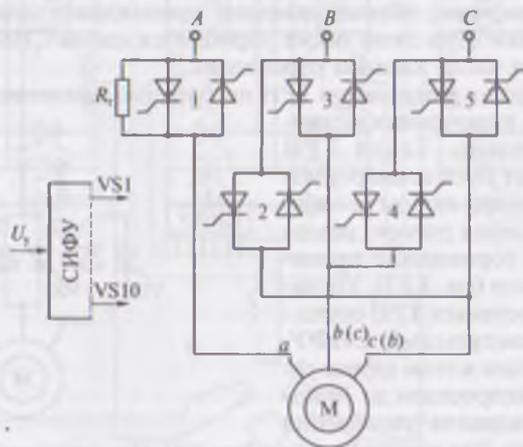


Рис. 8.28. Реверсивный тиристорный регулятор напряжения переменного тока с элементом динамического торможения

содержит высшие гармоники, что ведет к росту потерь в двигателе и снижению его КПД. Для ослабления пульсаций этого напряжения на выходе регуляторов последовательно в каждую фазу включают дроссельные фильтры.

При регулировании частоты вращения асинхронного двигателя изменением подводимого к обмотке статора напряжения посредством тиристорного регулятора ТРН механические характеристики двигателя имеют вид, представленный на рис. 3.22. Однако, как отмечалось в 3.6.4, такой способ регулирования частоты вращения дает возможность изменять частоту вращения только «вниз» от номинальной. При этом увеличивается скольжение асинхронного двигателя, а следовательно, растут потери. Исключение составляет электропривод рабочих механизмов с вентиляторной нагрузкой, у которых статический момент сопротивления $M_{св}$ пропорционален квадрату частоты вращения (см. рис. 3.21, в). При этом малой частоте вращения соответствует небольшое значение статического момента сопротивления, а следовательно, небольшой потребляемый ток. В этих условиях применение тиристорного регулятора напряжения оправдано.

8.7. Защитно-пусковые устройства для электроприводов переменного тока

Наибольшее применение тиристорные регуляторы напряжения получили в переходных режимах электропривода переменного тока: пуск, торможение и реверсирование. Известно, что основной недостаток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей — значительный пусковой ток. Это неблагоприятно влияет как на собственно двигатель, так и на питающую его сеть, вызывая в ней значительные колебания напряжения. Эффективным средством улучшения пусковых свойств электроприводов с указанными двигателями является применение *защитно-пусковых устройств* (ЗПУ), называемых «софт-стартерами». Основным элементом ЗПУ являются тиристорные регуляторы напряжения. Защитно-пусковые устройства позволяют:

- плавно запустить и остановить двигатель, исключая механические удары как на собственно двигатель, так и на приводимый рабочий механизм;
- снизить пусковые токи в двигателе, а следовательно, устранить возникновение в питающей сети резких бросков токов, что могло бы вызвать значительное падение напряжения в этой сети, нарушив работу других потребителей, включенных в эту сеть;
- уменьшить тепловое воздействие на двигатель, а следовательно, повысить надежность его эксплуатации;
- плавно остановить двигатель, что имеет большое значение для работы электроприводов гидронасосов, так как позволяет избе-

жать резких скачков давления жидкости в трубопроводе и не нарушить работу обратного клапана;

- получить энергосберегающий эффект как в процессе пуска двигателя, так и в процессе его работы; последнее объясняется тем, что в часы работы двигателя с недогрузкой рассматриваемые устройства позволяют снизить напряжение питания двигателя, что поддержит коэффициент мощности двигателя на достаточном уровне и снизит потери.

Защитно-пусковые устройства, помимо перечисленных, обладают защитными свойствами: от перегрузки и коротких замыканий, обрыва и «перекоса» фаз, значительных колебаний напряжения в сети, нарушения порядка следования фаз и от затянувшегося процесса пуска.

В простейшем случае защитно-пусковое устройство состоит из тиристорного регулятора напряжения ТРН переменного тока, блока управления БУ, блока дистанционного управления БДУ (рис. 8.29). Информация о фактических значениях токов в линейных проводах, поступает в блок управления БУ от датчиков тока ДТ, включенных в линейные провода через трансформаторы тока, а информация о величине и симметричности напряжения в трехфазной питающей сети поступает в БУ от датчиков напряжений ДН.

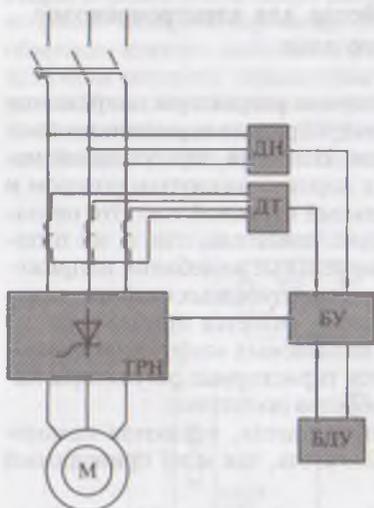


Рис. 8.29. Функциональная схема защитно-пускового устройства:

ТРН — тиристорный регулятор напряжения; ДН — датчики напряжения; ДТ — датчики токов; БУ — блок управления; БДУ — блок дистанционного управления

В результате обобщения этой информации с блока управления БУ на регулятор ТРН поступает управляющий сигнал, обеспечивающий на обмотке статора двигателя М напряжение, оптимальное для его фактической нагрузки. Если же отклонение напряжения в питающей сети превысило допустимое значение или произошел обрыв фазы, либо возникла еще какая-нибудь аварийная ситуация, то двигатель М будет отключен от сети.

Рассмотрим некоторые типы защитно-пусковых устройств, получившие применение в электроприводах переменного тока.

Устройства плавного пуска серии ДМС в полной мере обладают перечисленными выше свойствами. Все требуемые уставки для конкретных случаев пус-

ка и остановки вводятся в софт-стартер с клавиатуры и визуально отображаются на жидкостно-кристаллическом дисплее. Состояние работы и возможные неисправности фиксируются на четырех светодиодных индикаторах.

Софт-стартеры серии ДМС предназначены для плавного пуска асинхронных двигателей мощностью от 7,5 до 400 кВт при напряжении 380 В. Технические данные софт-стартеров серии ДМС приведены в табл. 8.3.

Тиристорное устройство плавного пуска серии УПР1 позволяют значительно повысить ресурс электродвигателей и механической части рабочих машин, снизить эксплуатационные затраты в системах управления технологического оборудования. Устройства серии УПР1 обеспечивают: плавный пуск, реверс и останов двигателя с регулируемой продолжительностью; ограничение тока в переходных режимах электропривода; устранение «рывков» в механической системе электропривода и рабочих машин; полную защиту электродвигателя при перегрузках, коротких замыканиях, перекосе фаз и т. п.

Основные свойства устройств плавного пуска серии УПР1:

- напряжение питания $U_{ном} = 380$ В при частоте 50 Гц;
- диапазон регулирования напряжения на выходе от 0,1 $U_{ном}$ до $U_{ном}$;
- диапазон регулирования длительности пуска от 0,5 до 20 с;
- диапазон регулирования длительности затянутого останова от 1 до 10 с;

Таблица 8.3

Технические данные софт-стартеров серии ДМС

Типоразмер	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток, А
ДМС-010Н	7,7	15
ДМС-015Н	11	22
ДМС-020Н	15	30
ДМС-030Н	22	43
ДМС-040Н	30	57
ДМС-050Н	37	72
ДМС-060Н	45	85
ДМС-075Н	55	104
ДМС-100Н	75	142
ДМС-125Н	93	190
ДМС-150Н	110	204
ДМС-200Н	150	270
ДМС-250Н	185	340
ДМС-300Н	225	420
ДМС-350Н	250	460
ДМС-400Н	315	580
ДМС-550Н	400	710

Основные технические данные устройства плавного пуска серии УПР1

Тип устройства	Ток, А	Расчетная мощность двигателя, кВт	Ревверс	Динамическое торможение
УПР1-200	25	1,0—10	—	—
УПР1-2010			—	Есть
УПР1-2110			Есть	Есть
УПР1-2120*			Есть	—
УПР1-3000	63	10—30	—	—
УПР1-3010			—	Есть
УПР1-3110			Есть	Есть
УПР1-3120*			Есть	—
УПР1-4000	160	30—80	—	—
УПР1-4010			—	Есть
УПР1-4120*			Есть	—
УПР1-5000	400	80—200	—	—
УПР1-5010			—	Есть
УПР1-5120*			Есть	—

* Имеется возможность торможения противовключением для устройств с обратной связью по скорости.

- диапазон регулирования времени динамического торможения от 0,5 до 5,0 с;

- КПД не ниже 95 %;

- режимы работы устройств: продолжительный S1 и повторно-кратковременный S3 с ПВ = 15, 25, 40 и 60 %.

Технические данные устройств плавного пуска серии УПР1 приведены в табл. 8.4.

8.8. Устройства импульсного управления электроприводами

Принципы импульсного управления электроприводами рассмотрены в 2.10 и 3.6.5. На рис 8.30 показана одна из возможных схем устройства импульсного управления двигателем постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения. Роль ключа в этой схеме выполняет тиристор VS, а управление им происходит посредством генератора импульсов ГИ. Импульсы напряжения от ГИ подаются на управляющий электрод УЭ тиристора, при этом тиристор открывается на время $t_{и}$, и в цепи якоря двигателя возникает ток I_{max} . Так как тиристор является не полностью управляемым полупроводниковым элементом (управляется лишь его открытие), то с прекращением действия импульса тиристор закрывается посредством резонансного контура L_1C , шунтирующего тиристор.

Происходит это следующим образом: до открытия тиристора все напряжение сети приложено к его анодной цепи, а так как конденсатор C присоединен к катоду и аноду тиристора (через дроссель L_1), то он оказывается заряженным напряжением сети и его левая пластина имеет потенциал «плюс», а правая — «минус». При открывании тиристора происходит разрядка и перезарядка конденсатора C через открытый тиристор, при этом изменяется полярность на его пластинах. В результате на левой пластине конденсатора, а следовательно, на аноде тиристора, появляется потенциал «минус», а на правой пластине и на катоде тиристора — «плюс», т. е. тиристор оказывается под действием обратного напряжения. Поэтому после прекращения импульса, открывающего тиристор, действием отрицательного потенциала на аноде (и положительного на катоде) происходит *запирание* тиристора. В дальнейшем конденсатор C вновь заряжается напряжением сети («плюс» на аноде) и с появлением следующего импульса тиристор вновь открывается.

Различают *частотно-импульсное* регулирование, когда напряжение U_{cp} регулируют изменением продолжительности периода T импульсов (при $t_{и} = const$), и *широтно-импульсное* регулирование, когда U_{cp} регулируют временем $t_{и}$ (при $T = const$). Время открытого состояния тиристора определяется параметрами контура:

$$t_{и} = \pi\sqrt{L_1 C}.$$

Возможно комбинированное регулирование, при котором изменяют как продолжительность периода T , так и продолжительность импульса $t_{и}$ (см. рис. 2.23). Частота подачи импульсов может достигать 400 Гц и более.

Существуют и другие схемы импульсного регулирования двигателя. Например, управление двигателем постоянного тока путем шунтирования резистора в цепи якоря ($VS1$) или шунтированием резистора в цепи возбуждения ($VS2$) (рис. 8.31). При закрытом тиристоре сопротивление резистора полностью введено ($r = r_{max}$), а при открытом — выведено ($r = 0$). В процессе импульсного регулирования сопротивление меняется в зависимости от скважности γ [см. (2.54)].

Механические характеристики двигателя постоянного тока при импульсном регулировании аналогичны характеристикам при регулировании частоты вращения двигателя изменением напряжения в цепи якоря и имеют вид параллельных прямых (рис. 8.32): характери-

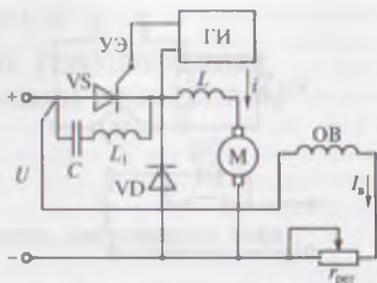


Рис. 8.30. Схема устройства импульсного управления двигателем постоянного тока с применением тиристора

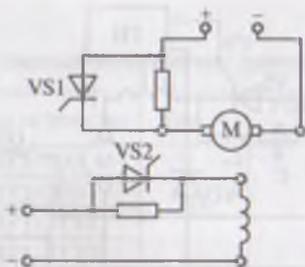


Рис. 8.31. Импульсное регулирование шунтированием резисторов в цепи якоря VS1 и в цепи возбуждения VS2

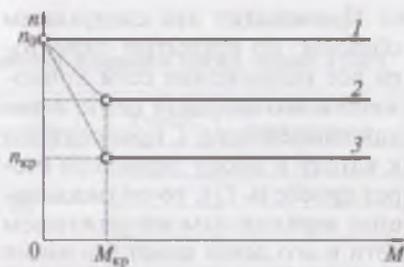


Рис. 8.32. Механические характеристики двигателя постоянного тока при импульсном регулировании

стика 1 естественная, характеристики 2 и 3 искусственные. Особенность этих характеристик состоит в том, что в зоне очень малых нагрузок двигателя возрастают пульсации тока. При некоторой критической минимальной нагрузке $M_{кр}$, соответствующей критической частоте вращения $n_{кр}$, токи становятся прерывистыми и механические характеристики меняют угол наклона так, что все они выходят из точки n_0 , т. е. пограничная частота вращения n_0 при $E_a \approx U$ для всех частот пульсаций импульсного управления оказывается одинаковой.

Импульсное управление двигателями экономично, обеспечивает регулирование частоты вращения плавно и в широком диапазоне, а также пуск двигателя без применения пускового реостата. Благодаря перечисленным достоинствам, а также простоте реализации, импульсное управление широко используется в электроприводах.

Контрольные вопросы

1. Объясните работу электрических машин в системе «генератор—двигатель».
2. Что такое форсировка возбуждения и каково ее назначение?
3. Каково назначение блока СИФУ в тиристорных устройствах?
4. Как устроен тиристорный реверсивный преобразователь напряжения постоянного тока?
5. Объясните работу реверсивного тиристорного преобразователя постоянного тока по схеме рис. 8.14.
6. Объясните принцип работы преобразователя частоты со звеном постоянного тока.
7. Чем ограничивается применение преобразователей частоты с непосредственной связью?
8. Как устроен тиристорный преобразователь напряжения переменного тока?
9. Какие функции выполняют защитно-пусковые устройства?
10. Объясните работу устройства импульсного управления двигателем постоянного тока по рис. 8.30.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, СОВМЕЩЕННЫЕ
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ИНВЕРТОРОМ

9.1. Вентильный двигатель постоянного тока

Недостатки коллекторных двигателей постоянного тока, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла (недостаточная надежность, высокая стоимость изготовления и эксплуатации, недопустимость работы в пожаро- и взрывоопасных средах), привели к необходимости создания двигателя постоянного тока без коллектора и щеток. Известно, что эти элементы в машине постоянного тока выполняют функцию механического преобразователя тока (коммутатора): в генераторах — это выпрямитель, а в двигателях — это инвертор.

Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых приборов — тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на этих элементах полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти полупроводниковые приборы работают в коммутаторе в режиме ключа, т.е. они имеют лишь два устойчивых состояния: открытое для прохождения тока и закрытое.

Вентильный двигатель постоянного тока представляет собой соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором — преобразователем постоянного тока сети в переменный ток обмотки статора (якоря). Что же касается свойств (характеристик) вентильного двигателя, то они зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если работа инвертора *не зависит* от пространственного положения ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного двигателя. Регулирование частоты вращения в таком двигателе выполняется изменением частоты питающего напряжения посредством статических преобразователей частоты. При этом переключение полупроводниковых элементов инвертора ПЧ не зависит от пространственного положения ротора двигателя и его частоты вращения. Такое управление называют *частотным*. Однако задача создания вентильных двигателей — получить бесконтактный двигатель постоянного тока со свойствами коллекторного двигателя. Это оказывается возможным лишь при *позиционном* управлении, когда последовательность и частота переключения полупроводниковых элементов инвертора (коммутатора) находятся в строгой зависимости от пространствен-

ного (углового) положения ротора относительно статора двигателя. В этом случае процесс переключения тока в катушках обмотки статора (якоря) вентильного двигателя происходит аналогично процессу коммутации в коллекторном двигателе постоянного тока. Механические характеристики вентильных двигателей с позиционным управлением мало отличаются от механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения.

На рис. 9.1 представлена функциональная схема вентильного двигателя постоянного тока, состоящего из собственно двигателя М (синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением), датчика положения ротора ДПР и инвертора И. Датчик положения ротора ДПР выдает сигналы на блок СИФУ, управляющего инвертором. Эти сигналы поступают на управляющие электроды тиристоров, вызывая их открывание в соответствии с пространственным положением ротора двигателя. Таким образом, датчик положения ротора в вентильном двигателе обеспечивает жесткую позиционную связь между переключениями тока в катушках обмотки статора (якоря) и пространственным (угловым) положением ротора относительно статора.

Инвертор выполнен на шести тиристорах, соединенных по трехфазной мостовой схеме. Тиристоры 1, 3 и 5 образуют анодную груп-

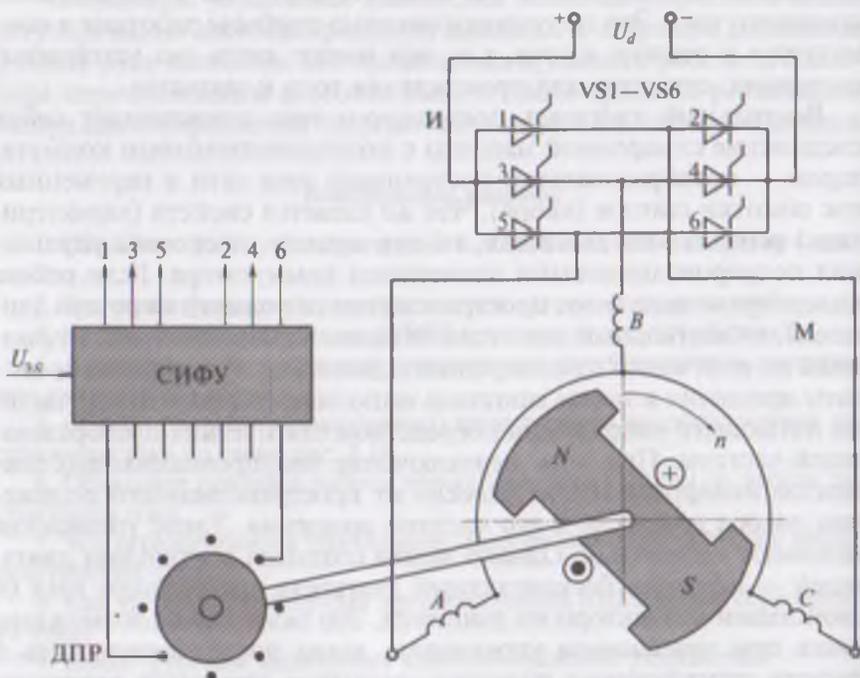


Рис. 9.1. Функциональная схема вентильного двигателя постоянного тока

пу, так как к ним подведен «плюс» напряжения питания U , а тиристоры 2, 4 и 6 образуют катодную группу — к ним подведен «минус» напряжении питания.

В процессе вращения ротора, созданное им вращающееся магнитное поле индуцирует в фазных обмотках статора ЭДС, мгновенные значения которых e_A , e_B и e_C . По своей природе они являются противо-ЭДС и направлены встречно напряжению сети. Для прохождения тока в обмотке статора необходимо, чтобы переменное напряжение U , поступающее на обмотку статора от индуктора, преодолевало значения ЭДС этой обмотки. Данный принцип положен в основу работы вентильного двигателя, так как в отдельные моменты времени мгновенные линейные значения противо-ЭДС обмотки статора (якоря) преодолевают напряжение сети, что ведет к прекращению тока в анодной цепи тиристоров и их закрытию в определенной последовательности.

Таким образом, в основе работы вентильного двигателя лежит органическое соединение инвертора и двигателя, т. е. инвертор не является автономным, как это имеет место в преобразователях частоты ПЧ, а сигналы на переключение его полупроводниковых элементов поступают от датчика положения ротора ДПР в зависимости от пространственного положения ротора. Основными элементами датчика положения ротора ДПР являются магниточувствительные элементы, располагаемые на статоре двигателя. При попадании такого элемента в зону действия магнитного поля вращающегося ротора на выходе такого элемента появляется электрический сигнал. Сигналы от всех этих чувствительных элементов в определенной последовательности и частотой, определяемой частотой вращения ротора двигателя, поступают на вход блока СИФУ и обеспечивают требуемый режим переключения полупроводниковых элементов инвертора (коммутатора). В качестве магниточувствительных элементов ДПР обычно применяют микросхемы, содержащие датчики ЭДС Холла. Эти элементы надежно обеспечивают получение дискретных сигналов уровня 0 или 1.

Так как собственно двигатель М является синхронным, то его частота вращения может регулироваться исключительно частотой переменного тока в обмотке статора. По этой причине, если вентильный двигатель является силовым элементом автоматизированного электропривода, то на вход СИФУ поступает сигнал задания скорости U_{1c} , управляющий частотой тока на выходе инвертора, а следовательно, скоростью вращения двигателя. Если же вентильный двигатель предназначен для включения в сеть трехфазного тока, то трехфазный синхронный двигатель дополняют датчиком положения ротора. Такой двигатель должен получать электропитание от преобразователя частоты ПЧ с дополнительным звеном выпрямителя УВ (см. рис. 8.22). При этом сигналы от ДПР $U_{пр}$ вводятся в блок управления инвертором БУИ и коррек-

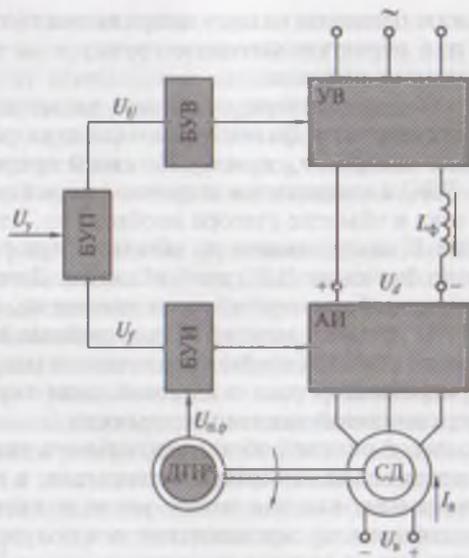


Рис. 9.2. Включение синхронного двигателя СД с преобразователем частоты

тируют сигнал U_f в соответствии с пространственным положением ротора (рис. 9.2).

В вентильных двигателях мощностью до 30 кВт основной магнитный поток возбуждения обычно создается постоянными магнитами, изготовленными из магнитотвердых материалов с большой коэрцитивной силой. Такая конструкция позволяет избежать в вентильных двигателях использование скользящих контактов, что расширяет области их применения в электроприводах. В частности, такие двигатели при определенной конструктивной доработке могут быть использованы в качестве взрывобезопасных для химической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности.

9.2. Вентильно-индукторный привод

Силовым элементом вентильно-индукторного привода ВИП является *индукторный двигатель*. Различают индукторные двигатели с активным ротором (возбужденным) и индукторные двигатели с реактивным (невозбужденным) ротором. Такие двигатели иногда называют синхронными редукторными двигателями, так как в них возможно получение весьма низких частот вращения ротора при значительных синхронных частотах вращения поля статора. Например, при частоте переменного тока 50 Гц возможно

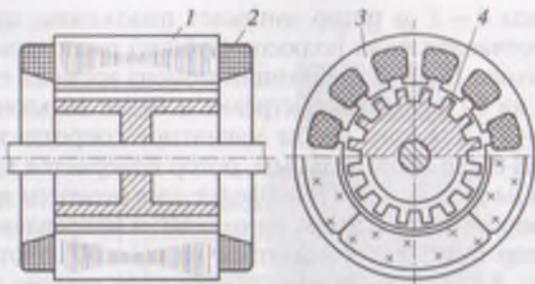


Рис. 9.3. Устройство индукторного двигателя реактивного типа

получение частоты вращения ротора, измеряемое десятками оборотов в минуту.

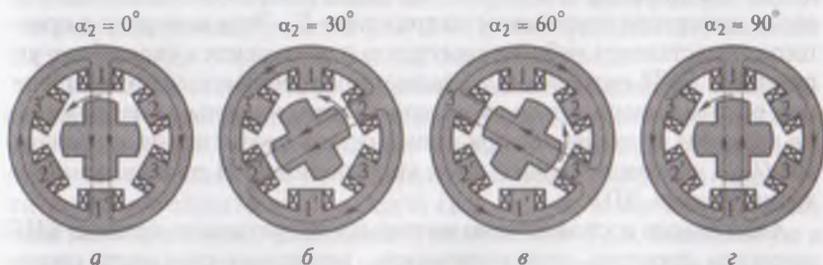
На рис. 9.3 показано устройство индукторного двигателя реактивного типа, состоящего из статора 1 с трехфазной обмоткой 2. Зубцы 3 сердечника статора представляют собой как бы явно выраженные полюсы. Ротор 4 имеет на поверхности продольные открытые пазы. Число этих пазов отличается от числа пазов на статоре, т. е. зубцовые деления статора и ротора индукторного двигателя неодинаковы. Для рассматриваемых двигателей принято соотношение чисел зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 :

$$Z_2 = Z_1 \pm 2p, \quad (9.1)$$

где $2p$ — число полюсов в обмотке статора.

