

В. М. ВАСИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

*для
техникумов*

*издательство
Высшая
Школа*

A decorative graphic of green grass blades, rendered in a soft, painterly style, located at the bottom center of the page. The blades are of varying lengths and are clustered together, creating a natural, textured appearance.

www.energobook.ru

МОРЕ КНИГ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКА

В. М. ВАСИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

**Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия для учащихся
электротехнических специальностей техникумов**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1984

ББК 31.291
В19
УДК 621.314

Рецензенты: ст. преп. В. И. Преображенский
(Московский энергетический институт);
преп. И. М. Соболевская
(Московский электромеханический техникум)

Васин В. М.

В19 Электрический привод: Учеб. пособие для техникумов. —
М.: Высш. шк. — 1984. — 231 с., ил.

В пер.: 80 к.

В учебном пособии приведены теория электропривода, характеристики двигателей, способы регулирования скорости электроприводов, расчет сопротивлений, выбор двигателей к производственным механизмам с различными нагрузочными диаграммами; рассмотрены вопросы управления электроприводами с помощью релейно-контактных и бесконтактных аппаратов, с использованием статических преобразователей напряжения и частоты. Книга иллюстрирована примерами расчетов характеристик, сопротивлений и выбора резисторов.

В 2302050000—226 121—84
001(01)—84

ББК 31.291
6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная автоматизация производства невозможна без использования электрических двигателей и средств управления ими или, точнее, без применения электрического привода. Использование автоматизированного и автоматического электропривода позволяет повышать производительность труда, культуру производства и быта человека.

Учебное пособие отвечает программе предмета «Электрический привод», утвержденной Учебно-методическим управлением по среднему специальному образованию Минвуза СССР. В нем изложены вопросы механики электропривода, электромеханических свойств двигателей, определения пусковых и тормозных сопротивлений, расчета мощности и выбора двигателей при различных режимах работы, технико-экономического обоснования выбора системы электропривода. Наименования, обозначения и размерности физических величин соответствуют ГОСТ 8.417—81 «Единицы физических величин» и ГОСТ 1494—77 «Электротехника». Буквенные обозначения основных величин. Значительное внимание уделено вопросам регулирования скорости электропривода с использованием реостатов, статистических (полупроводниковых) преобразователей напряжения и частоты тока, устройств импульсного регулирования, а также магнитных усилителей и муфт скольжения. Расчет и выбор устройств для пуска и торможения электроприводов, а также выбор двигателей по мощности иллюстрируются соответствующими примерами.

При рассмотрении вопросов управления электроприводами наряду с релейно-контакторными схемами большое внимание уделено бесконтактному управлению с использованием устройств полупроводниковой техники, а также замкнутым системам электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения, частоты тока и комплектным электроприводам. Все это отличает данную книгу от вышедших книг аналогичного названия.

Несмотря на небольшой объем книги и некоторую краткость в раскрытии отдельных тем, последовательное изучение материала обеспечит понимание учащимися существа вопросов и поможет в изучении дополнительной литературы.

Автор искренне благодарен рецензентам преп. И. М. Соболевской и особенно ст. преп. В. И. Преображенскому за ценные замечания и методические указания по размещению программного материала.

Все замечания и предложения по улучшению книги направляйте в издательство «Высшая школа» по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электрическим приводом (или просто электроприводом) * называется электромеханическое устройство, посредством которого осуществляется движение рабочих органов машины. Электрическая часть электропривода состоит из электродвигателя и аппаратуры для управления им. Кроме этого, во многих электроприводах электрическая часть содержит электропреобразователи и различные устройства автоматизации рабочего процесса. Механическая часть электропривода в зависимости от характера движения рабочих органов машины и ее конструкции может содержать ряд элементов, например редуктор, шатунно-кривошипный преобразователь движения, коробку скоростей и т. д. Из определения электропривода видно, что основным средством для приведения в движение рабочих машин является электродвигатель **. Механическая энергия двигателей широко используется во всех отраслях народного хозяйства: для привода металлорежущих и деревообрабатывающих станков, прокатных станов; при добыче полезных ископаемых, транспортировке грузов и пассажиров; в системах водо- и воздухоподачи; в сельском хозяйстве и т. д.

В настоящее время решение задач электрификации и автоматизации промышленности, транспорта, сельского хозяйства и быта немислимо без использования электрического привода. Исторически электропривод получил развитие с середины XIX в. Подлинное его развитие и внедрение в различные отрасли промышленности началось после Великой Октябрьской социалистической революции. Процесс развития характеризовался увеличением единичных мощностей, созданием малогабаритных и маломощных электрических машин, увеличением пределов регулирования угловой скорости двигателей, а также освоением комплексной автоматизации производственных процессов. В результате возникло три основных вида электроприводов: групповой, одиночный и многодвигательный.

Групповым называется электропривод, при котором двигатель приводит в движение группу рабочих машин. Это был первый тип электропривода, заменивший на промышленных предприятиях паровую машину. В настоящее время этот тип электропривода почти не используют.

Одиночным называется электропривод, в котором один двигатель приводит в движение все механизмы рабочей машины.

Многодвигательным называется электропривод, в котором каждый исполнительный механизм рабочей машины приводится в движение одним или несколькими двигателями.

* Термины и определения в данной книге соответствуют ГОСТ 16593—79 «Электропривод. Термины и определения».

** Для удобства и простоты выражений в дальнейшем наравне со словом «электродвигатель» будет применяться слово «двигатель».

Многодвигательный и одиночный электроприводы упрощают кинематику машин и отдельных механизмов. В ряде случаев двигатели конструктивно встраиваются в механизмы так, что образуют с рабочими или вспомогательными механизмами единое целое. Примерами одиночного электропривода могут служить электродвигатели-вентиляторы, насосы, простые металлорежущие станки и многие другие механизмы. Многодвигательный электропривод используют в современных универсальных и специальных станках по обработке металла или древесины, подъемно-транспортных устройствах (лифт, кран, конвейер и пр.).

В автоматизированном электроприводе широко используются достижения современной техники управления: новейшие электрические аппараты, различные полупроводниковые приборы, управляющие вычислительные машины.

В настоящее время развитие электропривода совершается в следующих направлениях: 1) расширения диапазона применяемых мощностей двигателей как посредством увеличения единичных мощностей до нескольких десятков тысяч киловатт, так и посредством использования микродвигателей мощностью до единиц и долей ватта; 2) дальнейшего объединения двигателя с исполнительным механизмом, уменьшения числа передаточных звеньев между ними; 3) расширения диапазона регулирования угловой скорости двигателей, что позволяет избежать громоздких передач; 4) максимального использования полупроводниковой техники в комплектных электроприводах и схемах управления; 5) автоматизации управления электроприводами и производственными процессами, широкого внедрения программного управления с использованием вычислительной техники.

Автоматизация управления электроприводом позволяет добиться максимальной производительности рабочих машин, повысить культуру производства, облегчить физическое и нервное напряжение работающих на машинах или обслуживающих их людей.

Намеченное XXVI съездом увеличение производительности труда в промышленности на 23—25% возможно только при автоматизации производства. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года предусматривают значительное увеличение производства комплектных электроприводов к прокатным станам, нефтеперерабатывающим станциям, металлорежущим станкам, высокомоментных двигателей, силовой полупроводниковой техники, средств автоматизации управления рабочими машинами, комплектных электроприводов с тиристорными преобразователями и микропроцессорами.

Комплексная автоматизация электроприводов рабочих машин и технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве позволит значительно ускорить выполнение намеченных партий планов одиннадцатой пятилетки и Продовольственной программы СССР на период до 1990 г.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ГЛАВА 1

МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

§ 1-1. Статические и динамические моменты в электроприводе и приведение их к одной оси вращения

Для совершения полезной работы исполнительный орган производственной машины или ее механизм получает механическую энергию от двигателя через различные системы механических звеньев. Эти системы составляют механическую часть электропривода, конструктивные исполнения которых могут быть различными. В общем случае механическая часть электропривода состоит из вращающегося ротора (или якоря) электродвигателя M , передаточного устройства $ПУ$ и рабочего органа $РО$, как показано на рис. 1-1.



Рис. 1-1. Структурная схема механической части электропривода

Возможные направления механической мощности показаны стрелками

Ротор (или якорь) является источником или потребителем механической энергии. Он обладает определенным моментом инерции, может вращаться в требуемом направлении с некоторой скоростью и развращать движущий или тормозящий момент.

Передаточное устройство передает и преобразует движение в механической части электропривода. С помощью этого устройства может увеличиваться или уменьшаться скорость, изменяться вид движения, например с вращательного в поступательное, и т. п. Передаточными устройствами могут быть редукторы (рис. 1-2, а), зубчато-реечные (рис. 1-2, б) или ременные передачи, барабан с тросом (рис. 1-2, в), кривошипно-шатунный механизм (рис. 1-2, г) или более сложные механизмы, представляющие собой комбинации из нескольких простейших звеньев. Иногда в электроприводах передаточное устройство вообще отсутствует и движение от вала двигателя передается непосредственно рабочему органу (например, центробежному вентилятору и др.).

Рабочий орган производственной машины обычно потребляет механическую энергию. При этом механическая мощность направлена от двигателя к рабочему органу (см. рис. 1-1). Иногда рабочий орган является источником механической мощности, тогда передача мощности будет иметь противоположное направление.

Рабочий орган обладает определенной механической инерционностью и характеризуется рабочим моментом при вращательном движении или рабочим усилием при поступательном движении. Примерами рабочих органов или исполнительных устройств производственных машин могут служить: шпиндель токарного или сверлильного станка, валки прокатного стана, барабан грузоподъемной лебедки, тележка или мост механизмов передвижения крана, лента или цепь конвейера и т. п.

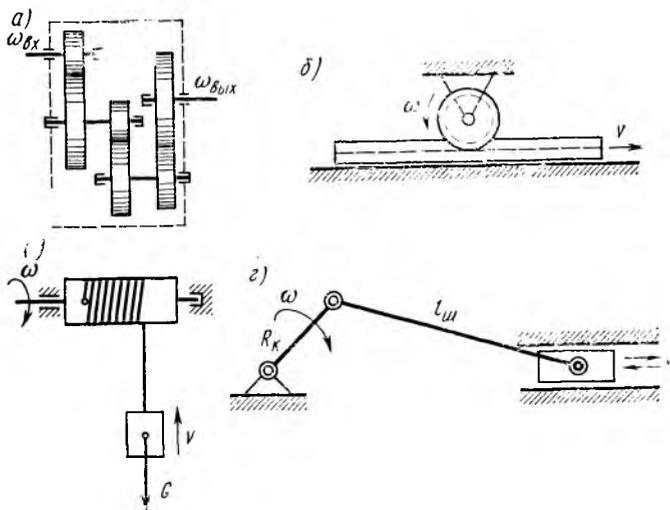


Рис. 1-2. Кинематические схемы передаточных устройств

Рабочие моменты и усилия совместно с силами трения в механической передаче создают *статическую нагрузку* (момент $M_{ст}$, силу $F_{ст}$). Статические моменты делятся на активные и реактивные.

Активный статический момент (или активная нагрузка) появляется независимо от движения и создается посторонними источниками механической энергии. Примерами его могут служить момент от груза, висящего на канате, навитом на барабан грузоподъемной лебедки; момент от пассажиров метро, спускающихся на эскалаторе; момент, создаваемый силой ветра, и т. п. Этот момент всегда направлен в одну сторону, поэтому при изменении направления вращения двигателя направление действия активного момента сохраняется. Так, если при подъеме груза на кране активный статический момент будет тормозящим, то при спуске этот же момент становится движущим.

Реактивный статический момент (или реактивная нагрузка) появляется только вследствие движения и направлен против него, т. е. этот момент всегда будет тормозящим. При изменении направления вращения двигателя изменяется на противоположное и направление действия реактивного момента. Реактив-

ные моменты возникают в механизмах трения (в подшипниках вращающихся валов, трущихся плоских поверхностях), на рабочих органах металлорежущих станков, крыльчатках центробежных насосов и вентиляторов и т. п.

Известно, что механические мощности двигателя или рабочего органа для вращательного и поступательного движений определяются соответственно выражениями

$$P_{\text{мх}} = M\omega \quad (1-1)$$

$$P_{\text{мх}} = Fv. \quad (1-2)$$

Здесь M — момент, Н·м; ω — угловая скорость, рад/с; F — сила, Н; v — линейная скорость, м/с.

Для получения угловой скорости ω , рад/с, по известной частоте вращения n , об/мин, используется соотношение

$$\omega = 2\pi n/60,$$

а для определения n по известной ω — соотношение

$$n = 60\omega/(2\pi) = 9,55\omega.$$

При передаче механической мощности возникают потери ее на трение $P_{\text{п.тр}}$ в механических звеньях. На компенсацию этих потерь расходуется часть мощности источника движения. Если мощность передается от двигателя к рабочему органу и наоборот, то полная статическая мощность соответственно

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ро}} + P_{\text{п.тр}}; \quad (1-3)$$

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ро}} - P_{\text{п.тр}}, \quad (1-4)$$

где $P_{\text{ро}}$ — мощность рабочего органа.

Потери мощности в механических звеньях определяются с помощью полного к.п.д. механической передачи $\eta_{\text{мх}}$ от вала рабочего органа до вала двигателя.

Таким образом, если известен к.п.д., то статическая мощность при реактивной и активной нагрузках находится по формулам соответственно

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ро}}/\eta_{\text{мх}}; \quad (1-5)$$

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ро}}\eta_{\text{мх}}. \quad (1-6)$$

Передающее устройство механической мощности (рис. 1-2) передает и преобразует не только скорость и вид движения, но и момент. Момент на входе передаточного устройства (например, редуктора) отличается от момента на его выходе на передаточное число i (или на передаточный коэффициент).

На входе передаточного устройства устанавливается двигатель, приводящий механизм в движение. Для правильного выбора двигателя на входной оси вращения ПУ определяются статические и динамические нагрузки как сумма внешних моментов или сил и инерционных масс механических звеньев. Используя выражения

(1-5) и (1-6) и учитывая (1-1) и (1-2), получим формулы приведенных к валу двигателя или входной оси вращения $ПУ$ статических моментов.

При реактивной нагрузке для вращательного и поступательно-го движения PO статический момент

$$M_{ст} = M_{i_0} i_{пу} \eta_{ix}; \quad (1-7)$$

$$M_{ст} = F_{po} \rho_{пу} \eta_{ix}. \quad (1-8)$$

Здесь M_{po} и F_{po} — соответственно момент и усилие на рабочих органах производственного механизма; $i_{пу}$ и $\rho_{пу}$ — соответствующие коэффициенты передачи преобразовательного устройства:

$$i_{пу} = \omega_{i_0} / \omega_{пу}; \quad \rho_{пу} = v_{i_0} / v_{пу}$$

где ω_{po} и v_{po} — угловая и линейная скорости рабочих органов механизма соответственно; $\omega_{дв}$ — угловая скорость двигателя, т. е. скорость на входном валу преобразовательного устройства.

При активной нагрузке для вращательного и поступательного движений

$$M_{ст} = M_{po} i_{пу} \eta_{мх}; \quad (1-9)$$

$$M_{ст} = F_{po} \rho_{пу} \eta_{мх}. \quad (1-10)$$

Значения $i_{пу}$ и $\rho_{пу}$ определяются по известным конструктивным параметрам преобразовательных устройств.

Количественный учет энергетических процессов, обусловленных действием движущихся масс, производится с помощью момента инерции. Если тело массы m находится в прямолинейном поступательном движении со скоростью v , то запас кинетической энергии тела

$$A = mv^2/2.$$

Для тела, обладающего моментом инерции J и вращающегося с угловой скоростью ω , запас кинетической энергии

$$A = J\omega^2/2.$$

Здесь J — момент инерции тела относительно оси вращения, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

* Переход от махового момента GD^2 к моменту инерции осуществляется по формуле

$$J = GD^2/4.$$

Динамический момент определяется запасенной кинетической энергией движущихся масс механизма. Мощность, которую вращающиеся массы получают при ускорении электропривода или отдают при торможении,

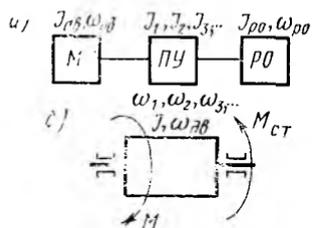
$$P_{дин} = dA/dt = J\omega d\omega/dt.$$

После деления на ω получим выражение для динамического момента

$$M_{\text{дин}} = P_{\text{дин}}/\omega = J d\omega/dt. \quad (1-11)$$

Динамический момент возникает и действует только при ускорении или замедлении движения электропривода. За счет этого момента происходят изменения угловой скорости.

Из рис. 1-1 видно, что между двигателем и рабочим органом производственного механизма находится передаточное устройство, отдельные звенья которого движутся с различными скоростями (рис. 1-2).



Чтобы упростить рассмотрение процессов изменения скорости и моментов на входном валу, необходимо динамический момент (или момент инерции) привести к той же оси вращения, что и статический момент. При этом следует исходить из равенства запасов кинетической энергии в действительной и эквивалентной системах (рис. 1-3).

Рис. 1-3. Схемы реальной и приведенной механической системы электропривода

Приведение моментов инерции механических звеньев к валу двигателя заключается в том, что моменты инерции $J_1, J_2, J_3, \dots, J_{ро}$ реальной системы (рис. 1-3, а) заменяются одним эквивалентным моментом инерции J на валу двигателя

(рис. 1-3, б):

$$J \frac{\omega_{\text{дв}}^2}{2} = J_{\text{дв}} \frac{\omega_{\text{дв}}^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{2} + \dots + J_{ро} \frac{\omega_{ро}^2}{2}, \quad (1-12)$$

где J — приведенный (эквивалентный) момент инерции; $J_{\text{дв}}$ — момент инерции якоря или ротора двигателя вместе с муфтой и тормозным шкивом, находящимися на его валу; $J_1, J_2, J_3, J_{ро}$ — моменты инерции первого, второго и т. д. звеньев реальной механической системы; $\omega_{\text{дв}}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_{ро}$ — угловая скорость ротора (или якоря) двигателя, первого, второго и т. д. звеньев реальной механической системы.

Так как моменты инерции приводятся к валу двигателя, то угловые скорости звеньев необходимо привести к угловой скорости двигателя. Разделив все члены равенства (1-12) на член $\omega_{\text{дв}}^2/2$, получим

$$J = J_{\text{дв}} + J_1 i_1^2 + J_2 i_2^2 + J_3 i_3^2 + \dots + J_{ро} i_{пу}^2, \quad (1-13)$$

где

$$i_1 = \omega_1/\omega_{\text{дв}}; \quad i_2 = \omega_2/\omega_{\text{дв}}; \quad i_3 = \omega_3/\omega_{\text{дв}}; \quad i_{пу} = \omega_{ро}/\omega_{\text{дв}}$$

— передаточные коэффициенты соответствующих звеньев механической системы электропривода.

Из (1-13) видно, что момент инерции отдельного звена механической системы электропривода влияет на значение приведенного момента инерции тем больше, чем меньше его угловая скорость.

Если в системе электропривода имеется поступательно движущийся элемент (например, подвешенный груз на кране, стол продольно-строгального станка и т. п.) массы m , то его следует заменить эквивалентным по запасу кинетической энергии звеном, находящимся во вращательном движении со скоростью вала, к которому приводят момент инерции.

В случае приведения к валу двигателя момент инерции эквивалентной вращающейся массы определяется из соотношения

$$J' = \frac{mv_{дв}^2}{\omega_{дв}^2} = mv^2, \quad (1-13)$$

откуда

$$J' = m(v_{дв}/\omega_{дв})^2. \quad (1-14)$$

Полученный момент инерции J' суммируется с моментами инерции вращающихся масс и получается приведенный момент инерции производственного механизма:

$$J_{мех} = J_1 i_1^2 + J_2 i_2^2 + J_3 i_3^2 + \dots + J'. \quad (1-15)$$

В результате приведения моментов инерции сложная действительная система заменяется более простой, где в движении участвуют ротор (или якорь) двигателя и приведенное механическое звено производственного механизма с одинаковой угловой скоростью $\omega_{дв}$:

$$J = J_{дв} + J_{мех}. \quad (1-16)$$

Во многих практических расчетах $J_{мех} = (0,2 \div 0,3) J_{дв}$.

§ 1-2. Уравнение движения электропривода

Электропривод может работать в разных режимах. Он ускоряется при пуске двигателя или уменьшении (сбросе) нагрузки; замедляется при отключении двигателя или его реверсе. Поведение электропривода в таких режимах зависит от сил и моментов, действующих в его механической части. Для удобства рассмотрения процессов, происходящих в электроприводе, считают одно из двух возможных направлений вращения двигателя за положительное, т. е. направление, при котором вращающий момент, развиваемый двигателем, совпадает с направлением скорости, а другое — за отрицательное. В соответствии с этим и момент статического сопротивления также может быть как положительным, так и отрицательным.

В системах электропривода основным режимом работы электрической машины является двигательный. При этом момент сопротивления имеет тормозящий характер по отношению к движению ротора (или якоря) и действует навстречу моменту двигате-

ля. Поэтому положительное направление момента сопротивления $M_{ст}$ принимают противоположным положительному направлению момента двигателя.

Если в процессе работы электропривода угловая скорость постоянна, то момент M , развиваемый двигателем, равен моменту нагрузки $M_{ст}$:

$$M = M_{ст}$$

или

$$M - M_{ст} = 0. \quad (1-17)$$

При переменной угловой скорости электропривода — увеличении или уменьшении — возникает динамический момент $M_{дин}$ и уравнение дополняется третьим членом:

$$M - M_{ст} = M_{дин}. \quad (1-18)$$

Это уравнение называется *основным уравнением движения электропривода*.

При замене в (1-18) $M_{дин}$ его выражением (1-11) уравнение движения электропривода принимает вид

$$M - M_{ст} = Jd\omega/dt. \quad (1-19)$$

В общем случае уравнение движения электропривода представляется как

$$\pm M \pm M_{ст} = Jd\omega/dt.$$

При анализе выражения (1-18) получаем три возможных состояния электропривода:

- 1) $M > M_{ст}$ — состояние ускорения;
- 2) $M = M_{ст}$ — состояние покоя или установившегося движения;
- 3) $M < M_{ст}$ — состояние замедления.

Знак динамического момента определяется алгебраической разностью вращающего момента двигателя и момента статического сопротивления.

§ 1-3. Понятие о механических характеристиках

Основное назначение электродвигателя — преобразование электрической энергии в механическую. Эта энергия передается через вал двигателя производственной машине или механизму. При установившейся скорости движения моменты двигателя и статического нагрузки равны [см. (1-17)]. Момент $M_{ст}$, создаваемый производственным механизмом, зависит от его механических свойств и может быть как постоянным, не зависящим от угловой скорости, так и переменным, в той или иной степени определяемым ею. Такая зависимость, изображаемая прямой или кривой линией в прямоугольной системе координат ω, M , называется *механической характеристикой производственного механизма* и представляется функцией $\omega = f(M_{ст})$.

Примеры статических механических характеристик $\omega = f(M_{ст})$ для некоторых механизмов приведены на рис. 1-4. Характеристики представлены для прямого (положительного) и обратного (отрицательного) направлений угловой скорости. Характеристику, изображенную на рис. 1-4, а, имеют механизмы с активным статическим

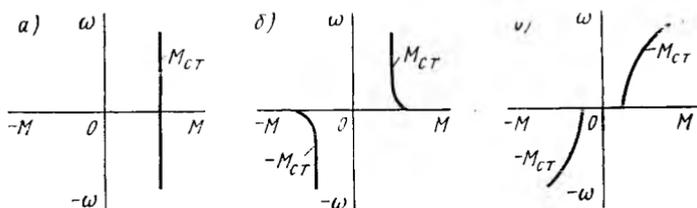


Рис. 1-4. Механические характеристики производственных механизмов

моментом. При изменении направления скорости момент $M_{ст}$ не изменяет направления действия, а следовательно, он не зависит от скорости. Характеристики, представленные на рис. 1-4, б, в, имеют механизмы с реактивным статическим моментом, так как с изменением направления скорости изменяется и направление момента. Примерами механизмов с реактивным статическим моментом мо-

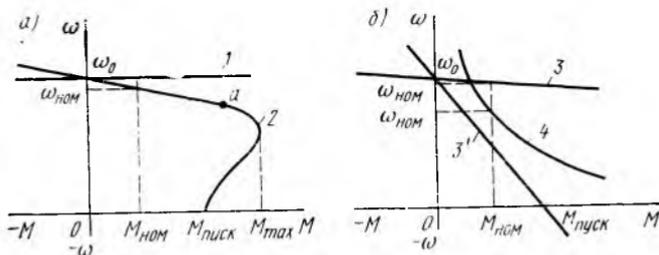


Рис. 1-5. Механические характеристики двигателей:

1 — синхронного; 2 — асинхронного; 3 — естественная и 3' — искусственная (реостатная) характеристики двигателя постоянного тока независимого (или параллельного) возбуждения; 4 — постоянного тока последовательного возбуждения

гут быть механизмы, у которых статический момент обусловлен силами трения или пластической деформации металлов (прокат, штамповка и т. п.) (рис. 1-4, б), и механизмы типа вентиляторов и центробежных насосов (рис. 1-4, в).

В свою очередь, момент двигателя, создаваемый взаимодействием магнитного потока и тока в его обмотках, как правило, с изменением значения скорости ротора или якоря изменяется. Это изменение отображается *механической характеристикой двигателя* $\omega = f(M)$ в той же системе координат ω, M . На рис. 1-5 показаны типичные механические характеристики двигателей переменного (рис. 1-5, а) и постоянного (рис. 1-5, б) тока.

Механические характеристики двигателей подразделяются на естественные (1, 2, 3, 4), изображаемые на рисунках жирной линией, и искусственные (3'). Под *естественной* понимается характеристика, получаемая при подключении двигателя к электрической сети, соответствующей номинальному значению напряжения его, без дополнительных сопротивлений в цепях статора, ротора или якоря. При этом частота питающей сети для двигателей переменного тока должна быть равна номинальной частоте двигателя. На естественной характеристике располагаются точка с номинальными (паспортными) данными двигателя $M_{ном}$ и $\omega_{ном}$.

Характеристики, получающиеся при изменении какого-либо параметра двигателя (напряжения питания, частоты, магнитного потока возбуждения, сопротивления силовой цепи), называются *искусственными*. Искусственные механические характеристики создаются для плавного пуска и торможения двигателей, для получения различных скоростей в установившихся режимах.

Основными величинами, определяющими механическую характеристику двигателя, являются:

1) начальный пусковой момент $M_{пуск}$ (или момент короткого замыкания M_K), развиваемый двигателем при скорости, равной нулю;

2) наибольший момент M_{max} , который способен развить двигатель; у синхронного и асинхронного двигателей переменного тока он ограничен значениями 1,6—3,5 от номинального; у двигателей же постоянного тока он теоретически неограничен, хотя практически по условиям коммутации тока он ограничивается каталожными значениями, равными 2—8 от номинального. Момент M_{max} , развиваемый асинхронным двигателем при пуске, называется *опрокидывающим* (или критическим);

3) скорость идеального холостого хода ω_0 , которую двигатель способен развить в идеальном случае — при полном отсутствии статического момента на его валу и электромагнитном моменте, равном нулю.

В приведенных механических характеристиках рабочих механизмов (см. рис. 1-4) и различных двигателей (рис. 1-5) степень изменения момента с изменением скорости различна. Величина, характеризующая это изменение, называется *жесткостью механической характеристики*:

$$\beta = dM/d\omega. \quad (1-20)$$

В зависимости от степени жесткости механические характеристики разделяются на три вида:

1) абсолютно жесткая механическая характеристика, при которой угловая скорость двигателя остается неизменной при изменении вращающего момента. Такую характеристику имеют синхронные двигатели (рис. 1-5, а, характеристика 1). Жесткость этой характеристики $\beta = \infty$;

2) жесткая механическая характеристика, при которой угловая скорость изменяется незначительно при изменении вращающего

момента [характеристика 2 в пределах $\omega_0 - a$ (рис. 1-5, а) и характеристика 3 (рис. 1-5, б)]. Жесткость этих характеристик отрицательна, т. е. $\beta < 0$;

3) мягкая механическая характеристика, при которой угловая скорость двигателя изменяется значительно при изменении вращающего момента [характеристика 4 (рис. 1-5, б), $\beta = \text{var} < 0$].

Так как установившийся режим работы электропривода характеризуется равенством моментов и угловых скоростей двигателя и производственного механизма, то для нахождения этого режима механические характеристики производственного механизма и двигателя изображают в одном квадранте плоскости ω, M (рис. 1-6). Точки пересечения характеристик будут определять установившийся режим M_y, ω_y . Так, например, устойчивая работа вентилятора (характеристика 2) с приводным асинхронным двигателем (характеристика 1) будет в точке a . Из рисунка видно, что для пуска в ход и разгона электропривода начальный пусковой момент двигателя $M_{\text{пуск}}$ должен быть всегда больше начального момента нагрузки $M_{\text{ст.н}}$. Устойчивая работа (или равновесие) электропривода будет при выполнении условий

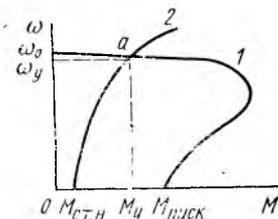


Рис. 1-6. Механические характеристики двигателя и производственного механизма в одной плоскости ω, M

$$\beta - \beta_{\text{ст}} < 0 \text{ или } \beta < \beta_{\text{ст}},$$

где β и $\beta_{\text{ст}}$ — жесткости характеристик двигателя и производственного механизма.

Для исследования движения электропривода иногда используют результирующую механическую характеристику, представляющую собой сумму механических характеристик двигателя и механизма. Жесткость такой характеристики при различных угловых скоростях различна.

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 2-1. Основные режимы работы двигателей в системе электропривода

Электрическая машина как электромеханический преобразователь энергии может работать только в одном из двух режимов: *двигательном*, когда электрическая энергия преобразуется в механическую, или *генераторном* — при обратном преобразовании энергии. В двигательном режиме электрическая машина развивает движущий момент, а в генераторном — тормозной момент.

При различных направлениях скорости и режимах работы двигателя его механические характеристики изображаются соответственно в различных квадрантах прямоугольной системы координат ω, M (рис. 2-1).

В I и III квадрантах, где знаки скорости и момента одинаковы, изображаются *характеристики двигательного режима*: в I квадранте — при вращении в условном положительном направлении; в III квадранте — при вращении в противоположном направлении (рис. 2-1, характеристики I и I').

Двигатель при работе в двигательном режиме потребляет электрическую мощность $P_{\text{э}}$ из сети и преобразует ее в механическую мощность $P_{\text{мх}}$. При этом неизбежны потери и баланс мощностей определяется выражением

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{э}} - (P_{\text{п.э}} + P_{\text{п.х}}),$$

где $P_{\text{п.э}}$ — потери электрической мощности в силовых цепях двигателя (переменные потери); $P_{\text{п.х}}$ — потери холостого хода, т. е. механические потери на трение, вентиляцию и перематгничивание стали (постоянные потери).

Во II и IV квадрантах, где знаки скорости и момента противоположны, изображаются соответствующие *характеристики тормозных режимов*. В отличие от двигательного различают несколько тормозных режимов в зависимости от того, как используется преобразованная электрическая энергия:

1) режим рекуперативного торможения, или генераторный режим с отдачей энергии в сеть. При этом ранее запасенная или активная механическая мощность с вала двигателя отдается в виде электрической мощности в сеть: $P_{\text{э}} < 0$. Переход из двигательного режима в режим рекуперативного торможения осуществляется при угловой скорости двигателя выше угловой скорости идеального холостого хода ω_0 (рис. 2-1, характеристики 2 и 2'). Примеры режима рекуперативного торможения:

а) спуск груза на кране или в лифте, когда двигатель, включенный в направлении спуска, под действием момента от груза увеличивает скорость;

б) перевод электропривода с большей скорости на меньшую, когда за счет запасенной энергии движущихся масс в первый момент переключения двигателя энергия торможения отдается в сеть;

2) режим торможения противовключением. Этот режим получают переключением обмоток двигателя на обратное направление

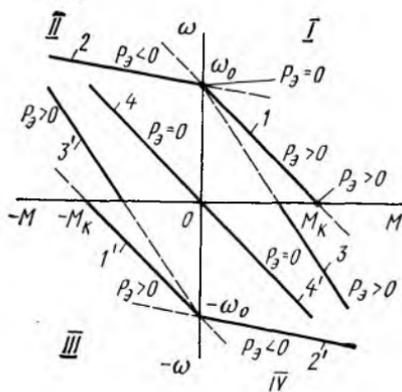


Рис. 2-1. Характеристики двигательного и тормозного режимов двигателя на плоскости ω, M

вращения или принудительным вращением якоря или ротора в обратном направлении. Примеры режима торможения противоключением:

а) спуск тяжелого груза на кране, когда двигатель, включенный на подъем, под действием момента груза, превышающего момент двигателя, вращает якорь (или ротор) двигателя в сторону спуска;

б) ускоренный останов вращающейся на металлорежущем станке детали, например для осуществления замеров, за счет переключения двигателя на противоположное направление вращения.

При этом двигатель потребляет механическую мощность с вала и электрическую мощность из сети: $P_{э} > 0$ (характеристики 3 и 3' на рис. 2-1);

3) режим динамического торможения. Получают его отключением от сети силовой цепи двигателя и замыканием (шунтированием) якоря (или ротора) сопротивлением. Двигатель обязательно должен быть возбужден. В этом случае механическая мощность на валу полностью расходуется на потери: $P_{э} = 0$. Двигатель работает как независимый генератор — только на сопротивление шунтирующей силовой цепи (характеристики 4 и 4' на рис. 2-1).

Кроме указанных двигательного и тормозных режимов двигатель имеет еще два граничных режима: *режим короткого замыкания* и *режим идеального холостого хода*.

Эти граничные режимы отделяют двигательный режим от тормозных и на рис. 2-1 отмечены точками M_k и ω_0 .

В режиме короткого замыкания подключенный к сети двигатель имеет скорость $\omega = 0$ и момент M_k . Чтобы получить режим короткого замыкания двигателя, необходимо якорь (или ротор) затормозить до $\omega = 0$ (не следует путать этот режим с замыканием сети на клеммах двигателя). В этом случае механическая мощность равна нулю, а потребляемая из сети электрическая энергия полностью расходуется на потери:

$$P_{э} = P_{н.э.}$$

В режиме идеального холостого хода, когда $\omega = \omega_0$, а $M = 0$, двигатель самостоятельно работать не может из-за наличия механических и электрических потерь. Чтобы двигатель мог находиться в данном режиме, к его валу следует подвести небольшую механическую мощность, компенсирующую эти потери.

Таким образом, двигатель в системе электропривода может работать в шести режимах, возникающих при различных моментах статической нагрузки.

§ 2-2. Основные понятия и соотношения для двигателей

Для создания в двигателях постоянного тока магнитного потока возбуждения имеются соответствующие обмотки. В зависимости от вида обмотки двигателя выполняются с независимой (или параллельной), последовательной и комбинированной (параллель-

ной и последовательной одновременно) обмотками. Кроме основных обмоток возбуждения в двигателях имеются вспомогательные обмотки: дополнительных полюсов (ДП) и компенсационная обмотка КО (рис. 2-2). Первая из них предназначена для улучшения условий коммутации на коллекторе якоря, вторая — для компенсации реакции якоря.

На рис. 2-2, а показана схема включения обмоток двигателя

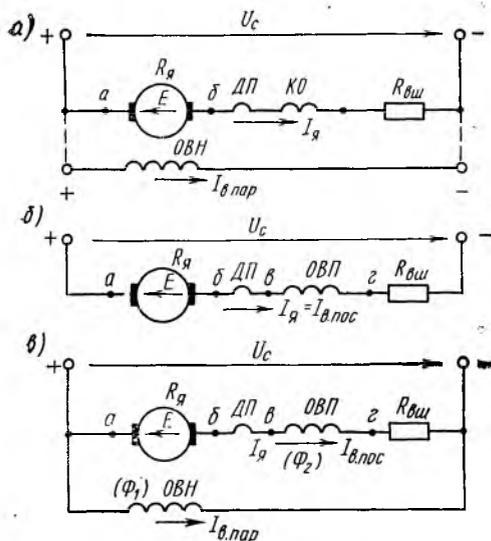


Рис. 2-2. Схемы включения двигателей постоянного тока

возбуждения *ОВН* подключается к независимому (отдельному) источнику питания (рис. 2-2, а).

Ток параллельной обмотки невелик и для двигателей мощностью от 5 до 100 кВт составляет $I_{в.пар} \approx (0,01 \div 0,05) I_{ном}$, где $I_{ном}$ — номинальный ток двигателя.

Схема включения обмоток двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 2-2, б. Обмотка возбуждения *ОВП* включена последовательно с якорем, в связи с чем $I_{в.пос} = I_{я}$. Следовательно, магнитный поток возбуждения двигателя Φ определяется нагрузкой на его валу. Если учесть, что характеристика намагничивания стали нелинейна, то и $\Phi = f(I_{я})$ будет изменяться нелинейно — при увеличении нагрузки магнитный поток будет возрастать, а при снижении — уменьшаться.

Для двигателя смешанного возбуждения схема включения обмоток приведена на рис. 2-2, в. Магнитный поток двигателя, а следовательно, и его характеристики будут определяться суммой магнитодвижущих сил (м.д.с.) как независимой, так последовательной обмоток возбуждения.

Установившийся режим работы двигателя постоянного тока характеризуется неизменным значением момента M и угловой скоростью ω [см. (1-17)]. При этом значения токов в цепях обмоток якоря и возбуждения также неизменны. Кроме того, при работе двигателя в двигательном режиме все токи считаются совпадающими с направлением напряжения сети U_c , а электродвижущая сила (э.д.с.) якоря E — противоположно направленной U_c и току якоря $I_{я}$.

С учетом сказанного для цепи якоря (рис. 2-2) можно записать уравнение электрического равновесия

$$U_c = E + I_{я}(R_{дв} + R_{вш}), \quad (2-1)$$

где E — э.д.с., наводимая в обмотке якоря; $I_{я}$ — ток якоря; $R_{дв}$ — сопротивление обмоток двигателя; $R_{вш}$ — внешнее сопротивление, включаемое последовательно в цепи якоря.

Сопротивление двигателя $R_{дв}$ — суммарное сопротивление обмоток силовой (якорной) цепи, находящихся внутри двигателя, и контакта коллектор-щетki:

$$R_{дв} = R_{я} + R_{д.п} + R_{п} + R_{щ}.$$

Здесь $R_{я}$ — сопротивление обмотки якоря; $R_{д.п}$ — сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $R_{п}$ — сопротивление последовательной обмотки возбуждения; $R_{щ}$ — сопротивление щеточно-го контакта.

Для крупных двигателей сопротивление $R_{дв}$ дополняют сопротивлением компенсационной обмотки $R_{к.о}$.

Сопротивления обмоток двигателя берут из каталожных данных и приводят их к нагретому состоянию, а сопротивление контакта коллектор-щетki определяют, исходя из падения напряжения на нем — 2 В при номинальном токе якоря.

При отсутствии каталожных данных сопротивление обмоток нагретого двигателя можно определить приблизительно по потерям в нем. Известно, что при номинальной нагрузке, соответствующей максимальному значению коэффициента полезного действия $\eta_{ном}$ двигателя, потери переменные равны постоянным. Исходя из этого равенства определяется сопротивление обмоток.

Для двигателя независимого возбуждения сопротивлением последовательной обмотки можно пренебречь, тогда

$$R_{дв} = 0,5(1 - \eta_{ном})U_{ном}/I_{ном}, \quad (2-2)$$

где 0,5 — коэффициент, учитывающий, что половина всех потерь в двигателе при номинальном токе в основном приходится на обмотку якоря; $\eta_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$ — номинальные (паспортные) к.п.д., напряжение и ток двигателя.

У двигателей последовательного возбуждения $R_{п} \approx 0,5R_{я}$, тогда

$$R_{дв} = 0,75(1 - \eta_{ном})U_{ном}/I_{ном}. \quad (2-3)$$

Для расчета сопротивлений в якорной цепи удобно пользоваться понятием «номинальное сопротивление двигателя». Для двига-

телей постоянного тока *номинальным сопротивлением* называется такое сопротивление силовой (якорной) цепи, состоящее из сопротивлений обмоток двигателя и внешнего сопротивления, которое при подведенном к двигателю номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ и неподвижном якоре ограничивает ток в нем номинальным значением $I_{\text{ном}}$:

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}. \quad (2-4)$$

Наведенная э.д.с. в обмотке якоря при угловой скорости ω и магнитном потоке Φ

$$E = k\Phi\omega, \quad (2-5)$$

где k — коэффициент, определяемый конструктивными данными двигателя: числом пар полюсов, числом активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря.

При неизменном магнитном потоке

$$E = c\omega, \quad (2-5a)$$

где $c = k\Phi$ — постоянный коэффициент при неизменном магнитном потоке.

Эту же э.д.с. можно выразить через известные параметры электрической цепи якоря:

$$E = U_c - IR_{\Sigma}. \quad (2-6)$$

Здесь $R_{\Sigma} = R_{\text{дв}} + R_{\text{вн}}$ — суммарное сопротивление цепи якоря.

Для нахождения номинальной э.д.с. $E_{\text{ном}}$ используются паспортные данные двигателя при номинальном токе возбуждения — $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $\omega_{\text{ном}}$ и $R_{\text{я}} \approx R_{\text{дв}}$:

$$E_{\text{ном}} = k\Phi_{\text{ном}}\omega_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_{\text{я}}. \quad (2-7)$$

Развиваемый двигателем электромагнитный момент связан с током якоря и магнитным потоком зависимостью

$$M_{\text{эм}} = k\Phi I_{\text{я}} \quad (2-8)$$

или

$$M_{\text{эм}} = cI_{\text{я}}. \quad (2-8a)$$

Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ отличается от момента на валу на значение потери момента $M_{\text{п}}$, который создается трением в подшипниках и вентиляцией двигателя. Момент потерь во много раз меньше электромагнитного момента, поэтому при практических расчетах величиной $M_{\text{п}}$ пренебрегают и считают $M_{\text{эм}} = M$.

Момент на валу двигателя по известной мощности $P_{\text{мх}}$ [см. (1-1)] определяется как

$$M = P_{\text{мх}} / \omega. \quad (2-9)$$

Если $P_{\text{мх}}$ задана в киловаттах, а частота вращения n — в оборотах в минуту, то момент

$$M = 9550 P_{\text{мх}} / n, \quad (2-10)$$

где $9550 = 60 \cdot 1000 / (2\pi)$ — коэффициент связи между системой МКГСС и СИ.

Пример 2.1. Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения заданы номинальные параметры: мощность 19 кВт; ток 102 А; к. п. д. 0,845; частота вращения 1500 об/мин; напряжение 220 В.

Определить общее сопротивление якоря и добавочных полюсов, номинальное сопротивление, номинальную э. д. с., номинальный вращающий момент и потери мощности при номинальной нагрузке.

Решение. Сопротивление якоря и добавочных полюсов нагретого двигателя $R_{\text{я}} = R_{\text{дв}} = 0,5 (1 - \eta_{\text{ном}}) U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} = 0,5(1 - 0,845) 220 / 102 = 0,167$ Ом.

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}} = 220 / 102 = 2,16 \text{ Ом.}$$

Номинальная э. д. с. якоря

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}} = 220 - 102 \cdot 0,167 = 203 \text{ В.}$$

Номинальная угловая скорость якоря

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}} / 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1500 / 60 = 157 \text{ рад/с.}$$

Номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot 10^3 / \omega_{\text{ном}} = 19 \cdot 10^3 / 157 = 121 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Мощность, забираемая двигателем из электрической сети при номинальной нагрузке,

$$P_{\text{э}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 19 / 0,845 = 22,5 \text{ кВт.}$$

Потери мощности

$$P_{\text{п}} = P_{\text{э}} - P_{\text{ном}} = 22,5 - 19 = 3,5 \text{ кВт.}$$

§ 2-3. Относительные величины в электроприводе

При расчетах электроприводов часто возникает необходимость в сравнении вариантов, выполненных с двигателями, отличающимися по номинальным данным. Непосредственное сравнение полученных результатов не может служить объективным критерием преимуществ сравниваемых вариантов. При рассмотрении, например, процесса пуска двух двигателей постоянного тока с различными номинальными напряжениями полученные значения пускового тока не позволяют судить об условиях пуска. Зачастую также нельзя сравнивать значения скорости двигателей по имеющимся значениям сопротивлений (в омах) на каждой ступени регулирования. Для устранения неопределенности в подобных случаях целесообразно расчеты проводить не в абсолютных (омах, амперах и т. д.), а в относительных единицах, называемых иногда базисными, долевыми, или в процентах. Использование относительных единиц избавляет от перехода к другим единицам и позволяет с помощью специально построенных универсальных зависимостей непосредственно определять параметры двигателя, необходимые для получения желаемых характеристик.

Для выражения какой-нибудь величины в относительных единицах необходимо ее абсолютное значение отнести к аналогичной величине, принятой условно за единицу (за базу). В качестве базисных величин (или принимаемых за единицу) обычно принимают номинальные величины двигателя: $U_{\text{ном}}$ — напряжение; $I_{\text{ном}}$ — ток якоря или ротора; $\Phi_{\text{ном}}$ — магнитный поток, отвечающий номинальному току возбуждения двигателя; $M_{\text{ном}}$ — момент (см. § 2-2); $R_{\text{ном}}$ — сопротивление двигателя (см. § 2-2 и 3-1). Для синхронных, асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока независимого возбуждения за базисную единицу угловой скорости принимают скорость ω_0 (см. § 2-4 и 3-1). Для двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения в качестве базисного значения скорости принимают $\omega_{\text{ном}}$ (или $n_{\text{ном}}$, об/мин).

В последующем изложении величины, выражаемые в относительных единицах, будут изображаться принятыми буквами со знаком «*», выражаемые в процентах — теми же буквами со знаком «%».

Таким образом, напряжение в относительных единицах или в процентах

$$U_* = U/U_{\text{ном}} \text{ или } U\% = (U/U_{\text{ном}}) 100.$$

Полное сопротивление силовой цепи двигателя

$$R_* = R/R_{\text{ном}} \text{ или } R\% = (R/R_{\text{ном}}) 100.$$

Сопротивления обмоток двигателя и внешнего сопротивления

$$R_{* \text{ лв}} = R_{\text{лв}}/R_{\text{ном}} \text{ или } R_{\text{лв}}\% = (R_{\text{лв}}/R_{\text{ном}}) 100;$$

$$R_{* \text{ вш}} = R_{\text{вш}}/R_{\text{ном}} \text{ или } R_{\text{вш}}\% = (R_{\text{вш}}/R_{\text{ном}}) 100.$$

Угловая скорость двигателя

$$\omega_* = \omega/\omega_0 \text{ или } \omega\% = (\omega/\omega_0) 100.$$

Ток двигателя и ток короткого замыкания

$$I_* = I/I_{\text{ном}} \text{ или } I\% = (I/I_{\text{ном}}) 100;$$

$$I_{* \text{ к}} = I_{\text{к}}/I_{\text{ном}} \text{ или } I_{\text{к}}\% = (I_{\text{к}}/I_{\text{ном}}) 100.$$

Момент двигателя

$$M_* = M/M_{\text{ном}} \text{ или } M\% = (M/M_{\text{ном}}) 100.$$

При номинальном магнитном потоке возбуждения двигателя постоянного тока относительные значения тока якоря и момента равны между собой:

$$M_* = k\Phi_{\text{ном}} I / (k\Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}}) = I_* \quad (2-11)$$

В этом случае характеристики изменения скорости двигателя в зависимости от тока и момента идентичны.

Дополнительные выражения величин в относительных единицах будут даны в дальнейшем при рассмотрении соответствующих понятий и характеристик двигателей.

§ 2-4. Механические и электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения в двигательном режиме

Двигательный режим получают при подключении двигателя к питающей сети (рис. 2-2, а) как по естественной, так и по искусственной схемам. При этом будут получены соответственно естественные или искусственные характеристики (см. § 1-4).

При питании двигателя от сети с напряжением U_c и неизменном магнитном потоке электрическое равновесие [см. (2-1) и (2-5)]

$$U_c = k\Phi\omega + I_{я}(R_{лв} + R_{вш}). \quad (2-12)$$

Решая уравнение относительно угловой скорости ω , получим

$$\omega = U_c / (k\Phi) - I_{я}(R_{лв} + R_{вш}) / (k\Phi). \quad (2-13)$$

Выражение (2-13) представляет собой уравнение *электромеханической характеристики* $\omega = f(I_{я})$.

Если к двигателю подведено номинальное напряжение $U_{ном}$, установлен номинальный ток возбуждения, т. е. $\Phi = \Phi_{ном}$, то при отсутствии дополнительного сопротивления $R_{вш}$ получается *естественная электромеханическая характеристика*

$$\omega_e = U_{ном} / (k\Phi_{ном}) - I_{я}R_{лв} / (k\Phi_{ном}), \quad (2-14)$$

где ω_e — скорость на естественной характеристике.

Исходя из выражения (2-8) ток якоря

$$I_{я} = M_{эм} / (k\Phi). \quad (2-15)$$

Подставляя в (2-13) и (2-14) выражение (2-15), получим *уравнение механической характеристики*

$$\omega = f(M_{эм})$$

или при равенстве $M_{эм} = M$

$$\omega = f(M).$$

В общем виде уравнение механической характеристики представится как

$$\omega = U_c / (k\Phi) - M(R_{лв} + R_{вш}) / (k\Phi)^2. \quad (2-16)$$

При $U_c = U_{ном}$ двигателя и $R_{вш} = 0$ получим *уравнение естественной механической характеристики*

$$\omega_e = U_{ном} / (k\Phi_{ном}) - MR_{лв} / (k\Phi)^2. \quad (2-17)$$

В режиме идеального холостого хода, когда $I_{я} = 0$ и $M = 0$, угловая скорость будет наибольшей. Эта скорость называется *скоростью идеального холостого хода* ω_0 . При этом э.д.с. якоря двигателя полностью уравновешивает напряжение сети, т. е. $U_c = E$, и скорость ω_0 определяется значениями напряжения и магнитного потока:

$$\omega_0 = U_c / (k\Phi). \quad (2-18)$$

Второй член в уравнениях (2-13) и (2-16) обусловлен нагрузкой (током) двигателя и сопротивлением цепи якоря и представляет собой статическое падение (снижение) угловой скорости $\Delta\omega$ относительно ω_0 .

С учетом (2-18)

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2-19)$$

где $\Delta\omega = -I_{я}(R_{дв} + R_{вщ}) / (k\Phi)$

или

$$\Delta\omega = -M(R_{дв} + R_{вщ}) / (k\Phi)^2. \quad (2-20)$$

При включении двигателя по естественной схеме статическое падение скорости $\Delta\omega_e$ будет наименьшим, так как в якорной цепи отсутствует внешнее сопротивление $R_{вщ}$.

Выражение (2-19) представляет собой уравнение прямой линии, пересекающейся с осью ординат (скоростей) в точке ω_0 (рис. 2-3). Вследствие пропорциональной зависимости между током и моментом механические и электромеханические характеристики представляются на рис. 2-3 одной и той же прямой линией и называются *статическими характеристиками*. Их название обусловлено тем, что они определяют зависимость скорости от момента или тока в установившемся режиме, когда

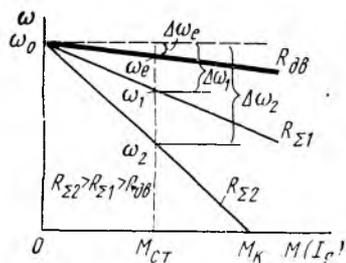


Рис. 2-3. Характеристики двигателя независимого возбуждения в двигательном режиме при различных сопротивлениях в цепи якоря

при моменте нагрузки $M_{ст}$ скорость $\omega = \text{const}$.

При увеличении $R_{вщ}$ в цепи якоря статическое падение скорости $\Delta\omega$ увеличивается. Следовательно, скорость двигателя при одной и той же нагрузке $M_{ст}$ становится меньше.

Изображенные на рис. 2-3 искусственные характеристики при сопротивлениях $R_{\Sigma 1} = R_{дв} + R_{вщ 1}$ и $R_{\Sigma 2} > R_{\Sigma 1}$ называются *реостатными*, так как введение этих сопротивлений в цепь якоря осуществляется с помощью устройств, называемых реостатами. Жесткость реостатных характеристик в сравнении с жесткостью естественной характеристики уменьшается (их наклон увеличивается), т. е. характеристики становятся более мягкими. При незначительном изменении значения $M_{ст}$ скорость изменяется тем больше, чем больше $R_{вщ}$.

Ток якоря в двигательном режиме определяется приложенным напряжением U_c , встречной э.д.с., зависящей от скорости ω , и сопротивлением цепи якоря R_{Σ} :

$$I_{я} = (U_c - E) / R_{\Sigma}, \quad (2-21)$$

где E — э.д.с. якоря при скорости ω .

Точки пересечения механической и электромеханической характеристик с осью абсцисс определяют момент и ток в режиме короткого замыкания.

Ток в этом режиме зависит только от сопротивлений $R_{дв} + R_{внш}$:

$$I_{к} = U_{с} / (R_{дв} + R_{внш}). \quad (2-22)$$

При пуске двигателя, когда $\omega = 0$ и $E = 0$, а сопротивление цепи якоря равно $R_{дв}$, ток короткого замыкания $I_{к}$ (или начальный пусковой ток) достигает недопустимо больших значений. Так, ток $I_{к}$ на естественной характеристике у двигателей средней и большой мощности превышает номинальный в 10—20 раз, а это недопустимо по условиям коммутации. Для ограничения $I_{к}$ в цепь якоря включают $R_{внш}$. Момент, развиваемый двигателем при коротком замыкании, зависит от тока $I_{к}$ и магнитного потока Φ :

$$M_{к} = k\Phi I_{к}. \quad (2-23)$$

Так как характеристики представляют собой прямые линии, то для построения естественной и реостатной характеристик достаточно найти по две их точки. Для естественной характеристики одна из них — точка номинального режима работы с координатами $\omega = \omega_{ном}$, $I_{я} = I_{ном}$ (или $M = M_{ном}$); другая — точка идеального холостого хода двигателя: $\omega = \omega_0$, $I_{я} = 0$ (или $M = 0$).

Для определения номинального момента можно использовать формулу (2-10), а для нахождения ω_0 — формулы (2-7) и (2-18):

$$\omega_0 = \omega_{ном} \frac{U_{ном}}{U_{ном} - I_{ном} R_{дв}} = \omega_{ном} \frac{U_{ном}}{E_{ном}}.$$

Величина $R_{дв}$ определяется по (2-2) или принимается из каталожных данных.

Для построения реостатной характеристики при введеном в цепь якоря сопротивлении $R_{внш}$ необходимо найти точки со значением скорости $\omega_{номR}$ при номинальной нагрузке двигателя, т. е. при $\omega = \omega_{номR}$ и $I_{я} = I_{ном}$ (или $M = M_{ном}$). Искомая скорость на реостатной характеристике находится из уравнения электромеханической характеристики (2-13):

$$\omega_{номR} = \omega_0 \left[1 - \frac{I_{ном} (R_{дв} + R_{внш})}{U_{ном}} \right] \quad (2-24)$$

или

$$\omega_{номR} = \omega_{ном} \frac{U_{ном} - I_{ном} (R_{дв} + R_{внш})}{U_{ном} - I_{ном} R_{дв}} = \omega_{ном} \frac{E_{и}}{E_{ном}}, \quad (2-24a)$$

где $E_{и}$ — э.д.с. якоря при работе двигателя на искусственной характеристике.

Анализируя уравнения (2-13) и (2-16), можно заключить, что на скорость двигателя, а следовательно, на его электромеханические и механические характеристики можно воздействовать не только введением реостата в цепь якоря, но и изменением подводимого напряжения $U_{с}$, и изменением магнитного потока Φ . При этом характеристики будут тоже искусственными.

При различных значениях напряжения $\alpha U_{\text{ном}}$ скорость двигателя на основании уравнения механической характеристики (2-16) будет изменяться в α раз:

$$\omega = \alpha U_{\text{ном}} / (k\Phi) - MR_{\Sigma} / (k\Phi)^2 \quad (2-25)$$

или при нагрузке $M_{\text{ст}}$

$$\omega_{\text{н}} = \alpha \omega_{\text{е}}, \quad (2-26)$$

где $\omega_{\text{н}}$ и $\omega_{\text{е}}$ — скорость на искусственной и естественной характеристиках; α — коэффициент изменения подводимого напряжения.

При этом на искусственной характеристике скорость идеального холостого хода

$$\omega_{0\text{н}} = \alpha U_{\text{ном}} / (k\Phi). \quad (2-27)$$

Наклон характеристик при изменении питающего напряжения не меняется, так как сопротивление цепи якоря неизменно:

$$\Delta\omega = -MR_{\Sigma} / (k\Phi)^2.$$

Таким образом, при изменении напряжения на якоре двигателя характеристики перемещаются параллельно самим себе (рис. 2-4).

При уменьшении в ν раз ($\nu < 1$) магнитного потока, а также неизменных напряжений на якоре и сопротивлении якорной цепи на основании уравнений (2-13) и (2-14) скорость двигателя будет увеличиваться. Скорость идеального холостого хода и статическое падение скорости представляется соответственно как

$$\omega_{0\text{н}} = U_{\text{е}} / (k\nu\Phi) = \omega_{0\text{е}} / \nu; \quad (2-28)$$

$$\Delta\omega_{\text{н}} = -I_{\text{к}} (R_{\text{я}} + R_{\text{вн}}) / (k\nu\Phi) = \Delta\omega_{\text{е}} / \nu. \quad (2-29)$$

Электромеханические характеристики при уменьшении магнитного потока (рис. 2-5, а) пересекаются в одной точке на оси абсцисс при токе короткого замыкания $I_{\text{к}} = U_{\text{е}} / R_{\Sigma}$. Жесткость характеристик по мере уменьшения Φ уменьшается.

Статическое падение скорости на искусственных механических характеристиках (рис. 2-5, б) при $\Phi < \Phi_{\text{ном}}$ по сравнению с падением скорости на естественной характеристике возрастает в $1/\Phi^2$ раз [см. (2-16)].

Поскольку момент короткого замыкания $M_{\text{к}} = k\Phi I_{\text{к}}$, с уменьшением Φ значение $M_{\text{к}}$ двигателя уменьшается.

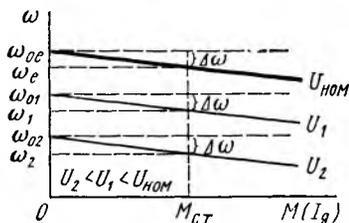


Рис. 2-4. Характеристики двигателя независимого возбуждения при питании цепи якоря пониженным напряжением:

$\omega_{0\text{е}}$ — скорость холостого хода на естественной характеристике; $\omega_{01,02}$ — скорость холостого хода на искусственных характеристиках; $\omega_{\text{е}}$, $\omega_{1,2}$ — установившаяся скорость при моменте $M_{\text{ст}}$

§ 2-5. Механические и электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения в тормозных режимах

В соответствии с приведенными определениями (см. § 2-1) электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения может работать в трех тормозных режимах: рекуперативного торможения, торможения противовключением и динамического торможения.

Рекуперативное торможение (или генераторный режим с отдачей энергии в сеть). Достоинство этого способа торможения состоит в том, что он позволяет полезно использовать большую часть энергии торможения, рекуперирова (отдавая) ее в сеть.

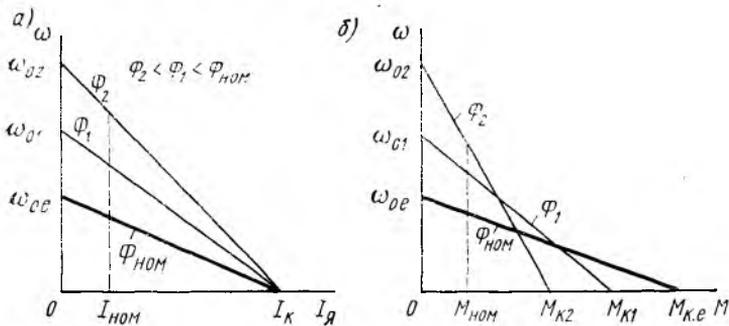


Рис. 2-5. Характеристики двигателя независимого возбуждения при уменьшении магнитного потока

Уравнение электрического равновесия (2-1) справедливо и для этого режима. Поскольку наведенная в якоре э.д.с. при $\omega > \omega_0$ станет больше напряжения сети U_c [см. (2-5)], ток в якорной цепи изменит свое направление и момент двигателя станет тормозящим:

$$-I_{я} = (U - E) / R_{я}. \quad (2-30)$$

При этом уравнение электромеханической характеристики представится как

$$\omega_{т} = U_c / (k\Phi) - (-I_{я}) R_{я} / (k\Phi)$$

или

$$\omega_{т} = U_c / (k\Phi) + I_{я} R_{я} / (k\Phi), \quad (2-31)$$

где $\omega_{т}$ — угловая скорость двигателя при торможении.

Механические и электромеханические характеристики рекуперативного торможения приведены в квадранте II (рис. 2-6). При сопротивлении якорной цепи, равных сопротивлениям двигательного режима, тормозные характеристики будут продолжать характеристики двигательного режима квадранта I. Рекуперативное торможение осуществляется только до скорости ω_0 .

Торможение противовключением (см. § 2-1). Для получения этого режима достаточно изменить полярность напряжения на обмотке якоря или обмотке возбуждения. Так как индуктивность обмотки якоря меньше индуктивности обмотки возбуждения, то по условиям коммутации переключения чаще делаются в цепи якоря. При включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 2-7, магнитный поток, скорость и э.д.с. якоря не меняют своего направления (см. рис. 2-2, а). При подаче на схему напряжения U_c противоположной полярности ток в цепи якоря изменяет направление и момент двигателя становится тормозящим. Таким образом, тор-

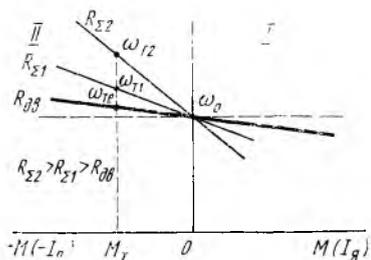


Рис. 2-6. Характеристики рекуперативного торможения

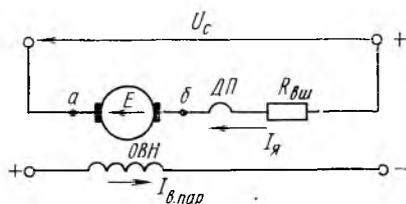


Рис. 2-7. Схема включения двигателя постоянного тока при торможении противовключением

можение противовключением возникает и действует до тех пор, пока направление электромагнитного момента противоположно направлению угловой скорости якоря. Приложенное напряжение U_c и э.д.с. E в этом режиме действуют в одном направлении, т. е. согласно (рис. 2-7).

Ток в якорной цепи

$$I_{я} = (U_c + E) / R_{\Sigma} \quad (2-32)$$

Из (2-32) видно, что для ограничения тока до допустимого значения в цепь якоря надо вводить сопротивление большее, чем при пуске. Механические характеристики при торможении противовключением и разных направлениях вращения приведены на рис. 2-8 в квадрантах II и IV и, по существу, являются продолжением реостатных характеристик двигательного режима. Для этого случая справедливы уравнения (2-13) и (2-16).

При торможении противовключением электропривода с реактивным моментом нагрузки — $M_{ст}$ (характеристика 1) и достигнутой скорости $\omega = 0$ цепь якоря двигателя должна быть отключена от источника напряжения, так как в противном случае двигатель реверсируется, т. е. разгоняется в обратном направлении до скорости $-\omega_1$. При активном моменте нагрузки, когда $M_{ст} > M_K$, двигатель достигает установившейся скорости $-\omega_2$ (характеристика 2). Увеличением или уменьшением сопротивления якорной цепи

начальный момент при торможении $M_{Т.н}$ можно изменить в широких пределах.

Динамическое торможение. Получают этот режим при отключении якоря от сети и последующем замыкании его на внешнее

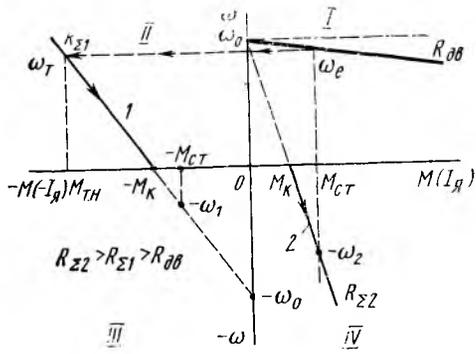


Рис. 2-8. Характеристики при торможении противотоком

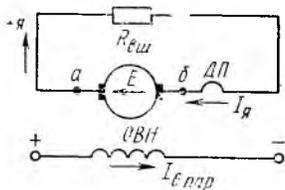


Рис. 2-9. Схема включения при динамическом торможении

сопротивление. Обмотка возбуждения при этом остается присоединенной к сети (рис. 2-9). Двигатель становится автономным генератором.

При динамическом торможении запасенная в электроприводе кинетическая энергия преобразуется в электрическую. Наведенная э. д. с. в обмотке якоря сохраняет то же направление, что и в двигательном режиме,— от щетки б к щетке а. Так как цепь якоря замкнута, то ток в ней изменит направление на противоположное (см. рис. 2-2, а) и двигатель будет создавать тормозящий момент. Так как внешнее напряжение к цепи якоря не подводится ($U_c=0$), то ток

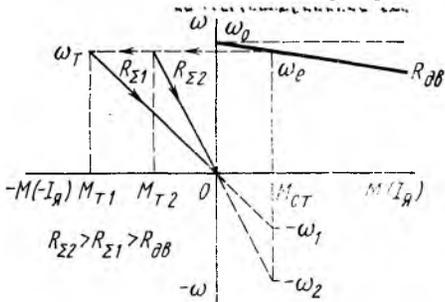


Рис. 2-10. Механические характеристики при динамическом торможении

$$I_{я} = -E/R_{я}. \quad (2-33)$$

Характеристики, соответствующие данному режиму, построены на рис. 2-10 в квадранте II. При возрастании сопротивления в цепи якоря наклон характеристики увеличивается. Это позволяет выбрать начальный тормозной момент M_T и по мере снижения скорости поддерживать его в определенных пределах. При реактивном статическом моменте нагрузки торможение электропривода осуществляется до скорости $\omega=0$, а при активном моменте $M_{СТ}$

в зависимости от R_{Σ} обеспечивается скорость торможения ω_1 или ω_2 .

Анализируя двигательный и тормозные режимы двигателя постоянного тока независимого возбуждения, можно сделать следующий вывод: так как возбуждение двигателя в пределах одной характеристики остается неизменным, то для получения э.д.с. якоря E или скорости ω при токе $I_{\text{я}}$ (или M) используется соотношение

$$\omega_1/\omega_2 = E_1/E_2. \quad (2-34)$$

Выражение (2-34) используется для построения электромеханических или механических характеристик по одному из известных режимов работы двигателя, чаще номинальному.

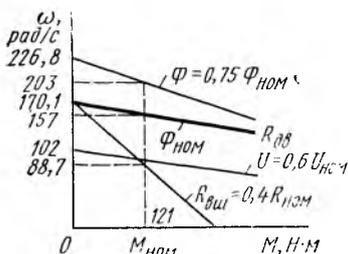


Рис. 2-11. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения (к примеру 2.2)

Пример 2-2. Для двигателя постоянного тока заданы следующие параметры: мощность 19 кВт; ток 102 А; к. п. д. 0,85; частота вращения 1500 об/мин (угловая скорость 157 рад/с); напряжение 220 В, для которого в примере 2.1 определены: $R_{\text{дв}}=0,167$ Ом; $R_{\text{ном}}=2,16$ Ом; $E_{\text{ном}}=203$ В; $M_{\text{ном}}=121$ Н·м.

Рассчитать и построить механические характеристики в двигательном режиме: естественную, реостатную при внешнем сопротивлении, равном $0,4 R_{\text{ном}}$, при напряжении на якоре, равном $0,6 U_{\text{ном}}$ и без внешнего добавоч-

ного сопротивления, при уменьшенном магнитном потоке возбуждения до значения $0,75 \Phi_{\text{ном}}$ и отсутствии внешнего сопротивления.

Решение. Угловая скорость идеального холостого хода при номинальном напряжении

$$\omega_{0e} = \omega_{\text{ном}} U_{\text{ном}} / E_{\text{ном}} = 157 \cdot 220 / 203 = 170,1 \text{ рад/с.}$$

Скорость на реостатной характеристике при $I_{\text{я}}=I_{\text{ном}}$ и $R_{\text{вщ}}=0,4 R_{\text{ном}}$

$$\omega_{\text{ном}R} = \omega_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}(R_{\text{дв}} + R_{\text{вщ}})}{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_{\text{дв}}} = 157 \frac{220 - 102(0,167 + 0,4 \cdot 2,16)}{220 - 102 \cdot 0,167} = 88,7 \text{ рад/с.}$$

Скорость идеального холостого хода на искусственной характеристике при напряжении на якоре $0,6 U_{\text{ном}}$ (коэффициент уменьшения напряжения $\alpha=0,6$)

$$\omega_{0и} = \alpha \omega_{0e} = 0,6 \cdot 170,1 = 102 \text{ рад/с.}$$

Скорость при номинальном моменте и $U=0,6 U_{\text{ном}}$

$$\omega_{и\text{-ном}} = \alpha \omega_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 157 = 94 \text{ рад/с.}$$

Статическое падение скорости на естественной характеристике при $M=M_{\text{ном}}$

$$\Delta \omega_e = \omega_{0e} - \omega_{\text{ном}} = 170,1 - 157 = 13,1 \text{ рад/с.}$$

Скорость идеального холостого хода при уменьшенном магнитном потоке до $0,75 \Phi_{\text{ном}}$ (коэффициент уменьшения магнитного потока $\nu=0,75$)

$$\omega_{0и} = \omega_{0e} / \nu = 170,1 / 0,75 = 226,8 \text{ рад/с.}$$

Скорость на механической характеристике при $M=M_{\text{ном}}$, $\Phi=0,75 \Phi_{\text{ном}}$

$$\omega_{и} = \omega_{0и} - \Delta \omega_e / \Phi_{*}^2 = 226,8 - 13,1 / 0,75^2 = 203 \text{ рад/с.}$$

Характеристики, соответствующие условиям задачи, построены на рис. 2-11.

§ 2-6. Механические и электромеханические характеристики двигателей последовательного и смешанного возбуждения

Схемы включения двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения приведены на рис. 2-2, б, в. В отличие от двигателя независимого возбуждения этот двигатель имеет свойство изменять в широких пределах угловую скорость и момент при увеличении и уменьшении нагрузки.

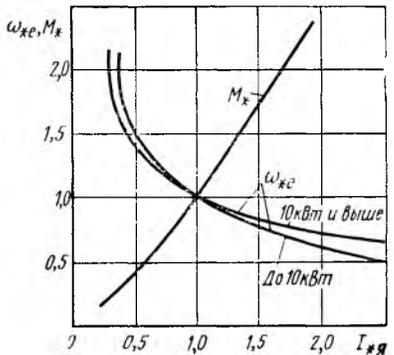


Рис. 2-12. Универсальные характеристики двигателей последовательного возбуждения серии ДП

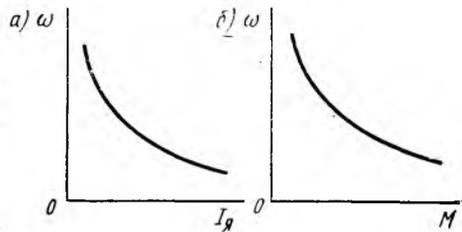


Рис. 2-13. Электромеханическая и механическая характеристики двигателя последовательного возбуждения

Характеристики в двигательном режиме. Уравнения электромеханических и механических характеристик этих двигателей такие же, как и двигателей независимого возбуждения [см. (2-13) и (2-16)], и справедливы для общего рассмотрения характеристик. У двигателя последовательного возбуждения значение магнитного потока зависит от тока якоря и при работе двигателя не остается постоянным. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения (т. е. кривая намагничивания) не является аналитической кривой, а поэтому характеристики $\omega = f(I_{я})$ и $\omega = \varphi(M)$ нельзя выразить аналитически.

В каталогах на определенную серию двигателей последовательного возбуждения наряду с обычными техническими данными ($P_{ном}$, $n_{ном}$, $I_{ном}$, $U_{ном}$) приводятся также зависимости угловой скорости или частоты вращения и момента от тока, выраженные в относительных единицах. Эти зависимости называются *универсальными характеристиками* $\omega_{кв} = f(I_{*я})$ и $M_{кв} = \varphi(I_{*я})$ (рис. 2-12). Изображенные характеристики являются естественными.

Анализируя уравнение электромеханической характеристики

$$\omega = [U_c - I_{я}(R_{лв} + R_{вш})]/(k\Phi)$$

и зависимость $\omega_{кв} = f(I_{*я})$, можно заключить, что у двигателя последовательного возбуждения при $I_{я} \rightarrow 0$ (или $M \rightarrow 0$) магнитный поток $\Phi \rightarrow 0$, э.д.с. якоря $E \rightarrow U_c$, а скорость $\omega \rightarrow \infty$.