Вращающий момент на роторе двигателя возникает за счет сил магнитного притяжения зубцов ротора к зубцам статора, т. е. ротор в любой момент времени стремится занять такое положение относительно статора, при котором магнитный поток вращающегося поля статора, замыкаясь через ротор, испытывает минимальное магнитное сопротивление.

Для пояснения обратимся к упрощенной конструктивной схеме индукторного двигателя, у которого на статоре шесть полюсов (зубцов), а на роторе четыре полюса (зубца) (рис. 9.4). В исходном положении (рис. 9.4, а) вращающееся поле статора замыкается



9.4. К принципу действия индукторного двигателя

через полюсы 1—1' и ротор занимает положение, при котором пара его противоположащих полюсов (зубцов) располагается по оси полюсов статора 1—1'. В следующий момент времени поле статора повернется на 60° по часовой стрелке и будет замыкаться по оси полюсов 2—2'. Для того чтобы магнитное сопротивление этому потоку вновь стало минимальным, ротор повернется против часовой стрелки на угол $\alpha_2 = 30^\circ$. В последующие моменты времени при каждом повороте поля статора на $\alpha_1 = 60^\circ$ в направлении часовой стрелки ротор будет поворачиваться на $\alpha_2 = 30^\circ$ против часовой стрелки (рис. 9.4, б, в, г). За один оборот поля статора (360°) ротор повернется на половину оборота (180°). В общем случае частота вращения ротора индукторного двигателя, об/мин:

$$n_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} \frac{60 f_1}{p} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} n_1, \quad (9.2)$$

где f_1 — частота переменного тока в обмотке статора, Гц; p — число пар полюсов обмотки статора; n_1 — синхронная частота вращения, об/мин.

Применительно к рассматриваемому индукторному двигателю получим

$$n_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} n_1 = \frac{4 - 6}{4} = -0,5 n_1.$$

Увеличивая число зубцов сердечников статора Z_1 и ротора Z_2 , можно получить индукторный двигатель на весьма малую частоту вращения. Знак минус в полученном выражении указывает, что ротор двигателя вращается встречно вращению поля статора.

Соотношение между количеством зубцов на статоре и роторе индукторного двигателя влияет как на частоту вращения ротора, так и на направление этого вращения.

Возможности индукторного двигателя расширяются при его питании не от трехфазной сети переменного тока, а от сети постоянного тока через инвертор, который позволяет регулировать частоту подачи импульсов в обмотку статора. Функциональная схема такого двигателя представлена на рис. 9.5. Здесь выпрямитель В создает на входе инвертора постоянное напряжение U_d . Этот инвертор в принципе представляет собой коммутатор и управляется через блок управления БУИ сигналом $U_{3,с}$, задающим требуемую частоту вращения ротора инверторного двигателя. Подача импульсов напряжения на катушки полюсов статора происходит в соответствии с сигналами $U_{дпр}$, поступающими в блок управления БУИ от датчика положения ротора ДПР.

Основными достоинствами вентильно-индукторного привода ВИП являются простота, технологичность, невысокая стоимость индукторного двигателя и др. Возможность получения в индукторном дви-

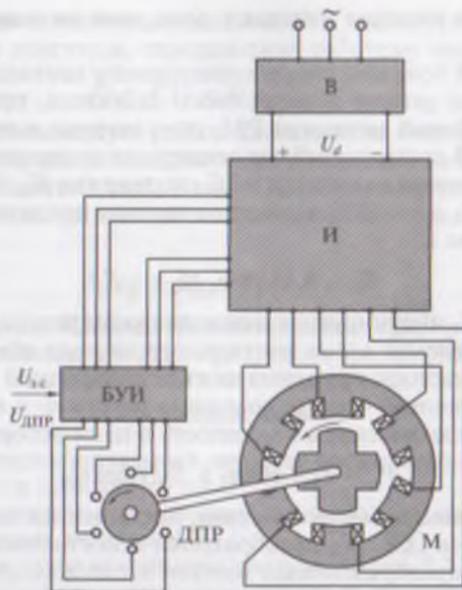


Рис. 9.5. Функциональная схема индукторно-вентильного привода

гатель весьма низких частот вращения позволяет в некоторых случаях при передаче движения от двигателя на рабочий орган рабочей машины отказаться от применения механического редуктора, что упрощает и удешевляет электропривод. Мощность ВИП может составлять от нескольких единиц до нескольких сотен киловатт и более.

9.3. Асинхронный вентильный каскад

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором введением в цепь ротора регулировочного реостата сопряжено со значительными потерями в цепи ротора, включая регулировочный реостат (см. 3.6.1), что существенно снижает энергетические показатели такого электропривода.

Имеется возможность регулировать частоту вращения таких двигателей без существенных потерь в цепи ротора. Для этого электрическую энергию, выделяющуюся в цепи ротора при скольжении (энергию скольжения), посредством преобразовательной установки передают обратно в питающую сеть переменного тока. Схемы, полезно использующие мощность скольжения $P_{эм}$, выделяемую в цепи ротора асинхронного двигателя, называют *каскадными системами*. Если же в схеме каскада применены вентильные устрой-

ства, то такие каскады называют *асинхронными вентильными каскадами* АВК.

На рис. 9.6 показана схема асинхронного вентильного каскада, где к фазному ротору асинхронного двигателя, приводящего во вращение рабочий механизм РМ, подключены выпрямитель В и инвертор И. В процессе работы асинхронного двигателя в обмотке его фазного ротора наводится ЭДС скольжения E_{2s} . Частота $f_{2s} = f_1 s$, и величина E_{2s} этой ЭДС зависит от частоты вращения ротора, т.е. от скольжения s ,

$$E_{2s} = 4,44f_1\Phi w_2 k_{об2}S = E_2s, \quad (9.3)$$

где E_2 — ЭДС, индуцируемая в неподвижном роторе, т.е. при $s = 1$.

Рассматриваемая схема вентильного каскада обеспечивает регулирование частоты вращения вниз от синхронной ($1 > s > 0$), т.е. при подсинхронной частоте вращения ротора $n_2 < n_1$. При работе двигателя со скольжением s мощность в цепи ротора

$$P_{рв} = E_{2s}I_2 \cos \varphi_2 = E_2sI_2 \cos \varphi_2, \quad (9.4)$$

называемая *мощностью скольжения*, поступает на выпрямитель В, где переменная ЭДС E_{2s} преобразуется в постоянное напряжение U_d . Затем эта преобразованная мощность скольжения поступает на инвертор И ведомой сетью (частота тока на выходе этого инвертора равна частоте тока в сети).

Здесь постоянный ток преобразуется в переменный ток частоты сети и через согласующий трансформатор Т передается в сеть. Таким образом, вместо потерь в регулировочном реостате, которые имеют место при регулировании частоты вращения введением в цепь ротора такого реостата, происходит рекуперация, т.е. частичный возврат энергии в питающую сеть.

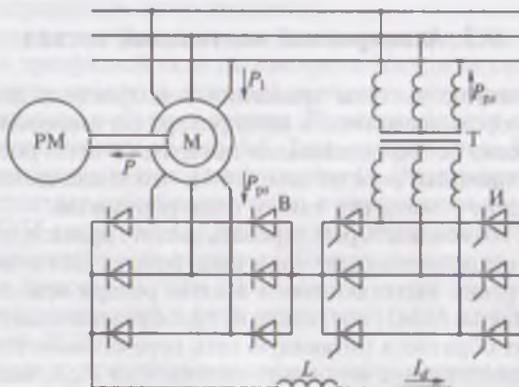


Рис. 9.6. Асинхронный вентильный каскад

Пренебрегая потерями, можно считать, что полезная мощность асинхронного двигателя, передаваемая рабочему механизму,

$$P_2 \approx P_1(1 - s) = P_1 - P_s. \quad (9.5)$$

Знак минус соответствует работе двигателя на подсинхронной частоте вращения, когда мощность скольжения P_s из цепи обмотки ротора возвращается в сеть. В итоге КПД асинхронного двигателя, при его работе по рассматриваемой схеме, т. е. при совмещении с инвертором

$$\eta_{и} = P_{ном} / (P_1 - P_s),$$

оказывается выше КПД асинхронного двигателя, при его работе в автономном режиме $\eta = P_{ном} / P_1$.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается вентильный двигатель постоянного тока от коллекторного двигателя постоянного тока?
2. Какова разница между частотным и позиционным способами управления вентильными двигателями?
3. Объясните работу вентильного двигателя по рис. 9.2.
4. Каково устройство и назначение вентильно-индукторного привода?
5. Какую функцию выполняют выпрямитель и инвертор в схеме асинхронного вентильного каскада?



**РАЗОМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

10.1. Основные понятия

Управление электроприводом включает в себя следующие операции: пуск, торможение, остановку, реверсирование, регулировка или поддержание неизменными (стабилизация) частоты вращения, момента, мощности либо других параметров электропривода. При этом должны учитываться случайно возникшие воздействия на электропривод, способные нарушить точность технологической операции, выполняемой рабочей машиной (механизмом).

В зависимости от способа реализации операций управления электроприводы разделяют на два вида: ручной и автоматизированный.

В *ручном электроприводе* все операции управления выполняются оператором посредством аппаратов и приборов ручного управления: рубильников, переключателей, кнопок, контроллеров, пусковых и регулировочных реостатов и т. п.

В *автоматизированном электроприводе* участие оператора сводится к надзору за электроприводом, на случай возникновения в нем аварийных ситуаций; что же касается управления электроприводом, то оно выполняется автоматически, без участия человека.

Автоматизированные системы электропривода подразделяют на разомкнутые и замкнутые.

В *разомкнутой автоматизированной системе* элементы электропривода составляют *прямую цепь воздействий*, по которой осуществляется управление электроприводом в соответствии с поступившим на вход этой цепи управляющим сигналом U_y (рис. 10.1). Работа двигателя М и других устройств электропривода происходит исключительно в соответствии с этим сигналом. Никакая информация о фактических значениях параметров в разомкнутую систему электропривода не поступает, а следовательно, и нет корректировки работы системы. Например, управляющим сигналом предусмотрено поддержание номинальной частоты вращения вала



Рис. 10.1. Блок-схема разомкнутого автоматизированного электропривода

электропривода не поступает, а следовательно, и нет корректировки работы системы. Например, управляющим сигналом предусмотрено поддержание номинальной частоты вращения вала

двигателя. Однако из-за происшедшего по непредвиденным причинам падения напряжения в питающей сети частота вращения оказалась меньше номинальной. Вследствие этого фактическое положение исполнительного органа ИО не будет соответствовать положению, заданному управляющим сигналом. Отсутствие корректирующих мер может нарушить технологический процесс рабочей машины (механизма), управляемой данным электроприводом. Таким образом, разомкнутая система автоматизированного электропривода не обеспечивает требуемого качества регулирования.

В замкнутой автоматизированной системе электропривода имеются цепи обратных связей, по которым на вход системы поступает информация о фактическом значении параметров и воздействует на электропривод таким образом, что факторы, нарушившие работу рабочего органа, оказываются скомпенсированными.

Рассматриваемые в данной главе разомкнутые схемы автоматизированного электропривода выполнены на релейно-контакторных элементах, применение которых в электроприводе пока является наиболее распространенным, хотя и не всегда обеспечивает требуемую надежность. Последнее зависит от качества изготовления релейно-контакторных устройств и правильного их выбора. Вместе с тем схемы с релейно-контакторными элементами проще для анализа примененных в них взаимодействий и блокировок, что имеет значение при изучении этих схем.

10.2. Типовые схемы автоматизированного управления пуском, реверсом и торможением электроприводов переменного тока

Все операции, связанные с включением и отключением, торможением и реверсом электроприводов в рассматриваемых схемах, выполняются автоматически. Лишь только команды «Пуск» и «Стоп» в этих схемах выполняются оператором. Однако любая из этих схем, будучи включенной в систему автоматического регулирования, становится *полностью автоматизированной*, так как все команды по управлению, включая «Пуск» и «Стоп», будут выполняться в такой системе автоматически, в соответствии с управляющими электрическими сигналами.

Следует также иметь в виду, что эти схемы в рассматриваемом виде относятся к категории *нерегулируемых*, так как в них не предусматривается регулирования частоты вращения либо другого рабочего параметра электропривода.

Рассматриваемые схемы выполнены с применением условных обозначений на элементы и буквенных кодов (приложение 2).

10.2.1. Схема пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором посредством нереверсивного контактора

Рассматриваемая схема является самой распространенной в электроприводах с короткозамкнутыми асинхронными двигателями малой и средней мощности напряжением до 1 кВ, допускающих прямое их включение в сеть при отсутствии торможения и реверса.

При нажатии кнопки SB1 «Пуск» замыкается цепь питания катушки линейного контактора KM1 (рис. 10.2), который срабатывает и своими силовыми контактами KM1 подключает к сети обмотку статора двигателя М. Одновременно замыкаются контакты KM1, шунтирующие кнопку SB1 «Пуск», чем обеспечивается питание обмотки контактора при отпускании этой кнопки.

Отключение двигателя выполняется нажатием кнопки SB2 «Стоп». При этом размыкается цепь питания катушки контактора KM1, что приводит к размыканию всех его силовых контактов KM1, отключающих обмотку статора двигателя от сети, и контактов, шунтирующих кнопку SB1.

При отпускании кнопки SB2 ее контакты замыкаются, но цепь катушки контактора KM1 остается разомкнутой.

В рассмотренной схеме управления применена защита двигателя от перегрузки посредством двух тепловых реле КК. Если двигатель окажется перегруженным и потребляемый им ток превысит допустимое значение, то выделяемая нагревательным элементом в тепловом реле КК теплота вызовет такой изгиб биметаллической

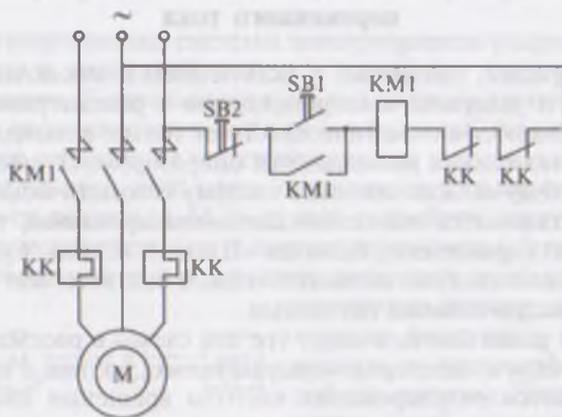


Рис. 10.2. Схема управления пуском трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

пластины (см. рис. 6.8), при котором разомкнутся контакты КК в цепи питания катушки линейного контактора КМ1 и двигатель отключится от сети.

10.2.2. Схема управления пуском короткозамкнутого асинхронного двигателя с ограничением пускового тока путем переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

Для трехфазных асинхронных двигателей, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», в целях уменьшения пускового тока применяют пуск двигателя переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник» (см. 3.5).

Предварительно следует включить рубильник QS1 и автоматический выключатель QF (рис. 10.3). Затем, нажатием кнопки SB1 включают контактор КМ1, который своими силовыми контактами КМ1 соединяет обмотку статора двигателя «звездой». При этом начинается разгон ротора двигателя при пониженном напряжении на фазных обмотках статора. Одновременно включается реле времени КТ, которое своими контактами КТ шунтирует кнопку SB1. С замедлением на срабатывание размыкаются контакты КТ в цепи катушки КМ1 и контактор КМ1 отключается, размыкая соединение «звездой» обмотки статора. Одновременно замыкаются контакты КТ в цепи контактора КМ2, который срабатывает и своими контактами КМ2 соединяет обмотку статора двигателя «треугольником». Двигатель продолжает разгон, но при номинальном напряжении на фазных обмотках статора.

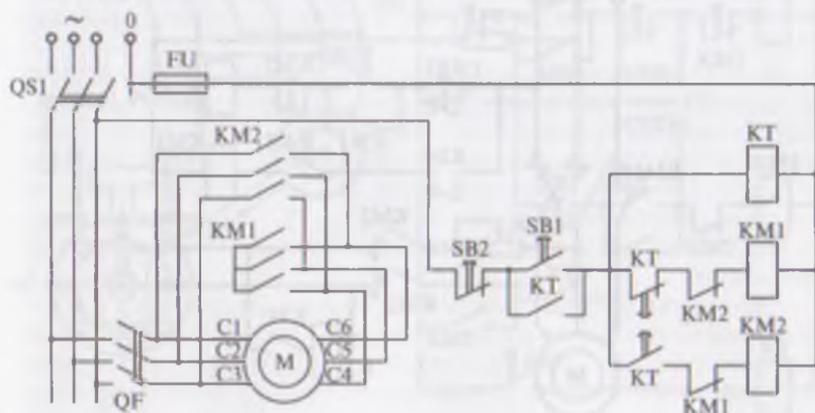


Рис. 10.3. Схема пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

10.2.3. Схема нереверсивного управления пуском и остановкой короткозамкнутого асинхронного двигателя с применением динамического торможения

При нажатии на кнопку SB1 «Пуск» замыкается цепь питания катушки линейного контактора KM1, который срабатывает и своими силовыми контактами KM1 подключает двигатель M к трехфазной сети (рис. 10.4) и катушку реле времени динамического торможения КТ подключает к источнику постоянного тока. При включении контактора KM1 размыкаются его контакты в цепи катушки контактора торможения KM2 и замыкаются контакты KM1, шунтирующие кнопку SB1 «Пуск». При срабатывании реле КТ замыкаются контакты КТ в цепи катушки контактора торможения KM2, но этот контактор не срабатывает, так как цепь его катушки остается разомкнутой контактами KM1.

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB2 «Стоп». При этом прекращается питание катушки контактора KM1 и двигатель отключается от сети. Одновременно замыкаются контакты KM1 в цепи катушки контактора KM2, который срабатывает и своими контактами KM2 подключает обмотку статора двигателя к источнику постоянного тока, что и приводит к динамическому торможению двигателя. Одновременно размыкаются контакты KM2 в цепи катушки линейного контактора KM1, что исключает его случайное включение.

Резистор R_r предназначен для ограничения постоянного тока в обмотке статора двигателя при динамическом торможении. Од-

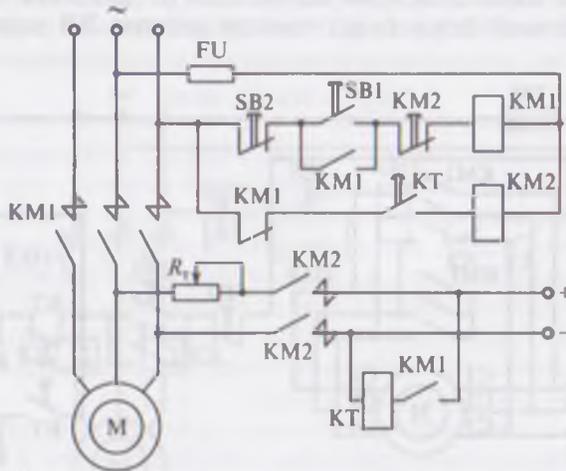


Рис. 10.4. Схема нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением динамического торможения

нако протекание тока в обмотке статора непродолжительно, так как при отключении контактора КМ1 размыкаются его контакты в цепи питания катушки реле времени КТ, что ведет к размыканию с некоторой временной задержкой контактов КТ в цепи питания катушки контактора торможения КМ2. В результате обмотка статора двигателя контактами КМ2 отключается от сети постоянного тока через некоторое время после отключения двигателя от трехфазной сети. Выдержка времени на размыкание контактов реле времени КТ устанавливается опытным путем с учетом времени, необходимого на торможение двигателя.

10.2.4. Схема реверсивного управления пуском и остановкой короткозамкнутого асинхронного двигателя с применением торможения противовключением в функции скорости

В этой схеме (рис. 10.5) подключение двигателя к сети возможно через две группы силовых контактов: контакты КМ1(П), при замыкании которых ротор двигателя вращается в одном направлении («правое» вращение) и контакты КМ2(Л), при включении

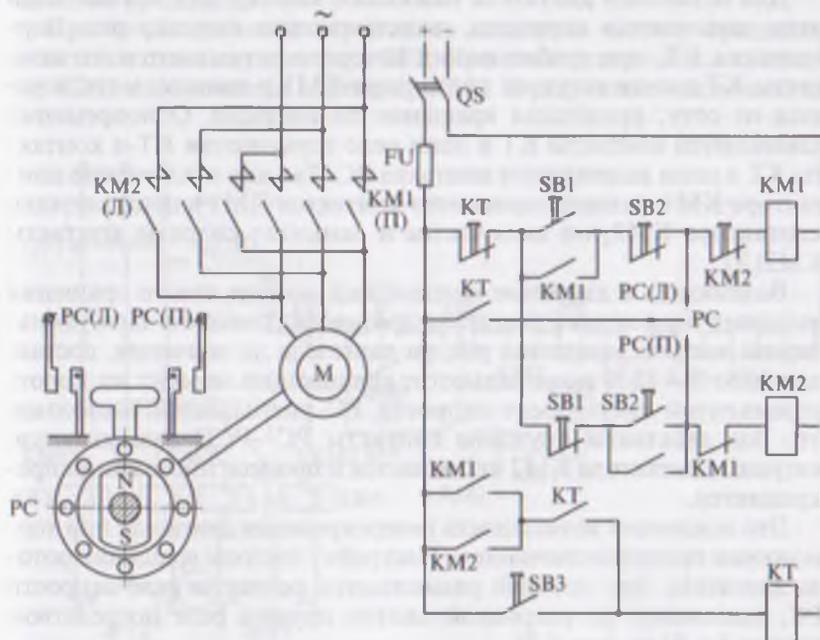


Рис. 10.5. Схема управления пуском, реверсированием и остановкой короткозамкнутого асинхронного двигателя с применением торможения противовключением в функции скорости

которых ротор вращается в другом направлении («левое» вращение). Схема содержит реле скорости РС (см. 6.2), механически соединенное с валом двигателя М. Контакты этого реле РС(П) и РС(Л) включены в схему управления двигателем. Начинать следует с подключения схемы управления в сеть постоянного тока рубильником QS.

Для включения двигателя на «правое» вращение нажимают двоящую кнопку SB1. При этом замыкается цепь катушки линейного контактора КМ1 и одновременно размыкаются контакты в цепи катушки линейного контактора КМ2, исключающие возможность случайного включения этого контактора, что привело бы к короткому замыканию в силовой части схемы двигателя. При срабатывании линейного контактора КМ1 замыкаются его блокировочные контакты, шунтирующие кнопку SB1, и включаются силовые контакты КМ1(П), которые присоединяют обмотку статора двигателя к сети. Одновременно размыкаются контакты блокировочные КМ1, исключающие возможность включения контактора КМ2, и замыкаются контакты КМ1 в цепи реле торможения КТ. После пуска двигателя М срабатывает реле скорости РС и его средний контакт РС замыкается с крайним контактом РС(П).

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB3 «Стоп». При этом замыкаются контакты, подключающие катушку реле торможения КТ, при срабатывании которого размыкаются его контакты КТ в цепи катушки контактора КМ1 и двигатель отключается от сети, продолжая вращение по инерции. Одновременно замыкаются контакты КТ в цепи реле торможения КТ и контакты КТ в цепи подвижного контакта РС. Так как отключение контактора КМ1 вызвало замыкание контактов КМ1 в цепи катушки контактора КМ2, он включается и замыкает силовые контакты КМ2(Л).

Возникший в двигателе вращающий момент левого вращения вызывает торможение двигателя противовключением. При уменьшении частоты вращения ротора двигателя до значения, составляющего 5—10% номинального, вращающий момент на короткозамкнутой клетке реле скорости РС уменьшается настолько, что под действием пружины контакты РС—РСП размыкаются, катушка контактора КМ2 отключается и процесс торможения прекращается.

Это исключает возможность реверсирования двигателя при торможении противовключением. Настройку частоты вращения ротора двигателя, при которой размыкаются контакты реле скорости РС, выполняют регулировкой сжатия пружин реле посредством винтов 3 и 9 (см. рис. 6.7).

Если при работе двигателя М с правым вращением ротора потребуется его реверсирование, то нажимать кнопку SB3 «Стоп» не следует. Для этого достаточно нажать кнопку SB2. При этом

размыкаются контакты в цепи катушки контактора КМ1 и замыкают контакты в цепи контактора КМ2. В итоге разомкнутся силовые контакты КМ1(П) и замкнутся силовые контакты КМ2(Л), изменится порядок следования фаз на обмотке статора и двигатель изменит направление вращения ротора. Если после этого потребуеться остановка двигателя, то необходимо нажать кнопку SB3 «Стоп» и наступит процесс торможения противовключением.

10.2.5. Схема нереверсивного управления короткозамкнутым двухскоростным асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре на разное число полюсов

После включения автоматов QF1 и QF2 нажимают сдвоенную кнопку SB1. При этом срабатывает контактор КМ1 (рис. 10.6), который своими контактами размыкает цепь катушки контактора КМ2, чтобы исключить возможность случайного включения контактора КМ2, что привело бы к аварии, и включает в трехфазную сеть обмотку статора меньшим числом полюсов ($2p = 2$). Одновременно шунтируется кнопка SB1. Двигатель работает с наибольшей частотой вращения.

При необходимости перейти на меньшую частоту вращения нажимают сдвоенную кнопку SB2. При этом отключается контактор КМ1 и включается контактор КМ2. В результате отключаются

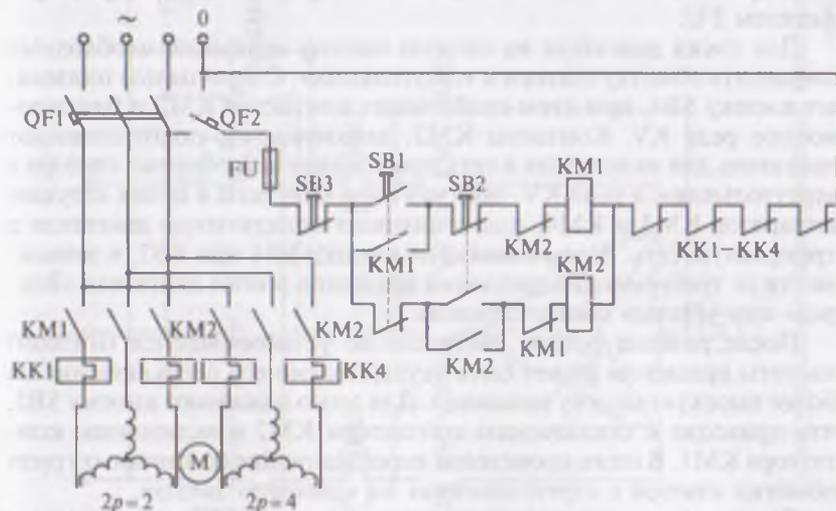


Рис. 10.6. Схема нереверсивного управления короткозамкнутым двухскоростным асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре на разное число полюсов

линейные контакты КМ1, включаются линейные контакты КМ2, подключающие к сети обмотку статора с большим числом полюсов ($2p = 4$). Для отключения двигателя следует нажать кнопку SB3. При этом размыкается цепь управления и все устройства в этой цепи отключаются. В итоге размыкаются линейные контакты КМ2 и двигатель оказывается выключенным.

Для защиты АД от перегрузки в линейные провода цепей статоров включены тепловые реле КК1—КК4, а их размыкающие контакты включены последовательно в цепь управления.

10.2.6. Схема управления короткозамкнутым двухскоростным асинхронным двигателем с одной обмоткой на статоре, переключаемой на разное число полюсов

В отличие от рассмотренной схемы управления (см. рис. 10.6), данная схема (рис. 10.7) управляет двигателем с одной обмоткой на статоре, конструкция которой путем переключения секционных групп обмотки обеспечивает получение двух вариантов этой обмотки на разное число полюсов в отношении 2:1. При соединении обмотки статора в «треугольник» ее число полюсов наибольшее, например $2p = 4$, а при соединении обмоток в «двойную звезду» число полюсов обмотки наименьшее, например $2p = 2$.

Защита силовой части электропривода осуществляется тепловыми реле КК1 и КК2, а защита схемы управления — предохранителем FU.

Для пуска двигателя на низкую частоту вращения необходимо соединить обмотку статора в «треугольник». С этой целью нажимают кнопку SB4, при этом срабатывает контактор КМ2 и блокировочное реле KV. Контакты КМ2, замкнувшись, подготавливают двигатель для включения в сеть при соединении обмотки статора в «треугольник», а реле KV, замкнув свои контакты в цепях катушек аппаратов КМ3 и КМ4, подготавливает подключение двигателя в трехфазную сеть. Затем нажимают кнопки SB1 или SB2, в зависимости от требуемого направления вращения ротора двигателя «Вперед» или «Назад» соответственно.

После разгона ротора двигателя до установившейся (низкой) частоты вращения может быть осуществлено его переключение на более высокую частоту вращения. Для этого нажимают кнопку SB5, что приводит к отключению контактора КМ2 и включению контактора КМ1. В итоге происходит пересоединение секционных групп обмотки статора с «треугольника» на «двойную звезду».

Для остановки двигателя нажимают кнопку SB3, что вызывает отключение всех контакторов от сети.

Применение в схеме кнопок управления со сдвоенными контактами исключает одновременное включение контакторов КМ1

и КМ2, КМ3 и КМ4, что привело бы к неправильному соединению секционных групп обмотки статора и нарушению работы схемы.

10.2.7. Схема нереверсивного управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Схема обеспечивает реостатный пуск двигателя в функции времени с применением реле времени постоянного тока КТ1, КТ2 и КТ3 с замедлением при отпускании.

При включении автоматических выключателей QF1 и QF2 срабатывают все реле времени КТ1, КТ2 и КТ3 и их контакты размыкают цепи катушек контакторов КМ2, КМ3 и КМ4, предназначенных для замыкания секций пускового реостата ПР (рис. 10.8). Пуск двигателя начинается с нажатия кнопки SB1, которая замыкает цепь катушки линейного контактора КМ1. При его срабатывании замыкаются ли-

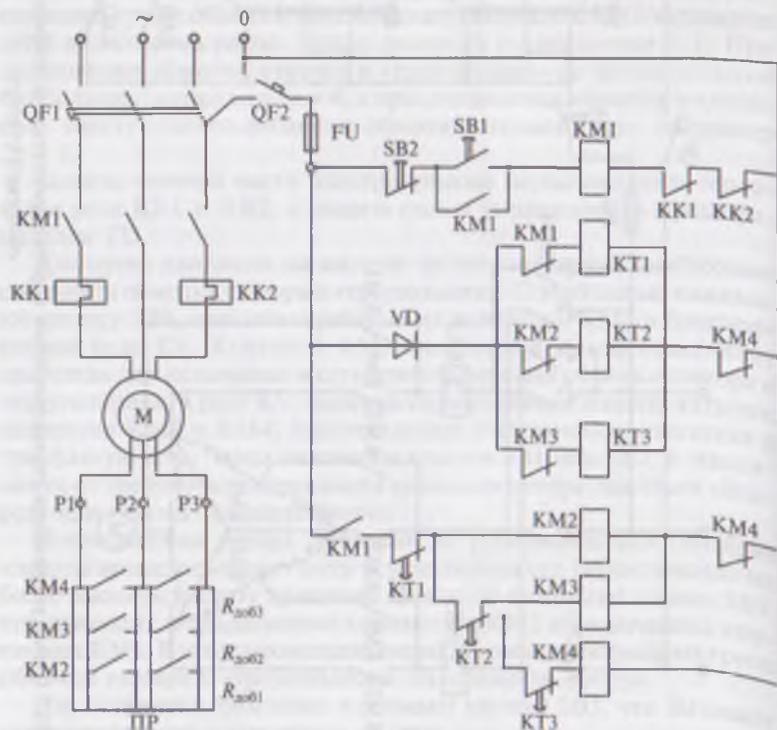


Рис. 10.8 Схема нереверсивного управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

нейные контакты КМ1, включающие обмотку статора двигателя в трехфазную сеть. Одновременно контакты КМ1 шунтируют кнопку SB1 так, чтобы при отпускании кнопки цепь катушки КМ1 осталась замкнутой. Все контакты в ПР остаются разомкнутыми, т.е. пуск двигателя начинается при полностью введенных ступенях ПР ($R_{до61} + R_{до62} + R_{до63}$). Одновременно контакты линейного контактора КМ1 подключают катушки контакторов КМ2, КМ3 и КМ4, а контакты КМ1 в цепи реле времени КТ1 размыкаются и отключают это реле. Через установленную в этом реле выдержку времени при отпускании контакты КТ1 замкнутся, контактор КМ2 сработает и своими контактами зашунтирует первую ступень ПР так, что пуск двигателя будет продолжаться на второй ступени ПР ($R_{до62} + R_{до63}$). Одновременно при срабатывании КМ2 его контакты отключат реле времени КТ2 и контакты этого реле в цепи контактора КМ3 с установленной выдержкой времени включают этот контактор. Kontakтами КМ3 будет зашунтирована вторая ступень ПР и пуск двигателя будет продолжаться на третьей ступени ПР ($R_{до63}$). Одновременно контакты КМ3 в цепи реле времени КТ3 разомкнут эту цепь и реле будет отключено. Его контакты КТ3, спустя время выдержки при отпускании, замкнут цепь катушки контактора КМ4, он сработает и своими контактами зашунтирует последнюю ступень ПР.

На этом процесс пуска двигателя заканчивается и наступает режим работы при $R_d = 0$. Так как работа двигателя может продолжаться длительное время, все реле времени КТ1, КТ2, КТ3 и контакторы КМ2 и КМ3 целесообразно отключить, что и происходит посредством размыкающих контактов КМ4. Замыкающие контакты контактора КМ4 полностью шунтируют ПР.

Остановка двигателя осуществляется нажатием кнопки SB2. При этом размыкается цепь катушки линейного контактора КМ1, контакты которого отключают от сети обмотку статора и катушки контакторов КМ2—КМ4. Что же касается катушек реле времени КТ1—КТ3, то, благодаря замкнутому состоянию контактов в цепи катушек этих реле, они окажутся включенными, что подготовит схему управления к следующему пуску двигателя.

Для защиты двигателя от перегрузки в два линейных провода включены тепловые реле КК1 и КК2, размыкающие контакты которых включены последовательно в цепь катушки линейного контактора КМ1.

10.2.8. Схема управления асинхронным пуском синхронного двигателя в функции тока статора

Наиболее сложным при эксплуатации синхронных двигателей является процесс пуска. Большинство синхронных двигателей имеют на роторе короткозамкнутую клетку для асинхронного пуска. При нажатии на кнопку SB1 срабатывает линейный контактор КМ1,

который своими силовыми контактами включает в сеть обмотку статора двигателя (рис. 10.9). Возникшее вращающееся поле статора сцепляется с пусковой клеткой ротора и на роторе появляется пусковой момент. Под действием этого момента ротор начинает разгоняться. При этом постоянный ток в обмотку возбуждения не подается, а сама обмотка замкнута на разрядный резистор R_p , что предохраняет обмотку от наведения в ней вращающимся полем статора чрезмерно высокой ЭДС, опасной для межвитковой изоляции обмотки. По мере разгона ротора сила пускового тока в цепи статора снижается. Контроль над величиной тока осуществляется посредством реле тока КА, включенного в один из линейных проводов через трансформатор тока ТА. Уставку этого реле на отпущение принимают равной номинальному значению тока статора, при котором частота вращения ротора достаточно близка к синхронной ($n \approx 0,95n_1$). Пока пусковой ток превышает это значение реле тока, КА включено и своими контактами замыкает цепь катушки реле времени КТ. При этом контакты КТ в цепи контактора КМ2 разомкнуты, и контакты КМ2 не подключают обмотку возбуждения двигателя на напряжение U_b . Когда же пусковой ток статора, постепенно снижаясь, достигнет значения тока уставки реле тока КТ, это реле отпустит и своими контактами отключит реле времени КТ, которое своими замыкающими контактами КТ с некоторым замедлением замкнет цепь катушки контактора КМ2. При этом контактор КМ2 сработает и подключит обмотку возбуждения

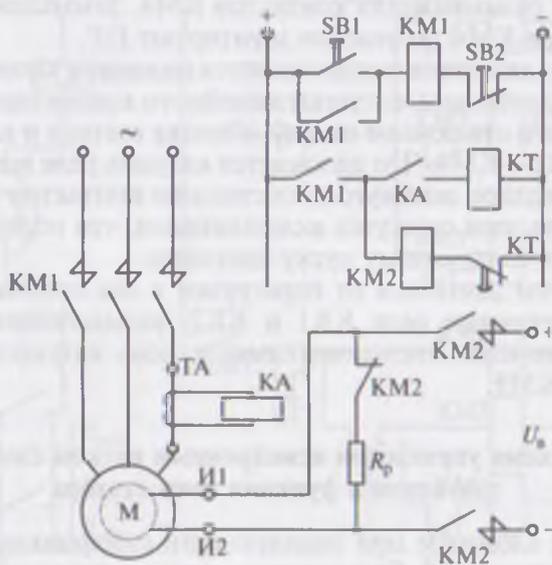


Рис. 10.9. Схема управления асинхронным пуском синхронного двигателя в функции тока статора

Об синхронного двигателя к сети постоянного тока на напряжение U_n , одновременно отключив разрядный резистор R_p . При этом двигатель возбуждается, втягивается в синхронизм и начинает работу в синхронном режиме.

10.3. Типовые схемы автоматизированного управления пуском, реверсом и торможением электроприводов постоянного тока

10.3.1. Схема управления пуском в функции времени и остановкой с динамическим торможением двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Пуск двигателя М в функции времени осуществляется с помощью двух реле времени КТ1 и КТ2 (рис. 10.10). При кратковременном нажатии кнопки SB1 «Пуск» замыкается цепь питания обмотки линейного контактора КМ1, при срабатывании которого замыкаются блок-контакты КМ1, шунтирующие кнопку SB1, размыкаются контакты в цепи терморезистора R_t , замыкаются контакты, включающие реле КТ1, и замыкаются силовые контакты КМ1,

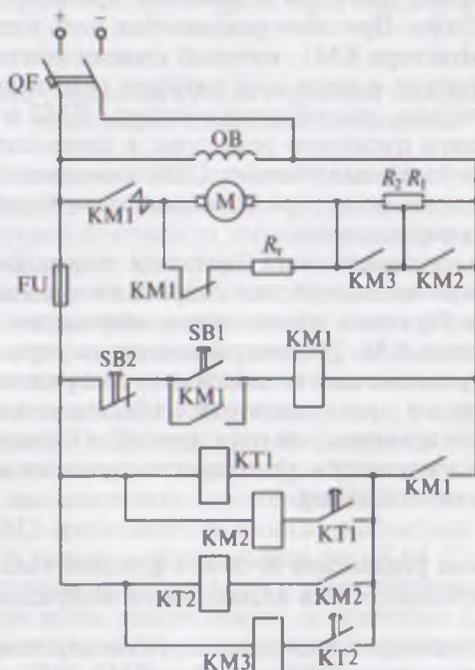


Рис. 10.10 Схема управления пуском двигателя постоянного тока независимого возбуждения в функции времени с динамическим торможением

подключающие к сети постоянного тока двигатель М. При этом начинается пуск двигателя М, в цепь обмотки якоря которого включены элементы пускового резистора $R_1 + R_2$.

Реле времени КТ1 с выдержкой времени замедления при срабатывании своими контактами замыкает цепь катушки контактора КМ2, при срабатывании которого контакты КМ2 шунтируют элемент пускового резистора R_1 . В итоге разгон двигателя продолжается, но теперь на второй ступени пуска с сопротивлением добавочного резистора в цепи якоря R_2 . Одновременно замыкаются контакты КМ2, подключающие катушку реле времени КТ2, которое срабатывает и с заданной выдержкой времени своими контактами подключает катушку контактора КМ3. Контакт КМ3 срабатывает и своими контактами шунтирует элемент пускового резистора R_2 и цепь якоря двигателя оказывается включенной на полное напряжение сети постоянного тока. На этом процесс пуска заканчивается и двигатель М переходит в рабочий режим. Таким образом, продолжительность пуска на первой ступени определяется временем замедления при срабатывании реле времени КТ1, а продолжительность пуска на второй ступени — временем замедления при срабатывании реле времени КТ2.

Для отключения двигателя необходимо кратковременно нажать кнопку SB2 «Стоп». При этом разомкнется цепь питания обмотки линейного контактора КМ1, который своими контактами отключит якорь двигателя и цепи всех катушек реле и контакторов от сети. Следовательно, разомкнутся контакты КМ2 и КМ3, шунтирующие элементы пускового резистора, и двигатель будет подготовлен к следующему включению. Одновременно замкнутся контакты КМ1 в цепи резистора R_r и двигатель перейдет в режим динамического торможения.

Количество ступеней пуска двигателя может быть увеличено путем добавления числа ступеней сопротивления в пусковой резистор с соответствующим увеличением количества реле времени КТ и контакторов КМ. Рассмотренная схема управления пуском двигателя постоянного тока независимого возбуждения может быть использована и для пуска двигателя с последовательным возбуждением. Следует помнить, что пуск двигателя с последовательным возбуждением допускается лишь при нагрузке на валу двигателя не менее 25 % номинальной.

10.3.2. Схема управления пуском в функции тока двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Схемой предусмотрен пуск двигателя в две ступени. В схеме применены три контактора КМ1, КМ2 и КМ3, три реле тока КА1, КА2 и КАМ, два реле времени с замедлением при срабатывании КТ1 и КТ2 (рис. 10.11).

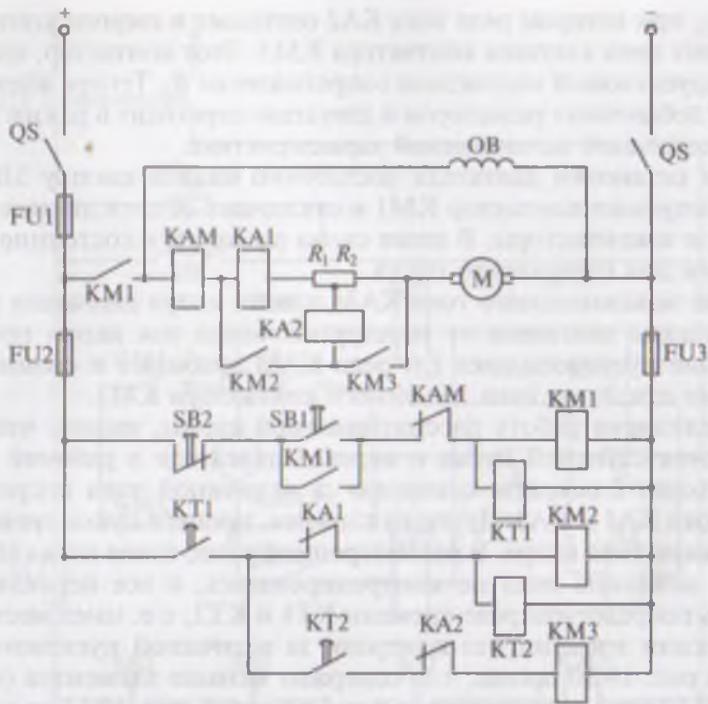


Рис. 10.11. Схема управления пуском в функции тока двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При нажатии кнопки SB1 срабатывает линейный контактор KM1, который своими силовыми контактами подключает двигатель к сети, а блокировочными контактами зашунтирует кнопку SB1. Одновременно срабатывает реле времени KT1 и его контакты в цепи контактора KM2 замыкаются с замедлением. Начинается процесс пуска двигателя с добавочным резистором в цепи якоря ($R_1 + R_2$). При этом пусковой ток в цепи якоря величиной I_{a1} оказывается достаточным для срабатывания реле тока KA1 и его контакты размыкают цепь катушки контактора KM2 до того, как эта цепь замкнулась контактами реле времени KT1. По мере разгона ротора пусковой ток убывает и при его уменьшении до величины $I_{a2} < I_{a1}$ реле тока KA1 отпускает, его контакты замыкают цепь контактора KM2 и реле времени KT2. Контактор KM2 срабатывает и своими контактами шунтирует сопротивление R_1 вместе с катушкой реле тока KA1. При этом начинается вторая ступень пуска двигателя с сопротивлением в цепи якоря R_2 и ток якоря вновь увеличивается до значения I_{a1} , при котором срабатывает реле тока KA2, разомкнув свои контакты в цепи катушки контактора KM3 еще до того, как замкнулись контакты реле времени KT2, срабатывающее с замедлением. Якорь двигателя, продолжая разгоняться, вызывает уменьшение тока якоря вновь до значе-

ния I_{a2} , при котором реле тока КА2 отпускает и своими контактами замыкает цепь катушки контактора КМ3. Этот контактор, сработав, шунтирует своими контактами сопротивление R_2 . Теперь в цепи якоря нет добавочных резисторов и двигатель переходит в режим работы на естественной механической характеристике.

Для остановки двигателя достаточно нажать кнопку SB2, при этом отпускает контактор КМ1 и отключает от сети двигатель М и все реле и контакторы. В итоге схема приходит в состояние, необходимое для следующего пуска.

Реле максимального тока КАМ в цепи якоря двигателя служит для защиты двигателя от перегрузки: когда ток якоря превысит значение пускового тока I_{a1} , реле КАМ сработает и своими контактами отключит цепь линейного контактора КМ1.

Анализируя работу рассматриваемой схемы, видим, что переключения ступеней пуска и переход двигателя в рабочий режим происходит благодаря контролю за величиной тока посредством реле тока КА1 и КА2. Другими словами, процесс пуска происходит в функции тока якоря. В рассмотренной ранее схеме пуска (см. рис. 10.10) величина тока не контролировалась, а все переключения велись посредством реле времени КТ1 и КТ2, т.е. имел место пуск в функции времени без контроля за величиной пускового тока. Схема рис. 10.10 проще, т.е. содержит меньше элементов (в схеме рис. 10.10 реле и контакторов пять, а в схеме рис. 10.11 их восемь). Поэтому, какая из схем является более приемлемой, следует решать с учетом конкретных условий работы электропривода, мощности двигателя, условий его пуска и т.д.

10.3.3. Схема управления пуском в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Контакты двух линейных контакторов КМ1 и КМ2 образуют мост, в диагональ которого включен двигатель М (рис. 10.12). На-

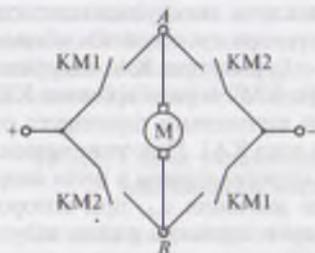


Рис. 10.12. Элемент реверсивной схемы управления

правление тока в обмотке якоря этого двигателя, а следовательно, и направление вращения якоря, зависит от того, какие из линейных контактов замкнуты. Так, при срабатывании контактора КМ1 ток в якорь направлен от точки А к точке В, а при срабатывании контактора КМ2 ток направлен от точки В к точке А.

Рассматриваемая схема управления (рис. 10.13) содержит следующие коммутирующие устройства:

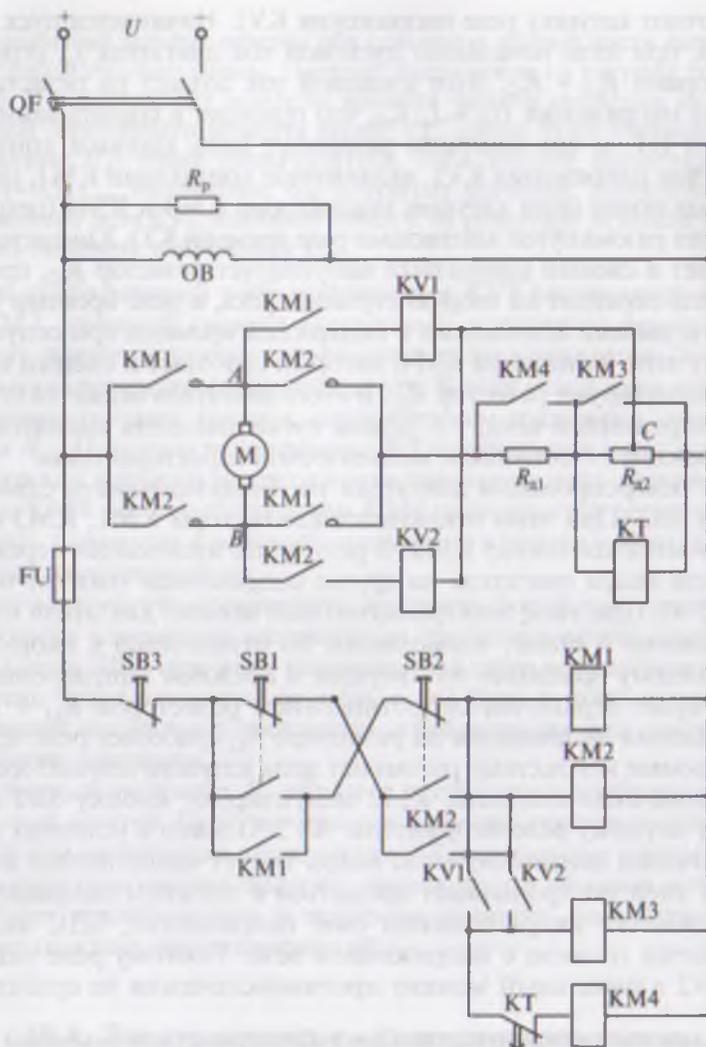


Рис. 10.13. Схема пуска двигателя постоянного тока в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции ЭДС

автоматический выключатель QF, кнопки управления SB1 (сдвоенная), SB2 (сдвоенная) и SB3, контакторы KM1, KM2, KM3 и KM4, реле времени KT с замедлением при отпускании, реле напряжения KV1 и KV2. В цепь якоря двигателя последовательно включены два резистора: пусковой R_{n1} и противовключения R_{n2} .