Таким образом, несмотря на возрастание скорости до любого значения, двигатель последовательного возбуждения не может при нормальной схеме перейти в режим рекуперативного торможения, т. е. быть генератором и отдавать энергию в сеть. Этот двигатель нельзя разгружать до значения $M=0$, так как он пойдет «вразнос», т. е. скорость начнет расти неограниченно.

Из рис. 2-12 видно, что с увеличением тока якоря (нагрузки) скорость двигателя значительно уменьшается — характеристики мягкие.

Электромеханическая и механическая характеристики, построенные по универсальным характеристикам, представлены на рис. 2-13, а и б. Жесткость изображенных характеристик двигателя последовательного возбуждения переменна и возрастает с увеличением нагрузки. Это обстоятельство используется при применении двигателей, например, на транспортных электроприводах, когда при движении транспортного средства с увеличенной нагрузкой момент двигателя значительно возрастает. При этом мощность и ток увеличиваются в меньшей степени.

Для построения характеристик конкретного двигателя используются его паспортные данные. Значения угловой скорости и тока для точек естественной электромеханической характеристики в абсолютных единицах находятся как

$$\omega_e = \omega_* \omega_{\text{ном}}; I_{\text{я}} = I_{*\text{я}} I_{\text{ном}}.$$

Для механической характеристики при тех же значениях $I_{*\text{я}}$ и $\omega_{*\text{я}}$ определяется M_* . В абсолютных единицах момент

$$M = M_* M_{\text{ном}},$$

где $M_{\text{ном}}$ находится по формуле (2-9) или (2-10).

На основании естественных характеристик строятся искусственные. Из общих уравнений (2-13) и (2-16) электромеханической и механической характеристик следует, что искусственные характеристики можно получить:

- 1) введением в цепь якоря добавочного сопротивления $R_{\text{вш}}$ — реостатные характеристики;
- 2) изменением подводимого напряжения U_c ;
- 3) изменением магнитного потока.

Для построения реостатных характеристик используется пропорциональная зависимость между скоростью ($\omega_{\text{и}}$, ω_e) и э.д.с. якоря ($E_{\text{и}}$, E_e) при неизменном магнитном потоке, т. е. при одном и том же токе $I_{\text{я}} = I_{\text{в.пос}}$:

$$\omega_{\text{и}}/\omega_e = E_{\text{и}}/E_e. \quad (2-35)$$

Подставив в (2-35) выражения для э.д.с., получим

$$\frac{\omega_{\text{и}}}{\omega_e} = \frac{U_c - I_{\text{я}}(R_{\text{ЛВ}} + R_{\text{вш}})}{U_c - I_{\text{я}}R_{\text{ЛВ}}},$$

откуда

$$\omega_{\text{и}} = \omega_e \frac{U_c - I_{\text{я}}(R_{\text{ЛВ}} + R_{\text{вш}})}{U_c - I_{\text{я}}R_{\text{ЛВ}}}. \quad (2-36)$$

Задавая ряд значений I_n , по характеристике $\omega = f(I_n)$ находят значения ω_c , подставляя которые в (2-36) при заданном сопротивлении $R_{вщ}$ определяют $\omega_{ц}$. Сопротивление $R_{дв}$ подсчитыва-

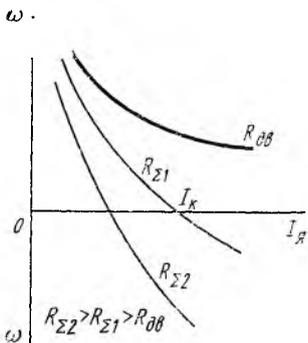


Рис. 2-14. Реостатные электро-механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

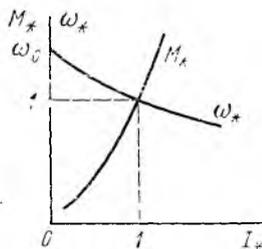


Рис. 2-15. Универсальные характеристики двигателей смешанного возбуждения

ют по формуле (2-3) или по каталожным данным. Реостатные характеристики двигателя последовательного возбуждения представлены на рис. 2-14.

Характеристики двигателя смешанного возбуждения получают на основании тех же формул (2-13) и (2-16). Однако магнитный поток этого двигателя зависит от магнитного потока Φ_1 , создавае-

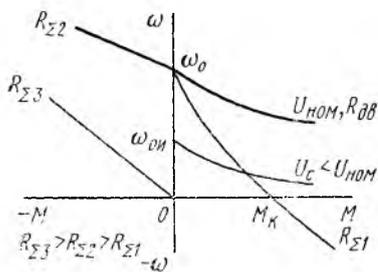


Рис. 2-16. Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения

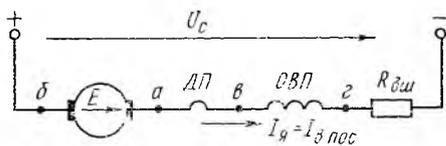


Рис. 2-17. Схема включения двигателя последовательного возбуждения при торможении противключением

мого током независимой обмотки возбуждения, и потока Φ_2 , создаваемого током обмотки последовательного возбуждения (см. рис. 2-2, в), т. е. $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$. Так как значение Φ_2 определяется током нагрузки, то для построения характеристик используют универсальные каталожные характеристики. Примерный вид универсальных характеристик показан на рис. 2-15. Электро-механические и механические характеристики двигателя смешанного воз-

буждения занимают промежуточное положение между характеристиками двигателя независимого и последовательного возбуждения. Примерный вид характеристик в различных режимах и при различных R_{Σ} и $U_c < U_{ном}$ показан на рис. 2-16.

Характеристики в тормозных режимах. Из возможных режимов электрического торможения двигатель последовательного возбуждения может работать в режимах торможения противовключением и динамического торможения.

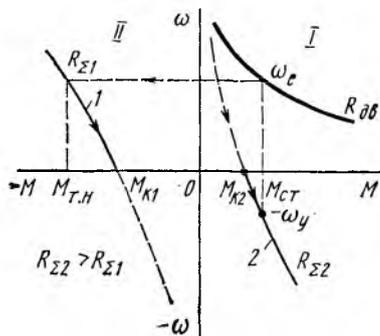


Рис. 2-18. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при торможении противовключением:

1 — торможение при реактивном моменте нагрузки; 2 — торможение при активном моменте нагрузки

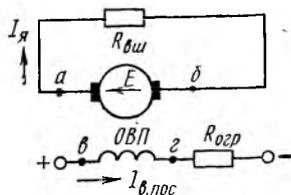


Рис. 2-19. Схема включения двигателя последовательного возбуждения при динамическом торможении с независимым возбуждением

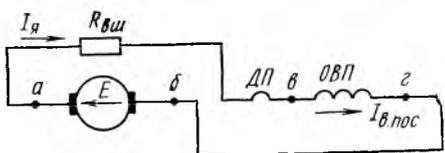


Рис. 2-20. Схема включения при динамическом торможении двигателя последовательного возбуждения с самовозбуждением

Торможение противовключением для двигателя последовательного возбуждения осуществляется при тех же условиях, что и для двигателя независимого возбуждения, т. е. при активном моменте нагрузки, когда $M_{CT} > M_K$, или при переключении полярности напряжения на выводах якоря. Для поддержания одного и того же направления магнитного потока после переключений в схеме ток в обмотке возбуждения двигателя должен протекать (см. рис. 2-2, б) от точки в к точке г (рис. 2-17). Ток в якорной цепи определяется равенством (2-32), поэтому для ограничения его допустимым значением в эту цепь вводится дополнительное сопротивление $R_{вщ}$. Характеристики при торможении противовключением располагаются в системе координат ω, I или ω, M в квадрантах II и IV (рис. 2-18).

Для остановки электропривода при угловой скорости $\omega = 0$ цепь якоря необходимо отключить от питающей сети. При активном моменте $M_{CT} > M_{K2}$ в этом режиме установится скорость $-\omega_y$ на характеристике 2.

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения осуществляется при независимом возбуждении или при самовозбуждении. Для получения режима динамического торможения при независимом возбуждении двигатель сначала отключают от сети. Затем обмотку возбуждения отключают от якоря и подключают к питающей сети последовательно с сопротивлением $R_{огр}$. При этом направление тока $I_{в.пос}$ не меняется. Якорь замыкается на некоторое внешнее сопротивление $R_{вн}$ (рис. 2-19). Полученная таким образом схема ничем не отличается от схемы динамического торможения двигателя независимого возбуждения, а поэтому характеристики этого тормозного режима прямолинейны (см. рис. 2-10).

Сопротивление $R_{огр}$, включаемое последовательно с обмоткой возбуждения, обычно выбирается из условия, чтобы ток в обмотке возбуждения не превышал номинального значения:

$$R_{огр} = (U_c / I_{ном}) - R_{п}. \quad (2-37)$$

Схема динамического торможения с самовозбуждением представлена на рис. 2-20. Внешний источник возбуждения двигателя в этой схеме отсутствует. В качестве первоначального возбуждения используется магнитный поток остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$, за счет которого в проводниках вращающегося якоря возникает некоторая начальная э. д. с. Под действием этой э. д. с. в цепи начнет протекать ток противоположного направления (по сравнению с током в двигательном режиме) в обмотке якоря и прежнего направления в обмотке возбуждения. Взаимодействие магнитного потока с током якоря создает тормозной момент.

Для сохранения направления тока возбуждения в цепи двигателя производят переключения обмоток таким образом, чтобы возникший начальный ток увеличивал остаточный магнитный поток, т. е. чтобы $\Phi = \Phi_{ост} + \Phi(I_{я})$, где $\Phi(I_{я})$ — зависимость магнитного потока от тока якоря (рис. 2-20). Без переключения обмоток двигатель размагничивается и тормозного момента не создает.

Условием возникновения процесса самовозбуждения является то, что э. д. с. E , обусловленная током возбуждения $I_{в.пос} = I_{я}$, должна быть больше падения напряжения в контуре цепи якоря $I_{я} R_{\Sigma} = I_{я} (R_{дв} + R_{вн})$. Так как $E = k\Phi\omega$, то при увеличении $R_{вн}$ самовозбуждение становится возможным при более высоких скоростях, чем при независимом возбуждении. При некоторой скорости $\omega = \omega_{кр}$ (где $\omega_{кр}$ — критическая скорость) возбуждение прекращается и двигатель не развивает тормозного момента. Примерный вид механических характеристик при динамическом торможении с самовозбуждением показан на рис. 2-21.

Недостаток динамического торможения с самовозбуждением —

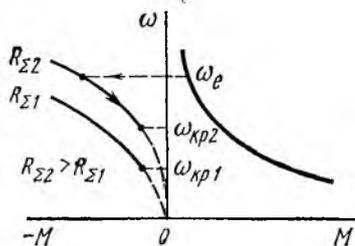


Рис. 2-21. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при динамическом торможении с самовозбуждением

заметное уменьшение тормозного эффекта при снижении скорости и прекращение торможения при некоторой скорости $\omega = \omega_{кр}$. Преимущества его заключаются в том, что не требуется источника энергии для возбуждения и торможение возможно даже при исчезновении напряжения питающей сети. Это повышает надежность электропривода.

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 3-1. Основные понятия и соотношения для асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели широко применяются в промышленности и сельском хозяйстве, так как они просты по конструкции, надежны в эксплуатации. В большинстве случаев асинхронные двигатели питаются непосредственно от сети переменного тока промышленной (50 Гц) частоты. Только в специальных случаях двигатели питаются от преобразовательных установок.

Асинхронный двигатель имеет две обмотки: обмотку статора, расположенную в станине неподвижно, и вращающуюся обмотку ротора. В зависимости от исполнения ротора различают асинхронные двигатели с фазным ротором (с контактными кольцами), у которого каждый конец обмотки фазы выводится на контактное кольцо KK (рис. 3-1, а, б), и с короткозамкнутым ротором (рис. 3-1, в) (короткозамкнутые двигатели), обмотка ротора которого исполняется в виде «беличьей клетки».

Обмотка статора в зависимости от номинального напряжения, на которое выполнен двигатель, и напряжения сети может быть соединена в звезду или треугольник; обмотка ротора, как правило, в звезду. В цепь ротора двигателя с фазным ротором включается внешнее сопротивление $R_{внш}$. Большинство асинхронных двигателей выполняются трехфазными, поэтому при дальнейшем изложении электромеханические свойства будут рассматриваться для этих двигателей.

Упрощенная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 3-2, где обозначения с индексом 1 относятся к обмотке статора (первичной цепи), а с индексом 2 — к обмотке ротора (вторичной цепи): $U_{1ф}$ — действующее значение фазного напряжения; I_M, I_1 — ток намагничивания и ток обмотки статора; X_M — индуктивное сопротивление контура намагничивания; X_1, R_1 — индуктивное и активное сопротивления обмотки фазы статора; I_2', R_2', X_2' — приведенные к обмотке статора ток ротора, активное и индуктивное сопротивления фазы ротора; s — скольжение двигателя.

Так как обмотка статора подключается к питающей сети, то для удобства рассмотрения протекающих процессов и упрощения уравнений обмотка ротора приводится к обмотке статора. Смысл

приведения состоит в условной замене действительной роторной обмотки фиктивной, имеющей число фаз и витков, а также обмоточный коэффициент такие же, как и у статорной обмотки.

Отношение э. д. с. обмоток статора и ротора при неподвижном роторе определяется коэффициентом трансформации э. д. с.

$$K_E = E_1 / E_2. \quad (3-1)$$

Коэффициент K_E можно найти, исходя из паспортных данных двигателя:

$$K_E \approx 0,95 U_{\text{ном}} / E_{2к}, \quad (3-2)$$

где 0,95 — коэффициент, учитывающий 5%-ную потерю напряжения в обмотке статора; $U_{\text{ном}}$ — номинальное линейное напряжение статора; $E_{2к}$ — э. д. с. между кольцами неподвижного ротора.

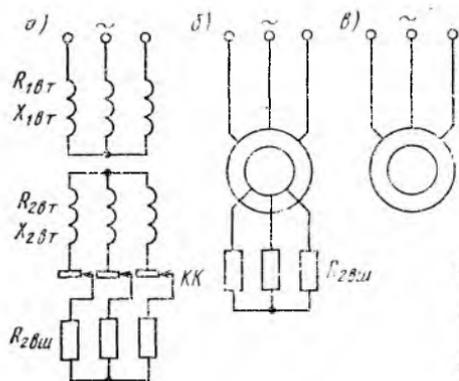


Рис. 3-1. Схемы включения асинхронных двигателей

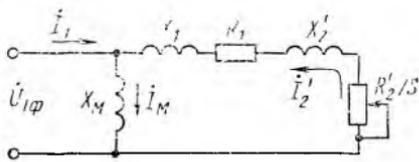


Рис. 3-2. Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя с фазным ротором

Из определения коэффициента K_E известно, что приведенная к обмотке статора э. д. с. ротора E_2' равна E_1 :

$$E_2' = E_2 K_E = E_1. \quad (3-3)$$

Коэффициент трансформации тока

$$K_T = I_2 / I_2', \quad (3-4)$$

где I_2 — действительный ток ротора.

Коэффициенты трансформации тока и э. д. с. связаны зависимостью

$$K_T = K_E m_1 / m_2, \quad (3-5)$$

где m_1 и m_2 — число фаз статора и ротора.

Приведенный к статору ток ротора

$$I_2' = I_2 / (K_E m_1 / m_2).$$

Приведенные к обмотке статора сопротивления ротора

$$\left. \begin{aligned} R_2' &= R_2 K_E K_T = R_2 (m_1/m_2) K_E^2; \\ X_2' &= X_2 (m_1/m_2) K_E^2, \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

где R_2 , X_2 — действительные активное и индуктивное сопротивление фазы роторной цепи.

На практике у большинства двигателей $m_1 = m_2$, тогда формулы (3-6) принимают более простой вид:

$$R_2' = R_2 K_E^2, \quad X_2' = X_2 K_E^2. \quad (3-7)$$

В общем случае полное сопротивление фазы роторной цепи

$$Z_{2\lambda} = E_2 / (\sqrt{3} I_2) = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}. \quad (3-8)$$

Если обмотки двигателя соединены в треугольник, то его следует заменить схемой эквивалентной звезды, для которой сопротивления принять равными $1/3$ от фактических сопротивлений фаз статора и ротора.

Для того чтобы при неподвижном роторе (например, при пуске двигателя) получить в его фазах значения токов, равные $I_{2\text{ном}}$, каждая фаза роторной цепи должна иметь сопротивление

$$R_{2\text{ном}} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}). \quad (3-9)$$

Для асинхронных двигателей с фазным ротором *номинальным сопротивлением фазы роторной цепи* называется активное сопротивление, равное сумме сопротивлений $R_{2\text{вт}}$ и $R_{2\text{вщ}}$, которые при номинальных для статора частоте и напряжении в сети при неподвижном роторе ограничивают ток номинальным значением.

Сопротивление $R_{2\text{ном}}$, найденное по формуле (3-9), по существу, является полным сопротивлением, так как $X_{2\text{вт}} \approx 0$:

$$Z_{2\text{ном}} = R_{2\text{ном}}.$$

Если обмотки статора и ротора двигателя соединены звездой, то при введении в цепь обмоток статора и ротора внешних активных или индуктивных сопротивлений их суммарные значения

$$R_{1\Sigma} = R_{1\text{вт}} + R_{1\text{вщ}}; \quad X_{1\Sigma} = X_{1\text{вт}} + X_{1\text{вщ}};$$

$$R_{2\Sigma} = R_{2\text{вт}} + R_{2\text{вщ}}; \quad X_{2\Sigma} = X_{2\text{вт}} + X_{2\text{вщ}},$$

где $R_{1\text{вт}}$, $R_{2\text{вт}}$, $X_{1\text{вт}}$, $X_{2\text{вт}}$ — внутренние активные и индуктивные сопротивления обмоток фаз статора и ротора; $R_{1\text{вщ}}$, $R_{2\text{вщ}}$, $X_{1\text{вщ}}$, $X_{2\text{вщ}}$ — активные и индуктивные внешние сопротивления фаз статора и ротора.

Сопротивления короткого замыкания двигателя с фазным ротором при замкнутых кольцах и неподвижном роторе

$$R_k = R_{1\Sigma} + R_{2\Sigma}'; \quad X_k = X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}'. \quad (3-10)$$

При подключении обмотки статора двигателя к сети трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, угловая скорость которого ω_0 , называемая *синхронной*, прямо пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p обмотки статора:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p. \quad (3-11)$$

В двигательном режиме ротор вращается в направлении вращения магнитного поля с угловой скоростью ω , меньшей скорости ω_0 . В режиме идеального холостого хода, когда потери в цепи ротора равны нулю, угловая скорость ротора равна угловой скорости магнитного поля.

Разность между синхронной угловой скоростью и текущим значением угловой скорости ротора, отнесенная к скорости ω_0 , называется *скольжением*:

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0. \quad (3-12)$$

Зная скольжение, можно определить угловую скорость ротора:

$$\omega = \omega_0 (1 - s). \quad (3-13)$$

Для двигательного режима $s = 1 - 0$.

По известным паспортным данным двигателя и подсчитанном значении $s_{\text{ном}}$ можно найти активное сопротивление обмотки фазы ротора:

$$R_{2\text{вт}} = E_{2к} s_{\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}}) = R_{2\text{ном}} s_{\text{ном}}. \quad (3-14)$$

Согласно схеме замещения (рис. 3-2), приведенный ток ротора в рабочем контуре

$$I_2' = U_{1\phi} / \sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (3-15)$$

В режиме идеального холостого хода через обмотки статора протекает только ток намагничивания I_M , который создаст магнитный поток в статоре, поэтому в общем случае ток статора является геометрической суммой приведенного тока ротора и намагничивающего тока:

$$I_1 = \sqrt{I_2'^2 + I_M^2}.$$

Так как $I_M \ll I_2'$, то с некоторым приближением можно считать ток I_2' и $\cos \varphi_2$ ротора равными соответствующим значениям статора ($I_2' \approx I_1$, $\cos \varphi_2 \approx \cos \varphi_1 \approx \cos \varphi$).

Активное сопротивление обмотки фазы статора $R_{1\text{вт}}$ значительно меньше, чем $X_{1\text{вт}} + X_2'$. Тогда, считая $R_{1\text{вт}} = 0$, после преобразования (3-15) получим



Рис. 3-3. Зависимости между s , $\cos \varphi$ и током асинхронного двигателя

$$I_1 = sU_{1\phi} / \sqrt{R_2'^2 + sX_k} \quad (3-16)$$

По паспортным данным двигателя этот ток подсчитывается по формуле

$$I_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}).$$

На основании (3-15) и (3-16) с учетом (3-13) можно построить зависимости $\omega = f(I_2')$ и $\omega = f(I_1)$ (рис. 3-3), называемые *электро-механическими характеристиками* асинхронного двигателя. На этом же рисунке показано и изменение $\cos \varphi$ по мере уменьшения s . Из рассмотрения зависимости $\cos \varphi$ от I_1 можно сделать заключение, что в процессе пуска активная мощность двигателя $P_{\text{э}} = 3m_1 U_{1\phi} \cos \varphi$ будет изменяться нелинейно, а это, в свою очередь, вызовет соответствующее изменение момента двигателя.

§ 3-2. Механические характеристики асинхронных двигателей в двигательном режиме

Электромагнитная мощность трех фаз, которая передается через воздушный зазор ротору двигателя,

$$P_{\text{эм}} = 3I_2'^2 R_2' / s. \quad (3-17)$$

Эта же мощность через электромагнитный момент представится как $P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_0$, откуда

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \omega_0 = 3I_2'^2 R_2' / (\omega_0 s). \quad (3-18)$$

Подставив значение I_2' из (3-15) и считая $M_{\text{эм}} = M$ (потерей момента пренебрегаем), получим зависимость момента двигателя от скольжения:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (3-19)$$

Зависимость (3-19) с учетом (3-13) представляет собой *механическую характеристику*, которая имеет два максимума. В этом можно убедиться, если по общему правилу исследования функций на максимум взять производную dM/ds , приравнять ее к нулю и полученное уравнение, которое оказывается при этом квадратным, решить относительно s . Скольжение, при котором момент двигателя будет максимальным, называется *критическим* и определяется выражением

$$s_{\text{кр}} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}, \quad (3-20)$$

где знак «+» соответствует двигательному режиму, а знак «—» — генераторному режиму с отдачей энергии в сеть (рекуперативное торможение).

Подставив в уравнение (3-19) значение $s = s_{кр}$ из (3-20), получим значение момента при критическом скольжении, называемого *критическим* или *опрокидывающим*:

$$M_{кр} = \frac{3U_{ф}^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}]}, \quad (3-21)$$

где знак «+» перед корнем отвечает $s_{кр} > 0$, т. е. двигательному режиму, а знак «-» соответствует $s_{кр} < 0$, т. е. режиму рекуперативного торможения.

Так как в (3-21) все величины положительны, то $M_{кр}$ при рекуперативном торможении будет больше $M_{кр}$ двигательного режима.

Уравнению механической характеристики (3-19) можно придать более простой и удобный для расчетов вид, если взять отношение M к $M_{кр}$. После соответствующих преобразований получим уравнение механической характеристики

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})}{s/s_{кр} + s_{кр}/s + 2as_{кр}}, \quad (3-22)$$

где $M_{кр}$, $s_{кр}$ и $a = R_1/R_2'$ являются неизменными параметрами, а s — изменяемым.

Критический момент для двигательного режима можно найти по каталожной величине $\lambda = M_{кр}/M_{ном}$, называемой *перегрузочной способностью двигателя*:

$$M_{кр} = \lambda M_{ном}$$

Величина λ характеризует возможность двигателей к недлительным перегрузкам. Для различных серий двигателей λ имеет следующие пределы: для краново-металлургической $\lambda = 2,3 \div 3$, для двигателей общего назначения $\lambda = 1,7 \div 2,4$.

Критическое скольжение можно найти с помощью величин λ и $s_{ном}$.

Для двигателей малой мощности

$$s_{кр} = s_{ном} \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2s_{ном}(\lambda - 1)}}{1 - 2s_{ном}(\lambda - 1)}; \quad (3-23)$$

для двигателей средней и большой мощности

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (3-23a)$$

Для двигателей большой мощности сопротивление обмотки статора невелико. Поэтому практически $R_1 \ll X_{к}$ и $as_{кр} \ll 1$. С учетом этого уравнение механической характеристики примет еще более простой вид (уравнение Клосса):

$$M = 2M_{кр} / (s/s_{кр} + s_{кр}/s). \quad (3-24)$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя (при $U = U_{ном}$, $f_1 = f_{ном}$, $R_2 = R_{2 вт}$), отвечающая уравнениям (3-19), (3-22) и (3-24), приведена на рис. 3-4, где ω и s связаны зависимостью (3-13).

Участок характеристики от $s=0$ до $s=s_{кр}$ называется *устойчивой частью характеристики*. На этом участке от $M=0$ до $M=M_{ном}$ величина $s \ll s_{кр}$. Поэтому в выражении (3-24) отношением $s=s_{кр}$ можно пренебречь. Тогда уравнение этой части механической характеристики примет вид уравнения прямой линии

$$M = (2M_{кр}/s_{кр})s. \quad (3-24a)$$

Участок характеристики от $s_{кр}$ до $s=1$ (или от $M_{кр}$ до $M_{к}$) используется лишь в процессе пуска двигателя и называется *неустойчивой частью характеристики*.

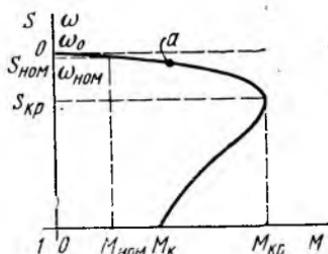


Рис. 3-4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Пусковые свойства асинхронного двигателя оцениваются значениями начального пускового момента $M_{пуск}$ и начального пускового тока $I_{1пуск}$ при $s=1$. Для двигателей с короткозамкнутым ротором в каталогах указываются кратности пускового момента $M_{пуск}/M_{ном}$ и тока $I_{1пуск}/I_{ном}$. Обычно пусковой момент серии краново-металлургических двигателей $M_{пуск} = (2,3 \div 3,0) M_{ном}$, а двигателей общего назначения $M_{пуск} = (1,0 \div 1,9) M_{ном}$. Пусковой ток краново-металлургических

двигателей превышает номинальный в 3—6 раз, двигателей общего назначения — в 4—7 раз.

Отсутствие пропорциональности между моментом и током в пусковой области характеристики объясняется значительным снижением коэффициента мощности (см. рис. 3-3).

Чтобы улучшить пусковые характеристики на основании (3-15) и (3-21), необходимо на время пуска увеличить активное сопротивление обмотки ротора и за счет этого повысить вращающий момент и снизить пусковой ток.

Для двигателей с фазным ротором, имеющим контактные кольца на роторе, это осуществляется за счет включения дополнительного внешнего сопротивления — реостата (см. рис. 3-1, а), которое в процессе пуска уменьшают. В связи с такой возможностью значения $M_{пуск}/M_{ном}$ и $I_{1пуск}/I_{ном}$ для двигателей с фазным ротором в каталогах не приводятся.

Для повышения пускового момента и снижения пускового тока двигателей с короткозамкнутым ротором в специальных сериях ротор выполняют с глубоким пазом или двойной «беличьей клеткой». При пуске двигателя проявляется поверхностный эффект вытеснения тока в пазу ротора, что эквивалентно увеличению сопротивления роторной цепи, в результате чего снижается пусковой ток.

Желание повысить пусковой момент привело к созданию нескольких серий двигателей с короткозамкнутым ротором. На рис. 3-5 представлены естественные характеристики $\omega_* = f(M_*)$ асинхронных двигателей с различным исполнением ротора: краново-

металлургических (МТК), с повышенным скольжением (АС), с повышенным пусковым моментом (АП), с ротором нормального исполнения (А4).

У двигателей с короткозамкнутым ротором значение $M_{\text{пуск}}$ не всегда является наименьшим. При $s \approx 0,8$ действительная характеристика имеет «провал» момента $M_{\text{мин}}$, который меньше пускового. Причина этого — наличие дополнительных моментов, обусловленных высшими гармоническими составляющими тока, эффектом вытеснения тока в пазах и неравномерностью магнитного поля ротора. Поэтому для двигателей с короткозамкнутым ротором в ката-

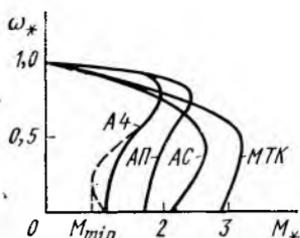


Рис. 3-5. Механические характеристики различных серий короткозамкнутых двигателей

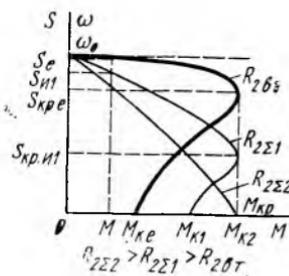


Рис. 3-6. Реостатные механические характеристики асинхронного двигателя

логах указывается отношение $M_{\text{мин}}/M_{\text{ном}}$. На рис. 3-5 для двигателей серии А4 показан примерный вид реальной характеристики, имеющей «провал», отмеченный штриховой линией.

Расчет и построение естественной механической характеристики осуществляются на основании каталожных данных двигателя. Для построения рабочей прямолинейной части характеристики достаточно двух точек. Для этого при известной скорости $\omega_{\text{ном}}$ и мощности двигателя $P_{\text{ном}}$ по формуле (2-10а) определяется номинальный момент. Первая точка находится по координатам $\omega = \omega_{\text{ном}}$, $M = M_{\text{ном}}$. Вторая точка — угловая скорость идеального холостого хода ω_0 при $M=0$ — находится по формуле (3-11). Координатами второй точки будут $\omega = \omega_0$, $M=0$. Рабочая часть характеристики на рис. 3-4 показана между точками ω_0 — а.

Для построения полной (с неустойчивой частью) характеристики по формулам (3-12), (3-20) или (3-23а) подсчитывается значение $s_{\text{кр}}$. Затем, задаваясь значениями s от 0 до 1 для двигательного режима, по формулам (3-22) или (3-24) определяют соответствующие значения момента M . При этом скольжению $s_{\text{кр}}$ отвечает момент $M_{\text{кр}}$.

При увеличении активного сопротивления $R_{2\Sigma}$ в цепи ротора на основании формулы (3-20) пропорционально повышается критическое скольжение. Так как различным значениям $s_{\text{кр}}$ соответствуют значения $M_{\text{кр}}$, не зависящие от $R_{2 \text{ вт}}$ [см.

(3-21)], то при неизменных значениях ω_0 и $M_{кр}$ повышение $s_{кр}$ будет определять наклон механических характеристик (рис. 3-6). Зависимость $s_{кр}$ от $R_{2\Sigma}$ при $M_{кр} = \text{const}$ используется для увеличения начального пускового момента (или $M_{п1}$) при $s=1$ двигателей с фазным ротором. Так, например, на рис. 3-6 при $R_{2\Sigma 2}$ момент $M_{к2}$ становится равным критическому.

Для построения реостатной механической характеристики двигателя с фазным ротором скольжение рассчитывается на основании пропорциональной зависимости $s_{кр}$ от $R_{2\Sigma}$. Тогда для естественной и искусственной (реостатной) характеристик исходя из формулы (3-24) для различных значений $s_{кр}$

$$s_{кр,и}/s_{кр,е} = (R'_{2вт} + R'_{2вн})/R'_{2вт} = R_{2\Sigma}/R_{2вт}, \quad (3-25)$$

где $s_{кр,и}$, $s_{кр,е}$ — критическое скольжение на искусственной (реостатной) и естественной характеристиках.

Соотношение (3-25) соблюдается и для текущих значений скольжений

$$s_{и}/s_{е} = R_{2\Sigma}/R_{2вт}, \quad (3-25a)$$

где $s_{и}$ и $s_{е}$ — скольжения на искусственной и естественной характеристиках при некотором моменте двигателя.

На искусственной характеристике скольжение

$$s_{и} = s_{е} R_{2\Sigma}/R_{2вт}, \quad (3-26)$$

Для построения реостатных характеристик задаются рядом значений $s_{е}$ и при соответствующих значениях M определяют $s_{и}$ (рис. 3-6).

Перепишем формулу (3-26) относительно $R_{2\Sigma}$:

$$R_{2\Sigma} = s_{и} R_{2вт}/s_{е} = R_{2вт} + R_{2вн},$$

откуда

$$R_{2вн} = (s_{и}/s_{е}) R_{2вт} - R_{2вт}. \quad (3-26a)$$

Полученное уравнение используется для определения сопротивлений секций пускового и регулировочного реостата.

В соответствии с формулами (3-19), (3-20) и (3-21) на механическую характеристику можно влиять и изменением индуктивного сопротивления роторной цепи X_2 .

При введении в цепь ротора реактора суммарное индуктивное сопротивление увеличится: $X_{2\Sigma} = X_{2вт} + X_{2вн}$. Тогда при подключении двигателя к сети пусковой ток в соответствии с (3-15) уменьшается ($I_{п1} < I_{к,е}$) (рис. 3-7). Критическое скольжение, критический и пусковой моменты двигателя тоже уменьшатся (кривые $M_{п1}$ и $I_{п1}$).

Более приемлемые результаты получаются при последовательном включении в цепь ротора дополнительного активного $R_{2вн}$ и индуктивного $X_{2вн}$ сопротивлений. При этом в момент пуска двигателя ($s=1$) при частоте тока ротора, равной частоте сети f_1 ,

индуктивное сопротивление $X_{2\text{вн}}$ велико и пусковой ток равен $I_{к2}$. По мере разгона двигателя э.д.с. ротора E_2 уменьшается, но одновременно с этим снижается и частота f_2 во вторичной цепи. Индуктивное сопротивление реактора уменьшается, в результате чего момент и ток ротора будут снижаться медленнее, чем при наличии одного активного сопротивления (кривые $M_{и2}$ и $I_{и2}$).

При работе двигателя, когда ток статора не отличается существенно от номинального значения, можно считать, что э.д.с. статора $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$. Тогда

$$U_{1\phi} \approx E_{1\phi} = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi, \quad (3-27)$$

где ω_1 — число витков обмотки фазы статора.

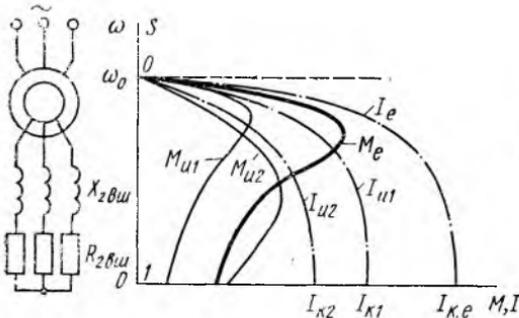


Рис. 3-7. Механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя при введении в цепь ротора реактивного и активного сопротивлений

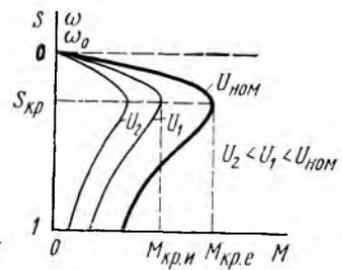


Рис. 3-8. Механические характеристики при различных напряжениях питания асинхронного двигателя

При неизменной частоте f_1 снижение напряжения $U_{1\phi}$ вызывает уменьшение магнитного потока. Поэтому приложенное к обмоткам статора напряжение может рассматриваться как управляющее воздействие, аналогичное напряжению на обмотке возбуждения двигателя постоянного тока.

При изменении напряжения питания двигателя его момент [см. (3-19) и (3-21)] изменяется пропорционально квадрату приложенного напряжения, а критическое скольжение [см. (3-20)] остается неизменным. Тогда при уменьшении напряжения на статоре до значения $U_1 = \alpha U_{\text{ном}}$, где $\alpha = U_1 / U_{\text{ном}} < 1$, отношение моментов на естественной и искусственной характеристиках при $s = \text{const}$ будет равно отношению соответствующих квадратов напряжений:

$$M_e / M_{и} = M_{кр.е} / M_{кр.и} = U_{\text{ном}}^2 / U_1^2 = 1 / \alpha^2, \quad (3-28)$$

где M_e , $M_{и}$ — моменты на естественной и искусственной характеристиках.

Таким образом, искусственную характеристику при $U_1 < U_{\text{ном}}$ можно получить и построить из естественной, если ординаты ее

пересчитать в α^2 раз. Механические характеристики при различных напряжениях питания двигателя изображены на рис. 3-8.

При введении дополнительных сопротивлений $R_{1\text{вн}}$ и $X_{1\text{вн}}$ в цепь статора снижаются ток двигателя [см. (3-15)], а также критическое скольжение, критический и пусковой моменты [см. (3-20) и (3-21)]. В цепь статора крупных двигателей сопротивления вводятся для ограничения пусковых токов до значения, допускаемого по условиям падения напряжения в питающей сети. Иногда введение сопротивления используется для уменьшения пускового момента, с тем чтобы при пуске двигателя смягчить удары в передаточных механизмах и обеспечить более плавный разгон электропривода.

На механическую характеристику асинхронного двигателя в соответствии с (3-11) можно влиять изменением частоты f_1 и числа пар полюсов p .

При изменении частоты тока f_1 пропорционально будет изменяться ω_0 и обратно пропорционально частоте — магнитный поток Φ [см. (3-27)]. Так как в номинальном режиме магнитная система двигателя насыщена, то при $U_{\text{ном}}$ допустимо только увеличение частоты питающего напряжения. Тогда при значении f_1 , большем $f_{1\text{ном}}$, соответственно увеличится ω_0 и индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{\text{к.и}} = X_{\text{к.е}}(f_1/f_{1\text{ном}})$ и уменьшится магнитный поток Φ . В соответствии с (3-21) увеличение ω_0 и $X_{\text{к}} = X_1 + X_2'$ вызывает уменьшение критического момента. Критическое скольжение с увеличением $X_{\text{к.и}}$ на основании (3-20) уменьшится. Механическая характеристика при $f_1 > f_{1\text{ном}}$, $U = U_{\text{ном}}$ показана на рис. 3-9.

При уменьшении частоты $f_1 < f_{\text{ном}}$ снижается угловая скорость ω_0 , а магнитный поток Φ увеличивается. Это приводит к глубокому насыщению магнитной цепи и увеличению намагничивающего тока I_m , что, в свою очередь, вызывает снижение энергетических показателей двигателя ($\cos \varphi$, η). Для того чтобы поток Φ при увеличении или уменьшении частоты f_1 оставался постоянным [см. (3-27)], необходимо при изменении частоты в той же кратности изменять напряжение, т. е. изменять эти величины так, чтобы

$$U/f_1 = \text{const.} \quad (3-29)$$

При соблюдении условия (3-29) критический момент изменяется — увеличивается с ростом частоты и уменьшается с ее снижением. Механические характеристики при изменении частоты и одновременном пропорциональном изменении напряжения приведены на рис. 3-9.

При изменении числа пар полюсов и одной и той же частоте тока и неизменном напряжении сети [см. (3-11)] его угловая скорость будет изменяться обратно пропорционально числу пар полюсов. Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в статоре были уложены независимые обмотки с различны-

ми значениями p либо при одной обмотке статора имелась возможность изменения ее схемы соединений.

Так, обмотки отдельных фаз статора двухскоростного двигателя состоят из двух частей. При переключении обмоток каждой фазы с последовательного соединения на параллельное число пар полюсов уменьшается вдвое, а угловая скорость двигателя возрастает. Критический момент двигателя при различных числах полюсов зависит от конструктивного исполнения обмоток. Двигатели с изменяемым числом пар полюсов выполняются с постоянной

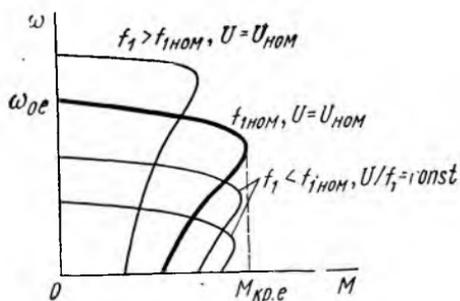


Рис. 3-9. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты питающего напряжения

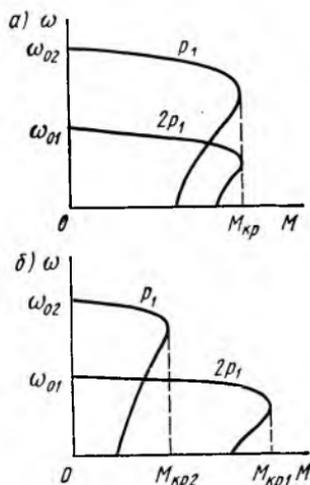


Рис. 3-10. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении числа пар полюсов в два раза

мощностью или постоянным моментом. Примерные механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя с постоянным моментом показаны на рис. 3-10, а (при p_1 и $2p_1$, $M_{кр} = \text{const}$), а с постоянной мощностью — на рис. 3-10, б (при $2p_1$, $M_{кр1}$, при p_1 , $M_{кр2}$).

Пример 3-1. Для асинхронного двигателя с фазным ротором общего назначения заданы следующие параметры: мощность $P_{ном} = 20$ кВт, напряжение $U_{ном} = 380$ В, частота тока $f_1 = 50$ Гц, частота вращения $n = 950$ об/мин (число пар полюсов $p = 3$); отношение $M_{max}/M_{ном} = 2,0$, номинальный к. п. д. $\eta_{ном} = 85\%$, $\cos \varphi_{ном} = 0,81$, номинальный ток статора $I_{1ном} = 44,2$ А, номинальный ток ротора $I_{2ном} = 63$ А, э. д. с. ротора $E_{2к} = 212$ В, сопротивление $R_{1вт} = 0,16$ Ом.

Расчитать номинальное и критическое скольжение; номинальное сопротивление роторной цепи; активное сопротивление обмотки фазы ротора; номинальный и критический моменты.

Построить естественную механическую характеристику двигательного режима; реостатную механическую характеристику с сопротивлением реостата, равным $0,1 R_{2ном}$.

Решение. Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = \frac{104,72 - 99,5}{104,72} = 0,05,$$

где

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99,5 \text{ рад/с}.$$

Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,05(2 + \sqrt{2^2 - 1}) \approx 0,19,$$

где $\lambda = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,0$.

Номинальное сопротивление роторной цепи

$$R_{2\text{ном}} = \frac{E_{2\text{к}}}{\sqrt{3} I_{2\text{ном}}} = \frac{212}{\sqrt{3} \cdot 63} = 1,943 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмотки фазы ротора

$$R_{2\text{вт}} = R_{2\text{ном}} s_{\text{ном}} = 1,943 \cdot 0,05 = 0,097 \text{ Ом}.$$

Номинальный и критический моменты двигателя

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{20 \cdot 10^3}{99,5} = 201 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{кр}} = 2M_{\text{ном}} = 2 \cdot 201 = 402 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Коэффициент трансформации э. д. с.

$$K_E \approx 0,95 U_{\text{ном}}/E_{2\text{к}} = 0,95 \cdot 380/212 = 1,703.$$

Сопротивление реостата в цепи ротора

$$R_{2\text{вн}} = 0,1 R_{2\text{ном}} = 0,1 \cdot 1,943 = 0,194 \text{ Ом}.$$

Суммарное активное сопротивление роторной цепи

$$R_{2\Sigma} = R_{2\text{вт}} + R_{2\text{вн}} = 0,097 + 0,194 = 0,291 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора

$$R_{2\text{вт}}' = R_{2\text{вт}} K_E^2 = 0,097 \cdot 1,7^2 = 0,28 \text{ Ом}.$$

Чтобы построить естественную механическую характеристику, зададимся несколькими значениями s_e от 0 до 1 и подставим в выражение

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}(1 + as_{\text{кр}})}{s_e/s_{\text{кр},e} + s_{\text{кр},e}/s_e + 2as_{\text{кр},e}} = \frac{2 \cdot 402(1 + 0,57 \cdot 0,187)}{s_e/0,187 + 0,187/s_e + 2 \cdot 0,57 \cdot 0,187} = \frac{889}{s_e/0,187 + 0,187/s_e + 0,213'}$$

где $a = R_{1\text{вт}}/R_{2\text{вт}}' = 0,16/0,28 = 0,57$.

Скольжение на искусственной характеристике при выбранных значениях s_e

$$s_{\text{и}} = s_e \frac{R_{2\Sigma}}{R_{2\text{вт}}} = s_e \frac{0,291}{0,097} = 3s_e.$$

Критическое скольжение на искусственной характеристике

$$s_{\text{кр},\text{и}} = s_{\text{кр},e} R_{2\Sigma}/R_{2\text{вт}} = 3s_{\text{кр},e} = 3 \cdot 0,187 = 0,56.$$

Угловые скорости, отвечающие скольжениям s_e и $s_{\text{и}}$,

$$\omega_e = \omega_0(1 - s_e); \quad \omega_{\text{и}} = \omega_0(1 - s_{\text{и}}).$$

Результаты расчетов M , ω_e , s_{II} и ω_{II} при различных значениях s_e приведены ниже:

s_e	0	0,05	0,10	0,19	0,25	0,35	0,5	0,75	1,0
ω_e , рад/с . .	104,7	99,5	94,2	85,1	78,5	68	52,4	26,2	0
M , Н·м . . .	0	201,0	339,0	402,0	386,5	342	272,7	198,9	154,7
s_{II}	0	0,15	0,30	0,56	0,75	1,05	1,50	2,25	3,0
ω_{II} , рад/с . .	104,7	89,0	73,3	46,0	26,2	-5,2	-52,4	-131,0	-209,0

Построенные естественная и реостатная характеристики представлены на рис. 3-11.

§ 3-3. Механические характеристики асинхронных двигателей в тормозных режимах

Асинхронный двигатель может работать в тех же тормозных режимах, что и двигатель постоянного тока: рекуперативного торможения, торможения противовключением, динамического торможения с независимым возбуждением и самовозбуждением.

Рекуперативное торможение возникает при $\omega > \omega_0$ и соответственно при $s < 0$. Переход двигателя в этот режим осуществляется без отключения от сети, только за счет действия активного момента нагрузки на его валу. Двигатель при $\omega > \omega_0$ превращается в генератор и отдает активную энергию в сеть. У многоскоростных двигателей режим рекуперативного торможения возникает при переходе (без остановки) электропривода с большей скорости на меньшую.

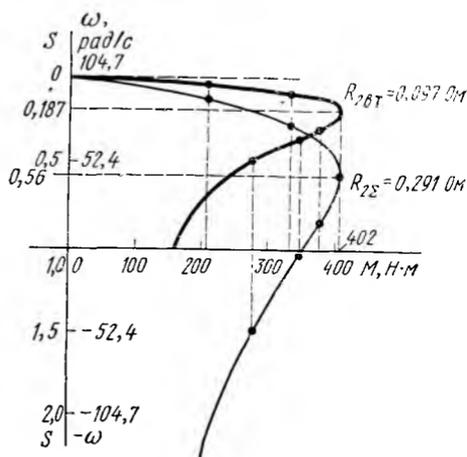


Рис. 3-11. Механические характеристики асинхронного двигателя, рассчитанные в примере 3-1

Механические характеристики этого режима являются продолжением характеристик двигательного режима в область квадранта II (рис. 3-12). Скольжение s и момент M при торможении имеют знак «—». Расчет координат ω для построения механических характеристик в режиме рекуперативного торможения производится по формуле (3-22), как и для двигательного режима.

Торможение противовключением возникает в том случае, когда ротор двигателя вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля статора. Этого можно достичь переключением обмоток статора на противоположное направление вращения (две фазы меняют местами) или, не отключая двигателя от сети, за счет действия активного момента нагруз-

ки заставить ротор вращаться в другую сторону. Характеристики торможения противовключением являются продолжением характеристик двигательного режима в область скольжений $s > 1$ (рис. 3-13). Уравнения механических характеристик те же, что и для двигательного режима.

Расчет координат ω для построения механических характеристик в режиме противовключения производится на основании естественной характеристики и зависимости (3-26). Так же как и для двигателей постоянного тока, для асинхронных двигателей режим торможения противовключением применяется в двух случаях:

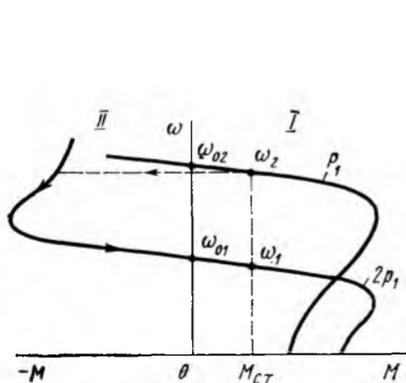


Рис. 3-12. Механические характеристики асинхронного двухскоростного двигателя при рекуперативном торможении

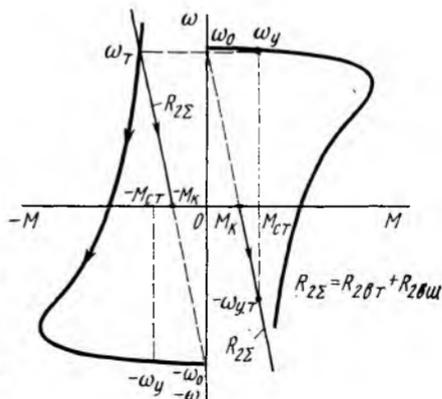


Рис. 3-13. Механические характеристики асинхронного двигателя при торможении противовключением

1) при торможении электропривода до $\omega = 0$; 2) при установившейся работе с активным моментом $M_{ст}$.

В первом случае при $\omega = 0$ двигатель отключают от сети (см. на рис. 3-13 часть характеристик в квадрантах II и IV). Если двигатель не отключить от сети, то произойдет реверс и при $-M_{ст}$ угловая скорость будет $-\omega_y$.

Во втором случае под действием активного момента $M_{ст}$ (например, спуск груза на кране) установившаяся скорость при торможении будет равна $-\omega_{y,т}$.

Динамическое торможение с независимым возбуждением получается при отключении двигателя от сети переменного тока и последующем подключении обмоток статора к сети постоянного тока. Обмотки фаз статора при питании постоянным током могут быть соединены между собой различными способами. Наиболее распространенные схемы включения представлены на рис. 3-14, а, б, в. При протекании по обмоткам статора постоянного тока возникает неподвижное относительно статора магнитное поле, под действием которого в проводниках обмотки вращающегося ротора наводится переменная э.д.с. и, следовательно, в цепи обмотки ротора проте-

кает переменный ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем статора обуславливает возникновение тормозного момента. При полном торможении ротора, когда $\omega=0$, э.д.с., ток ротора и момент становятся равными нулю. Асинхронный двигатель при динамическом торможении работает генератором, у которого генерируемая энергия рассеивается в роторной цепи.

Так как магнитный поток неподвижен в пространстве, то угловая скорость ротора будет являться той скоростью, при которой проводники ротора пересекают магнитные силовые линии поля. Отношение угловой скорости ротора к синхронной угловой скорости

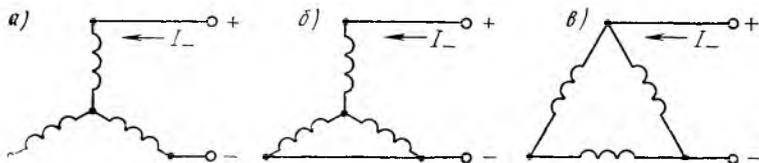


Рис. 3-14. Схемы включения при динамическом торможении с независимым возбуждением асинхронного двигателя

сти магнитного поля двигательного режима представляет собой скольжение при динамическом торможении

$$s_{\tau} = \omega/\omega_0 = \omega_*, \quad (3-30)$$

откуда

$$\omega_* = 1 - s_{\tau}. \quad (3-31)$$

Из соотношений (3-30) и (3-31) следует, что скольжение при динамическом торможении будет тем больше, чем выше угловая скорость ротора.

Так как при питании постоянным током обмотки фаз статора участвуют в создании м.д.с. по-разному, то для расчетов удобно ввести понятие эквивалентного намагничивающего тока $I_{м.эк}$. Этот ток эквивалентен такому переменному току, который при одинаковом значении в трех фазах создает такую же м.д.с., как и постоянный ток I_- в действительности протекающий в обмотке. В зависимости от способа включения обмоток статора соотношение между $I_{м.эк}$ и I_- различно. Так, для схем, приведенных на рис. 3-14, а, б, в, соответственно

$$I_{м.эк} = 0,82I_-; \quad I_{м.эк} = 0,71I_-; \quad I_{м.эк} = 0,44I_-.$$

Протекающий в цепи ротора переменный ток образует противодействующую м.д.с., которая складывается с м.д.с. статорной обмотки.

Результирующая м.д.с. создает магнитный поток, который при неподвижном роторе из-за отсутствия размагничивающего действия со стороны ротора будет равен эквивалентному. При вра-

щающемся роторе $I_M = I_{M.ЭК} - I_2'$. Поэтому с увеличением угловой скорости, а следовательно, и тока ротора значение I_M уменьшается.

Наведенная э.д.с. в обмотках фаз статора E_1 является функцией намагничивающего тока I_M . Обобщенный график этой функции, называемой *кривой намагничивания*, в относительных единицах приведен на рис. 3-15. На графике $I_{*M} = I_M/I_{1X}$, где I_{1X} — ток в обмотках фаз статора при холостом ходе двигателя с $U_{H \rightarrow M}$, когда $I_M \approx I_{1X}$. Вместе с тем э.д.с. E_1 может быть выражена через индуктивное сопротивление контура намагничивания X_M и ток I_M , т. е. $E_1 = I_M X_M$, откуда

$$X_M = E_1 / I_M. \quad (3-32)$$

Так как E_1 зависит от тока I_M нелинейно, то и X_M будет зависеть от I_M также нелинейно. Эта зависимость в относительных единицах показана на рис. 3-15.

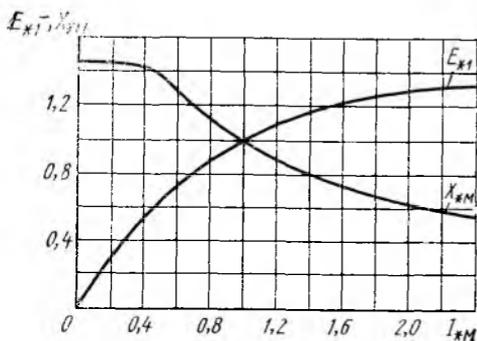


Рис. 3-15. Обобщенные зависимости э. д. с. и индуктивного сопротивления намагничивания от намагничивающего тока

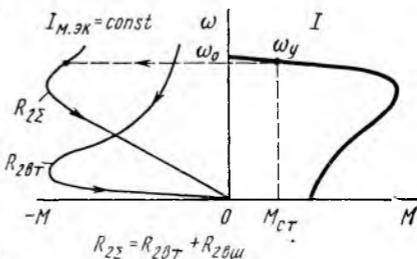


Рис. 3-16. Механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с независимым возбуждением

Уравнение механической характеристики в режиме динамического торможения аналогично (3-24):

$$M_T = 2M_{T.кp} / (s_T / s_{T.кp} + s_{T.кp} / s_T). \quad (3-33)$$

Критический (или максимальный) момент

$$M_{T.кp} = 3(I_{M.ЭК} X_M)^2 / [2\omega_0 (X_M + X_2')]. \quad (3-34)$$

Критическое скольжение, соответствующее критическому моменту,

$$s_{T.кp} = R_2' / (X_M + X_2'). \quad (3-35)$$

Анализируя последние три уравнения, можно заключить, что с увеличением внешнего сопротивления $R_{2внш}$ в цепи ротора скольжение $s_{T.кp}$ возрастает, а $M_{T.кp}$ при $I_{M.ЭК} = \text{const}$ остается неизменным. Это явление используют для поддержания тормозного момента двигателей с фазным ротором по мере снижения его угловой скорости.

Механические характеристики динамического торможения с независимым возбуждением представлены в квадранте II осей ω , M (рис. 3-16). При $\omega=0$ тормозной момент $M_T=0$, а поэтому все характеристики сходятся в одной точке. При изменении $I_{M,эк}$ критический момент на основании (3-34) изменится пропорционально $I_{M,эк}^2$.

Динамическое торможение с самовозбуждением получается при наличии конденсаторной батареи, которая подключается параллельно обмоткам фаз статора двигателя (рис. 3-17, а). Эта батарея при работе в двигательном режиме на характеристики двигателя никакого влияния не оказывает. При отключении двигателя от сети реактивная мощность, необходимая для создания магнитного потока в статоре двигателя, генерируется конденсаторами C , в связи с чем рассматриваемый режим часто называется *режимом конденсаторного торможения*.

На время торможения двигатель становится самовозбужденным асинхронным генератором, энергия торможения в котором превращается в тепловую и рассеивается затем в окружающее пространство.

Началом процесса самовозбуждения является возникновение э.д.с. в обмотках статора при вращающемся роторе за счет его остаточного намагничивания. Благодаря наличию конденсаторов появляется переменный трехфазный намагничивающий ток I_M , который, в свою очередь, увеличивает магнитный поток, а следовательно, и э.д.с. в обмотке статора, что приводит к дальнейшему увеличению намагничивающего тока, росту э.д.с. и т. д. Скорость двигателя $\omega_{в1}$, при которой начинается самовозбуждение, зависит от параметров цепи самовозбуждения — реактивного сопротивления ветви намагничивания X_M и конденсаторов X_C .

Самовозбуждение и тормозной момент появляются при скоростях выше $(0,3 \div 0,5)\omega_0$, поэтому при начальной скорости торможения, обычно превышающей указанное значение, за счет увеличения наведенной частоты переменного тока и соответствующего изменения параметров в цепи статора и ротора намагничивающий ток I_M будет меньше максимального значения. Соответственно значению намагничивающего тока двигатель будет развивать тормозной момент.

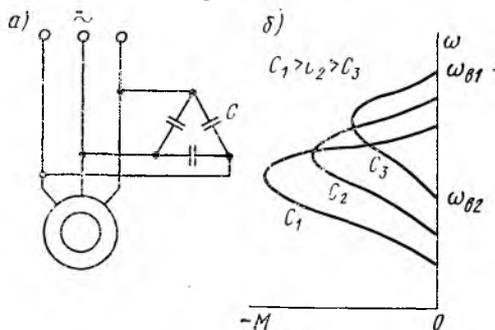


Рис. 3-17. Схема включения и механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с самовозбуждением

По мере снижения угловой скорости ротора в двигателе будут уменьшаться частота тока и индуктивное сопротивление (так как $X_L = 2\pi fL$), а увеличиваться ток намагничивания I_M и емкостное сопротивление [$X_C = 1/(2\pi fC)$]. При некоторой угловой скорости ω намагничивающий ток и соответственно тормозной момент будут иметь явно выраженный максимум (рис. 3-17, б). Дальнейшее снижение скорости приводит к уменьшению I_M , M_T , а затем и к прекращению возбуждения при скоростях $\omega_{в2}$.

Тормозной режим существует при значениях угловой скорости $\omega_{в1} - \omega_{в2}$.

При увеличении емкости конденсаторов скорости $\omega_{в1}$ и $\omega_{в2}$ (или зона действия динамического торможения с самовозбуждением) перемещаются в область более низких значений. Ширина зоны торможения определяется соотношением индуктивных сопротивлений X_M/X_R : чем больше отношение X_M/X_R , тем шире

зона действия торможения. Кроме того, изменение емкости конденсаторов приводит к изменению максимальных значений тормозного момента (рис. 3-17, б). С увеличением емкости C снижается угловая скорость $\omega_{в1}$, но растет тормозной момент двигателя.

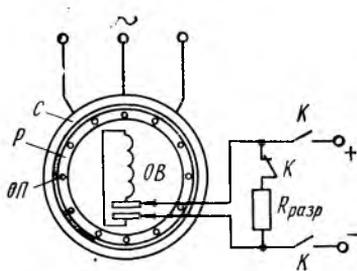


Рис. 3-18. Схема включения синхронного двигателя

§ 3-4. Механические и угловая характеристики синхронного двигателя. Регулирование возбуждения и реактивной мощности

Синхронные двигатели применяются в промышленности для нерегулируемых приводов (насосов, компрессоров и др.). Они сравнительно просты по конструкции и имеют высокие энергетические показатели (к.п.д., регулируемый $\cos \varphi$). Схема включения синхронного двигателя приведена на рис. 3-18. Этот двигатель имеет такой же, как у асинхронного двигателя, статор C с трехфазной обмоткой переменного тока. Ротор P выполнен с двумя обмотками: короткозамкнутой пусковой $ОП$ и обмоткой возбуждения $ОВ$. Короткозамкнутая обмотка служит для асинхронного пуска двигателя, а обмотка возбуждения — для возбуждения постоянным током, подводимым через контактные кольца.

Механические и угловая характеристики. Процессу пуска и режиму работы соответствуют разные механические характеристики.

При пуске двигателя обмотку статора подключают к сети переменного тока, а обмотку возбуждения замыкают контактами K на разрядное сопротивление $R_{разр}$, обычно равное (8—10)-кратному значению сопротивления обмотки возбуждения. Вращение ротора начинается под действием момента, создаваемого коротко-

замкнутой обмоткой. При этом разрядное сопротивление позволяет ограничить в допустимых пределах напряжение на обмотке *ОВ*, возникающее при больших скольжениях, и обеспечить приемлемый пусковой момент. Если же обмотку возбуждения замкнуть накоротко, то напряжение на ней станет равным нулю, но двигатель будет развивать пониженный пусковой момент. При наличии на валу двигателя значительного статического момента и пониженного пускового момента возможна устойчивая работа двигателя при пониженной угловой скорости. Так как пусковая обмотка синхронного двигателя рассчитывается на кратковременный режим работы (в пределах 20—30 с), то при работе с установившейся пониженной скоростью или при большой продолжительности пуска произойдет перегревание обмотки и ее повреждение.

При достижении двигателем скорости, соответствующей 95—98% от синхронной и называемой *подсинхронной*, в обмотку возбуждения ротора подается постоянный ток и двигатель втягивается в синхронизм. Разрядное сопротивление при этом отключается от обмотки возбуждения. Пусковая обмотка при синхронной угловой скорости автоматически исключается из работы, так как в ней не наводится э. д. с.

Механическая характеристика синхронного двигателя в процессе пуска (рис. 3-19, а) имеет две характерные точки: 1) начального пускового момента $M_{\text{пуск}}$, развиваемого при неподвижном состоянии (скольжение $s=1$); 2) подсинхронного или входного момента $M_{\text{вх}}$, развиваемого двигателем при 95%-ной синхронной угловой скорости (скольжение $s \approx 0,05$).

Статический момент нагрузки при входе двигателя в синхронизм должен быть меньше входного. Поэтому в каталогах на двигатели кроме кратности пускового тока $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ и пускового момента $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ приводится кратность входного момента $M_{\text{вх}}/M_{\text{ном}}$. Для обеспечения условий нагрузки при пуске и входе в синхронизм синхронные двигатели выполняются с пусковыми обмотками двух типов, позволяющими получить характеристику 1 или 2 (рис. 3-19, а). Характеристика 1 имеет меньший пусковой момент $M_{\text{пуск}1}$, но больший входной момент $M_{\text{вх}1}$ и приемлема для механизмов со значительным статическим моментом при пуске. Характеристика 2 имеет больший пусковой момент $M_{\text{пуск}2}$, но меньший $M_{\text{вх}2}$. Зная значение $M_{\text{вх}}$, можно построить часть пусковой

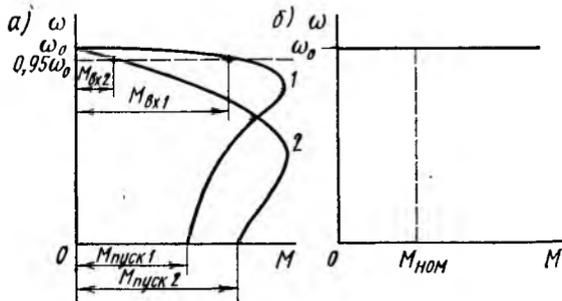


Рис. 3-19. Механические характеристики синхронного двигателя при пуске и в режиме нагрузки

характеристики в зоне вхождения двигателя в синхронный режим, так как эту характеристику при малых s можно принять прямойлинейной.

Пуск синхронных двигателей, как и асинхронных короткозамкнутых, осуществляется при подключении двигателя либо на полное (прямой пуск), либо на пониженное напряжение сети.

После процесса синхронизации угловая скорость синхронного двигателя $\omega_0 = 2\pi f_1/p$, где f_1 — частота тока в сети; p — число пар полюсов.

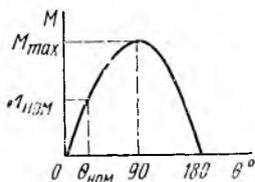


Рис. 3-20. Угловая характеристика синхронного двигателя

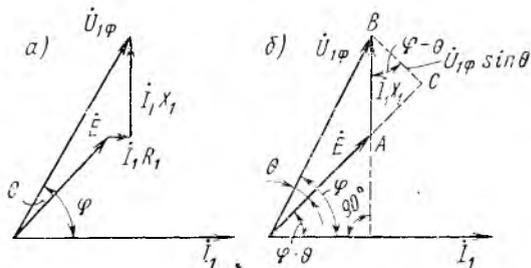


Рис. 3-21. Упрощенная векторная диаграмма синхронного двигателя

Механическая характеристика режима нагрузки синхронного двигателя представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 3-19, б). Жесткость механической характеристики $\beta = dM/d\omega = \infty$, поэтому она называется *абсолютно жесткой*. Однако синхронный двигатель работает устойчиво лишь в определенных пределах значений статического момента нагрузки. С изменением нагрузки изменяется положение осей магнитных полей статора и ротора, которое характеризуется углом θ сдвига фаз между векторами напряжения сети и э.д.с., наводимой полем ротора в обмотке статора. Зависимость момента двигателя M от угла θ называется *угловой характеристикой* синхронного двигателя (рис. 3-20).

Чтобы найти уравнение угловой характеристики, рассмотрим упрощенную векторную диаграмму синхронной машины (рис. 3-21, а). Так как активное сопротивление статора R_1 по сравнению с полным индуктивным сопротивлением X_1 достаточно мало, то без большого ущерба для точности расчета им можно пренебречь, т. е. положить $R_1 = 0$. Тогда векторная диаграмма примет вид диаграммы, изображенной на рис. 3-21, б. Из этой векторной диаграммы следует, что

$$U_{1\phi} \cos \varphi = E \cos (\varphi - \theta); \quad \cos (\varphi - \theta) = U_{1\phi} \sin \theta / (I_1 X_1). \quad (3-36)$$

Потребляемая из сети активная трехфазная мощность

$$P_3 = 3U_{1\phi} I_1 \cos \varphi.$$

Без учета потерь момент двигателя

$$M = P_3 / \omega_0 = 3U_{1\phi} I_1 \cos \varphi / \omega_0. \quad (3-37)$$

С учетом (3-36) получим уравнение угловой характеристики:

$$M = 3EU_{1\phi} \sin \theta / (\omega_0 X_1) = M_{\max} \sin \theta. \quad (3-38)$$

Из уравнения (3-38) видно, что момент синхронного двигателя пропорционален напряжению сети в первой степени. Такая зависимость момента выгодно отличает синхронный двигатель от асинхронного, у которого $M \equiv U^2$.

Как видно из характеристики $M = f(\theta)$ (рис. 3-20), устойчивая работа синхронного двигателя возможна при углах θ , меньших 90° . Обычно при номинальном моменте двигателя $\theta_{\text{ном}} = 20 \div 30^\circ$, что соответствует значениям $\sin \theta_{\text{ном}} = 0,35 \div 0,5$. Отсюда следует, что перегрузочная способность синхронного двигателя

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} = \sin 90^\circ / \sin \theta_{\text{ном}} = 2 \div 3.$$

Для специальных цепей изготавливают синхронные двигатели с перегрузочной способностью $\lambda = 3,5 \div 4$.

Регулирование возбуждения и реактивной мощности. Из основного уравнения угловой характеристики (3-38) синхронного двигателя следует, что $M_{\max} \equiv E$. Поэтому при работе синхронных двигателей в условиях ударной нагрузки для повышения их перегрузочной способности в момент резкого нарастания нагрузки на валу возбуждение машины усиливается (форсируется). Время работы с форсировкой должно быть ограничено из-за опасности перегрева обмоток двигателя.

Для быстрой остановки синхронных двигателей обычно применяется динамическое торможение с независимым возбуждением. При этом статор двигателя отключается от сети и замыкается на внешнее сопротивление, а обмотка возбуждения питается постоянным током. Если значение тока возбуждения не изменяется, то механическая характеристика синхронного двигателя в режиме динамического торможения аналогична таким же характеристикам асинхронного двигателя при различных сопротивлениях в цепи ротора.

В отличие от других двигателей переменного тока синхронный двигатель позволяет регулировать потребление реактивной мощности из сети. Это положение можно пояснить следующим образом. Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора двигателя, обусловленным активным и индуктивным сопротивлениями, то э.д.с., возникающая в обмотке статора при работе двигателя без нагрузки, равна напряжению сети. Она определяется результирующим магнитным потоком в воздушном зазоре «статор — ротор». Этот поток определяется м.д.с. обмотки статора и обмотки возбуждения. В том случае, когда ток возбуждения отсутствует, весь магнитный поток создается только током статора.

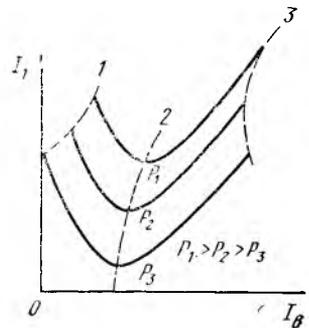


Рис. 3-22. U-образные характеристики синхронного двигателя

Синхронный двигатель при этом, так же как и асинхронный двигатель, работающий без нагрузки, потребляет из сети реактивный ток, отстающий от напряжения на 90° . Если двигатель возбудить постоянным током, то часть результирующей м.д.с. будет создана током возбуждения ротора и намагничивающий ток статора уменьшится. Дальнейшее увеличение тока возбуждения приведет к тому, что ток обмотки статора может стать размагничивающим. В противном случае магнитный поток машины оказался бы больше результирующего, соответствующего заданной э.д.с. Таким образом, при перевозбуждении синхронный двигатель будет потреблять размагничивающий ток, опережающий по фазе напряжение на угол 90° , т. е. машина будет работать генератором реактивной энергии.

Зависимость полного тока синхронного двигателя от тока возбуждения иллюстрируется U-образными характеристиками, приведенными на рис. 3-22. Здесь кривая 2 представляет собой регулировочную характеристику синхронного двигателя $I_1 = f(I_v)$ при $\cos \varphi = 1$ и является геометрическим местом минимумов U-образных характеристик, соответствующих разным значениям нагрузки P_1, P_2, P_3 . Слева от кривой 2 двигатель недо возбужден, справа — перевозбужден. Кривая 1 характеризует границу статической устойчивости двигателя; при переходе ее двигатель может выпасть из синхронизма. Кривая 3 соответствует верхней границе возбуждения по условиям допустимого нагревания обмоток возбуждения и стабильности работы (самораскачивания двигателя).

ГЛАВА 4

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

§ 4-1. Общие понятия о регулировании скорости

Многие производственные механизмы требуют в процессе работы изменения угловой скорости в тех или иных пределах. Это вызвано требованиями технологического процесса, например: обеспечения малых посадочных скоростей при спуске грузов краном, подбора и изменения скорости резания металлов на металлорежущих станках, изменения частоты вращения наматывающего устройства бумагоделательной машины при постоянной линейной скорости бумажной ленты, плавного трогания и быстрого подъема на скоростных лифтах и т. д.

Регулировать скорость движения рабочего органа производственного механизма можно двумя способами: изменением угловой скорости двигателя и изменением передаточного отношения механических передач, устанавливаемых между двигателем и рабочим органом. Регулирование за счет изменения передаточного отношения требует установки коробки скоростей, механических вариаторов или других устройств. При этом, как правило, не удается по-

лучить плавного регулирования скоростей. По этим причинам регулирование скорости стремятся осуществить регулированием основного источника механической энергии — электродвигателя.

Изменение скорости электропривода путем искусственного воздействия на его электромеханические параметры называется *регулированием*. Понятие *регулирование скорости* не следует путать с понятием *изменение скорости*, которое вызывается ростом или снижением нагрузки и происходит в соответствии со свойствами механической характеристики двигателя.

Возможные способы регулирования и управления в электроприводе подразделяются на параметрические и автоматические. Под *параметрическим способом* понимается изменение напряжения, тока, частоты или другого параметра путем установки нового значения, от которого зависит механическая характеристика двигателя. Этот способ широко используется в разомкнутых системах электропривода, где изменения регулируемого параметра осуществляются вручную. Если же изменение параметра осуществляется автоматически в зависимости от регулируемой величины (скорости, тока, напряжения, частоты и пр.) с помощью предусмотренной для этой цели обратной связи, то имеет место автоматическое регулирование параметра, а регулируемый параметр будет являться управляющим воздействием.