При включении автомата QF все элементы схемы оказываются под напряжением. При нажатии кнопки SB1 включается контактор KM1 и своими силовыми контактами включает в сеть двигатель M, одновременно блокировочные контакты KM1 шунтируют кнопку SB1

и включают катушку реле напряжения KV1. Начинается пуск двигателя М, при этом начальный пусковой ток двигателя I_{a1} ограничен резисторами $R_{n1} + R_{n2}$. Этот пусковой ток создаст на резисторе R_{n2} падение напряжения $U_{n2} = I_{a1} R_{n2}$, что приведет к срабатыванию реле времени КТ, и его контакты разомкнут цепь катушки контактора КМ4. Реле напряжения KV1, включенное контактами КМ1, сработает и подключит цепи катушек контакторов КМ3 и КМ4 (цепь КМ4 останется разомкнутой контактами реле времени КТ). Контакт КМ3 сработает и своими контактами зашунтирует резистор R_{n2} , при этом двигатель перейдет на вторую ступень пуска, а реле времени КТ отпустит и своими контактами с выдержкой времени при отпуске замкнет цепь контактора КМ4, который сработает и своими контактами зашунтирует резистор R_{n1} . В итоге двигатель окажется под полным напряжением сети, т.е. режим пуска двигателя сменится работой в режиме естественной механической характеристики.

Для реверсирования двигателя необходимо нажать двоящую кнопку SB2. При этом отключатся контакторы КМ1, КМ3 и КМ4 и включится контактор КМ2. В результате произойдет переключение цепи якоря двигателя на другое направление тока (от точки В к точке А). При этом электромагнитный момент двигателя изменит направление и станет тормозящим по отношению к якорю, продолжающему вращение по инерции в прежнем направлении. Ток якоря будет ограничен сопротивлением резисторов $R_{n1} + R_{n2}$. За счет падения напряжения на резисторе R_{n2} сработает реле времени КТ и своими контактами разомкнет цепь катушки контактора КМ4. Блокировочные контакты КМ2 зашунтируют кнопку SB2 и подключат катушку реле напряжения KV2. Однако в условиях противовключения двигателя, когда якорь за счет накопленной кинетической энергии продолжает вращаться в прежнем направлении, а ток в обмотке якоря изменил свое направление, ЭДС якоря E_a направлена *согласно* с напряжением сети. Поэтому реле напряжения KV2 в начальный момент противовключения не сработает.

Объясняется это следующим. При работе двигателя в основном (двигательном) режиме ЭДС якоря (противо-ЭДС) направлена *встречно* напряжению, приложенному к цепи якоря и соединенными с ней последовательно резисторами R_{n1} и R_{n2} . Поэтому напряжение между точками А и С, на которое включена катушка реле KV1, равно

$$U_{AC} = E_a + I_a(R_1 + 0,5R_2). \quad (10.1)$$

Величина этого напряжения достаточна для срабатывания реле KV1. Однако после реверсирования двигателя направление тока в обмотке якоря изменилось, а направление вращения якоря в первый момент осталось прежним. В этих условиях направление ЭДС якоря E_a стало *согласным* с напряжением сети. При этом выражение (10.1) принимает вид

$$U_{AC} = -E_a + I_a(R_1 + 0,5R_2). \quad (10.2)$$

В начальный момент реверса оба слагаемых правой части выражения (10.2) приблизительно равны. Поэтому напряжение на катушке реле KV2 $U_{AC} = 0$. В последующие моменты времени частота вращения якоря под влиянием тормозящего момента якоря ЭДС якоря будет уменьшаться, и напряжение U_{AC} будет увеличиваться. При частоте вращения якоря $n = (0,1+0,2)n_{ном}$ напряжение U_{AC} достигнет значения, достаточного для срабатывания реле KV2. Выбором точки C на резисторе R_2 можно корректировать величину напряжения U_{AC} .

При срабатывании реле напряжения KV2 включается контактор KM3, который своими контактами шунтирует резистор $R_{д2}$. К этому времени процесс торможения заканчивается ($n = 0$) и происходит реверсирование двигателя. В этих условиях в двигателе начинается процесс пуска с ограничением пускового тока резистором $R_{д1}$. При этом реле времени КТ отключается и его контакты с выдержкой времени на отпусkanie замыкают цепь катушки контактора KM4. При срабатывании KM4 шунтируется резистор $R_{д1}$ и двигатель переходит в рабочий режим, т. е. в режим работы на естественной характеристике.

Если же требуется остановить двигатель после его торможения, то в момент изменения направления вращения якоря следует нажать кнопку SB3, при этом разомкнуться цепи всех контакторов и двигатель будет отключен от сети, а все реле и контакторы цепи управления окажутся в состоянии, необходимом для следующего включения двигателя.

Разрядный резистор R_p образует с обмоткой возбуждения ОВ замкнутый контур. Поэтому при отключении двигателя автоматом QF ЭДС самоиндукции, наведенная ОВ, создаст ток в этом контуре, а электромагнитная энергия, запасенная в обмотке возбуждения, будет преобразована в тепловую энергию, не создав в этой обмотке опасных перенапряжений.

10.4. Электропривод с «электрическим валом»

«Электрический вал» — синхронизированный многодвигательный привод, обеспечивающий синхронное (согласованное) вращение нескольких механизмов при отсутствии механической связи между ними. Обычно для этого применяют асинхронные двигатели с фазным ротором. Обмотки статоров двигателей включены в трехфазную сеть, а обмотки роторов соединены между собой и образуют замкнутую систему (рис. 10.14). Каждый из двигателей «электрического вала» является приводным для своего рабочего механизма.

Благодаря электрической связи между двигателями M1 и M2 их вращение получается синхронным. При этом ЭДС, индуцированные в обмотках роторов двигателей, равны и взаимно уравновешивают

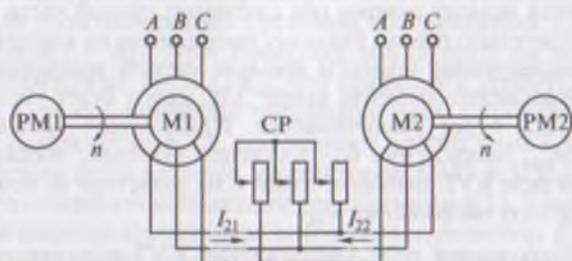


Рис. 10.14. Асинхронные двигатели с фазным ротором, включенные по схеме «электрический вал»

ваются. Токи каждого из роторов замыкаются через трехфазный согласующий реостат СР. Если под влиянием каких-либо внешних причин нарушится равенство частот вращения двигателей, например, возрастет нагрузка двигателя М1 и частота его вращения уменьшится, то скольжение в этом двигателе увеличится и соответственно увеличатся токи в фазных обмотках ротора. В итоге в соединительных проводах и обмотках роторов двигателей М1 и М2 появится уравнительный ток, который увеличит вращающий момент двигателя М1 и уменьшит его в двигателе М2. При этом частота вращения двигателя М2 несколько снизится, а частота вращения двигателя М1 возрастет, т. е. частоты вращения двигателей приобретут некоторое среднее значение. Это приведет к восстановлению синхронности вращения роторов двигателей «электрического вала».

«Электрический вал» применяют в приводе разводных мостов, ворот шлюзов либо других устройств, где требуется согласованное перемещение составляющих элементов этих устройств, механическая связь между которыми невозможна, либо ее технически трудно осуществить.

Контрольные вопросы

1. В чем различие между разомкнутыми и замкнутыми системами автоматического управления?
2. Чем блокируется одновременное включение контакторов КМ1 и КМ2 в схеме рис. 10.3?
3. Каково назначение реле времени КТ в схеме рис. 10.4?
4. Объясните назначение реле скорости в схеме рис. 10.5.
5. Каково назначение реле тока КА в схеме рис. 10.5?
6. Чем объясняется замедление срабатывания реле напряжения КВ2 в схеме рис. 10.13?
7. Объясните работу электропривода с «электрическим валом» по схеме рис. 10.14.

ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

11.1. Основные понятия

Как было показано (см. 10.1), разомкнутая система автоматизированного управления электроприводами не обеспечивает точного соответствия между предписанным и истинным значениями параметров из-за неизбежного воздействия на систему электропривода неподвиженных случайных факторов.

В замкнутых системах, помимо прямой цепи воздействий, по которой передается задающий сигнал U_z , несущий информацию о предписанном значении параметров, имеются *цепи обратной связи*, по которым передается информация об истинном (фактическом) значении параметра, называемый *сигналом обратной связи*. Обратной связью называется воздействие на вход автоматизированной замкнутой системы физической величины (сигнала обратной связи), пропорциональной выходной величине регулируемого параметра (координаты). Сигнал обратной связи получают посредством устройств, называемых датчиками обратной связи ДЭС.

На рис. 11.1 представлена блок-схема замкнутой системы автоматического регулирования, в которой регулируемым параметром является частота вращения двигателя М, приводящего в движение исполнительный орган ИО рабочей машины через механическое передающее устройство (редуктор) Р. Истинное значение параметра, в данном случае частоты вращения двигателя, получают с объекта управления (двигателя) посредством датчика скорости ДС (тахогенератора) и преобразования этого параметра в электрический сигнал обратной связи по скорости U_{occ} . Этот сигнал, будучи поданным в блок сравнения БС вместе с сигналом, задающим частоту вращения U_z , корректирует последний. В результате этого на управляемый преобразователь УП поступает сигнал управления U_y , скорректированный сигналом обратной связи по скорости U_{occ} в соответствии с истинным значе-

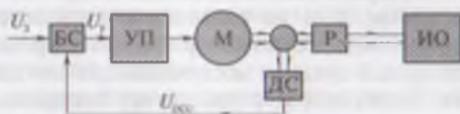


Рис. 11.1. Блок-схема замкнутой системы автоматического регулирования

нием регулируемого параметра, в данном случае частоты вращения двигателя M .

Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что задача замкнутой системы регулирования сводится к обеспечению наиболее точного соответствия истинного значения управляемого параметра (координаты) предписанному. Замкнутые системы электропривода разделяют на системы стабилизации и следящие системы.

Электроприводы системы стабилизации предназначены либо для обеспечения постоянства (неизменности) какого-либо параметра привода в условиях воздействия на регулируемый орган возмущающих факторов, либо для изменения этого параметра по заранее заданному закону. Чаще всего это относится к скорости (частоте вращения) или параметрам технологических процессов, зависящих от скорости. Автоматизированные системы стабилизации обычно применяют в электроприводах металлообрабатывающих станков, прокатных станов, механизмов перемотки лент и т.п. Обратная связь по скорости является эффективным средством повышения жесткости механических характеристик электропривода.

Наиболее важным показателем подобных систем является точность стабилизации. Различают статическую и динамическую точность стабилизации. Статическую точность применяют для оценки свойств сравнительно «грубых» систем. Более высоким показателем качества системы является динамическая точность, которая оценивается отношением максимального мгновенного отклонения скорости, например частоты вращения Δn_{\max} , к ее заданному значению n_z . По динамической точности системы стабилизации разделяют на группы: малой точности (1—5%), средней точности (0,1—1%), точные (0,01—0,1%) и высокоточные (менее 0,01%) [4].

Следящие автоматизированные электроприводы предназначены для воспроизведения движения регулируемого органа посредством силового исполнительного механизма, мощность которого должна быть достаточной для этого воспроизведения с требуемой скоростью. Такие электроприводы применяют в промышленных манипуляторах и роботах, механизмах подачи металлообрабатывающих станков, нажимных устройствах прокатных станов и т.п.

Следящий электропривод содержит датчик следящей системы и сервомотор (исполнительный механизм). Датчиком задается требуемое положение исполнительного органа либо его параметры движения: угол поворота или количество оборотов вала при вращательном движении, или же расстояние перемещения при поступательном движении. Сервомотор (силовой орган) воздействует на исполнительный орган и воспроизводит это движение. Датчик требуемого движения и сервомотор, воспроизводящий это движение на исполнительном органе, как правило, находятся на расстоянии друг от друга. Другими словами, следящий электро-

привод осуществляет *слежение* исполнительного органа на выходе системы электропривода за всеми изменениями на его входе.

Замкнутые автоматизированные системы электроприводов применяют также для *синхронизации скоростей* во взаимосвязанных многодвигательных электроприводах; для *программного управления* движением исполнительного органа рабочей машины, выполняемым с применением устройства числового программного управления ЧПУ и для других видов управления.

11.2. Замкнутые автоматизированные системы электропривода постоянного тока

11.2.1. Замкнутая автоматизированная система электропривода постоянного тока с обратной связью по скорости

Рассмотрим в качестве примера замкнутой автоматизированной системы постоянного тока стабилизатор частоты вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения, выполняющий задачу регулирования и стабилизации частоты вращения двигателя при изменениях статического нагрузочного момента на валу двигателя и возможных колебаниях напряжения в питающей сети.

Если бы этот процесс выполнялся вручную, то оператор должен был бы наблюдать за показанием прибора, измеряющего частоту вращения, и в соответствии с полученной информацией воздействовать на регулирующее устройство в целях стабилизации частоты вращения двигателя на заданном уровне. Из этого следует, что автоматический регулятор, заменяющий оператора, должен выполнять следующее:

- измерять частоту вращения двигателя;
- сравнивать измеренную частоту вращения с заданным значением;
- воздействовать на процесс регулирования в соответствии с величиной и знаком возникшего отклонения.

Для реализации этих задач автоматический регулятор должен содержать:

- устройство, задающее частоту вращения двигателя;
- устройство, измеряющее фактическую частоту вращения и вырабатывающее электрический сигнал обратной связи, соответствующий фактической частоте вращения;
- устройство сравнения, в котором сигнал обратной связи сравнивается с сигналом, задающим частоту вращения и вырабатывается результирующий сигнал;
- элемент, посредством которого результирующий электрический сигнал воздействует на частоту вращения двигателя в целях ее коррективки.

Возможно применение усилителя результирующего сигнала перед подачей его на элемент, воздействующий на частоту вращения двигателя (если этот элемент не сочетает в себе свойства усилителя сигнала).

Регулятор, состоящий из перечисленных устройств, вместе с объектом регулирования (в данном случае объектом является двигатель) образует систему автоматизированного регулирования. Рассмотрим такую систему для стабилизации и регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения. В качестве исполнительного устройства, воздействующего на частоту вращения двигателя, в этой системе используется управляемый тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный (см. 8.4.3).

Система состоит из следующих элементов (рис. 11.2):

задающего устройства ЗУ, представляющего собой потенциометр, на выходе которого выставляется величина напряжения U_{3y} , соответствующая задаваемой частоте вращения двигателя;

блока сравнения БС, в котором сигнал U_{3y} сравнивается с сигналом обратной связи по скорости U_{oc} и на выходе формируется сигнал $U_{\Sigma} = (I_{3y} - I_{oc})r$;

усилителя У, в котором сигнал U_{Σ} усиливается до значения U_y , достаточного для управления системой импульсно-фазового управления СИФУ;

системы СИФУ, которая выдает импульсы, управляющие работой тиристорного преобразователя ТП в соответствии с управляющим сигналом U_y ;

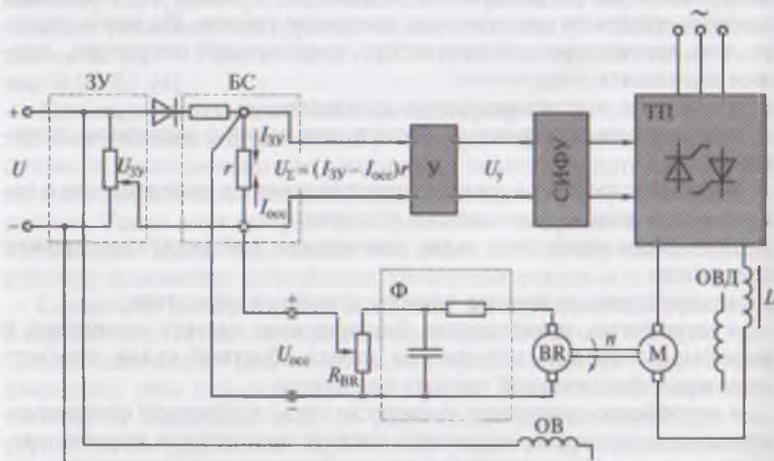


Рис. 11.2. Функциональная схема замкнутой системы автоматизированного управления электроприводом с двигателем постоянного тока независимого возбуждения с отрицательной обратной связью по скорости

управляемого тиристорного преобразователя переменного тока в постоянный ТП;

тахогенератора ВР с электромагнитным возбуждением, вырабатывающим сигнал обратной связи по скорости U_{occ} , соответствующий фактической частоте вращения двигателя;

фильтра (Φ) на выходе тахогенератора ВР для ослабления гармонических составляющих в сигнале обратной связи по скорости U_{occ} .

Для того чтобы возможные колебания напряжения питания цепи управления U не вносили ошибок в систему регулирования, обмотка возбуждения ОВ тахогенератора включена в сеть постоянного тока параллельно задающему устройству ЗУ. В этом случае изменение напряжения питания U одинаково воздействует на сигналы U_{3y} и U_{occ} и практически не повлияет на точность системы.

Напряжение на выходе тахогенератора прямо пропорционально частоте вращения [см. (7.1)]:

$$U_{\text{BR}} = U_{\text{occ}} = C_U n, \quad (11.1)$$

где C_U — коэффициент пропорциональности.

Задающий сигнал U_{3y} , установленный посредством потенциометра на входе блока сравнения, также пропорционален частоте вращения:

$$U_{3y} = C_U n. \quad (11.2)$$

Напряжения U_{3y} и U_{occ} подаются на блок сравнения БС, представляющий собой резистор r большого сопротивления (для снижения величин токов I_{3y} и I_{occ} до значений, неспособных внести погрешность в сигналы задающего устройства ЗУ и тахогенератора ВР).

Сигнал U_{occ} подается в БС с полярностью, обратной по отношению к сигналу U_{3y} . Таким образом, в рассматриваемой системе автоматического регулирования применена *отрицательная обратная связь по скорости*, при которой сигнал обратной связи U_{occ} в БС вычитается из заданного сигнала U_{3y} , в результате чего возникает суммарный сигнал на выходе блока сравнения

$$U_{\Sigma} = (I_{3y} - I_{\text{occ}})r = U_{3y} - U_{\text{occ}}. \quad (11.3)$$

При отрицательной обратной связи уменьшение частоты вращения двигателя (например, вследствие увеличения статического момента нагрузки) вызовет уменьшение сигнала обратной связи U_{occ} и приведет к *увеличению* сигнала U_{Σ} . Это, в свою очередь, вызовет увеличение сигнала управления U_y . В итоге изменится режим работы СИФУ таким образом, что произойдет рост частоты вращения двигателя до значения, при котором сигнал обратной связи по скорости U_{occ} восстановится, что приведет к восстановлению значений сигналов U_{Σ} и U_y , и фактическая частота враще-

ния двигателя восстановится до первоначально заданного значения. Если же по каким-либо причинам частота вращения двигателя превысит заданное значение, что может произойти вследствие уменьшения нагрузки на вал двигателя либо увеличения напряжения в питающей сети, то сигнал обратной связи U_{occ} увеличится, а так как заданный сигнал $U_{3y} = const$, то уменьшатся значения сигналов U_{Σ} и U_y , что приведет к уменьшению частоты вращения двигателя до заданного значения. При этом сигнал обратной связи восстановит свое значение.

Если же в рассматриваемой системе регулирования применить *положительную* обратную связь, для чего достаточно поменять местами провода, соединяющие тахогенератор с блоком сравнения, то в блоке сравнения будет происходить сложение сигналов U_{3y} и U_{occ} :

$$U_{\Sigma} = (I_{3y} + I_{occ})r = U_{3y} + U_{occ}. \quad (11.4)$$

При этом даже небольшое увеличение частоты вращения двигателя, при положительном воздействии сигнала обратной связи U_{occ} , привело бы к возрастанию сигнала U_{Σ} , отчего частота вращения двигателя возросла бы еще больше. В итоге вместо стабилизации частоты вращения произойдет ее неограниченное нарастание, т. е. система электропривода окажется неуправляемой.

При необходимости изменить частоту вращения двигателя следует воздействовать на величину сигнала задающего устройства U_{3y} . Например, для увеличения задаваемой частоты вращения следует посредством потенциометра задающего устройства ЗУ увеличить напряжение U_{3y} на входе блока сравнения БС, что приведет к увеличению сигналов U_{Σ} и U_y . В итоге произойдет увеличение напряжения на выходе преобразователя ТП и частоты вращения двигателя. Процесс стабилизации в регуляторе будет протекать по-прежнему, но при более высокой заданной частоте вращения двигателя. Если же необходимо изменить степень влияния обратной связи по скорости на работу САР, то следует изменить *глубину обратной связи по скорости*

$$\beta = U_{occ}/U_{3y}. \quad (11.5)$$

Для этого посредством потенциометра R_{BR} нужно изменить уровень сигнала обратной связи U_{occ} .

Механические характеристики электропривода в замкнутой системе автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по скорости (рис. 11.3, график 2) отличаются от аналогичных характеристик разомкнутой системы (график 1) большей жесткостью. Объясняется это тем, что в замкнутой системе, благодаря наличию обратной связи по скорости, поддерживается частота вращения, а поэтому при увеличении статического момента нагрузки частота вращения двигателя сохраняется практически не-

изменной и угол наклона характеристик электропривода в замкнутой системе регулирования меньше, чем механических характеристик электропривода в разомкнутой системе.

Воздействуя на уровень сигнала обратной связи, можно изменять угол наклона механических характеристик: при уменьшении U_{occ} влияние обратной связи на свойства электропривода снижается и угол наклона характеристик увеличивается. Таким образом, введение отрицательной обратной связи по скорости является эффективным средством воздействия на жесткость механических характеристик электропривода.

Расположение характеристик по высоте оси ординат определяется напряжением задающего устройства: чем меньше U_{3y} , тем ниже расположена механическая характеристика.

На рис. 11.4 представлена замкнутая система электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. В этом электроприводе применена обратная связь по скорости, в которой в качестве сигнала обратной связи используют параметр двигателя постоянного тока, значение которого зависит от частоты вращения. В рассматриваемом электроприводе в качестве сигнала обратной связи по скорости используется ЭДС обмотки якоря E_a , которая, как известно, пропорциональна частоте вращения и направлена встречно напряжению, приложенному к цепи якоря. На принципиальной схеме этого привода пунктиром обведены элементы блок-схемы.

Принцип работы рассматриваемого электропривода основан на сравнении сигнала задающего устройства U_{3y} с напряжением обратной связи по скорости U_{occ} , создаваемым противо-ЭДС двигателя E_a . Элементом сравнения схемы является диод VD2, так как ток через этот диод определяется разностью напряжений $U_{3y} - U_{occ}$. Ток через диод VD1 проходит лишь в положительные

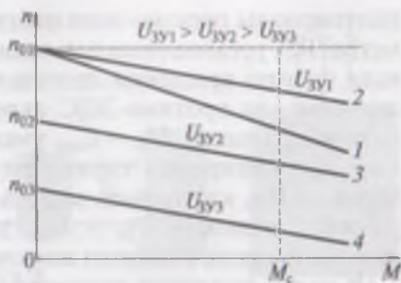


Рис. 11.3. Механические характеристики электропривода с отрицательной обратной связью по скорости

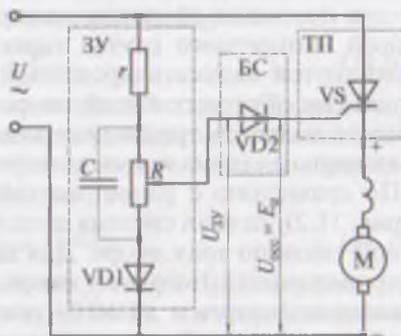


Рис. 11.4. Замкнутая система электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения и с использованием противо-ЭДС E_a в качестве сигнала обратной связи по скорости

полупериоды переменного напряжения U . Посредством потенциометра RP устанавливается такая величина напряжения U_{3y} , что если частота вращения двигателя M начнет превышать требуемое значение, то противо-ЭДС якоря E_a возрастет до величины, при которой разность $U_{3y} - U_{ocс}$ уменьшится до значения, недостаточного для отпирания тиристора VS , и двигатель окажется отключенным. Но, как только частота вращения якоря двигателя начнет убывать, разность $U_{3y} - U_{ocс}$ увеличится, тиристор откроется и двигатель вновь окажется включенным.

В целях придания рассматриваемому электроприводу большей устойчивости, потенциометр RP шунтируют конденсатором C .