Скорость двигателя любого типа, кроме синхронного, можно регулировать несколькими параметрами, дающими различный технический и экономический эффект. Сопоставление способов регулирования скорости электропривода проводят по следующим показателям:

1. Диапазон изменения угловой скорости (D) — изменение угловой скорости рабочего органа при установленной нагрузке и заданной точности регулирования. Весь диапазон регулирования угловой скорости представляет собой отношение максимальной угловой скорости двигателя к минимальной при заданных пределах колебания нагрузки:

$$D = \omega_{\max} / \omega_{\min}.$$

Относительно номинальной скорости весь диапазон регулирования подразделяют на диапазоны повышения и понижения скорости электропривода. Диапазон повышения скорости — отношение максимальной угловой скорости к номинальной, принятой за единицу:

$$D_{\text{пов}} = \omega_{\max} / \omega_{\text{ном}}.$$

Диапазон понижения скорости — отношение минимальной угловой скорости, принятой за единицу, к номинальной:

$$D_{\text{пн}} = \omega_{\min} / \omega_{\text{ном}}.$$

2. Плавность регулирования характеризуется отношением двух угловых скоростей на соседних ступенях регулирования при одной

и той же нагрузке. Ее можно оценить коэффициентом плавности

$$k_{пл} = \omega_k / \omega_{k-1},$$

где ω_k и ω_{k-1} — угловые скорости на двух соседних ступенях регулирования.

Плавность регулирования тем выше, чем большее число ступеней имеет регулирующий аппарат, например реостат. Оценка плавности — чисто технический показатель, связанный с условиями управления регулирования скорости.

3. Устойчивость или стабильность скорости при изменении нагрузки определяется жесткостью механической регулировочной характеристики. При колебаниях нагрузки будет иметь место статическое падение скорости $\Delta\omega$, значение которой тем выше, чем меньше жесткость характеристики (например, на реостатной характеристике в сравнении с естественной).

4. Направление регулирования скорости, т. е. увеличение или уменьшение ее по отношению к номинальной скорости, зависит от принятого способа регулирования.

5. Экономичность работы регулируемого электропривода определяется потерями энергии в регулировочных устройствах, первоначальными денежными затратами на создание их и расходами в процессе эксплуатации.

Значение скорости обусловлено технологическими требованиями производства, а поэтому возможность продолжительной работы электропривода с любой скоростью в заданном диапазоне регулирования определяет необходимость рассмотрения дополнительного показателя регулирования скорости — допустимой нагрузки на двигатель при регулировании.

§ 4-2. Допустимая нагрузка на двигатели при работе на регулировочных характеристиках

При выборе двигателя, угловая скорость которого должна регулироваться, возникает вопрос о нагрузке, допустимой при работе на регулировочных характеристиках. Главным критерием при этом является нагревание двигателя, которое определяется значением тока и условиями охлаждения. Если при регулировании скорости пренебречь изменением условий охлаждения, то можно считать, что при работе двигателя на регулировочных характеристиках длительно допустима такая статическая нагрузка, при которой ток двигателя не превышает номинального значения. Это означает, что условием полного использования двигателя в режиме нагрузки на разных регулировочных характеристиках является постоянство тока в силовой цепи. Однако это условие не всегда выполнимо.

Регулируемые двигатели применяются на различных производственных механизмах, каждый из которых имеет соответствующую механическую характеристику $\omega = f(M_{ст})$ (рис. 4-1):

$$\begin{aligned}
 M_{ст1} &= c/\omega; & P_{ст1} &= \text{const}; \\
 M_{ст2} &= \text{const}; & P_{ст2} &= c\omega; \\
 M_{ст3} &= c\omega; & P_{ст3} &= c\omega^2; \\
 M_{ст4} &= c\omega^2; & P_{ст4} &= c\omega^3,
 \end{aligned}$$

где c — постоянная величина, не зависящая от угловой скорости.

Наиболее полное использование параметров двигателя с механизмами, требующими регулирования скорости, будет в том случае, когда изменение момента двигателя происходит в соответствии с законом изменения момента статической нагрузки. При отсутствии такого совпадения двигатель будет недогружен в одной части диапазона изменения угловой скорости и может оказаться перегруженным в другой.

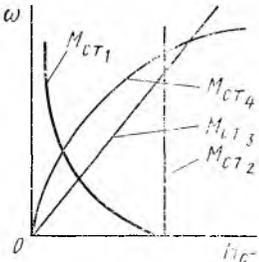


Рис. 4-1. Механические характеристики рабочих механизмов

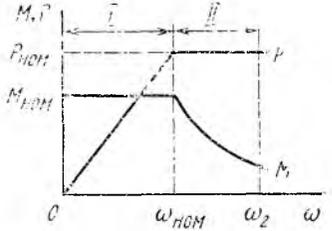


Рис. 4-2. Зависимость допустимого момента и мощности для регулируемых двигателей

Характеристики рабочих механизмов свидетельствуют о том, что угловую скорость необходимо регулировать либо при постоянном моменте двигателя, либо при постоянной мощности.

Если при всех скоростях момент на валу и ток двигателя постоянны и равны номинальным значениям, то имеет место *регулирование с постоянным моментом*. Допустимое значение (наибольшее рабочее) мощности на валу двигателя при этом изменяется по линейному закону, так как она пропорциональна угловой скорости: $P_{доп} = M_{ном}\omega$ (рис. 4-2, зона I).

Если же при всех скоростях ток двигателя равен номинальному, а мощность постоянна и равна номинальной, то имеет место *регулирование с постоянной мощностью*. При этом допустимое значение момента двигателя обратно пропорционально угловой скорости: $M_{доп} = P_{ном}/\omega$ (рис. 4-2, зона II).

Допустимые значения момента и мощности при работе на регулировочных характеристиках зависят от принятого способа регулирования.

§ 4-3. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока изменением параметров двигателя

Из уравнения электромеханической характеристики двигателей постоянного тока $\omega = [U_c - I_{\text{я}}(R_{\text{дв}} + R_{\text{вн}})] / (k\Phi)$ следует, что возможны три основных способа регулирования угловой скорости посредством изменения: 1) внешнего сопротивления в цепи якоря;

2) магнитного потока; 3) напряжения, подводимого к якору двигателя.

Изменение сопротивления в цепи якоря двигателя. Этот способ регулирования часто называется *реостатным*, так как в силовую цепь включаются резисторы (реостаты), способные пропускать большие токи. Как правило, резисторы вводят или выводят ступенями. Из уравнений (2-19), (2-20) и (2-24) видно, что регулирование угловой скорости

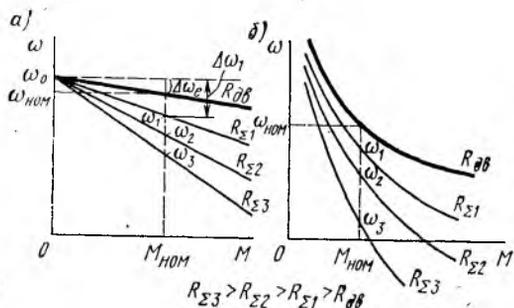


Рис. 4-3. Реостатные регулировочные характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения и последовательного возбуждения

введением сопротивлений возможно только в сторону понижения по отношению к основной угловой скорости, определяемой естественной характеристикой. Характер изменения угловой скорости двигателя независимого и последовательного возбуждения показан на рис. 4-3, а, б. Регулирование скорости этим способом осуществляется при постоянном моменте. При допустимом токе якоря $I_{\text{я. доп}} = I_{\text{ном}}$ $M_{\text{доп}} = M_{\text{ном}}$ и от значения скорости не зависит. Механическая мощность на валу двигателя $P_{\text{мх}} = M\omega$ с уменьшением угловой скорости будет снижаться, а электрическая $P_{\text{э}} = U_c I_{\text{я}} = M\omega$, при $P_{\text{ст}} = \text{const}$ будет неизменной. Таким образом, если регулирование скорости осуществляется при $M = \text{const}$, то

$$\eta = P_{\text{мх}} / P_{\text{э}} = \omega / \omega_0 = \omega_*, \quad (4-1)$$

а электрические потери мощности $P_{\text{п.э}} = P_{\text{э}} - P_{\text{мх}}$ будут прямо пропорциональны статическому падению скорости, выраженному в относительных единицах:

$$P_{\text{п.э}} = P_{\text{э}} \omega_*. \quad (4-2)$$

Рассмотренный способ регулирования относительно прост, однако имеет следующие недостатки: при снижении угловой скорости охлаждение двигателя ухудшается, вследствие чего статическая нагрузка во избежание перегрева двигателей с самовентиляцией должна быть понижена; для получения низких скоростей в цепь якоря надо включать большое сопротивление. При этом ха-

характеристика получается мягкой, скорость при незначительных колебаниях нагрузки — нестабильной. При малых значениях нагрузки скорость мало изменяется даже при включении больших сопротивлений. Указанные недостатки ограничивают диапазон регулирования до $D_{\text{шт}} \approx 1:2$.

Изменение магнитного потока двигателя. Регулирование осуществляется изменением

тока возбуждения $I_{\text{в.пар}}$ у двигателя независимого возбуждения (рис. 4-4, а) и шунтированием последовательной обмотки сопротивлением $R_{\text{ш}}$ у двигателя последовательно го возбуждения (рис. 4-4, б). Так как магнитная система двигателей в номинальном режиме обычно насыщена, то практически воздействовать на магнитный поток можно только в направлении его уменьшения, в результате чего угловая скорость двигателя возрастает (см. § 2-4). Регулировочные характеристики двигателей представ-

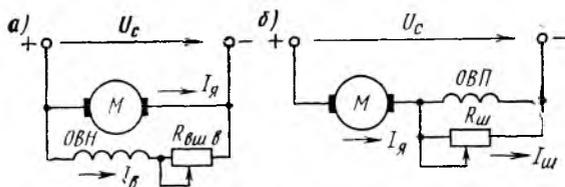


Рис. 4-4. Схемы включения двигателей постоянного тока для уменьшения магнитного потока

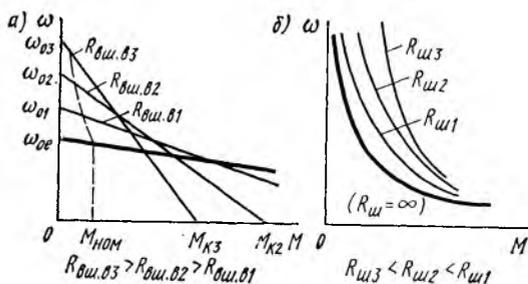


Рис. 4-5. Механические характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения и последовательного возбуждения при уменьшении магнитного потока

лены на рис. 4-5, а и б. Этот способ прост и экономичен, а поэтому довольно широко применяется, особенно для двигателей независимого возбуждения. Плавность регулирования может быть достаточно высокой, так как регулировочные реостаты $R_{\text{вш.}}$ работают в цепях с относительно небольшими токами. При работе двигателя на регулировочной характеристике с допустимым током $I_{\text{я. доп}} = I_{\text{ном}}$ мощность на валу $M_{\text{доп}} \omega = P_{\text{ном}} = \text{const}$. Поэтому данный способ регулирования относится к регулированию с постоянной мощностью. Допустимый момент двигателя в режиме нагрузки уменьшается обратно пропорционально угловой скорости. На рис. 4-5, а зависимость $M_{\text{доп}}(\omega)$ показана штриховой линией.

Диапазон повышения скорости двигателей общего назначения $D_{\text{пв}} = 1,5:1 \div 2:1$, регулируемых двигателей независимого возбуждения $D_{\text{пв}} = 3:1 \div 8:1$, двигателей последовательного возбуждения при номинальном токе $D_{\text{пв}} = 1,25:1 \div 1,5:1$.

Верхний предел регулирования угловой скорости ограничивается механической прочностью элементов якоря машины — бандажей обмотки якоря, коллектора и др.

Значение момента двигателя при основной скорости определяет его габариты и стоимость. Поэтому из двух двигателей одинаковой мощности и максимальной угловой скорости регулируемый двигатель будет иметь тем большие размеры, чем шире диапазон регулирования.

Изменение напряжения, подводимого к якорю двигателя. Способ регулирования осуществляется, как правило, с помощью регулируемых источников питания: отдельных управляемых электрических генераторов, управляемых преобразователей с использованием ртутных вентилях или тиристоров, электромашинных или магнитных усилителей и других устройств.

Подводимое напряжение на якоре двигателя, как правило, изменяют в пределах до номинального значения (см. § 2-4, 2-5), а поэтому регулирование угловой скорости возможно только в сторону понижения от основной скорости, которая определяется естественной характеристикой.

Из уравнения (2-25) следует, что при изменении э.д.с. преобразователя и соответственно напряжения на якоре угловая скорость двигателя изменяется пропорционально значениям питающего напряжения. Механические характеристики (см. рис. 2-4) параллельны друг другу. Жесткость характеристик остается постоянной, так как сопротивление цепи якоря не изменяется.

У двигателей независимого возбуждения угловая скорость регулируется при номинальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$. Вследствие этого в режиме нагрузки двигателя ток в якоре при регулировании скорости не должен превышать номинального значения. Следовательно, регулирование производится при $M_{\text{доп}} = M_{\text{ном}} = \text{const}$.

§ 4-4. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с помощью преобразователей напряжения и специальных схем

В зависимости от преобразовательных устройств электропривод с двигателями постоянного тока (или электропривод постоянного тока) разделяют на следующие системы: «генератор — двигатель» ($G-D$), где рабочий (исполнительный) двигатель получает питание от электромашинного преобразователя, состоящего из управляемого генератора постоянного тока и двигателя, вращающего генератор; «управляемый выпрямитель — двигатель» ($UV-D$), где двигатель получает питание от управляемых статических преобразователей. При питании двигателя от магнитного усилителя с выходом на постоянном токе система называется $MU-D$, а от электромашинного усилителя — $EMU-D$.

Достоинством регулирования скорости изменением напряжения с помощью преобразователей является тот факт, что для изменения э.д.с. преобразователя необходимо воздействовать не на пара-

метры главной (силовой) цепи, а на параметры цепи управляющего устройства — ток возбуждения в электромашинном преобразователе, угол регулирования вентилей в управляемом статическом преобразователе, ток подмагничивания в магнитном усилителе. Мощности этих цепей во много раз меньше мощности регулируемого двигателя, а поэтому вопрос об увеличении числа ступеней, а значит, и плавности регулирования скорости решается просто.

Система «генератор — двигатель» (Г—Д). Электрическая схема представлена на рис. 4-6.

Изменение напряжения на якоре двигателя $M2$, приводящего в движение рабочий механизм PM , осуществляется регулированием э. д. с. генератора электромашинного преобразователя ЭМП. Генератор G приводится во вращение с постоянной угловой скоростью приводным двигателем $M1$ переменного тока (асинхронным или синхронным). Обмотки возбуждения двигателя OBM и генератора OBG питаются от сети постоянного тока U_B или от регулируемых источников постоянного тока (генератора-возбудителя B , тиристорного, электромашинного или магнитного усилителей).

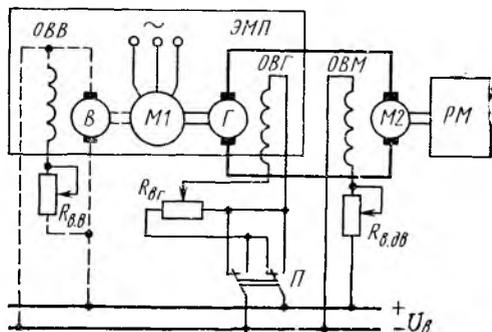


Рис. 4-6. Схема регулирования скорости двигателя с независимым возбуждением в системе Г—Д

Любой режим двигателя $M2$ (пуск, торможение, реверс и регулирование угловой скорости) получают изменением значения и знака подводимого к якору напряжения $U_{дв}$, которое отличается от э. д. с. генератора E_G на величину падения напряжения в сопротивлениях обмотки генератора R_G .

Чтобы изменить э. д. с. E_G , необходимо изменить магнитный поток генератора. Для этого изменяют ток возбуждения в обмотке OBG с помощью потенциометра $R_{B.G}$. Так как направление вращения двигателя $M1$ неизменно, то для изменения полярности э. д. с. генератора меняют направление тока возбуждения в обмотке OBG переключателем полярности P . В результате этого изменяются полярность напряжения на якоре и направление вращения двигателя.

При оценке экономичности регулирования следует иметь в виду, что в системе Г—Д осуществляется трехкратное преобразование энергии. Каждая из ступеней преобразования сопровождается потерями энергии, поэтому общий к. п. д. системы

$$\eta_{Г-д} = \eta_{M1} \eta_G \eta_{дв},$$

где η_{M1} , η_G , $\eta_{дв}$ — к. п. д. приводного (первичного) двигателя $M1$, генератора, исполнительного двигателя $M2$.

Результирующий к.п.д. системы особенно низок для электроприводов малой мощности и достигает 75—80% для электроприводов средней и большой мощности (см. рис. 4-12, а).

Скорость двигателя $M2$ регулируется ниже основной изменением э.д.с. генератора E_g при номинальном магнитном потоке двигателя (зона I), а выше основной — уменьшением магнитного потока двигателя $\Phi_{дв}$ при номинальной э.д.с. генератора (зона II) (рис. 4-7).

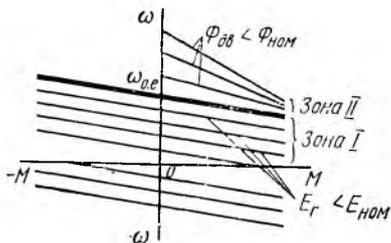


Рис. 4-7. Механические характеристики двигателя независимого возбуждения в системе Γ — D

В связи с этим регулирование в этой системе может быть одно- и двухзонным. Зона I отвечает регулированию при постоянном моменте, зона II — при постоянной мощности.

Регулировочные характеристики зоны I строятся в соответствии с уравнениями электромеханической и механической характеристик двигателя независимого возбуждения, которые для системы

Γ — D принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{E_g - I_a(R_{дв} + R_r)}{k\Phi_{дв}}; \\ \omega &= \frac{E_g}{k\Phi_{дв}} - \frac{M(R_{дв} + R_r)}{(k\Phi_{дв})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

Изменение первого слагаемого $E_g/(k\Phi_{дв})$, представляющего собой угловую скорость идеального холостого хода ω_0 при изменении э.д.с. генератора, вызывает параллельное перемещение характеристик вдоль оси ординат. Характеристики зоны II получаются при последующем уменьшении магнитного потока двигателя.

Жесткость естественной и регулировочных характеристик исполнительного двигателя в системе Γ — D [см. (4-3)] несколько ниже, чем при питании его от мощного источника напряжения, внутренним сопротивлением которого по сравнению с сопротивлением якоря генератора R_r можно пренебречь.

При однозонном регулировании диапазон понижения скорости в этой системе $D_{\text{шн}} = 1 : 10 \div 1 : 12$ и при двухзонном регулировании общий диапазон регулирования скорости $D = (20 \div 25) : 1$. Верхний предел регулирования ограничен трудностями обеспечения устойчивой работы двигателя при малых значениях магнитного потока из-за размагничивающего действия реакции якоря. Расширение диапазона регулирования угловой скорости исполнительного двигателя $M2$ и обеспечение его устойчивой работы при низких напряжениях и небольшом магнитном потоке достигается при использовании в схеме обратных связей по току и скорости с применением усилителей в цепях возбуждения. В таком случае в системе должно

быть автоматическое регулирование. Общий диапазон регулирования в системе Г—Д может достигать 100 : 1 и выше.

Система «управляемый выпрямитель — двигатель» (УВ—Д). Напряжение на якоре двигателя изменяется за счет изменения угла открывания вентилей преобразователя (выпрямителя). В связи с этим электропривод, в котором преобразовательным устройством является управляемый статический преобразователь, называется *вентильным*.

С помощью вентильных преобразователей энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока и обратно. Вентильные преобразователи за счет более высокого к.п.д. экономичнее электромашинных и имеют по сравнению с ними меньшие размеры и массу.

Для питания якорных цепей и обмоток возбуждения двигателей постоянного тока наибольшее распространение получили тиристорные преобразователи. Электроприводы с такими преобразователями называются *тиристорными*. Все разнообразие схем этих преобразователей делится на схемы одно- и двухполупериодного выпрямления с питанием от одно- или трехфазной сети переменного тока.

Схемы могут различаться: числом фаз питающего напряжения, числом пульсаций выпрямленного напряжения (одно-, двух- и трехимпульсные), а также структурой — полностью управляемые схемы, где применены только тиристоры (рис. 4-8, а, б, в), полуправляемые, где часть тиристоров заменяют неуправляемыми вентилями (диодами) (рис. 4-8, г), схемы с промежуточным выпрямителем (рис. 4-8, д). Показанные на рис. 4-8 схемы применяются в преобразователях постоянного тока, а также в схемах тиристорных электроприводов постоянного тока.

В электроприводе наибольшее распространение получили трехфазные схемы с нулевым выводом питающего трансформатора (рис. 4-8, а), в которых используется один полупериод напряжения переменного тока, и мостовые схемы (рис. 4-8, б), в которых используются оба полупериода. Мостовые схемы могут выполняться и в бестрансформаторном варианте с питанием непосредственно от трехфазной сети.

Так как к вентильному преобразователю подводится напряжение переменного тока, то после выпрямления напряжение на выходе будет пульсирующим, а следовательно, пульсирующим будет и ток в нагрузке. Для сглаживания пульсаций тока, оказывающего неблагоприятное влияние на процесс нагревания и коммутации двигателя, в цепь нагрузки включается дроссель (реактор).

Пульсирующее напряжение и ток содержат постоянную и переменную составляющие. Постоянные составляющие напряжения и тока, определяемые как средние значения за период изменения напряжения питающей сети переменного тока, часто называются *выпрямленным напряжением* и *выпрямленным током*. Средние значения напряжения и тока вентильного преобразователя определяются его параметрами и схемой соединения.

Для определения выпрямленного напряжения и тока в схеме электропривода с преобразователем, представленной на рис. 4-8, а, заменим ее эквивалентной с распределенными параметрами. Эквивалентная схема, диаграммы э.д.с., напряжений и токов представ-

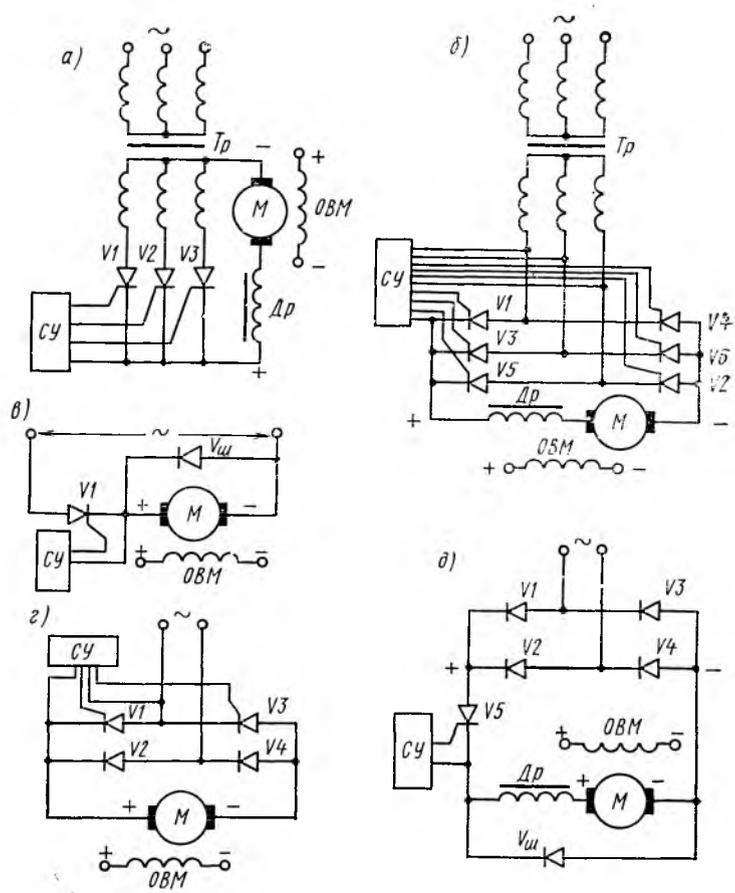


Рис. 4-8. Принципиальные схемы электроприводов с вентильными преобразователями

лены на рис. 4-9, а, б, где приняты следующие обозначения: m — число выпрямляемых полупериодов от всех фаз питающего напряжения (число пульсаций); e_{2a}, e_{2b}, e_{2c} — мгновенные значения э.д.с. вторичных обмоток трансформатора; i_a, i_b, i_c — мгновенные значения токов, протекающих через вентили; I_d — среднее значение выпрямленного тока; e_d, u_d — выпрямленные мгновенные значения э.д.с. и напряжения преобразователя; E_d — среднее значение выпрямленной э.д.с. преобразователя; U_d — среднее значение выпрямленного

напряжения на выходе преобразователя; R_T, X_T — активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора; $R_{дв}, R_{др}$ — активные сопротивления обмоток двигателя и дросселя; $L_{дв}, L_{др}$ — индуктивность обмоток двигателя и дросселя; $E_{я}$ — э.д.с. якоря двигателя; α — угол регулирования выпрямителя или запаздывания момента открывания вентилей, отсчитываемый от начала положительного полупериода анодного напряжения при однофазном выпрямлении или от точки перехода э.д.с. с одной фазы на другую у многофаз-

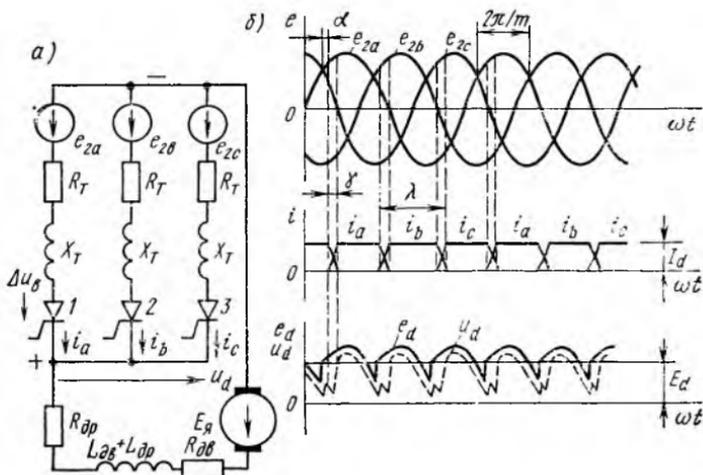


Рис. 4-9. Эквивалентная схема и диаграммы э. д. с., напряжений и токов трехфазного однополупериодного выпрямителя

ных выпрямителей; γ — период коммутации вентилей, т. е. период, когда прекращается работа одного вентиля и вступает в работу очередной вентиль; λ — интервал открытого состояния вентиля; $\Delta U_{в}$ — прямое падение напряжения на вентиле.

Наибольшее среднее значение выпрямленной э.д.с. E_{d0} в режиме непрерывного выпрямления для случая, когда вентили открываются в начале полупериода как обычные диоды ($\alpha=0$), определяется площадью, заключенной между кривой мгновенных э.д.с. e_d и осью ωt . Протяженность каждого участка выпрямляемой э.д.с. e_2 для трехфазной схемы равна $2\pi/m=2\pi/3=120$ эл. град. В этом режиме ток в нагрузке протекает непрерывно. При активно-индуктивной нагрузке внешней цепи выпрямителя (например, двигателя) интервал открытого состояния вентиля равен $2\pi/m+\gamma=120^\circ+\gamma$. Значение угла коммутации зависит от тока нагрузки и угла регулирования α и обычно составляет $0 \div 20^\circ$. Чем больше $L_{дв}+L_{др}$ по сравнению с $R_{дв}+R_{др}$, тем более пологими становятся кривые нарастания и снижения тока i в период коммутации. Процесс коммутации отражается на форме кривой выпрямленного напряжения u_d (рис. 4-9, б).

Если с помощью системы управления (СУ) задержать начало

отпирания вентиля на угол α (см. рис. 4-8), то площадь под кривой e_d уменьшится и среднее значение E_d также уменьшится. При углах регулирования $\alpha \leq \pi/6$ и любых соотношениях $L_{дв} + L_{др}$ и $R_{дв} + R_{др}$ в выпрямителе и нагрузке сохранится непрерывный ток. При дальнейшем увеличении угла управления α непрерывный ток сохраняется только при значительном преобладании индуктивности:

$$[\omega (L_{дв} + L_{др}) / (R_{дв} + R_{др})] \gg 3 \div 5.$$

Среднее значение э.д.с., создающей непрерывный ток в нагрузке,

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha. \quad (4-4)$$

Если угол регулирования изменять от 0 до 90° , то средняя выпрямленная э.д.с. будет изменяться от E_{d0} до 0. Зависимость E_d от α представляет собой *регулирующую характеристику выпрямителя*. Зависимость E_d/E_{d0} от α при однополупериодном выпрямлении с активной нагрузкой приведена на рис. 4-10.

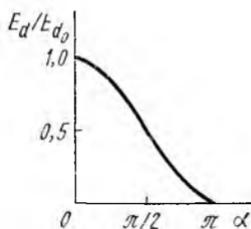


Рис. 4-10. Зависимость выпрямленной э. д. с. от угла регулирования

При значительных углах регулирования и токе $I_d \rightarrow 0$ в выпрямителе и нагрузке протекает прерывистый ток, длительность прохождения которого в вентиле оказывается меньше чем $2\pi/\omega$. В этом случае кривая тока i в нагрузке содержит интервалы нулевого тока (бестоковые паузы). Прерывистый ток вызывает повышенное нагревание

якоря двигателя. Уменьшить зону действия прерывистых токов позволяет включение в цепь якоря сглаживающего дросселя.

Среднее выпрямленное напряжение U_d на выводах преобразователя (выпрямителя) отличается от его э.д.с. на значение падения напряжения на вентиле в проводящий период (ΔU_v), падения напряжения на активном сопротивлении токопроводящей цепи и падения напряжения, обусловленного процессом коммутации вентиля:

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_v - R_{эк.пр} I_d, \quad (4-5)$$

где $R_{эк.пр}$ — эквивалентное сопротивление преобразователя; для схем одно- и двухполупериодного выпрямления соответственно $R_{эк.пр} = R_T + 0,478X_T$, $R_{эк.пр} = 2R_T + 0,955X_T$.

Уравнения электромеханической и механической характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения, питающегося от управляемого статического преобразователя (система УВ—Д), аналогичны уравнениям (2-13) и (2-16) и с учетом параметров преобразователя соответственно принимают вид

$$\omega = (E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_v - R_{\Sigma} I_a) / (k\Phi); \quad (4-6)$$

$$\omega = [(E_{a0} \cos \alpha - \Delta U_n) / k\Phi] - R_2 M / (k\Phi)^2, \quad (4-7)$$

где $R_\Sigma = R_{\text{эк.пр}} + R_{\text{дв}} + R_{\text{др}}$ — суммарное сопротивление силовой цепи; $I_\alpha = I_d$ — ток в цепи якоря, или ток преобразователя.

Из уравнений (4-6) и (4-7) видно, что при непрерывном выпрямленном токе преобразователя электромеханические и механические характеристики при $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ и $E_d = \text{var}$ представляют собой параллельные линии, наклон которых определяется величиной R_Σ (рис. 4-11). За счет относительно большого сопротивления преобразователя и введения дросселя в цепь якоря жесткость электромеханических характеристик в системе $УВ—Д$ меньше жесткости естественной характеристики.

Указанные прямолинейные характеристики отсекают на оси ординат отрезки, соответствующие скорости идеального холостого хода:

$$\omega'_0 = (E_{a0} \cos \alpha - \Delta U_n) / (k\Phi). \quad (4-8)$$

Однако в действительности скорость идеального холостого хода при выбранном значении угла регулирования α отличается от скорости, определяемой выражением (4-8). Резкий подъем скорости, показанный на рис. 4-11 штриховыми линиями,

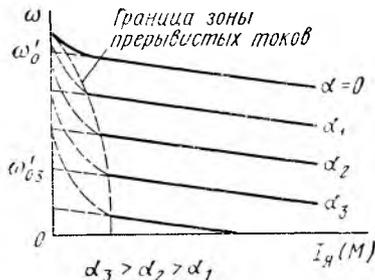


Рис. 4-11. Механические характеристики двигательного режима в системе $УВ—Д$

при малых значениях момента двигателя возникает из-за явлений, обусловленных прерывистым током якоря. Это явление особенно заметно при больших углах регулирования. Действие прерывистого тока сказывается в определенной зоне (рис. 4-11).

Электромеханические и механические характеристики двигателя при работе преобразователя в зоне прерывистых токов не могут быть выражены аналитически.

Характеристики, изображенные на рис. 4-11 в квадранте I, соответствуют двигательному режиму. В зоне изменения угла регулирования α от 0 до 90° выпрямленная э.д.с. изменяется от E_{d0} до 0. При этом практический диапазон понижения скорости $D_{\text{ши}} \approx 1 : 10 \div 1 : 20$, т. е. такой же, как в системе $\Gamma—Д$. Для расширения диапазона регулирования в системе $УВ—Д$ применяют обратные связи, т. е. переходят к автоматическому регулированию.

Коэффициент полезного действия системы $УВ—Д$ зависит как от значения нагрузки на валу двигателя, так и от его скорости при регулировании. Это связано с ухудшением показателей преобразователя при больших токах и низких напряжениях. Зависимость к.п.д. электропривода с тиристорным преобразователем $\eta_{УВ-Д}$ от угловой скорости в системе $УВ—Д$ при номинальной нагрузке на валу двигателя приведена на рис. 4-12, а. Там же для сравнения показана зависимость к.п.д. в системе $\Gamma—Д$ ($\eta_{\Gamma-Д}$). Сравнение $\eta =$

$=f(\omega_*)$ показывает, что к.п.д. электропривода, выполненного по системе $УВ—Д$, выше, чем по системе $Г—Д$.

Коэффициент мощности χ из-за искажения формы кривых выпрямленного тока и напряжения и появления гармонических составляющих в системе $УВ—Д$ определяется двумя величинами: углом сдвига φ первой гармонической составляющей тока, потребляемым преобразователем из сети, относительно напряжения сети и коэффициентом искажения того же тока:

$$d = I_{d1}/I_d, \quad (4-9)$$

где I_d — действующее значение тока, потребляемого преобразователем из сети; I_{d1} — действующее значение первой гармонической составляющей того же тока.

При большой индуктивности в цепи выпрямленного тока $\varphi = \alpha$. Тогда коэффициент мощности

$$\chi = d \cos \varphi = d \cos \alpha. \quad (4-10)$$

Вместе с тем на основании выражения (4-4) можно записать

$$\cos \alpha = E_d/E_{d0} = \omega/\omega_{ном}^+. \quad (4-11)$$

Таким образом, коэффициент мощности в системе $УВ—Д$ зависит от угловой скорости двигателя ω и от значения нагрузки на валу, определяющей I_d . Снижение угловой скорости или увеличение тока I_d приводит к уменьшению коэффициента мощности установки (рис. 4-12, б).

Чтобы повысить значение χ , применяют методы искусственной коммутации вентилей и специальные фильтры высших гармонических составляющих, что увеличивает значения $\cos \varphi$ и d .

Экономичность установки для регулирования скорости электропривода в системах $Г—Д$ и $УВ—Д$ (по сравнению, например, с реостатным регулированием скорости) определяется габаритами преобразователя, его сложностью и стоимостью оборудования. Как в системе $Г—Д$, так и в системе $УВ—Д$ дополнительные затраты, связанные с установкой дополнительных электрических машин или введением управляемого преобразователя, полностью окупаются высокой управляемостью систем, обеспечивающих возможность эффективного автоматического управления всеми режимами работы электропривода. Поэтому в настоящее время эти системы электропривода используются в основном с автоматическим регулированием.

Система «магнитный усилитель — двигатель» ($МУ—Д$). Изменение напряжения на зажимах якоря двигателя можно получить с

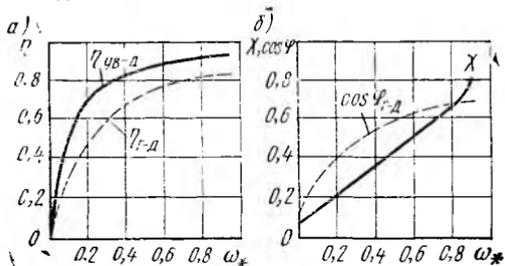


Рис. 4-12. Зависимости к. п. д. и коэффициента мощности системы $УВ—Д$ и $Г—Д$ от скорости при $M_{ст} = M_{ном}$

помощью дросселей подмагничивания и магнитных усилителей, в цепи рабочих обмоток которых включены неуправляемые вентили (рис. 4-13).

Магнитный усилитель (МУ) отличается от обычных дросселей наличием цепи самоподмагничивания — внутренней положительной обратной связи по току. За счет этого он имеет больший коэффициент усиления, меньшую массу и при одинаковом с обычным дросселем коэффициенте усиления — меньшую инерционность.

Основной регулирующий элемент магнитного усилителя — дроссель насыщения с подмагничиванием, рабочая (силовая) обмотка (РО) которого наматывается на сердечник и включается последовательно с диодом и нагрузкой. Со всеми сердечниками МУ связана обмотка подмагничивания или обмотка управления (ОУ). Рабочие цепи (рабочие обмотки вместе с диодами) могут включаться по схемам, аналогичным схемам включения управляемых вентильных преобразователей.

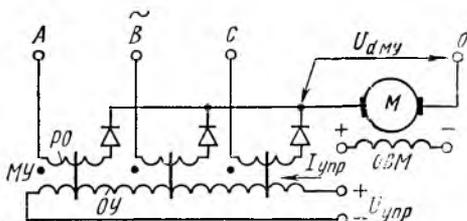


Рис. 4-13. Принципиальная схема включения трехфазного магнитного усилителя, применяемого для питания двигателя постоянного тока

Регулирование скорости двигателя M в системе МУ—Д осуществляется изменением выпрямленной э.д.с. магнитного усилителя $E_{му}$, а следовательно, напряжения $U_{d му}$ за счет изменения магнитной индукции B сердечников при уменьшении или увеличении тока подмагничивания $I_{упр}$.

Среднее значение выпрямленной э.д.с.

$$E_{му} = [mU_m / (2\pi)] (1 + B_{упр} / B_s), \quad (4-12)$$

где m — число полупериодов выпрямления (для рис. 4-13 значение $m=3$); U_m — амплитудное значение напряжения источника питания, фазное для схем с нулевым выводом трансформатора и линейное для мостовых схем; $B_{упр}$ — магнитная индукция в сердечниках от тока управления; B_s — индукция насыщения сердечников.

Значение индукции $B_{упр}$ изменяется в пределах $\pm B_s$, что соответствует изменению выпрямленной э.д.с. от 0 до mU_m/π . При снижении тока управления уменьшается $B_{упр}$ и, как следствие, при $B_s = \text{const}$ уменьшается э.д.с. магнитного усилителя, а следовательно, и напряжение на выходе $U_{d му}$. Угловая скорость двигателя при этом снижается.

Уравнения электромеханической и механической характеристик в системе МУ—Д имеют вид

$$\omega = \frac{E_{му} - \Delta U_B - (R_{му} + R_{дв}) I_a}{k\Phi}; \quad (4-13)$$

$$\omega = \frac{E_{МУ} - \Delta U_B}{k\Phi} - \frac{(R_{МУ} + R_{ЛВ}) M}{(k\Phi)^2}, \quad (4-14)$$

где ΔU_B — падение напряжения на диодах (вентильях); $R_{МУ}$ — активное сопротивление рабочих обмоток магнитного усилителя.

Так же как и для системы УВ—Д, уравнения (4-13) и (4-14) справедливы для непрерывного выпрямленного тока. Уравнения (4-13), (4-14) идентичны уравнениям (4-6) и (4-7) для системы УВ—Д. Следовательно, электромеханические и механические характеристики рассматриваемой системы электропривода будут аналогичны характеристикам системы УВ—Д в двигательном режиме и при изменении $I_{упр}$ перемещаются вдоль оси параллельно.

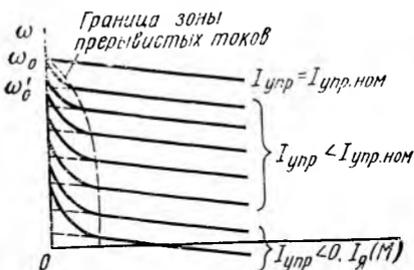
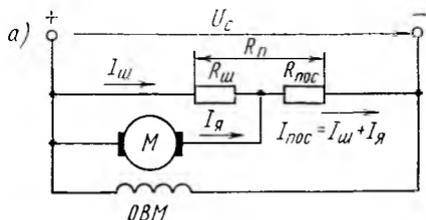


Рис. 4-14. Электромеханические характеристики системы электропривода МУ—Д

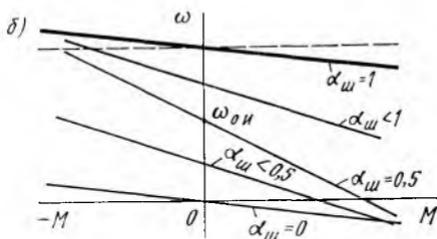


Рис. 4-15. Потенциометрическая схема и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных значениях $I_{упр}$ они представлены на рис. 4-14.

Жесткость механических характеристик в системе МУ—Д, определяемая суммарным сопротивлением цепи якоря, меньше жесткости естественной характеристики. Диапазон понижения скорости такой же, как в системе УВ—Д: $D_{шн} \approx 1 : 10 \div 1 : 20$. Для увеличения жесткости механических характеристик и соответственно расширения диапазона регулирования угловой скорости электропривода в системе МУ—Д используют обратные связи, т. е. переходят к автоматическому регулированию.

Основным недостатком системы МУ—Д является низкий к.п.д. (до 30%), что ограничивает ее применение.

Схема шунтирования якоря двигателя. Для изменения напряжения на зажимах якоря, а следовательно, и скорости двигателя применяются и более простые схемы, например реостатные делители напряжения — потенциометры. Такие схемы в электроприводе называются *схемами шунтирования якоря двигателя*. Для двигателя

постоянного тока независимого возбуждения схема шунтирования якоря представлена на рис. 4-15, а, а механические характеристики, соответствующие этой схеме, — на рис. 4-15, б. При различных соотношениях шунтирующего $R_{ш}$ и последовательного $R_{пос}$ сопротивлений подводимое к якорю двигателя напряжение можно изменять от 0 до U_c .

Угловая скорость идеального холостого хода $\omega_{0и}$ зависит от значения напряжения на якоре двигателя и определяется как

$$\omega_{0и} = \alpha_{ш} \omega_{0с},$$

где $\alpha_{ш} = R_{пш}/R_{п} < 1$ — коэффициент снижения напряжения.

Рассеиваемая потенциометром мощность при $U_c = U_{ном}$

$$P_{п.э} = I_{ш}^2 R_{ш} + I_{пос}^2 R_{пос}. \quad (4-15)$$

Из выражения (4-15) видно, что данная схема регулирования скорости неэкономична, так как с увеличением тока $I_{ш}$ или $I_{пос}$ **потери резко возрастают.**

Регулирование угловой скорости в потенциометрической схеме осуществляется

вниз от основной. Диапазон понижения скорости $D_{пш} = 1:4 \div 1:5$. Для двигателя последовательного возбуждения схема шунтирования якоря приведена на рис. 4-16, а, а механические характеристики ее — на рис. 4-16, б. В этой схеме сопротивление $R_{ш}$ шунтирует обмотку якоря двигателя, а обмотка возбуждения $ОВП$ остается включенной последовательно с добавочным сопротивлением $R_{пос}$. Независимо от тока $I_{я}$ через обмотку возбуждения все время протекает ток $I_{ш}$, создающий независимый магнитный поток двигателя и определяющий конечную угловую скорость холостого хода $\omega_{0и}$. При изменении сопротивлений $R_{ш}$ и $R_{пос}$ угловые скорости $\omega_{0и}$ и ω за счет падения напряжения на $R_{пос}$ будут уменьшаться.

Схема импульсного изменения напряжения на якоре. Угловую скорость двигателей можно регулировать не только постоянным (продолжительным), но и кратковременным (импульсным) изменением параметров (сопротивлений, напряжения и др.).

Электропривод, в котором угловая скорость регулируется за счет импульсного изменения параметров, называется *импульсным*. Уст-

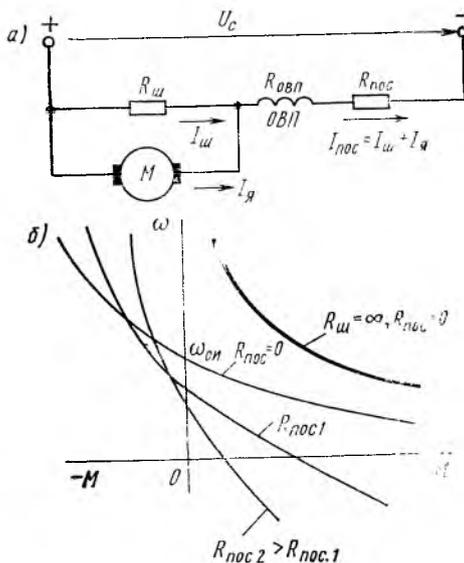


Рис. 4-16. Схема шунтирования якоря двигателя последовательного возбуждения и механические характеристики, получаемые при регулировании

ройство, осуществляющее периодическую коммутацию, называется *импульсным преобразователем* (коммутатором).

Если с помощью рассматриваемого устройства якорную цепь двигателя периодически (импульсно) подключать к источнику постоянного напряжения, то средние значения напряжения и тока якоря будут меньше, чем при постоянном его включении. При этом

средняя угловая скорость $\omega_{ср}$ двигателя в сравнении с угловой скоростью на естественной характеристике будет уменьшаться.

Принципиальные схемы импульсного изменения напряжения на якоре двигателя постоянного тока с полупроводниковыми коммутаторами K показаны на рис. 4-17, а, б. В процессе работы схемы в тот период, когда двигатель подключен к источнику питания, большая часть энергии передается от источника к рабочему органу производственного механизма через вал двигателя, а часть ее запасается в виде кинетической и электромагнитной энергии в звеньях электропривода. При отключении двигателя электропривод продолжает работать за счет запасенной энергии.

В схеме транзисторного коммутатора (рис. 4-17, а) периодическое подключение и отключение двигателя осуществляет транзистор V , работающий в режиме переключения. Транзистор, как правило, включается по схеме с общим эмиттером, так как в этом случае он имеет максимальный коэффициент усиления по мощности. Транзистор открывается при подаче на его вход отрицательного управляющего сигнала $U_{упр}$ и закрывается при изменении полярности $U_{упр}$.

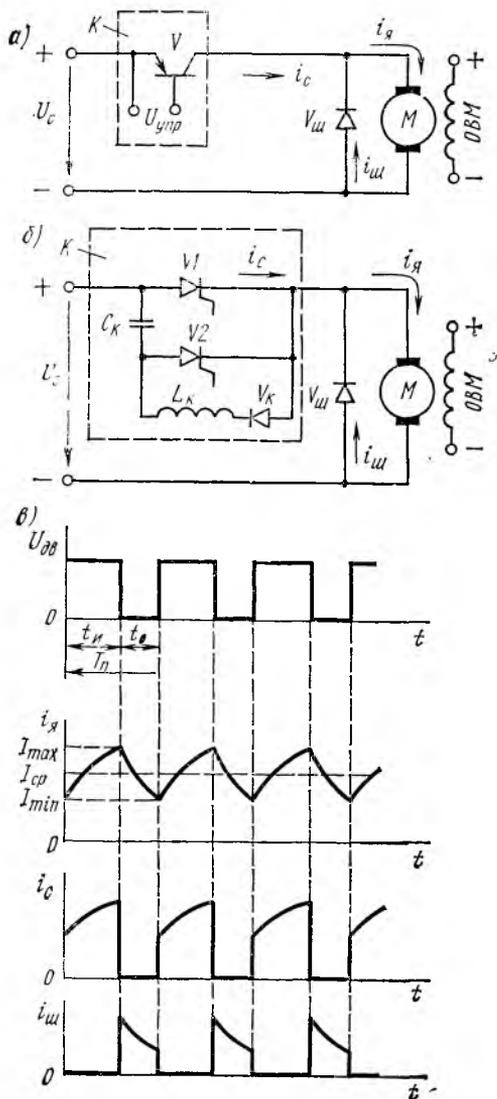


Рис. 4-17. Схемы включения при импульсном регулировании напряжения на якоре двигателя и диаграммы изменения напряжения и токов

Схема применяется при токах якоря 10—15 А.

В схеме тиристорного коммутатора (рис. 4-17, б) до открывания тиристора $V1$ для обеспечения последующего его запираания сначала открывают тиристор $V2$. При этом конденсатор C_K заряжается от питающей сети с плюсом на верхней обкладке (электроре). При открывании основного тиристора $V1$ подается напряжение на якорь двигателя и одновременно с помощью тиристора $V1$ происходит перезаряд конденсатора C_K через реактор L_K и отсекающий диод V_K . В результате C_K перезаряжается с минусом на верхней обкладке. При последующем открывании $V2$ вследствие отрицательного напряжения на C_K закроется $V1$. В дальнейшем цикл будет повторяться.

В период открытого (или включенного) состояния коммутатора K ток якоря $i_{я}$ равен току i_c , поступающему от источника питания, так как включенный параллельно якорю диод $V_{ш}$ при этом закрыт отрицательным напряжением сети на его аноде. После отключения коммутатором двигателя от сети под действием э.д.с. самоиндукции в цепи якоря продолжает проходить ток, замыкаясь через диод $V_{ш}$. В этот период $i_{я} = i_{ш}$.

На рис. 4-17, в показаны диаграммы изменения во времени напряжения на зажимах двигателя $u_{дв}$, тока якоря $i_{я}$, тока сети i_c и тока в шунтирующем диоде $i_{ш}$. Диаграммы построены при условии, что коммутация осуществляется мгновенно, т. е. цепи источника питания и диода $V_{ш}$ не обладают индуктивностью.

Коммутация в схеме обычно происходит таким образом, что период следования выходных импульсов $T_{п} = t_{н} + t_0$ остается постоянным, а изменяется лишь соотношение времени подачи импульса $t_{н}$ и отсутствия импульса t_0 (отключенного состояния K).

Способ регулирования напряжения, когда при постоянном значении напряжения источника питания изменяется длительность импульса $t_{н}$ при $T_{п} = \text{const}$ и $t_0 = \text{const}$, называется *широотно-импульсным*, а при $t_{н} = \text{const}$ и $T_{п} = \text{var}$ — *частотно-импульсным*. В электроприводе наиболее часто применяется широко-импульсное регулирование.

При $t_{н} = \text{const}$ и $t_0 = \text{const}$ в схеме будет квазиустановившийся режим работы, характеризующийся значениями I_{\max} , I_{\min} и $I_{\text{ср}} = (I_{\max} + I_{\min})/2$.

Среднее значение напряжения на якоре характеризуется коэффициентом заполнения импульсов $\nu = t_{н}/T_{п}$, или скважностью. Изменением ν изменяют $I_{\text{ср}} = I_{я}$ и среднюю угловую скорость двигателя $\omega_{\text{ср}}$. В квазиустановившемся режиме

$$R_{\text{яв}} I_{\text{ср}} = \nu U_c - k\Phi \omega_{\text{ср}} \quad (4-16)$$

Тогда уравнения электромеханической и механической характеристик при импульсном регулировании напряжения примут вид

$$\omega_{\text{ср}} = (\nu U_c - R_{\text{яв}} I_{\text{ср}}) / (k\Phi); \quad (4-17)$$

$$\omega_{\text{ср}} = \nu U_c / (k\Phi) - M R_{\text{яв}} / (k\Phi)^2. \quad (4-18)$$

Электромеханические и механические характеристики представляют собой параллельные друг другу прямые, отсекающие на оси ординат отрезки, соответствующие

$$\omega'_0 = \nu U_c / (k\Phi) = \nu \omega_0. \quad (4-19)$$

Электромеханические характеристики при импульсном регулировании напряжения представлены на рис. 4-18. При прерывистом токе в якоре независимо от значения ν угловая скорость идеального холостого хода $\omega_0 = U_c / (k\Phi)$.

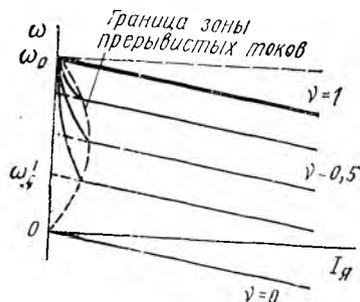


Рис. 4-18. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при импульсном регулировании напряжения на якоре

Схема импульсного регулирования напряжения отличается простотой устройства и надежностью работы. Существенным недостатком являются снижение жесткости электромеханических и механических характеристик и наличие прерывистых токов, которые приводят к дополнительному нагреванию двигателя.

§ 4-5. Регулирование скорости электроприводов переменного тока

Угловая скорость двигателей и, следовательно, электроприводов переменного тока может регулироваться следующими способами:

- 1) изменением числа пар полюсов [см. (3-11)];
- 2) изменением частоты источника напряжения [см. (3-11)];
- 3) изменением значения активного сопротивления роторной цепи у двигателей с фазным ротором [см. (3-20) и (3-26)];
- 4) изменением напряжения на двигателе в схемах автоматического управления;
- 5) применением управляемой муфты скольжения и специальных схем включения двигателей.

Дополнительные возможности регулирования угловой скорости дает импульсное управление внешним сопротивлением роторной цепи.

Изменение числа пар полюсов. Способ регулирования угловой скорости определяется зависимостью

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p,$$

где p — число пар полюсов, подлежащее изменению. Для этой цели промышленностью выпускаются специальные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, позволяющие за счет переключения обмоток изменять число пар полюсов статора. Такие двигатели называются *многоскоростными* и выполняются для регулирования как с постоянной мощностью, так и с постоянным моментом. Для изменения p существуют две схемы переключения обмо-

ток статора: с одинарной звезды на двойную (рис. 4-19, а) и с треугольника на двойную звезду (рис. 4-19, б).

Для правильного составления этих схем руководствуются обозначениями выводов обмоток статора. На рис. 4-19 цифра перед буквой *C* обозначает номер обмотки. Маркировка *C1, C2, C3* обозначает начало, а *C4, C5, C6* — конец катушек обмотки.

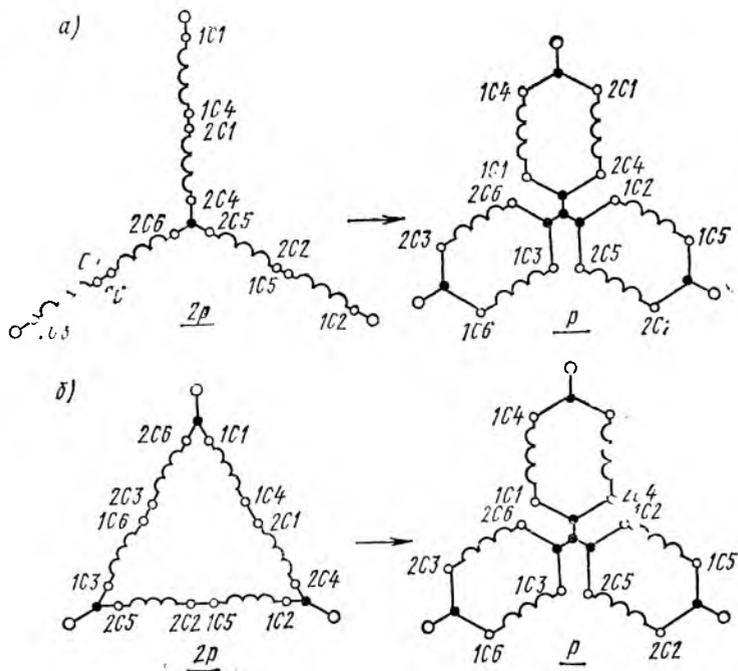


Рис. 4-19. Схемы переключения обмоток двухскоростного асинхронного двигателя

Если до переключения обмоток при схеме одинарной звезды (число пар полюсов $2p$) мощность двигателя при номинальной нагрузке

$$P_{\text{ном}\Delta} = 3I_{\text{ном}} (U_{\text{ном}}/\sqrt{3}) \cos \varphi_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta}, \quad (4-20)$$

то после переключения обмоток в схему двойной звезды (число пар полюсов p) угловая скорость возрастает в два раза, напряжение на каждой половине обмотки фазы увеличивается вдвое, мощность двигателя

$$P_{\text{ном}\Delta\Delta} = 3 \cdot 2I_{\text{ном}} (U_{\text{ном}}/\sqrt{3}) \cos \varphi_{\Delta\Delta} = 2\sqrt{3} I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta\Delta}. \quad (4-21)$$

Так как при номинальной нагрузке $\cos \varphi_{\Delta} \approx \cos \varphi_{\Delta\Delta}$, то, разделив (4-21) на (4-20), получим

$$P_{\text{ном}\Delta\Delta} = 2P_{\text{ном}\Delta}. \quad (4-22)$$

Вращающие моменты двигателя до (M_{Δ}) и после ($M_{\Delta\Delta}$) переключения остаются постоянными ($M_{\Delta} = M_{\Delta\Delta} = \text{const}$):

$$M_{\Delta} = P_{\text{ном } \Delta} / \omega; \quad M_{\Delta\Delta} = 2P_{\text{ном } \Delta} / (2\omega). \quad (4-23)$$

Механические характеристики для схем обмоток «звезда — двойная звезда» показаны на рис. 3-10, а.

При схеме соединения обмоток в треугольник (число пар полюсов $2p$)

$$P_{\text{ном } \Delta} = 3I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta}. \quad (4-24)$$

После переключения на двойную звезду (число пар полюсов p) угловая скорость возрастает, ток в фазе сети $I = 2I_{\text{ном}}$ и мощность двигателя определяется выражением (4-21). Взяв отношение (4-24) к (4-21), при равенстве $\cos \varphi_{\Delta} = \cos \varphi_{\Delta\Delta}$ получим

$$\frac{P_{\text{ном } \Delta}}{P_{\text{ном } \Delta\Delta}} = \frac{3I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta}}{2\sqrt{3}I_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta\Delta}} = 0,866, \quad (4-25)$$

т. е. при обеих схемах включения мощность двигателя остается примерно одной и той же ($P \approx \text{const}$).

Вращающие моменты двигателя

$$M_{\Delta} = P_{\text{ном } \Delta} / \omega; \quad M_{\Delta\Delta} = P_{\text{ном } \Delta\Delta} / (2\omega)$$

изменяются пропорционально изменениям угловых скоростей:

$$M_{\Delta} / M_{\Delta\Delta} \approx \omega_{\Delta\Delta} / \omega_{\Delta}, \quad (4-26)$$

где ω_{Δ} и $\omega_{\Delta\Delta}$ — угловые скорости, соответствующие схемам соединения обмоток в треугольник и в двойную звезду.

Механические характеристики для схем «треугольник — двойная звезда» изображены на рис. 3-10, б.

Способ регулирования скорости изменением числа полюсов прост в реализации и экономичен, поскольку двигатель работает с малыми скольжениями на любой из характеристик. Основным недостатком этого способа — ступенчатое регулирование и небольшое число скоростей (до четырех).

Изменение частоты питающего напряжения. При этом способе регулирование можно производить как ниже, так и выше основной скорости.

Для поддержания $\Phi = \text{const}$ при изменении частоты источника питания f_1 напряжение на обмотке статора асинхронного двигателя также должно изменяться [см. (3-27)].

На основании формулы (3-29) регулирование при $U/f_1 = \text{const}$ целесообразно для электроприводов с $M_{\text{ст}} = \text{const}$. Если $M_{\text{ст}}$ производственного механизма изменяется при регулировании скорости так, что мощность $P_{\text{ст}} = M_{\text{ст}} \omega$, то регулируемый источник переменного тока должен обеспечивать изменения U и f_1 в таких пределах, чтобы $U/\sqrt{f_1} = \text{const}$. Для вентиляторной нагрузки (см. § 1-2) при регулировании угловой скорости значения U и f_1 должны изменяться так, чтобы $U/f_1^2 = \text{const}$.

Таким образом, закон изменения напряжения определяется не только частотой f_1 , но и характером изменения момента статической нагрузки на валу двигателя.

Механические характеристики для указанных трех случаев представлены на рис. 4-20.

На рис. 4-20, а приведены регулировочные характеристики при $M_{ст} = \text{const}$, на рис. 4-20, б — при $P_{ст} = \text{const}$, на рис. 4-20, в — при $M_{ст} = \text{var}$ (вентиляторная нагрузка). Характеристики при $f_{1.1}$, $f_{1.2}$ и $f_{1.3}$ построены по формулам (3-21) и (3-24) при $f_1 = \text{var}$ с учетом законов изменения напряжения. Регулирование угловой скорости

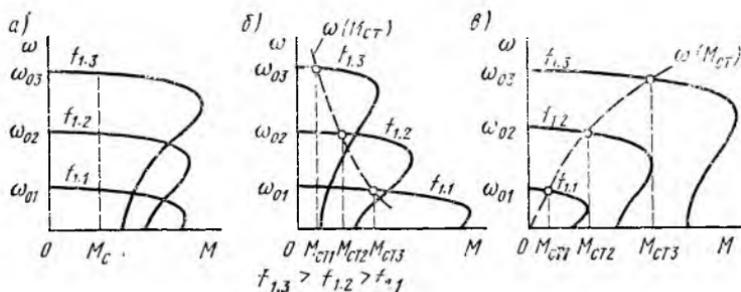


Рис. 4-20. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании изменением частоты питающего напряжения

двигателей, выполненных на частоту $f_1 = 50$ Гц, выше номинальной (повышением частоты) допустимо в 1,5—2,0 раза. Указанное ограничение обусловлено прежде всего прочностью крепления обмотки ротора, а также повышенными потерями мощности в стали статора. Регулирование скорости ниже номинальной (т. е. понижением частоты) ограничивается нестабильностью работы двигателя, в связи с чем диапазон регулирования $D_{\text{пн}} = 1 : 10 \div 1 : 15$.

Способ регулирования угловой скорости изменением f_1 позволяет получить жесткие механические характеристики (рис. 4-20). Потери мощности при работе на регулировочных характеристиках невелики, так как двигатель работает на линейных участках механических характеристик при небольших значениях скольжения ($P_{\text{п.э}} = M\omega_0 s$). При наличии соответствующего преобразователя частоты можно получить любую плавность регулирования.

Основной недостаток электроприводов с регулированием частотой — необходимость применения преобразователей частоты, имеющих относительно сложные схемы. В электроприводе применяются различные типы преобразователей частоты, которые могут быть разделены на две группы: электромашинные и вентильные.

В электромашинных преобразователях, состоящих обычно из двух двухмашинных агрегатов, источником переменной частоты служат электрические машины переменного тока. Эти преобразователи имеют ряд существенных недостатков, основные из которых—

низкий к.п.д. из-за четырехкратного преобразования энергии (60—70%), громоздкость и инерционность.

В настоящее время наибольшее распространение получили вентильные преобразователи частоты. Поэтому вентильный электропривод переменного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый преобразователь частоты, называется системой «преобразователь частоты — двигатель» (ПЧ—Д).

Появление статических преобразователей частоты расширило применение асинхронных двигателей, позволило достигнуть высоких скоростей, недостижимых для двигателей постоянного тока. При этом система регулирования получается достаточно экономичной.

В качестве статических преобразователей частоты наибольшее распространение получили две их разновидности:

1) автономный инвертор со звеном постоянного тока, который требует предварительного выпрямления переменного тока сети и последующего его инвертирования.

Выходная частота не связана с частотой сети и может изменяться от единиц до нескольких тысяч герц;

2) преобразователь с непосредственной связью (циклоконвертор), в котором совмещены функции выпрямителя и инвертора. Выходная частота такого преобразователя даже в случае применения шестифазных схем питания при частоте сети 50 Гц не превышает 15—16 Гц.

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, выполненные на тиристорах. Структурная схема электропривода с таким преобразователем показана на рис. 4-21. Преобразователь состоит из трех основных узлов: управляемого выпрямителя *В*, преобразующего энергию сети переменного тока с напряжением U_c и частотой f_1 в энергию постоянного тока при регулируемом напряжении $U_- = var$; автономного инвертора *АИ*, преобразующего энергию постоянного тока в энергию переменного тока с напряжением $U_- = var$ и частотой $f_2 = var$ на выходе; системы управления *СУ* с блоками управления выпрямителем *БУВ*, инвертором *БУИ* и блоком задания скорости *БЗС* для отдельного регулирования напряжения и частоты.

Напряжение управляемого выпрямителя регулируется как в выпрямительном, так и в инверторном режимах. В первом случае двигатель *М* работает в двигательном режиме, во втором — в режиме рекуперативного торможения.

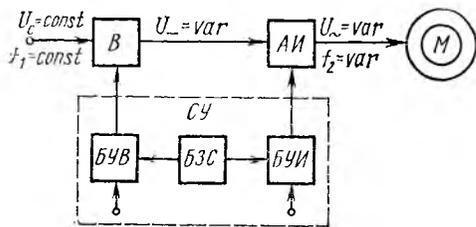


Рис. 4-21. Структурная схема асинхронного регулируемого электропривода с вентильным преобразователем частоты, имеющим промежуточное звено постоянного тока

дующего его инвертирования. Выходная частота не связана с частотой сети и может изменяться от единиц до нескольких тысяч герц;

2) преобразователь с непосредственной связью (циклоконвертор), в котором совмещены функции выпрямителя и инвертора. Выходная частота такого преобразователя даже в случае применения шестифазных схем питания при частоте сети 50 Гц не превышает 15—16 Гц.

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, выполненные на тиристорах. Структурная схема электропривода с таким преобразователем показана на рис. 4-21. Преобразователь состоит из трех основных узлов: управляемого выпрямителя *В*, преобразующего энергию сети переменного тока с напряжением U_c и частотой f_1 в энергию постоянного тока при регулируемом напряжении $U_- = var$; автономного инвертора *АИ*, преобразующего энергию постоянного тока в энергию переменного тока с напряжением $U_- = var$ и частотой $f_2 = var$ на выходе; системы управления *СУ* с блоками управления выпрямителем *БУВ*, инвертором *БУИ* и блоком задания скорости *БЗС* для отдельного регулирования напряжения и частоты.

Напряжение управляемого выпрямителя регулируется как в выпрямительном, так и в инверторном режимах. В первом случае двигатель *М* работает в двигательном режиме, во втором — в режиме рекуперативного торможения.

Автономный инвертор выполняется по различным схемам. Одна из возможных схем — схема параллельного инвертора напряжения с диодами реактивного тока и автотрансформаторной коммутацией (или с двухобмоточными коммутирующими дросселями) — изображена на рис. 4-22, а.

Тиристоры $V1—V6$ инвертора являются коммутирующими устройствами, посредством которых каждая обмотка фазы двигателя с

разной полярностью подключается к выпрямленному напряжению. Принцип действия схемы основан на разряде коммутирующего конденсатора $C1—C6$ на соответствующую половину обмотки $L1—L6$ автотрансформатора $AT1—AT3$. Последовательность открывания тиристоров соответствует их порядковым номерам в схеме. Например, если открыты тиристоры $V1$ и $V2$, то ток в двигателе проходит по фазам a и c , при этом одновременно заряжается конденсатор $C4$. Для закрывания тиристора $V1$ и открывания тиристора $V3$ одновременно подается кратковременный управляющий импульс на тиристор $V4$ (порядка десятков микросекунд) и более длительный импульс на тиристор $V3$. Открывание тиристора $V4$ вызывает разряд конденсатора $C4$ через обмотку $L4$ автотрансформатора $AT1$. В обмотке $L1$ наводится напряжение, которое запирает тиристор $V1$. Более длительный импульс, поданный на управляющий электрод тиристора $V3$, вызывает его открывание. Угол открытого состояния (или совершающего коммутацию) тиристора в этой схеме $\lambda = \pi$.

При подаче импульса $t_{\text{н}}$ (протекании тока) в катушках фаз двигателя за счет индуктивности запасается электромагнитная энергия. При паузе t_0 (закрытого состояния тиристоров) эта энергия возвращается в источник постоянного тока через диоды обратного тока $V7—V12$ в тот момент, когда мгновенные значения токов имеют направления, противоположные мгновенным значениям напряжения.

В рассматриваемом инверторе тиристоры можно выключать в любой момент времени и таким образом осуществлять широтно-импульсное регулирование выходного напряжения U_d . Широтно-импульсное регулирование за счет изменения ширины импульса U_d позволяет модулировать или изменять среднее значение напряже-

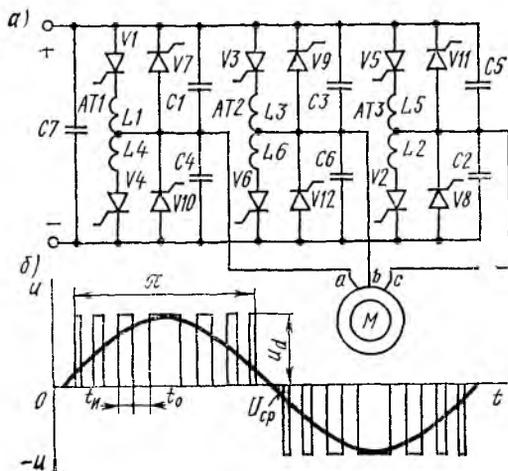


Рис. 4-22. Принципиальная схема и график формирования выходного напряжения автономного тиристорного инвертора

ния $U_{\text{ср}}$ по синусоидальному закону (рис. 4-22, б). При модулировании $U_{\text{ср}}$ разность между прямоугольной и основной (синусоидальной) формой гармонического напряжения выравнивается за счет индуктивных элементов, входящих в силовую цепь инвертора.

Система управления коммутирующими вентилями VI—V6 инвертора выполняется так, чтобы обеспечивались требуемая последовательность открывания и закрывания вентилях и порядок чередования фаз переменного тока.

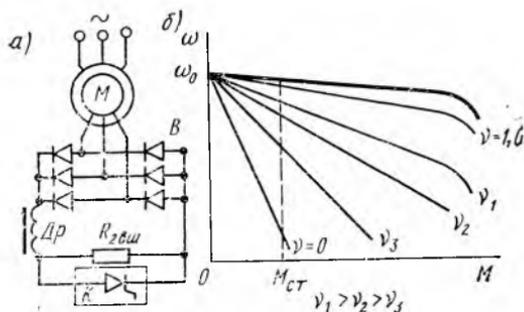


Рис. 4-23. Схема включения и механические характеристики асинхронного двигателя при импульсном регулировании внешнего сопротивления в цепи ротора

Изменение значения активного сопротивления роторной цепи двигателей с фазным ротором (реостатное регулирование). Регулирование угловой скорости осуществляется при включении в три фазы ротора внешнего сопротивления (см. рис. 3-1).

При изменении сопротивления ступенями получаются ре-

остатные характеристики (см. рис. 3-6).

Из рассмотрения этих характеристик при различных значениях $R_{2\Sigma}$ видно, что регулировать скорость можно только в сторону понижения. Как и для двигателей постоянного тока, способ регулирования для рассматриваемых двигателей имеет те же недостатки. Плавность регулирования зависит от числа ступеней включаемого сопротивления. Диапазон регулирования $D_{\text{пн}} \approx 1 : 2$.

Экономичность работы электропривода на регулировочных характеристиках при значительных скольжениях низка прежде всего из-за потерь мощности в добавочных сопротивлениях:

$$P_{\text{п.э}} = P_{\text{э}} s. \quad (4-27)$$

При импульсном изменении сопротивления плавность регулирования значительно улучшается, для чего применяется тиристорный коммутатор K (рис. 4-23, а). Внешнее сопротивление $R_{2\text{вн}}$ включается через трехфазный выпрямитель B и сглаживающий дроссель $Др$.

В квазиустановившемся режиме коммутации изменение коэффициента заполнения импульсов ν приводит к изменению эквивалентного внешнего сопротивления $R_{\text{эк}} = R_{2\text{вн}}(1 - \nu)$. В результате $R_{2\Sigma} = R_{2\text{вт}} + R_{\text{эк}}$ увеличивается и при некотором $M_{\text{ст}}$ скольжение $s \equiv \equiv R_{2\Sigma}$ также увеличивается, а угловая скорость уменьшается.

Механические характеристики при импульсном изменении сопротивления роторной цепи асинхронного двигателя приведены на рис. 4-23, б. При $\nu = 1$ механическая характеристика не совпадает с

естественной. Это объясняется тем, что тиристорный коммутатор при открытом тиристоре обладает конечным сопротивлением.

Некоторое ухудшение энергетических показателей асинхронных двигателей при импульсном изменении сопротивления в роторной цепи обусловлено помимо пульсаций выпрямленного тока наличием

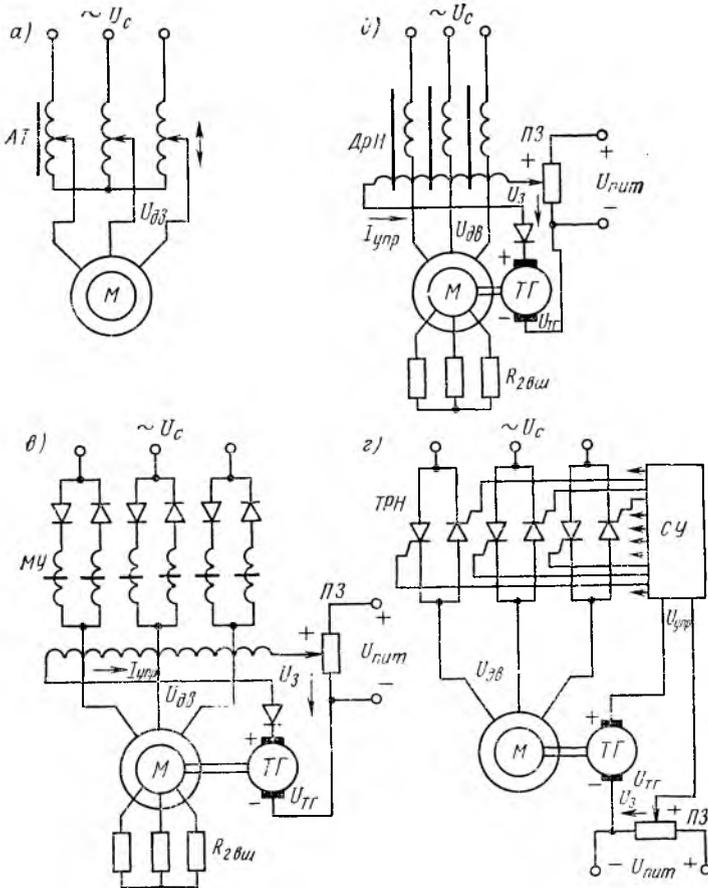


Рис. 4-24. Схемы асинхронного электропривода для регулирования угловой скорости изменением напряжения на двигателе

вентилей в цепи ротора, что приводит к искажению формы тока двигателя и, как следствие, к появлению моментов высших гармоник.

Изменение напряжения на двигателе. Регулирование угловой скорости этим способом осуществляется, как правило, в схемах автоматического управления, в которых с помощью устройства обратной связи по скорости двигателя обеспечивается непрерывное регулирование и поддержание необходимого напряжения.

Как известно, с изменением напряжения, подводимого к двигателю, изменяется вращающий момент. При некоторых значениях $M_{ст}$ и $U_{дв}$ установившаяся угловая скорость может оказаться на неустойчивой части механической характеристики. Для стабилизации этой скорости необходимо с изменением $M_{ст}$ изменять $U_{дв}$.

Для автоматического поддержания напряжения, момента двигателя и его угловой скорости при питании пониженным напряжением используются различные устройства (рис. 4-24, а—г), включаемые в цепь статора: автотрансформаторы АТ, дроссели насыщения DpH , магнитные усилители $M\dot{y}$, тиристорные регуляторы напряжения TPH . Для плавного и устойчивого регулирования напряжения схемы (рис. 4-24, б, в, г) имеют отрицательную обратную связь по скорости, осуществляемую с помощью тахогенератора $TГ$. За счет изменения коэффициента трансформации автотрансформатора АТ, или тока подмагничивания $I_{упр}$ дросселя и магнитного усилителя, или напряжения сигнала управления, влияющего на угол α отпирания тиристоров, напряжение $U_{дв}$ будет регулироваться. Необходимое значение $U_{упр}$, а следовательно, и $U_{дв}$ определяется в системе автоматического регулирования с отрицательной обратной связью разностью задающего напряжения U_3 и напряжения тахогенератора $U_{тг}$: $U_{упр} = U_3 - U_{тг}$.

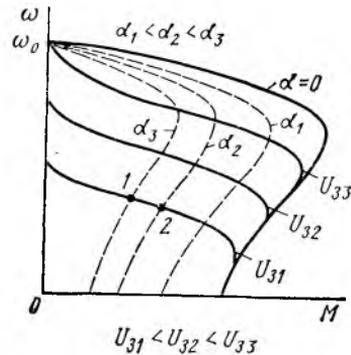


Рис. 4-25. Механические характеристики асинхронного электропривода при автоматическом изменении напряжения на двигателе

(или углах α) и $U_{дв} = \text{const}$ будут иметь вид, показанный на рис. 4-25 штриховыми линиями.

Предположим, что двигатель с TPH работал в точке 1 на характеристике α_3 (рис. 4-25). При увеличении нагрузки на его валу произойдет некоторое уменьшение его угловой скорости, сигнал управления $U_{упр} = U_3 - U_{тг}$ при постоянном U_3 возрастает. Вследствие этого угол α уменьшится, напряжение на статоре увеличится и двигатель станет развивать больший момент. Достаточно сравнительно небольшого снижения угловой скорости, чтобы момент двигателя уравновесил увеличивающийся момент нагрузки (точка 2 на характеристике с α_2). Изменяя величину U_3 , можно получить с помощью TPH семейство жестких механических характеристик.

Достоинства рассмотренных схем регулирования скорости изменением напряжения на зажимах статора — относительная их простота, надежность, удобства в эксплуатации. Так как дроссели насыщения (магнитные усилители) и тиристоры являются бесконтактными элементами автоматики, то в сочетании с асинхронным двигателем они образуют систему электропривода, надежно работающую в тяжелых производственных условиях (повышенной влажности, запыленности и т. п.).

Недостаток этих схем — невысокий к. п. д., определяемый большими потерями энергии скольжения [см. (4-21)]. Например, при диапазоне регулирования $D_{пн} = 1:2$ и постоянстве момента нагрузки значение к. п. д. электропривода составляет 50%, при диапазоне $D_{пн} = 1:5$ значение к. п. д. равно 20%; при дальнейшем увеличении диапазона к. п. д. продолжает снижаться.

Применение электромагнитной (или индукторной) муфты скольжения ЭМС. Схема такого электропривода показана на рис. 4-26, а.

Электромагнитная муфта скольжения состоит из двух вращающихся частей: якоря $Я$, выполненного в виде полого массивного стального цилиндра, и индуктора $И$, представляющего собой двухрядное зубчатое стальное колесо с торяндальной обмоткой возбуждения $ОВ$. При прохождении по обмотке возбуждения постоянного тока возникает магнитный поток, замыкающийся через якорь и ин-

дктор. Вследствие неодинаковых магнитных сопротивлений воздушного зазора над зубцами и впадинами индуктора образуется неравномерное магнитное поле по окружности якоря. При вращении ротора двигателя M соединенная с ним часть муфты перемещается относительно другой. В активной части якоря появляются вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с основным магнитным потоком создает момент, который приводит во вращение ведомую часть. Изменением задающего напряжения U_3 , снимаемого с потенциометра $ПЗ$ и усиленного усилителем $У$, регулируется ток возбуждения I_{θ} муфты. В результате этого плавно изменяется вращающий момент, а следовательно, и угловая скорость ведомого вала муфты и связанного с ним рабочего органа $РО$ производственного

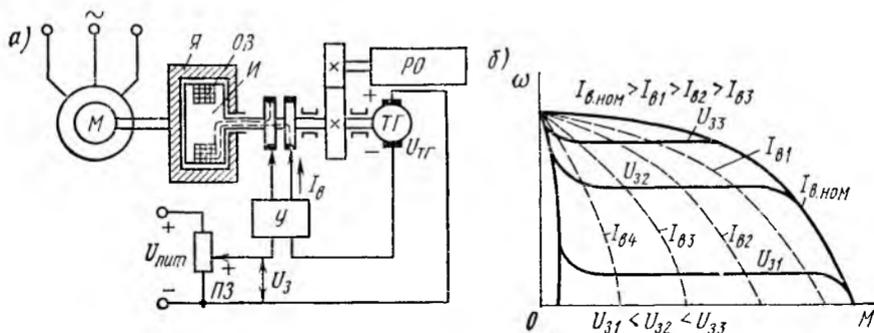


Рис. 4-26. Принципиальная схема регулирования скорости асинхронного электропривода с электромагнитной муфтой скольжения и получаемые механические характеристики

механизма. Механические характеристики электропривода с электромагнитной муфтой скольжения представлены на рис. 4-26, б. Характеристики при различных токах возбуждения показаны штриховыми линиями. С уменьшением I_{θ} механические характеристики становятся менее жесткими, чем при $I_{\theta, ном}$, поэтому при различных значениях момента нагрузки угловая скорость будет нестабильной. Для стабилизации скорости и расширения диапазона регулирования в схеме электропривода с ЭМС применяют отрицательную обратную связь по скорости, осуществляемую с помощью тахогенератора ТГ. При этом для различных значений задающего напряжения U_3 могут быть получены жесткие характеристики (рис. 4-26, б). Регулирование скорости осуществляется в сторону понижения от основной угловой скорости асинхронного двигателя. Диапазон регулирования при автоматическом регулировании может достигать $D_{\text{вн}} = 1 : 30 \div 1 : 40$.

Потери в электромагнитной муфте скольжения складываются из потерь в обмотке якоря, обусловленных скольжением и передаваемым моментом, потерь в обмотке возбуждения, потерь в стали якоря и механических потерь. При регулировании угловой скорости с постоянным моментом к. п. д. ЭМС

$$\eta_{\text{ЭМС}} \approx 1 - s. \quad (4-28)$$

К. п. д. всего электропривода с ЭМС

$$\eta = \eta_{\text{дв}}(1 - s), \quad (4-29)$$

где $\eta_{\text{дв}}$ — к. п. д. асинхронного двигателя.

Коэффициент мощности электропривода с ЭМС зависит только от передаваемого вращающего момента и определяется коэффициентом мощности асинхронного двигателя.

Способ регулирования угловой скорости с помощью ЭМС прост, имеет высокую плавность регулирования при малой мощности управления. Недостаток — значительные потери мощности в якоря, большие габариты и масса ЭМС.

Применение каскадных схем. С помощью этих схем энергию скольжения, теряющуюся при реостатном регулировании угловой скорости, полезно используют либо отдавая в сеть, либо превращая ее в механическую энергию на рабочем органе машины. В первом случае схемы называются *электрическими каскадами*, а во втором — *электромеханическими каскадами*, а электроприводы — *каскадами*.

Создание каскадов целесообразно для мощных электроприводов от 100 кВт и выше.

На рис. 4-27, а приведена схема электрического *вентильного каскада*. В качестве преобразователя электрической энергии скольжения в ней служит *вентильный инвертор И*.

Схема работает следующим образом: э. д. с. ротора двигателя *М* выпрямляется выпрямителем *В* и подается на инвертор *И*. С помощью системы управления инвертором (на схеме не показана) преобразуется выпрямленная э. д. с. ротора в трехфазную э. д. с. переменного тока, которая посредством согласующего трансформатора *Тр* возвращает энергию скольжения в сеть.

Регулирование угловой скорости в вентильном каскаде осуществляется изменением угла регулирования β вентилей в инверторном режиме. Этот угол называется *углом опережения* открывания вентилей. Он равен $\beta = \pi - \alpha$ и всегда меньше 90° .

Регулирование угловой скорости в этом каскаде осуществляется в сторону понижения от основной скорости асинхронного двигателя. Регулировочные свойства

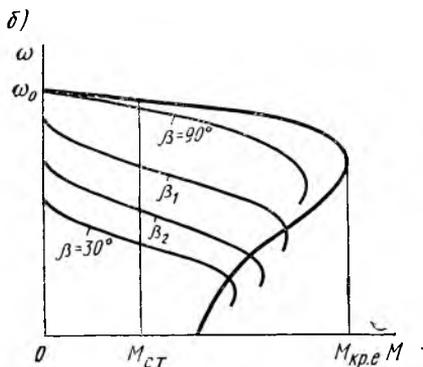
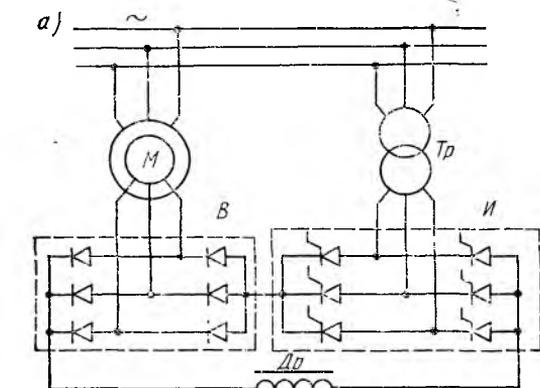


Рис. 4-27. Схема и механические характеристики машинно-вентильного каскада

ства каскада при уменьшении угла β ограничены допустимым углом инвертирования:

$$\beta_{\text{доп}} \geq \gamma_{\text{н}} + \delta,$$

где $\gamma_{\text{н}}$ — угол коммутации инвертора; δ — угол восстановления запирающих свойств вентилей (примерно 2°).

Следовательно, диапазон регулирования скорости ограничен как допустимым углом инвертирования, так и перегрузочной способностью каскада: $D_{\text{пн}} \approx 1:2 \div \pm 1:2,5$.

Механические характеристики вентильного каскада при различных углах β представлены на рис. 4-27, б.

Повышенное падение напряжения выпрямленного тока обуславливает несколько меньшую жесткость механических характеристик двигателя в сравнении с естественной характеристикой. Получаемый максимальный момент двигателя:

при регулировании по мере снижения угловой скорости уменьшается примерно до $0,75 M_{кр.е.}$

Установленная мощность вентиляльного каскада, состоящая из суммы мощностей асинхронного двигателя, выпрямителя, инвертора и согласующего трансформатора, оказывается в 2,5 раза больше мощности двигателя. Это является большим недостатком каскада. Кроме того, при сравнительно высоком к. п. д. (0,6—0,85) коэффициент мощности вентиляльного каскада оказывается невысоким из-за искажения кривых тока двигателя и трансформатора.

§ 4-6. Синхронное вращение электроприводов

Синхронное вращение электроприводов применяется в том случае, когда необходимо обеспечить одинаковый или пропорциональный закон движения нескольких механизмов, не имеющих механической связи.

Такая необходимость возникает в тех случаях, когда механическая связь между отдельными механизмами затруднена или вообще невозможна из-за большого расстояния между ними или громоздкости конструкции (например, в приводах разводных мостов, шлюзовых затворов и ворот, бумагоделательных машин и т. д.). Механическая связь в этих случаях заменяется электрической синхронной связью — электрическим валом. Системы синхронного вращения отдельных механизмов часто позволяют выполнить машинный комплекс проще, чем системы механической связи.

Электрическая синхронизация у электроприводов переменного тока достигается применением как вспомогательных машин, так и регулировочного реостата в цепи роторов исполнительных двигателей.

Схема электрического вала со вспомогательными машинами (рис. 4-28) состоит из главных двигателей $M1$ и $M2$, приводящих во вращение валы 1 и 2 , и вспомогательных машин $BM1$ и $BM2$ для синхронизации их вращения. Главные двигатели — обычно асинхронные, трехфазного тока, равные по мощности и имеющие одинаковые механические характеристики. В качестве вспомогательных машин применяют также асинхронные двигатели с фазным ротором, так как они конструктивно проще синхронных и не требуют источника постоянного тока для возбуждения. Мощность вспомогательных двигателей зависит от передаваемого ими уравнивающего момента и может быть равной или меньше мощности главных двигателей. Электродвижущие силы роторов вспомогательных машин

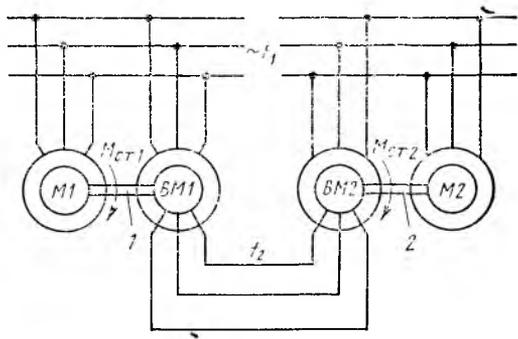


Рис. 4-28. Схема синхронного вращения электроприводов с асинхронными двигателями

направлены навстречу друг другу так, что если нагрузочные моменты $M_{ст1}$ и $M_{ст2}$ одинаковы, то результирующая э.д.с. в их цепи равна нулю и вспомогательные машины не развивают вращающих моментов. По обмоткам их статоров проходит только намагничивающий ток.

Допустим, что нагрузочные моменты неодинаковы и $M_{ст1} > M_{ст2}$. Тогда вал 1 отстанет на некоторый угол от вала 2, в цепи роторов вспомогательных машин возникает результирующая э.д.с. и появится уравнивающий ток. Возникшие в результате этого уравнивающие моменты вспомогательных машин компенсируют рассогласование и обеспечат синхронное вращение обоих валов. Так как оба вала должны вращаться с одинаковой угловой скоростью, то моменты главных двигателей должны быть одинаковы. Это может быть лишь в том случае, если машина $BM1$ работает в режиме двигателя (разгрузит двигатель $M1$), а машина $BM2$ — в режиме рекуперативного торможения и дополнительно нагружает двигатель $M2$.

Роторы вспомогательных машин могут вращаться не только в сторону вращения магнитного поля статора, но и против него. Условия работы системы при этом принципиально не изменяются. Однако в случае вращения вспомогательных машин против направления вращения магнитного поля дополнительный (уравнивающий) приток мощности будет значительно больше, чем в случае вращения машины в направлении вращения магнитного поля. Последнее объясняется тем, что э.д.с. их роторов, пропорциональные скольжению, будут в первом случае значительно большими, а следовательно, большими будут и уравнивающие моменты.

ГЛАВА 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

§ 5-1. Переходные процессы при линейных и нелинейных характеристиках двигателя и механизма

При эксплуатации электропривода двигатель подключают к сети, изменяют режимы его работы с двигательного на тормозные и наоборот. Переход электропривода от одного установившегося режима работы к другому называется *переходным режимом*.

В переходном режиме электропривода одновременно и взаимосвязанно действуют *переходные* механические, электромагнитные и тепловые процессы. Механические и электромагнитные переходные процессы в совокупности называются *электромеханическим переходным процессом*. При быстро протекающем электромеханическом переходном процессе более медленный тепловой процесс существенного влияния на изменения параметров электропривода не оказывает. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться электромеханический переходный процесс. Переходный процесс обусловлен инерционными массами электропривода и электромагнитной инерцией

обмоток электрических машин и устройств. Возникает он при пуске в ход, торможении и реверсировании электропривода, переходе двигателя с одной угловой скорости на другую или изменении параметров в схеме включения, внезапном полном или частичном снятии нагрузки.

Цель расчета переходных процессов — определение времени переходного процесса и зависимостей $\omega = f(t)$, $M = \varphi(t)$, $I = \psi(t)$; в некоторых случаях — нахождение зависимости пройденного в переходном режиме пути или угла поворота механизма.

Переходные процессы при линейных характеристиках. Из основного уравнения движения электропривода (1-19) получим

$$M - M_{ст} = J d\omega/dt,$$

где $M - M_{ст} = M_{дин}$ — положительный динамический момент.

Переписывая уравнение движения относительно dt , получим

$$dt = J d\omega / (M - M_{ст}). \quad (5-1)$$

Время, необходимое для изменения угловой скорости электропривода от начальной ω_n до конечной (установившейся) ω_y ,

$$t_{1,2} = \int_{\omega_n}^{\omega_y} J d\omega / (M - M_{ст}). \quad (5-2)$$

Из уравнения (5-2) видно, что теоретически $t = \infty$, так как при $M = M_{ст}$ величина, стоящая под знаком интеграла, стремится к бесконечности. В практических расчетах считают, что переходный процесс заканчивается приблизительно при $\omega = (0,95 \div 0,98) \omega_y$.

В простейшем случае при $M = \text{const}$, $M_{ст} = \text{const}$ и $J = \text{const}$ время переходного процесса (c)

$$t_{1,2} = J (\omega_y - \omega_n) / (M - M_{ст}), \quad (5-3)$$

где M — момент, развиваемый двигателем при переходном процессе; в формуле (5-3) считается постоянным в течение всего времени переходного процесса и принимается равным среднему моменту $M_{ср}$.

Время разгона электропривода из неподвижного состояния до номинальной скорости при $M_{ср} = \text{const}$ и $M_{ст} = \text{const}$

$$t_p = J \omega_{ном} / (M_{ср} - M_{ст}). \quad (5-4)$$

Так как при торможении двигателя $M_{ст}$ действует согласно с $M_{ср}$, то время торможения при тех же условиях от $\omega_{ном}$ до $\omega = 0$

$$t_T = J \omega_{ном} / (M_{ср} + M_{ст}). \quad (5-5)$$

Для многих рабочих машин в процессе работы $M_{ст} = \text{const}$, так как в основном он обуславливается силами трения (прокатные станы, ленточные транспортеры и др.). У этих машин зависимость $M_{ст}(\omega)$ выражается прямой линией, параллельной оси ординат (см. рис. 1-4, а, б), т. е. считается, что характеристика механизма линейная.

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения и асинхронного двигателя с фазным ротором с введенным внешним сопротивлением в цепи ротора уравнение прямолинейной механической характеристики [см. (2-19)]

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Пусть разгон электропривода начинается по реостатной характеристике двигателя (рис. 5-1). Величина $\Delta\omega$ может быть найдена из пропорции, составленной для двух подобных треугольников:

$$\Delta\omega/M_{ст} = \omega_0/M_K,$$

откуда

$$\Delta\omega = (\omega_0/M_K) M_{ст}.$$

Учитывая, что $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_y$, получим

$$M_{ст} = [(\omega_0 - \omega_y)/\omega_0] M_K. \quad (5.6)$$

Установившаяся скорость

$$\omega_y = \omega_0 - (\omega_0/M_K) M_{ст} \quad (5-7)$$

или

$$\omega_y = \omega_0 (M_K - M_{ст})/M_K. \quad (5-7a)$$

Уравнения (5-7) и (5-7 а) также являются уравнениями механической характеристики.

Для решения уравнения движения электропривода

$$M = M_{ст} + Jd\omega/dt$$

необходимо знать зависимость $M_{ст}$ от ω . При $M_{ст} = \text{const}$ уравнение (5-7) после дифференцирования примет вид

$$d\omega/dt = -(\omega_0/M_K) (dM/dt). \quad (5-8)$$

Подставим полученное выражение (5-8) в уравнение движения электропривода:

$$M = M_{ст} - J(\omega_0/M_K) (dM/dt). \quad (5-9)$$

Величина $J\omega_0/M_K$ при $M_{ст} = \text{const}$ в этом уравнении называется *электромеханической постоянной времени* T_m , выражается в секундах и характеризует интенсивность протекания переходного процесса. *Электромеханической постоянной времени* называется время, в течение которого электропривод, обладая моментом инерции J , разгоняется из неподвижного состояния до угловой скорости идеального холостого хода ω_0 под действием неизменного момента, равного моменту короткого замыкания M_K (или начальному пусковому моменту) двигателя:

$$T_m = J\omega_0/M_K. \quad (5-10)$$

Так как M_K на реостатных характеристиках определяется активным сопротивлением R_Σ якорной или роторной цепи, то для двигателя постоянного тока независимого возбуждения при учете (2-7), (2-9) и (2-30)

$$T_M = J\omega_0/M_K = JR_\Sigma/(k\Phi)^2 = JR_\Sigma/c^2, \quad (5-10a)$$

а для асинхронного двигателя

$$T_M = J\omega_0/M_K = J\omega_0 s_{ном}/M_{ном}. \quad (5-10б)$$

Как видно из выражений (5-10), (5-10 а) и (5-10 б), постоянная времени T_M не зависит от нагрузки на валу двигателя и с увеличением сопротивления в цепи якоря или ротора увеличивается (так как M_K при этом уменьшается).

Из уравнения (5-9) после разделения переменных получим

$$dM/(M - M_{ст}) = -dt/T_M. \quad (5-9a)$$

Проинтегрируем и обозначим постоянную интегрирования через $\ln C$. Тогда

$$\ln(M - M_{ст}) = -t/T_M + \ln C. \quad (5-11)$$

Величину C определим из начальных условий пуска: $t=0$; $M=M_K$; $C=M_K - M_{ст}$. Подставим значение C в уравнение (5-11) и перенесем $\ln C$ в левую часть:

$$\ln[(M - M_{ст})/(M_K - M_{ст})] = -t/T_M. \quad (5-12)$$

После потенцирования

$$(M - M_{ст})/(M_K - M_{ст}) = e^{-t/T_M}. \quad (5-13)$$

Решая уравнение относительно M , получим закон изменения момента:

$$M = M_{ст}(1 - e^{-t/T_M}) + M_K e^{-t/T_M}. \quad (5-14)$$

Перепишывая уравнение (5-12) относительно t , найдем время переходного процесса:

$$t = T_M \ln[(M_K - M_{ст})/(M - M_{ст})]. \quad (5-15)$$

При линейных механических характеристиках двигателя, когда $M \equiv I$, закон изменения тока аналогичен закону (5-14):

$$I = I_{ст}(1 - e^{-t/T_M}) + I_K e^{-t/T_M}. \quad (5-16)$$

В формулах (5-14) и (5-16) $M_{ст}$ и $I_{ст}$ — момент и ток двигателя в режиме нагрузки; t — текущее значение времени от начала переходного периода.

Уравнения (5-14) и (5-16) приведены для случая, когда электропривод разгоняется из неподвижного состояния при пусковом (или начальном) моменте M_K и токе I_K . Для этого случая изменение M и I показано на рис. 5-2.

В общем случае, когда выбраны или заданы начальные значения M_n и I_n , уравнения (5-14) и (5-16) могут быть представлены в виде

$$M = M_{ст} + (M_n - M_{ст}) e^{-t/T_M}; \quad (5-17)$$

$$I = I_{ст} + (I_n - I_{ст}) e^{-t/T_M}. \quad (5-18)$$

Обычно при пуске и разгоне электропривода применяют пусковой реостат, ступени которого выводят последовательно закорачивая

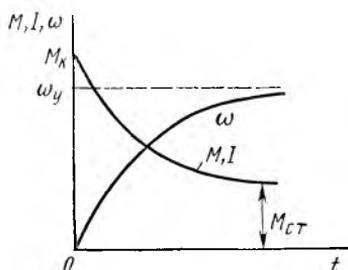


Рис. 5-2. Кривые изменения момента тока и скорости при разгоне электропривода под нагрузкой

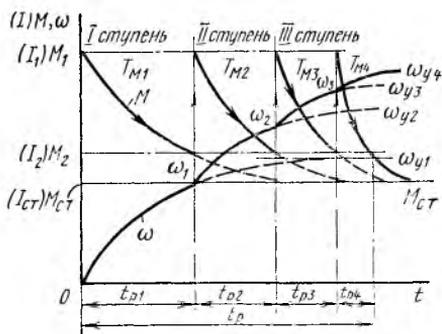


Рис. 5-3. Графики переходного процесса при ступенчатом реостатном пуске двигателя

вая (шунтируя) отдельные его секции. При этом электропривод переходит с одной (более мягкой) реостатной характеристики на другую (более жесткую) характеристику с меньшим сопротивлением R_{Σ} . Начальный пусковой момент M_1 (ток I_1) двигателя, выбираемый по условиям коммутации тока или допустимости пускового момента, на каждой ступени разгона стремятся поддерживать неизменным (рис. 5-3).

Момент M_2 (ток I_2), при котором происходит шунтирование пусковых ступеней, принимают несколько большим, чем $M_{ст}$ ($I_{ст}$). Таким образом, на каждой пусковой ступени момент (ток) поддерживают соответственно в пределах от M_1 до M_2 (или от I_1 до I_2).

Так как момент и угловая скорость двигателя связаны между собой линейно, то уравнение для изменения угловой скорости во времени аналогично (5-17):

$$\omega = \omega_y + (\omega_n - \omega_y) e^{-t/T_M}. \quad (5-19)$$

Если считать, что разгон электропривода заканчивается при угловой скорости $(0,95 \div 0,98) \omega_y$, то время переходного процесса до скорости $0,95 \omega_y$ составляет $t_p = 3T_M$, а до скорости $0,98 \omega_y - t_p = 4T_M$.

Исходя из уравнений (5-17) — (5-19) на рис. 5-3 построены кривые переходного процесса момента (тока) и угловой скорости, от-

вечашающие реостатному пуску в три ступени. Соответствующее время разгона на реостатных характеристиках обозначено t_{p1} , t_{p2} , t_{p3} , а время выхода на естественную характеристику — t_{p4} . Суммарное время разгона электропривода $t_p = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4}$. Переходный процесс заканчивается при $M = M_{ст}$.

В отличие от процесса пуска и разгона электропривода процесс торможения чаще всего происходит при одной ступени реостата в силовой цепи двигателя.

Переходные процессы для момента, тока и угловой скорости описываются уравнениями, аналогичными уравнениям (5-17), (5-18)

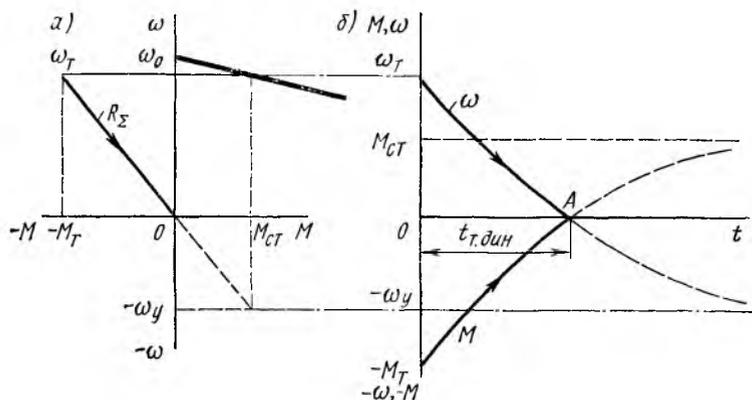


Рис. 5-4. Механические характеристики и графики переходного процесса при динамическом торможении двигателя

и (5-19), в которых начальные условия — момент, ток и скорость перед торможением: $-M_T$, $-I_T$, ω_T . Установившимися значениями при этом являются $M_{ст}$, $I_{ст}$ и $-\omega_y$, которые установились бы в случае активного момента нагрузки (рис. 5-4, а). Электромеханическая постоянная времени для режима динамического торможения и торможения противовключением

$$T_{м.лин} = J \frac{\omega_T}{M_T}; \quad T_{м.нв} = J \frac{\omega_T}{M_T - M_k},$$

где M_k — момент короткого замыкания на тормозной характеристике (см. рис. 2-8, 3-13).

Время торможения t_T при соответствующих T_M для динамического торможения и торможения противовключением соответственно

$$t_{T,лин} = T_{м.лин} \ln [(M_T + M_{ст})/M_{ст}]; \quad (5-20)$$

$$t_{T,нв} = T_{м.нв} \ln [(M_T + M_{ст})/(M_k + M_{ст})]. \quad (5-21)$$

Переходный процесс при торможении до полного останова электропривода заканчивается при $\omega = 0$. Для динамического торможения кривые изменения M и ω до точки A ($\omega = 0$) показаны на рис. 5-4, б.

Переходные процессы при нелинейных характеристиках. Ряд производственных механизмов (вентиляторы, насосы, некоторые механизмы трения) имеют нелинейную механическую характеристику, т. е. с увеличением угловой скорости момент $M_{ст}$ не остается постоянным и не описывается линейной зависимостью. Двигатели последовательного и смешанного возбуждения и асинхронные двигатели в неустойчивой части механической характеристики имеют также нелинейную зависимость $\omega = f(M)$.

При работе таких двигателей со статическими нагрузками указанных механизмов переходные процессы $M = \varphi(t)$, $I = \psi(t)$ и $\omega = f(t)$ не могут быть описаны уравнениями (5-17), (5-18) и (5-19). Однако нелинейные характеристики можно разбить на 2—3 участка, каждый из которых с достаточной для практики точностью может быть принят линейным, и воспользоваться для каждого из этих участков указанными уравнениями.

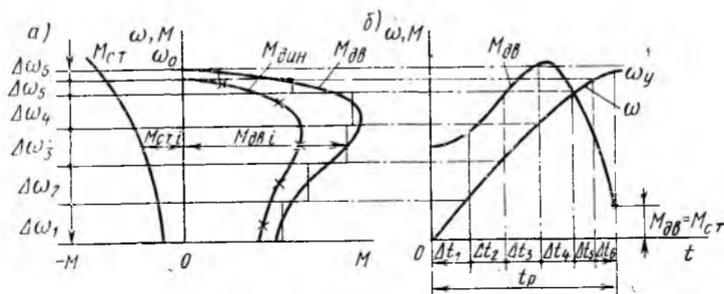


Рис. 5-5. Нелинейные механические характеристики и графики переходного процесса при разгоне электропривода

Наиболее часто для расчетов переходных процессов при нелинейных характеристиках применяют графо-аналитический метод. Этот метод основан на использовании выражений (5-3) — (5-5). Рассмотрим применение его, например, в электроприводе с вентиляторной статической нагрузкой и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

Механические характеристики двигателя и механизма представлены на рис. 5-5, а. Для построения зависимости $\omega = f(t)$ находят разность моментов двигателя и механизма, т. е. $M - M_{ст} = \xi(\omega)$ или $M_{дин} = \xi(\omega)$. Ординату угловой скорости разбивают на ряд участков, для каждого из которых на основании (5-3) справедливо выражение

$$\Delta t_i = J \Delta \omega_i / (M_{дв i} - M_{ст i}), \quad (5-22)$$

где $\Delta \omega_i$ — изменение скорости электропривода от начального до конечного значения за отрезок времени Δt_i ; $M_{дв i} - M_{ст i} = M_{дин i}$ — значение среднего избыточного момента на i -м участке.

Общее время переходного процесса представляет собой сумму отрезков времени, т. е. $\sum \Delta t_i$. На рис. 5-5, а в результате сложения $M_{дв}$ и $M_{ст}$ получена характеристика $M_{дин} = \xi(\omega)$. В соответствии с выражением (5-22) на рис. 5-5, б построен переходный процесс угловой скорости и момента при разгоне электропривода до ω_y , где $t_p = \sum \Delta t_{1-6}$.

§ 5-2. Переходные процессы в системах электропривода с преобразовательными устройствами

В § 5-1 рассматривались переходные процессы при питании двигателя от сети с неизменным напряжением. При питании двигателей от управляемых преобразователей по системам Г—Д, УВ—Д, ПЧ—Д переходные процессы пуска и торможения следуют за по-

степенным изменением э.д.с., напряжения или частоты переменного тока во времени.

Постепенное изменение этих параметров достигается путем подачи на вход системы управления преобразователя сигнала управления в виде напряжения $U_{упр}$. Если $U_{упр}$ изменять во времени по определенному закону, то можно сформировать необходимый переходный процесс. Рассмотрим наиболее типичную в этом отношении систему «управляемый выпрямитель — двигатель» с тиристорным выпрямителем.

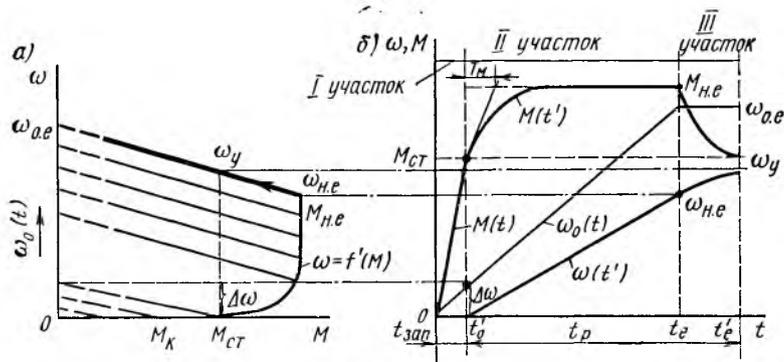


Рис. 5-6. Динамическая механическая характеристика и графики изменения угловой скорости и момента двигателя в системе УВ—Д при пуске с реактивным моментом статической нагрузки

Тиристорный выпрямитель практически не обладает инерционностью, поэтому можно считать, что его э.д.с. следует за изменениями во времени сигнала управления $U_{упр}$. Пуск и разгон электропривода осуществляются обычно при изменении э.д.с. преобразователя $e_{пр}$ от нуля до номинального значения $E_{пр.ном}$ по линейному закону

$$e_{пр} = k_e t,$$

где k_e — коэффициент, характеризующий скорость нарастания $e_{пр}$.

Переходный процесс в электроприводе начинается с момента подключения двигателя к источнику питания, напряжение которого в начальный момент времени равно нулю. Если момент сопротивления механизма $M_{ст}$ реактивный, то при увеличении напряжения преобразователя якорь двигателя еще не начинает вращаться, так как в течение некоторого времени момент двигателя M_K будет меньше момента $M_{ст}$ (рис. 5-6, а). При этом ускорение $\epsilon_{пр}$, с которым изменяется э.д.с. преобразователя, будет положительным и значение $\omega_0(t) = \epsilon_{пр} t$ также будет положительно, что свидетельствует о процессе разгона двигателя. Вращение двигателя начинается при $M = M_{ст}$, $E_{пр} = IR = M_{ст} R / (k\Phi)$, что соответствует увеличению $\omega_0(t)$ до значения $\Delta\omega$.

Время до начала движения электропривода, в течение которого нарастают $\epsilon_{\text{пр}}$ и M , называется *временем запаздывания* $t_{\text{зап}}$. Таким образом, время $t_{\text{зап}}$ будет определять участок I переходного процесса.

Для промежутка времени $t_{\text{зап}}$, когда скорость еще равна нулю, момент изменяется во времени по линейному закону (рис. 5-6, б, участок I). Для дальнейшего увеличения скорости электропривода

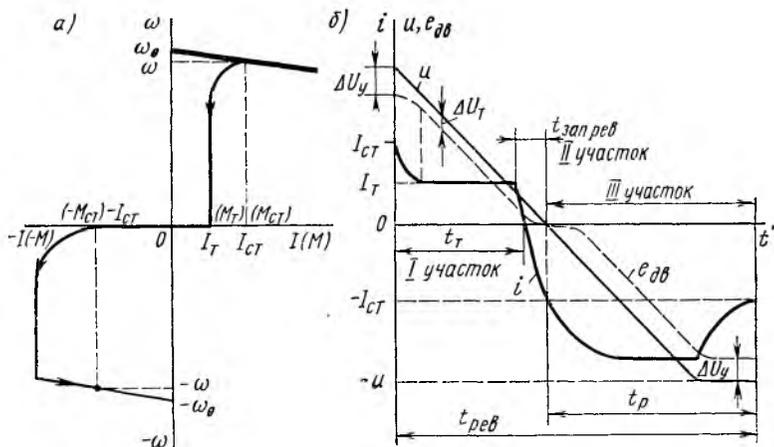


Рис. 5-7. Динамические характеристики и графики изменения u , e , i во времени при реверсе с реактивным моментом нагрузки в системе УВ—Д

напряжение на выходе преобразователя, пропорциональное $\epsilon_{\text{пр}}$, также должно увеличиваться по линейному закону. Значение избыточного или динамического момента, равного $M - M_{CT}$, при разгоне электропривода будут изменяться по кривой $\omega = f(M)$, показанной на рис. 5-6, а, от точки $M = M_{CT}$ при $\omega = 0$ до точки с $\omega = \omega_y$. Кривая $\omega = f'(M)$, связывающая значения ω и M в переходном процессе, называется *динамической механической характеристикой двигателя*.

Значения угловой скорости и момента двигателя в процессе разгона электропривода изменяются по динамической характеристике до точки начальных значений момента $M_{н.е}$ и скорости $\omega_{н.е}$. Этому перемещению рабочей точки на графике $\omega(t)$, $M(t)$ (рис. 5-6, б) соответствует изменение момента $M(t')$ и $\omega(t')$ на участке II от начального времени отсчета t_0' до конечного t_e . Изменения угловой скорости и момента при разгоне электропривода на естественной характеристике двигателя до ω_y и M_{CT} показаны на участке III от точки t_e до t_e' . Общее время разгона t_p равно времени разгона от t_0' до t_e' .

В процессе торможения электропривода момент и скорость изменяются по тем же законам, но при этом $\epsilon_{\text{пр}} < 0$. Динамическая характеристика для процессов торможения и реверса показана на

рис. 5-7, а, а зависимость $i = \psi(t)$, u , $e_{дв} = f'(t)$ — на рис. 5-7, б. В процессе установившегося движения электропривода падение напряжения в силовой цепи

$$\Delta U_y = I_{ст} R_{\Sigma},$$

где $I_{ст}$ и R_{Σ} — ток и суммарное сопротивление силовой цепи двигателя и преобразователя.

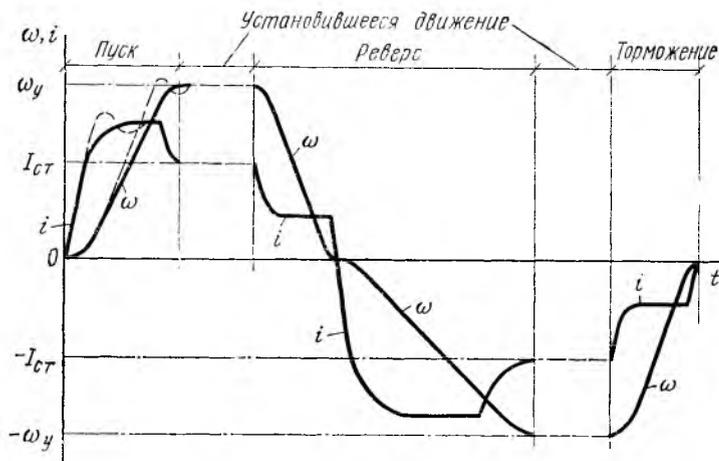


Рис. 5-8. Графики переходных процессов ω , i в реверсивной системе УВ—Д

В начале торможения электропривода с реактивной нагрузкой ток I_T становится меньше $I_{ст}$, что объясняется линейным уменьшением $E_{пр}$.

Падение напряжения в силовой цепи при торможении ΔU_T , определяемое произведением $I_T R_{\Sigma}$, меньше установившегося значения ΔU_y , так как $I_T < I_{ст}$. Величины I_T и ΔU_T до конца торможения остаются неизменными. Зависимости $e_{дв}(t)$ и $u(t)$ показаны на рис. 5-7, б.

Когда статический момент реактивной нагрузки изменяется скачком от $M_{ст}$ до $-M_{ст}$, для того чтобы угловая скорость изменила направление на противоположное, необходимо изменить в якоре направление тока и увеличить его по модулю до значений, превышающих ток $-I_{ст}$.

Время, в течение которого изменяются значения тока от I_T до $-I_{ст}$, называется *временем запаздывания* при реверсе $t_{зап.рев}$. Это время аналогично времени запаздывания при пуске. В течение $t_{зап.рев}$ ток якоря изменяется по линейному закону (рис. 5-7, б).

После того как ток достигнет значения $-I_{ст}$, начинается разгон электропривода в противоположном направлении. Изменения значений тока и э.д.с. двигателя во времени при разгоне показаны на участке III. Время реверса

$$t_{\text{рев}} = t_{\tau} + t_{\text{зап.рев}} + t_{\text{р.}}$$

На рис. 5-8 показаны примерные кривые изменения угловой скорости и тока двигателя в системе «управляемый выпрямитель — двигатель» с линейным изменением э.д.с. преобразователя при пуске, реверсе и торможении до $\omega = 0$. На этом же рисунке штриховыми линиями показаны колебательные процессы тока i и угловой скорости ω в переходном режиме.

Выбором соответствующего закона изменения э.д.с. преобразователя можно обеспечить формирование и более сложных законов изменения параметров электропривода.

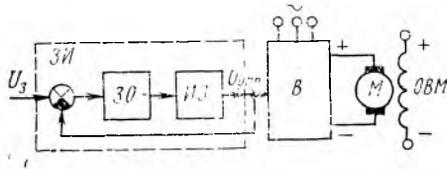


Рис. 5-9. Структурная схема электропривода с линейным датчиком интенсивности

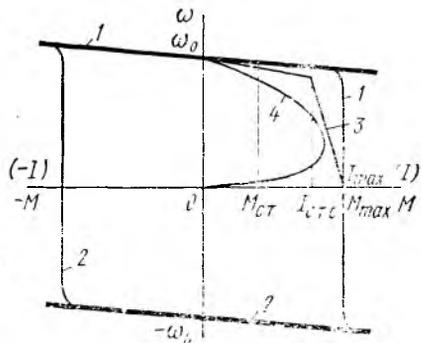


Рис. 5-10. Оптимальные и действительные механические характеристики в системе электропривода с отсечкой по току

Описанный способ пуска и разгона электропривода для системы $УВ—Д$ может быть применен и для системы $ПЧ—Д$ переменного тока. В этом случае при одновременном изменении напряжения преобразователя $U_{\text{пр}}$ и частоты $f_{\text{пр}}$, так чтобы $U_{\text{пр}}/f_{\text{пр}} = \text{const}$, каждому значению $f_{\text{пр}}$ соответствует механическая характеристика двигателя, определяемая точкой $\omega_0 = 2\pi f_{\text{пр}}/p$. Для разных значений $f_{\text{пр}}$ получается семейство таких характеристик, причем они практически линейны на рабочих участках (где $s < s_{\text{кр}}$) и перемещаются вдоль оси ординат параллельно (см. рис. 3-9).

В системе $УВ—Д$ формирование линейного процесса нарастания э.д.с. преобразователя не представляет затруднений и обеспечивается включением на вход управляемого выпрямителя $В$ датчика интенсивности $ЗИ$ нарастания во времени сигнала $U_{\text{упр}}$ (рис. 5-9). Датчик интенсивности имеет два звена: звено ограничения сигнала $ЗО$ и интегрирующее звено $ИЗ$. В начальный момент пуска электропривода звено ограничения под действием задающего сигнала $U_3 = k\omega_0$ переходит в состояние глубокого насыщения и выдает на вход интегрирующего звена постоянный сигнал, обеспечивающий выход и нарастание управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ с темпом, требуемым для получения допустимого ускорения электропривода. По мере возрастания $U_{\text{упр}}$ из-за отрицательной обратной связи результирующий сигнал на входе $ЗО$ уменьшается и в конце переходного процесса выводит $ЗИ$ на линейную часть его характеристики. Темп

нарастания $U_{\text{упр}}$ быстро уменьшается, и при $U_3 = U_{\text{упр max}}$ наступает равновесие.

При уменьшении выходного сигнала скачком до нуля сигнал отрицательной обратной связи по напряжению $U_{\text{упр}}$ обеспечивает изменение знака сигнала на выходе ЗО. Происходит процесс постепенного уменьшения сигнала $U_{\text{упр}}$ по тому же закону, что и пуск. Торможение электропривода осуществляется с допустимым ускорением.

Формирование линейного нарастания э.д.с. преобразователя обеспечивает высокую стабильность максимально допустимого ускорения электропривода. Формирование оптимального момента состоит в поддержании наибольшего значения при пуске и торможении электропривода. В случаях, когда желательнее ускоренное протекание переходных процессов при пуске, реверсе и торможении, необходимо, чтобы наибольший момент двигателя изменялся по ломаным кривым 1 и 2 $\omega = f(M)$ (рис. 5-10). Статические характеристики такого вида называются *экскаваторными*, так как в случае увеличения нагрузки $M_{\text{ст}}$ до M_{max} за счет обратных связей в системе электропривода наступает ограничение момента и снижение угловой скорости двигателя до нуля (что характерно для механизмов напора и подъема экскаватора). За счет тех же обратных связей поддерживается максимальный момент M_{max} при пуске и торможении электропривода.

Формирование экскаваторной статической характеристики требует регулирования двух координат электропривода — угловой скорости (э.д.с. двигателя, напряжения) и тока (момента) двигателя. Регулирование каждой из этих переменных связано с согласованием работ различных обратных связей и устранением их возможного неблагоприятного взаимного влияния, что вызывает применение достаточно сложных регулирующих устройств.

Если в системе электропривода использовать обратную связь только по току (токовую отсечку), то статическая характеристика примет вид ломаной 3, которая значительно отличается от желаемой характеристики 1. Динамическая же характеристика 4 из-за инерционности в системе управления примет вид кривой.

Из сравнения статической и динамической характеристик следует, что использование электропривода по допустимому току при различных угловых скоростях различно. Это обусловлено тем, что при заданном значении M_{max} (или I_{max}) увеличивается фактическое время переходного процесса в сравнении с временем оптимального закона регулирования.

Существенное улучшение динамических свойств в рассматриваемых системах достигается введением отсечки по скорости и использованием формирующей положительной обратной связи по напряжению.

При ограничении темпа нарастания тока с помощью гибкой обратной связи по току якоря замкнутые схемы автоматического управления обеспечивают формирование переходных процессов, весьма близких к оптимальным.

РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ, ТОРМОЗНЫХ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

§ 6-1. Расчет сопротивлений для двигателей постоянного тока

Ранее было выяснено, что для ограничения тока при пуске двигателей постоянного тока, когда э. д. с. якоря $E=0$, необходимо в цепь якоря вводить токоограничивающее сопротивление. Устройство, служащее для введения и вывода сопротивления в цепи якоря в период пуска и разгона электропривода, называется *пусковым реостатом*.

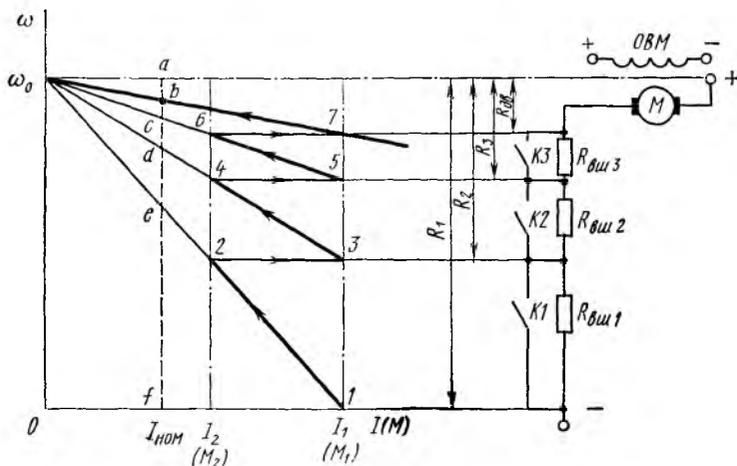


Рис. 6-1. Схема включения и пусковые реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Введение и выведение сопротивлений производится ступенчато (секциями). Такой же реостат используют и для регулирования угловой скорости двигателя, но тогда он называется *регулирующим*.

Пусковые сопротивления. Для пуска и торможения электроприводов требуются определенные значения моментов. Их определяют соответствующим расчетом сопротивлений в силовой цепи двигателя. Рассматриваемые ниже методы расчетов справедливы для номинальных значений питающего напряжения и магнитного потока.

Графо-аналитический метод. Схема включения и пусковые реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения показаны на рис. 6-1. Там же приведены обозначения расчетных величин. Сопротивления R_1, R_2, R_3 называются *сопротивлениями ступеней*; сопротивления $R_{вш1}, R_{вш2}, R_{вш3}$ — *сопротивлениями секций*. Наибольшее значение тока I_1

(момента M_1) при пуске ограничивается требованием допустимой коммутации тока якоря и для двигателей общего назначения принимается равным

$$I_{\max} = I_1 = (2,0 \div 2,5) I_{\text{ном}}$$

В ряде случаев максимальный пусковой ток на первой реостатной характеристике ограничивается не условиями коммутации, а допустимым пусковым моментом или ускорением.

Минимальное значение тока I_2 (момента M_2) при шунтировании секций пускового реостата определяется статической нагрузкой и в условиях нормального пуска принимается равным

$$I_{\min} = I_2 = (1,1 \div 1,2) I_{\text{ст}}$$

Ток I_2 называется *током переключения*.

Если требуется повышенная плавность пуска, то минимальное значение пускового тока (момента) принимается большим, чем при нормальных условиях, но это влечет за собой увеличение числа пусковых ступеней.

Построение пусковой диаграммы статических характеристик производится в следующем порядке (рис. 6-1):

1) строится естественная характеристика, для которой параметры определяются по формулам § 2-4; в итоге находятся координаты двух точек: ω_0 при $I=0$ и $\omega_{\text{ном}}$ при $I_{\text{ном}}$; через эти точки проводится прямая линия;

2) задаются токами I_1 и I_2 (M_1 и M_2) в пределах указанных выше значений;

3) строится первая реостатная характеристика, которая проводится через точки I и ω_0 ;

4) строятся реостатные характеристики последующих ступеней, для чего из точек 2, 4, 6 проводятся горизонтальные линии до пересечения с вертикалью $I_1(M_1)$ в точках 3, 5, 7. Через точки пересечения в точку ω_0 проводятся реостатные характеристики.

Построение считается удачным, если выход на естественную характеристику происходит в точке 7 на линии $I_1(M_1)$. В противном случае изменяют пределы I_1 и I_2 .

В соответствии с характеристикой 1—2 угловая скорость двигателя увеличивается до значения, определяемого положением точки 2. При этой скорости шунтируется первая секция реостата (замыкается контакт $K1$). Угловая скорость двигателя из-за инерции механической системы электропривода не может измениться мгновенно, а момент быстро растет, поэтому переход на новую характеристику практически осуществляется по линии, параллельной оси абсцисс.

Далее двигатель будет ускоряться соответственно прямой 3—4 до точки 4, и когда замкнется контакт $K2$, произойдет переход на следующую характеристику. После замыкания $K3$ наступит последний этап пуска двигателя, т. е. переход на естественную характеристику. Если при пуске статический момент на валу двигателя соответствует номинальному, то двигатель по окончании пуска ра-

ботаает на естественной характеристике с угловой скоростью $\omega_{ном}$.

При графо-аналитическом методе расчета пусковых сопротивлений с прямолинейными электромеханическими или механическими характеристиками отрезок $0 - \omega_0$ (рис. 6-1) в масштабе сопротивления принимается равным $R_{ном}$. Тогда отрезки, отсекаемые реостатными характеристиками на вертикальной линии номинального тока (или момента), будут представлять собой сопротивления секций и ступеней пускового реостата.

Если ординату af , равную $R_{ном}$ в относительных единицах, принять равной единице ($af=1$), то ординаты ae , ad , ac , ab равны соответственно сопротивлениям пусковых ступеней якорной цепи двигателя R_1 , R_2 , R_3 . Вычитанием из указанных ординат внутреннего сопротивления двигателя, отмеченного отрезком ab , получаем сопротивления отдельных ступеней (соответствующие ординатам be , bd и bc).

Для перехода от сопротивлений, выраженных в относительных единицах, к сопротивлениям, выраженным в омах, производится соответствующий перерасчет:

$$R_{1-3} = R_* R'_{ном},$$

где $R_* = ae/af = ad/af$ и ac/af .

Отдельные секции реостата $R_{вш1}$, $R_{вш2}$ и $R_{вш3}$ (рис. 6-1) имеют сопротивления, соответствующие отрезкам de , cd и bc . По имеющимся значениям сопротивлений ступеней сопротивления секций находят так:

$$R_{вш1} = R_1 - R_2; \quad R_{вш2} = R_2 - R_3; \quad R_{вш3} = R_3 - R_{лв}.$$

Аналитический метод. Отношение I_1/I_2 обозначим через λ . Для трехступенчатого пуска (рис. 6-1) с токами переключения I_1 и I_2 из условия равновесия электрической цепи следует, что

$$\lambda = I_1/I_2 = M_1/M_2 = R_1/R_2 = R_2/R_3 = R_3/R_{лв}. \quad (6-1)$$

Сопротивление первой пусковой ступени, ограничивающее пусковой ток значением I_1 ,

$$R_1 = U_c/I_1.$$

Тогда сопротивления пусковых ступеней из соотношения (6-1)

$$R_2 = R_1/\lambda; \quad R_3 = R_2/\lambda = R_1/\lambda^2; \quad R_{лв} = R_3/\lambda = R_1/\lambda^3 \quad (6-2)$$

или

$$R_1 = R_2\lambda; \quad R_2 = R_3\lambda; \quad R_3 = R_{лв}\lambda. \quad (6-2a)$$

Если известны токи I_1 и I_2 , то число ступеней

$$m = \frac{\lg \frac{1}{R_{*лв} I_{*1}}}{\lg (I_{*1}/I_{*2})} \quad \text{или} \quad m = \frac{\lg \frac{1}{R_{*лв} M_{*1}}}{\lg (M_{*1}/M_{*2})}. \quad (6-3)$$

Если число m при подсчетах оказывается дробным, то необходимо изменить M_1 или M_2 .

Тормозные сопротивления. Сопротивления для торможения рассчитываются на основании выражений (2-30), (2-32) и (2-33). При торможении противовключением в соответствии с (2-32) внешнее сопротивление $R_{вщ.дв}$ в цепи якоря

$$R_{вщ.пв} = [(U_c + E)/I_T] - R_{дв}, \quad (6-4)$$

где E — э. д. с. якоря при начальной угловой скорости торможения ω_2 [см. (2-34)]; I_T — допустимый начальный ток при торможении.

Для динамического торможения внешнее сопротивление [см. (2-33)]

$$R_{вщ.лин} = (E/I_T) - R_{дв}. \quad (6-5)$$

Регулировочные сопротивления. Чтобы получить угловую скорость, меньшую скорости на естественной характеристике при номинальной нагрузке, сопротивление рассчитывают по формулам для двигателей независимого и последовательного возбуждений соответственно

$$R_{вщR} = R_{ном} (1 - \omega_{номR}/\omega_0) - R_{дв}; \quad (6-6)$$

$$R_{вщR} = R_{ном} (1 - \omega_{номR}/\omega_{ном}) (1 - R_{яв}/R_{ном}), \quad (6-6.)$$

где $\omega_{номR}$ — угловая скорость на реостатной характеристике при номинальном токе.

Для нескольких ступеней пуска, торможения и регулирования угловой скорости двигателя сопротивления каждой ступени определяют при соответствующих значениях угловых скоростей на реостатных характеристиках.

Пример 6.1. Производственный механизм приводится в движение двигателем постоянного тока параллельного возбуждения. Пуск электропривода предполагается осуществить с помощью реостата в четыре ступени.

Определить значение сопротивления пускового реостата и время разгона электропривода до номинальной угловой скорости.

Каталожные данные двигателя: $P_{ном} = 14$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $I_{ном} = 74$ А; $n_{ном} = 1500$ об/мин ($\omega_{ном} = 157$ рад/с); момент инерции якоря $J_{дв} = 0,16$ кг·м²; сопротивление нагретых обмоток якоря, обмоток добавочных полюсов и последовательной обмотки $R_{дв} = 0,174$ Ом.

Данные механизма: приведенный к валу двигателя момент инерции механизма $J_M = 0,7$ $J_{дв}$; приведенный к валу двигателя момент статической нагрузки $M_{ст} = 0,8$ $M_{ном}$ двигателя. Ограничения динамического момента нет.

Решение. Момент инерции электропривода

$$J = J_{дв} + J_M = 0,16 + 0,7 \cdot 0,16 = 0,272 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном} = 14 \cdot 10^3 / 157 = 89,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент статической нагрузки

$$M_{ст} = 0,8 M_{ном} = 0,8 \cdot 89,1 = 71,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{ном} = U_{ном}/I_{ном} = 220/74 = 2,97 \text{ Ом}.$$

Относительное сопротивление двигателя

$$R_{*дв} = R_{дв}/R_{ном} = 0,174/2,97 = 0,058.$$

Принимаем максимальный пусковой ток $I_1 = 2,2 I_{ном}$ или $I_{*1} = 2,2$.
 Отношение пускового тока I_1 к току переключения I_2

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt[m]{\frac{1}{R_{*дв} I_{*1}}} = \sqrt[4]{\frac{1}{0,058 \cdot 2,2}} = 1,67,$$

где $m = 4$ — число пусковых ступеней.

Сопротивления секций пускового реостата

$$R_{вш4} = R_{дв}/(\lambda - 1) = 0,174(1,67 - 1) = 0,12 \text{ Ом};$$

$$R_{вш3} = R_{вш4}\lambda = 0,12 \cdot 1,67 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$R_{вш2} = R_{вш3}\lambda = 0,2 \cdot 1,67 = 0,334 \text{ Ом};$$

$$R_{вш1} = R_{вш2}\lambda = 0,334 \cdot 1,67 = 0,557 \text{ Ом}.$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{п.р} = \sum R_{вш(1-4)} = 0,12 + 0,2 + 0,334 + 0,557 = 1,21 \text{ Ом}.$$

Ток переключения ступеней

$$I_{*2} = I_{*1}/\lambda = 2,2/1,67 = 1,32.$$

Среднее значение тока двигателя при разгоне электропривода

$$I_{*ср} = 0,5(I_{*1} + I_{*2}) = 0,5(2,2 + 1,32) = 1,76.$$

Среднее значение тока отвечает среднему моменту двигателя

$$M_{ср} = 1,76 M_{ном} = 1,76 \cdot 89,1 = 156,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Время разгона электропривода до номинальной угловой скорости

$$t_p = J \frac{\omega_{ном}}{M_{ср} - M_{ст}} = 0,272 \frac{157}{156 - 71,3} = 0,5 \text{ с}.$$

§ 6-2. Расчет сопротивлений в роторной цепи асинхронного двигателя

При пуске асинхронных двигателей из-за больших скольжений ротора возникают большие пусковые токи, которые вызывают значительные динамические усилия и интенсивное нагревание обмоток статора и ротора. Для ограничения пусковых токов, получения необходимых моментов или обеспечения заданных условий ускорения электропривода в цепь ротора асинхронного двигателя вводится реостат, который по мере разгона электропривода выводится ступенями. Сопротивления вводятся в каждую фазу ротора.

Пусковые сопротивления. Схема включения, пусковые и тормозная реостатные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором приведены на рис. 6-2, а, б.

В зависимости от требуемой точности и имеющихся данных расчет пусковых сопротивлений может быть произведен графо-аналитическим приближенным или уточненным методом.

Приближенный графо-аналитический метод. Для расчета используется прямолинейная часть механических характеристик, что справедливо при значениях момента до $(0,7 \div 0,75) M_{кр}$.

Естественную механическую характеристику при этом строят по двум точкам: ω_0 при $M=0$ и $\omega_{ном}$ при $M_{ном}$. Прямолинейные реостатные характеристики строят в той же последовательности, которая указана в § 6-1 для двигателя постоянного тока. Моменты M_1 и M_2 и число ступеней m выбираются исходя из условий, принятых для двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Необходимо только иметь в виду, что наибольшее значение пускового момента M_1 определяется в данном случае значением

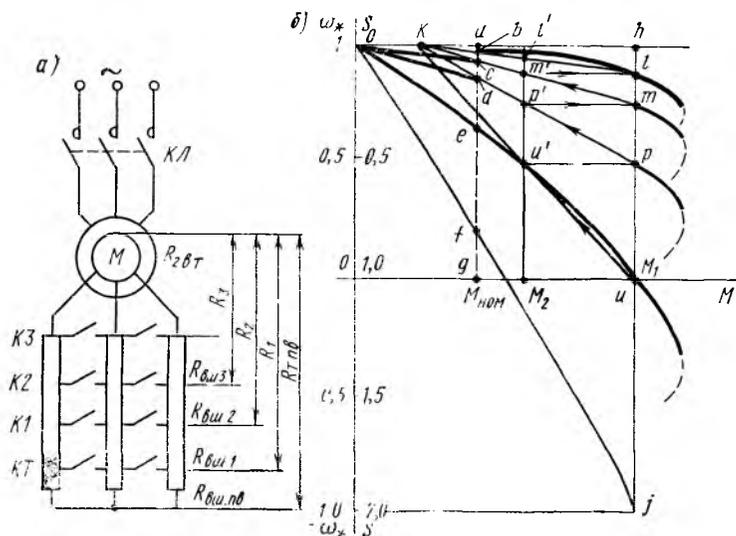


Рис. 6-2. Схема включения, пусковые и тормозная характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

$M_{кр}$ с учетом возможного снижения напряжения сети. Практически $M_1 = 0,7M_{кр}$. После построения пусковых реостатных характеристик находят сопротивления ступеней $R_{1-3} = R_*R_{2ном}$, где $R_* = ae/ag = ad/ag = ac/ag$, $R_{2ном}$ [см. (3-9)]. Сопротивления секций реостата

$$R_{вш1} = R_1 - R_2; R_{вш2} = R_2 - R_3; R_{вш3} = R_3 - R_{вт}.$$

Уточненный графо-аналитический метод. Этот метод учитывает кривизну механических характеристик асинхронного двигателя и применяется в тех случаях, когда $M_1 > 0,7M_{кр}$.

Для построения статических реостатных характеристик сначала по формулам (3-21) — (3-24) рассчитывают и строят естественную механическую характеристику от $M=0$ до $M=M_{кр}$. Затем, исходя из условий пуска, задаются значениями M_1 и M_2 (рис. 6-2, б). Через точки пересечения вертикалей M_1 и M_2 с естественной характеристикой (точки l и l') проводят прямую до пересечения в точке K с горизонтальной прямой ah ($s=0$). Соблюдая ра-

венства наибольших M_1 и переключающих M_2 моментов на всех пусковых ступенях, через точку K проводят прямые uu' , pp' и mm' , характеризующие процесс ступенчатого разгона электропривода. При удачном выборе значений M_1 и M_2 выход на естественную характеристику должен произойти в точке l на вертикальной линии ih наибольшего пускового момента M_1 . В результате построения отрезки $u'p$, $p'm$, $m'l$ должны быть равны и параллельны друг другу. Если указанное условие не выполняется, то следует изменить значение M_1 или M_2 и построение повторить.

Руководствуясь выражением (3-25), а при $s_H/s_e = R_{2\Sigma}/R_{2ВТ}$ и построенной диаграммой, найдем сопротивления каждой ступени

$$R_{2\Sigma 1} = R_{2ВТ} \frac{hu}{hl}; \quad R_{2\Sigma 2} = R_{2ВТ} \frac{hp}{hl}; \quad R_{2\Sigma 3} = R_{2ВТ} \frac{hm}{hl}.$$

Вычитанием из этих сопротивлений сопротивления обмотки фазы ротора $R_{2ВТ}$ получим сопротивления ступеней пускового реостата.

Сопротивления секций при включении реостата по схеме одной звезды

$$R_{вш1} = R_{2ВТ} \frac{pu}{hl}; \quad R_{вш2} = R_{2ВТ} \frac{mp}{hl}; \quad R_{вш3} = R_{2ВТ} \frac{lm}{hl}.$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{п.р} = R_{вш1} + R_{вш2} + R_{вш3}.$$

Тормозное сопротивление. При торможении электропривода противовключением в роторную цепь помимо пускового реостата вводят добавочную ступень с сопротивлением $R_{вш.пв}$ (рис. 6-2). Тогда сопротивление фазы роторной цепи (сопротивление противовключения) $R_{т.пв} = R_{2ВТ} + R_{п.р} + R_{вш.пв}$, где $R_{вш.пв}$ — сопротивление добавочной секции реостата. Механическая характеристика σ $R_{т.пв}$, отвечающая режиму торможения с начальными условиями $s=2$ и $M=M_1$, показана на рис. 6-2 в квадранте IV.

Относительное сопротивление противовключения $R_{*т.пв}$ из рис. 6-2 определяется отношением af/ag на линии номинального момента, а в омах — формулой

$$R_{т.пв} = R_{*т.пв} R_{2НОМ}.$$

Сопротивление добавочной секции реостата $R_{вш.пв} \approx = (ef/ag) R_{2НОМ}$ или

$$R_{вш.пв} = R_{т.пв} - (R_{2ВТ} + R_{п.р}).$$

На линии наибольшего пускового момента M_1 сопротивления противовключения и добавочной секции реостата

$$R_{т.пв} = R_{2ВТ} n j / (hl); \quad R_{вш.пв} = R_{2ВТ} u j / (hl).$$

Для определения сопротивления ступени противовключения вместо отношений отрезков можно использовать отношения скольжений [см. (3-26 а)].

Пример 6.2. В электроприводе переменного тока при статическом моменте на валу двигателя, равном $0,75 M_{\text{ном}}$, необходимо с помощью реостата в цепи ротора получить скорость, равную $0,5$ от синхронной.

Определить внешнее сопротивление в цепи ротора, обеспечивающее заданную скорость.

Данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 16$ кВт, $U_{\text{ном}} = 380$ В, $n_{\text{ном}} = 957$ об/мин (синхронная частота вращения $n_{\text{синх}} = 1000$ об/мин); сопротивление нагретой обмотки ротора $R_{2\text{вт}} = 0,092$ Ом.

Решение. Номинальная и синхронная угловые скорости

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 957}{30} = 100 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_0 = \frac{\pi n_{\text{синх}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад/с.}$$

Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = \frac{105 - 100}{105} = 0,0475.$$

Считая естественную механическую характеристику асинхронного двигателя в рабочей части прямолинейной, при статическом моменте, равном $0,75 M_{\text{ном}}$, определим скольжение, отвечающее этому моменту. Из соотношения $0,75 M_{\text{ном}}/M_{\text{ном}} = s_e'/s_{\text{ном}}$ скольжение

$$s_e' = (0,75 M_{\text{ном}}/M_{\text{ном}}) s_{\text{ном}} = 0,75 s_{\text{ном}} = 0,75 \cdot 0,0475 = 0,0355.$$

Скольжение при пониженной угловой скорости

$$s_{\text{н}} = \frac{\omega_0 - 0,5\omega_0}{\omega_0} = \frac{105 - 0,5 \cdot 105}{105} = 0,5.$$

Необходимое внешнее сопротивление [см. (3-26а)]

$$R_{2\text{вн}} = \frac{s_{\text{н}}}{s_e'} R_{2\text{вт}} - R_{2\text{вт}} = \frac{0,5}{0,0355} 0,092 - 0,092 = 1,29 \text{ Ом.}$$

§ 6-3. Расчет сопротивлений в цепи статора асинхронного двигателя

Для снижения пускового тока и тока в режиме торможения противовключением в цепь статора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на время пуска, торможения или реверса вводят активные или индуктивные сопротивления. Получаемые при этом характеристики рассмотрены в § 3-2 и 3-3.

Для расчета пусковых или тормозных сопротивлений задаются пусковым током или моментом. Если требуется снизить пусковой или тормозной ток в α_t раз, то этот ток в искусственной схеме с токоограничивающими элементами

$$I_{\text{пускн}} = \alpha_t I_{\text{пуск.е}}, \quad (6-7)$$

где $I_{\text{пуск.е}}$ — пусковой ток в естественной схеме (без сопротивлений).

Пусковой момент на искусственной характеристике, пропорциональный квадрату напряжения, за счет падения напряжения на

введенных в цепь статора сопротивлений будет уменьшен в α_i^2 раз ($\alpha_i < 1$):

$$M_{\text{пуск.и}} = M_{\text{пуск.е}} \alpha_i^2. \quad (6-8)$$

Значения внешних активных $R_{1\text{вн}}$ и индуктивных $X_{1\text{вн}}$ сопротивлений в цепи статора обычно выбирают из условия получения равных пусковых моментов в естественной и искусственной схемах. Потери электрической энергии при пуске или торможении противовключением с активными сопротивлениями будут больше, чем при пуске или торможении с индуктивными сопротивлениями. Значения моментов на искусственной механической характеристике с $R_{1\text{вн}}$ будут несколько меньше, чем на соответствующей характеристике с

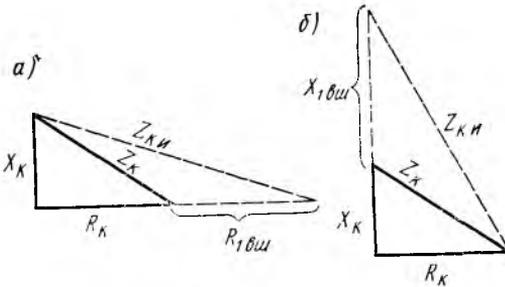


Рис. 6-3. Треугольник сопротивлений для цепи статора асинхронного двигателя

$X_{1\text{вн}}$.

Чтобы получить заданное значение пускового тока или момента двигателя, его полное сопротивление в режиме короткого замыкания (при $s=1$) должно быть

$$Z_{\text{к.и}} = Z_{\text{к}}/\alpha_i = Z_{\text{к}}/\sqrt{\mu}, \quad (6-9)$$

где $Z_{\text{к.и}}$, $Z_{\text{к}}$ — полное сопротивление короткого замыкания в искусственной и естественной схемах включения двигателя; $\mu = M_{\text{пуск.и}}/M_{\text{пуск.е}}$ — коэффициент снижения момента.

Значения вводимых в цепь статора сопротивлений получаются из треугольников сопротивлений, построенных для естественной и искусственной схем в режиме короткого замыкания (рис. 6-3). На рис. 6-3, а приведен треугольник сопротивлений при введении активного сопротивления, а на рис. 6-3, б — индуктивного. Искомые значения активных и индуктивных сопротивлений определяются из выражений

$$R_{1\text{вн}} = \sqrt{(Z_{\text{к}}/\alpha_i)^2 - X_{\text{к}}^2} - R_{\text{к}}; \quad (6-10)$$

$$X_{1\text{вн}} = \sqrt{(Z_{\text{к}}/\alpha_i)^2 - R_{\text{к}}^2} - X_{\text{к}}, \quad (6-11)$$

где $R_{\text{к}}$ и $X_{\text{к}}$ — сопротивления короткого замыкания в естественной схеме включения.

§ 7-1. Потери в установившихся режимах

Электрический привод как энергетическое устройство является потребителем электрической энергии, которая, как известно, не вся превращается в полезную работу. Потребляемую электрическую энергию характеризуют полезной механической энергией на валу двигателя, к. п. д. и $\cos \varphi$. Повышение к. п. д. и $\cos \varphi$ позволяет полнее использовать электропривод и снизить расходы на его эксплуатацию.

Энергетические показатели электропривода зависят от режимов его работы, загрузки, угловой скорости, напряжения и частоты тока питающей сети.

При установившемся режиме работы электропривода, т. е. когда угловая скорость и ток двигателя неизменны, мощность потерь складывается из потерь в механических звеньях электропривода и потерь в двигателе и его электрической цепи. Потери в механических звеньях характеризуются к. п. д. $\eta_{мх}$ и всегда дополнительно загружают двигатель. Вместе с полезной нагрузкой производственного механизма эти потери определяют нагрузку двигателя.