Применение в рассматриваемом электроприводе двигателя постоянного тока последовательного возбуждения оправдано тем, что такие двигатели имеют «мягкую» механическую характеристику, поэтому стабилизация частоты вращения в них весьма актуальна. В схеме применено однополупериодное выпрямление, что упрощает схему включения тиристора, так как не требует включения элементов запираания тиристора. В рассмотренном виде схема пригодна для электропривода небольшой мощности. Но возможны схемные решения, обеспечивающие запираание тиристора так, чтобы схема была пригодна для электропривода большей мощности с питанием ее от мощного управляемого выпрямителя, выполненного по трехфазной мостовой схеме.

11.2.2. Замкнутая система автоматизированного электропривода постоянного тока с обратными связями по скорости и току якоря

Влияние обратных связей на форму механических характеристик позволяет создавать электроприводы с требуемыми для каждого конкретного случая характеристиками. Так, применение в замкнутой автоматизированной системе электропривода отрицательных обратных связей по скорости и току якоря дает возможность получить трехзонные механические характеристики. Функциональная схема такого электропривода представлена на рис. 11.5. По сравнению с ранее рассмотренной замкнутой системой (см. рис. 11.2), данная система дополнена цепью отрицательной обратной связи по току якоря. Для получения электрического сигнала, пропорционального току якоря, в цепь якоря двигателя последовательно включен *шунт* — элемент небольшого электрического сопротивления $R_{ш}$, предназначенный для получения электрического сигнала $U_{ш}$, пропорционального току якоря I_a , $U_{ш} = I_a R_{ш}$.

Таким образом, с увеличением нагрузки двигателя возрастает сигнал отрицательной обратной связи по току $U_{ш} = I_a R_{ш}$. Это ведет к ослаблению управляющего сигнала U_y , подаваемого на блок СИФУ, и способствует уменьшению напряжения в цепи якоря, а следовательно — снижению частоты вращения якоря. В итоге

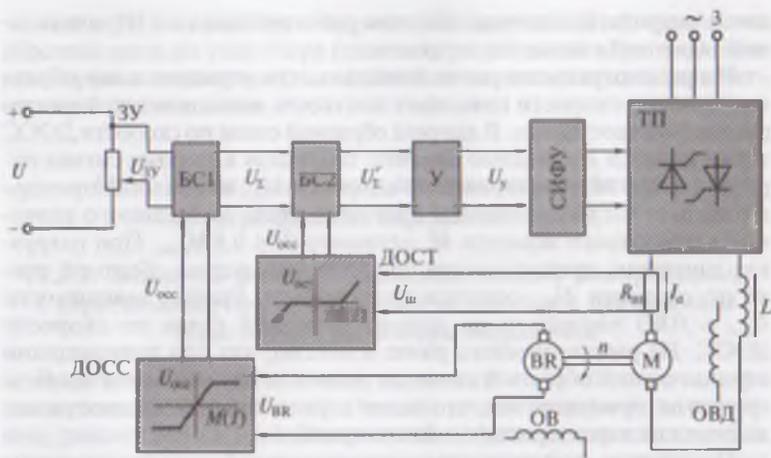


Рис. 11.5. Функциональная схема замкнутой системы электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения с отрицательными обратными связями по скорости и току якоря

механическая характеристика электропривода становится более мягкой.

В цепи отрицательной обратной связи по скорости используется тахогенератор BR, сигнал с которого U_{BR} поступает на датчик обратной связи по скорости (ДОСС). Затем сигнал $U_{ocс}$ подается на блок сравнения BC1. Сигнал с выхода BC1, равный $U_{\Sigma} = U_{3У} - U_{ocс}$, поступает на блок сравнения BC2, где он уменьшается на величину сигнала отрицательной обратной связи по току $U_{ocт}$:

$$U'_{\Sigma} = U_{\Sigma} - U_{ocт} \quad (11.6)$$

Таким образом, если в электроприводе действуют оба вида отрицательной обратной связи, то сигнал задающего устройства подвергается двукратному уменьшению, при этом сигнал управления, поступающий на блок СИФУ, равен

$$U_y = U_{3У} - U_{ocс} - U_{ocт} \quad (11.7)$$

Сигнал $U_{ш}$, пропорциональный току якоря I_a , поступает на вход датчика обратной связи по току (ДОСТ), в котором имеется устройство *токовой отсечки*. Благодаря этому устройству отрицательная обратная связь по току вводится в блок сравнения BC2 начиная лишь с некоторого заданного в этом устройстве значения, например, начиная с величины тока якоря, соответствующего моменту нагрузки $M_{ocт} \geq 0,6 M_{ном}$. График зависимости $U_{ocт} = f(M)$ показан на блоке ДОСТ. При нагрузочных моментах, соответствующих значениям тока якоря меньше заданного значе-

ния в устройстве отсечки, система работает только с отрицательной обратной связью по скорости.

Из рассмотренного ранее известно, что отрицательная обратная связь по скорости повышает жесткость механических характеристик электропривода. В датчике обратной связи по скорости ДОСС также имеется *устройство отсечки*, благодаря которому сигнал отрицательной обратной связи по скорости $U_{\text{оСС}}$ изменяется пропорционально частоте вращения двигателя лишь до заданного значения нагрузочного момента M , например $M \leq 0,8 M_{\text{ном}}$. При нагрузках двигателя, превышающих это значение, сигнал обратной связи по скорости $U_{\text{оСС}}$ остается неизменным. График зависимости $U_{\text{оСС}} = f(M)$ изображен на датчике обратной связи по скорости ДОСС. Из рассмотренного ранее известно, что при прекращении отрицательной обратной связи по скорости стабилизация частоты вращения прекращается, что ведет к уменьшению жесткости механических характеристик электропривода.

Переходя к механическим характеристикам двигателя с отрицательными обратными связями по скорости и по току якоря (рис. 11.6), видим, что на этих характеристиках имеются три зоны:

зона I, когда в замкнутой системе действует лишь отрицательная обратная связь по скорости, что придает характеристикам электропривода этого участка значительную жесткость;

зона II, в пределах которой действуют оба вида отрицательной обратной связи по скорости и по току якоря, при этом последняя способствует уменьшению частоты вращения при росте момента нагрузки M , а следовательно, и тока нагрузки I_a ; в итоге жесткость механических характеристик уменьшается (наклон к оси абсцисс увеличивается);

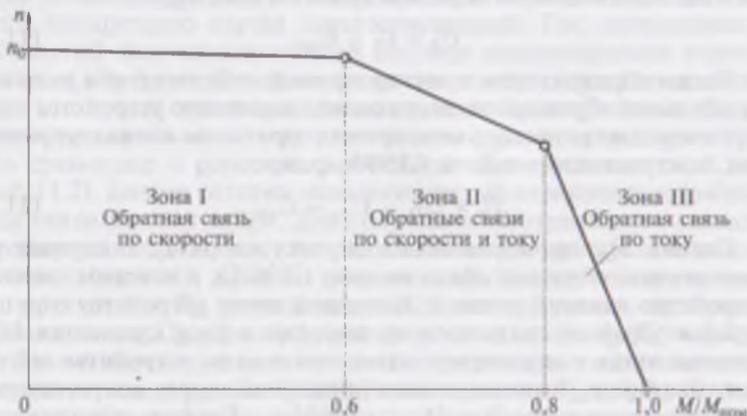


Рис. 11.6. Трехзонная механическая характеристика электропривода с отрицательными обратными связями по скорости и току нагрузки

зона III, в пределах которой действует лишь отрицательная обратная связь по току якоря (сигнал отрицательной обратной связи по скорости отсутствует), механические характеристики становятся еще более мягкими.

11.3. Замкнутые автоматизированные системы электропривода переменного тока

11.3.1. Замкнутая автоматизированная система электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем с применением тиристорного регулятора напряжения

Регулирование напряжения, подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя, как способ изменения частоты вращения, рассмотрено в 3.6.4. Этот способ эффективен лишь для асинхронных двигателей с повышенным скольжением, механические характеристики которых достаточно мягкие. Метод регулирования наиболее целесообразен в электроприводах с вентиляторной нагрузкой, когда статический момент нагрузки $M_{с.в}$ изменяется пропорционально квадрату частоты вращения $M_{с.в} \equiv n^2$ (см. рис. 3.22, в).

Для реализации этого метода регулирования в замкнутой системе автоматизированного электропривода применяют тиристорные регуляторы напряжения ТРН (см. 8.6).

В схеме применен тахогенератор постоянного тока BR в качестве датчика отрицательной обратной связи по скорости (рис. 11.7). Возможно применение тахогенератора как с возбуждением постоянным магнитом, так и с электромагнитным возбуждением. В последнем случае обмотку возбуждения тахогенератора включают, как

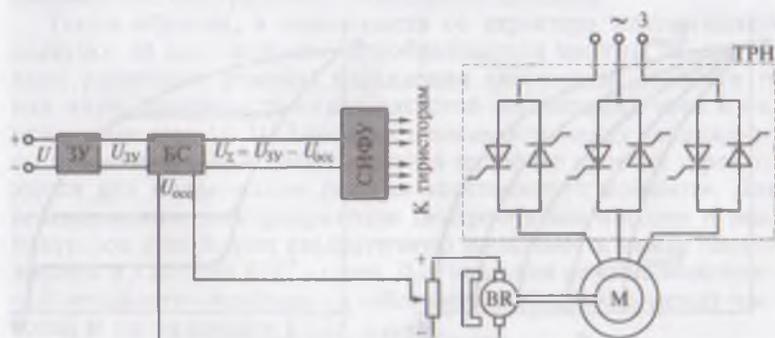


Рис. 11.7. Функциональная схема замкнутой автоматизированной системы электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем с применением ТРН

показано на схеме рис. 11.2. Взаимодействие сигналов задающего устройства U_{3y} отрицательной и обратной связи по скорости U_{occ} аналогично изложенному в 11.2.1. В результате этого взаимодействия на вход системы импульсно-фазового управления подается сигнал

$$U_{\Sigma} = U_{3y} - U_{occ}. \quad (11.8)$$

Блок СИФУ управляет работой тиристоров в соответствии с сигналом U_{Σ} , обеспечивая на выходе ТРН требуемое напряжение.

Механические характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя при его работе автономно либо в разомкнутой системе электропривода имеют вид, показанный на рис. 11.8, а. Область регулирования частоты вращения методом воздействия на напряжение статора U_1 ограничена семейством характеристик, верхняя из которых соответствует номинальному $U_{1ном}$, а нижняя минимальному U_{1min} значениям напряжения статора. При работе двигателя в замкнутой системе с отрицательной обратной связью по скорости значительно повышается жесткость механических характеристик, и они приобретают вид, представленный на рис. 11.8, б. Такая жесткость механических характеристик двигателя, работающего в замкнутой системе, охваченной отрицательной обратной связью объясняется тем, что с ростом момента нагрузки возникает тенденция к уменьшению частоты вращения ротора двигателя. Это сопровождается снижением сигнала обратной связи U_{occ} , что, в свою очередь, ведет к увеличению напряжения U_{Σ} на входе блока СИФУ. В итоге уменьшается угол управления α (см. 8.4.1) и напряжение на выходе ТРН увеличивается, что ведет к восстановлению частоты вращения ротора двигателя до прежнего значения. При уменьшении нагрузочного момента снижается напряжение на выходе ТРН, что также способствует поддержанию частоты вращения на прежнем уровне.

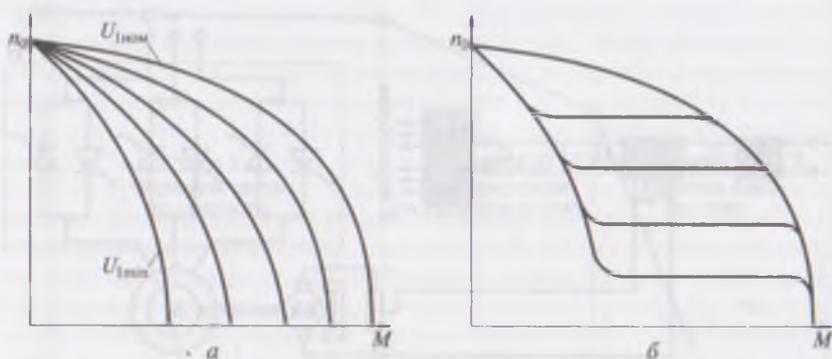


Рис. 11.8. Механические характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя при работе в автономном режиме (а) и в замкнутом автоматизированном электроприводе с отрицательной обратной связью (б)

Если короткозамкнутый асинхронный двигатель, используемый в замкнутой системе электропривода, не обладает механическими характеристиками требуемой «мягкости», то можно применить асинхронный двигатель с фазным ротором, включив в цепь фазного ротора резистор сопротивления $R_{доб}$, необходимого для получения механических характеристик требуемой жесткости.

11.3.2. Замкнутая автоматизированная система электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем с частотным регулированием

Применение преобразователей частоты для регулирования асинхронных двигателей создает более широкие возможности. Как было показано ранее (см. 8.5), для регулирования частоты вращения двигателей переменного тока наибольшее применение получили полупроводниковые преобразователи частоты, позволяющие изменять напряжение и частоту переменного тока. Частотное управление скоростью вращения осуществляется путем одновременного изменения частоты переменного тока и напряжения, подаваемого на обмотку статора двигателя. Закон изменения этих параметров зависит от вида механической характеристики рабочей машины (см. рис. 1.2). Если основной магнитный поток асинхронного двигателя в процессе регулирования поддерживается неизменным, то и максимальный момент двигателя также остается неизменным, чем обеспечивается постоянная перегрузочной способности двигателя во всем диапазоне регулирования при неизменном моменте нагрузки. Исключением является регулирование частоты тока сверх номинального значения, когда увеличение напряжения недопустимо. Это приводит к снижению основного магнитного потока и, следовательно, уменьшению перегрузочной способности двигателя.

Таким образом, в зависимости от характера механической нагрузки на вал двигателя, преобразователи частоты обеспечивают различные режимы управления двигателем, реализуя ту или иную зависимость между частотой переменного тока и напряжением (см. 3.6.3). Линейная зависимость между напряжением и частотой ($U/f = \text{const}$) является наиболее простой и реализуется для поддержания режима «постоянного момента». Для регулирования электроприводов центробежных насосов и вентиляторов используют квадратичную зависимость между напряжением и частотой $U/f^2 = \text{const}$. Для создания режима «постоянной мощности» необходимо соблюдать зависимость между частотой и напряжением $U/\sqrt{f} = \text{const}$.

Реализация перечисленных зависимостей при частотном управлении асинхронными двигателями оказывается достаточной для большего числа электроприводов. Вместе с тем в составленном автоматизированном электроприводе возникает потребность в более

высоком качестве регулирования. Такое регулирование возможно в замкнутых автоматизированных системах электроприводов с применением преобразователей частоты.

Как известно, в двигателях постоянного тока имеются две обмотки: обмотка возбуждения и обмотка якоря. Ток в обмотке возбуждения обеспечивает возбуждение двигателя, а ток в обмотке якоря определяет величину электромагнитного момента. Такое разделение функций обмоток упрощает процесс регулирования параметров двигателей постоянного тока. Что же касается асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, то в нем имеется всего лишь одна обмотка — статорная, в которой возможно регулирование параметров. Ток в этой обмотке формирует возбуждающее магнитное поле и определяет электромагнитный момент. Именно это обстоятельство и является причиной некоторого усложнения процессов регулирования параметров в короткозамкнутых асинхронных двигателях.

Рассмотрим замкнутую систему автоматизированного электропривода с частотным управлением, функциональная схема которого [3] представлена на рис. 11.9. В этой системе для частотного регулирования используется воздействие на частоту f_1 подводимого к двигателю напряжения и на ЭДС статора E_1 асинхронного двигателя.

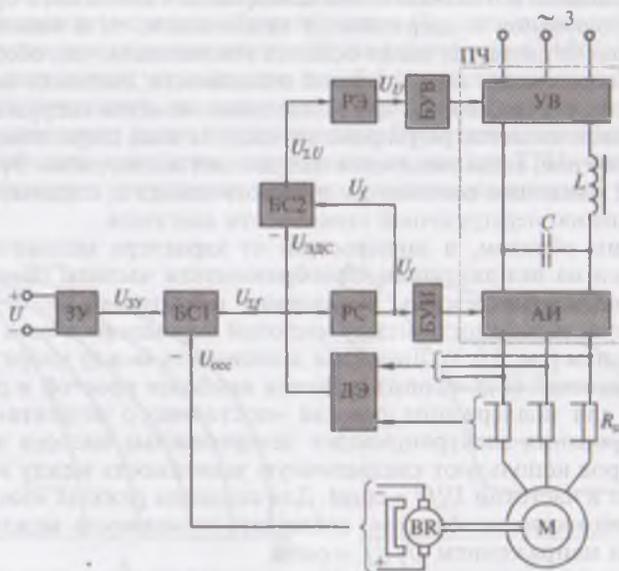


Рис. 11.9. Функциональная схема замкнутой автоматизированной системы электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем с частотным управлением

Частота переменного тока f_1 определяет синхронную скорость вращения n_1 , а ЭДС статора E_1 определяет величину основного магнитного потока Φ и электромагнитный момент двигателя M .

Сигнал отрицательной обратной связи $U_{\text{ЭДС}}$, эквивалентный ЭДС статора $E_1 = U_1 + I_1 Z_1$, формируется датчиком ДЭ (датчик ЭДС). На этот датчик поступает сигнал напряжения статора U_1 и сигналы, эквивалентные токам I_1 в линейных проводах, в виде падений напряжений, измеренных на шунтах $R_{\text{ш}}$. Датчик ДЭ включает в себя трансформатор напряжения, выпрямитель, усилитель в канале измерения тока статора, сумматор и фильтр. Для получения сигнала отрицательной обратной связи по скорости $U_{\text{осс}}$ используется тахогенератор постоянного тока ВК. Сигнал $U_{\text{осс}}$ поступает на блок сравнения скорости БС1, где он вычитается из сигнала задающего устройства $U_{\text{зУ}}$. Полученный после этого сигнал $U_{\text{зУ}} = U_{\text{зУ}} - U_{\text{осс}}$ поступает на регулятор скорости РС. Сигнал U_f на выходе РС, являясь сигналом управления частотой автономного инвертора АИ, поступает на блок управления инвертором БУИ, который вырабатывает импульсы напряжения для управления тиристорами АИ в соответствии с сигналом U_f . Одновременно сигнал U_f подается на блок сравнения БС2, где он корректирует сигнал управления напряжением выпрямителя УВ до значения

$$U_{\text{УВ}} = U_f - U_{\text{ЭДС}}$$

Пройдя через регулятор электродвижущей силы РЭ, этот сигнал приобретает значение U_U и подается на блок управления выпрямителем БУВ. В соответствии с сигналом U_U этот блок вырабатывает импульсы управления тиристорами УВ.

Если замкнутая система электропривода работает в режиме постоянного момента, то изменения напряжения U_1 , поступающего из ПЧ на обмотку статора асинхронного двигателя, должны быть пропорциональны изменениям частоты f_1 , т.е. отношение этих параметров $U/f = \text{const}$. Допустим, из-за возросшего момента нагрузки на валу двигателя в электроприводе возникла тенденция к снижению частоты вращения. При этом сигнал отрицательной обратной связи по скорости $U_{\text{осс}}$ уменьшается, что сопровождается ростом сигнала $U_{\text{зУ}}$ и соответствующим увеличением сигнала

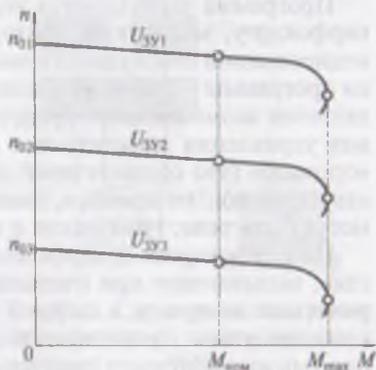


Рис. 11.10. Механические характеристики замкнутой системы асинхронного электропривода с частотным управлением

U_f . В итоге режим работы автономного инвертора АИ изменится и частота тока на его выходе возрастет до значения f'_1 , при которой частота вращения двигателя восстановится, но теперь уже в условиях возросшей нагрузки. Одновременно сигнал U_f поступит на блок сравнения БС2, что вызовет увеличение напряжения $U_{\Sigma U}$ и сигнала U_U . Это приведет к увеличению напряжения на выходе УВ, а следовательно, и на выходе АИ до значения U'_f . Но так как изменения напряжения и частоты на выходе ПЧ произошли под воздействием одного и того же сигнала U_f , то отношение этих параметров осталось неизменным, т.е. $U'_1 f'_1 = U_1 / f_1 = \text{const}$. При этом перегрузочная способность двигателя остается на заданном уровне. Механические характеристики двигателя в рассмотренной замкнутой системе электропривода с частотным регулированием так же, как и в других системах электроприводов с отрицательной обратной связью по скорости, получаются достаточно жесткими (рис. 11.10). При уменьшении напряжения на выходе задающего устройства U_{3y} механические характеристики смещаются вниз, оставаясь параллельными, т.е. жесткость характеристик остается неизменной.

11.4. Электропривод с программным управлением

Программное управление — это управление режимом работы объекта, в данном случае электроприводом, по заранее заданной программе. Программа управления каким-либо процессом содержит информацию о последовательности и характере действий, которые должны быть совершены исполнительными органами производственного механизма.

Наиболее совершенный вид программного управления — *числовое программное управление ЧПУ*, когда программа задается в виде чисел, определяющих последовательность операций, величину и скорость перемещения рабочего органа, и другие сведения.

Программа записывается на программноноситель (перфоленду, перфокарту, магнитную ленту, оптический диск и т.п.) в виде кодированной совокупности чисел. Наиболее удобная форма записи программы — двоичным кодом. Удобство двоичного кода определяется возможностью представления чисел в цифровых системах управления элементами с двумя устойчивыми состояниями: «открыто» (что соответствует единице) и «закрыто» (что соответствует нулю). Элементами, имеющими два устойчивых состояния, могут быть реле, транзистор в ключевом режиме, тиристор и др.

На перфокартах и перфолентах цифре 1 соответствует отверстие, вызывающее при считывании программы появление электрического импульса, а цифре 0 — отсутствие отверстия, т.е. отсутствие импульса. Существуют и другие кодовые системы для записи программы, например двоично-десятичная система.

Программноноситель закладывают в устройство считывания, которое преобразует закодированную информацию в последовательность электрических импульсов (сигналов), управляющих работой электропривода по перемещению рабочего органа (инструмента или изделия) с определенной последовательностью и скоростью.

Наиболее простыми системами ЧПУ являются разомкнутые системы с применением шаговых двигателей (см. 3.9), которые преобразуют электрические импульсы в угловое или линейное шаговое перемещение. Для перемещения рабочего органа по каждой оси координат имеется свой шаговый электропривод.

На рис. 11.11 показана функциональная схема шагового привода с программным управлением для одной координаты перемещения. Программа записана в определенном коде на перфоленте в виде двух дорожек — одна дорожка для движения рабочего органа «вперед», другая — для движения «назад». Перфоленту посредством лентопротяжного механизма пропускают через считывающие головки СГ, которые закодированную на перфоленте программу преобразуют в систему электрических импульсов.

После усиления в промежуточном усилителе ПУ импульсы поступают на блок управления шаговым двигателем БУШД, который распределяет командные импульсы по обмоткам фаз шагового двигателя ШД. Шаговый двигатель обрабатывает эти импульсы и через винтовую передачу, преобразующую вращательное движение вала двигателя в поступательное движение, перемещает рабочий орган РО, например, суппорт металлообрабатывающего станка. Каждому импульсу программы соответствует один шаг двигателя. Общее число импульсов определяет величину (расстояние) перемещения рабочего органа, а частота следования этих импульсов — скорость перемещения рабочего органа.

Разомкнутые системы с ЧПУ просты и компактны, но не обеспечивают высокой точности реализации программы, так как перемещение рабочего органа не контролируется обратными связями по положению и по скорости. Поэтому случайное изменение какого-либо параметра (напряжения сети, нагрузочного момента и т. п.) может вызвать ошибку в воспроизведении программы. При необходимости высокой точности вос-

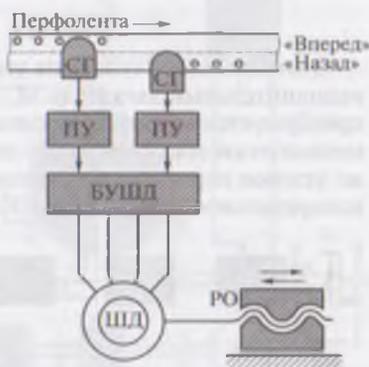


Рис. 11.11. Структурная схема разомкнутой системы электропривода с ЧПУ

произведения программы используют *замкнутые системы* электропривода с ЧПУ, в которых сигналы управления корректируются сигналами обратной связи от датчиков, контролирующих действительное положение и скорость перемещения рабочего органа. Обычно в замкнутых системах электропривода с ЧПУ в качестве приводных двигателей применяют исполнительные малоинерционные двигатели постоянного тока (двигатели с полым или с гладким якорем).

11.5. Следящий электропривод с аналоговым управлением

Следящий электропривод представляет собой замкнутую систему автоматического воспроизведения угловых перемещений посредством сервомотора (исполнительного механизма).

На рис. 11.12 показана блок-схема следящего электропривода с вращающимся движением задающего устройства ЗУ, на котором устанавливают требуемый угол α поворота исполнительного органа ИО рабочей машины (механизма). Благодаря механической связи ЗУ с датчиком Д, в последнем происходит преобразование заданного угла поворота α в задающий сигнал U_α . Исполнительный орган ИО механически связан с измерительным устройством ИУ, в котором вырабатывается электрический сигнал U_β , находящийся в определенной функциональной зависимости от угла поворота β исполнительного органа. Сигнал U_β представляет собой *сигнал обратной связи по положению* исполнительного органа ИО. Сигналы U_α и U_β поступают на сравнивающее устройство СУ, на выходе которого возникает сигнал, равный разности задающего сигнала и сигнала обратной связи, называемый *сигналом рассогласования*

$$U_\theta = U_\alpha - U_\beta. \quad (11.9)$$

Этот сигнал поступает на усилитель мощности У, а затем — на исполнительный двигатель М, в котором сигнал рассогласования преобразуется в угловое перемещение исполнительного органа ИО, механически соединенного с двигателем М через редуктор Р. Это же угловое перемещение исполнительного органа β передается на измерительное устройство ИУ. После того как исполнительный

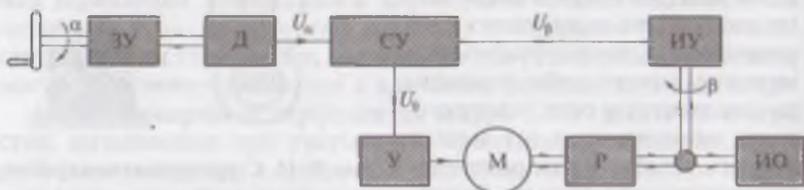


Рис. 11.12. Блок-схема следящего электропривода

орган ИО рабочего механизма повернется на угол $\beta = \alpha$, сигнал рассогласования уменьшается практически до нулевого значения ($U_0 = 0$), т.е. следящий электропривод, отработав заданный угол поворота α , придет в согласованное состояние.

В следящем электроприводе можно применять аналоговый (непрерывный) или релейный способы управления. При *аналоговом* (непрерывном) *управлении* частота вращения исполнительного двигателя пропорциональна сигналу рассогласования, т.е. она максимальна в начале отработки заданного угла поворота α и постепенно снижается до нуля в конце отработки электроприводом этого угла. Для следящих систем с аналоговым управлением должны применяться исполнительные управляемые двигатели постоянного (см. 2.11) или переменного (см. 3.8) тока, что обеспечивает этим системам, по сравнению с системами с релейным управлением, более высокую точность отработки (воспроизведения) заданного угла поворота исполнительного органа рабочей машины (механизма).

Рассмотрим работу следящего электропривода аналогового действия с применением сельсинов (см. 7.2.2), соединенных по трансформаторной схеме (рис. 11.13).

Следящий электропривод аналогового действия содержит два сельсина: сельсин-датчик СД, выполняющий функцию задающего устройства ЗУ, и сельсин-приемник СП, выполняющий функции измерительного ИУ и сравнивающего СУ устройств.

Согласованным положением сельсинов в трансформаторной схеме является положение, когда оси одноименных обмоток синхронизации этих сельсинов смещены относительно друг друга на

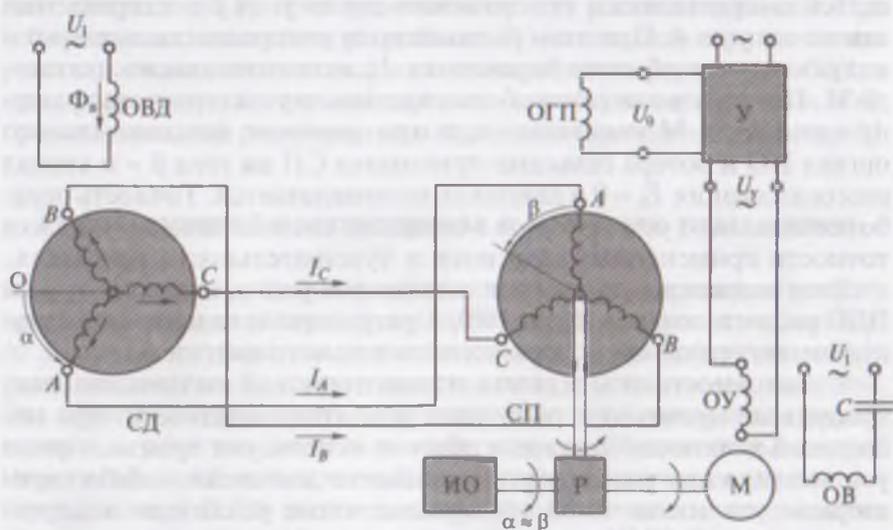


Рис. 11.13. Следящий электропривод на сельсинах с аналоговым управлением

угол 90 эл. град. Поэтому при согласованном положении сельсинов весь магнитный поток сельсина-приемника Φ_{Π} , создаваемый обмоткой синхронизации СП, направлен по поперечной оси, т.е. перпендикулярно оси генераторной обмотки ОГП и не индуцирует в ней ЭДС. Но как только начинается поворот ротора СД на заданный угол α (при этом ротор СП пока еще не начал поворота, т.е. $\beta = 0$), появляется угол рассогласования

$$\theta = \alpha - \beta \quad (11.10)$$

и магнитный поток синхронизации сельсина-приемника СП, повернувшись на некоторый угол θ , приобретает продольную составляющую

$$\Phi_d = \Phi_{\Pi} \sin \theta, \quad (11.11)$$

которая, сцепляясь с генераторной обмоткой СП, индуцирует в ней ЭДС рассогласования

$$E_0 = E_{\max} \sin \theta, \quad (11.12)$$

где E_{\max} — наибольшее значение ЭДС в генераторной обмотке, соответствующее углу рассогласования $\theta = 90^\circ$.

На выводах генераторной обмотки сельсина-приемника ОГП появляется напряжение рассогласования U_0 , которое, будучи усиленным усилителем мощности У, создает напряжение управления U_y на обмотке исполнительного двигателя М. При этом двигатель приходит во вращение и через редуктор Р поворачивает исполнительный орган ИО. Одновременно вращение передается ротору сельсина-приемника и поворачивает его на угол β в направлении заданного угла α . При этом уменьшаются угол рассогласования θ и напряжение на обмотке управления U_y исполнительного двигателя М. Поэтому по мере отработки заданного угла α частота вращения двигателя М уменьшается, а при повороте исполнительного органа ИО и ротора сельсина-приемника СП на угол $\beta = \alpha$ сигнал рассогласования $E_0 = 0$ и двигатель останавливается. Точность отработки заданного угла поворота в следящей системе зависит от класса точности примененных сельсинов и чувствительности усилителя.

Если меняется направление задаваемого угла α , изменяется фаза ЭДС рассогласования E_0 на 180° , в результате чего изменяется направление вращения ротора исполнительного двигателя.

В зависимости от мощности и типа двигателя в следящем электроприводе применяют различные усилители мощности: при небольшой мощности двигателя обычно используют транзисторные усилители, а при значительной мощности двигателя — либо тиристорные усилители, либо электромашинные усилители поперечного поля типа ЭМУ.

На рис. 11.14 представлена схема следящего электропривода аналогового действия с двигателем постоянного тока независимого

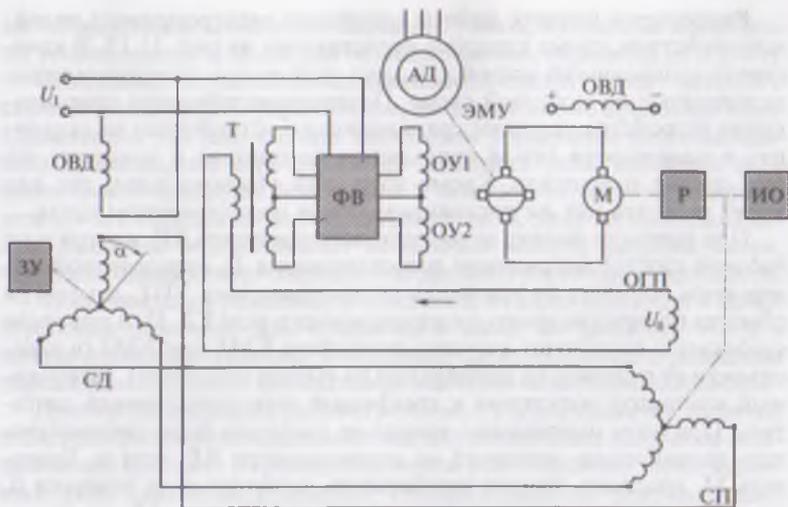


Рис. 11.14. Следящий электропривод аналогового управления с ЭМУ

возбуждения и электромашинным усилителем ЭМУ, приводимым в действие трехфазным асинхронным двигателем АД.

Обмотки управления этого усилителя ОУ1 и ОУ2 подключены к фазочувствительному выпрямителю ФВ. На вход выпрямителя ФВ через трансформатор Т с нулевым выводом на вторичной обмотке поступает напряжение U_0 , пропорциональное углу рассогласования θ . При повороте вала задающего устройства ЗУ по часовой стрелке сигнал рассогласования создает напряжение на обмотке управления ОУ1, а при повороте против часовой стрелки — на обмотке управления ОУ2, при этом каждый раз меняется направление вращения двигателя М.

11.6. Следящий электропривод с релейным управлением

При релейном управлении следящим электроприводом частота вращения ротора (якоря) исполнительного двигателя не зависит от значения сигнала рассогласования, т.е. пока действует сигнал рассогласования U_0 , двигатель вращается с неизменной частотой. Это позволило применить в следящих системах с релейным управлением в качестве двигателя нерегулируемый двигатель, например, трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который по своим технико-экономическим показателям лучше исполнительных регулируемых двигателей (более высокие КПД и коэффициент мощности, меньше габариты, масса и стоимость).

Рассмотрим процесс работы следящего электропривода релейного действия, схема которого представлена на рис. 11.15. В качестве сравнивающего устройства здесь применены потенциометры, включенные по мостовой схеме. Потенциометрические сравнивающие устройства уступают сравнивающим устройствам на сельсинах в надежности (из-за скользящих контактов) и точности, но они проще и дешевле. Кроме того, они универсальны, так как могут работать как на постоянном, так и на переменном токах.

При повороте движка задающего потенциометра RP_d на угол α по часовой стрелке напряжение рассогласования U_0 определенной полярности поступит на усилитель постоянного тока УПТ, а затем на обмотку поляризованного трехпозиционного реле КЛ. При этом реле сработает и подключит катушку контактора КМ1 или КМ2 (в зависимости от полярности напряжения на выходе усилителя). Включенный контактор подключит к трехфазной сети асинхронный двигатель. При этом направление вращения двигателя будет соответствовать направлению заданного на потенциометре RP_d угла α . Двигатель М, вращаясь, начнет обрабатывать заданный угол поворота α , но после поворота исполнительного органа ИО на угол $\beta = \alpha$ двигатель не остановится. В связи с электромагнитной и механической инерцией регулирующих приборов и самого двигателя отработанный угол β «перекроит» заданный угол α . При этом напряжение рассогласования U_0 на входе усилителя УПТ изменит свою полярность на противоположную. Также изменится полярность напряжения на катушке поляризованного реле КЛ, которое своими контактами переключит контакторы КМ1 и КМ2 и двигатель начнет вращение в противоположную сторону. Но и в этом случае система вновь не остановится при $\beta = \alpha$, но «перекрытие» заданного угла α произойдет в меньшей степени, чем в предыдущем случае. Другими словами, в следящей системе наступают *затухающие колебания*. Если за это время в систе-

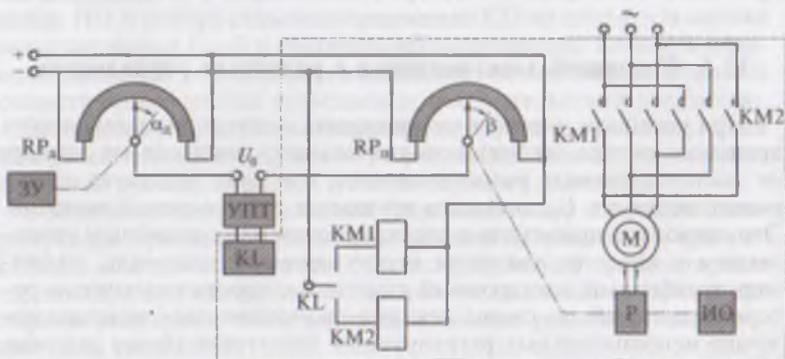


Рис. 11.15. Следящий электропривод релейного действия

ме не произошло изменения заданного угла α , то система постепенно успокаивается и двигатель останавливается, отработав угол $\beta \approx \alpha$.

Описанный затухающий колебательный процесс имеет место и в системе с аналоговым управлением, но там он менее продолжителен. Объясняется это тем, что при аналоговом управлении исполнительный двигатель, по мере отработки заданного угла, замедляет скорость своего вращения и подходит к моменту отработки заданного угла $\beta \approx \alpha$ с небольшой частотой вращения. К тому же исполнительные двигатели обычно имеют небольшой момент инерции якоря, что также способствует сокращению времени переходных процессов.

Что же касается релейного управления, то здесь двигатель в конце отработки заданного угла вращается с такой же частотой, что и в начале отработки. Поэтому в следящем электроприводе с релейным управлением процесс «успокоения» системы более продолжителен.

Другим недостатком рассматриваемой схемы является наличие в системе *зоны нечувствительности*, обусловленной наличием нейтрального контакта в трехпозиционном реле. Поэтому, если заданный угол отработан и контакт поляризованного реле занимает нейтральное положение, возобновление работы системы возможно лишь, когда напряжение рассогласования U_0 после усиления превысит напряжение срабатывания нейтрального реле.

Поляризованные реле обычно имеют небольшое напряжение срабатывания, но все же зона нечувствительности появляется, она снижает точность и приводит к ошибке воспроизведения заданного угла. Для устранения этого недостатка в цепи управления двигателем применяют *двухпозиционное* (без нейтрального положения) поляризованное реле КЛ. Но в этом случае двигатель М постоянно подключен к сети, а система непрерывно совершает *автоколебания* около заданного угла α и двигатель М также непрерывно работает в повторно-кратковременном режиме.

Таким образом, в следящих системах с релейным управлением приходится либо допускать автоколебания, либо жертвовать точностью системы и устранять эти автоколебания за счет применения трехпозиционного поляризованного реле, т. е. введения в систему зоны нечувствительности.

В заключение следует отметить, что следящий электропривод с релейным управлением, благодаря своей простоте, надежности и невысокой стоимости, получил широкое применение в устройствах общепромышленного назначения, когда его точность соответствует предъявляемым требованиям.

11.7. Серводвигатели

Серводвигатель — это силовой исполнительный элемент следящей системы, производящий перемещение исполнительного органа

рабочей машины (механизма) в соответствии с заданным сигналом управления. Мощность серводвигателя должна быть достаточной для перемещения исполнительного органа с требуемой скоростью и на расстояние (угол поворота), заданное датчиком регулирующего устройства.

Серводвигатели часто называют *электрическими исполнительными механизмами* ЭИМ, что более точно отражает их назначение. Эти механизмы незаменимы для управления вентилями, заслонками, клапанами и другими запорными и регулирующими органами, способными изменять количество энергии или рабочего вещества, поступающего на автоматизируемый объект. В трубопроводах, протяженность которых на некоторых объектах измеряется десятками и даже сотнями километров, установлено большое количество заслонок, вентилялей и других подобных устройств, каждый из которых приводится в действие исполнительным электрическим механизмом.

Элементы следящего электропривода с релейным управлением на рис. 11.15, обведенные пунктирной линией, образуют основу электрического исполнительного механизма.

Механическое перемещение регулирующего органа РО электрического исполнительного механизма может быть вращательным (в пределах одного или нескольких оборотов) или поступательным.

Электрический исполнительный механизм (рис. 11.16) состоит из блока сравнения БС; усилителя У; двигателя М; электромагнитного тормозного устройства ЭТ; редуктора Р, понижающего частоту вращения, а в механизмах с прямолинейным движением регулирующего органа РО еще и редуктора, преобразующего вращательное движение в поступательное; датчиков обратной связи ДОС; конечных выключателей КВ. Кроме того, ЭИМ имеет штурвал ручного управления РУ, позволяющий вручную выставлять регулирующий орган РО в требуемое положение (при монтаже и регулировке ЭИМ). Положение регулирующего органа можно контролировать по указателю на корпусе ЭИМ, а также дистанционно с помощью прибора П, подключенного к ДОС. Регулирующий орган РО исполнительного механизма механически соединяют с исполнительным

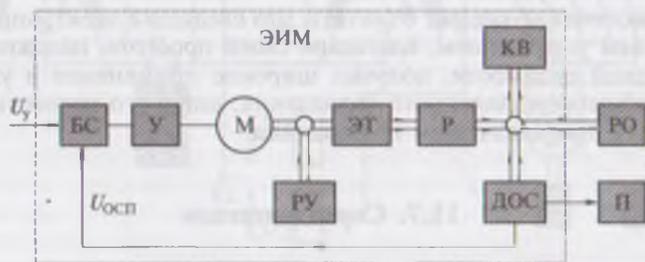


Рис. 11.16. Структурная схема исполнительного электрического механизма

органом ИО рабочего механизма. Помимо перечисленного, ЭИМ могут содержать и другие элементы, например датчик обратной связи по скорости, в качестве которого обычно используют тахогенераторы. Таким образом, ЭИМ представляет собой замкнутую систему, охваченную обратной связью, и в то же время он является элементом другой замкнутой системы, содержащей несколько подобных механизмов и других элементов, составляющих автоматизированную систему управления технологическим процессом.

В зависимости от требований к ЭИМ со стороны следящего электропривода, элементом которого он является, исполнительные механизмы могут быть аналогового или релейного действия. От этого зависит устройство усилителя, коммутирующих элементов и тип двигателя, примененных в ЭИМ.

ЭИМ аналогового действия называют механизмами *переменной скорости*, так как в этих механизмах частота вращения двигателя в процессе отработки заданного сигнала изменяется — в начале она наибольшая, а по мере отработки сигнала она постепенно снижается. В качестве двигателей для механизмов переменной скорости применяют исполнительные двигатели (обычно асинхронные), частота вращения которых регулируется напряжением, поступающим на обмотку управления двигателя (см. 3.8).

ЭИМ релейного действия называют механизмами *постоянной скорости*, так как частота вращения двигателя в этих механизмах всегда одинакова, т.е. не зависит от стадии отработки заданного перемещения. Такой режим работы позволяет применять в исполнительных механизмах трехфазные асинхронные двигатели общего назначения, например, серии АИР или асинхронные конденсаторные двигатели. Эти двигатели имеют высокие энергетические показатели, надежны в эксплуатации, имеют минимальные габаритные размеры, массу и стоимость. Однако такие исполнительные механизмы не обеспечивают высокой точности регулирования, что необходимо учитывать при выборе ЭИМ.

Тормозное устройство служит для фиксированного останова регулирующего органа механизма после отработки управляющего сигнала. Наиболее широко в ЭИМ применяют фрикционные тормоза с электромагнитным управлением (см. 7.7.2).

Датчики обратной связи по положению служат для получения электрического сигнала обратной связи $U_{осп}$, значение которого определяется пространственным положением регулирующего органа механизма. В механизме таких датчиков обычно два. Сигнал обратной связи $U_{осп}$ с одного из них подается на сравнивающее устройство, где он, суммируясь с задающим сигналом, корректирует работу ЭИМ в соответствии с пространственным положением регулирующего органа механизма, а сигнал с другого датчика подается на дистанционный указатель положения регулирующего органа на пульте диспетчера.

В качестве датчиков обратной связи по положению используют датчики двух типов: реостатные и индукционные. Реостатный датчик — это реостат, включенный по схеме потенциометра. Положение движка датчика соответствует пространственному положению регулирующего органа механизма. Основным недостатком реостатных датчиков — наличие скользящего контакта, который снижает надежность ЭИМ из-за возможного подгорания контакта или его нарушения вследствие окисления.

Более надежны индукционные датчики. Такой датчик состоит из двух катушек (см. 7.3), включенных по дифференциальной схеме. Внутри катушек перемещается сердечник, связанный через профильный кулачок с выходным валом механизма. Рабочий ход этого сердечника 5 мм. При симметричном расположении сердечника относительно катушек напряжение на выводах обеих катушек одинаково. При смещении сердечника от этого положения напряжение на катушках становится неодинаковым.

Благодаря использованию кулачка специального профиля напряжение на катушках изменяется пропорционально углу поворота выходного вала исполнительного механизма. Датчики обратной связи монтируются в отдельном блоке совместно с конечными выключателями. При подходе регулирующего органа механизма к одному из крайних положений срабатывают конечные выключатели, отключающие двигатель (рис. 11.17).

Наличие в исполнительном механизме контактных элементов заметно снижает его надежность из-за возможного подгорания или

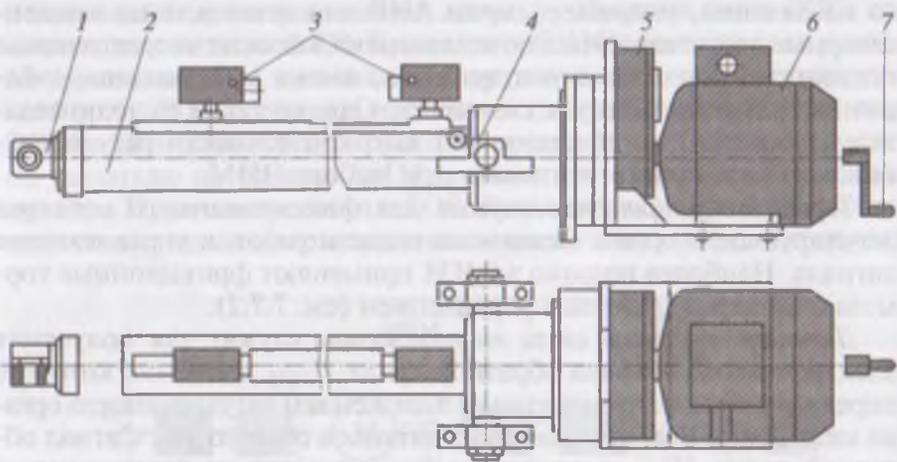


Рис. 11.17. Электрический исполнительный механизм поступательного движения типа РЭМ:

1 — выдвигной шток для присоединения к рабочему органу; 2 — силовая передача «винт-гайка»; 3 — конечные выключатели; 4 — шарнирные опоры корпуса; 5 — редуктор; 6 — двигатель; 7 — рукоятка ручного привода

залипания контактов. Стремление повысить надежность ЭИМ привело к созданию бесконтактных исполнительных механизмов, не содержащих в своих цепях размыкаемых или скользящих контактов. В таких механизмах нет конечных выключателей, а для ограничения крайних положений выходного органа механизма применены механические упоры. При подходе к одному из крайних положений регулирующий орган механизма стопорится упором. Специфика работы бесконтактных исполнительных механизмов предъявляет к двигателю дополнительное требование — возможность его работы в режиме «на упор» (режим короткого замыкания), когда скольжение $s = 1$. В качестве таких двигателей используют асинхронные исполнительные двигатели, спроектированные таким образом, что в режиме работы «на упор» их перегрев не превышает допустимого значения. Такое свойство двигателей обеспечивается повышенным активным сопротивлением обмотки ротора, при котором номинальное скольжению $s_{ном} \geq 20\%$. При этом пусковой момент двигателя равен максимальному.

Промышленность изготавливает разнообразные ЭИМ, предназначенные для работы в системах общепромышленной автоматики и системах специального назначения.