Потери мощности в двигателе и его электрической цепи называются *полными потерями* $P_{п.}$. Они состоят из потерь холостого хода (постоянные потери $P_{п.пост}$) и потерь в силовой электрической цепи (переменные потери $P_{п.в}$):

$$P_{п.} = P_{п.пост} + P_{п.в}. \quad (7-1)$$

Постоянные потери складываются из потерь в стали, на трение и вентиляцию и не зависят от нагрузки двигателя. Переменные потери зависят от тока двигателя и сопротивления силовой цепи и определяются для двигателей постоянного тока и трехфазных асинхронных двигателей соответственно как

$$P_{п.в} = I_{я}^2 (R_{лв} + R_{вш}); \quad (7-2)$$

$$P_{п.в} = 3I_2'^2 (R_{1вт} + R_{2вт}' + R_{2вш}'). \quad (7-3)$$

При отсутствии регулировочного реостата сопротивления $R_{вш}$ и $R_{2вш}'$ равны нулю.

Переменные потери при номинальной нагрузке двигателя определяются соответствующим номинальным током, а при частичной (до номинальной) нагрузке пропорциональны коэффициенту загрузки двигателя $k_3 = I/I_{ном}$ (при некоторых допущениях $k_3 = P/P_{ном} = M/M_{ном}$). Для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей соответственно

$$P_{п.в} = (I_{ном} k_3)^2 (R_{лв} + R_{вш}); \quad (7-2a)$$

$$P_{п.в} = 3(I_{ном}' k_3)^2 (R_{1вт} + R_{2вт}' + R_{2вш}'). \quad (7-3a)$$

Если обозначить электрические потери при номинальном токе через $P_{п.э.ном}$, то выражения (7-2а) и (7-3а) примут вид

$$P_{п.э} = P_{п.э.ном} k_3^2 \quad (7-4)$$

При номинальном режиме работы двигателя соотношение между постоянными и переменными потерями характеризуется коэффициентом $\gamma = P_{п.пост}/P_{п.э}$, который равен: для двигателей постоянного тока независимого возбуждения общего назначения — 1—1,5; для крановых двигателей постоянного тока — 0,5—0,9; для двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором общего назначения — 0,5—0,7; для крановых двигателей с короткозамкнутым ротором — 0,4—0,5; для крановых двигателей с фазным ротором малой и средней мощности — 0,45—0,6 и большой мощности — 0,9—1,0.

Переменные потери при нагрузке двигателя, отвечающей максимальному к. п. д., равны постоянным:

$$P_{п.э.ном} k_3^2 = P_{п.пост}, \quad (7-5)$$

откуда

$$P_{п.пост}/P_{п.э.ном} = k_3^2 = \gamma. \quad (7-6)$$

Полные потери в двигателе при номинальной нагрузке, т. е. при $k_3 = 1$ и к. п. д. $\eta_{дв} = \eta_{ном}$,

$$P_{п.ном} = P_{ном} (1 - \eta_{ном})/\eta_{ном}. \quad (7-7)$$

Представим (7-1) с учетом (7-5) при номинальной нагрузке

$$P_{п.ном}^* = P_{п.пост} + P_{п.э} k_3^2. \quad (7-8)$$

Из (7-6) имеем выражение

$$P_{п.э.ном} = P_{п.пост}/\gamma,$$

подставляя которое в (7-8) получаем

$$P_{п.ном} = P_{п.пост} + P_{п.пост}/\gamma, \quad (7-9)$$

откуда

$$P_{п.пост} = P_{п.ном} \gamma / (\gamma + 1). \quad (7-10)$$

При частичной загрузке двигателя мощностью P_x полные потери с учетом (7-7)—(7-10) определяются как

$$P_{п.x} = P_{п.ном} (\gamma + k_3^2) / (\gamma + 1). \quad (7-11)$$

Полные потери при нагрузке двигателя $P_x = P_{ном} k_3$ могут быть найдены по аналогичной (7-7) зависимости

$$P_{п.x} = P_x (1 - \eta_x) / \eta_x, \quad (7-12)$$

где η_x — к. п. д. двигателя, отвечающий мощности P_x ; определяется по каталожной зависимости к. п. д. двигателя от нагрузки на его валу.

Потери мощности при работе двигателя на различных регулировочных характеристиках определяются зависимостями (4-2) и (4-15).

Количество потерянной электрической энергии зависит от времени работы электропривода:

$$A_{\text{п}} = P_{\text{п}} t_{\text{раб}}. \quad (7-13)$$

Для двигателей переменного тока важным энергетическим показателем является коэффициент мощности $\cos \varphi$. Асинхронные двигатели потребляют из питающей сети значительную реактивную мощность, дополнительно загружающую эти сети и создающую в них дополнительные потери энергии. Для большинства асинхронных двигателей номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,68 \div 0,9$ ($\text{tg } \varphi = 0,75 \div 0,45$), а поэтому их реактивная мощность

$$Q = P \text{tg } \varphi = (0,75 \div 0,45) P.$$

Это значит, что на 1 кВт активной мощности асинхронные двигатели потребляют из сети 0,45—0,75 квар реактивной мощности. При работе двигателей с нагрузками, меньшими номинальной, $\cos \varphi$ снижается, а доля реактивной энергии увеличивается. Значительному изменению $\cos \varphi$ подвержен при регулировании угловой скорости асинхронных двигателей (см. § 4-4), поэтому при выборе способа регулирования скорости электропривода следует учитывать возможное колебание коэффициента мощности и его действие на энергетические показатели установки.

§ 7-2. Потери при переходных процессах

При работе электропривода с частыми пусками, торможением и остановками потери энергии в переходных процессах становятся существенными, заметно влияют на нагревание двигателя и энергетические показатели установки. Определение суммарных потерь мощности в переходных процессах представляет собой сложную задачу, так как эти потери зависят от значений статической нагрузки на валу, от механической и электромагнитной инерционности электропривода, угловой скорости двигателя и т. п. К тому же отдельные составляющие потерь в переходных процессах изменяются по-разному. Поэтому для определения потерь сделаем некоторые допущения: момент статической нагрузки $M_{\text{ст}} = 0$, что часто бывает при пуске и разгоне реальных электроприводов; из-за незначительного влияния на потери мощности пренебрегаем магнитной инерционностью и постоянными потерями двигателя.

Рассмотрим метод определения потерь, применяемый для асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока независимого возбуждения. Потери мощности в роторной цепи асинхронного двигателя и в цепи якоря двигателя постоянного тока

$$P_{\text{р2}} = M \omega_0 s; \quad P_{\text{я2}} = M \omega_0 \delta,$$

где s и δ — скольжение и относительное статическое падение угловой скорости.

Скольжение (и относительное падение угловой скорости) в двигательном и тормозном режимах

$$s(\delta) = (\omega_0 - \omega) / \omega_0; \quad s(\delta) = \omega / \omega_0.$$

Потери энергии за время $t_{p(r)}$ переходного процесса (разгона или торможения электропривода)

$$A_{r2} = \int_0^{t_{p(r)}} P_{n2} dt. \quad (7-14)$$

В цепи ротора асинхронного двигателя и в цепи якоря двигателя постоянного тока

$$A_{n2} = \int_0^{t_{p(r)}} M \omega_0 s dt; \quad (7-14a)$$

$$A_{n2} = \int_0^{t_{p(r)}} M \omega_0 \delta dt. \quad (7-14б)$$

Потери энергии от начальных значений s_n и δ_n до конечных установившихся s_y и δ_y (отвечающих ω_y) для асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока

$$A_{n2} = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_n^2 - s_y^2); \quad (7-15a)$$

$$A_{n2} = J \frac{\omega_0^2}{2} (\delta_n^2 - \delta_y^2). \quad (7-15б)$$

Из выражений (7-15a) и (7-15б) видно, что потери электроэнергии в цепи ротора асинхронного двигателя и в цепи якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения при переходных процессах без статической нагрузки не зависят от вида механической характеристики и времени переходного процесса. Они определяются только запасом кинетической энергии, $A = J \omega_0^2 / 2$ при угловой скорости идеального холостого хода и пределами изменения скольжения s или относительного статического падения скорости δ . Это означает, что, например, потери при прямом пуске двигателя (без изменения каких-либо его параметров) в одну ступень и при реостатном пуске в несколько ступеней одинаковы.

Потери энергии в переходных процессах при разгоне, торможении и реверсе электропривода определяются выражениями (7-15a) и (7-15б) при подстановке в них соответствующих значений s или δ .

При разгоне и динамическом торможении электропривода, когда $s_n(\delta_n) = 1$, $s_y(\delta_y) = 0$,

$$A_{n2(p)} = J \omega_0^2 / 2.$$

При торможении противовключением, когда $s_H(\delta_H) = 2$, $s_Y(\delta_Y) = 1$,

$$A_{n2(\text{т.пв})} = 3J\omega_0^2/2 = 3A_{n2(p)};$$

при реверсе, когда $s_H(\delta_H) = 2$, $s_Y(\delta_Y) = 0$,

$$A_{n2(\text{рев})} = 4J\omega_0^2/2 = 4A_{n2(p)}.$$

Для асинхронного двигателя потери энергии в цепи статора A_{n1} выражаются через потери энергии в роторной цепи A_{n2} :

$$A_{n1} = A_{n2}R_{1\Sigma}/R'_{2\Sigma}. \quad (7-16)$$

Полные потери в электроприводе с асинхронным двигателем

$$A_n = A_{n1} + A_{n2}.$$

Из выражения (7-16) следует, что у асинхронного двигателя с фазным ротором, во вторичную цепь которого включаются внешние сопротивления, потери энергии в цепи статора меньше, чем у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, так как $R_{2\Sigma}' \gg R_{1\Sigma}$.

Потери энергии в переходных процессах со статической нагрузкой на валу двигателя зависят от времени этих процессов, которое, в свою очередь, обусловлено статическим моментом.

Если принять, что в течение переходного процесса $M_{ст} = \text{const}$ и средний момент двигателя $M_{ср} = \text{const}$, то после подстановки этих значений в (7-14а) или (7-14б) и математических преобразований получим потери энергии в электроприводе с асинхронным двигателем и с двигателем постоянного тока независимого возбуждения:

$$A_{n2} = \frac{M_{ср}}{M_{ср} - M_{ст}} J \frac{\omega_0^2}{2} (s_H^2 - s_Y^2); \quad (7-17а)$$

$$A_{n2} = \frac{M_{ср}}{M_{ср} - M_{ст}} J \frac{\omega_0^2}{2} (\delta_H^2 - \delta_Y^2). \quad (7-17б)$$

Из анализа зависимостей (7-17а) и (7-17б) видно, что при разгоне электропривода со статической нагрузкой на валу двигателя потери энергии возрастают по сравнению с потерями при разгоне без статической нагрузки. При торможении электропривода, когда момент статической нагрузки действует согласно с моментом двигателя ($M_{ср} + M_{ст}$), потери энергии меньше, чем при торможении без статической нагрузки.

Выражения (7-15) и (7-17) показывают, что снизить потери энергии в переходных процессах можно за счет уменьшения момента инерции электропривода, для чего применяют двигатель специального исполнения с уменьшенными моментами инерции ротора, либо за счет использования двигателей, имеющих в сумме также меньший момент инерции роторов (якорей).

За счет ступенчатого (или плавного) изменения угловой скорости идеального холостого хода ω_0 снижение потерь в переходных процессах будет более заметное, так как ω_0 в указанных формулах выражена в квадрате. Так, например, при применении в электроприводе многоскоростного асинхронного двигателя потери при разгоне в соответствии с (7-15) будут определяться величинами ω_0 , s_n и s_y на каждой ступени ускорения электропривода. Для двухскоростного двигателя при ступенчатом пуске до первой ω_{01} и второй (высшей) ω_{02} скоростей потери энергии

$$A_{п2(p)} = J\omega_{01}^2/2 + J(0,5\omega_{02})^2/2 = 0,5J\omega_{02}^2/2,$$

т. е. составляют половину от потерь при прямом пуске на высшую ступень.

При торможении электропривода с многоскоростным асинхронным двигателем угловая скорость снижается за счет переключения двигателя на низшие скорости с рекуперативным торможением (см. § 3-3). Для двухскоростного двигателя с торможением противозвключением до $\omega = 0$ потери энергии

$$A_{п2(т.пр)} = J\frac{\omega_{01}^2}{2} + J\frac{\omega_{02}^2}{2} \left[\left(\frac{3}{2} \right)^2 - 1 \right] = \frac{3}{2} J\frac{\omega_{02}^2}{2},$$

т. е. также составляют половину от потерь при торможении противозвключением в одну ступень (от $3A_{п2(p)}$).

При плавном изменении угловой скорости идеального холостого хода двигателя, как это имеет место в электроприводах с преобразователями постоянного тока или с преобразователями частоты, потери энергии при разгоне и торможении электропривода с линейным изменением э. д. с. или частоты преобразователя в 3—5 раз меньше, чем потери при разгоне с постоянными значениями U и f_1 , а потери энергии при торможении равны потерям при разгоне электропривода.

ГЛАВА 8

ВЫБОР ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 8-1. Нагревание и охлаждение двигателей

Выбор двигателя для приведения в движение какого-либо механизма связан с обеспечением ряда требований, основными из которых являются следующие: номинальное напряжение двигателя должно соответствовать напряжению сети; развиваемый момент должен обеспечивать динамические и статические режимы без допустимого превышения температуры; перегрузочная способность двигателя должна обеспечивать работу электропривода при кратковременных пиковых нагрузках; регулирование скорости должно отвечать требованиям технологического процесса и др. Наиболее

важным требованием является недопустимость перегрева двигателя.

Нагревание двигателя обусловлено потерями энергии в металле проводников силовой цепи, в стали магнитной системы, в подшипниках, а также потерями на вентиляцию и добавочные потери.

Нагревание электрической машины ограничено допустимой температурой изоляционных материалов, которая, в свою очередь, устанавливается из необходимого срока службы изоляции — примерно десять лет. По допустимой температуре изоляционные материалы машин делятся на шесть классов от 105 до 180° С.

Максимальная рабочая температура частей двигателя, обеспечивающая достаточный срок службы, определяется не только внутренними тепловыделениями, но и температурой окружающей среды. При тепловом расчете двигателей температура окружающей среды принимается равной 40° С.

В расчетах вместо действительной температуры удобнее оперировать превышением температуры τ , которое представляет собой разность между температурой нагретой машины и температурой окружающей среды.

Условия нагревания различных частей двигателя различны, а поэтому точный учет тепловых процессов в нем очень сложен. При изучении законов нагревания и охлаждения двигателей делается ряд допущений. Двигатель рассматривается как однородное тело с бесконечно большой теплопроводностью, т. е. температура двигателя во всех его точках принимается одинаковой.

При прохождении тока тепловая энергия, выделяющаяся в двигателе вследствие потерь, в начальный период нагревания расходуется главным образом на превышение температуры отдельных его частей над температурой окружающей среды. Начиная с того момента, когда количество тепловой энергии, выделяемой двигателем в единицу времени, станет равным количеству тепловой энергии, рассеиваемой за то же время во внешнюю среду, температура электродвигателя будет сохраняться практически постоянной. Эта температура называется *установившейся*.

Установившееся превышение температуры проводников, по которым протекает ток, и других конструктивных узлов двигателя

$$\tau_y = Q / (\alpha S), \quad (8-1)$$

где Q — количество теплоты, выделяющееся в двигателе в единицу времени; α — коэффициент теплоотдачи, характеризующий теплообмен конвекцией между двигателем и окружающей средой при разности температур $\Delta\theta$; S — площадь поверхности, с которой осуществляется теплообмен.

Время, в течение которого проходит нагревание двигателя до установившегося значения τ_y , называется *временем теплового переходного процесса*. При этом температура изменяется по аналогичным законам электро-механического переходного процесса (см. гл. 5) — по законам экспоненты.

В любой момент времени t превышение температуры

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/T_{\text{нагр}}}) + \tau_0 e^{-t/T_{\text{нагр}}}, \quad (8-2)$$

где $e = 2,718$ — основание натуральных логарифмов; τ_0 — начальное превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды; $T_{\text{нагр}}$ — постоянная времени нагревания, в течение которого двигатель нагрелся бы от $\tau = 0$ до установившегося значения τ_y при отсутствии теплоотдачи и равномерном темпе нарастания температуры.

Время изменения превышения температуры от начального до установившегося значения равно бесконечности [см. (8-2)]. На

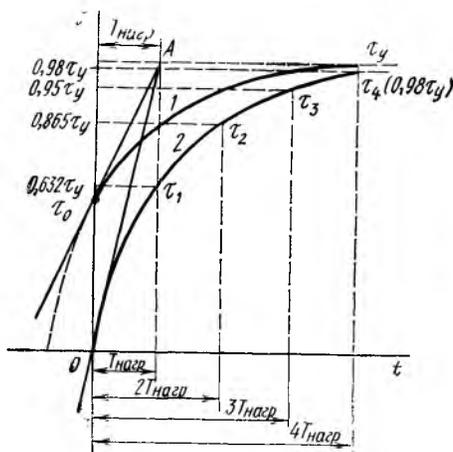


Рис. 8-1. Кривые нагревания двигателя

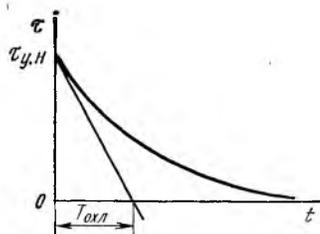


Рис. 8-2. Кривая охлаждения двигателя

рис. 8-1 представлен график изменения τ без начального (кривая 2) и с начальным τ_0 (кривая 1) превышением температуры. Из графика видно, что превышение температуры можно считать установившимся при $(3 \div 4) T_{\text{нагр}}$, так как при $t = 3T_{\text{нагр}}$ превышение температуры $\tau = 0,95\tau_y$, а при $t = 4T_{\text{нагр}}$ значение $\tau = 0,98\tau_y$. На этом графике показано графическое определение $T_{\text{нагр}}$. Для этого в начале координат проведена касательная до пересечения с горизонтальной линией τ_y (точка A). Отрезок, заключенный между точкой A и вертикалью из точки касания, равен постоянной времени $T_{\text{нагр}}$.

Уравнение (8-2) справедливо и для процесса охлаждения двигателя. В этом случае изменяются начальные и конечные условия. Если обозначить установившееся при охлаждении превышение температуры через $\tau_{у.охл}$, а начальное превышение температуры нагретого двигателя через $\tau_{у.н}$, то уравнение теплового процесса при охлаждении будет иметь вид

$$\tau = \tau_{у.охл} (1 - e^{-t/T_{\text{охл}}}) + \tau_{у.н} e^{-t/T_{\text{охл}}}, \quad (8-3)$$

где $T_{\text{охл}}$ — постоянная времени охлаждения.

В частном случае, когда двигатель охлаждается до температуры окружающей среды, т. е. $\tau_{у.охл} = 0$, уравнение (8-2) принимает вид

$$\tau = \tau_{у.н} e^{-t/T_{охл}} \quad (8-4)$$

Кривая охлаждения, отвечающая уравнению (8-4), показана на рис. 8-2.

Вследствие изменения условий охлаждения при отключении самовентилируемых двигателей по сравнению с рабочим периодом постоянная времени охлаждения всегда больше постоянной времени нагревания, т. е. $T_{охл} > T_{нагр}$.

Отношение $T_{нагр}$ работающего двигателя к $T_{охл}$ отключенного и неподвижного называется *коэффициентом ухудшения теплоотдачи*

$$\beta_0 = T_{нагр} / T_{охл} \quad (8-5)$$

Значения β_0 для двигателей с различными способами охлаждения равны: для закрытых двигателей с естественным охлаждением и с независимой вентиляцией — 1; для закрытых с наружной самовентиляцией — 0,45—0,55; для защищенных с внутренней самовентиляцией — 0,25—0,35.

§ 8-2. Нагрузочные диаграммы и режимы работы двигателей

Законы нагревания двигателей были рассмотрены для случаев, когда статическая нагрузка двигателя с течением времени оставалась неизменной и превышение температуры достигало установленного значения. При охлаждении двигателя температура изменялась до температуры окружающей среды. В действительности статическая нагрузка двигателя в процессе работы не всегда постоянна и изменяется при изменении технологических параметров рабочей машины.

Для учета разнообразных условий, изменяющих статическую нагрузку двигателей, рассчитывают и строят *нагрузочные диаграммы*, представляющие собой график изменения во времени значений мощности или момента. Основными величинами для расчета нагрузочных диаграмм являются статическая мощность $P_{ст}$ или момент $M_{ст}$ на каждом этапе работы рабочей машины (производственного механизма). Зависимость $P_{ст}$ и $M_{ст}$ от времени работы t рабочей машины называется *нагрузочной диаграммой рабочей машины* [$P_{ст}(t)$, $M_{ст}(t)$]. Формулы для расчета мощности и момента производственных механизмов приводятся в специальной литературе. На основании нагрузочной диаграммы механизма определяется предварительная расчетная мощность двигателя.

Нагрузочная диаграмма электропривода характеризует зависимость вращающего момента, тока или мощности двигателя во времени. При построении нагрузочных диаграмм электроприводов учитываются особенности совместной работы двигателей и исполнительных механизмов. Для этого необходимо знать характер из-

менения момента сопротивления рабочей машины и законы протекания переходных процессов в электроприводах.

Построение нагрузочной диаграммы электропривода обязательно для окончательного определения мощности двигателя, так как только с помощью диаграммы можно выявить действительные условия его работы.

Наличие в электроприводе при переходных процессах динамических моментов, а следовательно, увеличенного против номинального значения тока вызывает увеличение потерь и, как следствие, повышение температуры двигателя. Это особенно заметно в двигателях, которые относительно часто находятся в переходных режимах.

Для многих электроприводов, работающих продолжительно ($t_{\text{раб}} \gg T_{\text{нагр}}$) с постоянной нагрузкой и угловой скоростью, можно не считаться с дополнительными потерями энергии при пуске и торможении. В этом случае $P(t) = P_{\text{ст}} = \text{const}$ и $M(t) = M_{\text{ст}} = \text{const}$. Тогда зависимость мощности двигателя во времени можно представить величиной постоянной или в осях P, t — горизонтальной прямой линией (рис. 8-3, а). Нагревание двигателя при такой на-

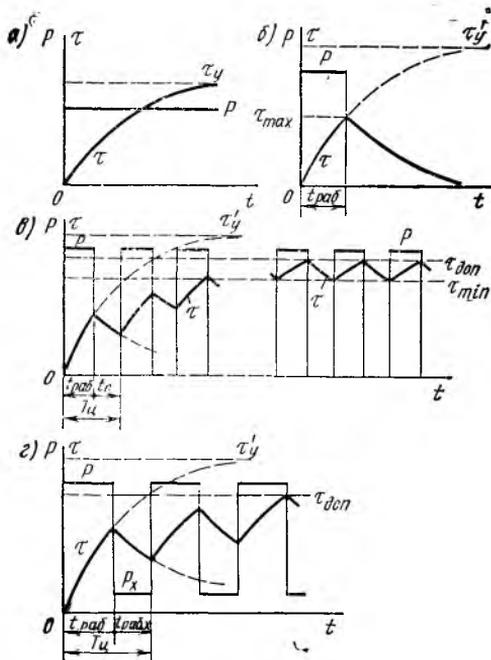


Рис. 8-3. Графики нагрузки и нагревания двигателей в различных режимах работы

грузочной диаграмме осуществляется по законам, рассмотренным в § 8-1, до установившегося значения τ_y .

Для каждой рабочей машины характерна своя нагрузочная диаграмма, которая определяется условиями ее работы. Эти нагрузочные диаграммы обуславливают различные режимы электроприводов. Для более точных расчетов и выбора двигателей по мощности произвольные нагрузочные диаграммы приводятся к диаграммам, которые классифицируются на восемь номинальных режимов и обозначаются S1—S8.

Продолжительный номинальный (S1) — режим работы двигателя (или преобразователя) с неизменной нагрузкой, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех его частей достигают установившихся значений. График $P(t)$, представленный на рис. 8-3, а, иллюстрирует режим S1.

Кратковременный номинальный (S2) — режим, при котором периоды работы двигателя с неизменной нагрузкой чередуются с периодами его отключения (остановки); при этом периоды работы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений, а периоды остановки настолько длительны, что все части его охлаждаются до температуры окружающей среды (рис. 8-3, б). Для данного режима рекомендуются продолжительности рабочего периода $t_{\text{раб}}$ 10, 30, 60, 90 мин.

Если электропривод в кратковременном режиме работы по каким-либо причинам будет работать более длительно, чем $t_{\text{раб}}$, то превышение температуры двигателя достигнет значения τ_y' , большего допустимого $\tau_{\text{доп}}$, что повлечет за собой сокращение срока службы изоляции или ее выгорания.

Повторно-кратковременный номинальный (S3) — режим работы двигателя, при котором кратковременные периоды $t_{\text{раб}}$ (рабочие периоды) с неизменной нагрузкой чередуются с периодами отключения t_0 (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя могли достигнуть установившихся значений (рис. 8-3, в). В данном режиме работы без учета влияния пусковых потерь продолжительность рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ не превышает 10 мин. При большом числе циклов превышение температуры двигателя в рабочие периоды может достигать допустимого значения $\tau_{\text{доп}}$, но не превышать его.

Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$\epsilon = t_{\text{раб}}/T_{\text{ц}} = t_{\text{раб}}/(t_{\text{раб}} + t_0), \quad (8-6)$$

где $t_{\text{раб}}$ — время работы; $T_{\text{ц}}$ — время цикла; t_0 — время отключенного состояния.

Относительную продолжительность включения часто выражают в процентах:

$$ПВ = (t_{\text{раб}}/T_{\text{ц}}) 100. \quad (8-6a)$$

Нормируемые значения относительной продолжительности включения — 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; или в процентах — 15, 25, 40, 60.

Продолжительный режим работы соответствует $ПВ = 100\%$.

Электроприводы повторно-кратковременного режима очень распространены. К ним относятся краны, лифты, экскаваторы, подъемно-транспортные устройства. Этот режим имеет место для токарных, сверлильных, шлифовальных и других станков.

Режимы S1—S3 являются в настоящее время основными. Номинальные данные двигателей в этих режимах включаются в паспорт и каталоги.

Режимы S4—S8 уточняют основные и помогают упростить нагрузочные диаграммы произвольных режимов. Так, представленный на рис. 8-3, г график $P(t)$ относится к перемежающемуся режиму S6, при котором периоды работы с $t_{\text{раб}}$ чередуются с перио-

дами холостого хода двигателя $t_{\text{раб.х}}$. При этом в периоды работы и холостого хода величина τ не достигает установившегося значения и максимальное его значение не превышает $\tau_{\text{доп}}$.

§ 8-3. Расчет и выбор мощности двигателей при различных режимах работы

Надежная продолжительная работа двигателя возможна только в том случае, когда он правильно рассчитан и выбран по тепловому и динамическому (при переходных процессах) режимам и соответствует условиям окружающей среды. Обеспечение надежности электроприводов связано с конструкцией двигателей.

Применение двигателя любого типа прежде всего связано с подбором его по мощности. В случае несоответствия мощности двигателя статической нагрузке механизма электропривод не обеспечит требуемой произ-

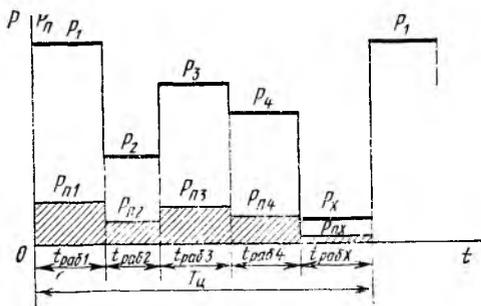


Рис. 8-4. Нагрузочная диаграмма перемежающегося режима работы с переменной нагрузкой

водительности, а двигатель преждевременно выйдет из строя.

Необходимую мощность двигателей при имеющемся или заданном графике статической нагрузки $P_{\text{ст}}(t)$ определяют с таким расчетом, чтобы можно было воспользоваться номинальными (паспортными) данными двигателя.

Продолжительная неизменная нагрузка (режим S1). При такой нагрузке номинальная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{ст}}. \quad (8-7)$$

Угловая скорость двигателя должна отвечать необходимой угловой скорости производственного механизма. При соблюдении условия (8-7) потери в двигателе при пуске и в режиме нагрузки не превышают допустимых, а превышение температуры является установившимся и не превышает допустимого значения.

Переменная нагрузка (перемежающийся режим S6). У некоторых рабочих машин (эскалатор метро, транспортеры подачи деталей и др.) в период работы нагрузка изменяется циклически с временем $T_{\text{ц}}$. При некоторой идеализации нагрузочную диаграмму таких машин приводят к режиму S6 (рис. 8-4). Потери в двигателе $P_{\text{п1}}—P_{\text{п4}}$, отвечающие значениям мощности $P_1—P_4$, изменяются также циклически. При достаточно большом числе циклов в двигателе устанавливается некоторое среднее превышение температуры $\tau_{\text{ср}}$.

Определить мощность двигателя в этом случае сложнее, чем при продолжительной неизменной нагрузке. Выбор мощности по наибольшему значению P_1 повлечет за собой недоиспользование двигателя при значениях $P_2 - P_4$, меньших P_1 . Это вызывает ухудшение энергетических и экономических показателей электропривода. Расчетную мощность двигателя можно определить, исходя из средней нагрузочной мощности $P_{ср}$ с учетом некоторого коэффициента запаса:

$$P_{расч} = P_{ср} k_{зап}, \quad (8-8)$$

где $P_{ср} = \Sigma P_{1-4}/4$; $k_{зап} = 1,1 \div 1,3$ учитывает превышение действительной мощности над средним значением.

Номинальную мощность двигателя выбирают как можно ближе к расчетной. Однако такой подход приемлем только при предварительном определении мощности двигателя. Это объясняется тем, что потери мощности, а следовательно, и энергии зависят от значений мощности в режиме нагрузки двигателя и изменяются пропорционально квадрату тока. Выбранная по расчетному значению мощность двигателя в большинстве случаев получается ниже требуемого значения, когда $\tau_y \leq \tau_{доп}$.

Для более точного определения мощности двигателя в режиме работы *С6* пользуются одним из двух методов: 1) методом средних потерь; 2) методом эквивалентных значений тока, момента, мощности.

Метод средних потерь заключается в том, что для предварительно выбранного двигателя [см. (8-8)], мощность которого считается номинальной, сначала определяют номинальные потери $P_{п.ном}$ [см. (7-7)], затем с помощью графика $\eta_{дв} = f(P)$, даваемого в каталоге, при нагрузках $P_1 - P_4$, P_x [см. (7-12)] находят потери $P_{п1}$, $P_{п2}$ и т. д. (рис. 8-4). С несколько меньшей точностью эти потери могут быть определены на основании (7-11).

Средние потери мощности в двигателе

$$P_{п.ср} = \frac{P_{п1} t_{раб1} + P_{п2} t_{раб2} + P_{п3} t_{раб3} + P_{п4} t_{раб4} + P_{п.х} t_{раб.х}}{t_{раб1} + t_{раб2} + t_{раб3} + t_{раб4} + t_{раб.х}}. \quad (8-9)$$

Подсчитанные средние потери сравниваются с номинальными. При $P_{п.ср} = P_{п.ном}$ предполагается, что наибольшее значение τ_{max} двигателя равно $\tau_{доп}$ и достигается в определенной точке каждого цикла. Двигатель будет выбран правильно, если

$$P_{п.ср} \leq P_{п.ном}. \quad (8-10)$$

Если температура окружающей среды θ отличается от 40°C , то условие (8-10) может быть записано в виде

$$P_{п.ср} \leq P_{п.ном} (\theta_{доп} - \theta_{окр}) / (\theta_{доп} - 40^\circ). \quad (8-11)$$

Рассмотренный метод расчета и выбора мощности двигателя несколько трудоемок, вследствие чего большее применение получили методы эквивалентных значений тока, момента и мощности.

Метод эквивалентного тока основан на замене дей-

ствительно изменяющегося тока двигателя при переменной нагрузке расчетным неизменным током, называемым *эквивалентным*, который вызвал бы в двигателе те же потери, что и действительный ток.

При этом делаются следующие допущения: 1) постоянные потери $P_{п.пост}$ в двигателе (в стали, на трение, вентиляцию), не зависящие от значений нагрузки, неизменны в течение всего рабочего периода; 2) активное сопротивление обмоток двигателя практически неизменно. Тогда, например, в двигателе постоянного тока в соответствии с (7-1) и (7-2) средние потери мощности

$$P_{п.ср} = P_{п.пост} + I_{эк}^2 R_{\Sigma}, \quad (8-12)$$

где $I_{эк}$ — эквивалентный расчетный ток.

Подставляя равенство (8-12) в (8-9) при n рабочих периодах, получим

$$I_{эк}^2 = \frac{I_1^2 t_{раб1} + \dots + I_n^2 t_{рабn}}{t_{раб1} + \dots + t_{рабn}},$$

откуда искомое значение эквивалентного тока

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_{раб1} + \dots + I_n^2 t_{рабn}}{t_{раб1} + \dots + t_{рабn}}}. \quad (8-13)$$

Расчетный эквивалентный ток сопоставляется с номинальным током выбранного двигателя. При этом эквивалентный ток должен быть меньше или равен номинальному:

$$I_{эк} \leq I_{ном}. \quad (8-14)$$

Двигатель должен быть также проверен по допустимой перегрузке из условия, что

$$I_{max}/I_{ном} \leq \lambda_i,$$

где I_{max} — максимальное значение тока (при наибольшей нагрузке); λ_i — допустимый коэффициент перегрузки двигателя по току, например для двигателей постоянного тока общего назначения $\lambda_i = 2 \div 2,5$.

Если окажется, что последнее условие не выполняется, то необходимо выбрать двигатель большей мощности, руководствуясь при этом уже не условиями нагревания, а перегрузочной способностью двигателя.

При выводе формулы (8-13) предполагалось, что значения статической нагрузки на каждом участке графика оставались неизменными. Фактически произвольные графики нагрузки можно представить в виде прямоугольников, трапеций и треугольников (рис. 8-5). Тогда при известном времени $t_{раб}$ прохождения тока на каждом из этих участков эквивалентный ток $I_{эк}'$ определится так:

для прямоугольника с начальным и конечным токами, равными I_1 ,

$$I'_{\text{эк}} = I_1; \quad (8-15)$$

для трапеции с начальным током I_1 и конечным пониженным током I_2

$$I'_{\text{эк}} = \sqrt{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)/3}; \quad (8-16)$$

для треугольника с начальным током I_2 и конечным значением тока, равным нулю,

$$I'_{\text{эк}} = \sqrt{I_2^2/3}. \quad (8-17)$$

Значения $I'_{\text{эк}}$ уточняют значения токов I_1 — I_n в формуле (8-13), в результате чего точность расчетов повышается.

Методом эквивалентного тока нельзя пользоваться в тех случаях, когда существенно изменяется активное сопротивление обмоток двигателя при работе в тех или иных режимах (асинхронные двигатели с глубокими пазами и двойной клеткой ротора). В этих случаях следует применять методы, основанные на непосредственном определении потерь.

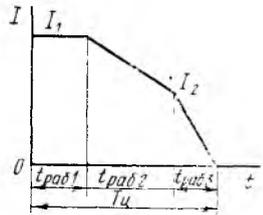


Рис. 8-5. График спланированного тока двигателя

В ряде случаев известно не изменение тока, а зависимость вращающего момента двигателя от времени.

Метод эквивалентного момента основан на использовании пропорциональной зависимости между током и моментом двигателя [см. (2-8 а)].

Для режима S6 эквивалентный момент

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{раб}1} + \dots + M_n^2 t_{\text{раб}n}}{t_{\text{раб}1} + \dots + t_{\text{раб}n}}}. \quad (8-18)$$

Метод эквивалентного момента дополнительно к указанным ограничениям для метода эквивалентного тока не может быть использован для двигателей, в которых магнитный поток в процессе работы изменяется (двигатели постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением). Метод определения мощности по эквивалентному моменту неприменим для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором вне рабочей части механической характеристики (в зоне больших скольжений), т. е. во время пуска, торможения или реверса. Во всех этих случаях следует непосредственно определять потери в двигателе.

Метод эквивалентной мощности основан на использовании зависимости $P = M\omega$, т. е. при работе механизма без резких колебаний угловой скорости $P \equiv M\dot{\omega}$.

Тогда нагрузочная диаграмма может быть задана графиком мощности, развиваемой двигателем. Выбор номинальной мощно-

сти и проверка двигателя по условиям нагревания производится по формуле

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_{1\text{раб}}^2 t_{\text{раб}1} + \dots + P_{n\text{раб}}^2 t_{\text{раб}n}}{t_{\text{раб}1} + \dots + t_{\text{раб}n}}} \quad (8-19)$$

Двигатель будет выбран правильно при $P_{\text{эк}} \leq P_{\text{ном}}$.

Методом эквивалентной мощности нельзя пользоваться во всех случаях, перечисленных для методов эквивалентного тока и момента, а также если скорость двигателя существенно изменяется по значению (при частых пусках и отключениях двигателя, регулировании скорости, пуске и торможении) и в случае изменения к. п. д. и коэффициента мощности двигателей переменного тока на разных участках графика нагрузки.

Таким образом, методы эквивалентной мощности и эквивалентного момента применимы главным образом для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и асинхронных двигателей при работе в установившемся режиме.

Из трех рассмотренных методов наиболее приемлемым является метод эквивалентного тока, так как он значительно точнее учитывает потери в двигателе в режимах S6—S8.

Кратковременная нагрузка (режим S2). Выбор мощности двигателя при такой нагрузке основан на предположении, что за время работы двигателя $\tau \leq \tau_{\text{доп}}$. При этом двигатель полностью используется по перегрузочной способности.

Нагрузочная диаграмма в этом режиме может быть не только одноступенчатой, как это показано на рис. 8-3, б, но двух- и трехступенчатой.

Во время работы наибольшая допустимая температура двигателя должна быть равной или несколько меньшей допустимой для номинального режима.

При кратковременном режиме работы специальных двигателей, отвечающих режиму S2, необходимо, чтобы действительное время кратковременной работы $t_{\text{раб}}$ было равно одному из значений времени $t_{\text{раб,ном}}$, для которого выполнен двигатель (10, 30, 60 и 90 мин). Тогда двигатель выбирается из условия

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}} \quad \text{или} \quad M_{\text{ном}} \geq M_{\text{расч}},$$

где $P_{\text{расч}}$ и $M_{\text{расч}}$ — расчетная мощность и момент при одноступенчатом графике нагрузки.

Если $t_{\text{раб}} \neq t_{\text{раб,ном}}$, то предварительно выбирается двигатель, имеющий по каталогу значения $t_{\text{раб,ном}}$ и $P_{\text{ном}}$, ближайšie к заданным значениям $t_{\text{раб}}$ и $P_{\text{расч}}$. Затем определяются потери мощности в двигателе $P_{\text{п,ном}}$ при номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ и потери при расчетной мощности $P_{\text{п,расч}}$. Двигатель будет правильно выбран при выполнении условия

$$P_{\text{п,ном}} \geq P_{\text{п,расч}} \frac{1 - e^{-t_{\text{раб}}/T_{\text{нагр}}}}{1 - e^{-t_{\text{раб,ном}}/T_{\text{нагр}}}} \quad (8-20)$$

Затем двигатель обязательно проверяется по перегрузочной способности, с тем чтобы максимальный момент нагрузки не оказался больше максимального момента двигателя.

Если время работы $t_{\text{раб}}$ незначительно и отношение $t_{\text{раб}}/T_{\text{нагр}} \leq \leq 0,35$ (статическая нагрузка двигателя при этом составит $2,5 P_{\text{ном}}$ и более), то двигатель следует выбирать только по перегрузочной способности и начальному пусковому моменту.

Использование для кратковременной работы двигателей общего назначения, изготовленных для работы в продолжительном режиме, нецелесообразно, так как во всех случаях из-за невысокой перегрузочной способности (2—2,5) они оказываются недоиспользованными по допустимому превышению температуры. Поэтому для кратковременной работы создана специальная серия двигателей.

Повторно-кратковременная нагрузка (режим S3). Нагрузочная диаграмма показана на рис. 8-3, в. Мощность двигателей при этом режиме работы выбирается исходя из эквивалентных значений тока, момента или мощности [см. (8-13), (8-18), (8-19)] и сравнения их с номинальными.

Продолжительность цикла, т. е. суммарное время работы и пауз в этом режиме, не должна превышать 10 мин, в противном случае двигатель должен выбираться как для продолжительного режима работы.

Для улучшения экономических показателей электроприводов, работающих в повторно-кратковременном режиме, также выпускается специальная серия двигателей с повышенным пусковым и максимальным моментами. Для двигателей этой серии в паспортных данных кроме основных величин указывается продолжительность включения (ПВ%).

В специальных каталогах для двигателей повторно-кратковременного режима указывается мощность, которую он может развивать при каждом из нормируемых значений ПВ (15, 25, 40, 60 и 100%).

Если при повторно-кратковременном режиме статическая нагрузка двигателя, время работы и пауз от цикла к циклу не меняются и относительная продолжительность включения $PВ_{\text{гр}}$, подсчитанная по нагрузочной диаграмме, равна одному из указанных стандартных значений $PВ_{\text{ст}}$, то двигатель выбирается путем сравнения расчетной мощности с номинальной:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{ном}}, \quad (8-21)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя при стандартной продолжительности включения.

Если действительная или графическая продолжительность включения отличается от стандартной, то двигатель выбирается по ближайшему стандартному значению ее, при этом пересчитывается соответственно мощность двигателя. Без учета постоянных потерь в двигателе формула пересчета имеет вид

$$P_{\text{вном}} \geq P_{\text{расч}} \sqrt{PB_{\text{гр}}/PB_{\text{ст}}} = P_{\text{расч}} \sqrt{\varepsilon_{\text{гр}}/\varepsilon_{\text{ст}}}, \quad (8-22)$$

где $P_{\text{вном}}$ — мощность двигателя, соответствующая $PB_{\text{ст}}$ или $\varepsilon_{\text{ст}}$; $P_{\text{расч}}$ — мощность двигателя, рассчитанная для продолжительности включения $PB_{\text{гр}}$ или $\varepsilon_{\text{гр}}$.

Для удобства расчетов реальные нагрузочные диаграммы повторно-кратковременного режима заменяют эквивалентными в отношении нагревания двигателя ступенчатыми диаграммами с двумя периодами (рис. 8-6):

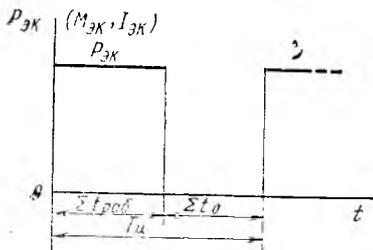


Рис. 8-6. Эквивалентная нагрузочная диаграмма

$$\sum t_{\text{раб}} = t_{\text{раб}1} + t_{\text{раб}2} + \dots + t_{\text{раб}n};$$

$$\sum t_0 = t_{01} + t_{02} + \dots + t_{0n};$$

где $t_{\text{раб}1}, t_{\text{раб}2}, \dots, t_{\text{раб}n}$ — время работы с нагрузками P_1, P_2, \dots, P_n ; $t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0n}$ — время пауз.

Действительная или графическая

относительная продолжительность включения (%)

$$PB_{\text{гр}} = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{\sum t_{\text{раб}} + \sum t_0} 100 \quad (8-23a)$$

или

$$\varepsilon_{\text{гр}} = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{\sum t_{\text{раб}} + \sum t_0}, \quad (8-23б)$$

где $\sum t_{\text{раб}} + \sum t_0 = T_{\text{ц}}$ — время цикла.

Если в производственном механизме, работающем в повторно-кратковременном режиме, установить двигатель того же режима, то при определении расчетной (или эквивалентной) статической мощности или момента время пауз $\sum t_0$ учитывать не следует, так как оно учтено в значении стандартной продолжительности включения $PB_{\text{ст}}$. Эквивалентные значения тока, момента и мощности будут определяться формулами (8-13), (8-18) и (8-19).

Если в том же производственном механизме установить двигатель, предназначенный для продолжительного режима работы, то $\sum t_0$ надо учитывать. При этом в более точных расчетах для учета изменяющихся условий охлаждения двигателя время разгона t_p и торможения t_T электропривода умножают на коэффициент $\beta_{\omega} = 0,75$ а время пауз $\sum t_0$ — на $\beta_0 = 0,5$. Тогда эквивалентные значения тока, момента и мощности будут соответственно определяться формулами

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{эк}} &= \sqrt{\frac{\Sigma I_n^2 t_{\text{раб}n}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_0 \beta_0 + \Sigma t_{\text{p}(\tau)} \beta_{\omega}}}; \\ M_{\text{эк}} &= \sqrt{\frac{\Sigma M_n^2 t_{\text{раб}n}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_0 \beta_0 + \Sigma t_{\text{p}(\tau)} \beta_{\omega}}}; \\ P_{\text{эк}} &= \sqrt{\frac{\Sigma P_n^2 t_{\text{раб}n}}{\Sigma t_{\text{раб}} + \Sigma t_0 \beta_0 + \Sigma t_{\text{p}(\tau)} \beta_{\omega}}}, \end{aligned} \right\} (8-24)$$

где ΣI_n , ΣM_n , ΣP_n , $t_{\text{раб}n}$ — ток, момент, мощность и время n -го участка нагрузочной диаграммы; $\Sigma t_{\text{p}(\tau)}$ — суммарное время переходных процессов при разгоне (торможении) электропривода.

Рассчитанные эквивалентные значения тока, момента и мощности соответствуют относительной продолжительности включения $PB_{\text{гр}}$. Для выбора двигателя со стандартной продолжительностью включения $PB_{\text{ст}}$ необходимо эквивалентные значения тока, момента или мощности [см. (8-22)] привести к номинальному стандартному режиму с ближайшим значением $PB_{\text{ст}}$. Полученная таким образом расчетная мощность сравнивается с каталожной.

Выбрав двигатель по каталогу, необходимо проверить его на перегрузочную способность по условию, указанному для перемежающегося режима S_6 с переменной нагрузкой, или по максимальному моменту, который должен быть не менее максимального момента статической нагрузки:

$$M_{\text{максст}} \leq (0,85 \div 0,9) M_{\text{максиз}}$$

где 0,85—0,9 — коэффициент, учитывающий снижение момента при допустимом падении напряжения на выводах двигателя.

Если двигатель для повторно-кратковременной работы выбран предварительно без учета переходных процессов, то после построения уточненной нагрузочной диаграммы электропривода по формулам (8-24) определяют его окончательную пригодность для работы в этом режиме.

Пример 8-1. Производственный механизм имеет следующий график нагрузки, приведенный к угловой скорости входного вала $\omega = 99,5$ рад/с (950 об/мин): $P_1 = 45$ кВт, $t_{\text{раб}1} = 1$ мин; $P_2 = 23$ кВт, $t_{\text{раб}2} = 4$ мин; $P_3 = 38$ кВт, $t_{\text{раб}3} = 1$ мин, время остановки $t_0 = 7$ мин. Пуск двигателя осуществляется без нагрузки.

Выбрать асинхронный двигатель к этому механизму.

Решение. Суммарное время работы за один цикл

$$\Sigma t_{\text{раб}} = t_{\text{раб}1} + t_{\text{раб}2} + t_{\text{раб}3} = 1 + 4 + 1 = 6 \text{ мин.}$$

Относительная продолжительность включения в заданном графике нагрузки

$$PB_{\text{гр}} = \frac{\Sigma t_{\text{раб}}}{\Sigma t_{\text{раб}} + t_0} 100 = \frac{6}{6 + 7} 100 = 46\%.$$

При этом значении $PB_{\text{гр}}$ режим работы — повторно-кратковременный.

Так как предполагается выбрать двигатель из серии двигателей повторно-кратковременного режима с $P_{вст} = 40\%$, то эквивалентна мощность за циклы работы без учета времени остановки (паузы)

$$P_{эк} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{раб1} + P_2^2 t_{раб2} + P_3^2 t_{раб3}}{\Sigma t_{раб}}} = \sqrt{\frac{452 \cdot 1 + 232 \cdot 4 + 382 \cdot 1}{6}} = 9,65 \text{ кВт.}$$

Приведем полученную мощность к стандартной продолжительности включения $P_{вст} = 40\%$:

$$P_{расч 40} = P_{эк} \sqrt{PB_{гр}/PB_{ст}} = 9,65 \sqrt{46/40} = 10,35 \text{ кВт.}$$

По каталогу асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором типа МТКМ (380 В, 50 Гц, 40% ПВ) выбираем двигатель мощностью $P_{ном} = 11,0$ кВт, $n_{ном} = 935$ об/мин, $M_{кр}/M_{ном} = 3,0$, $M_{пуск}/M_{ном} = 2,8$.

Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = 9550 P_{ном} / n_{ном} = 9550 \cdot 11 / 935 = 112,4 \text{ Н·м.}$$

Максимальный (критический) момент двигателя

$$M_{кр} = 3,0 M_{ном} = 3,0 \cdot 112,4 = 337,2 \text{ Н·м.}$$

Максимальный момент нагрузки при неизменной частоте вращения, равной 935 об/мин,

$$M_{нах ст} = 9550 P_1 / n_{ном} = 9550 \cdot 45 / 935 = 459,6 \text{ Н·м.}$$

Максимальный момент нагрузки больше максимального момента двигателя: $459,6 > 337,2$. При этом неравенстве работа двигателя невозможна.

По каталогу выбираем двигатель, ближайший по мощности, — $P_{ном} = 16$ кВт, $n_{ном} = 940$ об/мин, $M_{кр}/M_{ном} = 3,0$, $M_{пуск}/M_{ном} = 2,8$.

Проверяем этот двигатель по перегрузочной способности. Максимальный момент двигателя

$$M_{кр} = 3 M_{ном} = 3 \cdot 9550 P_{ном} / n_{ном} = 3 \cdot 9550 \cdot 16 / 940 = 487,6 \text{ Н·м.}$$

В результате сравнения $M_{кр} > M_{нах ст}$, т. е. $487,6 > 459,6$.

Без учета понижения напряжения в питающей сети можно окончательно принять двигатель мощностью 16 кВт.

В случае падения напряжения в питающей сети до 10% принятый двигатель не удовлетворяет по перегрузочной способности и тогда нужно выбрать двигатель еще большей мощности.

§ 8-4. Допустимая частота рабочих циклов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Для работы многих современных производственных механизмов (сверлильных, токарных, шлифовальных и других металлорежущих станков, вспомогательных механизмов прокатных станов и т. д.) требуются электроприводы с большим числом циклов работы за рабочую смену или в час. Для обеспечения требований технологии производства и необходимой производительности механизмов число включений двигателя достигает 600—800 за 1 ч работы. Так как при разгоне электропривода ток двигателя повышен, то потери мощности в двигателе вызовут более интенсивное нагревание его. При частых включениях и отключениях двигателя на нагревание его заметно влияет ухудшение условий охлаждения.

Указанные обстоятельства ограничивают число циклов за один час работы значением, при котором среднее превышение температуры будет равно максимально допустимому $\tau_{\text{доп}}$.

Особенно в тяжелых условиях при частых циклах работы оказывается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, в котором теплота, выделяемая во время переходных процессов в цепи ротора, должна рассеиваться обмоткой ротора. При этом важно проверить двигатель на допустимую частоту включений, так как при определении его мощности методом эквивалентных значений ($I_{\text{эк}}$, $M_{\text{эк}}$, $P_{\text{эк}}$) результаты расчетов получаются недостаточно точными (см. § 8-3).

На практике сначала предварительно выбирают двигатель, а затем для него определяют допустимое число включений в час. Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором допустимое число включений определяется по упрощенной формуле

$$h \approx 3600 \frac{(P_{\text{н.ном}} - P_{\text{н.х}})\epsilon + P_{\text{н.ном}}\beta_0(1-\epsilon)}{A_{\text{н.р}} + A_{\text{н.т}}}, \quad (8-25)$$

где $P_{\text{н.ном}}$ — потери мощности при номинальной нагрузке; $P_{\text{н.х}}$ — потери мощности при нагрузке $P_{\text{х}}$; $A_{\text{н.р}}$ и $A_{\text{н.т}}$ — потери энергии при разгоне и торможении электропривода; ϵ — относительная продолжительность включения.

Если в установившемся режиме двигатель работает с нагрузкой $P_{\text{х}} = P_{\text{ном}}$, то формула упрощается еще более:

$$h = 3600 P_{\text{н.ном}} (1 - \epsilon) / (A_{\text{н.р}} + A_{\text{н.т}}). \quad (8-26)$$

Анализ полученного уравнения показывает, что для увеличения допустимого числа включений необходимо повысить значение коэффициента β_0 за счет принудительной вентиляции двигателя и снизить потери в двигателе в период разгона и торможения электропривода за счет применения устройств автоматического изменения параметров.

§ 8-5. Особенности выбора двигателя по мощности регулируемого электропривода

Мощность двигателя для регулируемого электропривода зависит как от значений нагрузки, так и от способа регулирования скорости электропривода. Из всего разнообразия статических нагрузок принято выделять два основных вида: 1) нагрузка, при которой на всех угловых скоростях $M_{\text{ст}} = \text{const}$, $P_{\text{ст}} = \text{var}$; 2) нагрузка с $P_{\text{ст}} = \text{const}$, $M_{\text{ст}} = \text{var}$.

Для них применяются способы регулирования угловой скорости с постоянной мощностью и постоянным моментом.

Методика выбора двигателя по мощности предполагает, что на каждой регулировочной характеристике двигатель работает продолжительно и при этом успевает нагреться до установившейся температуры. Исходя из этого предположения мощность двигателя

должна быть такой, чтобы на любой скорости она не превосходила допустимой с точки зрения нагревания

При нагрузках с $M_{ст} = \text{const}$ и $P_{ст} = \text{var}$ можно выбрать способ регулирования скорости как с постоянным моментом, так и с постоянной мощностью. При регулировании скорости с постоянным моментом принимается

$$M_{ном} = M_{ст}.$$

Наибольшая мощность в этом случае будет при наибольшей угловой скорости ω_{max} . Необходимая расчетная мощность двигателя

$$P_{расч} = M_{ст} \omega_{max}. \quad (8-27)$$

Эта мощность должна быть равна или несколько меньше каталожной при $\omega_{ном} = \omega_{max}$:

$$P_{ном} \geq P_{расч}.$$

При регулировании с постоянной мощностью угловая скорость двигателя выше номинальной, т. е.

$$\omega_{min} = \omega_{ном}.$$

Мощность $P_{ст}$ определяется моментом $M_{ст}$ при максимальной угловой скорости двигателя:

$$P_{ст} = M_{ст} \omega_{max} = P_{max}. \quad (8-28)$$

Выбранный по каталогу двигатель мощностью $P_{ном} \geq P_{ст}$ должен иметь номинальный момент

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = P_{max} / \omega_{min} = M_{ст} \omega_{max} / \omega_{min}$$

или

$$M_{ном} = M_{ст} \omega_{max} / \omega_{ном} = M_{ст} D_{пв}, \quad (8-29)$$

где $D_{пв}$ — диапазон повышения скорости.

Из (8-29) следует, что выбор двигателя для регулируемого электропривода с постоянной мощностью вызывает увеличение номинального момента в $D_{пв}$ раз. Если $P_{ст}(M_{ст}) = \text{const}$, то это вызывает увеличение габарита двигателя.

Снижения габарита двигателя можно достичь за счет выбора более быстроходного двигателя и установки понижающего редуктора между ним и механизмом.

При нагрузках с $P_{ст} = \text{const}$, $M_{ст} = \text{var}$ возможен тот же выбор способов регулирования — с постоянным моментом или с постоянной мощностью.

При регулировании скорости с постоянной мощностью принимается $P_{ном} = P_{ст}$, а номинальный момент определяется номинальной угловой скоростью $\omega_{ном}$. В зависимости от направления регулирования скорости (выше или ниже от основной) угловая скорость $\omega_{ном}$ может быть равной ω_{min} или ω_{max} . При увеличении угловой скорости $\omega_{ном} = \omega_{min}$ и $M_{ном} = P_{ст} / \omega_{min}$. При уменьшении угловой скорости $\omega_{ном} = \omega_{max}$ и $M_{max} = M_{ном} = P_{ст} / \omega_{min}$.

Тогда номинальная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{ст}} \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}} = P_{\text{ст}} D, \quad (8-30)$$

где $\omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}} = D$ — общий диапазон регулирования угловой скорости.

Из (8-30) видно, что номинальная мощность двигателя в D раз больше мощности статической нагрузки на любой скорости, а это значит, что он будет работать с тем большей недогрузкой, чем больше диапазон регулирования.

§ 8-6. Выбор системы электропривода по технико-экономическим показателям

Выбор системы электропривода для какого-либо производственного механизма связан с обеспечением технических требований и экономических показателей. Основными требованиями являются надежность и долговечность работы электропривода, а это, в свою очередь, связано с технически обоснованными параметрами и показателями.

Правильный подбор основного элемента системы электропривода — двигателя (см. § 8-3) — обусловлен выбором его не только по мощности, но и по роду тока и номинальному напряжению, номинальной угловой скорости, виду естественной механической характеристики, пусковым и тормозным моментам, особенностям регулирования скорости, конструктивному исполнению и другим данным. Необходимо стремиться выбирать наиболее простые по устройству двигателя — асинхронные, синхронные — и только после этого рассматривать вопрос о применении двигателей постоянного тока. Большое значение имеет и простота управления электроприводом.

Выбор системы электропривода иногда затруднителен, так как с рабочим механизмом работают различные двигатели. Поэтому при выборе системы электропривода необходимо иметь в виду следующие требования правил устройства электроустановок (ПУЭ): для электропривода механизмов продолжительной работы, не требующих регулирования скорости, независимо от мощностей рекомендуется, как правило, применять синхронные двигатели. Хотя электропривод с синхронным двигателем дороже, эксплуатационные расходы на него за счет более высокого к. п. д. и возможности повышения $\cos \varphi$ системы электроснабжения ниже расходов на асинхронный электропривод. Однако если мощность синхронного двигателя значительно превосходит расчетную, то его применять не следует, в противном случае электропривод будет иметь низкие экономические показатели. На всех предприятиях имеется сеть переменного тока, поэтому обязательно рассматривают возможность применения в электроприводе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Двигатели с фазным ротором на основании требования ПУЭ применяются только в тех случаях, когда асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и синхронные

двигатели не могут быть применены по условиям пуска или регулирования угловой скорости.

Для механизмов с тяжелыми условиями пуска или механизмов, требующих регулирования угловой скорости, следует сравнивать технико-экономические показатели асинхронных двигателей с фазным ротором и синхронных или асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, сочлененных с устройствами для регулирования скорости (с вариаторами, фрикционными, электромагнитными и гидравлическими муфтами и др.), и выбрать наиболее целесообразный из них.

При необходимости регулирования скорости электропривода производственного механизма вопрос о двигателе решается только после определения следующих основных показателей: диапазона регулирования, плавности регулирования, условий нагрузки, стабильности и экономичности электропривода. Если по каким-либо показателям двигатель с фазным ротором не подходит, то рассматривают вопрос о применении двигателя постоянного тока.

Однако следует иметь в виду, что по ряду показателей двигатели постоянного тока значительно уступают двигателям переменного тока. Так, следует указать на основные из них: а) необходимость в источниках постоянного тока, что требует специальных преобразовательных устройств; б) большую стоимость двигателей и аппаратуры; в) большие размеры и массу; г) большую сложность эксплуатации. Поэтому выбор двигателей постоянного тока приводит к значительному увеличению как капитальных затрат, так и эксплуатационных расходов.

Представляет интерес сопоставление электроприводов постоянного и переменного тока по условиям регулирования скорости. У двигателя переменного тока они значительно хуже, но достигнутые в настоящее время успехи в области электронной техники и регулируемых вентильных электроприводов открывают широкие возможности для плавного, глубокого и экономичного регулирования угловой скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Общие указания, касающиеся выбора типа двигателя по способу защиты от воздействия окружающей среды, сводятся к следующему:

Сухое помещение без пыли, грязи и едких газов
Пыльное или влажное помещение
Помещение с высокой температурой
Помещение с высокой влажностью или содержащее едкие газы
Взрывоопасные помещения
Открытое пространство

Открытый или защищенный двигатель
Закрытый двигатель
Закрытый двигатель с независимой вентиляцией
Закрытый или герметичный двигатель
Взрывозащищенный двигатель
Закрытый или защищенный двигатель

При выборе двигателя по мощности следует исходить из необходимости его полного использования в процессе работы. В случае

завышения номинальной мощности двигателя снижаются технико-экономические показатели электропривода, к. п. д. и коэффициент мощности.

Если выбор системы электропривода по техническим параметрам не выявляет преимущественного применения того или иного варианта, то следует сравнить рассматриваемые варианты систем по их экономичности. Одной из важнейших характеристик является производительность механизма. Другая важная экономическая характеристика — коэффициент полезного действия системы электропривода

$$\eta_{э.п} = \eta_{пр} \eta_{дв},$$

где $\eta_{пр}$ и $\eta_{дв}$ — к. п. д. преобразовательных устройств и двигателя. К. п. д. электропривода определяет потери энергии

$$A_{п} = k_э P_{ном} [(1 - \eta_{э.п}) / \eta_{э.п}] T,$$

где $k_э$ — коэффициент загрузки двигателя; $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя; T — время работы электропривода.

Экономичность электропривода определяется сравнением капитальных и ежегодных затрат рассматриваемых вариантов. Для каждого варианта находятся расчетные затраты Z (руб/год), представляющие собой сумму ежегодных эксплуатационных расходов C и капитальных затрат K , приведенных к одинаковой размерности (году):

$$Z = p_n K + C, \quad (8-31)$$

где p_n — нормативный коэффициент эффективности (для расчетов установок энергетики $p_n = 0,15$).

Эксплуатационные расходы C складываются из расходов, учитывающих амортизационные отчисления C_a , стоимости потерь электроэнергии $C_п$, стоимости ремонта электрооборудования C_p и стоимости обслуживания этого электрооборудования $C_{об}$ за год нормальной эксплуатации:

$$C = C_a + C_п + C_p + C_{об}. \quad (8-32)$$

При модернизации электропривода в годовые эксплуатационные расходы включают не только дополнительные расходы, связанные с изменением узлов машины, но и дополнительные капитальные вложения на новый электропривод и новые узлы машины.

Годовые затраты сопоставляемых вариантов при модернизации электропривода и системы управления им определяются как

$$Z_c = p_n \Delta K_c + C_c; \quad Z_n = p_n (K_n - K_d) + C_n, \quad (8-33)$$

где Z_c и Z_n — годовые затраты на старый и новый модернизированный электропривод; ΔK_c — затраты на капитальный ремонт старого электропривода в случае отказа от модернизации; K_n — капиталь-

ные вложения в новое оборудование; $K_{л}$ — ликвидационная стоимость демонтируемого оборудования; C_c и C_n — годовые издержки сопоставляемых вариантов.

Методика технико-экономических расчетов предполагает, что варианты сопоставляются при одинаковых технических условиях. На практике же эти условия могут несколько различаться. Кроме того, следует учитывать, что большинство величин, определяющих основные экономические показатели K и C , являются вероятностными и могут отклоняться в ту или иную сторону. Если экономические показатели сравниваемых вариантов близки (расхождение не превышает 15%), то производится дополнительная оценка по массогабаритным показателям размещения электрооборудования.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

§ 9-1. Общие сведения

Для управления электроприводом используются разнообразные электро механические аппараты, имеющие для соединения электрической цепи подвижные контакты, и бесконтактные аппараты, в которых отсутствуют подвижные устройства, а электрическая цепь создается за счет гальванических связей и электронно-ионных проводимостей полупроводниковых и электронных элементов. Наибольшее распространение имеют электро механические аппараты общепромышленного применения, работающие в схемах питания и управления напряжением до 1000 В. Их можно разделить на две основные группы — аппараты ручного (неавтоматического) управления и аппараты автоматического управления.

Аппараты ручного управления приводятся в действие оператором, обслуживающим электропривод установки или механизма.

Аппараты автоматического управления приходят в действие от электрических сигналов (команд), подаваемых различными реле, датчиками и командными аппаратами, на которые первоначально может воздействовать оператор. Эти аппараты предназначаются:

1) для обслуживания основных процессов управления: пуска в ход, реверсирования, регулирования скорости, торможения и отключения двигателей;

2) для защиты двигателей, механизмов, электрических сетей питания от чрезмерных нагрузок, коротких замыканий, самопроизвольных включений и повреждений;

3) для блокирования отдельных элементов электропривода и механизма, обеспечивающего заданную последовательность действий или предотвращающего неправильные действия оператора, обеспечения требуемой последовательной работы схемы управления и механизмов.

По назначению (или функциональным признакам) все аппараты могут быть разделены на две группы: аппараты, работающие в главных (силовых) электрических цепях, и аппараты и устройства управления, включающие и отключающие главные аппараты. К первой относятся главным образом электромагнитные контакторы и пускатели, силовоточные выключатели, предохранители, резисторы

(реостаты), реакторы. Ко второй группе относятся реле управления (контактные и бесконтактные), аппараты защиты и блокирования, командоаппараты, датчики электрических и неэлектрических величин, блочные системы регуляторов и различные специальные аппараты и устройства.

По роду тока аппараты разделяются: по коммутации — постоянного или переменного тока; по приведению в действие их — с катушками управления на постоянном или переменном токе.

Большой недостаток контактных аппаратов — образование в процессе коммутации электрической искры или дуги между контактами. От этого недостатка свободны бесконтактные аппараты,

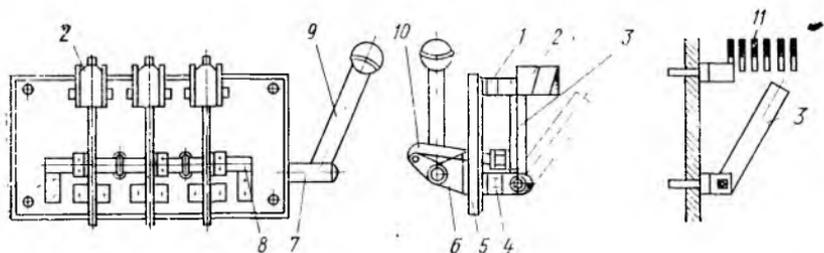


Рис. 9-1. Общий вид рубильника с боковой рукояткой:

1 и 4 — неподвижные контакты (стойки) врубной и шарнирный; 2 — дугогасительная камера; 3 — подвижный контакт (нож); 5 — изоляционное основание; 6 — подшипник; 7 — вал; 8 — изолированный валик; 9 — боковая рукоятка; 10 — тяга; 11 — пластины дугогасительной решетки

в которых нет подвижных электрических контактов. Они осуществляют коммутацию цепи электрического тока каким-либо нелинейным элементом: полупроводниковым, магнитным, электронным. В отличие от механических электрических контактов бесконтактный коммутационный элемент не разрывает полностью гальваническую связь в цепи, что в ряде случаев следует к недостаткам этих аппаратов. Бесконтактные логические элементы не только выполняют функции, аналогичные релейно-контактным аппаратам, но зачастую обладают и более широкими возможностями за счет суммирования и объединения в них нескольких сигналов и функций.

§ 9-2. Выключатели и предохранители

Для подачи напряжения и коммутации токов в электрических схемах управления и регулирования электроприводом служат различные автоматические и неавтоматические выключатели, рубильники, тумблеры, кнопочные пускатели.

Рубильник (рис. 9-1) — наиболее простой из названных аппаратов. Он состоит из неподвижных и подвижных контактов, последние выполняются в виде ножей из меди или латуни. При включении рубильника его ножи плотно входят в неподвижные пружинящие контакты (губки). Рубильники изготавливаются одно-, двух- и трехполюсными. В качестве рубильников могут использоваться

переключатели на два рабочих и одно нейтральное положение. С помощью рубильников можно производить пуск двигателей малой мощности с небольшим числом включений в час.

Пакетный выключатель или переключатель — закрытый коммутационный аппарат, в котором разрыв контактов не виден. Выключатель состоит из набора колец-пакетов, выполненных из изолирующего материала, внутри полостей которых расположено отдельное для каждого полюса контактное устройство.

Рубильники и неавтоматические выключатели не имеют устройств для защиты электрической сети от коротких замыканий в ней или в двигателях, поэтому последовательно с ними ставятся предохранители.

Плавкий предохранитель — аппарат, автоматически отключающий электрическую цепь при коротком замыкании. Цепь отключается при расплавлении плавкой вставки, которая нагревается непосредственно током защищаемой цепи.

Автоматический воздушный выключатель (автомат) — аппарат, служащий для замыкания и размыкания электрической цепи, находящейся под нагрузкой, и для отключения ее при ненормальных и аварийных режимах — перегрузках, коротких замыканиях, чрезмерном понижении напряжения питания. Автомат может включаться вручную или дистанционно с помощью электромеханического привода.

Основными параметрами автоматов являются номинальный длительный ток, номинальное напряжение, предельный ток отключения, уставки срабатывания по напряжению и току.

Автоматы занимают промежуточное положение между аппаратами ручного и автоматического управления. Современные автоматы совмещают функции коммутационного и защитного характера и применяются в шкафах, панелях или щитах управления двигателями (заменяют рубильники и плавкие предохранители). В зависимости от назначения автоматы изготовляют одно-, двух- или трехполюсными.

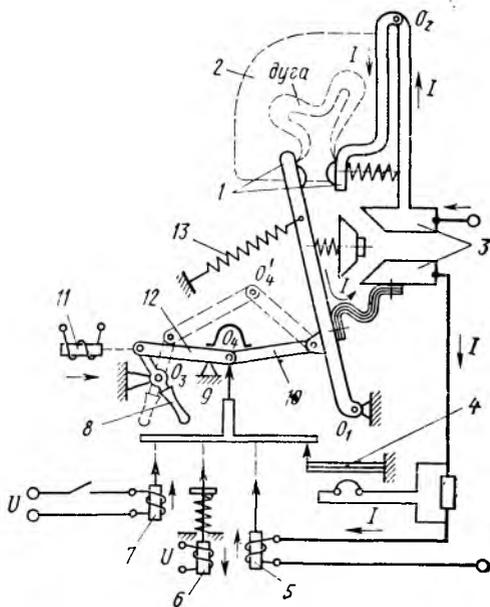


Рис. 9-2. Принципиальная схема автоматического выключателя на большие токи

Различают следующие разновидности автоматов, получивших широкое распространение: 1) универсальные; 2) установочные; 3) быстродействующие.

Универсальные автоматы изготавливаются на значительные токи (100—1000 А) и имеют комбинированные уставки защиты — максимально-токовую и минимального напряжения.

Принципиальная схема универсального автомата на ток более 200 А приведена на рис. 9-2.

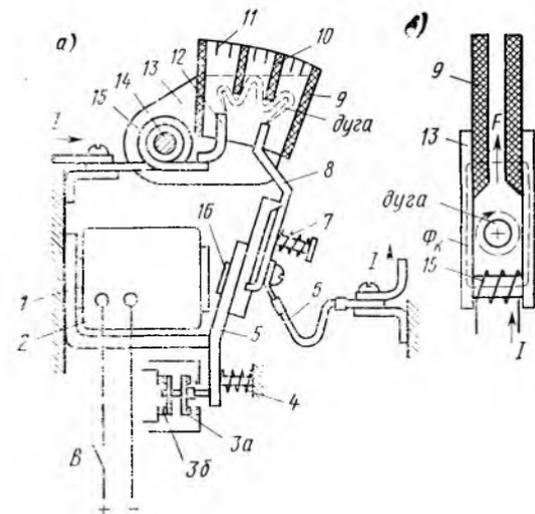


Рис. 9-3. Принципиальная схема контактора постоянного тока

Автомат отключается токовым элементом 5, при понижении напряжения — элементом 6, а при токах перегрузки — нагревательным биметаллическим элементом 4. Для гашения возникающей при коммутации дуги служит дугогасительная камера 2.

Автоматы общего назначения предназначены для более частой коммутации небольших мощностей, имеют изоляционные кожухи и закрытые выводы. Такие автоматы называются установочными. В них предусматриваются тепловые, максимально-токовые расцепители или их комбинация (комбинированные расцепители).

§ 9-3. Контакты и реле

Контактор — двухпозиционный аппарат с самовозвратом, предназначенный для частых коммутаций рабочих токов, а также для редких отключений при токах перегрузки. Включение контактов — дистанционное, с помощью встроенных электромагнитов.

Контакторы выполняются одно- и двухполюсными для цепей постоянного тока и двух- и трехполюсными для цепей переменного тока. Контакторы различаются: по конструкции электромагнита — с якорем клапанного типа и прямоходовым якорем; по способу га-

шения дуги — с магнитным гашением или дугогасительной решеткой.

Контактор постоянного тока — электромеханический аппарат, устройство которого с якорем клапанного типа показано на рис. 9-3, а. Контактор изображен в состоянии, когда он отключает силовую цепь, по которой протекает ток I .

На цельнометаллическом неподвижном сердечнике 1 магнитной системы контактора установлена втягивающая катушка постоянного тока 2. С подвижной частью магнитной системы — якорем 5 — связан рычаг, на котором закреплен подвижный главный контакт 8, присоединяемый к цепи тока гибким проводником 6. Принцип действия состоит в том, что при подаче напряжения на катушку 2 (замыкании контакта ключа В) якорь притягивается к сердечнику, а контакт 8 — к неподвижному главному контакту 12. Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной 7. При этом в процессе соприкосновения контактов происходит перекачивание и притирание контактных поверхностей, что уменьшает переходное сопротивление контактов. Таким образом соединяется главная электрическая цепь. С якорем связаны также замыкающие 3а и размыкающие 3б вспомогательные или блокировочные контакты мостикового типа, предназначенные для работы в цепях управления и рассчитанные на небольшие токи.