Для получения возвратно-поступательного движения рабочего органа (трубопроводной арматуры, привода дверей, шлагбаумов, жалюзи, задвижек) широко используют электромеханизмы серии РЭМ (см. рис. 11.17). В качестве приводного двигателя в этих механизмах применен трехфазный асинхронный двигатель, вращательное движение с которого через редуктор передается на винтовую пару, преобразующую вращательное движение в поступательное. Ход штока выбирается из ряда 150, 300 и 500 мм. Номинальное усилие на штоке $F_{ном}$ от 0,5 до 10 кН. Винтовая передача является самотор-

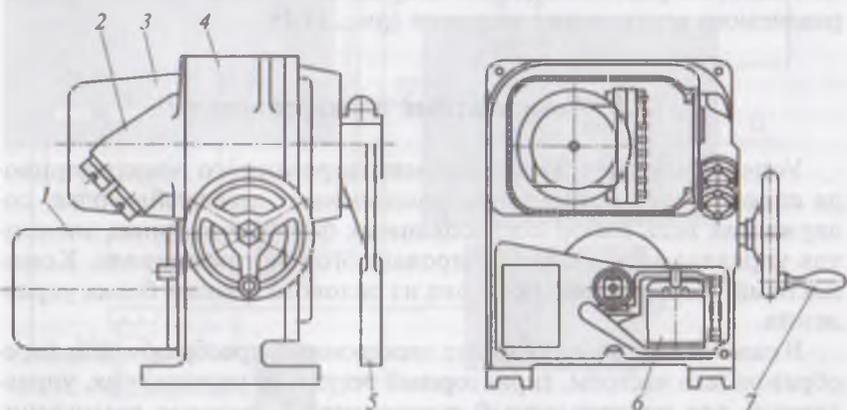


Рис. 11.18. Общий вид однооборотного электрического исполнительного механизма типа МЭО

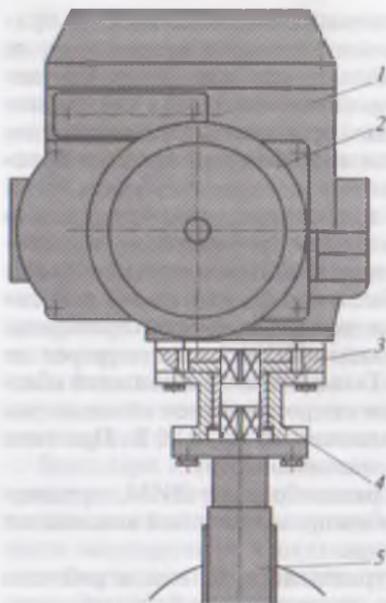


Рис. 11.19. Фланцевое крепление исполнительного механизма типа МЭМ на управляемом вентиле:

1 — механизм; 2 — штурвал; 3 — фланец; 4 — соединительная втулка; 5 — управляемый вентиль

мозающейся, поэтому электромеханизмы серии РЭМ не имеют тормозного устройства.

Исполнительные механизмы типа МЭО однооборотные, т.е. с вращательным движением выходного органа в пределах одного оборота (рис. 11.18); механизмы типа МЭМ (многооборотные) для управления регулирующими органами с винтовым шпинделем; механизмы типа МЭП (прямоходовые) с поступательным движением выходного органа.

Основу исполнительного механизма типа МЭО (см. рис. 11.18) составляет редуктор, на корпусе 4 которого крепятся двигатель 1, блок датчиков обратной связи по положению 3, электромагнитный тормоз 6. Штурвал 7 служит для ручной установки регулирующего органа 5. Механизм включается в схему автоматического управления посредством штуцерного ввода 2.

Крепление исполнительного электрического механизма в месте установки выполняется либо

на лапах (см. рис. 11.18), либо посредством фланца на корпусе управляемого вентиля или заслонки (рис. 11.19).

11.8. Комплектные электроприводы

Успешному внедрению автоматизированного электропривода способствует применение *комплектных электроприводов*, содержащих весь набор согласованных функциональных элементов управляемого автоматизированного электропривода. Комплектный электропривод состоит из силового блока и блока управления.

В *силовом блоке* обычно входят электронный преобразователь (преобразователь частоты, тиристорный регулятор напряжения, управляемый или неуправляемый выпрямитель), включая коммутационно защитную аппаратуру КЗА, систему охлаждения, электродвигатель М переменного или постоянного тока с датчиком или

без датчика скорости ДС, силовой трансформатор или автотрансформатор, реактор.

В блок управления обычно входят источник питания цепей управления, устройства ввода и вывода сигналов, пульт управления с индикаторным устройством, блок связи с преобразователем (интерфейс), контроллер привода. Возможно наличие и других блоков, устройств и т. п.

На рис. 11.20 представлена функциональная схема комплектного нереверсивного тиристорного электропривода типа КТЭ на ток 500 А. Электропривод КТЭ включает в себя следующие блоки:

силовой блок СБ, состоящий из согласующего трехфазного трансформатора Т, трехфазного управляемого нереверсивного выпрямителя на тиристорах с естественным охлаждением (при токах свыше 1000 А охлаждение принудительное методом обдува воздухом), выполненный по трехфазной мостовой схеме, двигатель постоянного тока независимого возбуждения М, укомплектованного тахогенератором ВР;

блок управления БУ, предназначенный для управления тиристорами и работающий в соответствии с управляющим сигналом U_y , поступающим на вход КФУ (канал фазового управления) из системы автоматического регулирования (САР);

блок защиты и сигнализации БЗС, предназначенный для выдачи аварийных или предупредительных сигналов о неисправнос-

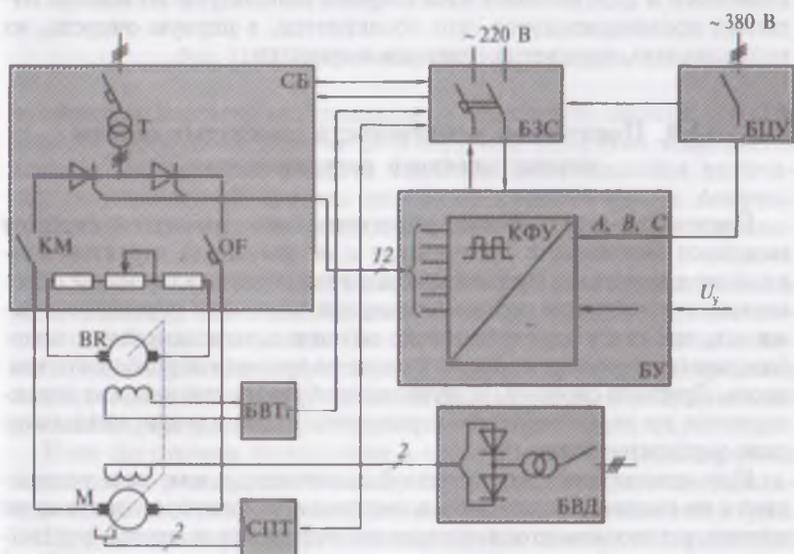


Рис. 11.20. Функциональная схема нереверсивного комплектного тиристорного электропривода на ток 500 А с набором встроенных устройств

тях в электроприводе, а также для индикации на табло светосигнальными устройствами подачи напряжений на блоки и системы, состоящая готовности блоков, их работы и возникновения аварий в КТЭ;

блок питания цепей управления БЦУ;

блоки питания обмоток возбуждения БВД двигателя М, тахогенератора БВТг и электромагнитного тормоза.

Цепь якоря двигателя М подключена к тиристорному выпрямителю посредством силового контактора КМ и автоматического выключателя QF. Кроме перечисленных элементов КТЭ содержит необходимые коммутационные и защитные устройства.

Все блоки КТЭ размещаются в металлических шкафах, при токах до 1000 А охлаждение тиристоров естественное, а при токах более 1000 А охлаждение искусственное посредством центробежного вентилятора, забирающего воздух из машинного зала через очистительный фильтр.

Промышленность выпускает также реверсивные КТЭ, отличающиеся от рассмотренного более сложной схемой преобразовательных устройств и системой их управления.

КТЭ изготавливают на токи от 10 до 10 000 А с питанием от сети трехфазного переменного тока напряжением 220 и 380 В, а также высоковольтным напряжением 6,0 и 10 кВ.

Комплектные электроприводы с применением двигателей постоянного и переменного тока широко используют во многих отраслях промышленности, что объясняется, в первую очередь, их надежностью, простотой монтажа и наладки.

11.9. Понятие об устойчивости замкнутых систем автоматического регулирования

Постоянно действующую обратную связь замкнутой системы называют *жесткой*, а полученные с ее помощью характеристики — *статическими*. Применение жестких обратных связей не обеспечивает устойчивой работы замкнутой системы в переходных режимах, так как в электроприводе возможно возникновение колебательных процессов или затягивание во времени переходного процесса. Другими словами, получение требуемых статических характеристик не гарантирует электроприводу приемлемые динамические характеристики.

При изменении регулируемой величины u или при воздействии на систему каких-либо возмущающих факторов система из одного установившегося состояния переходит в другое установившееся состояние, при этом в системе наступает *переходный режим*. Поведение системы в переходном режиме зависит от *степени успокоения* системы ϵ . На рис. 11.21 представлены графики

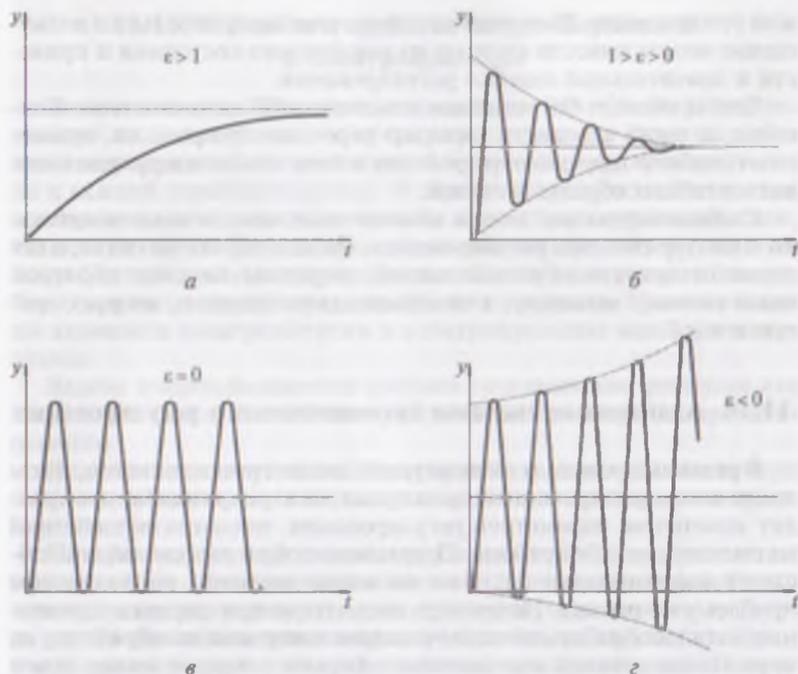


Рис. 11.21. Графики переходных процессов

возможных переходных процессов в замкнутой системе $y = f(t)$. Если в переходном режиме регулируемая величина изменяется плавно, не перекрывая новое значение изменившейся величины, то переходный процесс называют *апериодическим*. Апериодический переходный процесс соответствует степени успокоения $\epsilon > 1$ (рис. 11.21, а).

Если регулируемая величина приближается к своему новому установившемуся значению по колебательному закону с постепенным ослаблением этих колебаний, то переходный процесс называют *колебательным затухающим*. Такому переходному процессу соответствуют значения степени успокоения ϵ от нуля до единицы (рис. 11.21, б).

Если же степень успокоения $\epsilon = 0$, то колебательный процесс переходного режима становится *незатухающим*, при этом амплитуда колебаний не нарастает, но система не успокаивается (рис. 11.21, в). И наконец, при неблагоприятном сочетании параметров элементов системы регулирования колебательный процесс в системе становится незатухающим при нарастающей амплитуде колебаний ($\epsilon < 0$) (рис. 11.21, г). В этом случае говорят о потере систе-

мой устойчивости. В неустойчивой системе даже небольшое возмущение может вывести систему из устойчивого состояния и привести к значительной ошибке регулирования.

Чтобы обеспечить устойчивость замкнутой автоматической системы, а также улучшить характер переходного процесса, применяют стабилизирующие устройства в виде стабилизирующих звеньев и гибких обратных связей.

Стабилизирующие звенья обычно включаются последовательно в контур системы регулирования. Гибкие обратные связи, в отличие от жестких обратных связей, передают по цепи обратной связи не саму величину, а ее производную (первую, вторую, третью и т.д.).

11.10. Адаптивные системы автоматического регулирования

В реальных условиях эксплуатации автоматических систем, в том числе автоматизированных замкнутых электроприводов, происходит изменение параметров регулирования, внешних воздействий на систему, условий работы. Применение обратных связей способствует настраиванию системы на новые условия, но полностью проблему не решает. Например, автоматическая система управления металлообрабатывающим станком настроена на обработку на этом станке деталей определенных форм и размеров из металла с конкретными свойствами.

Если же возникла необходимость обработки других деталей с другими формами, размерами или из металла с другими свойствами, то возникает необходимость перенастройки системы автоматического управления этим станком. В таких случаях целесообразно применение *адаптивных* систем автоматического управления, которые автоматически перенастраиваются на новые условия с поиском оптимальных параметров технологического процесса.

По уровню адаптации (приспособляемости) системы разделяют на самонастраивающиеся и самоорганизующиеся. В *самонастраивающихся* адаптивных системах на основе характеристик системы и информации о параметрах внешних воздействий изменяются параметры элементов, входящих в адаптивную систему. В *самоорганизующихся* адаптивных системах на основе информации о состоянии объекта регулирования происходит формирование другого алгоритма (математической основы) управления, т.е. изменение последовательности действий (операций) технологического процесса, реализуемого данной системой управления. В таких системах производится переработка информации о технологическом процессе, в результате которой вырабатываются новые команды управления процессом.

11.11. Способы и средства энергосбережения в электроприводах

В соответствии с Федеральным законом РФ «Об энергосбережении» на промышленном предприятии должны быть разработаны мероприятия по экономии электроэнергии применительно к каждой электроустановке. В первую очередь это относится к электромеханическим устройствам с электрическим приводом, так как более 60 % всей производимой в мире электроэнергии потребляется именно электродвигателями в электроприводах рабочих машин, механизмов, транспортных средств. Поэтому меры по экономии электроэнергии в электроприводах наиболее актуальны.

Задачи энергосбережения требуют оптимального решения как в процессе эксплуатации электроприводов, так и при их проектировании.

В процессе эксплуатации электропривода значительные потери энергии наблюдаются в переходных режимах и в первую очередь при его пуске.

Потери энергии в переходных режимах могут быть заметно снижены за счет применения двигателей с меньшими значениями моментов инерции ротора, что достигается уменьшением диаметра ротора при одновременном увеличении его длины, так как мощность двигателя при этом должна оставаться неизменной. Например, так сделано в двигателях краново-металлургических серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме с большим числом включений в час.

Эффективным средством снижения потерь энергии *при пуске* двигателей является пуск при постепенном повышении напряжения, подводимого к обмотке статора (см. 4.4). Такой энергосберегающий способ пуска двигателя возможен только при работе этого двигателя в системе с регулируемым преобразователем: для асинхронных двигателей это устройства плавного пуска (см. 8.7) или преобразователи частоты (см. 8.5), а для двигателей постоянного тока это электронные (тиристорные) устройства управления (см. 8.4).

Энергия, расходуемая при торможении двигателя, равна кинетической энергии, запасенной в движущихся частях электропривода при его пуске. Энергосберегающий эффект при торможении зависит от способа торможения. Наибольший энергосберегающий эффект происходит при генераторном рекуперативном торможении с отдачей энергии в сеть (см. 2.4, 2.6 и 3.3). При динамическом торможении двигатель отключается от сети, поэтому потери энергии при динамическом торможении не происходит. Наибольшие потери энергии происходят при торможении противовключением, когда расход электроэнергии равен трех-

кратному значению энергии, рассеиваемой в двигателе при динамическом торможении.

При *установившемся режиме* работы двигателя с номинальной нагрузкой потери энергии определяются номинальным значением КПД. Но если электропривод работает с переменной нагрузкой, то в периоды ее спада КПД двигателя понижается, что ведет к росту потерь. Эффективным средством энергосбережения в этом случае является снижение напряжения, подводимого к двигателю в периоды его работы с недогрузкой. Это возможно реализовать при работе двигателя в системе с регулируемым преобразователем при наличии в нем обратной связи по току нагрузки. Сигнал обратной связи по току корректирует соответствующим образом сигнал управления преобразователем, вызывая уменьшение напряжения, подводимого к двигателю в периоды снижения нагрузки. Если приводным является асинхронный двигатель, работающий при соединении обмоток статора «треугольником», то снижение

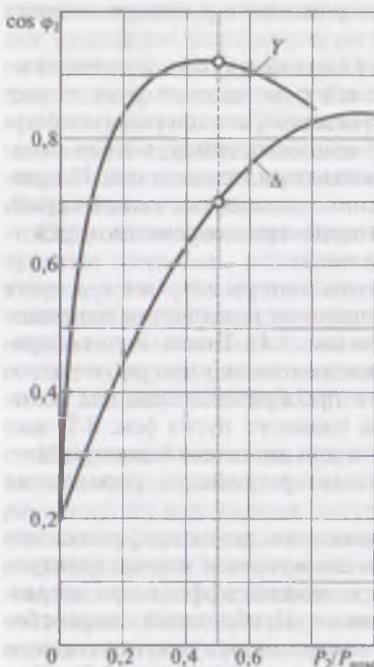


Рис. 11.22. Зависимость $\cos \varphi_1 = f(P)$ асинхронного двигателя при соединении обмотки статора «треугольником» и «звездой»

напряжения, подводимого к фазным обмоткам статора, можно легко реализовать путем переключения этих обмоток статора на соединение «звездой», так как при этом фазное напряжение понижается в 1,73 раза. Это целесообразно еще и потому, что при таком переключении повышается коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_1$, что также способствует энергосбережению. На рис. 11.22 представлены графики зависимости коэффициента мощности трехфазного асинхронного двигателя от нагрузки $\cos \varphi_1 = f(P_2)$. Из этих графиков следует, что при переключении обмотки статора с «треугольника» на «звезду» при снижении нагрузки этого двигателя до 50 % относительно номинальной коэффициент мощности возрастает более чем на 20 %. Примером практического применения этого способа энергосбережения может служить электропривод с асинхронным двигателем, работающий в условиях значительных колебаний нагрузки (рис. 11.23).

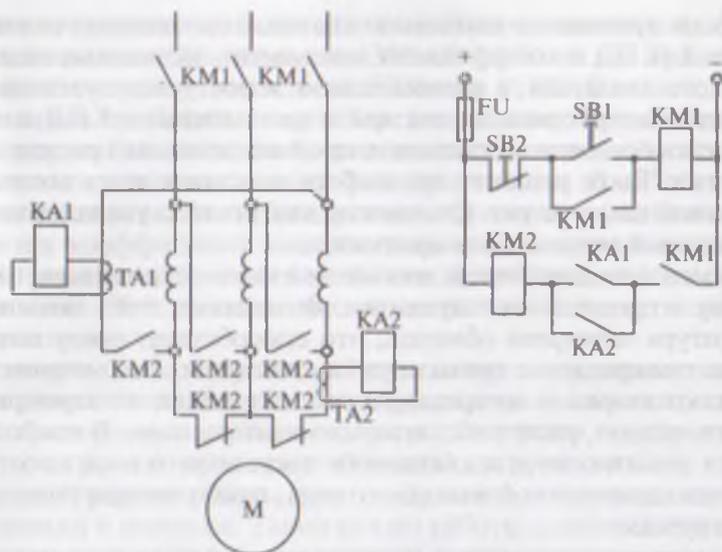


Рис. 11.23. Схема автоматического переключения обмотки статора асинхронного двигателя с «треугольника» на «звезду»

Несложное схемное решение, приведенное на рис. 11.23, позволяет с помощью двух реле тока KA1 и KA2, катушки которых включены последовательно в фазные обмотки статора двигателя через измерительные трансформаторы тока TA1 и TA2, автоматизировать переключение обмотки статора с «треугольника» на «звезду» при снижении нагрузки двигателя на 40—50 % относительно номинальной и обратное переключение при восстановлении нагрузки.

При нажатии кнопки SB1 включается силовой контактор KM1 и своими линейными контактами подключает двигатель к сети. Контактор KM2 в начальный момент пуска остается невключенным и своими размыкающимися контактами соединяет обмотку статора «звездой». Но как только начинается пуск двигателя, значительный пусковой ток статора вызывает срабатывание реле тока KA2. При этом контактор KM2 срабатывает и своими замыкающими контактами переключает обмотку статора со «звезды» на «треугольник». Реле тока KA1 срабатывает и двигатель переходит в рабочий режим. При этом реле KA2 отпускает и его контакты в цепи катушки KM2 размыкаются.

Если нагрузка двигателя снизится до значения $P_2 < 0,5P_{ном}$, то реле тока KA1 отпустит и своими контактами отключит контактор KM2, что приведет к пересоединению обмотки статора с «треугольника» на «звезду». При этом двигатель будет продолжать работу при повышенном значении коэффициента мощности. Если же нагрузка двигателя вновь возрастет до значения $P_2 > 0,5P_{ном}$, то произойдет переключение обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

При проектировании электропривода важным является правильный выбор мощности двигателя. Так, выбор двигателя *завышенной*

мощности приведет к снижению его технико-экономических показателей (КПД и коэффициент мощности), вызванных недогрузкой такого двигателя, а следовательно, к росту эксплуатационных расходов электропривода, так как с уменьшением КПД и коэффициента мощности возрастает непроизводительный расход электроэнергии. Такое решение при выборе двигателя ведет также к росту капитальных затрат (стоимость двигателя с увеличением его номинальной мощности возрастает).

Применение двигателей *заниженной* мощности вызывает их перегрузку в процессе эксплуатации. Вследствие этого повышается температура перегрева обмоток, что способствует росту потерь и вызывает сокращение срока службы двигателя. В конечном итоге возникают аварии и непредвиденные остановки электропривода, и следовательно, растут эксплуатационные расходы. В наибольшей степени это относится к двигателям постоянного тока из-за наличия у них щеточно-коллекторного узла, наиболее чувствительного к перегрузкам.

Большое значение имеет рациональный выбор пускорегулирующей аппаратуры. С одной стороны, желательно, чтобы процессы пуска, торможения, реверса и регулирования частоты вращения не сопровождалась значительными потерями электроэнергии, так как это ведет к удорожанию эксплуатации электропривода. Но, с другой стороны, желательно, чтобы стоимость пускорегулирующих устройств не была бы чрезмерно высокой, что привело бы к росту капитальных затрат. Обычно эти требования находятся в противоречии. Например, применение полупроводниковых пусковых и регулирующих устройств обеспечивает наиболее экономичное протекание переходных процессов в двигателях, но стоимость этих устройств пока еще остается достаточно высокой. Поэтому при решении вопроса по применению полупроводниковых силовых устройств следует обратиться к графику работы проектируемого электропривода. Если электропривод не подвержен частым регулировкам, пускам, реверсам и т.п., то повышенные затраты на дорогостоящее пускорегулирующее оборудование могут оказаться неоправданными, а расходы, связанные с потерями энергии — незначительными. И наоборот, при интенсивной эксплуатации электропривода в переходных режимах применение полупроводниковых пускорегулирующих устройств становится оправданным.

Известно, что электрические потери в питающих сетях и в обмотках электрических устройств пропорциональны квадрату тока ($P_{эл} = I^2 R$). По этой причине целесообразно применение в электроприводах двигателей с большим номинальным напряжением, так как при заданной мощности применение более высокого напряжения сопровождается уменьшением силы тока, и следовательно, сокращением потерь. Поэтому для низковольтных двигателей рациональнее применение напряжения 440 В для двигателей по-

стоянного тока или 660 В для двигателей переменного тока. Что же касается двигателей мощностью 300 кВт и более, то они обычно рассчитаны на напряжение сети 6000 или 10 000 В.

Решению проблемы энергосбережения способствует применение синхронных двигателей, создающих в питающей сети реактивные токи, опережающие по фазе напряжение. В итоге сеть разгружается от реактивной (индуктивной) составляющей тока, повышается коэффициент мощности на данном участке сети, что ведет к уменьшению тока в этой сети и, как следствие, к энергосбережению. Эти же цели преследует включение в сеть синхронных компенсаторов.

Примером целесообразного применения синхронных двигателей является электропривод компрессорных установок, снабжающих предприятие сжатым воздухом. Для этого электропривода характерен режим: пуск при небольшой нагрузке на валу, продолжительный режим работы при стабильной нагрузке, отсутствие торможений и реверсов. Такой режим работы вполне соответствует свойствам синхронных двигателей. Используя в синхронном двигателе режим перевозбуждения, можно достичь значительного энергосбережения в масштабе всего предприятия.

С аналогичной целью применяют силовые конденсаторные установки («косинусные» конденсаторы). Создавая в сети ток, опережающий по фазе напряжение, эти установки частично компенсируют индуктивные (отстающие по фазе) токи, что ведет к повы-

Таблица 11.1

Комплектные конденсаторные установки серии УКМ58

Тип установки	Напряжение, кВ	Номинальная реактивная мощность, квар	Масса, кг
УКМ 58-04-20-10 УЗ	0,4	20	47
УКМ 58-04-30-10 УЗ	0,4	30	62
УКМ 58-04-50-25 УЗ	0,4	50	70
УКМ 58-04-67-33,3 УЗ	0,4	67	85
УКМ 58-04-100-33,3 УЗ	0,4	100	110
УКМ 58-04-150-30 УЗ	0,4	150	132
УКМ 58-04-180-30 УЗ	0,4	180	145
УКМ 58-04-200-33,3 УЗ	0,4	200	168
УКМ 58-04-300-33,3 УЗ	0,4	300	210
УКМ 58-04-402-67 УЗ	0,4	402	395
УКМ 58-04-603-67 УЗ	0,4	603	585

Примечание. В обозначении УКМ58 вторая цифра обозначает номинальное напряжение, кВ, третья — реактивную мощность, квар, четвертая — мощность одной ступени, квар.