Отключение контактора производится снятием напряжения с катушки 2 (контакт ключа В размыкается). При этом подвижная система контактора под действием собственной массы и возвратной пружины 4 приходит в «нормальное» состояние. Возникающая при расхождении главных контактов дуга от протекающего тока быстро гасится системой магнитного дутья в щелевой дугогасительной камере 9, изготовляемой из жаростойкого изоляционного материала.

Система магнитного дутья состоит из последовательной катушки 15, размещенной на стальном сердечнике 14 с двумя стальными пластинами — полюсами 13, охватывающими дугогасительную камеру. Ток, протекающий по катушке 15, создает магнитный поток Φ_k (рис. 9-3, б) в зоне горения дуги. Этот поток, взаимодействуя с магнитным полем от тока дуги, вызывает электромагнитные силы F , которые смещают дугу в щель камеры 9. Дуга растягивается, интенсивно охлаждается и гаснет. Для облегчения гашения дуги могут применяться камеры с изоляционными перегородками 10, которые способствуют увеличению длины дуги и ее сопротивления. В дугогасительных камерах некоторых типов контакторов устанавливается также искрогасительная решетка из коротких металлических пластин 11. Во избежание «залипания» якоря после отключения катушки на якоре укрепляется прокладка 16 из немагнитного материала.

Контактор переменного тока отличается от контактора постоянного тока числом главных контактов и шихтованной (набранной из отдельных изолированных пластин стали) магнитной системой электромагнита.

Разрез по магнитной и контактной системам одного полюса трех-полюсного контактора переменного тока с якорем клапанного типа показан на рис. 9-4, а. Катушка электромагнита контактора пита-

ется однофазным током, вследствие чего магнитный поток в магнитной системе контактора периодически проходит через нуль. Это обстоятельство вызывает вибрацию и гудение магнитной системы, питаемой однофазным током. Для ослабления этих явлений на торце сердечника контактора переменного тока закладывается медный

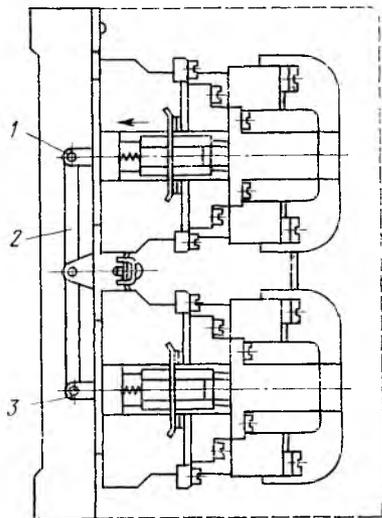
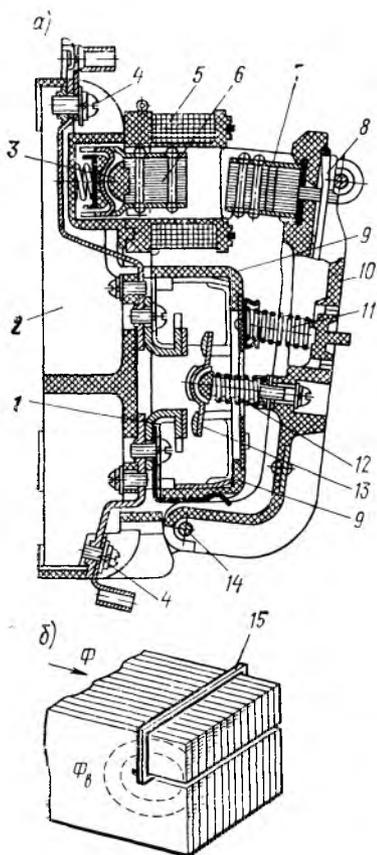


Рис. 9-4. Разрез контактора переменного тока и короткозамкнутый виток в магнитной системе:

1 — неподвижные контакты; 2 — основание; 3 — амортизационное устройство сердечника; 4 — вывод главного контакта; 5 — катушка; 6 — сердечник; 7 — якорь; 8 — амортизационное устройство якоря; 9 — камера дугогасительная; 10 — траверса; 11 — возвратная пружина; 12 — контактная обойма и пружина; 13 — подвижный мостиковый контакт (самоустанавливающийся); 14 — ось вращения траверсы; 15 — короткозамкнутый виток

Рис. 9-5. Общий вид реверсивного пускателя с механической блокировкой

короткозамкнутый виток, который охватывает обычно около $1/3$ площади его сечения (рис. 9-4, б). В моменты, когда основной магнитный поток Φ сердечника проходит через нуль, скорость изменения этого потока максимальна и поэтому в короткозамкнутом витке наводится максимальная э.д.с., как во вторичной обмотке трансформатора. Через виток проходит ток, который создает магнитный поток Φ_v , замыкающийся через сердечник и якорь и препятствующий

щий отпаданию последнего при переходе основного потока через нуль.

Для гашения дуги в контакторах переменного тока применяются дугогасительные камеры, аналогичные дугогасительным камерам контакторов постоянного тока.

Все контакторы постоянного и переменного тока должны надежно работать при колебаниях напряжения сети от 85 до 105%.

Контактор в сочетании с защитными тепловыми реле называется пускателем. Магнитный пускатель — это комплексный коммутационный аппарат, предназначенный для пуска, отключения и защиты двигателей от перегрузки без выведения или введения в их силовые цепи резисторов. Нереверсивный пускатель состоит из одного, а реверсивный — из 2 трехполюсных контакторов и 2 однополюсных тепловых реле (или одного двухполюсного), смонтированных на общем основании или в общей защитной оболочке. Чтобы устранить одновременное включение контакторов реверсивного магнитного пускателя, в их подвижные системы встраивают механическую блокировку (рис. 9-5). Подвижная часть 1 верхнего контактора при срабатывании перемещается влево и рычагом 2 оттягивает подвижную часть 3 нижнего контактора вправо. В случае подачи напряжения на катушку нижнего контактора якорь электромагнита не трогается с места, так как сила удержания подвижной системы верхнего контактора больше начальной силы нижнего электромагнита, имеющего больший зазор между якорем и сердечником. Так как при большом зазоре магнитной системы из-за малого индуктивного сопротивления в катушке протекает ток, в 8—15 раз превышающий рабочий, то для того, чтобы катушка не перегревалась, зазор должен быть минимальным.

Реле — слаботочный аппарат, применяемый для дистанционного и автоматического управления контакторами и пускателями. По конструктивному исполнению реле делятся на контактные и бесконтактные, а по назначению — на реле управления и защиты.

Электрическое контактное реле — в большинстве случаев промежуточный элемент в системе автоматического управления, производящий замыкания или размыкания одной или нескольких электрических цепей. В реле при плавном или скачкообразном изменении входной (управляющей) величины (электрической, тепловой и др.) происходит скачкообразное замыкание контактов, т. е. скачкообразное изменение выходной (управляемой) величины.

В электроприводе реле управления предназначается для управления пуском, разгоном или торможением двигателя, контроля и поддержания значения тока в цепи или напряжения, а также введения в систему управления сигналов на изменение режимов работы установки. Реле защиты служит для защиты от повреждений аппаратов, двигателей и механических узлов электропривода в ненормальном режиме работы путем подачи команд на отключение или сигнализацию.

Некоторые типы реле (тока, напряжения) используются как для управления, так и для защиты.

Из всего многообразия типов и конструкций реле рассмотрим наиболее часто применяемые для управления электроприводом.

Реле времени служат для создания выдержки времени между срабатыванием двух или нескольких аппаратов. Выдержка времени у этих реле может осуществляться при командах как на срабатывание, так и на отключение.

В электроприводе для создания небольших выдержек времени (до 5—10 с) наибольшее применение получили *реле времени с электромагнитным замедлением*. Реле приводится в действие только постоянным током. В цепях переменного то-

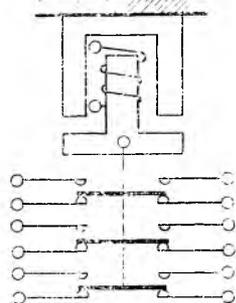


Рис. 9-6. Схема многоконтактного промежуточного реле

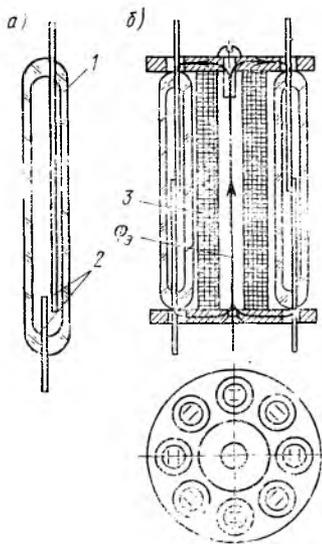


Рис. 9-7. Разрез геркона и герконового реле

ка для использования этого реле ставят выпрямители. Выдержка времени реле создается после снятия напряжения или тока с катушки управления за счет замедленного спадания остаточного магнитного потока в магнитной системе.

Для подачи команд, задержанных во времени, служат и другие конструкции реле:

пневматическое реле времени, у которого выдержка времени получается за счет медленного натекания воздуха в камеру с регулируемым сечением отверстия;

реле времени с часовым механизмом, у которого замедлитель выполнен в виде анкерного механизма часов;

моторное реле времени, в котором выдержки времени до нескольких десятков минут получаются за счет механизма, приводимого в действие микродвигателем;

реле времени полупроводниковое, тиратронное, электронное, в котором используется принцип замедленного разряда конденса-

тора с использованием элементов электронной и полупроводниковой техники (ламп, транзисторов, тириатронов и т. п.).

Для одновременной коммутации нескольких электрических цепей в автоматических схемах управления служат электромагнитные промежуточные реле, которые включаются и отключаются с малой задержкой по времени (десятые и сотые доли секунды). Схема подобных реле показана на рис. 9-6. Они работают с большим числом включений в час, поэтому неисправности электромагнитов и контактов становятся наиболее частыми причинами отказов в работе. Для повышения надежности и износоустойчивости разработаны конструкции реле с магнитоуправляемыми герметизированными контактами (герконами). Износоустойчивость герконов достигает десятков и сотен миллионов срабатываний. Герконы способны осуществлять коммутацию токов до 5 А при напряжении до 200 В.

На рис. 9-7, а изображен простейший геркон с замыкающим контактом, помещенным в герметизированную колбу или капсулу 1. В нормальном состоянии, т. е. при отсутствии внешних воздействий, контакт разомкнут или замкнут. Если контакт поместить в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом или катушкой с током, то контактные пластины 2 сомкнутся (или разомкнутся, если они были замкнуты). Герконы объединяются в конструкции (рис. 9-7, б), имеющие единые внешние или внутренние управляющие катушки 3. При этом получают многоконтактные реле, управляемые одним сигналом тока, создающего магнитный поток Φ_a . Многоконтактные реле, выполненные на герконах, позволяют осуществлять и определенную последовательность срабатывания контактов за счет создания разных магнитных цепей отдельных контактов. Это значительно расширяет их применение в автоматизации управления электроприводом.

Тепловые реле предназначены для защиты двигателей от перегрузок. Наибольшее распространение получили тепловые реле с биметаллической пластиной. Биметаллическая пластина состоит из двух соединенных сваркой пластин, одна из которых имеет больший температурный коэффициент расширения. Если нагревать такую пластину, то она изогнется в сторону материала с меньшим коэффициентом расширения. Биметаллический элемент может нагреваться за счет теплоты, выделяемой в пластине протекающим током, или специальным нагревателем. Нагреватель включается в цепь тока защищаемого двигателя. Реле защищает двигатель при сравнительно небольших $(1,1 \div 1,2) I_{ном}$, но продолжительных перегрузках.

Кинематическая схема теплового реле показана на рис. 9-8. Ток защищаемого двигателя проходит через нагревательный элемент 1, внутри которого расположена биметаллическая пластинка 2, упирающаяся в верхний конец пружины 5. Нижний конец пружины давит на выступ пластмассового коромысла 6 с подвижным контактом 8 мостикового типа.

До тех пор, пока ток не превышает допустимого значения (номинального тока защищаемого двигателя), механизм реле остается

в положении, при котором контактные пластины 7 замкнуты мостиком 8. При протекании через нагревательный элемент тока, превышающего ток уставки, нагревание биметаллической пластины возрастает с течением времени. При достижении определенной температуры пластины реле сработает и разомкнет контакт 7, подав в схему управления сигнал на отключение двигателя. Правильно выбранное и отрегулированное тепловое реле срабатывает при перегрузке двигателя по току на 20% в течение 20 мин и не будет срабатывать при пуске двигателя или кратковременных толчках нагрузки. Регулирование то-

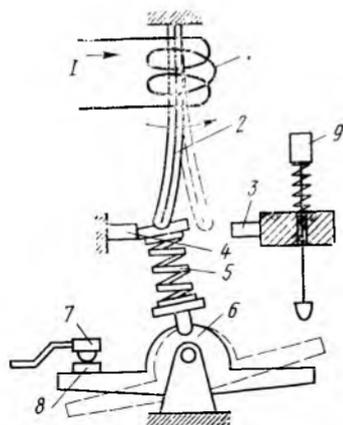


Рис. 9-8. Кинематическая схема теплового реле

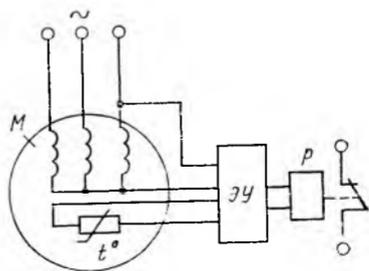


Рис. 9-9. Принципиальная схема температурной защиты двигателя

ка срабатывания реле осуществляется перестановкой упора 4.

После охлаждения биметаллической пластины (через 1—1,5 мин) реле возвращается в исходное положение либо самопроизвольно, либо с помощью кнопки возврата 9. Регулирование реле на самовозврат или на ручной возврат производится перестановкой упора 3.

Тепловые реле используются для защиты не только от перегрузки асинхронных двигателей, но и от работы на двух фазах, для чего в схемах применяются два однополюсных реле или одно двухполюсное с двумя нагревательными элементами, включенными в две фазы.

Устройства температурной защиты (рис. 9-9) предназначены для непосредственного контроля за температурой двигателей и их своевременного отключения при перегревании. Температура обмоток двигателя M измеряется с помощью встроенных в них терморезисторов. При достижении определенной температуры терморезистор скачкообразно изменяет сопротивление, а следовательно, и состояние схемы электронного усилителя ЭУ, на выходе которого включено электромеханическое реле P . Реле отключает контактор, через который получает питание двигатель или подает команду устройствам разгрузки. Устройства температурной защи-

ты отключают двигатель при работе на двух фазах, так как за счет повышенного тока в оставшихся в работе фазах температура двигателя повышается, что в конечном итоге приводит к срабатыванию *P*. При обрыве фазы устройство непосредственно реагирует на изменение потенциала нулевой точки обмоток двигателя и подает команду на его отключение.

§ 9-4. Командные аппараты и датчики

Аппараты ручного управления, с помощью которых подаются команды на включение, переключение, регулирование скорости электроприводов и их останов, называются *командными*. Командоаппараты выполняются контактными и бесконтактными. К ним относятся кнопки управления, универсальные переключатели, ключи управления и командоконтроллеры.

Кнопка управления — простейший командоаппарат. Она предназначена для дистанционного управления электромагнитными и другими аппаратами при сравнительно редких включениях. Кнопочный элемент, на базе которого строятся кнопки и кнопочные станции, обычно имеет один размыкающий и один замыкающий контакт с пружинным самовозвратом. Заключенный в кожух кнопочный элемент называется *кнопкой управления*, а несколько заключенных в кожухе элементов — *кнопочной станцией*. Кнопочные станции могут выполняться для монтажа на пульте, стене, полу (ножные) и подвесными.

Универсальный переключатель — многоцепной аппарат, применяемый при сложной коммутации цепей управления и измерительных цепей (вольтметровых и амперметровых). Он имеет сравнительно небольшие габариты и довольно мощные контакты (на токи до 20 А переменного тока), что позволяет использовать его в силовых цепях многоскоростных асинхронных двигателей небольшой мощности.

Общий вид переключателя представлен на рис. 9-10. Переключатель набирается из 2, 4, 6, 8, 10, 12 или 16 секций 1, стянутых шпильками 2. Переключения производятся с помощью рукоятки 3. Фиксация положений осуществляется пружиной 4.

Ключ управления подобен универсальному переключателю; он состоит из набора закрытых секций пакетов, на которых укреплены неподвижные контакты и размещены подвижные контактные мостики, приводимые в действие центральным валиком с рукояткой.

Различные конфигурации контактов позволяют получить разнообразные варианты последовательности замыканий или размыканий контактов с разрывом и без разрыва токовой цепи.

Контроллер. Переключения электрических цепей могут выполняться контроллером — многоступенчатым, многоцепным аппаратом, имеющим специальную диаграмму переключений контактов. По роду тока коммутируемых электрических цепей контроллеры делятся на контроллеры постоянного и переменного тока, по назна-

чению — на *сильноточные (силовые) контроллеры*, контакты которых предназначены для коммутации главных цепей электродвигателей, и *командоконтроллеры*, коммутирующие цепи управления

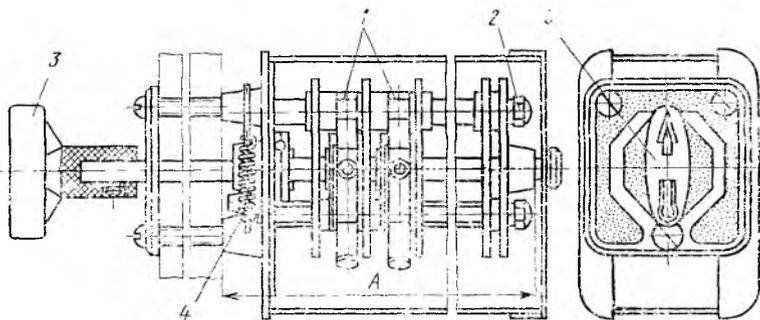


Рис. 9-10. Общий вид пакетного переключателя серии УП

электромагнитных контакторов. По конструктивному исполнению различают барабанные, кулачковые и плоские контроллеры.

Командоконтроллеры и силовые контроллеры конструктивно аналогичны друг другу; первые из них имеют меньшие габариты и контакты мостикового типа, предназначенные для коммутации

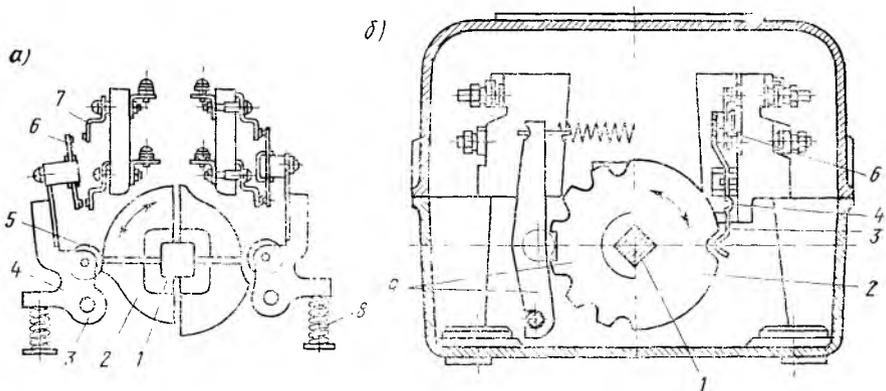


Рис. 9-11. Кинематическая схема и разрез командоконтроллера переменного и постоянного тока

сравнительно небольших токов; вторые снабжены перекатывающими контактами с дугогашением.

В контроллерах могут располагаться как сильноточные контакты, так и контакты для цепей управления. Количество контактов определяется схемой контроллеров.

На рис. 9-11 показаны кулачковые командоконтроллеры с различными профилями кулачковых шайб и фиксирующими механиз-

мами. В контроллерах, предназначенных для коммутации цепей переменного тока (рис. 9-11, а), в отличие от контроллеров, предназначенных для цепей постоянного тока (рис. 9-11, б), нет межконтактных изоляционных перегородок. Замыкание или размыкание контактов происходит при повороте вала 1 на угол, определяемый устройством фиксации 9. Необходимое усилие прижатия контактного мостика 6 к неподвижному контакту 7 создается пружиной 8, воздействующей на рычаг 3. При размыкании контактов кулачковая шайба 2 действует на ролик 5 поворачивающегося вокруг центра 4 рычага 3. Момент включения и отключения контактов определяется профилем кулачковой шайбы. Набор шайб с определенным профилем создает диаграмму замыканий контактов командоконтроллера.

В системах управления электроприводами большое распространение получили различные датчики (контроля пути, давления в гидросистеме, скорости). Наиболее часто в качестве датчиков используются путевые (или конечные) выключатели контактного и бесконтактного исполнений.

Путевой выключатель — аппарат, воздействие на контакты которого производится рабочим механизмом при его движении или принятии определенного положения в пространстве. Этот же выключатель, установленный для контроля и ограничения конечных положений в передвижении механизма, называется конечным. Контактные путевые и конечные выключатели бывают нажимными, рычажными и вращающимися.

Нажимный путевой выключатель показан на рис. 9-12. При нажатии на шток 1 происходит воздействие на контакты 2, замыкание или размыкание которых приводит к переключениям в схеме управления электроприводом. Возврат штока в исходное положение осуществляется пружиной 3.

В рычажном путевом и конечном выключателе воздействующим на контакты устройством является рычаг с механизмом мгновенного переключения контактов (или без такового). По окончании воздействия на рычаг под действием пружины контакты возвращаются в исходное положение (нормальное).

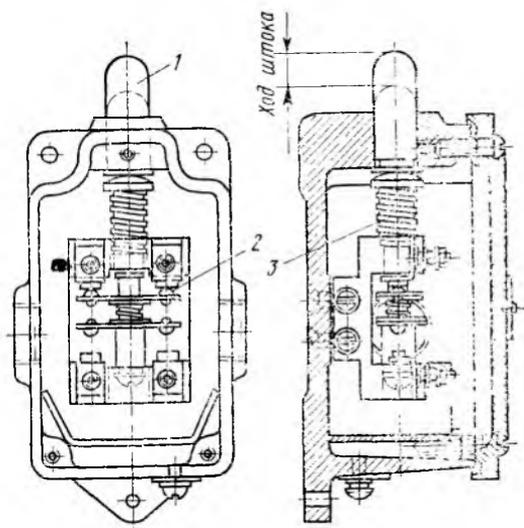


Рис. 9-12. Разрез путевого контактного выключателя

Вращающийся путевой и конечный выключатель подобен устройствам командоконтроллеров, у которых вал вместе с установленными на нем кулачковыми шайбами приводится во вращение производственным механизмом непосредственно или через редуктор. Кулачки на шайбах могут переставляться, чем достигается изменение программы переключения контактов.

Имеются выключатели и датчики, для получения команд от которых не требуется механического воздействия.

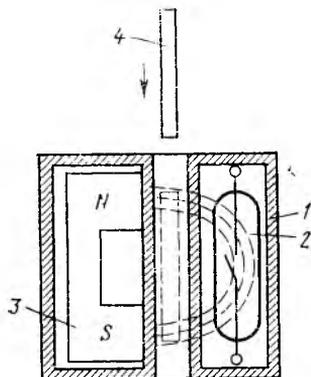


Рис. 9-13. Принципиальная схема герконового путевого датчика

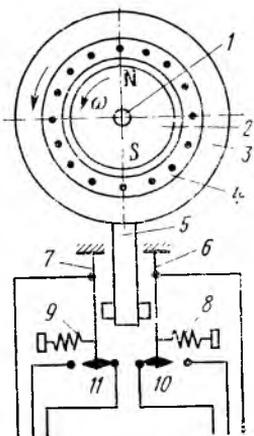


Рис. 9-14. Принципиальная схема индукционного датчика скорости

Герконовый путевой датчик построен на базе герконов с управлением магнитным полем от постоянных магнитов (рис. 9-13). В немагнитном корпусе 1 по обе стороны от щели размещены геркон 2 и постоянный магнит 3. Геркон находится в поле действия постоянного магнита, и его контакт принимает вынужденное положение — замкнут или разомкнут. При вхождении в щель стальной полосы 4 магнитный поток постоянного магнита шунтируется и магнитоуправляемый контакт возвращается в исходное (нормальное) положение. При выходе стальной полосы из щели контакты опять занимают вынужденное положение. Таким образом, датчик выдает сигналы об определенном положении или прохождении механизма.

Датчик скорости реагирует на изменения угловой скорости вала механизма или двигателя и подает команды на соответствующие переключения в цепях управления электроприводом. С помощью датчиков скорости (или реле скорости) контролируют максимальную, минимальную или нулевую скорости, а также направление вращения.

Для управления разгоном и торможением электропривода большое распространение получил *индукционный датчик скорости* (называемый реле контроля скорости типа РКС), изображенный на рис. 9-14.

С валом механизма или двигателя, скорость которого контролируется, соединяется вал 1 датчика, на валу датчика закреплен круглый постоянный магнит 2. Вместе с валом поворачивается кольцо 3 с короткозамкнутой обмоткой 4 типа «беличьей клетки». При вращении вала с магнитом в обмотке индуцируется э. д. с., возникает ток, создающий магнитное поле, и кольцо стремится повернуться в сторону вращения вала. К кольцу прикреплен толкатель 5, который упирается в подпружиненную стойку подвижного контакта 6 или 7 (в зависимости от направления вращения). При определенной угловой скорости сила давления повернувшегося толкателя на стойку 6 или 7 достаточна для переключения контактов 10 или 11. Регулирование скорости, при которой переключаются контакты датчика, осуществляется изменением натяжения пружин 8 или 9.

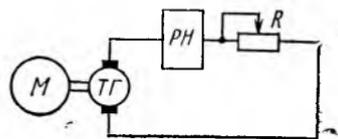


Рис. 9-15. Схема контроля скорости с использованием тахогенератора и реле

Датчики скорости могут выполняться и на базе центробежных механизмов, но при этом они более громоздкие и менее надежные, чем индукционное реле контроля скорости.

В схемах непрерывного автоматического управления электроприводом применяются датчики скорости — тахогенераторы ТГ, э. д. с. которых пропорциональна угловой скорости вала двигателя М. Сочетание тахогенератора и электромагнитного реле напряжения РН образует устройство контроля скорости (рис. 9-15). Реле срабатывает при некоторой определенной угловой скорости двигателя в зависимости от положения регулирующего реостата R.

В замкнутых системах электропривода датчиком скорости является тахогенератор, сигнал от которого поступает в систему управления.

§ 9-5. Реостаты, тормозные электромагниты

Для изменения внешнего сопротивления при пуске, регулировании угловой скорости и торможении двигателей, а также для изменения тока возбуждения двигателей независимого возбуждения служат устройства, называемые реостатами. Реостат — аппарат, состоящий из секций активного сопротивления и переключающего устройства.

По назначению реостаты делятся на *пусковые, пускорегулирующие, нагрузочные и реостаты возбуждения*.

В зависимости от материала, используемого для создания сопротивления электрическому току, различают металлические, жидкостные и угольные реостаты.

В металлических реостатах используются все материалы, применяемые для изготовления резисторов; в жидкостных реостатах используются водные растворы солей и щелочей; в угольных — набор угольных дисков, сопротивления которых изменяются в зависимости от давления на диски. Металлические реостаты можно

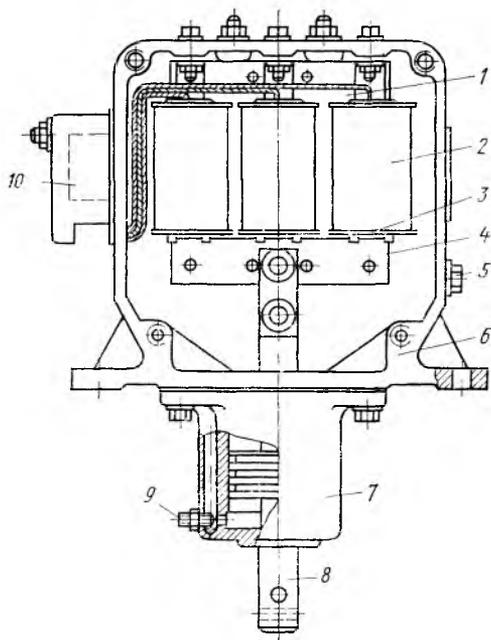


Рис. 9-16. Общий вид электромагнита трехфазного тока:

1 — ярмо; 2 — катушки; 3 — держатель катушки; 4 — яркор; 5 — болт заземления; 6 — корпус; 7 — демпферное устройство; 8 — шток; 9 — винт регулировочный; 10 — панель выводов

разделить в зависимости от системы охлаждения на реостаты с естественным воздушным и масляным охлаждением. При небольшой мощности регулирования резисторы и переключающее устройство, представляющее собой плоский контроллер или скользящий контакт, скомпонованы в один аппарат. При больших мощностях в качестве переключающих устройств используются барабанные и кулачковые контроллеры.

В зависимости от режима работы реостаты делятся на работающие кратковременно (пусковые реостаты и пусковая часть пускорегулирующих реостатов) и продолжительно (все остальные виды реостатов).

Тормозной электромагнит служит для быстрых и небольших перемещений тормозных колодок механического тормоза производственного механизма.

Электромагниты различаются по роду тока — постоянного и переменного тока, по длине хода якоря — длинноходовые и короткоходовые, по продолжительности включения ПВ (15, 25, 40 и 60%).

На переменном токе электромагниты выполняются одно- и трехфазными.

На рис. 9-16 представлена конструкция длинноходового тормозного электромагнита трехфазного тока типа КМТД-102. Ход якоря составляет 50 мм при тяговом усилии до 200 Н, включая вес якоря. Магнитопровод электромагнита Ш-образный, набранный из листов электротехнической стали. Электромагнит предназначен для размыкания тормоза, т. е. для отжатия пружины или подъема груза. При включении электромагнита, когда якорь опущен и имеется

большой зазор в магнитной системе, ток в цепи достигает значения в 10—15 раз больше номинального (включенного состояния электромагнита). Это обстоятельство должно учитываться при выборе защитной аппаратуры — плавких предохранителей или автоматов.

Короткоходовые электромагниты постоянного тока типа МП и однофазного переменного тока типа МО имеют ход якоря 2—4,5 мм и предназначены для управления короткоходовыми пружинными тормозами.

§ 9-6. Выбор силовых резисторов и аппаратов управления

Для ограничения пусковых и тормозных токов и регулирования момента двигателей часто применяют реостаты. Коммутация секций реостатов производится вручную или автоматически дистанционно. При автоматическом выведении внешних сопротивлений двигателей используют контакторы, шунтирующие секции силовых резисторов (ящиков сопротивлений).

Выбор резисторов. Силовые резисторы выбирают по сопротивлению отдельных секций и допустимому току. Знание сопротивлений (см. гл. 6) — первоначальное необходимое условие для выбора резистора. Чтобы правильно выбрать резистор, необходимо определить протекающий по нему расчетный ток и мощность, которую он должен рассеять без превышения допустимой температуры. При этом затраты активного материала должны быть минимальными.

Если через резистор протекает ток длительно, то превышение температуры τ токопроводящего материала с течением времени становится установившимся τ_y . При этом закон изменения τ остается таким же, как и при нагревании двигателя [см. (8-1), (8-2), рис. 8-1]. Интенсивность охлаждения резисторов зависит от окружающей среды (воздух, масло) и происходит в соответствии с (8-3), как показано на рис. 8-2. Постоянные времени нагревания $T_{нагр}$ и охлаждения $T_{охл}$ резисторов можно определить по тем же формулам, которые указаны для двигателей в § 8-1.

В зависимости от длительности прохождения по резистору тока и характера (графика) изменения его значения различают следующие основные режимы работы резисторов:

1) продолжительный режим, при котором рабочий период протекания тока I_∞ настолько большой, что превышение температуры τ практически достигает установившегося значения (рис. 9-17, а);

2) кратковременный режим, при котором рабочий период протекания тока I_t мал и τ не успевает достичь практически установившегося значения, а пауза (когда ток не протекает через резистор) настолько велика, что значение τ становится равным нулю, т. е. температура резистора становится равной температуре окружающей среды (рис. 9-17, б). Для резисторов, работающих в этом режиме, практикой и действующими нормативами установлены следующие длительности включения: 10, 20 и 30 с; 1, 3 и 5 мин;

3) повторно-кратковременный режим, при котором рабочие периоды протекания тока $I_{тв}$ чередуются с паузами таким образом, что ни в одном из рабочих периодов или пауз значение τ не достигает установившегося. Иными словами, в рабочий период температура резистора не достигает установившегося значения, а во время паузы она не достигает температуры окружающей среды (рис. 9-17, в). Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения

$$\varepsilon = t_{раб} / (t_{раб} + t_0) = t_{раб} / T_{ц},$$

где $t_{раб}$ — время работы (нахождения под током) резистора за цикл; t_0 — время паузы (время отсутствия тока в резисторе); $T_{ц} = t_{раб} + t_0$ — время цикла.

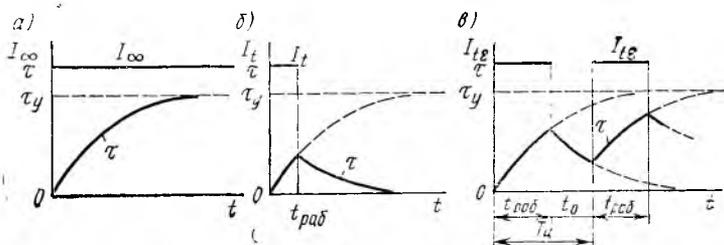


Рис. 9-17. Идеализированные графики тока в резисторах при продолжительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы

Наиболее часто относительная продолжительность включения выражается в процентах:

$$ПВ\% = (t_{раб} / T_{ц}) 100.$$

Продолжительности включения (%) для повторно-кратковременного режима при длительности цикла 60 с стандартизованы: 6,25; 8,8; 12,5; 17,7; 25; 35; 50 и 70.

По току резисторы выбираются исходя из данных каталогов, в которых приводится значение длительно допустимого тока резистора $I_{ном}$ при максимально допустимой температуре токопроводящего материала. Если расчетный эквивалентный ток в различных режимах не превышает номинального тока резистора, то температура находится в допустимых пределах и резистор работает сколько угодно долго.

Для продолжительного режима работы с неизменной нагрузкой значение длительного рабочего тока $I_{\infty} = I_{нк}$ не должно превышать $I_{ном}$ резистора.

Для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы резисторы выбираются с помощью коэффициентов перегрузки по току k_t и $k_{тв}$. Для этих режимов в каталогах имеются зависимости указанных коэффициентов от постоянной времени нагревания $T_{нагр}$ при различных значениях времени работы в кратковременном

режиме (рис. 9-18, а) и при различных значениях относительной продолжительности включения ϵ в повторно-кратковременном режиме (рис. 9-18, б).

Допустимый расчетный ток при выбранном токе резистора $I_{\text{ном}}$ и его постоянной времени нагрева $T_{\text{нагр}}$ в кратковременном и повторно - кратковременном режимах определяется соответственно по формулам

$$I_t = k_t I_{\text{ном}}; I_{t\epsilon} = k_{t\epsilon} I_{\text{ном}}$$

где k_t и $k_{t\epsilon}$ находятся исходя из рис. 9-18 для известного времени работы или известной относительной продолжительности включения.

Резистор по току можно выбирать и на основании расчетных токов стандартизированных режимов, данные для которых приводятся в каталогах на резисторы.

Резисторы выполняют из материалов с достаточно высоким удельным сопротивлением в виде отдельных элементов: чугунного (рис. 9-19, а), фехралевового (рис. 9-19, б) и константанового (рис. 9-19, в). Отдельные элементы конструктивно объединяются в ящики резисторов (рис. 9-20).

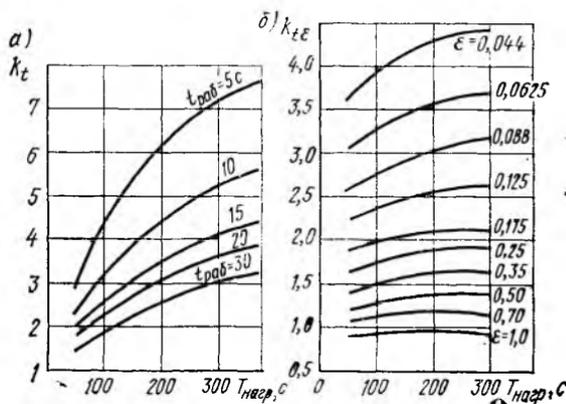


Рис. 9-18. Графики коэффициентов перегрузки резисторов по току в кратковременном k_t и повторно-кратковременном $k_{t\epsilon}$ режимах работы

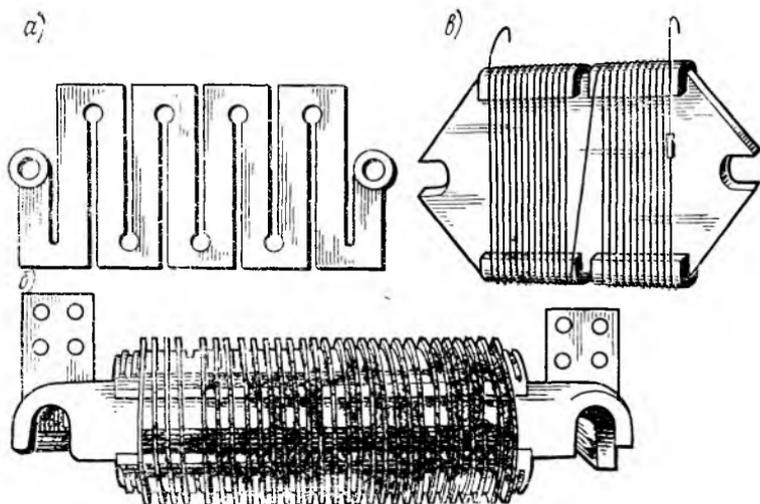


Рис. 9-19. Общий вид элементов силовых резисторов

Необходимое сопротивление секций (в омах) получают последовательным, параллельным и последовательно-параллельным соединением секций или элементов резисторов.

Общее сопротивление секций при последовательном (рис. 9-21, а), параллельном (рис. 9-21, б) и смешанном (рис. 9-21, в) соединении ступеней рессорта равно соответственно

$$R = R_a + R_b + R_c; \quad (9-1)$$

$$R = \frac{1}{1/R_a + 1/R_b + 1/R_c}; \quad (9-2)$$

$$R = R_a + \frac{1}{1/R_b + 1/(R_c + R_d)}. \quad (9-3)$$

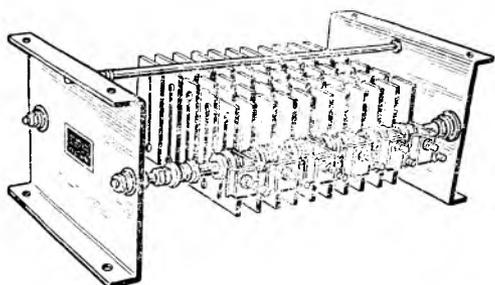


Рис. 9-20. Общий вид ящика резисторов с чугунными элементами

При установке ящиков резисторов необходимо обеспечить хороший естественный теплоотвод.

Выбор аппаратов управления. Аппараты должны соответствовать напряжению питающей сети, а также расчетным или номинальным токам нагрузки. Выключатели и предохранители по коммутационной способности должны также надежно отключать токи короткого замыкания. Для этого определяется расчетное значение тока короткого замыкания, которое сравнивается с каталожными данными этих аппаратов. Контакторы и магнитные пускатели при нали-

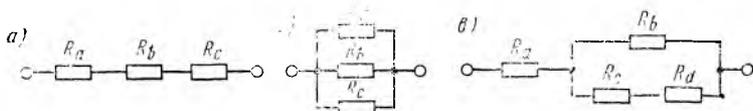


Рис. 9-21. Схемы соединения секций резисторов

ции справочных данных могут выбираться не только по току, но и непосредственно по мощности двигателей. Уставки реле защиты (тепловых, токовых, напряжения) должны отвечать расчетным значениям соответствующих величин (см. § 10-3).

Различные реле, а также командоаппараты по коммутационной способности контактов должны надежно работать при включениях и отключениях нескольких аппаратов. Для этого при работе схемы управления электроприводом определяется суммарная мощность катушек, включаемых или отключаемых аппаратов. Найденные наибольшие значения токов включения или отключения сравниваются с соответствующими паспортными значениями аппарата. При выборе аппаратов по условию коммутационной способности контактов необходимо учитывать индуктивность электрических цепей, так как в цепях с индуктивной нагрузкой коммутационная способность контактов резко снижается.

РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

§ 10-1. Основные положения и понятия

Под *управлением электроприводом* понимается пуск его в работу, регулирование скорости, реверсирование, торможение, а также поддержание постоянства заданной скорости, момента, мощности или другой какой-либо величины, обеспечивающей технологический процесс рабочей машины. Если пуск электропривода, регулирование скорости и торможение осуществляются с помощью аппаратов ручного управления (рубильников, кнопочных или пакетных выключателей, контроллеров, пусковых и регулировочных реостатов и т. п.), то имеет место *неавтоматическое (ручное) управление*. Электропривод, управляемый таким способом, называется *неавтоматизированным*. Если же при управлении электроприводом человек участвует только в подаче начального управляющего воздействия, а остальные действия по управлению осуществляют различные аппараты (реле, контакторы, логические и бесконтактные устройства), то такой управляемый электропривод называется *автоматизированным*. Электропривод, в котором все операции по управлению осуществляют автоматические аппараты и устройства, а участие человека предусматривается только в надзоре за электро-механической системой, называется *автоматическим*. Управление автоматизированным и автоматическим электроприводом осуществляет система управления, которая во взаимодействии с двигателем, преобразователями и автоматическими управляющими устройствами называется *электро-механической автоматической системой управления электроприводом (АСУЭП)*.

По количеству используемых для управления электроприводом сигналов (каналов информации) различают три вида систем управления: по разомкнутому, замкнутому и комбинированному циклам.

Системы электропривода, управляемые по разомкнутому циклу, называются *разомкнутыми системами*. Процесс управления по этой системе характеризуется отсутствием всякого измерения и контроля значения регулируемой величины (скорости, момента и т. п.). Регулирующее воздействие в этой системе от регулируемой величины не зависит, т. е. имеет место воздействие и регулирование в одном направлении (используется только один канал информации).

Системы, управляемые по замкнутому циклу и называемые *замкнутыми*, одновременно используют два канала информации: задающей и о фактическом значении регулируемой величины — обратная связь. Задающая информация сравнивается с информацией обратной связи, и в зависимости от значения и знака результирующего сигнала по каналу управления вырабатывается регулирующее воздействие на электропривод таким образом, чтобы свести ошибку

(или рассогласование) к минимуму. Качество и точность работы системы с обратными связями намного выше, чем разомкнутой.

В системах, управляемых по комбинированному циклу и называемых *комбинированными*, сочетаются две системы — замкнутая и разомкнутая, обеспечивающие независимость регулируемой величины. Качество и надежность работы электропривода улучшаются.

По виду сигналов информации и управления (изменяющихся непрерывно или дискретно) АСУЭП разделяют на *непрерывные* (аналоговые) и *дискретные* (импульсные, цифровые и релейные) системы, а для систем стабилизации параметров — следящие и программно управления.

По виду усилительных элементов в управляющем устройстве различают системы электропривода:

1) с серводвигательным управлением, где в качестве управляющего устройства применяется вспомогательный двигатель (серводвигатель);

2) с релейно-контакторным управлением, в котором управляющим устройством являются электромеханические контакторы и реле;

3) с бесконтактным управлением, в котором управляющими устройствами являются бесконтактные усилители;

4) с электромашинным управлением, для управления которым используется электромашинный усилитель (ЭМУ).

По влиянию нагрузки на регулируемую величину различают три вида систем автоматического управления: статические, астатические и смешанные. *Статическими* называются системы, у которых установившееся значение регулируемой величины зависит от нагрузки, а *астатическими* — системы, у которых установившееся значение регулируемой величины не зависит от нагрузки. *Смешанные системы* получаются при одновременном использовании статических и астатических систем управления.

Все разнообразие способов и систем управления электроприводами подчинено выполнению определенных функций. К основным из них можно отнести следующие:

1) управление процессами пуска, торможения и реверсирования электроприводов;

2) поддержание постоянства (стабилизация) заданной величины (скорости, момента, мощности и др.) в статическом и динамическом режимах;

3) слежение за вводимыми в систему произвольно изменяющимися входными сигналами (следящее управление);

4) отработку заданной программы (программное управление);

5) выбор целесообразных режимов работы электроприводов.

Кроме основных функций автоматические системы управления электроприводами выполняют и ряд вспомогательных. К ним относятся: защита электродвигателей и другого электрооборудования от токов короткого замыкания, недопустимых длительных и кратковременных перегрузок, перенапряжений и т. п.; блокирование, исключающее возникновение аварийных и ненормальных режимов при

ошибочных действиях операторов или обслуживающего персонала; ограничение движения механизмов в конечных положениях; сигнализация о ходе технологического процесса или исправностях и неисправностях механизмов.

При комплексной автоматизации производственных процессов электропривод часто представляет собой сложную многосвязанную систему с управлением в функции нескольких параметров.

§ 10-2. Принципы управления электроприводами.

Выполнение электрических схем

Пуск электропривода в работу всегда связан с необходимостью тех или иных переключений как в силовой цепи, так и в цепях управления.

Принципы управления электроприводами. Наиболее просто процесс управления осуществляется для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Так пуск его, как правило, сводится к прямому включению на полное напряжение сети. У асинхронных двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока для плавности разгона электропривода и ограничения пусковых токов пусковые ступени ускорения (см. гл. 5 и 6) выводят вручную или с помощью контакторов. Для облегчения работы оператора и обеспечения наиболее оптимального режима разгона электропривода схему управления выполняют автоматической, с использованием электромеханических реле и контакторов. При этом электропривод называется *электроприводом с релейно-контакторным управлением*.

Для пуска двигателя оператор должен нажать кнопку управления или повернуть в рабочее положение рукоятку командоконтроллера. Все пусковые операции — подключение двигателя к сети, последовательное замыкание накоротко пусковых сопротивлений или отключение других пусковых устройств — совершаются автоматически.

Процесс разгона электропривода со ступенчатым ускорением показан на рис. 5-3, из которого видно, что выключение (или закорачивание) ступеней пускового сопротивления должно производиться через определенные промежутки времени t_{p1} , t_{p2} , t_{p3} при соответствующих скоростях ω_1 , ω_2 , ω_3 и моменте (токе) переключения $M_2(I_2)$. Отсюда следует, что управление пуском может быть получено в функции: 1) независимой выдержки времени; 2) скорости; 3) тока. Кроме трех названных широко распространено управление электроприводом в функции пути, когда двигатель пускается или тормозится при достижении рабочими механизмами определенного положения, фиксируемого с помощью путевых или конечных выключателей.

При автоматическом управлении электроприводом и технологическим процессом может применяться управление в функции мощности, момента, натяжения, температуры, цвета, числа операций и др.

Управление в функции времени, получившее наибольшее распространение, осуществляется с помощью аппаратов, контролирующих время, т. е. реле времени, настраиваемых на отсчет заданных выдержек времени. Каждое реле включает или отключает отдельный контактор, который закорачивает главным контактом или вводит нужную ступень пускового или тормозного сопротивления.

Управление в функции скорости производится с помощью реле, контролирующих угловую скорость двигателя непосредственно или косвенно. По достижении заданного значения скорости соответствующее реле выдает команду на включение контактора ускорения. При косвенном управлении используются величины, пропорциональные угловой скорости двигателя, например э. д. с. якоря (для двигателей постоянного тока), э. д. с. или частота тока ротора (для двигателей асинхронных с фазным ротором и синхронных). При этом считают, что управление происходит в функции э. д. с. или частоты.

Управление в функции тока осуществляется путем применения реле минимального или максимального тока. Эти реле включают контакторы ускорения в моменты увеличения или уменьшения тока двигателя до заданного значения.

Управление в функции э. д. с. производится с помощью реле или контакторов, настроенных на срабатывание при различных значениях э. д. с. якоря или ротора.

Управление в функции частоты основано на изменении частоты тока в роторе или э. д. с., пропорциональной скольжению, при пуске или торможении электропривода и осуществляется с помощью реле, настроенных на эту частоту тока и э. д. с. Управление торможением может производиться в функции времени, скорости (э. д. с., частоты) и тока с применением тех же средств, что и при пуске. Окончание процесса торможения фиксируется соответственно: после выдержки времени, достаточной для торможения; при снижении угловой скорости двигателя до нуля; при снижении тормозного тока двигателя до заданного значения при торможении противовключением или до нуля при динамическом торможении.

Автоматическое управление пуском и торможением двигателей в функции указанных величин осуществляется с помощью типовых узлов электрических схем.

Выполнение электрических схем. Для того чтобы «читать» электрические схемы, ознакомимся с основными положениями, понятиями и правилами их изображения.

Электрической схемой какого-либо объекта управления называется схема соединения электрических цепей входящих в него электрических двигателей, преобразователей, аппаратов, приборов, измерительных устройств и усилителей. Указанные устройства или отдельные элементы электрической цепи на схеме обозначаются условными знаками и символами, которые оговорены в ГОСТах. Механические детали и сложные кинематические связи в электрических связях не показываются. Принципиальная (полная) электриче-

ская схема содержит все элементы и связи между ними и дает детальное представление о принципе работы электропривода или производственной установки в целом. На основе принципиальной схемы разрабатываются схемы соединения (монтажные) и подключения (внешних соединений). Чтобы быстрее понять принцип действия сложной схемы, ее дополняют *структурной и функциональной схемами*. С помощью структурной и функциональной схем легко определяются зависимость и взаимодействие узлов установки.

Несмотря на большое разнообразие типов электрических машин, аппаратов, приборов и устройств автоматического управления, их элементы имеют значительную общность (обмотки двигателей, катушки и контакты различных аппаратов и др.), поэтому для изображения их на схемах требуется небольшое количество условных обозначений.

Условные обозначения обычно вычерчиваются для отключенного положения электросхемы, т. е. без напряжения на катушках аппаратов и без механических воздействий на аппараты (начальное положение схемы). Для аппаратов, не имеющих нормального (начального) положения (аппараты с принудительной фиксацией в любом положении), к схеме должны быть приведены пояснения относительно работы контактов.

Изображения контактов реле, кнопок, рубильников, автоматов и других коммутационных устройств располагают так, чтобы воображаемая сила, действующая на подвижную часть контакта, уменьшала острый угол изображенного контакта (см. ГОСТ 2.755—74) и замыкала замыкающие контакты, но размыкала размыкающие контакты. Все контакты делят на замыкающие и размыкающие.

Условные обозначения, наиболее употребительные в электрических схемах, приведены в ГОСТ 2.722—68, 2.743—72, 2.756—76 и др. Имеется три способа построения условных графических обозначений: упрощенный однолинейный, упрощенный многолинейный (форма I) и разнесенный (форма II).

Линии связей в схемах вычерчиваются полностью. В сложных схемах иногда обрывают линии связей удаленных друг от друга элементов (например, в разветвленной цепи управления, цепях питания и смещения логических элементов, цепях накаливания радиоламп), если графические изображения связей затрудняют чтение схемы. Обрывы линий заканчивают стрелками с обозначением мест подключения. В тех случаях, когда ряд элементов подключают к цепям одинаковой полярности и равного потенциала, на проводах линий связи указывают подключение соответствующей полярности возле изображенных выводов этих элементов.

Для чтения схем с разнесенным изображением все элементы одного и того же аппарата (например, главные и блокировочные контакты выключателя, катушка и контакты контактора или реле, контакты кнопки управления) снабжают одинаковым буквенно-цифровым позиционным обозначением, составляемым из буквенного обозначения русского или латинского алфавитов и порядкового но-

мера. Часто эти обозначения состоят из первых характерных букв слов, составляющих наименование элемента, или букв, присвоенных этому элементу ГОСТом или конструкторскими нормами. Например *K1*, *K2* и т. д. обозначают контакторы, *M* — двигатели и т. п.

Если в схеме имеется только один элемент (например, магнитный пускатель, генератор и др.), то порядковый номер в его позиционном обозначении опускается. Позиционные обозначения проставляют по схеме рядом с условными графическими обозначениями элементов, по возможности с правой стороны или над ними.

В несложных схемах, т. е. в схемах, имеющих небольшое количество элементов, в раздельном изображении части элементов (например, кнопок управления) показывают механические связи штриховыми или непрерывными параллельными линиями. В этом случае позиционные обозначения элементов проставляют у одного или обоих концов линии механической связи.

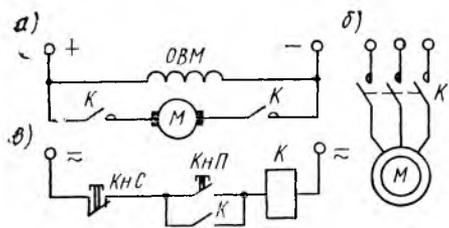


Рис. 10-1. Схемы подключения двигателей к сети

§ 10-3. Типовые узлы схем включения двигателей и вывода резисторов

Схема подключения к питающей сети и отключения от нее силовой цепи двигателя довольно проста и осуществляется с помощью контакторов. Для двигателя постоянного тока она показана на рис. 10-1, а, а для двигателя переменного тока — на рис. 10-1, б. Цепь управления контактором приведена на рис. 10-1, в.

Включение контактора *K* осуществляется кнопкой «Пуск» *KнП*, при нажатии на которую замыкаются ее разомкнутый контакт и цепь катушки электромагнита контактора *K*. Контактор *K* главными (силовыми) контактами подключает двигатель к сети. Отключается двигатель после нажатия на кнопку «Стоп» *KнС*, замкнутый контакт которой размыкается и разрывает цепь питания катушки *K*.

Чтобы обеспечить питание катушки контактора при отпускании кнопки *KнП*, ее разомкнутый контакт шунтируют вспомогательным контактом (блок-контактом) этого контактора. Питание цепей управления осуществляется на постоянном или переменном токе в зависимости от применяемой аппаратуры. При наличии сети постоянного тока или при частых пусках двигателя целесообразно использовать аппараты с катушками электромагнитов на постоянном токе. При нечастых пусках асинхронных двигателей удобнее применять аппараты с катушками на переменном токе.

В реверсивных схемах управления используется не менее двух контакторов, переключением которых изменяют направление вращения двигателя. Силовая цепь реверсивной схемы для двигателя постоянного тока показана на рис. 10-2, а, а для двигателя переменного тока — на рис. 10-2, б. Цепи управления реверсивными контакторами приведены на рис. 10-2, в. При нажатии на кнопку *Кн1* через размыкающий контакт кнопки *КнС*, замкнувшийся контакт *Кн1* и размыкающие контакты *Кн2* и *К2* получит питание катушка электромагнита контактора *К1*. Контактор *К1* главными контактами

подключает двигатель к сети для какого-то условного направления вращения, например левого. Для изменения направления вращения двигателя нажимают на кнопку *Кн2*. При этом размыкается цепь питания катушки *К1* и по цепи контактов *КнС* — *Кн1* — *Кн2* — *К1* получает питание катушка контактора *К2*. Главными контактами *К2* в силовой цепи двигателя

изменяется направление тока в якоре или последовательность чередования фаз (у двигателя переменного тока).

Для удержания контактора *К1* или *К2* во включенном положении служат соответствующие замыкающие блок-контакты *К1* и *К2*. Размыкающий контакт кнопки *КнС* включается в общую цепь питания катушек контакторов *К1* и *К2*. При нажатии на *КнС* контакторы отключаются. В случае приваривания блок-контактов какого-либо контактора при нажатии на кнопку другого направления вращения соответствующий контактор не включается, т. е. кроме механической блокировки контакторов в схеме выполнено электрическое блокирование от одновременного их включения размыкающим контактом кнопки управления *Кн1* (или *Кн2*) и контактом *К1* (или *К2*).

Рассмотренные узлы схем прямого пуска и реверса применяют для двигателей небольшой мощности. При средних и больших мощностях двигателей в силовую цепь двигателей при релейно-контакторном управлении вводят пусковые и тормозные резисторы. Введение и выведение из нее резисторов производится, как правило, ступенчато. Пусковые ступени, называемые ступенями ускорения, шунтируются соответствующими аппаратами — контакторами или силовыми контроллерами.

Контакторы, с помощью которых выводятся или вводятся резисторы в схемах управления электроприводом, называются *контакторами ускорения* или при торможении электропривода — *контакторами торможения*. Если контакторами управляют реле, работаю-

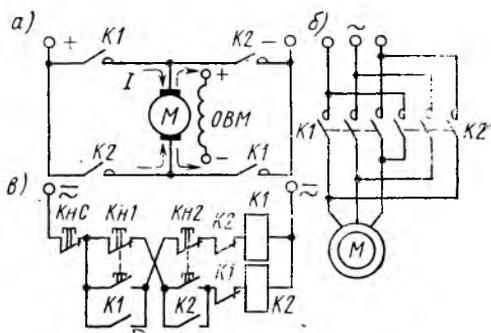


Рис. 10-2. Схемы реверсирования двигателей

щие в функции определенных величин (времени, скорости, тока), то они соответственно называются *реле ускорения или торможения*.

Схемы введения и вывода пусковых сопротивлений, а также габариты контакторов ускорения выбираются в зависимости от тока в силовой цепи и режима работы электропривода. Для двигателей постоянного тока две из возможных схем включения пусковых резисторов показаны на рис. 10-3, а, б. Для асинхронных двигателей включение пусковых резисторов в роторной цепи показано

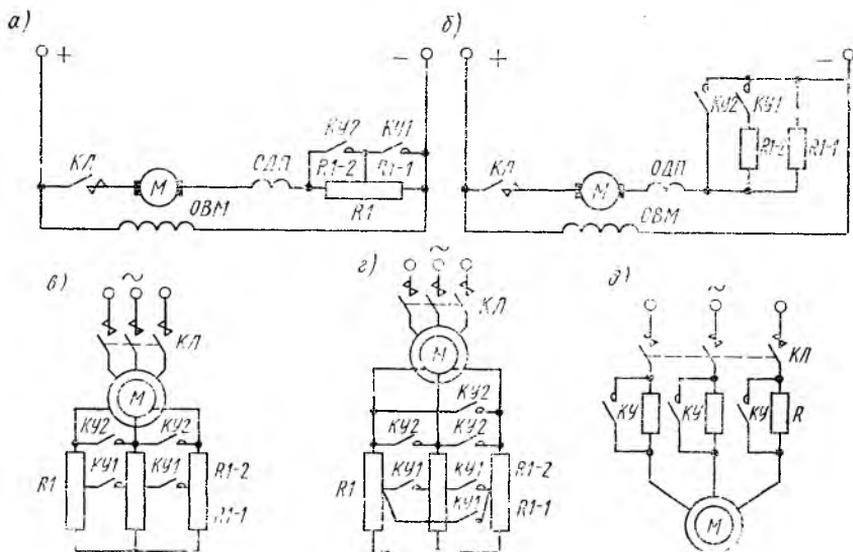


Рис. 10-3. Схемы выведения пусковых резисторов

на рис. 10-3, в, г, а в цепи статора — на рис. 10-3, д. Последовательность работы аппаратов и устройств при пуске двигателя и последующем его разгоне приведена в табл. 10-1, где знак \oplus обозначает включение аппарата или перевод его в вынужденное состояние, а знак \ominus — его отключение. Эти же знаки, но светлые, обозначают, что аппараты остаются в соответствующем положении. Знаки \uparrow \downarrow с индексом изменяющейся величины обозначают, что эта величина растет или снижается. На рис. 10-3, а, б, в, г показана силовая часть схемы включения двигателя и его разгона в две ступени. При включении линейного контактора $KЛ$ двигатель начинает разгоняться с полными (наибольшими значениями) сопротивлений в цепи якоря или ротора — первое состояние схемы. При достижении некоторой скорости реле подает команду на включение первого аппарата (например, контактора) ускорения $KУ1$, который после срабатывания замыкает контакты и шунтирует резистор $R1-1$, являющийся частью пускового резистора $R1$ (у асинхронного двигателя $R1$ трехфазный). Во втором состоянии схема остается до тех пор, пока не будет дана команда $KУ2$ на шунтирование рези-

стора $R1-2$. После замыкания контактов $KУ2$ пусковой резистор будет закорочен, двигатель выйдет на естественную характеристику и разгонится до скорости ω_y .

В схеме, приведенной на рис. 10-3, а, при контакторном управлении все контакторы должны быть одного габарита, так как при работе в продолжительном режиме по их контактам протекает один и тот же ток якоря. К достоинству этой схемы относится то, что приваривание какого-либо контакта не вызывает при последующем пуске двигателя работу без пускового резистора. Схема применяется к двигателям малой и средней мощности. В схеме, приведенной на рис. 10-3, б, контактор ускорения можно выбрать меньшей величины, так как по окончании разгона электропривода его можно

Таблица 10-1

Состояние схемы	Аппараты или устройства					ω
	$KЛ$	$KУ1$	$KУ2$	$R1$	M	
Исходное положение	—	—	—	+	—	$\omega = 0$
Пуск двигателя и ускорение:						
на 1-й ступени	+	—	—	+	+	$\omega \uparrow$
на 2-й ступени	+	+	—	$-R1-1$	+	$\omega \uparrow$
Окончание ускорения	+	+	+	$-R1-2$	+	ω_y

отключить. Эта схема выведения пусковых сопротивлений имеет существенный недостаток, так как в случае приваривания контакта $KУ2$, шунтирующего накоротко пусковые резисторы, последующий пуск двигателя происходит без добавочного сопротивления в цепи якоря. При этом в схеме управления требуется соответствующее блокирование для определенной последовательности работы аппаратов. Схема применяется для двигателей большой мощности.

Узел схемы, приведенный на рис. 10-3, в, применяется наиболее часто, так как он выполняется на двухполюсных контакторах. По контактам контактора ускорения в нормальном режиме работы проходит линейный ток ротора. В схеме, показанной на рис. 10-3, г, по контактам будут проходить токи, меньшие линейных, однако для нее требуются трехполюсные контакторы. На рис. 10-3, д представлен узел схемы с пусковым резистором в каждой фазе статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Этот резистор шунтируется после снижения пускового тока или по истечении времени разгона электропривода. В подобной схеме можно включить резистор только в одну фазу. При этом требуется однополюсный контактор.

Узлы схем силовой электрической цепи для торможения электроприводов с помощью двигателей приведены на рис. 10-4. Для тор-

можения противовключением схемы представлены на рис. 10-4, а, б, в, а для динамического торможения — на рис. 10-4, г, д, е. Торможение противовключением применяется как для двигателей постоянного тока, так и для асинхронных двигателей, особенно в случае реверсивных электроприводов, где вслед за торможением производится пуск двигателя в обратном направлении вращения.

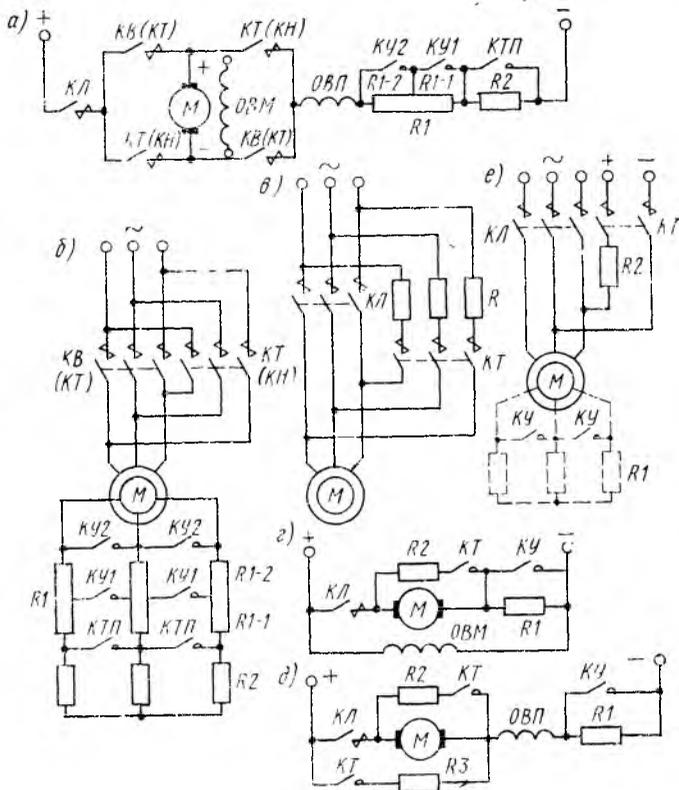


Рис. 10-4. Схемы торможения

При торможении противовключением зашунтированные в двигательном режиме резисторы $R1$ и $R2$ вводят в силовую цепь полностью и оставляют включенными на весь период торможения. Характеристики этого режима приведены на рис. 2-8, 3-13. Для поддержания тормозного момента двигателя по мере снижения скорости резисторы $R2$, $R1-1$, $R1-2$ могут последовательно шунтироваться. Последовательность работы аппаратов и устройств при работе двигателя «вперед», «назад» и при торможении противовключением в одну ступень (рис. 10-4, а, б) приведена в табл. 10-2.

Перед торможением сначала размыкаются контакты реверсивного контактора $KВ$ или $KН$ (в зависимости от направления вра-

щения в двигательном режиме), контакторов ускорения $KУ1$, $KУ2$ и контактора противовключения $КТП$. После этого замыкаются контакты контактора торможения $КТ$, изменяющие направление тока в якоре или последовательность чередования фаз в статоре.

Таблица 10-2

Состояние схемы	Аппараты или устройства									ω	
	$KЛ$	$KВ$	$KН$	$КТ$	$KУ1$	$KУ2$	$КТП$	$R1$	$R2$		M
Исходное положение	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	$\omega = 0$
Пуск «вперед» и ускорение:											
на 1-й ступени	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	ω_1
на 2-й ступени	+	+	-	-	+	-	+	$-R1-1$	-	+	ω_2
Окончание ускорения	+	+	-	-	+	+	+	$-R1-2$	-	+	ω_y
Торможение в одну ступень до $\omega = 0$	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+	ω_1
Окончание торможения	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	$\omega = 0$
Пуск «назад» и ускорение:											
на 1-й ступени	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	ω_1
на 2-й ступени	+	-	+	-	+	-	+	$-R1-1$	-	+	ω_2
Окончание ускорения	+	-	+	-	+	+	+	$-R2-1$	-	+	ω_y

Если после торможения не требуется пуск электропривода для движения в противоположном направлении, то контакт $КТ$ при $\omega = 0$ должен разомкнуться.

При пуске двигателя добавочный резистор $R2$, необходимый только при торможении, шунтируется контактом $КТП$.

Схема, изображенная на рис. 10-4, в, применима в основном для торможения электропривода противовключением до скорости $\omega = 0$. Для ограничения тока и тормозного момента двигателя на период торможения в цепь статора вводят внешнее сопротивление — резистор R .

Работа схем динамического торможения (рис. 10-4, г, д, е) при включении и разгоне электропривода аналогична ранее рассмотренным схемам, для простоты понимания на схемах приведена только одна ступень ускорения и торможения.

Динамическое торможение в схеме (рис. 10-4, г) начинается после размыкания контактов $KЛ$ и $KУ$ и последующего замыкания $КТ$. При этом якорь двигателя шунтируется резистором $R2$. Процесс торможения происходит до скорости $\omega = 0$. Для получения независимого магнитного потока при торможении в схеме (рис. 10-4, д) контакт $КТ$ при замыкании вводит токоограничивающий резистор $R3$ и подключает обмотку $ОВП$ на независимое напряже-

ние питания, т. е. к сети. Характеристики этого режима торможения приведены на рис. 2-10.

Динамическое торможение электропривода с асинхронным двигателем (рис. 10-4, *е*) наступает также после замыкания контактов *КТ*. При этом через токоограничивающий резистор *Р2* в статоре будет протекать постоянный по направлению ток, создающий неподвижный магнитный поток статора. Торможение происходит до скорости $\omega = 0$. Механические характеристики для этого случая приведены на рис. 3-16.

При динамическом торможении двигателя с фазным ротором, у которого в двигательном режиме резистор *Р1* был шунтирован контактами *КУ*, одновременно с замыканием контактов *КТ* должны разомкнуться контакты *КУ*. При этом в роторную цепь вводится резистор *Р1*, который позволит получить первую тормозную характеристику. После некоторого снижения угловой скорости контакты *КУ* можно замкнуть и получить вторую тормозную характеристику. Торможение электропривода при таком переключении проходит более эффективно, так как поддерживается определенное среднее значение тормозного момента двигателя.

§ 10-4. Типовые узлы схем управления в функции различных величин

Автоматический разгон, регулирование скорости и торможение электроприводов осуществляют в функции определенных величин — тока, скорости, времени, пути и др. При этом электрические аппараты, реагирующие на указанные величины, в зависимости от принципа действия включаются в определенные цепи электрических схем управления. Узлы схем, работающие в функции тока, показаны на рис. 10-5, *а*, *б*, а диаграмма изменения угловой скорости и тока двигателя — на рис. 10-5, *в*. Схема управления контакторами ускорения дана на рис. 10-5, *г*.

Ступени пускового реостата (рис. 10-5, *а*, *б*) шунтируются при снижении тока до заданного минимального значения I_2 (рис. 10-5, *в*). Реле ускорения *РУ1*, *РУ2* (которых может быть и больше) отрегулированы или подобраны таким образом, что их замыкающие контакты после замыкания контактов *КЛ* разомкнутся раньше, чем может включиться контактор ускорения *КУ1*, т. е. собственное время срабатывания токового реле должно быть меньше собственного времени срабатывания контактора. Реле *РУ1* и *РУ2* срабатывают при токе I_1 , и разгон электропривода начинается с полностью введенными резисторами в силовой цепи двигателя. По мере разгона двигателя ток в якоре или роторе уменьшается. После снижения тока до значения I_2 реле *РУ1* отпускает якорь и его замыкающий контакт замыкается, чем создается цепь включения катушки контактора ускорения *КУ1*. Силовыми контактами *КУ1* шунтирует (закорачивает) резистор первой ступени *Р1—1*, а через замыкающий блок-контакт обеспечивается питание катушки. После срабатывания *КУ1* процесс разгона начинает контролировать

реле $PY2$, размыкающий контакт которого сначала разомкнется, а при снижении тока до значения I_2 замкнется и включит контактор $KY2$, шунтирующий ступень $R1-2$. Внешнее пусковое сопротивление в цепи якоря (или ротора) будет выведено. Двигатель разгонится по естественной характеристике до скорости ω_y .

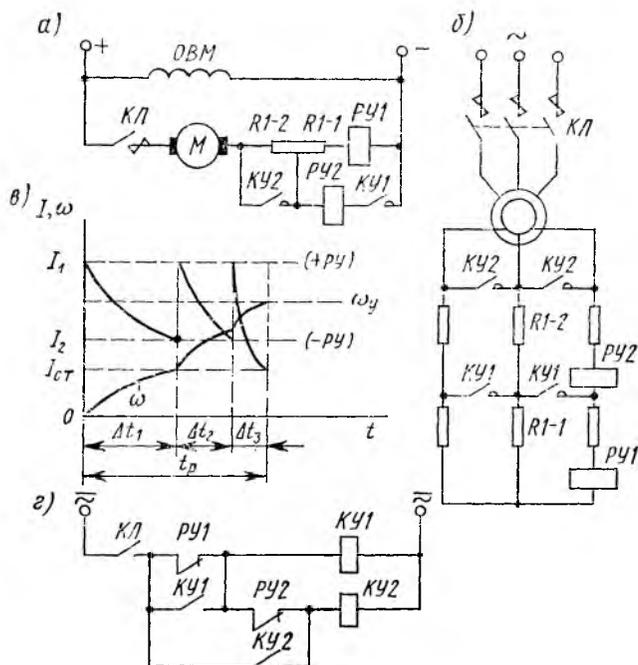


Рис. 10-5. Схемы управления в функции тока и диаграмма изменения угловой скорости и тока двигателя при разгоне электропривода

Надежность работы схемы зависит от соотношения собственного времени срабатывания реле ускорения и контакторов ускорений. Обычно в таких схемах собственное время срабатывания токовых реле в 3—5 раз меньше, чем у контакторов. При запаздывании срабатывания реле преждевременно включит контактор ускорения, что приведет к чрезмерным пикам пускового тока двигателя. В цепях с асинхронными двигателями реле тока могут включаться как в роторную, так и в статорную цепь. Управление в функции тока используется не только при разгоне, но и при торможении электропривода.

Достоинство схем, работающих в функции тока, состоит в том, что переключения контакторов ускорения производится при заданных значениях тока в цепи якоря или ротора и не зависят от колебания напряжения сети. Однако в случаях разгона электропривода с моментом нагрузки, большим номинального, ток двигателя

может превышать значение I_2 , при котором происходит отпущание якоря реле. Поэтому пусковой резистор окажется невыключенным, что может привести к его перегоранию, так как он не рассчитан на недлительную работу.

Узел схемы управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения, работающий в функции э.д.с., пропорциональной угловой скорости, представлен на рис. 10-6, а. Диаграмма изменения э. д. с. и напряжения на якоре приведена на рис. 10-6, б.

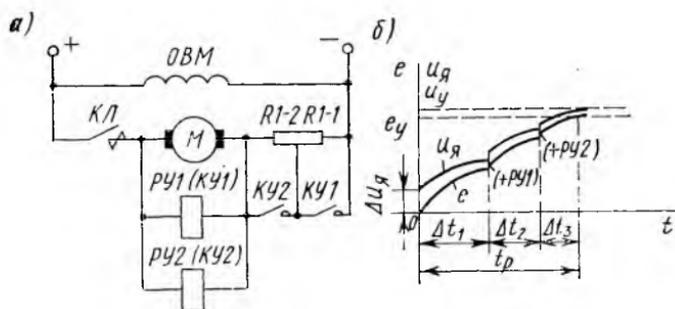


Рис. 10-6. Схемы ускорения электропривода в функции скорости и диаграмма изменения э. д. с. и напряжения на якоре

При включении линейного контактора $KЛ$ напряжение на катушках реле ускорения $PУ1$, $PУ2$ (или непосредственно контакторов) равно падению напряжения $\Delta Uя$ на якоре, которое в начальный момент пуска недостаточно для их срабатывания. В процессе разгона электропривода э. д. с. двигателя увеличивается и по достижении определенной угловой скорости возрастает до значения уставки срабатывания первого реле ускорения $PУ1$ (рис. 10-6, б), которое включает первый контактор ускорения. После этого резистор $R1-1$ первой ступени ускорения шунтируется. При дальнейшем увеличении угловой скорости двигателя э. д. с. достигает значения уставки второго реле (или второго контактора), подающего команду на шунтирование резистора $R1-2$ второй ступени ускорения.

Управление в функции скорости широко применяется при автоматическом управлении торможением электроприводов. Узел схемы динамического торможения представлен на рис. 10-7, а, а узлы схем динамического торможения противовключением — на рис. 10-7, б, в.

Для включения контактора динамического торможения и контроля процесса торможения служит реле $PДТ$ (рис. 10-7, а), которое включается при замыкании размыкающего контакта $KЛ$ после отключения двигателя от сети, когда $E \approx U_c$. Контактор $KДТ$ (его катушка на схеме не показана) главным контактом подключит на выводы якоря резистор R . При угловой скорости, близкой к нулю ($E \approx 0$), якорь реле $PДТ$ отпадает и тем самым подается команда на отключение контактора $KДТ$. Реле $PДТ$ в данной схеме долж-

но иметь возможно меньший коэффициент возврата ($k_B = 0,1 \div 0,15$), так как только в этом случае можно получить торможение до минимальной скорости.

В реверсивных электроприводах для уменьшения времени реверса используют торможение противовключением. Для контроля за процессом торможения у асинхронных двигателей с фазным ротором используют реле, работающее от различных значений э. д. с.

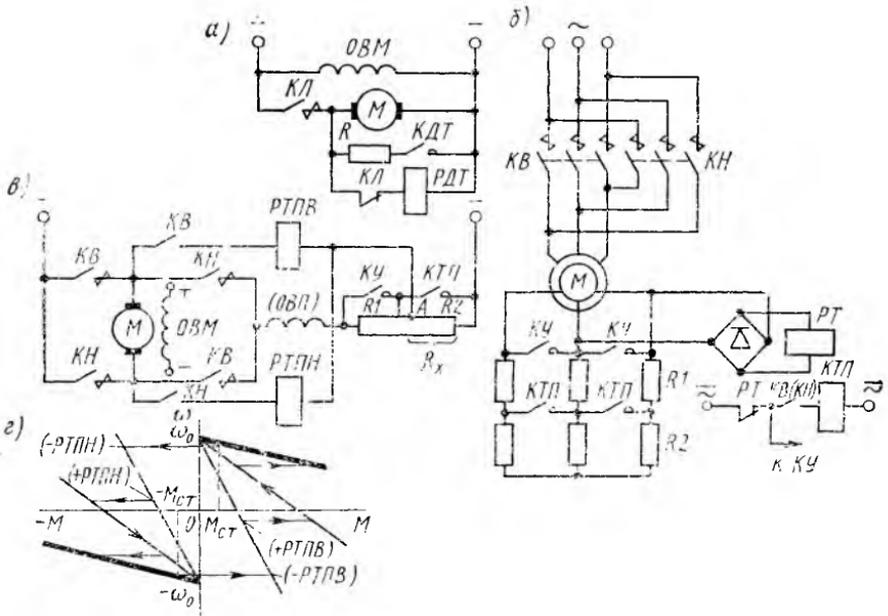


Рис. 10-7. Схемы торможения электропривода в функции скорости

ротора (рис. 10-7, б). Для уменьшения коэффициента возврата и увеличения надежности работы эти реле включают через выпрямитель. При большой угловой скорости ротора двигателя наведенная в его обмотках э. д. с. небольшая, так как $E_{2s} = E_{2R} s$, а скольжение s незначительно (3—10%). Напряжение на реле PT недостаточно для втягивания его якоря. При реверсе, когда в цепи статора контакты $КВ$ разомкнутся, а контакты $КН$ замкнутся, направление вращения магнитного поля в статоре изменится на противоположное. Скольжение ротора $s \approx 2$. Реле PT при этом срабатывает, размыкает цепь питания катушек контакторов $КТП$ и $КУ$ и в цепь ротора вводится полное внешнее сопротивление резисторов $R1$ и $R2$. При скорости, близкой к нулю, якорь реле PT отпадает, размыкающий контакт PT в цепи управления замыкается и производит ускорение двигателя в противоположном направлении.

Узел схемы, обеспечивающий автоматическое торможение противовключением реверсивного двигателя постоянного тока, приве-

ден на рис. 10-7, в. Он пригоден для двигателей как независимого, так и последовательного возбуждения. Поэтому на рисунке показаны две обмотки возбуждения. Для упрощения схемы приведена одна ступень ускорения с резистором $R1$. Резистор $R2$ вводится только на период торможения. Реле напряжения, контролирующее и управляющие процессом торможения в данной схеме, называются реле торможения противовключением «назад» ($РТПН$) или «вперед» ($РТПВ$).

Предположим, что двигатель имеет условное направление вращения «вперед». При этом включены аппараты KB , $КТП$, $КУ$ и реле $РТПВ$. Внешние резисторы $R1$ и $R2$ замкнуты. Для реверса двигателя аппараты $КТП$, $КУ$ и KB отключают, а $КН$ включают. В результате этого якорь подключается к сети для обратного направления вращения — «назад». В его цепь вводится все внешнее сопротивление. Замыкающий блок-контакт $КН$ в цепи катушки $РТПН$ замыкается. Однако реле $РТПН$ не сработает, так как в начальный момент торможения напряжение на его катушке будет близко к нулю и его якорь останется не втянутым до тех пор, пока угловая скорость двигателя не снизится до определенного значения. Это достигается соответствующим выбором точки A присоединения реле.

Тормозной ток создает на участке цепи с сопротивлением R_x падение напряжения $IR_x \approx U_{\text{ном}}$. Так как э. д. с. якоря двигателя и напряжение сети в период торможения противовключением действуют согласно (последовательно), то точка A должна быть выбрана в таком месте диагонали моста, питающегося от двух источников, где $U=0$. До тех пор, пока угловая скорость двигателя, а следовательно, и его э. д. с. не снизятся почти до нуля, якорь реле $РТПН$ не втянется. Так как напряжение сети остается неизменным, то с уменьшением э. д. с. двигателя напряжение на катушке $РТПН$ будет расти. Когда $E=0$, напряжение на катушке будет достаточно для срабатывания реле. Оно включается и разрешает разгон привода в обратную сторону.

Угловая скорость, при которой реле $РТПН$ при торможении противовключением включается с направлением «вперед», отмечена на реостатной характеристике как $(+РТПН)$, а с направлением «назад» — как $(+РТПВ)$ (рис. 10-7, з). Там же обозначены и точки начала торможения и отключения реле как $(-РТПН)$ и $(-РТПВ)$, когда реле, имея замкнутую электрическую цепь, не втягивает якорь до окончания процесса торможения.

Достоинство узлов схем, работающих в функции скорости, — их простота. К недостаткам можно отнести зависимость времени разгона и торможения электропривода от его статического момента и момента инерции, напряжения питающей сети, температуры резисторов и катушек реле, а также вероятность задержки процесса разгона на промежуточной скорости, что повлечет нагревание пускового реостата.

При управлении электроприводом в функции времени выбор схемы подключения реле времени обусловлен необходимыми

включениями контакторов для пуска, торможения или регулирования скорости электропривода. Команда на отсчет выдержки времени подается контактором или другим аппаратом замыканием или размыканием контакта.

Узлы схем включения реле времени показаны на рис. 10-8. Варианты включения электромагнитных реле времени постоянного тока представлены на рис. 10-8, а, б. Реле ускорения $PY1$ — $PY3$ осуществляют выдержку времени при отключении, поэтому в схемах их катушки получают питание сразу после появления напряжения на схеме управления через размыкающие контакты (рис.

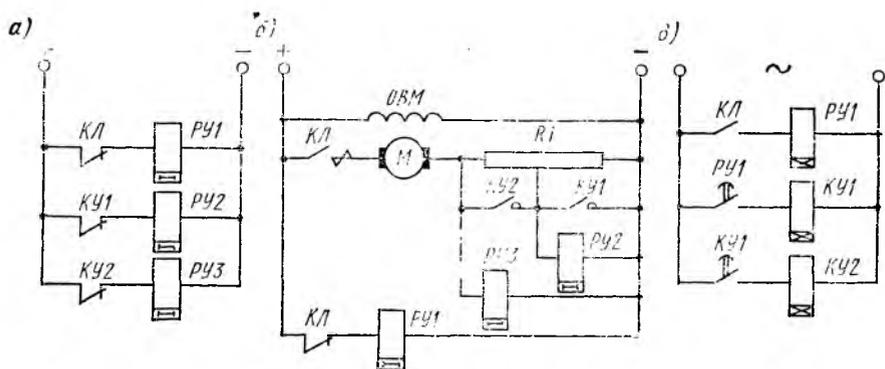


Рис. 10-8. Схемы включения реле времени

10-8, а) или после замыкания силового контакта линейного контактора KL (рис. 10-8, б). После размыкания контактов KL , $KY1$, $KY2$ или закорачивания катушек силовыми контактами $KY1$, $KY2$ реле начинают отсчитывать заданное время. Включение реле $PY1$ и контакторов $KY1$ и $KY2$ в схеме (рис. 10-8, в) осуществляется встроенными в них контактами с механическими замедлителями после получения питания через замыкающие контакты KL , $PY1$ и $PY2$.

Выдержки времени реле для разгона или торможения электропривода в несколько ступеней определяются расчетами, рассмотренными в гл. 5. Там же представлены пусковые диаграммы.

Так как пусковые ступени реостата шунтируются независимо от тока, момента или угловой скорости двигателя, то при изменении статического момента наибольшие значения пускового тока будут отличаться от расчетного значения I_1 . По мере разгона электропривода при статическом моменте, меньшем расчетного, броски тока будут уменьшаться и, наоборот, при $M_{ст}$, большем расчетного, броски тока от ступени к ступени будут расти, что неблагоприятно отразится на коммутации машины и увеличится ее нагревание. Это обстоятельство является основным недостатком данного способа управления.

К достоинствам управления в функции времени относятся простота схем, удобство регулирования уставок реле времени, воз-

возможность применения однотипных реле для управления двигателями различной мощности, стабильность процесса разгона или торможения, отсутствие задержки электропривода на промежуточных скоростях.

Управление электроприводом в функции пути осуществляется

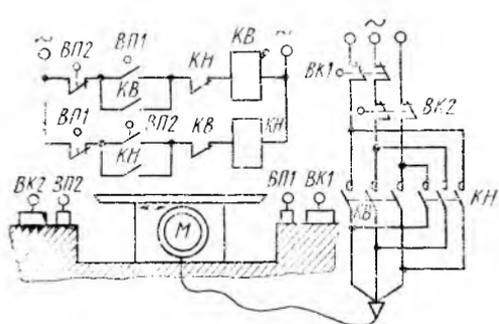


Рис. 10-9. Схема управления в функции пути

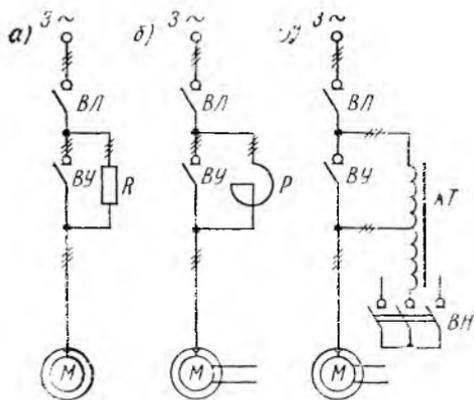


Рис. 10-10. Схемы силовой цепи управления мощными двигателями переменного тока

Для уменьшения падения напряжения в питающей сети от пусковых токов достаточно мощных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в статорные цепи на период разгона вводят дополнительные активные или реактивные сопротивления. Иногда же требуется снизить пусковые моменты двигателей с короткозамкнутым ротором даже небольшой мощности, с тем чтобы уменьшить при пуске возникающие удары в кинематической цепи электропривода. Пусковой ток и момент ограничиваются с помощью внешних сопротивлений или автотрансформаторов. Узлы схем статорных цепей с токоограничением при пуске показаны на

путевыми и конечными выключателями. Принцип этого управления можно пояснить на примере схемы, приведенной на рис. 10-9. Если какой-либо элемент производственного механизма совершает возвратно-поступательное движение от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, то для подачи автоматических команд на реверс двигателя устанавливаются путевые выключатели ВП1 и ВП2, контакты которых включают и выключают реверсивный контактор. При несрабатывании путевого выключателя (вследствие неисправности) движение подвижного элемента механизма будет ограничено конечным выключателем ВК1 (или ВК2), который отключит двигатель от сети.

Принцип управления в функции пути широко применяется при управлении многодвигательными электроприводами, когда они работают по определенной программе.

рис. 10-10. При пуске двигателя (рис. 10-10, *а, б*) сначала замыкаются контакты линейного выключателя *ВЛ*. Питание двигателя осуществляется через активные сопротивления или реактор. По мере разгона двигателя и снижения тока замыкаются контакты выключателя ускорения *ВУ*, после чего двигатель работает с полным напряжением на статоре. Пуск через активные сопротивления (рис. 10-10, *а*) связан со значительными пусковыми потерями, а поэтому применяется редко. Схема с пусковыми реакторами (рис. 10-10, *б*) применяется чаще, так как снижение пускового тока и момента достигается при незначительных потерях энергии в реакторах.

В тех случаях, когда необходимо значительно снизить пусковой ток и нежелательно чрезмерно снижать момент, применяется схема пуска двигателя с автотрансформатором (рис. 10-10, *в*). Пуск и разгон двигателя осуществляются в определенной последовательности. Сначала замыкаются контакты выключателей *ВЛ* и *ВН* и на статор подается пониженное напряжение. При достижении двигателем некоторой скорости размыкаются контакты *ВН* и замыкаются *ВУ*. Двигатель подключается на полное напряжение сети. Для снижения пускового тока в сети в n раз коэффициент трансформации автотрансформатора $K_U = \sqrt{n}$. Пусковой ток в обмотке статора в этом случае снижается в \sqrt{n} раз, что является преимуществом этой схемы. Однако эта схема сложнее и дороже описанных выше.

§ 10-5. Защита в схемах управления электроприводами

Защита необходима для предотвращения повреждения электрооборудования и устранения дальнейшего развития возникшего повреждения. Устройства защиты устанавливаются как в силовых электрических цепях, так и в цепях управления. Основными видами защит в электроприводе являются: защита от короткого замыкания, предотвращающего развитие повреждения, вызванного током короткого замыкания в силовой цепи или цепи управления; максимальная защита, срабатывающая даже при кратковременном превышении током установленного значения; защита двигателей от перегрузки током, длительно превышающем его номинальное значение; защита от самозапуска двигателей или нулевая защита от нежелательных последствий исчезновения и последующего восстановления напряжения в электрической сети; защита при обрыве цепи обмотки возбуждения двигателя; защита от перенапряжения, возникающего в электрических цепях; защита от выпадания синхронных двигателей из синхронизма. К защите относится блокирование от одновременного включения реверсивных и тормозных контакторов, а также контакторов, позволяющих получить определенную последовательность действий в схемах управления и согласовать работу отдельных электроприводов.

Защита от короткого замыкания и максимальная защита. Обеспечивают немедленное отключение цепи, в которой произошло короткое замыкание или чрезмерное увеличение тока. При коротких замыканиях она осуществляется с помощью плавких предохранителей (рис. 10-11, а) или автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями (рис. 10-11, б). Максимальная токовая защита осуществляется на реле максимального тока (рис. 10-11, в). Токowe катушки этих реле включаются в две фазы трех-

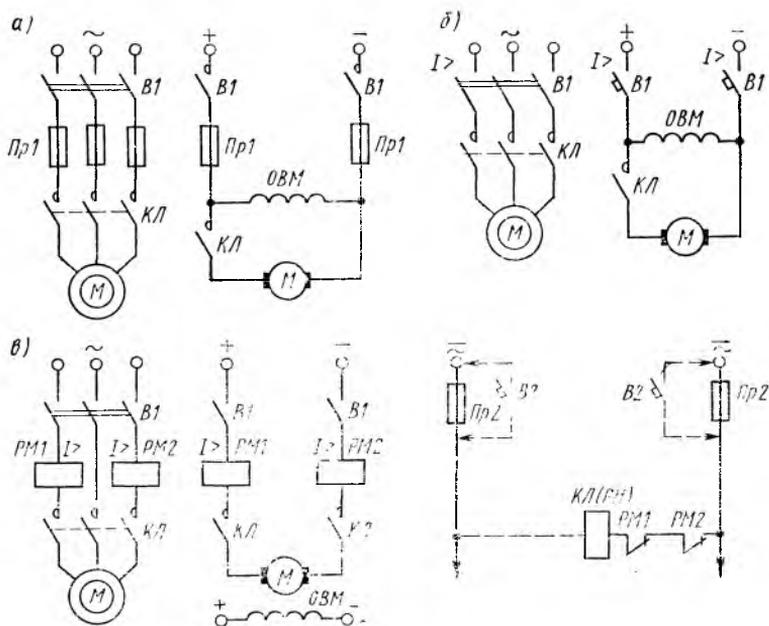


Рис. 10-11. Схемы защиты от коротких замыканий

фазных двигателей, в один или два полюса двигателей постоянного тока до главных контактов контакторов. При этом перекрытия током силовых контактов реле обеспечивают защиту питающей сети. Контакты максимальных токовых реле отключают цепи управления аппаратов, подающих или обеспечивающих подачу напряжения на поврежденную часть схемы. Цепи управления при коротких замыканиях во многих случаях имеют отдельную защиту плавкими предохранителями или автоматами (рис. 10-11, г).

Для защиты силовой цепи номинальный ток плавкой вставки $I_{вст}$ и ток уставки $I_{уст}$ (ток срабатывания) автоматов и максимальных токовых реле определяются следующими формулами:

для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором при продолжительном или кратковременном режиме ($PB = 25\%$) с начальным пусковым током $I_{пуск}$

$$I_{вст} \geq (1,2 \div 1,25) I_{ном}; \quad I_{уст} = (1,2 \div 1,3) I_{пуск},$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток двигателя;

для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при нормальном пуске ($t_p < 5c$)

$$I_{вст} \geq 0,4 I_{пуск};$$

при тяжелом пуске ($t_p > 10c$) или большой частоте включений

$$I_{вст} \geq (0,5 + 0,6) I_{пуск};$$

независимо от условий пуска

$$I_{уст} = (1,3 + 1,5) I_{пуск}.$$

Для защиты цепей управления

$$I_{вст} = I_{уст} = (2,5 + 3) I_{Экат},$$

где $I_{Экат}$ — суммарный ток наибольшего количества катушек одновременно включенных аппаратов.

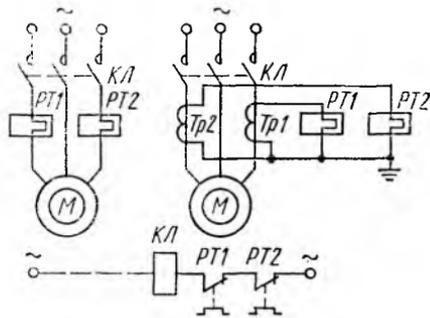
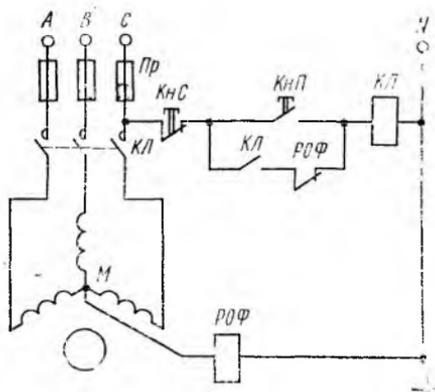


Рис. 10-12. Схема защиты от работы двигателя на двух фазах

Рис. 10-13. Схемы защиты двигателей от перегрузки

Защита плавкими предохранителями трехфазной силовой цепи двигателя имеет существенный недостаток — при перегорании одной из вставок двигатель будет работать на двух фазах, а это приведет к его перегреванию. Такого недостатка лишена защита автоматическими выключателями, когда при их срабатывании отключаются все три фазы питающего напряжения. Для защиты двигателя от работы на двух фазах в сочетании с предохранителями в схему включают специальное реле, контролирующее обрыв фаз и подающее команду на его отключение (рис. 10-12).

Реле обрыва фаз $РФ$ (реле напряжения) включают между нейтралью обмотки статора и заземленным нулевым проводом сети. В симметричном (трехфазном) режиме работы двигателя напряжение на катушке $РФ$ равно нулю. При обрыве или отсутствии одной из фаз на обмотке статора напряжение между нейтралью

двигателя и нулевым проводом становится достаточным для срабатывания реле. Напряжение срабатывания реле *РОФ* должно быть 10—30% от номинального фазного напряжения сети.

Защита двигателей от перегрузки током. Эта защита предотвращает перегревание двигателей при продолжительном режиме работы. Для этого в цепь трехфазного двигателя включают два однополюсных или одно двухфазное тепловое реле. Для двигателя постоянного тока достаточно одного реле. Тепловые элементы (нагреватели) этих реле включают в цепь двигателя непосредственно или через трансформаторы тока, как правило, после главных контактов контакторов (рис. 10-13). Контакты тепловых реле вводят в цепи катушек отключающих аппаратов.

Защита от перегрузки осуществляется также и автоматами с тепловыми расцепителями. Защита от перегрузок двигателя с тепловыми реле или тепловыми расцепителями автоматов на кратковременное превышение тока не реагирует из-за наличия тепловой инерции. При повторно-кратковременном режиме защита от перегрузки выполняется с помощью двух реле максимального тока (рис. 10-11, в). Чтобы устранить возможность отключения двигателя от пусковых токов, контакты токовых реле на время пуска включаются последовательно с контактами реле времени, замыкающими цепь отключающего аппарата. Применение двух тепловых реле или реле максимального тока позволяет обеспечить защиту асинхронных двигателей от работы на двух фазах.

Номинальный ток теплового элемента реле $I_{т.э}$ или теплового расцепителя автомата $I_{уст.т}$ выбирают из условия, что номинальный ток двигателя $I_{ном}$ должен быть равен или несколько меньше $I_{т.э}$ или $I_{уст.т}$:

$$I_{т.э} = I_{уст.т} = (1 \div 1,15) I_{ном}.$$

Более чувствительная защита двигателей от перегрузки осуществляется терморезисторами, встраиваемыми между витками обмотки статора. Узел схемы такой температурной защиты приведен на рис. 9-9. Контакты исполнительного реле, как и в предыдущих случаях, включают в цепь катушки отключающего двигатель аппарата.

Защита от самозапуща двигателей или нулевая защита. При исчезновении напряжения в сети или его чрезмерном снижении эта защита отключает двигатель, а при появлении напряжения предотвращает самопроизвольное включение его. При кнопочном управлении двигателем по схемам, приведенным на рис. 10-1 и 10-2, такую защиту осуществляют линейный контактор *K* или контакторы направления вращения *K1*, *K2*. В этих схемах после отключения контакторов замыкающий блок-контакт *K1* или *K2*, включаемый параллельно пусковым кнопкам *КнП*, при появлении напряжения на схеме не позволяет включаться контакторам, оставляя цепь включения катушек разомкнутой.

При управлении электроприводом посредством командоконтроллеров или переключателей с фиксированными положениями нуле-

вая защита выполняется на реле напряжения *РН* (рис. 10-14). Реле включается в исходном (нулевом) положении командоконтроллера, когда контакт *КК.0* замкнут, становится на самопитание и через замыкающий контакт создает цепь питания контакторов *КВ*, *КН* и других аппаратов. При срабатывании защиты для включения *РН* надо командоконтроллер поставить в исходное положение «0». В цепь катушки реле *РН* включаются контакты других защитных

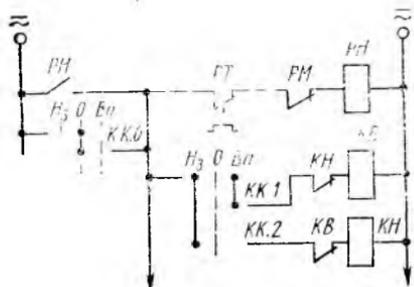


Рис. 10-14. Схема нулевой блокировки или защиты от самозапуска двигателя

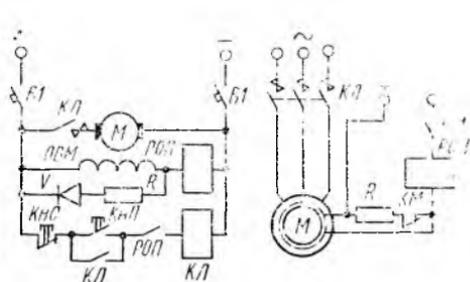


Рис. 10-15. Схемы защиты при обрыве цепи возбуждения двигателя

аппаратов и устройств (контакты реле максимального тока, тепловых реле и т. п.).

Защита при обрыве цепи обмотки возбуждения (защита при обрыве магнитного поля). Применяется для двигателя постоянного тока и синхронного двигателя и выполняется на реле минимального тока.

Катушка реле обрыва поля *РОП* включается последовательно с обмоткой возбуждения (рис. 10-15). При наличии возбуждения контакт реле замкнут и через него получает питание цепь управления электроприводом. В случае обрыва цепи возбуждения якорь реле отпадает и цепь управления двигателем обесточивается.

Реле *РОП* имеет небольшую выдержку при отключении, что предотвращает отключение двигателя при случайных кратковременных колебаниях тока возбуждения.

Защита от перенапряжения. Выполняется на реле максимального напряжения, катушка которого включается в измерительную электрическую цепь. Необходимость в этом возникает при питании электроприводов от отдельных генераторов или преобразователей. Реле максимального напряжения подает соответствующую команду в цепь регулирования напряжения.

Защита от перенапряжения на обмотке возбуждения при снятии питания осуществляется разрядным резистором *R*, включаемым параллельно обмотке возбуждения (рис. 10-15). Сопротивление резистора принимают равным $(6 \div 8) R_{обм}$ при напряжении 220 В и $(3 \div 5) R_{обм}$ при напряжении 110 В. Для устранения излишних потерь энергии в разрядном резисторе при работе двигателя после-

довательно с резистором включают диод V навстречу положительному полюсу питания $ОВМ$. Наведенная при отключении обмотки возбуждения э. д. с. будет иметь противоположную напряжению полярность и через диод будет протекать ток. Напряжение на обмотке $ОВМ$ окажется в пределах допустимого значения.

У синхронных двигателей разрядное сопротивление R включается размыкающим контактом контактора питания $КМ$ (катушка $КМ$ на схеме не показана) при отключении напряжения питания обмотки возбуждения.

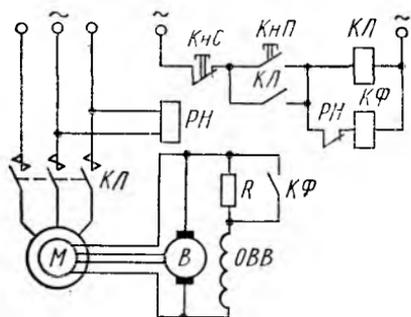


Рис. 10-16. Схемы защиты от выпадания двигателя из синхронизма

Защита от выпадания синхронных двигателей из синхронизма. Выполняется на реле минимального напряжения $РН$ и контактора форсировки возбуждения $КФ$ (рис. 10-16).

Катушка реле $РН$ включается на линейное напряжение сети и держит размыкающий контакт в цепи контакторов разомкнутым. При резком изменении нагрузки на валу двигателя или по другим каким-либо причинам напряжение в сети может снизиться до недопустимого значения. Для того чтобы сохранить перегрузочную

способность двигателя, необходимо увеличить его возбуждение. Это осуществляется контактором $КФ$, шунтирующим после срабатывания $РН$ сопротивление R в цепи обмотки возбуждения возбудителя B . Напряжение возбудителя повышается, возрастает ток возбуждения двигателя и его максимальный момент. За счет этого двигатель надежно удерживается в синхронизме.

Электрическое блокирование. В схемах автоматического управления электроприводами наряду с защитными устройствами широко используются электрическое блокирование и механические блокировки, обеспечивающие надежную работу электрических аппаратов и всей системы электропривода. Благодаря предусмотренному блокированию устраняются повреждения механизмов или их отдельных частей, которые работают согласованно, и устраняется ненормальность работы электроприводов в результате неправильных действий операторов. Для реверсивных линейных и тормозных контакторов, которые никогда не должны включаться одновременно, предусматривается механическая блокировка.

Схемы блокирования рассмотрены в § 10-2 и представлены на рис. 10-14, на котором последовательность работы реверсивных контакторов $КВ$ и $КН$ обеспечивается командоконтроллером, так как контакты $КК.1$ и $КК.2$ замыкаются в разных положениях рукоятки переключения.

Блокирование, обеспечивающее последовательность включения электроприводов, исключает возможность запуска двигателей в другой последовательности, кроме той, которая указана на рис. 10-17 стрелкой. Это объясняется тем, что катушка контактора $K2$ получает питание только после включения контактора $K1$. Отключение двигателей происходит в такой же последовательности, как и пуск. Сначала отключается $K1$, а затем $K2$, даже если нажать первой кнопку $КнС2$, или срабатывает защитное реле $PT2$.

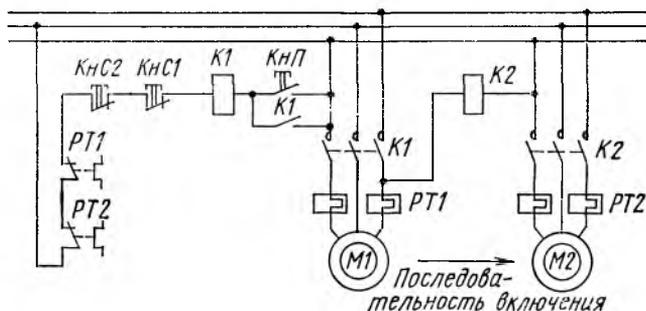


Рис. 10-17. Схема электрического блокирования для соблюдения определенной последовательности включения и отключения двигателей

Блокирование от перехода рабочими механизмами заданного пути осуществляется с помощью конечных выключателей (см. рис. 10-9), когда после срабатывания какого-либо конечного выключателя ($BK1$ или $BK2$) движение механизма возможно только в обратном направлении.

§ 10-6. Управление асинхронными двигателями

Простейшая схема управления представлена на рис. 10-1. Она выполнена на магнитном пускателе с кнопочной станцией. Для защиты от коротких замыканий в нее введены предохранители или автомат, а для защиты от перегрузки — тепловые реле.

Схема управления электроприводом с динамическим торможением показана на рис. 10-18. В исходном положении при включенном выключателе $B1$ аппараты $KЛ$ и KT не срабатывают. Двигатель включается нажатием на кнопку $КнП$. Для останова электропривода нажимается кнопка $КнС$. При этом отключается контактор $КЛ$. Главными контактами $КЛ$ отключает двигатель от сети, а размыкающим блок-контактом при нажатой кнопке $КнС$ включает контактор торможения KT , который становится на самопитание и обеспечивает питание обмотки статора постоянным током от выпрямителя $V1—V4$. Контакт KT имеет встроенное реле времени с размыкающим контактом KT . По истечении заданной выдержки времени, достаточной для торможения электропривода, контакт KT

размыкает цепь питания катушки контактора, который главными контактами отключает выпрямитель. При наличии в цепях сети постоянного тока обмотки статора при динамическом торможении получают питание через токоограничивающее сопротивление.

Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором, работающая в функции тока, представлена на рис. 10-19. При включении сетевого выключателя *В* ни один из аппаратов не срабаты-

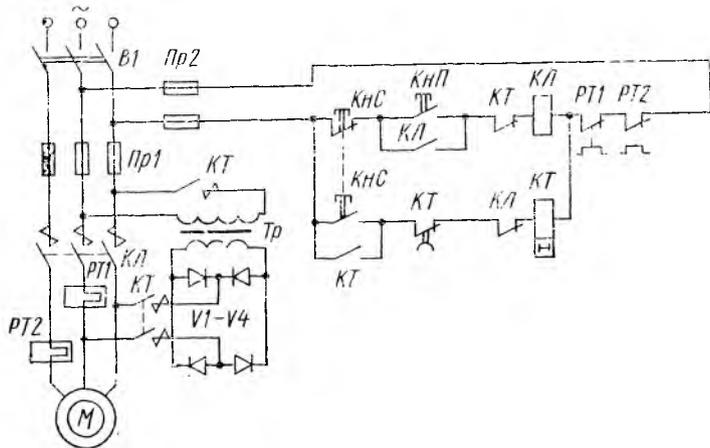


Рис. 10-18. Схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с динамическим торможением

вает. Ускорение двигателя предусмотрено в три ступени. Защита от коротких замыканий и чрезмерных пусковых токов осуществляется реле максимального тока *РМ1*, *РМ2* и *РМ3*, а защита от коротких замыканий в цепях управления — плавкими предохранителями *Пр*. Пусковые сопротивления в цепи ротора шунтируются контакторами ускорения *КУ1*, *КУ2* и *КУ3*. Реле ускорения *РУ1*, *РУ2* и *РУ3* должны быть настроены таким образом, чтобы токи, при которых соответствующие реле отключаются, удовлетворяли неравенству $I_{РУ1} > I_{РУ2} > I_{РУ3}$. Это необходимо для того, чтобы не произошло включения последующего контактора ускорения раньше предыдущего.

Пуск двигателя осуществляется нажатием на кнопку *КнП*. Включается линейный контактор *КЛ* и становится на самопитание. Главными контактами он подключает статор двигателя к сети, а замыкающим блок-контактом *КЛ* включает блокировочное реле *РБ*, контакт которого после замыкания подает питание на узел схемы ускорения двигателя.

Включение реле *РБ* обеспечивает некоторую выдержку времени, необходимую для достижения в роторной цепи значения тока, достаточного для срабатывания реле ускорения. Так как размыкающие контакты *РУ1*, *РУ2* и *РУ3* будут разомкнуты, то контакторы *КУ1*, *КУ2* и *КУ3* останутся невключенными. После снижения тока

на первой ступени ускорения первым отпустит якорь токовое реле *РУ1*. Замкнувшись контактом оно включает контактор ускорения *КУ1*, который становится на самопитание и главными контактами шунтирует первую ступень ускорения. Разгон двигателя будет продолжаться по второй реостатной характеристике. Аналогично будут работать реле ускорения *РУ2* и *РУ3*, подавая команды на включение контакторов *КУ2* и *КУ3*, которые шунтируют вторую и третью ступени ускорения. Отключение двигателя происходит при нажатии на кнопку *КНС*.

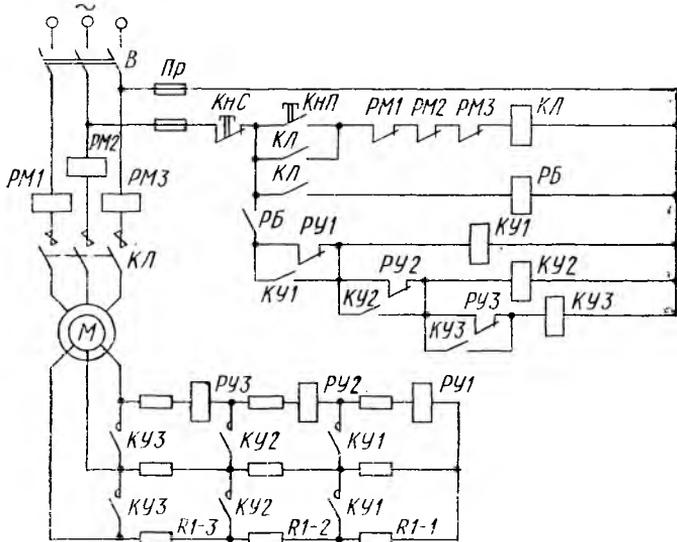


Рис. 10-19. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором в функции тока

В зависимости от назначения электроприводов и специальных требований, предъявляемых к их управлению, вариантов схем управления может быть очень много. Для унификации схемных решений отечественной промышленностью изготавливаются станции, блоки и панели управления.

Станция управления (блок или панель) представляет собой комплектное устройство с набором необходимых коммутационных и защитных аппаратов, измерительных приборов, зажимов и других элементов, соединенных по типовой схеме. Этот набор аппаратов монтируется на изоляционных плитах или конструкции из реек и размещается в закрываемых шкафах или без них, если станция управления будет эксплуатироваться в специальных электротехнических помещениях.

Для управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором выпускаются нормализованные станции управления общего назначения серии БУ, ПУ с питанием цепей управления как на переменном, так и на постоянном токе. Схемы станций уп-

равления выполнены для нереверсивного и реверсивного управления двигателями с динамическим торможением и торможением противовключением по типовым узлам схем, рассмотренным в § 10-3. В зависимости от установленной аппаратуры станции управления предназначаются для продолжительного, перемежающегося и повторно-кратковременного режимов работы. Габариты панелей

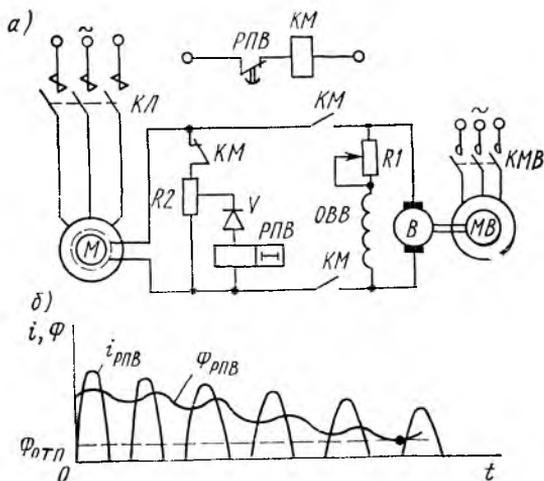


Рис. 10-20. Схемы подключения обмотки возбуждения синхронного двигателя

двигатели. При пуске синхронный двигатель сначала разгоняют как асинхронный за счет встроенной в ротор короткозамкнутой обмотки. При достижении ротором подсинхронной скорости в обмотку возбуждения подается постоянный ток и двигатель втягивается в синхронизм. Особенностью пуска синхронного двигателя является управление подачей в его обмотку возбуждения постоянного тока, получаемого с помощью машинного генератора постоянного тока или тиристорного преобразователя. Для упрощения схемы подачи возбуждения быстроходных двигателей вал машинного возбудителя соединяется непосредственно с валом двигателя (см. рис. 10-16). У тихоходных двигателей машинный возбудитель имеет приводной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (рис. 10-20, а). В современных схемах пуска синхронных двигателей процесс подачи постоянного тока в обмотку возбуждения автоматизируется либо в функции скорости, либо в функции тока статора.

При первом способе постоянный ток в обмотку возбуждения подается включением контактора *КМ*, который получает команду от реле подачи возбуждения *РПВ* с демпфирующей обмоткой. Реле через диод *V* включено на часть разрядного резистора *R2*. При подключении обмотки статора к сети из-за большого скольжения ротора в обмотке возбуждения двигателя *М* наводится переменная

зависят от установленной аппаратуры и имеют высоту до 2300 мм и ширину до 1200 мм. Защита от коротких замыканий и от перегрузки двигателя осуществляется автоматами с комбинированными расцепителями.

§ 10-7. Управление синхронными двигателями

Для электроприводов, работающих с постоянной скоростью (компрессоров, насосов и т. п.), широко применяют синхронные

однофазная э. д. с. По катушке *РПВ* протекает выпрямленный диодом *V* однополупериодный ток $i_{РПВ}$ (рис. 10-20, б). Амплитуда и частота тока пропорциональны скольжению ротора. В начале разгона двигателя, когда $s=1$, импульсы тока в реле достаточно велики и реле *РПВ* включается. Магнитный поток в магнитной системе реле зависит не только от амплитуды, но и от интервалов между полупериодами тока $i_{РПВ}$. По мере разгона двигателя (т. е. снижения s) амплитуда импульсов уменьшается, а интервалы между ними увеличиваются. Магнитный поток реле постепенно снижается по кривой $\Phi_{РПВ} = f(t)$. При малом скольжении ротора, когда угловая скорость его становится большой и равной подсинхронной, $\Phi_{РПВ} = \Phi_{отп}$ и якорь реле отпадает. Размыкающий контакт *РПВ* в цепи катушки контактора *КМ* замыкается, при этом создается цепь включения контактора *КМ*.

Второй способ включения реле, контролирующего подачу возбуждения, основан на резком снижении тока статора при подсинхронной скорости ротора. Реле *РПВ* включается в одну из фаз статора через трансформатор тока. Так как возбуждение чаще всего подается в одну ступень, то использование второго способа дает лучшие условия вхождения двигателя в синхронизм.

При статическом моменте на валу двигателя, не превышающем $0,4 M_{ном}$, пуск осуществляют с глухо (постоянно) включенным возбудителем (см. рис. 10-16). Схема подачи возбуждения в этом случае значительно упрощается. По мере разгона напряжение возбудителя растет и при подсинхронной скорости достигает установленного значения. Ток возбуждения будет достаточным для вхождения двигателя в синхронизм. В настоящее время при мощных электрических сетях такой способ включения широко применяется. Если падение напряжения в сети от пусковых токов недопустимо, то пуск двигателя производится при пониженном напряжении (см. узлы схем на рис. 10-10). При этом в зависимости от типа двигателя и характеристик статического момента подача тока возбуждения осуществляется или до включения на полное напряжение (легкий пуск), или при полном напряжении на обмотке статора (тяжелый пуск).

Одна из простых схем прямого пуска синхронного двигателя, включаемого на полное напряжение сети, представлена на рис. 10-21. Разъединитель *P* включается до начала пуска. С его включением ни один из аппаратов не срабатывает. Нормальное включение и отключение двигателя производится от руки линейным выключателем *ВЛ*. При срабатывании защиты отключение двигателя происходит после замыкания контакта *РМ1* и *РМ2* в цепи катушки *КО* электромагнита отключения линейного выключателя.

Обмотка возбуждения двигателя получает питание от отдельного возбудительного агрегата *B—MB*, генератор возбуждения *B* которого подключается к ней после срабатывания контактора *КМ*. Необходимый ток возбуждения регулируется реостатом *Р1*. Цепи управления подачи возбуждения питаются от генератора возбужде-

ния. Защита от обрыва цепи возбуждения осуществляется реле тока *РОП*.

После включения асинхронного двигателя *МВ* возбудительного агрегата и выключателя *ВУ* в цепи управления последовательно срабатывают реле контроля пуска *РКП1* и *РКП2*, которые размыкают цепь электромагнита отключения *КО*.

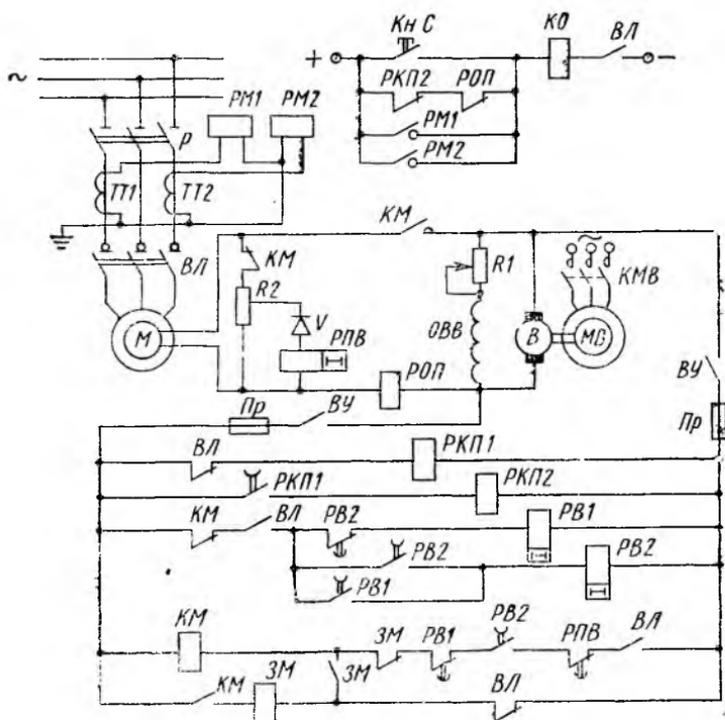


Рис. 10-21. Схема прямого пуска синхронного двигателя

Пуск двигателя осуществляется ручным включением выключателя *ВЛ*. При этом размыкающий блок-контакт *ВЛ* разрывает цепь питания катушки *РКП1* и осуществляет дополнительный разрыв в цепи катушки *ЗМ*. Замыкающими блок-контактами *ВЛ* подготавливает к включению контактор *КМ*, электромагнит отключения *КО* и включает реле времени *РВ1*, которое, в свою очередь, включает реле времени *РВ2*. Реле *РВ2* после получения питания самоблокируется и замыкающим контактом подготавливает к включению контактор *КМ*.

В результате включения двигателя в сеть реле подачи возбуждения *РПВ* питается однополупериодным током, определяемым повышенным скольжением ротора. Размыкающий контакт *РПВ* в цепи катушки *КМ* на период разгона двигателя разомкнут. При достижении двигателем подсинхронной скорости ($\approx 0,95\omega_0$) раз-

мыкающим контактом *РПВ* включается контактор возбуждения *КМ*, который отсоединяет разрядный резистор *Р2* от обмотки возбуждения и подает на нее напряжение постоянного тока. Двигатель втягивается в синхронизм.

Контактор *КМ* имеет две катушки: включающую *КМ* и механической защелки *ЗМ*. После включения *КМ* защелка *ЗМ* разрывает цепь питания его и удерживает во включенном положении до тех пор, пока защелка не будет отведена отключающей катушкой *ЗМ*. Замыкающим блок-контактом защелка *ЗМ* подготавливает собственную цепь отключения.

При отключении выключателя *ВЛ* вручную или с помощью кнопки *КНС* размыкающий контакт *ВЛ* подает питание на отключающую катушку *ЗМ* контактора возбуждения *КМ*. Чтобы предотвратить заседание защелки, получившей питание, контактор *КМ* плотнее подтягивает подвижную часть и позволяет защелке свободно отойти. Отключившись, контактор *КМ* замкнет обмотку ротора на разрядный резистор *Р2*. Одновременно замыкающим контактом *ЗМ* обесточится катушка *КМ*.

При запуске, затянувшемся свыше установленного времени, реле *РКП2* замкнет контакт в цепи *КО* и двигатель будет отключен от сети.

§ 10-8. Управление двигателями постоянного тока

В схемах управления двигателями постоянного тока используются типовые узлы, рассмотренные в § 10-2.

Представленная на рис. 10-22 схема с динамическим торможением состоит из типовых узлов, объединенных в определенную последовательность для работы: пуска и разгона двигателя в две ступени в функции времени (*РУ1*, *РУ2*, *КУ1*, *КУ2*); динамического торможения в функции э. д. с. (*РДТ*, *КДТ*); защиты от самозапуска (*РН*), от коротких замыканий (*В1*, *Пр*, *РМ*), от обрыва обмотки возбуждения (*РОП*).

Управление производится командоаппаратом, имеющим два положения: «Нуль» и «Пуск». Подача напряжения на цепь управления осуществляется выключателем *В2*, имеющим кроме замыкающего и размыкающий контакт. Размыкающий контакт при отключении замыкает разрядную цепь обмотки возбуждения *ОВМ*. Для регулирования скорости двигателя за счет ослабления магнитного поля последовательно с обмоткой возбуждения включается регулировочный реостат *Р3*.

Если командоаппарат находится в нулевом положении, то после подачи напряжения на цепи управления включаются реле *РН*, *РУ1* и контактор управления полем *КУП*. При переводе рукоятки командоаппарата в положение *П* («Пуск») питание поступает к контактору *КЛ* через замкнутый контакт *РДТ*. Двигатель подключается к сети и начинается разгон его при полностью введенном пусковом резисторе *Р1*. Через установленные выдержки времени реле *РУ1* и *РУ2* включаются контакторы ускорения *КУ1* и *КУ2*. При включе-

нии контактора *КУ2* сработает реле тока *РП*, контролирующее разгон на второй ступени. Как только ток двигателя снизится до значения тока отпускания реле *РП*, контактор *КУП* отключается и вводит добавочное сопротивление *R3* в цепь обмотки возбуждения. Ток в обмотке возбуждения и магнитный поток двигателя уменьшаются, а ток якоря увеличивается.

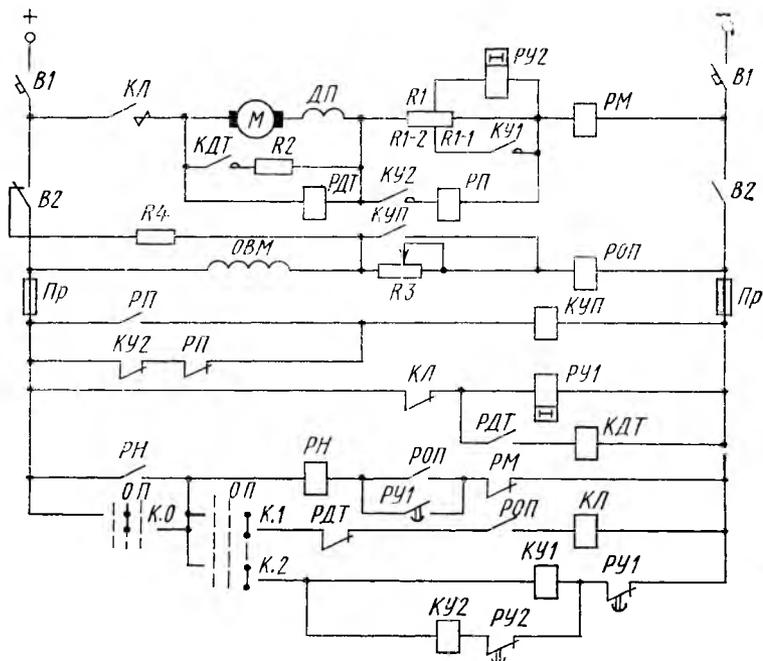


Рис. 10-22. Схема управления двигателем постоянного тока параллельного возбуждения с динамическим торможением

За счет индуктивности обмотки возбуждения магнитный поток изменяется не скачкообразно, а поэтому толчки тока в якоре смягчаются и растягиваются во времени. Ограничение толчков тока осуществляет реле *РП*, которое замыкающим контактом включает и отключает контактор *КУП* и управляет таким образом процессом ослабления поля в зависимости от значения тока якоря. Благодаря вибрационному режиму работы реле *РП* (т. е. включение и отключение его с какой-то частотой) ток якоря в процессе ослабления поля не выходит за пределы установленного значения.

Торможение электропривода осуществляется после установки рукоятки командоаппарата в положение «Нуль». Через находящийся в замкнутом состоянии контакт *РДТ* и замкнувшийся при отключении размыкающий контакт *КЛ* получит питание контактор динамического торможения *КДТ* и главными контактами подключает на выводы якоря резистор *R2*. Процесс динамического тормо-

жения происходит в одну ступень. При скорости, близкой к нулю, РДТ отпустит якорь и отключит контактор КДТ.

Схема, представленная на рис. 10-23, реверсивная, с торможением противовключением применяется для двигателей как после-

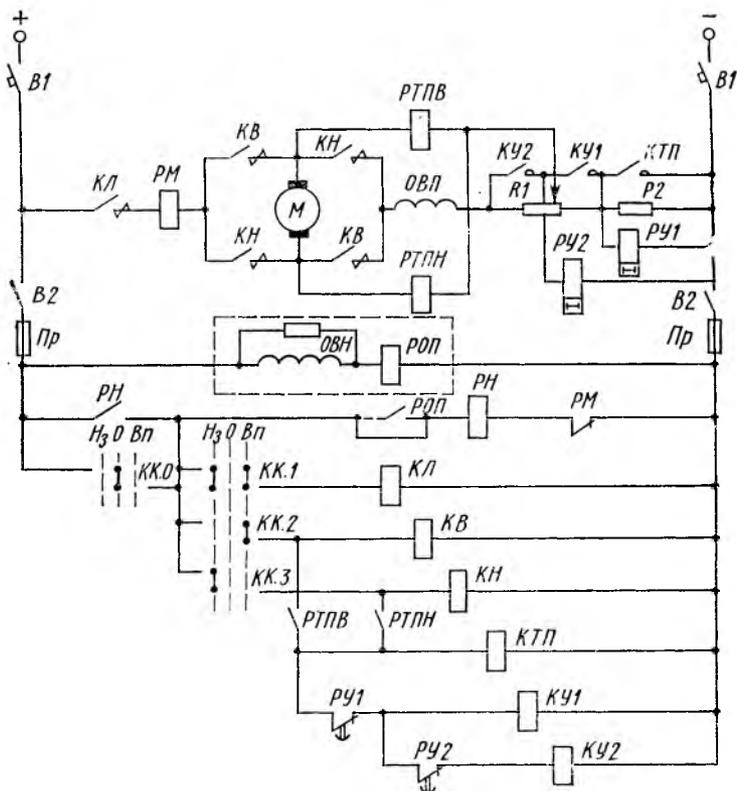


Рис. 10-23. Реверсивная схема управления двигателем постоянно-го тока последовательного возбуждения с торможением противовключением

довательного, так и параллельного возбуждения. При использовании ее с двигателями параллельного возбуждения должен быть введен узел схемы, обведенный штриховой линией. Схема включает в себя ряд типовых узлов: реверсивных контакторов *КВ* и *КН*, реле и контакторов ускорения в функции времени (*РУ1*, *КУ1*, *РУ2*, *КУ2*), реле торможения противовключением (*РТПВ*, *РТПН*, *КТП*), контакты и реле защиты от самозапуска (*КК.О*, *РН*), максимально-токовую защиту.

В исходном положении включены выключатели *В1* и *В2*, втянуто реле напряжения *РН* при условии, что командоаппарат находится в нулевом положении. При переводе командоаппарата в положение «вперед» контакты *КК.1* и *КК.2* замыкаются, образуя цепь питания контакторов *КЛ* и *КВ*. Двигатель получит питание для

направления вращения «вперед». При первом толчке тока в силовой цепи срабатывает реле $PY1$, $PY2$, а также получает питание реле $PTPB$. Последнее замыкающим контактом $PTPB$ включает контактор KTP и из силовой цепи выводится резистор $R2$, не требующийся при разгоне. Контактор KTP шунтирует катушку реле $PY1$, которое начинает отсчет времени разгона на первой ступени. По окончании выдержки времени реле $PY1$ включает контактор $KY1$, который шунтирует сопротивление первой ступени ускорения и катушку реле $PY2$. Реле $PY2$ с выдержкой времени включает контактор $KY2$. Разгон двигателя на этом заканчивается.

Для реверса двигателя рукоятка командоаппарата переводится в положение $H3$ («назад»), после чего сначала разомкнутся контакты $KK.1$ и $KK.2$, а потом замкнутся $KK.1$ и $KK.3$. Контакторы KB , KTP , $KY1$ и $KY2$ отключаются, а контактор KH включается. При этом реле $PTPH$ не замкнет контакта и контакторы KTP , $KY1$ и $KY2$ не получают питания до окончания торможения противовключением. Торможение закончится при угловой скорости, близкой к нулю, когда втянется реле $PTPH$. После этого начнется разгон в обратную сторону — включится контактор KTP , а затем через выдержки времени — реле $PY1$, $PY2$ и контакторы $KY1$ и $KY2$. При переводе командоаппарата в положение «вперед» процесс торможения будет контролировать реле $PTPB$.

Подробно узел схемы торможения рассмотрен в § 10-2 и приведен на рис. 10-7, в.

ГЛАВА 11

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ

§ 11-1. Принцип бесконтактного управления

В рассмотренных в гл. 10 схемах управления электроприводами использовались электромеханические аппараты дискретного действия: реле, контакторы, кнопки управления и др. Эти аппараты имеют существенные недостатки: подвижные части при значительной частоте включений в час сравнительно недолговечны; время срабатывания их заметно влияет на быстродействие схемы; они требуют систематических осмотров, регулировок или замены; в наиболее сложной и ответственной части схем управления — логической — электромеханические аппараты имеют наибольшее число отказов и сбоев в работе. Для повышения надежности и быстродействия схем в настоящее время наряду с контактными применяют бесконтактные аппараты, построенные на базе бесконтактных усилителей.

Большинство бесконтактных аппаратов — статические, не имеющие подвижных частей. Электрические цепи в них в процессе работы не разрываются (отсюда и название «бесконтактные»), а сигналы управления получаются за счет дискретного изменения

параметров составляющих элементов, имеющих нелинейные характеристики (транзисторов, диодов, ферромагнитных сердечников). К этим аппаратам относятся индуктивные, емкостные и генераторные датчики, фотоэлектрические аппараты, транзисторные, магнитные и тиристорные усилители, транзисторные и магнитные логические элементы, выполняющие различные функции. Бесконтактные аппараты более долговечны, чем электромеханические аппараты, требуют в процессе эксплуатации незначительного времени на обслуживание, обладают высокой надежностью и быстродействием. К недостаткам их следует отнести чувствительность к внешним электрическим помехам и нарушение стабильности работы при изменении температуры (особенно полупроводниковых узлов). При правильном построении схем с бесконтактными аппаратами указанные недостатки можно минимально сократить.

Статические бесконтактные аппараты аналогичны релейно-контактным. Они обладают дискретным действием (скачкообразным изменением состояния), характеризуемым двумя состояниями, соответствующими понятиям «Включено» и «Выключено». Под состоянием «Включено» понимается такое состояние бесконтактного элемента или устройства, когда на его выходе имеется полезный сигнал с полным напряжением. Отсутствие напряжения на выходе аппарата соответствует состоянию «Выключено». В более удобном математическом отображении эти состояния в двоичной системе исчисления записываются как **1** и **0**.

Наиболее распространенные аппараты в схемах управления электроприводами — логические элементы дискретного действия. На их основе строится логическая часть системы управления, где в зависимости от сигналов на входе элементов на выходе появляется сигнал **1** или сигнал **0**. Эти сигналы через усилители поступают на исполнительные устройства управления электроприводом (электромагнитные муфты, электромагниты золотников гидравлической системы, тиристорные ключи или пускатели и т. п.). Сочетания сигналов управления, которые необходимы для действия схем с логическими элементами, командными и исполнительными аппаратами и устройствами дискретного действия, могут записываться в виде формул специального раздела математики — алгебры логики. Эти формулы отражают все связи и взаимодействия между элементами системы управления в виде независимых переменных и их функций, принимающих значения **1** или **0**. Логические элементы как устройства, реализующие элементарные логические функции, также могут быть обозначены алгебраически. Так, все релейно-контактные схемы логической части системы управления составляются из различных сочетаний последовательных и параллельных соединений замыкающих и размыкающих контактов и катушек реле.

Бесконтактные схемы могут быть собраны и с помощью логических элементов, выполняющих элементарные логические функции **ПОВТОРИТЕЛЬ**, **И**, **ИЛИ**, **НЕ**, **ПАМЯТЬ**, **ВРЕМЯ** или **ЗАДЕРЖ**.

КА. Применение в таких схемах логических элементов, выполняющих более сложные логические функции, позволяет сократить число элементов с элементарными функциями, а схему управления сделать более надежной и удобной в обслуживании. Бесконтактные элементы логической части системы управления выполняют определенный объем смысловых логических операций. Однако они не могут, подобно релейно-контактным аппаратам, соединять или разрывать какие-либо электрические цепи. Поэтому применение бесконтактных аппаратов не означает прямой замены электромеханического реле. В бесконтактных схемах управления количество логических элементов обычно в несколько раз больше, чем реле в аналогичных релейно-контактных схемах, а поэтому составление таких схем должно базироваться на основе логического синтеза.

Под *логическим синтезом* понимается процесс составления структурных формул (алгебраических выражений) схемы управления по заданным условиям технологического процесса. В процессе синтеза получают алгебраические выражения для выходных и промежуточных переменных, позволяющих на их основе построить схему с минимальным количеством бесконтактных элементов.

В настоящее время отечественной промышленностью созданы разнообразные типы бесконтактных аппаратов и устройств, позволяющих выполнять современные быстродействующие и надежные схемы управления электроприводами.

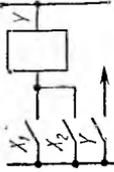
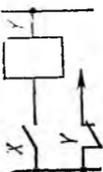
§ 11-2. Логические элементы, применяемые для управления электроприводом

При дискретном бесконтактном управлении электроприводом наибольшее применение имеют логические элементы, выполняемые на электронных лампах, полупроводниковых диодах, транзисторах и магнитных (ферритовых) сердечниках. Входные и выходные сигналы логических элементов имеют два рабочих значения, соответствующих логическим 0 и 1.

Элементы классифицируются по выполняемым ими функциям, число которых велико. Однако сложные функции разделяются на ряд простых, реализуемых с помощью логических элементов нескольких типов, осуществляющих так называемые элементарные функции. Названия некоторых элементарных (простейших) логических функций и элементов, их функциональные формулы, обозначения элементов и их релейные эквиваленты приведены в табл. 11-1.

Более сложные логические функции реализуются логическими элементами, объединяющими в одной конструкции различные схемные решения. Наиболее широко в электроприводе с бесконтактным управлением применяются диодно-транзисторные элементы, объединенные в унифицированную систему «Логика». Эта система состоит из серии транзисторных элементов «Логика Т» и серии, построенной на базе интегральных микросхем К511,— «Логика И».

Таблица 11-1

Наименование логической функции (элемента)	Функциональная формула	Содержание логической функции	Обозначение элемента	Таблица истинности	Релейный эквивалент															
Повторение (повторитель)	$Y = X$	Сигнал на выходе появляется при наличии сигнала на входе		<table border="1" data-bbox="212 282 357 493"> <tr> <td>X</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	X	Y	0	0	1	1										
X	Y																			
0	0																			
1	1																			
И (конъюнктор)	$Y = X_1 X_2$	Сигнал на выходе появляется тогда, когда имеются сигналы на всех входах		<table border="1" data-bbox="388 282 574 493"> <tr> <td>X₁</td> <td>X₂</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
X ₁	X ₂	Y																		
0	0	0																		
0	1	0																		
1	0	0																		
1	1	1																		
ИЛИ (дизъюнктор)	$Y = X_1 + X_2$	Сигнал на выходе появляется тогда, когда имеется сигнал хотя бы на одном из входов		<table border="1" data-bbox="595 282 782 493"> <tr> <td>X₁</td> <td>X₂</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
X ₁	X ₂	Y																		
0	0	0																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	1																		
НЕ (инвертор, отрицание)	$Y = \bar{X}$	При наличии сигнала на входе сигнал на выходе появляется с исчезновением сигнала на входе		<table border="1" data-bbox="802 282 947 493"> <tr> <td>X</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	X	Y	0	1	1	0										
X	Y																			
0	1																			
1	0																			

Наименование логической функции (элемента)	Функциональная формула	Содержание логической функции	Обозначение элемента	Таблица истинности	Релейный эквивалент															
И — НЕ Отрицание конъюнкции (элемент Шеффера)	$Y = \bar{X}_1 \bar{X}_2 = \overline{X_1 + X_2}$	Сигнал на выходе отсутствует тогда, когда имеются сигналы на всех входах		<table border="1"> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	
X ₁	X ₂	Y																		
0	0	1																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	0																		
Запрет	$Y = \bar{X}_1 X_2$	При отсутствии сигнала на входе «запрет X ₁ » сигнал на выходе появляется одновременно с сигналом на входе X ₂ , а при наличии сигнала на входе «запрет X ₁ » сигнал на выходе отсутствует		<table border="1"> <tr> <th>X₁</th> <th>X₂</th> <th>Y</th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	
X ₁	X ₂	Y																		
0	0	0																		
0	1	1																		
1	0	0																		
1	1	0																		
Задержка (выдержка времени)	—	Сигнал на выходе появляется через некоторое время после подачи сигнала на вход и исчезает одновременно с входным сигналом		—																
Память (двоничный триггер)	—	После подачи сигнала на вход включения X ₁ записанная информация (Y) сохраняется до подачи сигнала на вход отключения (X ₂) памяти независимо от последующего состояния входа X ₁		—																

Элементы этих серий выпускаются промышленностью в комплекте с источниками питания.

Логические элементы серии «Логика Т» представляют собой диодно-транзисторные элементы, составленные из дискретных компонентов. В них используются два способа представления информации: потенциальный (отрицательный потенциал), когда значениям переменной 1 и 0 соответствуют высокий и низкий уровни напряжения, и импульсный (положительный потенциал), когда значения 1 и 0 двоичной переменной характеризуются положительными и отрицательными электрическими импульсами или наличием и отсутствием импульса.

Основным (базовым) элементом серии является элемент ИЛИ — НЕ, построенный с помощью транзисторного усилителя, работающего в ключевом режиме, и диодного узла ИЛИ, включенного на входе усилителя (рис. 11-1). Транзистор типа *p-n-p* включен по схеме с общим эмиттером. Входной сигнал $U_{вх}$ отрицательной полярности через один из диодов $V1—V3$ и резистор $R_б$ поступает на переход база — эмиттер транзистора V . Выходной сигнал $U_{вых}$ снимается между общей точкой источников питания OT и коллектором транзистора V . Транзистор запирается при отсутствии входного сигнала источником положительного смещения $U_{см}$ через резистор $R_{см}$, присоединенный к базе транзистора. При подаче на любой из входов сигнала, соответствующего 1, на базе транзистора имеет место отрицательный потенциал; при этом через переход база — эмиттер проходит ток, достаточный для перевода транзистора в режим насыщения. На выходе схемы резко снижается потенциал $U_{вых}$, т. е. происходит дискретное изменение выходного сигнала. Таким образом, усилительный каскад реализует логическую инверсию (отрицание). На основе базовой схемы и дополнительных диодно-резисторных узлов, конденсаторов и трансформаторов связи в этой серии создано около 30 разновидностей логических элементов, стабилизаторов, усилителей и преобразователей.

Логические элементы серии «Логика Т» оформлены в виде модулей: полупроводниковые приборы, резисторы и другие детали смонтированы на гетинаксовых печатных платах, которые помещены в полистироловый корпус размером $90 \times 19, 5 \times 55$ мм и залиты компаундом на основе эпоксидной смолы. Конструкция модулей неразборная и неремонтоспособная.

Серия «Логика И» состоит из четырех групп элементов: логических, функциональных, времени и выходных (усилителей). Всего имеется 30 различных элементов.

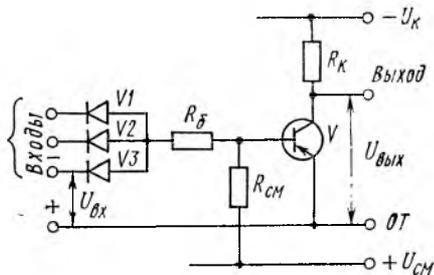


Рис. 11-1. Принципиальная схема базового элемента серии «Логика Т»

Логические элементы предназначены для реализации основных логических функций, а также некоторых операций цифрового управления.

Функциональные согласующие входные элементы предназначены для связи аппаратов управления (кнопок, датчиков, выключателей и т. п.) с логическими элементами. Основой входных элементов служат миниатюрные герконовые реле типа РПГ-6, благодаря чему обеспечиваются малая потребляемая мощность, надежная коммутация низких уровней

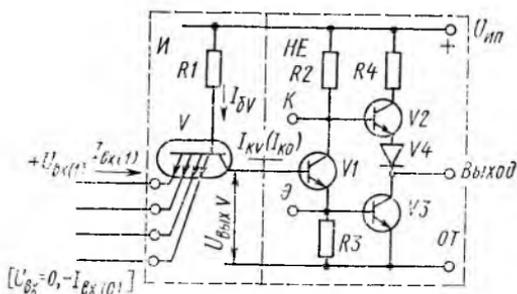


Рис. 11-2. Принципиальная схема базового логического элемента на многоэмиттерном транзисторе

тока и напряжений, достаточно высокое быстродействие, гальваническая развязка цепей управления и нагрузки.

Элементы времени предназначены для получения выдержек времени в диапазоне 0,01—10 с.

Выходные элементы (усилители) предназначены для усиления сигналов логических элементов. На выходе усилителей включаются исполнительные устройства, потребляющие значительную мощность (единицы и десятки ватт).

Схемы выходных элементов выполнены на мощных транзисторах и имеют дискретный выход.

Напряжение питания всех элементов (за исключением входных) 15 В. Габаритные размеры элементов 70×70×12 или 70×70×24 мм (соответственно I и II габариты). В сериях интегральных микросхем используется потенциальный способ представления информации: логическая единица — высокий положительный потенциал, ноль — низкий.

Для построения схем бесконтактного управления электроприводом и автоматизации промышленных установок может быть использована и серия полупроводниковых интегральных логических микросхем К155. Базовым элементом интегральных микросхем К155 и К511 является элемент И—НЕ, выполненный на основе многоэмиттерного транзистора, реализующего функцию И, и транзисторного усилителя, называемого сложным инвертором НЕ (рис. 11-2). Инвертор включен на выходе V и является его коллекторной нагрузкой. Многоэмиттерный транзистор типа *n-p-n* имеет несколько эмиттеров, расположенных таким образом, что прямое взаимодействие между ними исключено. Если на все входы схемы — эмиттеры транзистора V — поданы высокие положительные потенциалы $U_{вх(1)}$ (но ограниченные по значению напряжения пробоя перехода эмиттер — база), то переходы эмиттер — база запираются током смещения $I_{вх(1)}$.

Если с одного из входов транзистора V будет снят сигнал ($U_{вх}=0$) или подан низкий положительный потенциал, соответствующий переход эмиттер — база отпирается и ток базы I_b начинает протекать через этот переход ($I_b \approx -I_{вх(0)}$). Транзистор будет считаться закрытым. Таким образом, если на всех входах многоэмиттерного транзистора имеется сигнал 1, то на его выходе также будет напряжение $U_{выхV}=1$; если хотя бы на одном входе появляется сигнал 0, то и на выходе будет сигнал 0, т. е. эта часть схемы реализует логическую функцию И. Однако схема И на многоэмиттерном транзисторе практического применения не находит, так как она функционально неустойчива: логический сигнал 1 на выходе V меньше, чем на входе. Для запираания переходов эмиттер — база транзистора V необходимо, чтобы входной сигнал превышал выходной: $U_{вх} > U_{выхV}$.

В логических схемах с интегральными схемами рассмотренную схему И на многоэмиттерном транзисторе включают на вход транзисторного усилителя ($V1, V3$) — сложного инвертора. Такая общая схема образует базовый элемент, реализующий функцию И — НЕ.

Инвертор построен на транзисторах $V1$ и $V3$ по схеме «составного транзистора», где $R3$ обеспечивает запираание $V3$ при запертом $V1$. Коллекторное напряжение транзистора $V1$ управляет эмиттерным повторителем на транзисторе $V2$. Диод $V4$ за счет прямого падения напряжения обеспечивает надежное запираание транзистора $V2$, а резистор $R4$ ограничивает протекающий ток.

Элементы серии «Логика» обеспечивают построение практически любых дискретных схем, необходимых для управления электроприводами и автоматизации промышленных установок.

§ 11-3. Узлы схем для управления электроприводом с применением логических элементов

Изображения схем управления с бесконтактными логическими элементами отличаются от изображений схем с релейно-контактными аппаратами. Электромеханические реле и контакторы обычно имеют одну входную цепь (втягивающую катушку) и несколько выходных цепей в виде замыкающих и размыкающих контактов. Бесконтактные логические элементы имеют несколько входных цепей, которые могут быть соединены между собой или не соединены электрически, и только одну выходную цепь у магнитных элементов или две инверсные у полупроводниковых элементов. Поэтому в релейно-контактных схемах не может быть механической замены контактов бесконтактными элементами.

При изображении схем с бесконтактными логическими элементами показываются только логические связи между элементами, по которым проходят сигналы управления. Вспомогательные же цепи, к которым относятся цепи питания рабочих обмоток и обмоток смещения магнитных элементов и усилителей, цепи коллекторного напряжения и смещения полупроводниковых элементов и усилителей,

бесконтактных датчиков сигналов, не показываются, так как они сильно затруднили бы чтение схем. Эти цепи выполняются для всех элементов или усилителей одинаково.

Структурная схема автоматической системы управления, выполненная на логических элементах, приведена на рис. 11-3. Она может быть отнесена к схемам любой сложности. Питание схемы осуществляется от источника питания *ИП*. Датчиками входных сигналов *ДС* могут быть пусковые кнопки, контактные и бесконтактные путевые или конечные выключатели, датчики давления, температуры и т. д. Если датчики на выходе имеют плавно изменяющиеся сигналы, то их необходимо преобразовать в дискретные. Для согласования сигналов с входными параметрами элементов в схему вводятся согласующие элементы *СЭ*. Так как мощность логических элементов

ЛЭ недостаточна для питания большинства исполнительных устройств *ИУ* (контакторов, электромагнитов, электромагнитных муфт и т. п.), они включаются через усилители *У*. Количество элементов в схемах управления зависит от типов элементов (серии). Это обусловлено тем, что одни и те же функциональные узлы в разных сериях выполняются различными наборами элементов.