шению коэффициента мощности сети, а следовательно, к энергосбережению. Наиболее эффективным является использование конденсаторных установок серии УКМ58 (табл. 11.1) с автоматическим поддержанием заданного значения коэффициента мощности и со ступенчатым изменением реактивной мощности в диапазоне от 20 до 600 квар при напряжении 400 В.

Необходимо помнить, что энергосбережение направлено на решение не только экономических, но и экологических проблем, связанных с производством электроэнергии.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное различие между разомкнутой и замкнутой системами автоматизированного электропривода?
2. Объясните назначение сравнивающего устройства в замкнутой системе.
3. Чем можно регулировать глубину обратной связи на схеме рис. 11.2?
4. Почему механические характеристики электропривода с обратной связью по скорости более жесткие, чем при отсутствии обратной связи?
5. Каким образом получают трехзонную механическую характеристику электропривода?
6. Что представляет собой следящий электропривод?
7. Объясните работу следящего электропривода по блок-схеме рис. 11.12.
8. Почему в следящем электроприводе аналогового действия необходимо применение исполнительного управляемого двигателя?
9. Чем вызвана необходимость использования фазочувствительного выпрямителя в следящем электроприводе рис. 11.14?
10. Каковы достоинства и недостатки следящего электропривода релейного действия?
11. По какой причине в следящем электроприводе релейного действия может появиться зона нечувствительности?
12. Каково назначение серводвигателей?
13. Из каких основных элементов состоит ЭИМ?
14. В чем преимущества применения комплектных электроприводов?
15. В чем разница между самонастраивающимися и самоорганизующимися адаптивными системами автоматического электропривода?
16. В чем состоят основные принципы энергосбережения?

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Основные и производные единицы международной системы единиц СИ,
использованные в книге**

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение (русское)
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Плоский угол	радиан	рад
Площадь	квадратный метр	м ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³
Скорость (линейная)	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с
Частота периодического процесса, частота колебаний	герц	Гц
Частота вращения*	секунда в минус первой степени	с ⁻¹
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Момент инерции	килограмм-метр в квадрате	кг·м ²
Сила, сила тяжести (вес)	ньютон	Н
Момент силы, момент пары сил	ньютон-метр	Н·м
Давление, нормальное напряжение	паскаль	Па
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Температура Цельсия	градус Цельсия	°С
Теплота, количество теплоты	джоуль	Дж

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение (русское)
Количество электричества (электрический заряд)	кулон	Кл
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	вольт	В
Электрическая емкость	фарад	Ф
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	А/м ²
Линейная плотность электрического тока	ампер на метр	А/м
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер	А
Магнитная индукция	тесла	Тл
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	ампер на метр	А/м
Электрическое сопротивление (активное, реактивное, полное)	ом	Ом
Электрическая проводимость (активная, реактивная, полная)	сименс	См
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	Ом·м
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	См/м
Магнитное сопротивление	генри в минус первой степени	Гн ⁻¹
Магнитная проводимость	генри	Гн
Мощность активная	ватт	Вт
Электромагнитная энергия	джоуль	Дж

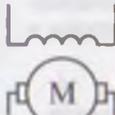
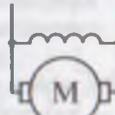
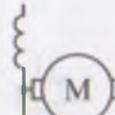
* В технических документах, каталогах и заводской практике частоту вращения принято измерять в единицах «обороты в минуту», обозначение об/мин или мин⁻¹; 1 об/мин = 60 с⁻¹.

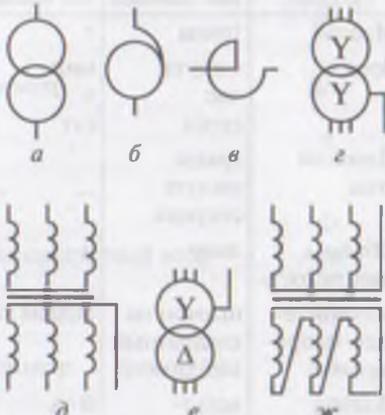
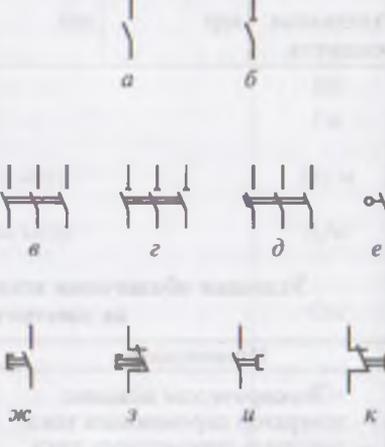
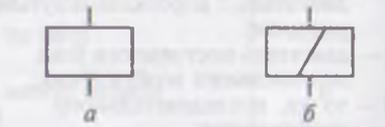
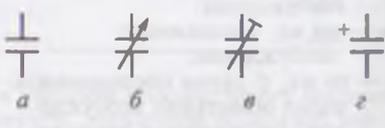
Единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Величина	Наименование единицы	Обозначение единицы	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Плоский угол	градус	...°	$\pi/180$ рад $\approx 1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...'	$\pi/10\,800$ рад $\approx 2,908882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	...''	$\pi/648\,000$ рад $\approx 4,848137 \cdot 10^{-6}$ рад
Объем, вместимость	литр	л	10^{-3} м ³
Механическое напряжение	ньютон на квадратный миллиметр	Н/мм ²	1 МПа
Полная мощность	вольт-ампер	В·А	—
Реактивная мощность	вар	вар	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Условные обозначения некоторых элементов и устройств на электрических схемах

Наименование	Обозначение
<i>Электрические машины:</i>	
<i>a</i> — генератор переменного тока;	
<i>б</i> — двигатель переменного тока;	
<i>в</i> — трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;	
<i>г</i> — двигатель постоянного тока независимого возбуждения;	
<i>д</i> — то же, последовательного возбуждения;	
<i>е</i> — то же, параллельного возбуждения;	
<i>ж</i> — то же, смешанного возбуждения;	
<i>з</i> — то же, с двумя последовательными обмотками возбуждения (реверсивный двигатель)	

Наименование	Обозначение
<p><i>Трансформаторы:</i> <i>a</i> — трансформатор; <i>б</i> — автотрансформатор; <i>в</i> — реактор; <i>г, д</i> — трехфазный трансформатор, соединение обмоток «звезда — звезда с нейтральным проводом»; <i>е, ж</i> — трехфазный трансформатор, соединение обмоток «звезда с нейтральным проводом — треугольник»</p>	
<p><i>Выключатели:</i> <i>a</i> — однополюсный выключатель; <i>б</i> — однополюсный разъединитель; <i>в</i> — трехполюсный выключатель; <i>г, д</i> — трехполюсный выключатель автоматический; <i>е</i> — путевой однополюсный выключатель; <i>ж</i> — кнопка замыкающая с самовозвратом; <i>з</i> — кнопка размыкающая с самовозвратом; <i>и</i> — кнопка замыкающая без самовозврата; <i>к</i> — кнопка размыкающая без самовозврата</p>	
<p><i>Катушки электромеханических устройств (реле, контакторы и т.п.)</i> <i>a</i> — общее обозначение; <i>б</i> — катушка с одной обмоткой</p>	
<p><i>Конденсаторы:</i> <i>a</i> — постоянный; <i>б</i> — переменный; <i>в</i> — подстроечный; <i>г</i> — электролитический</p>	

Наименование	Обозначение
<i>Полупроводниковые приборы:</i> <i>a</i> — диод (общее обозначение); <i>б</i> — туннельный диод; <i>в</i> — стабилитрон; <i>г</i> — варикап; <i>д</i> — динистор; <i>е</i> — тиристор с управлением по катоду; <i>ж</i> — тиристор с управлением по аноду; <i>з</i> — триодный тиристор, запираемый по катоду; <i>и</i> — триодный тиристор, запираемый по аноду	
<i>Полупроводниковые приборы:</i> <i>a</i> — выпрямитель однофазный мостовой; <i>б</i> — фотодиод; <i>в</i> — светодиод; <i>г</i> — фоторезистор; <i>д</i> — солнечный фотоэлемент; <i>е</i> — транзистор <i>pnp</i> -типа; <i>ж</i> — транзистор <i>npn</i> -типа; <i>з</i> — полевой транзистор с каналом <i>n</i> -типа; <i>и</i> — биполярный транзистор с изолированным затвором	
<i>Контакты:</i> <i>a</i> — замыкающий; <i>б</i> — размыкающий; <i>в</i> — переключающий; <i>г</i> — с двойным замыканием; <i>д</i> — с двойным размыканием; <i>е</i> — замыкающий с механической связью; <i>ж</i> — с замедлением при срабатывании; <i>з</i> — с замедлением при возврате (отпускиании); <i>и</i> — с замедлением при срабатывании и возврате; <i>к</i> — без самовозврата; <i>л</i> — теплового реле	

Буквенные коды наиболее распространенных элементов и устройств, применяемые в электрических схемах

Код группы элементов	Примеры кодов устройств и элементов
А — Устройства	АК — Блок реле
В — Преобразователи неэлектрических величин в электрические, и наоборот	ВК — Тепловой датчик ВL — Фотоэлемент ВR — Тахогенератор
С — Конденсаторы	
Е — Элементы разные	ЕК — Нагревательный элемент ЕL — Лампа осветительная
F — Разрядники, предохранители, устройства защиты	FA — Дискретный элемент защиты по току FU — Предохранитель плавкий FV — Разрядник
G — Генераторы, источники питания	GB — Батарея аккумуляторная
Н — Устройства сигнальные и индикаторные	НL — Лампа сигнальная НА — Звонок
К — Реле, контакторы, пускатели	КА — Реле тока КН — Реле указательное КК — Реле электротепловое КМ — Контактор, магнитный пускатель КТ — Реле времени KV — Реле напряжения KL — Реле промежуточное
L — Катушки индуктивности, дроссели, реакторы	LL — Дроссель люминесцентной лампы
М — Двигатели электрические	
Р — Приборы и устройства измерительные	РА — Амперметр PV — Вольтметр PW — Ваттметр PF — Частотомер PR — Омметр
Q — Выключатели и разъединители в силовых цепях	QF — Выключатель автоматический QS — Разъединитель
R — Резисторы	RK — Терморезистор RP — Потенциометр RS — Шунт измерительный

Код группы элементов	Примеры кодов устройств и элементов
S — Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	SA — Выключатели и переключатели SF — Выключатели автоматические SB — Выключатели кнопочные SL — Выключатели, срабатывающие от уровня SP — Выключатели, срабатывающие от давления SQ — Выключатели, срабатывающие от положения SR — Выключатели, срабатывающие от частоты вращения
	SK — Выключатель, срабатывающий от температуры
T — Трансформаторы, автотрансформаторы	TA — Трансформатор тока измерительный TV — Трансформатор напряжения измерительный
U — Преобразователи электрических величин в электрические	UZ — Выпрямитель, инвертор, преобразователь частоты
V — Приборы полупроводниковые и электровакуумные	VD — Диод VT — Транзистор VS — Тиристор VL — Прибор электровакуумный
X — Соединения контактные	XA — Токосъемник, контакты скользящие XP — Штырь XS — Гнездо XT — Соединение разборное XN — Соединение неразборное
Y — Устройства механические с электромагнитным приводом	YA — Электромагнит YC — Муфта электромагнитная YB — Тормоз электромагнитный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алиев И. И.* Электротехнический справочник. — М.: РадиоСофт, 2001.
2. *Аракелян А. К., Афанасьев А. А., Чиликин М. Г.* Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. — М.: Энергия, 1977.
3. *Баширин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г.* Управление электроприводами. — Л.: Энергоиздат, 1982.
4. *Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М.: Изд. центр «Академия», 2004.
5. *Бут Д. А.* Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1985.
6. *Васин В. М.* Электрический привод. — М.: Высшая школа, 1984.
7. *Вешневский С. Н.* Характеристики двигателей в электроприводе. — М.: Энергия, 1977.
8. *Иванов А. А.* Справочник по электротехнике. — Киев: Вища школа, 1984.
9. *Касаткин А. С., Немцов М. В.* Электротехника. — М.: Изд. центр «Академия», 2004.
10. *Кацман М. М.* Электрические машины. — М.: Изд. центр «Академия», 2003.
11. *Кацман М. М.* Электрические машины автоматических устройств. — М.: Форум-Инфра, 2002.
12. *Кацман М. М.* Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу. — М.: Изд. центр «Академия», 2003.
13. *Кацман М. М.* Справочник по электрическим машинам. — М.: Изд. центр «Академия», 2005.
14. *Келим Ю. М.* Типовые элементы систем автоматического управления. — М.: Форум, 2002.
15. *Кисаримов Р. А.* Справочник электрика. — М.: РадиоСофт, 2002.
16. *Клюев В. И.* Теория электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 2001.
17. *Лихачев В. Л.* Электротехника. Справочник. Т. 2. — М.: Солон-Пресс, 2003.
18. *Миллер Е. В.* Основы теории электропривода. — М.: Высшая школа, 1968.
19. *Москаленко В. В.* Электрический привод. — М.: Мастерство, 2000.
20. *Москаленко В. В.* Системы автоматизированного управления электропривода. — М.: ИНФРА-М, 2004.
21. *Москаленко В. В.* Справочник электромонтера. — М.: ПрофОбрИздат, 2002.

22. Соколова Е. М. Электрическое и электромеханическое оборудование. — М.: Мастерство, 2001.

23. Справочник по электрическим машинам / Под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

24. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. — М.: Высшая школа, 1985.

25. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1981.

26. Шишмарев В. Ю. Типовые элементы систем автоматического управления. — М.: Изд. центр «Академия», 2004.

27. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. — М.: Высшая школа, 1988.

28. Элементы приборных устройств / Под ред. О. Ф. Тищенко. — М.: Высшая школа, 1968.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Время динамического торможения** 123
— отпускаания реле 183
— разгона двигателя 123
— самоторможения двигателя 123
— срабатывания реле 183
Выбор двигателей предварительный 149
Выключатель автоматический 203, 207
— пакетный 174
Выпрямители неуправляемые 269
- Датчик емкостной** 242
— индуктивный для контроля размеров 240
— трансформаторный 241
— давления манометрический 245
— — поршневой 246
— температуры 240, 246, 247
— уровня 249
— электромагнитный 239, 240, 241
- Двигатели исполнительные** 64, 114
— — шаговые 116
Двигатель вентильный 301
Диаграмма пусковая 52
Диаграммы нагрузочные 147
- Жесткость характеристики** 22
- Каскад асинхронный вентильный** 311
Клапан электромагнитный 248
Классы нагревостойкости изоляции 139
- Кнопка управления** 178
Компенсаторы синхронные 113
Контактор тока переменного 195
— — постоянного 194
— — тиристорный 200
Контакты реле 184, 185
Контроллер 175
Коэффициент нагрева 30
- Место размещения при эксплуатации** 145
Метод конечных приращений 124
Механизм свободного расцепления 203, 204
— электрический исполнительный 356
— Момент динамический 12
— инерции приведенный 15, 17
— маховый 15
— сопротивления статический 9
— — — активный 9
— — — приведенный 14
— — — реактивный 9
- Муфта гидродинамическая** 254
— электромагнитная асинхронная 261, 262
— — порошковая 260
— — фрикционная 256
— — — бесконтактная 259
- Муфты механические** 252
— самоуправляющиеся 255, 256, 257
- Нелинейность характеристики** 23
- Параметры сельсинов** 228
— схем выпрямления 271
Передача механическая 5

- Переключатель путевой 179
- Предохранители плавкие 208
- Преобразователь тиристорный 278, 280
 - частоты с автономным инвертором 285, 288
 - — с непосредственной связью 292
- Привод вентильно-индукторный 305, 307
- Проверка двигателя по нагреву 167
- Пускатель магнитный 197
- Процессы переходные 120, 126
- Постоянная времени нагревания 137
 - — охлаждения 138
 - — электромеханическая 122
- Потери энергии в переходных режимах 127
- Пуск двигателя асинхронного 86, 96
 - — нормальный 51, 54, 89
 - — постоянного тока 49
 - — синхронного 111
 - — форсированный 51, 54, 89
- Расцепитель комбинированный 204
- Расчет мощности двигателей 155, 157, 161, 163
 - пускового реостата 52, 55, 56, 90, 91
- Регулирование частоты вращения 57, 101, 104, 107
 - — — импульсное 63, 109
- Регулятор напряжения тиристорный 293, 294
- Режим постоянного момента 103
 - постоянной мощности 104
- Режимы работы асинхронного двигателя 72
 - — электроприводов 148
- Резисторы силовые 211
- Реле времени 190, 191, 192
 - герконовое 187
 - максимального тока 201
 - напряжения 202
- скорости механическое 180
- тепловое 181
- электромагнитное 182
- Реостаты пусковые 217, 219
- Рубильники 173
- Сельсины 227
- Серводвигатели 353
- Система «генератор—двигатель» 265
 - индикаторной синхронной связи 227
 - электропривода автоматизированная 310, 315, 335
 - — с обратной связью по скорости 334, 345
 - — — и току 339
 - — — с частотным управлением 344
- Системы регулирования адаптивные 362
- Сопротивление двигателя номинальное 29
- Способность перегрузочная 74
- Способы монтажа 145
 - охлаждения 142
- Средства энергосбережения 367
- Степени защиты двигателей 141
- Схема «электрического вала» 333
- Схемы типовые электроприводов 312, 313, 315, 319, 323, 325, 327
- Таходвигатель асинхронный 221
 - постоянного тока 223
- Термистор 244
- Терморезистор 243
- Тормоз электромагнитный 250
- Торможение двигателя генераторное 33, 46, 79
 - — динамическое 35, 46, 80
- Торможение двигателя конденсаторное 82
 - — противовключением 37, 47, 83
- Трансформатор вращающийся 230
 - — режиме синусном 230
 - — — синусно-косинусном 232
 - — линейный 235

- Условие вентиляторной нагрузки 106
- — постоянства момента 105
- — мощности 106
- Уравнение теплового баланса электродвигателя 136
- Условия климатические 145
- Установки комплектные конденсаторные 371
- Устойчивость замкнутых систем 364
- Управление двигателем амплитудное 115
 - — амплитудно-фазовое 115
 - — полюсное 66
 - — якорное 65
- Уравнение движения электропривода 11
 - механической характеристики 25
- Устройство защитно-пусковое 101, 296, 298
- Форсировка возбуждения генератора 268**
- Характеристика механическая 8**
 - — двигателя постоянного тока 27, 43, 49
 - — асинхронного 73
 - — естественная 27, 42, 76
 - — искусственная 27, 44, 76
 - — электропривода совместная 11

Частота вращения пограничная 26, 29

- приемистости шагового двигателя 118

Электропривод 4

- автоматизированный 7, 311
- групповой 6
- индивидуальный 6
- комплектный 359
- многодвигательный 6
- ручной 7, 310
- с маховиком 168
- с программным управлением 347
- следящий 349, 351, 352
- Электромагнит длинноходовой 249
- Электромагниты исполнительные 247

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Глава 1. Механика электропривода	8
1.1. Основные понятия	8
1.2. Основное уравнение движения электропривода	11
1.3. Приведение статических моментов сопротивления и моментов инерции к частоте вращения вала двигателя	14
Глава 2. Характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока	21
2.1. Основные понятия	21
2.2. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения ...	24
2.3. Расчет механических характеристик электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в основном (двигательном) режиме	27
2.4. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения в тормозных режимах	33
2.5. Механические характеристики электроприводов с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения	39
2.6. Электроприводы с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения в тормозных режимах	46
2.7. Электропривод с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения	48
2.8. Пуск электроприводов с двигателями постоянного тока	49
2.9. Регулирование частоты вращения электроприводов с двигателями постоянного тока	57
2.10. Импульсное регулирование электропривода с двигателем постоянного тока	63
2.11. Исполнительные двигатели постоянного тока	64
Глава 3. Характеристики электроприводов с двигателями переменного тока	68

3.1.	Основные понятия и соотношения для трехфазных асинхронных двигателей	68
3.2.	Механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном режиме	73
3.3.	Электроприводы с асинхронными двигателями в тормозных режимах	79
3.4.	Пуск электроприводов с асинхронными двигателями с фазным ротором	86
3.5.	Пуск электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями	94
3.6.	Регулирование частоты вращения электроприводов с асинхронными двигателями	101
3.7.	Электропривод с синхронным двигателем	110
3.8.	Исполнительные асинхронные двигатели	114
3.9.	Исполнительные шаговые двигатели	116
Глава 4. Переходные режимы в электроприводах		120
4.1.	Основные понятия	120
4.2.	Переходные процессы в электроприводе при линейной совместной характеристике	121
4.3.	Переходные процессы в электроприводе при нелинейной совместной характеристике	124
4.4.	Потери энергии в электроприводе при переходных режимах	127
Глава 5. Выбор двигателей для электроприводов и расчет их требуемой мощности		134
5.1.	Двигатели общего и специального назначения	134
5.2.	Нагревание и охлаждение электродвигателей	136
5.3.	Конструктивные формы исполнения и способы охлаждения двигателей	140
5.4.	Режимы работы электроприводов	146
5.5.	Предварительный выбор двигателя	149
5.6.	Проверка двигателей на достаточность пускового момента и перегрузочную способность	153
5.7.	Расчет мощности двигателей для продолжительного режима работы	155
5.8.	Расчет мощности двигателей для кратковременного режима работы	161
5.9.	Расчет мощности двигателей для повторно-кратковременного режима работы	163
5.10.	Проверка выбранного двигателя по нагреву	167
5.11.	Электропривод с маховиком	168

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Глава 6. Устройства коммутации и защиты		172
6.1.	Контактные коммутирующие устройства	172

6.2.	Реле управления	179
6.3.	Реле времени	189
6.4.	Контакты и магнитные пускатели	193
6.5.	Бесконтактные коммутирующие устройства	199
6.6.	Устройства защиты	200
6.7.	Силовые резисторы	209
6.8.	Реостаты	215
Глава 7. Информационные устройства		220
7.1.	Основные понятия	220
7.2.	Электромашины датчики	221
7.3.	Электромагнитные датчики	237
7.4.	Емкостные датчики	241
7.5.	Датчики температуры	243
7.6.	Контактные датчики давления и уровня дискретного действия	245
7.7.	Исполнительные электромагнитные устройства	247
7.8.	Муфты электроприводов	251
Глава 8. Преобразовательные устройства электроприводов		264
8.1.	Основные понятия	264
8.2.	Электромашиный преобразователь и система «генератор— двигатель»	264
8.3.	Неуправляемые полупроводниковые выпрямители	269
8.4.	Управляемые полупроводниковые выпрямители для электроприводов постоянного тока	271
8.5.	Полупроводниковые преобразователи частоты переменного тока	284
8.6.	Тиристорный регулятор напряжения переменного тока	293
8.7.	Защитно-пусковые устройства для электроприводов переменного тока	295
8.8.	Устройства импульсного управления электроприводами	298
Глава 9. Электродвигатели, совмещенные с полупроводниковым инвертором		301
9.1.	Вентильный двигатель постоянного тока	301
9.2.	Вентильно-индукторный привод	304
9.3.	Асинхронный вентильный каскад	307
Глава 10. Разомкнутые системы управления автоматизированными электроприводами		310
10.1.	Основные понятия	310
10.2.	Типовые схемы автоматизированного управления пуском, реверсом и торможением электроприводов переменного тока ...	311
10.3.	Типовые схемы автоматизированного управления пуском, реверсом и торможением электроприводов постоянного тока	323
10.4.	Электропривод с «электрическим валом»	329
Глава 11. Замкнутые системы управления автоматизированными электроприводами		331

11.1. Основные понятия	331
11.2. Замкнутые автоматизированные системы электропривода постоянного тока	333
11.3. Замкнутые автоматизированные системы электропривода переменного тока	341
11.4. Электропривод с программным управлением	346
11.5. Следящий электропривод с аналоговым управлением	348
11.6. Следящий электропривод с релейным управлением	351
11.7. Серводвигатели	353
11.8. Комплектные электроприводы	358
11.9. Понятие об устойчивости замкнутых систем автоматического регулирования	360
11.10. Адаптивные системы автоматического регулирования	362
11.11. Способы и средства энергосбережения в электроприводах	363
Приложения	369
Список литературы	376
Предметный указатель	378

**БИБЛИОТЕКА
ФГУ СПО
ПЕРЕВОЗСКИЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОЛЛЕДЖ**

ИНВ. № 108728

Учебное издание

Кацман Марк Михайлович

Электрический привод

Учебник

Редактор Т. Ф. Мельникова

Технический редактор О. С. Александрова

Компьютерная верстка: Г. А. Берковский

Корректоры Л. А. Богомолова, В. А. Жилкина

Изд. № 104106739. Подписано в печать 17.05.2011. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 24,0.
Тираж 1 000 экз. Заказ № 2106.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru

125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 266.

Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 14964 от 21.12.2010.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных
издательством материалов в ОАО «Тверской ордена Трудового Красного
Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР».
170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.