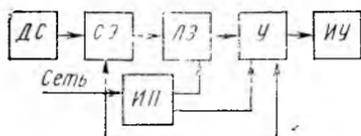


Рис. 11-3. Структурная схема управления на логических элементах

Приведенные на рис. 11-4 некоторые типовые узлы схем управления неререверсивным электроприводом отвечают приведенной структурной схеме и при сравнительно небольшом количестве элементов. Для большей наглядности и лучшего понимания работы узлов схем с бесконтактными элементами для каждого из них приведен релейно-контакторный вариант.

Схема включения неререверсивного электромеханического пускателя показана на рис. 11-4, а. Работа релейно-контакторного узла описана в § 10-2. При управлении пускателем или контактором *К* с использованием логических элементов в исходном состоянии схемы на выходе элемента *1* сигнал отсутствует. При отсутствии сигнала X_1 на входе элемента *2* (триггера) выходной сигнал отсутствует; следовательно, на выходе элемента *3* (усилителя) его нет. Контактор *К* отключен.

При нажатии на кнопку *КнП* появляется сигнал на входе элемента *2*. Появившийся сигнал на его выходе поступает на вход элемента *3*, на выходе которого включена катушка. Под действием большого выходного напряжения усилителя в катушке протекает ток, достаточный для срабатывания контактора *К*, который главными контактами подключает двигатель *М* к сети. При отпускании *КнП* схема остается в работе, так как элемент *2* записал (запомнил) входную команду. Снятие выходного сигнала у элемента *2* осуществляется нажатием на кнопку *КнС* или разрывом контакта *РТ* теплового реле. При разрыве хотя бы одной из входных цепей эле-

мента 1 на его выходе появляется сигнал, поступающий на вход X_2 , с помощью которого триггер перебрасывается, и сигнал на его выходе исчезает. С исчезновением его снимается напряжение с катушки контактора. Двигатель отключается от сети.

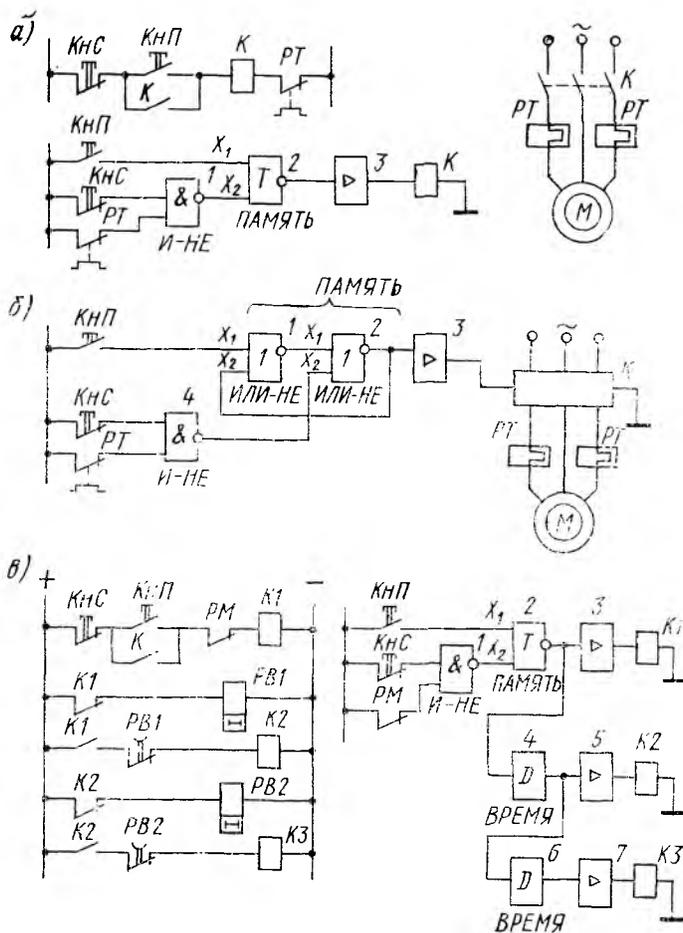


Рис. 11-4. Схемы управления неперевисным электроприводом на бесконтактных логических элементах

Запоминание командного входного сигнала может быть осуществлено с помощью двух логических элементов ИЛИ — НЕ, когда сигнал с выхода элемента 2 (рис. 11-4, б) будет поступать на вход X_2 элемента 1 по цепи обратной связи.

Вместо электромеханического пускателя или контактора исполнительным аппаратом может быть бесконтактный пускатель (например, тиристорный). Тогда узел схемы (рис. 11-4, б) неперевис-

ного включения двигателя будет представлять почти бесконтактную систему управления.

В схеме, приведенной на рис. 11-4, в, показано включение трех контакторов $K1—K3$, последовательность работы которых при управлении электроприводом приведена в функции времени. В релейно-контакторной схеме после включения контактора $K1$ через некоторую выдержку времени реле $PВ1$ включается контактор $K2$, а затем через вторую выдержку времени реле $PВ2$ — контактор $K3$.

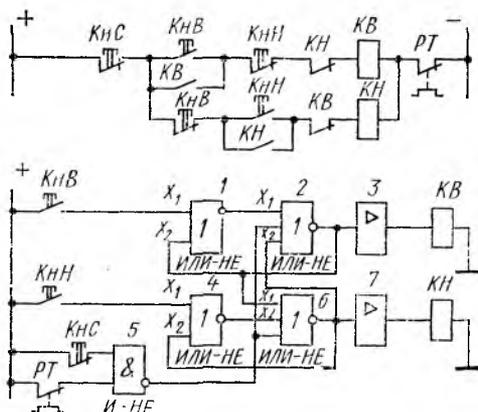


Рис. 11-5. Схемы управления реверсивным электроприводом на логических элементах

Отключение контакторов происходит при нажатии кнопки $КНС$ или в результате действия максимально-токовой защиты (при размыкании контакта $РМ$).

Узел схемы реверсивного управления электроприводом показан на рис. 11-5. После нажатия на соответствующую кнопку $КНВ$ («Вперед») или $КНН$ («Назад») включаются контакторы $КВ$ и $КН$. Сигналы управления проходят по цепочкам, аналогичным рассмотренным. Блокирование, предотвращающее одновременное включение контакторов, обеспечивается при включении $КВ$ или $КН$ подачей сигнала 1 соответственно с выхода элемента 2 на вход X_1 элемента 6 или, наоборот, с выхода элемента 6 на вход X_2 элемента 2. Таким образом, если нажата, например, кнопка $КНВ$ и включен контактор $КВ$, то после нажатия на кнопку $КНН$ и появления на выходе элемента 4 сигнала 0 на выходе элемента 6 по-прежнему остается сигнал 0, поскольку на его вход X_1 подан сигнал 1.

Приведенные узлы схем с логическими элементами широко используют при составлении более сложных схем управления электроприводами производственных механизмов.

Для получения различных бесконтактных схем управления электроприводами и производственными механизмами в настоящее время разработано и изготавливается универсальное устройство управления с программируемой логикой типа УЛП. Это устройство, выполняя логические и счетные функции, позволяет воспроизвести

любую логическую схему управления. Программа, описывающая логику работы электрооборудования, закладывается в постоянную память устройства УЛП и записывается с пульта по электрической релейной схеме или по заданию в виде логических уравнений. Входами являются органы управления электроприводами механизмов и элементов их автоматизации: кнопки, переключатели, конечные выключатели, датчики давления, скорости и т. д. Получаемые на выходе сигналы служат для управления исполнительными аппаратами: электромеханическими и бесконтактными пускателями, контакторами, электромагнитами и т. д.

Устройство последовательно контролирует состояние входов (включен — отключен) и выходов (включить — отключить). В зависимости от соответствия состояния входов условиям, указанным в программе, включаются двигатели или исполнительные устройства.

§ 11-4. Узлы схем для управления электроприводом с применением тиристоров

Схемы с тиристорами применяются в электроприводе для различных целей: получения регулируемого напряжения постоянного тока; преобразования постоянного тока в переменный (инверторы и преобразователи частоты); бесконтактной коммутации цепей переменного тока (бесконтактные пускатели, ключи и переключатели); получения различных режимов работы электроприводов постоянного и переменного токов — включение и реверсирование двигателей, регулирование скорости, динамическое торможение и торможение противовключением, а также специальных режимов асинхронного двигателя — шагового и вибрационного. Схемные решения тиристорных устройств для получения различных режимов работы электроприводов весьма разнообразны.

Для электроприводов постоянного тока тиристорные устройства используются в станциях и блоках управления типа БУВ 3603, БУ 3509, ЭТУ 3601 и др., рассчитанных на мощности двигателей от сотен ватт до сотен киловатт.

Для электроприводов переменного тока промышленностью выпускаются: 1) преобразователи частоты со звеном постоянного тока типа ЭКТ, рассчитанные на мощности от 5 до 400 кВт и частоты 1—60, 5—70, 15—200 Гц, типа ПЧИ — на частоты 5—50 Гц и с непосредственной связью типа ТТС на 2—30, 3—20 Гц, обеспечивающие управление двигателями от 2 до 80 кВт; 2) тиристорные регуляторы напряжения типа РСТ, выполняемые по симметричной трехфазной схеме включения (см. рис. 4-24, з); 3) комплексные тиристорные станции управления серии КТСУ, являющиеся бесконтактными аналогами щитов релейно-контакторных станций управления и предназначенные для пуска, реверса, торможения и защиты асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющих номинальные токи от 10 до 160 А.

Узел схемы получения различных частот и напряжений с помо-

стью статического преобразователя рассмотрен в § 4-4. Управление электроприводом с таким преобразователем сводится главным образом к управлению тиристорами управляемого выпрямителя и автономного инвертора.

Для коммутации электрических цепей переменного тока и получения различных режимов работы асинхронных двигателей широко используются схемы с тиристорными элементами, называемые *статическими переключателями*. Узлы схем основных статических

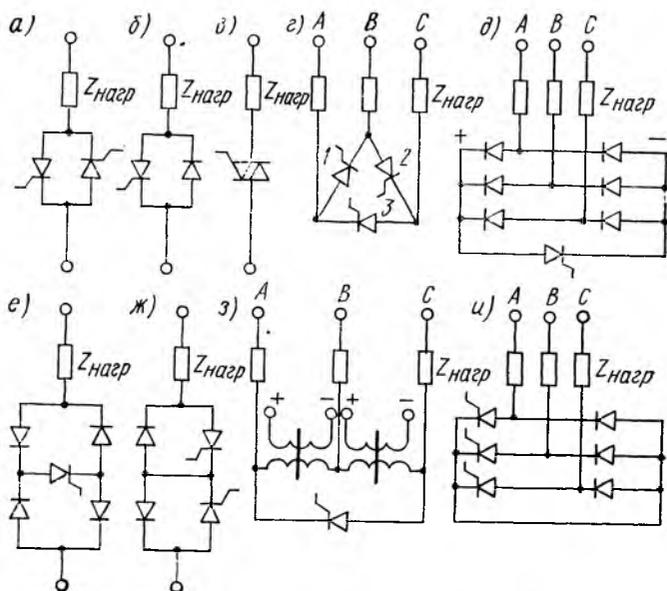


Рис. 11-6. Схемы статических переключателей

переключателей показаны на рис. 11-6, а—д, а возможных дополнительных — на рис. 11-6, е—и. В режиме полного открытия тиристоров переключатели работают как группа силовых контактов. При фазовом, а также время-импульсном (частотно-импульсном или широтно-импульсном) управлении тиристорными элементами в цепь нагрузки оказывается включенным как бы некоторое эквивалентное нелинейное реактивное сопротивление.

Тиристорные элементы, приведенные на рис. 11-6, а, б, в, е, ж, предназначены для включения их в одну фазу сети. В трехфазных схемах такие элементы ставятся в каждую фазу.

Управление симметричными встречно-параллельными элементами (рис. 11-6, а, е) и симистором (рис. 11-6, в) осуществляется изменением угла управления α обоих тиристоров. В несимметричных элементах (рис. 11-6, б, ж) включено одинаковое число диодов и тиристоров. Управление треугольным тиристорным элементом (рис. 11-6, з) осуществляется симметричным и несимметричным из-

менением угла α . Чередование работы тиристоров в этом элементе приведено в табл. 11-2.

Максимальный диапазон изменения угла управления при активной нагрузке составляет 210° , при активно-индуктивной — $210^\circ - \varphi$, где φ — фазовый угол нагрузки.

В схеме, приведенной на рис. 11-6, з, два тиристора заменены дросселями насыщения, имеющими сердечники, выполненные из материала с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса. Число

Таблица 11-2

Интервал	Тиристоры		
	1	2	3
$\alpha < \omega t < 120^\circ$	Открыт	Закрыт	Открыт
$120^\circ < \omega t < \alpha + 120^\circ$	»	»	Закрыт
$\alpha + 120^\circ < \omega t < 240^\circ$	»	Открыт	»
$240^\circ < \omega t < \alpha + 240^\circ$	Закрыт	»	»
$\alpha + 240^\circ < \omega t < 360^\circ$	»	»	Открыт
$360^\circ < \omega t < 360^\circ + \alpha$	»	Закрыт	»
$360^\circ + \alpha < \omega t \rightarrow$	Открыт	»	»

витков дросселя выбирается таким, чтобы его максимальная рабочая индукция была меньше индукции насыщения. В схемах тиристорных короткозамыкателей (рис. 11-6, д, и) при включении тиристоров происходит закорачивание выводов выпрямительного моста, что соответствует одновременному включению трех контактов в линейных проводах трехфазной нагрузки.

Статические переключатели в сочетании с добавочными устройствами (конденсаторами, трансформаторами, резисторами, дополнительными тиристорами и диодами) позволяют получить большое число режимов управления электроприводом. Например, узел схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, представленный на рис. 11-7, а, служит для пуска, динамического торможения и шагового режима при соединении обмоток $c1-c4$, $c2-c5$, $c3-c6$ в звезду. При работающих тиристорах $V1-V3$, включенных треугольником, и отключенном тиристоре $V4$ двигатель работает в симметричном двигательном режиме.

Для получения режима динамического торможения в этой и подобных схемах не требуется включения дополнительных тиристорov или источника постоянного тока. Если тиристоры $V2$ и $V3$ отключены, а включены тиристоры $V1$ и $V4$, то две обмотки статора питаются выпрямленным постоянным током и, следовательно, двигатель имеет динамическое торможение.

Шаговый режим работы двигателя получается при отключенных тиристорах $V1$ и $V4$ и последовательно работающих $V2$ и $V3$. При закрытых $V1$ и $V4$ на выводах $c1$ и $c3$ постоянно приложено напряжение сети. Если открыты $V2$, то при закрытом $V3$ двигатель сделает один шаг, а при открытом $V3$ и закрытом $V2$ — другой шаг и т. д. с заданными интервалами времени.

При использовании пяти встречно-параллельных тиристорных элементов (рис. 11-7, б) можно осуществлять прямой бесконтактный пуск двигателя в требуемом направлении, реверс, торможение противовключением и динамическое торможение, регулирование скорости импульсным методом и подмагничиванием обмоток статора постоянным током, а также шаговый режим. Для получения необходимого режима работы двигателя система управления должна формировать сигналы, включающие соответствующие тиристоры,

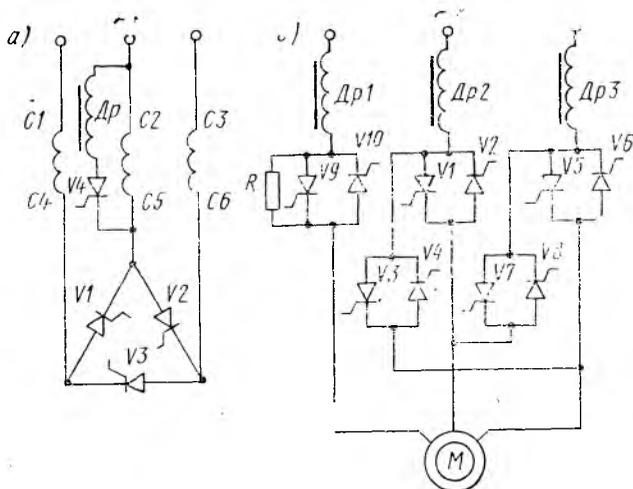


Рис. 11-7. Тиристорные схемы для получения различных режимов работы асинхронного двигателя

например V_1, V_2, V_5, V_6 при пуске двигателя «вперед», тиристоры V_3, V_4, V_7, V_8 при пуске «назад», тиристоры V_1, V_6 для снижения скорости при работе «вперед»; тиристоры V_1, V_7 для получения режима динамического торможения, а значит, и тормозной момент можно регулировать введением в цепь статора резистора R . Во всех режимах, кроме динамического торможения, резистор R шунтирован открытыми тиристорами V_9 и V_{10} и не оказывает влияния на работу двигателя. На время торможения тиристоры V_9 и V_{10} закрываются, заставляя тормозной ток проходить через резистор R .

Одна из полных схем управления асинхронным двигателем с использованием статических переключателей приведена на рис. 11-8. С помощью этой схемы могут быть получены следующие режимы работы двигателя: включение на пониженное напряжение, регулирование угловой скорости, динамическое торможение, шаговый режим. Три встречно-параллельные пары тиристоров $V_1—V_6$ включены в три фазы двигателя, а два тиристора V_7 и V_8 — параллельно двум его обмоткам.

Управляющие импульсы подаются на тиристоры через упрощенные формирователи узких импульсов, в которых используются диоды $V21, V22$ и $V23$. Процесс формирования импульсов осуществляется следующим образом. Пока открыт встречный тиристор, например $V2$, напряжение управления не подается на цепь управляющего перехода тиристора $V1$. Как только тиристор $V2$ закрывается, на-

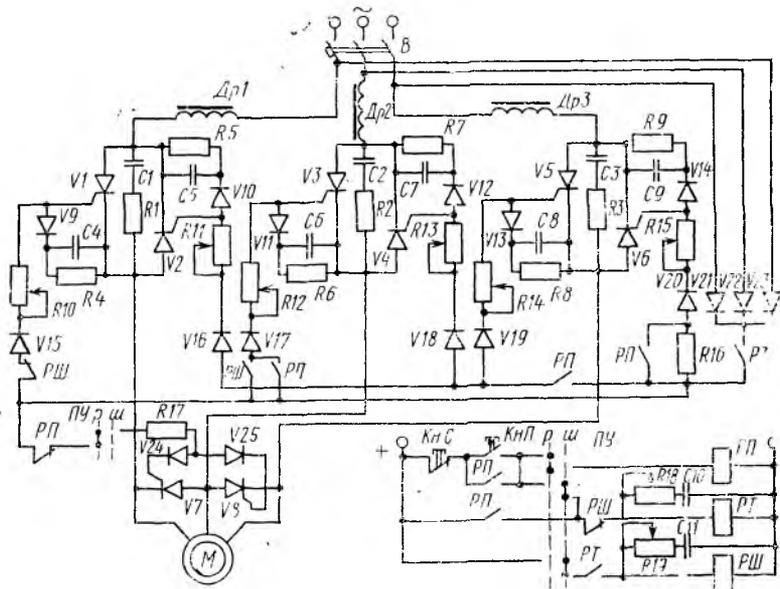


Рис. 11-8. Схема управления асинхронным двигателем с использованием статических переключателей

чинает возрастать ток управления в тиристоре $V1$; когда он достигает значения, при котором тиристор включается, напряжение на управляющем переходе падает, так как последний закорачивается включившимся тиристором $V1$. Импульс возникает после перехода тока через нуль и прекращается после включения тиристора, т. е. длительность импульса управления равна времени открывания тиристора и зависит от протекающего через тиристор тока и фазового угла нагрузки. Ширина импульса упрощенной схемы формирования для различных режимов работы двигателя (пуск, режим нагрузки, режим холостого хода) колеблется от 0,5 до 8 град. Импульсы управления для тиристорov $V3, V4$ и $V5, V6$ формируются аналогично импульсам для тиристорov $V1, V2$.

Для получения требуемых режимов работы асинхронного двигателя импульсы напряжений управления подаются соответствующим тиристорам с помощью контактов реле $РП, РТ, РШ$. Плавное открывание тиристорov обеспечивается динамическими фазовращательными RC -цепочками, включенными параллельно управляющим переходам тиристорov $V1-V6$ (у тиристора $V1$ — ре-

зистор $R4$, конденсатор $C4$ и диод $V9$, у тиристора $V2—R5, C5, V10$, у тиристоров $V3—V6$ соответственно $R6—R9, C6—C9$ и $V11—V14$).

Защита тиристоров от коммутационных перенапряжений осуществляется параллельными RC -цепочками: $R1—C1$; $R2—C2$ и $R3—C3$. Для настройки режима работы тиристоров имеются диоды $V15—V20, V24, V25$ и регулировочные резисторы $R10—R17$.

При нажатии на кнопку $KnП$ в положении переключателя ПУ «Работа» (P) включаются реле PP и PT . Реле PP подготавливает к включению цепи управления тиристоров $V2—V5$ и отключает замыкающие тиристоры $V7$ и $V8$. Реле PT подает напряжение на цепи управления всех шести тиристоров. Двигатель плавно разгоняется до номинальной скорости.

При нажатии на кнопку KnC отключается реле PP , закрываются тиристоры $V2—V5$ и подключаются цепи управления тиристоров $V7$ и $V8$. Так как реле PT имеет выдержку времени на отпускание, оказываются включенными тиристоры $V1, V6—V8$, в результате чего двигатель входит в режим динамического торможения. Время торможения подбирается величинами $R18$ и $C10$.

Шаговый режим работы двигателя выполняется при установке переключателя ПУ в положение «шагание» ($ш$) и нажатой кнопке $KnП$. При этом реле PT получает питание и включает тиристоры $V1$ и $V6$; с выдержкой времени включается реле $PШ$, размыкающее цепь питания PT , отключающее тиристор $V1$ и включающее тиристор $V3$. Ротор двигателя совершает один шаг. С выдержкой времени отключаются реле PT и тиристор $V3$. Двигатель обесточивается. Следующий шаг двигателя начинается при замыкании размыкающего контакта реле $PШ$ в цепи катушки PT . Выдержка времени реле $PШ$ и PT обеспечивается значениями емкостей $C10, C11$ и сопротивлений резисторов $R18$ и $R19$. Шаговый режим двигателя будет продолжаться в течение времени нажатия на кнопку $KnП$ и прекращается после отпускания.

ГЛАВА 12

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОМОЩЬЮ НЕПРЕРЫВНО ДЕЙСТВУЮЩИХ (ЗАМКНУТЫХ) СИСТЕМ

§ 12-1. Принцип построения замкнутых систем управления электроприводами

Автоматические системы управления электроприводом (АСУЭП), имеющие главную обратную связь по регулируемой величине, называются *замкнутыми системами*. Такие системы создаются для регулирования и поддержания скорости движения, получения наиболее оптимальных переходных процессов, поддержания постоянства мощности, момента или другой величины.

Рассмотрим принцип построения замкнутой автоматической системы управления, например, для поддержания скорости электро-

привода. Известно, что под действием статических нагрузок скорость большинства электроприводов несколько снижается. Для поддержания ее в определенных, заданных пределах необходимо измерять эту скорость и при отклонениях от заданного значения производить ее подрегулирование воздействием на параметры силовых устройств питания и регулирования. Из сказанного следует, что система управления электроприводом рабочей машины *РМ* (рис. 12-1) должна включать в себя следующие элементы и устройства: задающее устройство *ЗУ*, элемент сравнения сигналов *ЭС*, промежуточный усилитель *У*, преобразователь энергии *Пр*, тахогенератор *ТГ* (измеритель угловой скорости двигателя *М*). Для непрерывного подрегулирования скорости электропривода необходимо постоянно воздействовать на сигнал управления преобразователем энергии, т. е. система должна быть замкнутой.

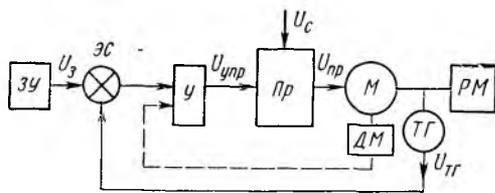


Рис. 12-1. Структурная схема замкнутой системы управления электроприводом

Системы поддержания и стабилизации скорости электроприводов применяют при больших диапазонах регулирования скорости или точном поддержании ее. При этом для формирования закона регулирования процессов пуска и торможения электропривода в систему управления вводят дополнительные обратные связи, например по моменту двигателя через датчик момента *ДМ*, по производным и интегралам отклонения регулируемой величины (на рис. 12-1 не показаны), дополнительные датчики и корректирующие устройства, которые могут включаться как в основную цепь регулирования, так и в цепи обратных связей. Сигналы от датчиков и корректирующих устройств подаются на вход промежуточного усилителя, где они суммируются и в виде результирующего сигнала поступают в цепи управления преобразователем энергии.

По характеру воздействия на схему управления и регулирования обратные связи разделяются на положительные и отрицательные. Эти связи могут действовать постоянно (жесткие связи) или только при переходных процессах (гибкие связи). При увеличении регулируемой величины (скорости, мощности и т. п.) положительная обратная связь еще больше ее увеличивает, а отрицательная, наоборот, уменьшает. Обратные связи, передающие сигналы, пропорциональные скорости, напряжению и т. д., получают названия по соответствующим величинам, т. е. по скорости, напряжению и т. д. Обратные связи могут осуществляться с помощью электрических, механических и других соединений.

Регулирование и автоматическое поддержание скорости электропривода по схеме, приведенной на рис. 12-1, достигается следующим образом. Необходимое значение скорости устанавливается с помощью задающего устройства. Пропорционально сигналу U_3 на

выходе преобразователя будет напряжение $U_{пр}$, под действием которого двигатель начинает разгоняться. По мере разгона электропривода напряжение тахогенератора $U_{тг}$ увеличивается. Это напряжение включено навстречу задающему, т. е. создана отрицательная обратная связь по скорости. В результате общего действия $U_з$ и $U_{тг}$ получается результирующий входной сигнал $U_{упр}$ на преобразователе, который обеспечивает соответствующее напряжение на двигателе. При неизменной статической нагрузке после разгона электропривода будет иметь место установившееся состояние системы регулирования.

Если статическая нагрузка по каким-либо причинам увеличивается, то угловая скорость двигателя и напряжение тахогенератора соответственно уменьшаются. В результате действия отрицательной обратной связи сигнал, поступающий с элемента сравнения, увеличится, что вызовет повышение $U_{упр}$ и $U_{пр}$. Угловая скорость двигателя увеличится почти до заданного значения. Чем больше усиление управляющих сигналов, тем точнее поддерживается скорость электропривода.

§ 12-2. Элементы и устройства автоматического управления электроприводами в замкнутых системах

Для получения задающих сигналов, измерения основного и дополнительных параметров, образования сигналов по производной и интегралу изменяющихся величин и усиления этих сигналов в замкнутых системах управления электроприводами служат соответствующие элементы и устройства. Все разнообразие их можно разделить на четыре группы: 1) усилители сигналов в канале управления; 2) управляющие и формирующие элементы; 3) датчики и измерительные схемы; 4) командные и задающие элементы.

Усилители. В схемах автоматического управления электроприводами усилители предназначаются для увеличения мощности сигналов в канале управления. Они используются как выходные усилительные элементы управляющих устройств, промежуточные суммирующие (сравнивающие) или фазочувствительные элементы, Применяемые усилители могут быть электронными (ламповыми и транзисторными), электромагнитными поперечного поля (ЭМУ) и магнитными. Принцип действия этих усилителей подробно рассматривается в предметах электроники, автоматики и вычислительной техники; здесь же напомним только их основные показатели: коэффициент усиления по напряжению, току и мощности; входная мощность; коэффициент полезного действия; чувствительность; динамический диапазон; нелинейные частотные и фазовые искажения. Основные показатели усилителей учитываются и используются при составлении замкнутых автоматических схем управления электроприводами для получения надежной и стабильной работы. Наибольшее распространение получили электронные усилители постоянного тока (УПТ).

Управляющие и формирующие элементы. Эти элементы необходимы для формирования требуемых законов управления и улучшения динамических свойств системы. К ним относятся пассивные и активные корректирующие элементы (в том числе операционные или решающие усилители), функциональные преобразователи и вычислительные устройства. Введение этих элементов в схему автоматического управления позволяет получить требуемые сигналы для устранения колебаний в системе при резких колебаниях нагрузки, т. е. сделать ее стабильно работающей.

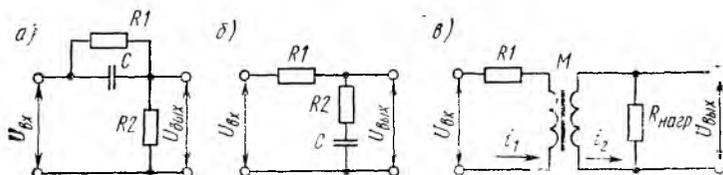


Рис. 12-2. Схемы пассивных корректирующих элементов

В качестве пассивных (не имеющих внутренних источников энергии) корректирующих элементов обычно используются различные RC -контур и стабилизирующие трансформаторы (рис. 12-2), пропускающие или формирующие сигналы только в переходном режиме системы. Дифференциальный элемент (рис. 12-2, а) форсирует переходный процесс, так как напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$, поступающее в регулирующие устройства, в начальный момент изменения сигнала $U_{\text{ВХ}}$ большое и по мере заряда конденсатора C снижается по закону экспоненты. Интегрирующий элемент (рис. 12-2, б), наоборот, замедляет переходный процесс, что объясняется постепенным возрастанием напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от какого-то начального значения $U_{\text{ВХ}}$. Стабилизирующий трансформатор (рис. 12-2, в) имеет на выходе сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$ только при изменении напряжения $U_{\text{ВХ}}$ и тока i_1 . Конструктивно он представляет собой двухобмоточный трансформатор с воздушным зазором в магнитопроводе, нагруженный на достаточно большое сопротивление $R_{\text{нагр}}$. К первичной цепи подводится изменяющееся по значению напряжение постоянного тока. С резистора $R_{\text{нагр}}$ снимается сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$, содержащий первую производную от напряжения $U_{\text{ВХ}}$. Регулированием зазора в магнитной системе получают требуемый диапазон частот, в котором должно осуществляться дифференцирование сигнала $U_{\text{ВХ}}$.

Операционные усилители (регуляторы) относятся к активным корректирующим элементам. В схемах управления электроприводами они не только усиливают сигналы, но и главным образом формируют требуемые законы управления. С помощью этих усилителей выполняются операции интегрирования, дифференцирования, суммирования, изменения масштаба сигналов и др. Операционные усилители вместе с резисторами и конденсаторами обратной связи ($R_{\text{о.с.}}$, $C_{\text{о.с.}}$) называются *регуляторами* (рис. 12-3). Тип регулятора, а следовательно, и название определяют выполняемыми ими операциями: пропорциональный, или П-регулятор (рис. 12-3, а) ;

интегральный, или И-регулятор (рис. 12-3, б); пропорционально-интегральный, или ПИ-регулятор (рис. 12-3, в); интегрально-пропорциональный, или ИП-регулятор (рис. 12-3, г); пропорционально-дифференциальный, или ПД-регулятор (рис. 12-3, д); пропорционально-дифференциально-интегральный, или ПИД-регулятор (рис. 12-3, е). Переходные характеристики этих регуляторов показаны рядом с упрощенными схемами.

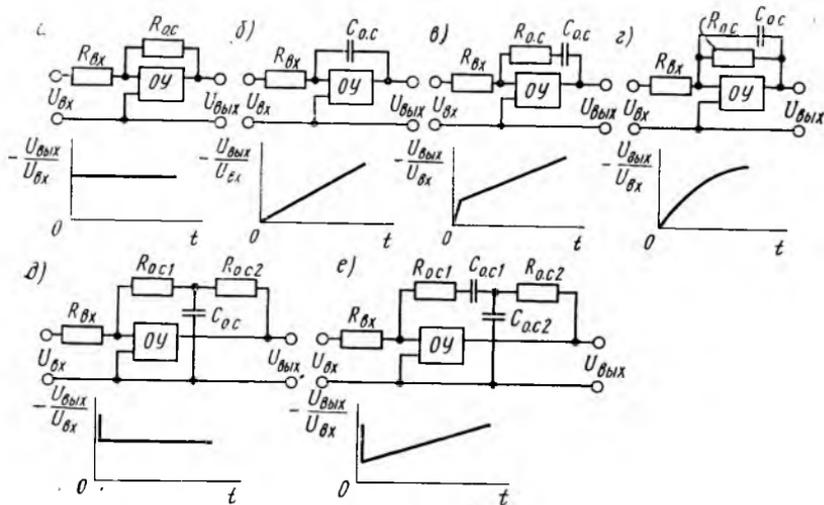


Рис. 12-3. Схемы корректирующих элементов с операционными усилителями и их выходные характеристики

В настоящее время перечисленные регуляторы объединены в унифицированные блочные системы регуляторов (УБСР), имеющие в комплексе различные датчики, функциональные и задающие элементы и источники питания. В этих системах используются усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления по напряжению, выполненные как на транзисторах, так и с использованием интегральных микросхем. Регуляторы УБСР используются для изготовления комплектных устройств управления электроприводами.

Аналоговые (непрерывно действующие) устройства управления являются выходными и обеспечивают хорошее качество протекания переходных процессов.

Для получения высокой точности обработки сигналов обратных связей и широкого диапазона регулирования скорости электроприводов (до 1 : 10 000) вместе с аналоговыми устройствами применяют дискретные устройства управления и регулирования (УБСР-Д).

Формирующие устройства. Эти устройства предназначены для преобразования входного сигнала в сигнал, изменяющийся по определенному закону. В схемах управления электроприводами они служат для получения нелинейных зависимостей между входными и выходными сигналами. Схемы таких устройств при реверсивных

сигналах $U_{вх}$ и зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ приведены на рис. 12-4, а, б. При однополярном сигнале в схемах должен быть только один диод V .

Схема формирующего устройства, приведенная на рис. 12-4, а, работает следующим образом: при $0 \leq |U_{вх}| < |U_{ср}|$ ($U_{ср}$ — напряжение сравнения) ток через резистор $R2$ не протекает и $U_{вых} = 0$. При $|U_{вх}| > |U_{ср}|$ ток через резистор $R2$ будет протекать за счет разности напряжений $|U_{вх}| - |U_{ср}|$, направление его будет определяться полярностью $U_{вх}$.

На рис. 12-4, б представлена схема формирующего устройства, коэффициент усиления которого зависит от напряжения $U_{вх}$. До оп-

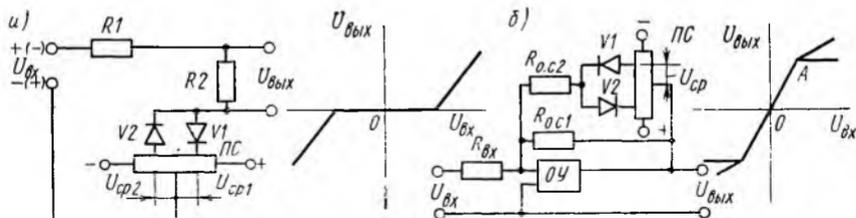


Рис. 12-4. Схемы и выходные характеристики формирующих устройств

ределенного значения $U_{вх}$, пока $|U_{вых}| < |U_{ср}|$ (участок OA), ток через диод $V1$ или $V2$ и резистор $R_{0.c2}$ не протекает. При $|U_{вых}| > |U_{ср}|$ через диод $V1$ или $V2$ будет протекать ток. Полученный сигнал усиливается операционным усилителем OU . С учетом прямого падения напряжения на вентиле сопротивления потенциометра PC и сопротивления резистора $R_{0.c1}$ характеристики выше точки A могут иметь различные наклоны. Это позволяет получить достаточно сложные нелинейные зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$.

Датчики и измерительные устройства. Для получения сигналов обратных связей, пропорциональных контролируемым или измеряемым величинам, служат датчики и измерительные устройства.

Сигнал, пропорциональный угловой скорости ротора (или якоря) двигателя, снимается с датчика угловой скорости — тахогенератора, который сочленяется с валом двигателя или другим валом рабочей машины. Зависимость э. д. с. тахогенератора от угловой скорости практически линейная: $E_{тг} \equiv \omega$.

Контроль и измерение скорости могут осуществляться и с помощью тахометрического моста (рис. 12-5, а), напряжение U_{ω} которого пропорционально скорости двигателя. Плечи моста образованы резисторами делителя напряжения $R1, R2$, обмоткой дополнительных полюсов $ОДП$ двигателя с сопротивлением $R_{д.п.}$, якорем двигателя с сопротивлением $R_{я}$ и э. д. с. $E = k\Phi\omega$. К одной диагонали моста подводится напряжение питания якоря двигателя U_c , с другой диагонали (между точками 1 и 2) снимается напряжение, пропорциональное угловой скорости U_{ω} . Если выбрать значения со-

противлений резисторов R_1 и R_2 так, чтобы соблюдалось условие $R_1 R_{\text{я}} = R_2 R_{\text{д.п.}}$, мост будет сбалансирован. Тогда напряжение

$$U_{\omega} = \frac{R_1 k \Phi}{R_1 + R_2} \omega = C \omega.$$

В системах электропривода на постоянном токе датчиками напряжений являются чаще всего потенциометры (реостатный преобразователь, включенный в электрическую цепь как делитель напряжения), а датчиками

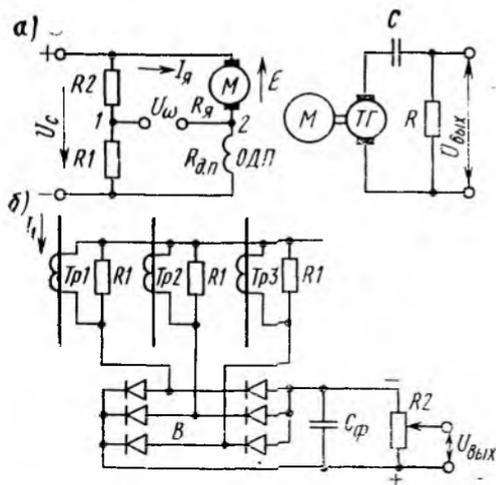


Рис. 12-5. Измерительные схемы в системах управления электроприводами

тока — отдельные шунты или обмотки дополнительных полюсов и компенсационные обмотки электрических машин. В электроприводах, выполненных по системе $УВ-Д$, датчики тока иногда включают в цепи переменного тока. Для получения сигналов управления по току в этом случае используют измерительные трансформаторы переменного тока, нагруженные на резисторы R_1 , и выпрямительный мост B

(рис. 12-5, б). На выходе выпрямителя включаются фильтр $C_{\text{ф}}$ и регулируемый резистор R_2 , с которого и снимается сигнал $U_{\text{вых}}$. Выпрямленное напряжение $U_{\text{вых}}$ практически пропорционально току первичной цепи I_1 , протекающему через силовой преобразователь. Датчиком ускорения электропривода (датчиком динамического тока) в простейшем случае может быть дифференцирующая RC -цепь, включенная на выход тахогенератора (рис. 12-5, в). Напряжение $U_{\text{вых}}$ будет появляться только при изменении значения напряжения тахогенератора, т. е. при ускорении или замедлении электропривода.

Командные и задающие элементы. Для введения в систему управления электроприводом сигналов, необходимых при получении требуемого регулируемого параметра, служат командные и задающие элементы — задатчики скорости и интенсивности.

Наиболее простыми задатчиками скорости являются потенциометры с плавным или ступенчатым изменением напряжения на выходе. В электроприводах с двухзонным (зоны I и II) регулированием скорости такие потенциометры сдвигаются и при повороте регулировочной рукоятки сначала изменяется напряжение на первом потенциометре, а при дальнейшем вращении рукоятки — на втором потенциометре (рис. 12-6, а). С первого потенциометра счи-

мается сигнал $U_{з.я}$, который воздействует на изменение напряжения на зажимах якоря двигателя, а со второго $U_{з.в}$ — на изменение магнитного потока (возбуждения). К недостаткам потенциометрического задатчика относится тот факт, что при быстром перемещении подвижного контакта (для увеличения магнитного потока двигателя) возникает перенапряжение на зажимах якоря, так как его скорость не успевает снижаться вслед за возрастанием магнитного потока.

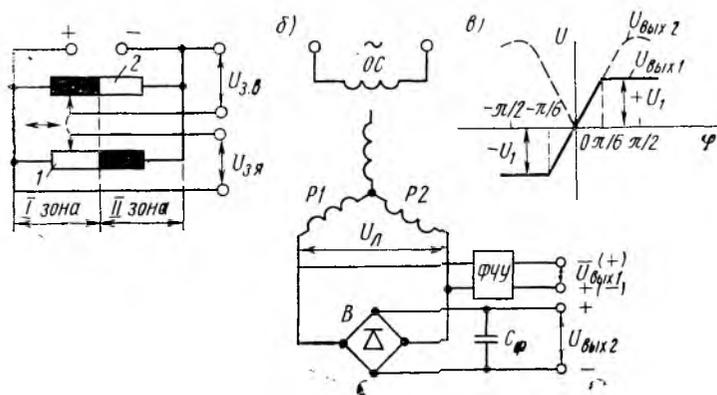


Рис. 12-6. Схемы задающих устройств в замкнутых системах управления электроприводами

Если подвижные контактные устройства (ползунки) потенциометров перемещать с помощью серводвигателя, то такой потенциометрический задатчик будет выполнять и функции задатчика интенсиности.

В электроприводах больших мощностей вместо потенциометров со скользящим контактом применяются бесконтактные задатчики скорости, выполненные на основе бесконтактного сельсина, работающего в трансформаторном режиме (рис. 12-6, б). Однофазная обмотка сельсина $ОС$ подключается к однофазной сети переменного тока, а к двум фазам его трехфазной обмотки $P1$ и $P2$ подключены фазочувствительный усилитель $ФЧУ$ и выпрямитель $В$ с конденсатором фильтра $С_{ф}$. При повороте ротора сельсина линейное напряжение $U_{л}$, снимаемое с обмоток $P1-P2$, изменяясь во времени по синусоидальному закону, находится в фазе или противофазе с напряжением однофазной обмотки в зависимости от направления поворота ротора от некоторого начального положения. Напряжение $U_{л}$ изменяется от нуля (в начальном положении) до максимума (при повороте ротора на угол $\pi/2$). Пропорционально изменению $U_{л}$ изменяется и выпрямленное напряжение $U_{вых2}$. Напряжение $U_{вых1}$ за счет подбора параметров фазочувствительного усилителя должно изменяться от 0 до $\pm U_1$ при повороте ротора на угол $\pm\pi/6$, а при больших углах поворота должно оставаться неизменным (рис. 12-6, в). Напряжение $U_{вых}$ в системах управления элект-

роприводами на постоянном токе используется в качестве сигнала для регулирования напряжения на якоре, а напряжение $U_{\text{вых2}}$ — для управления полем двигателя.

Задатчики интенсивности в замкнутых системах управления электроприводами служат для получения закона изменения во времени задающего сигнала или для получения, например, оптимального процесса разгона или торможения. Принцип действия задатчика рассмотрен в § 5-3.

§ 12-3. Системы автоматического регулирования скорости и момента электропривода

В гл. 4 при рассмотрении способов регулирования угловой скорости двигателей было отмечено, что для получения большого диапазона регулирования необходимо иметь замкнутые автоматические системы. В этих системах с помощью преобразователей энергии, усилителей и сигналов обратных связей получают не только изменение угловой скорости и ее стабилизацию, но и поддержание или ограничение момента двигателя.

В качестве силовых преобразователей энергии используются электромашинный генератор (система $\Gamma-D$), статический вентильный преобразователь (системы $УВ-D$ и $ПЧ-D$), магнитный усилитель. Для суммирования задающих сигналов, сигналов обратных связей и выработки результирующего управляющего сигнала силовым преобразователем применяются усилители как с магнитным (электромашинные и магнитные), так и с потенциальным суммированием сигналов (электронные).

Используя необходимые датчики, измерительные узлы, задающие элементы, формирующие устройства, усилители и силовые преобразователи, можно составлять замкнутые системы управления электроприводами с заданными параметрами.

Для автоматического регулирования и поддержания угловой скорости двигателя применяются следующие замкнутые системы: с отрицательной обратной связью по напряжению преобразователя, с отрицательной обратной связью по скорости двигателя, с положительной обратной связью по току нагрузки и их комбинации — с отрицательной связью по напряжению преобразователя и положительной связью по току нагрузки, с отрицательной обратной связью по скорости и положительной связью по току нагрузки.

Основной принцип регулирования и поддержания скорости в замкнутой системе электропривода с использованием тахогенератора рассмотрен в § 12-1.

На рис. 12-7 представлена структурная схема автоматического регулирования и поддержания скорости электропривода постоянного тока с жесткой отрицательной обратной связью по напряжению и положительной по току нагрузки. Обратная связь по напряжению осуществляется с датчика $ДН$, представляющего собой делитель напряжения, а связь по току — с датчика $ДТ$ (шунта). Задающее напряжение U_z , поступающее с потенциометра $ПЗ$, и напряже-

ние обратной связи $U_{д.н}$ суммируются на элементе сравнения ЭС. Так как обратная связь по напряжению отрицательная, то на вход усилителя У поступает разностный сигнал $U_{вх} = U_з - U_{д.н}$. Преобразователь электрической энергии Пр может быть любым из рассмотренных в гл. 4. Под действием сигнала управления $U_{упр}$ на выходе преобразователя образуется некоторое положительное напряжение $U_{пр}$ и двигатель начинает разгоняться. По мере увеличения напряжения $U_{пр}$ и, следовательно, угловой скорости двигателя ω сигнал обратной связи $U_{д.н}$ увеличивается. Результирующий входной сигнал $U_{вх}$ уменьшается. Так как при этом начинает действовать об-

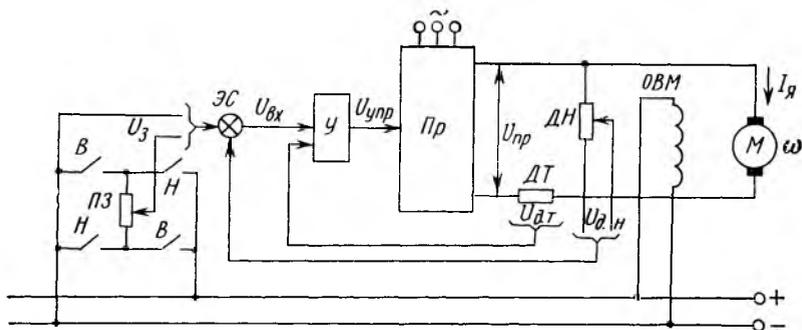


Рис. 12-7. Схема автоматического регулирования и поддержания скорости электропривода

ратная связь по току, то во время разгона электропривода требуется ограничение $U_{упр}$. При использовании успокоительных устройств и задатчика интенсивности (см. рис. 5-9), на схеме не показанных, скорость двигателя и напряжение преобразователя установятся в соответствии с заданным значением.

Если во время работы электропривода нагрузка на двигатель увеличится, то это вызовет возрастание падения напряжения в силовой цепи двигателя и снижение его угловой скорости. Сигнал обратной связи $U_{д.н}$ уменьшится пропорционально изменению напряжения на якоре, а это вызовет увеличение $U_{вх}$ усилителя. С возрастанием тока нагрузки сигнал положительной обратной связи по току $U_{д.т}$ увеличится. В результате совместного действия сигналов $U_{вх}$ и $U_{д.т}$ на выходе усилителя напряжение управления преобразователем возрастет, что вызовет увеличение напряжения $U_{пр}$ и угловой скорости двигателя ω до заданного значения.

Реверс двигателя осуществляется изменением полярности задающего напряжения с помощью контактов В и Н.

В рассмотренной схеме с отрицательной обратной связью по напряжению и положительной по току нагрузки в период разгона электропривода сигнал $U_{вх}$ значительно превышает тот же сигнал при установившемся движении. Поэтому в этот период возможно увеличение $U_{пр}$ и тока якоря $I_я$ сверх допустимого по условиям коммутации. Для ограничения пусковых токов и токов перегрузки,

а следовательно, и момента двигателя в систему вводится так называемая *токовая отсечка* — отрицательная обратная связь по току с регулированием начала ее действия.

Структурная схема автоматической системы электропривода с токовой отсечкой приведена на рис. 12-8, а. Принцип действия ее при регулировании и стабилизации скорости с отрицательной обратной связью по скорости рассмотрен в § 12-1. Рабочая угловая скорость и соответственно скорость идеального холостого хода ω_0 (рис. 12-8, б) определяются задающим напряжением U_3 . Для токов нагрузки, меньших заданного тока отсечки $I_{отс}$, схема работает так, как описано в § 12-1.

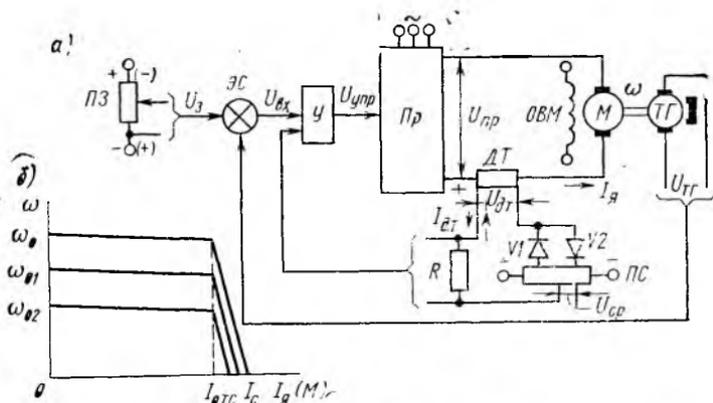


Рис. 12-8. Схема электропривода с токовой отсечкой и электромеханические характеристики

Примененная в схеме жесткая отрицательная обратная связь по току начинает действовать в тот момент, когда ток нагрузки превысит ток $I_{отс}$. В это время напряжение $U_{д.т.}$, снимаемое с датчика тока ДТ, станет больше заданного напряжения сравнения $U_{ср}$ и в цепи через VI начнет протекать ток $I_{д.т.}$. Полученный сигнал поступает на вход усилителя У и действует навстречу $U_{вх}$. Суммарный входной сигнал усилителя уменьшится, а следовательно, напряжения $U_{упр}$, $U_{пр}$ и угловая скорость двигателя ω уменьшатся. Возрастание тока в силовой цепи почти прекратится (рис. 12-8, б).

При неснимаемой перегрузке двигателя сигнал с датчика тока будет таким, что э. д. с. преобразователя, все время снижаясь, вызовет стопорение (остановку) двигателя. При неподвижном состоянии двигателя в его якорной цепи протекает ток стопорения I_c , а э. д. с. преобразователя равна произведению стопорного тока на сопротивление силовой цепи «преобразователь — двигатель».

Изменяя с помощью потенциометра ПС $U_{ср}$, можно изменить ток $I_{д.т.}$, при котором вступает в действие отрицательная обратная связь по току нагрузки, а следовательно, и предельный момент двигателя.

При реверсировании электропривода полярность сигналов управления меняется на противоположное и ток $I_{д.т}$ будет протекать через диод $V2$, проводящий в другом направлении.

§ 12-4. Системы автоматического управления с полупроводниковыми преобразователями напряжения и частоты

Как определено в § 4-3 и 4-4, электроприводы с широким диапазоном регулирования можно получить при использовании управляемых полупроводниковых преобразователей в сочетании с устройствами задания скорости и узлами схем обратных связей.

Системы электроприводов со статическими преобразователями напряжения или частоты ($УВ$ — $Д$ или $ПЧ$ — $Д$) получили широкое распространение благодаря высокой надежности в работе, меньшей массе (по сравнению с системой $Г$ — $Д$ и $МУ$ — $Д$), удобствам в обслуживании и меньшей стоимости эксплуатации. Эти системы образуются из отдельных функциональных узлов, принцип действия которых рассмотрен в § 4-3, 4-4, 11-4, 12-1, 12-2. Одна из схем электропривода небольшой мощности с тиристорным преобразователем постоянного тока представлена на рис. 12-9—12-13.

Функциональная схема электропривода представлена на рис. 12-9.

В нее входят блок регулирования $БР$, блок силовых вентилей $БСВ$, дроссели $Др1$, $Др2$, двигатель $М$ с обмоткой возбуждения $ОВМ$, тахогенератор $ТГ$, датчик скорости $ЗС$ и силовой трехфазный трансформатор $Тр$.

Блок $БР$ состоит из блока питающих напряжений $БПН$, полупроводникового усилителя $У$, системы управления тиристорами $СУ$ и системы ограничения тока $СО$.

Блок $БСВ$ предназначен для преобразования переменного напряжения в регулируемое выпрямленное напряжение. Он имеет анодную A и катодную K группы тиристоров, соединенных по трехфазной мостовой схеме, которая получает питание от вторичных обмоток силового трансформатора. Блок $БСВ$ позволяет иметь на якоре двигателя напряжение различной полярности, что необходимо для реверса электропривода. Полупроводниковый усилитель служит для усиления сигнала рассогласования между датчиком скорости и фактической угловой скоростью двигателя. Система ограничения тока осуществляет ограничение пусковых и тормозных токов и конструктивно выполнена в блоке полупроводникового усилителя. Система управления тиристорами предназначена для формирования импульсов управления анодной и катодной групп. Тиристоры управляются по согласованному способу, т. е. с линейным согласованием их углов регулирования α_1 и α_2 , по закону $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$, где α_1 и α_2 — углы регулирования катодной и анодной групп вентилей. При таком способе управления, если один из преобразователей работает в выпрямительном режиме, другой подготовлен к работе в инверторном режиме, и наоборот. Согласованный способ управления характеризуется наличием уравнительных токов в цепи постоянного тока. Для ограничения уравнительных токов в $БСВ$ служат дроссели.

Блок $БПН$ предназначен для питания цепей усилителей, обмотки возбуждения двигателя и состоит из 4 трехфазных мостовых выпрямителей и стабилизаторов напряжения. Датчик скорости состоит из трех резисторов $R1$ — $R3$ и служит для установки необходимой скорости электропривода.

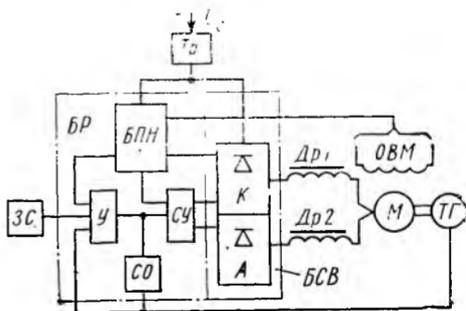


Рис. 12-9. Функциональная схема электропривода с тиристорным преобразователем

Электрическая схема электропривода представлена на рис. 12-10. Блок силовых вентилях состоит из тиристоров катодной $V1—V3$ и анодной $V4—V6$ групп. Управление тиристорами осуществляется от системы управления $СУ$, которая состоит из трех идентичных каналов. Каждый канал включает в себя блок управления $БУ$ и два формирователя импульсов $ФИ$, которые формируют импульсы управления катодной и анодной групп тиристоров, подключенных к одной фазе сети (для фазы $C—БУ1, ФИ1, ФИ4; B—БУ2, ФИ2, ФИ5; A—БУ3, ФИ3, ФИ6$). Отпирание тиристоров производится импульсами положительной полярности, подаваемыми на управляющие электроды со вторичных обмоток импульсных транс-

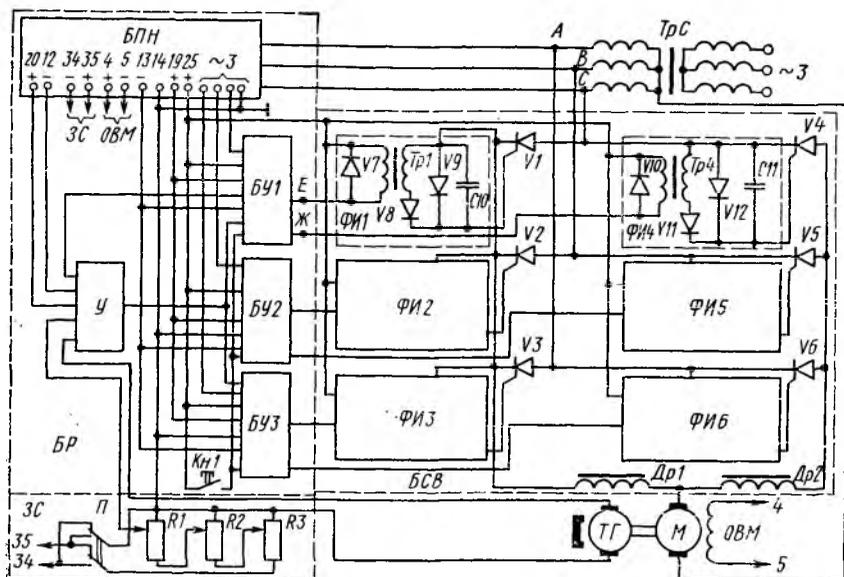


Рис. 12-10. Электрическая схема электропривода с тиристорными преобразователями

сформаторов ($Tr1, Tr4$ в первом канале управления). Первичные обмотки этих трансформаторов питаются от блока управления ($БУ1$ — в первом канале, $БУ2$ и $БУ3$ — во втором и третьем). Вентили $V8, V9, V11$ и $V12$ предназначены для защиты управляющих электродов тиристоров от отрицательных импульсов, а $V7$ и $V10$ — для защиты блока $БУ1$ от э. д. с. самоиндукции трансформаторов $Tr1$ и $Tr4$. Конденсаторы $C10$ и $C11$ шунтируют входы тиристоров по высокочастотным составляющим помех.

Система управления тиристорами работает по вертикальному методу сравнения напряжения постоянного тока, поступающего с усилителя, и развертывающего синусоидального напряжения.

Блок управления, например первого канала управления $БУ1$ (рис. 12-11), состоит из узла суммирования напряжений управления, нуля-органа (блокинг-генератора, выполненного на операционном усилителе $ОУ4$), инвертора $ОУ3$ и усилителя мощности $ОУ5$. На вход каждого канала подается от трансформатора $TrУ$, размещенного в блоке $БПН$, три сдвинутых по фазе на 120° относительно друг друга синусоидальных сигнала $U_{оп}$, амплитуда которых регулируется переменным резистором $R28$. Цепь $R30, C19$ является частью фазосдвигающей и помехозащищающей цепи и предназначена для установившегося начального угла управления тиристорами. В точке A суммируются синусоидальное напряжение $U_{оп}$ и управляющее напряжение постоянного тока $U_{упр}$, поступающее с выхода $У$.

Суммарный сигнал точки *A* подается на вход усилителя *ОУ4*. В зависимости от значения и знака $U_{упр}$ на выходе *ОУ4* изменяется ширина прямоугольного импульса и, как следствие, ширина зоны выработки импульсов управления.

В табл. 12-1 представлены диаграммы напряжений в цепях *БУ1—БУ3*.

При $U_{упр} = 0$ на выходе *ОУ4* появляется напряжение прямоугольной формы с одинаковой шириной положительной и отрицательной частей (строка III). После дифференцирования конденсатором *C22* (см. рис. 12-11) на входе усилителя

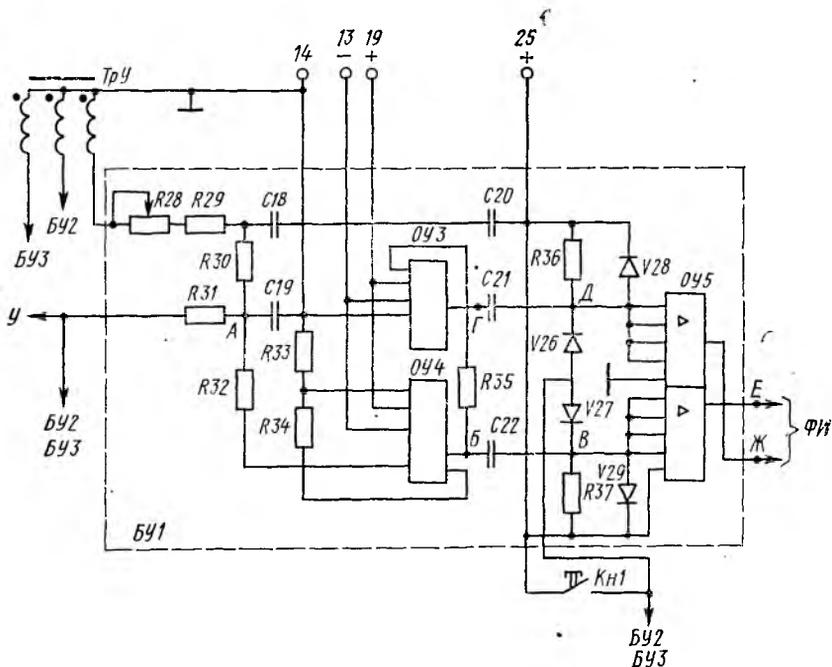


Рис. 12-11. Схема блока управления тиристорами

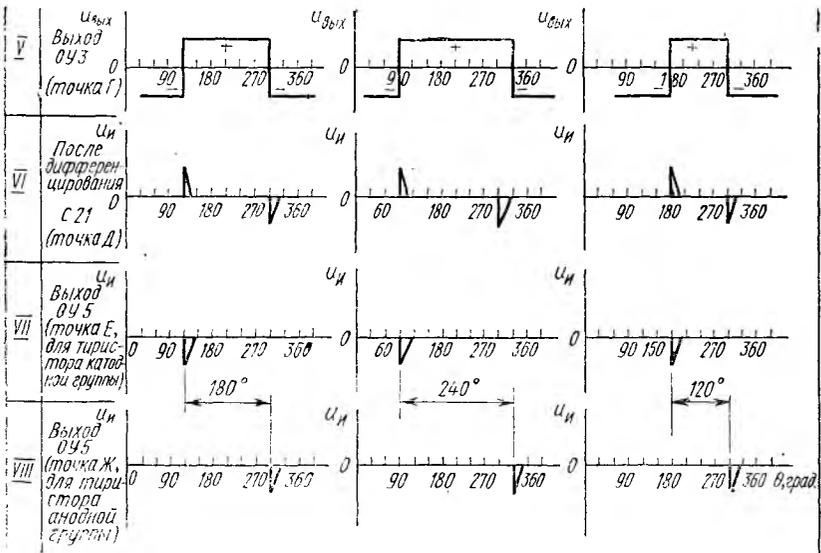
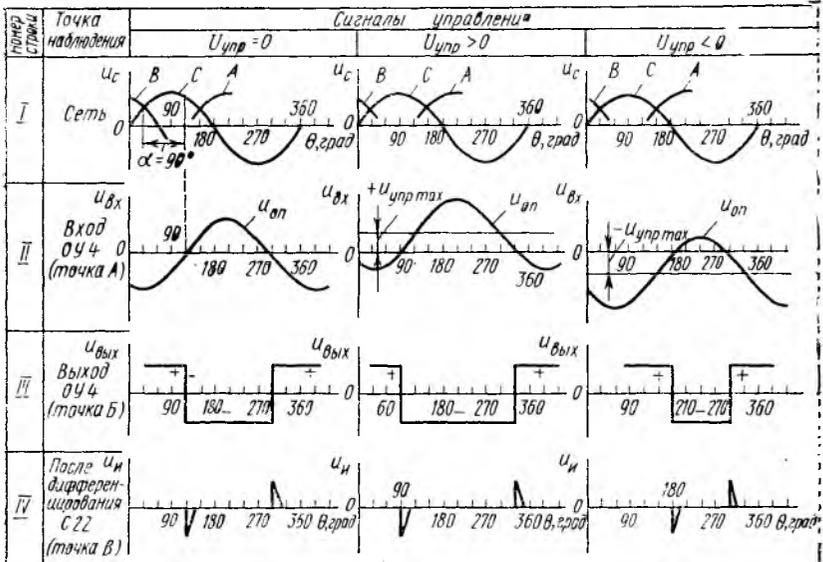
ОУ5 (точка *B*) появляются два разнополярных импульса, расположенные так, что угол отпирания тиристора *V1* катодной группы $\alpha_1 = 90^\circ$ (строки VII и I). В соответствии с выражением (4-4) напряжение на выходе выпрямителя $U_{вых} = 0$. Второй импульс управления тиристорами (строка IV) в системе не используется.

Тиристор анодной группы *V4* для соблюдения закона согласованного управления сдвигом угла отпирания относительно катодной группы на 180° получает импульс от инверторного усилителя *ОУ3*, вход которого соединен с выходом усилителя *ОУ4* через резистор *R35*.

Прямоугольное напряжение на выходе *ОУ3* (строка V) дифференцируется конденсатором *C21* и усиливается *ОУ5*. С выхода *ОУ5* импульс, сдвинутый на 180° по отношению к импульсу катодной группы (строка VIII), поступает на управляющий электрод *V4*.

При управляющем напряжении $U_{упр} > 0$ или $U_{упр} < 0$ развертывающаяся синусоида опорного напряжения $U_{оп}$ приподнимается или опускается (строка II). Импульсы управления раздвигаются или сдвигаются, что отвечает требованиям закона согласованного управления.

Нажатием на кнопку *Кн1* (рис. 12-11) через диоды *V26* и *V27* подается запирающее напряжение для отключения электропривода. Так как напряжения на выходе усилителя *ОУ5* сдвинуты по фазе на 180° , то диоды *V26* и *V27* одновре-



менно служат для развязки выхода от шунтирования при подаче запирающего напряжения.

Чтобы получить достаточную крутизну переднего фронта импульсов, резистором R_{34} усилитель $OY4$ охватывается положительной обратной связью.

Управляющее напряжение постоянного тока $U_{упр}$ создается усилителем, состоящим из двух операционных усилителей: $OY1$ и $OY2$ (рис. 12-12). Питаятся усилители от блока БПН.

На вход усилителя $OY1$ от задатчика скорости $ЗС$ и тахогенератора $ТГ$ (см. рис. 12-10) через резисторы $R11$ и $R12$ поступает разность напряжений $U_{вх} = U_{ЗС} - U_{ТГ}$. От чрезмерно больших напряжений вход усилителя шунтирован

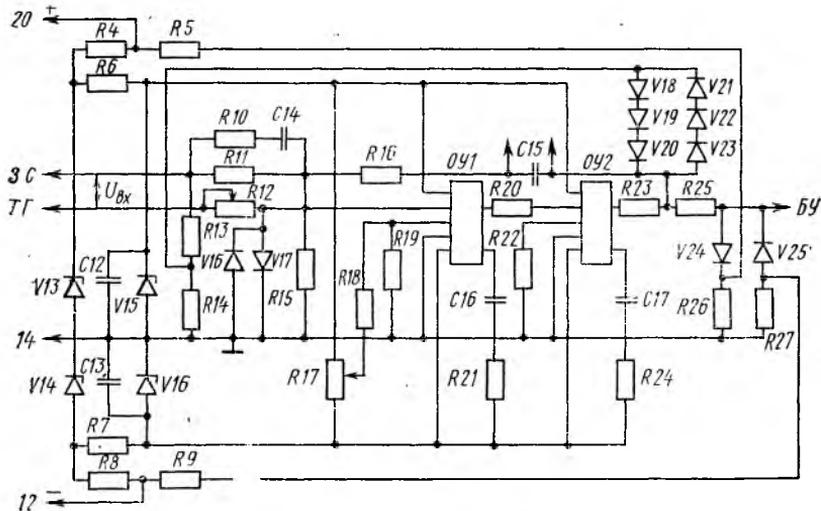


Рис. 12-12. Схема усилителя постоянного тока

защитными диодами $V16$ и $V17$. Цепи $R21-C16$ и $R24-C17$ служат для предотвращения самовозбуждения усилителей $OY1$ и $OY2$, а цепь $R16-C15$ — для коррекции и устранения автоколебаний в замкнутой системе регулирования. Усилитель $OY1$ балансируется потенциометром $R17$. Рабочая точка усилителя $OY2$ определяется сопротивлением резистора $R22$. Для улучшения качества переходных процессов резистор $R11$ шунтирован цепью $R10-C14$.

Усилитель имеет цепь упреждающего токоограничения (блок CO на рис. 12-9), состоящую из резисторов $R13$, $R14$ и диодов $V18-V23$. Резисторы $R13$ и $R14$ образуют делитель напряжения тахогенератора. К диодам $V18-V23$ приложены выходное напряжение усилителя $OY2$ и напряжение тахогенератора. При пуске и торможении электропривода разность напряжений обратных связей по току и скорости, приложенных к диодам $V18-V23$, превышает их напряжение полного открывания, поэтому одна из ветвей открывается и шунтирует вход $БУ$. У тиристоров $V1-V6$ (см. рис. 12-10) угол отпирания увеличится, а ток нагрузки уменьшится.

Диоды $V24$ и $V25$ и делители напряжения, образованные резисторами $R26$ и $R27$, $R5$ и $R9$, предназначены для ограничения выходного напряжения усилителя $OY2$ до значения, допускающего смещение управляющего импульса не более чем на 60° . Если выходное напряжение превысит напряжение полного открывания диода $V24$ или $V25$, то выход усилителя $OY2$ зашунтируется.

Схема электропривода представляет собой автоматическую замкнутую систему регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока с диапазоном $D=1:1000$; она обеспечивает необходимую жесткость механических характеристик во всем диапазоне регулирования. Система регулирования имеет отрица-

тельную обратную связь по скорости двигателя и снабжена корректирующим устройством, обеспечивающим устойчивость и требуемое качество переходных процессов. В режиме холостого хода при увеличении задающего сигнала напряжение ЗС превышает напряжение тахогенератора ТГ и результирующий сигнал открывает усилители ОУ1 и ОУ2. Усиленный сигнал рассогласования поступает на вход БУ, где перемещает по вертикали синусоиды опорных напряжений $U_{оп}$. Импульсы управления тиристорами сдвигаются так, что уменьшается угол отпирания, например анодной группы, и увеличивается выпрямленное напряжение на якоре двигателя. Угловая скорость двигателя возрастает. Напряжение тахогенератора увеличивается, уменьшая сигнал рассогласования и выпрямленное напряжение катодной группы. Двигатель притормаживается. Таким образом, фактическая угловая скорость двигателя колеблется около среднего значения, соответствующего заданному.

При возрастании нагрузки на двигатель его угловая скорость уменьшается. Сигналы управления на входе усилителя ОУ1 и выходе ОУ2 увеличиваются, и, как следствие, угол отпирания тиристорov, среднее значение напряжения и угловая скорость двигателя возрастают. Этот процесс протекает до тех пор, пока сигнал рассогласования на входе системы управления тиристорами не достигнет прежнего значения.

При уменьшении нагрузки отработка сигнала рассогласования происходит в обратном порядке.

Реверс двигателя осуществляется переключателем П (см. рис. 12-10), который изменяет знак задающего напряжения. В результате напряжения U_z и $U_{ТГ}$ складываются, что приводит к изменению знака и значения сигнала рассогласования. Одна группа тиристорov переводится в инверторный режим, и двигатель передает запасенную энергию электропривода в сеть. Происходит быстрое рекуперативное торможение двигателя до полной остановки. После этого электропривод разгоняется в противоположном направлении.

Системы управления электроприводами переменного тока со статическими преобразователями частоты (системы ПЧ—Д) выполняются на базе тиристорных преобразователей (см. § 4-4). Наибольшее распространение получили преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В таких преобразователях, как отмечалось ранее, переменное напряжение питающей сети выпрямляется и подается на автономный инвертор, преобразующий постоянное напряжение в переменное регулируемой частоты. Напряжение на выходе преобразователя регулируется изменением напряжения выпрямителя, причем число фаз и его схема выбираются независимо от схемы инвертора. Выходная частота преобразователя может регулироваться в широких пределах.

Одна из возможных схем управления и регулирования асинхронным двигателем представлена на рис. 12-13. Переменное напряжение сети через силовой трансформатор Тр1 и включенный линейный контактор КЛ поступает на управляемый тиристорный выпрямитель В. Выпрямленное напряжение на выходе выпрямителя регулируется блоком задания скорости БЗС и блоком системы управления выпрямителем БСУВ.

Для фильтрации выпрямленного напряжения служат дроссели Др1, Др2 и конденсатор C_{ϕ} . Дроссели Др1 и Др2 являются одновременно входной индуктивностью автономного инвертора АИ и предотвращают мгновенный разряд конденсаторов, находящихся в контуре коммутации инвертора. Конденсатор C_{ϕ} , выполняя роль фильтра, является также конденсатором реактивной мощности, увеличивающим общий коэффициент мощности установки.

В данной схеме автономным инвертором АИ может быть любой мостовой трехфазный инвертор с любыми способами коммутации тиристорov, в том числе представленный на рис. 4-22.

Устройством принудительной коммутации, предназначенным для запираания тиристорov, является блок БСУИ системы управления инвертором.

Замкнутая система управления построена по принципу сравнения задающего сигнала, пропорционального частоте $f_{вых}$, с сигналом обратной связи по напряжению, снимаемым с Тр2 и пропорциональным э. д. с. двигателя. Для стабилизации работы двигателя в схеме имеется обратная связь по току, выполненная трансформаторами тока ТТ1—ТТ6 и введенная в систему через промежуточный

который угол поворота вала при дискретном изменении состояний электромагнитного поля в рабочем зазоре за счет импульсного возбуждения обмоток.

Движение ротора ШД состоит из элементарных поворотов (шагов) на некоторый угол. Суммарный угол поворота пропорционален числу импульсов, а угловая скорость — их частоте. Следовательно, необходимое перемещение рабочего органа можно задать числом импульсов.

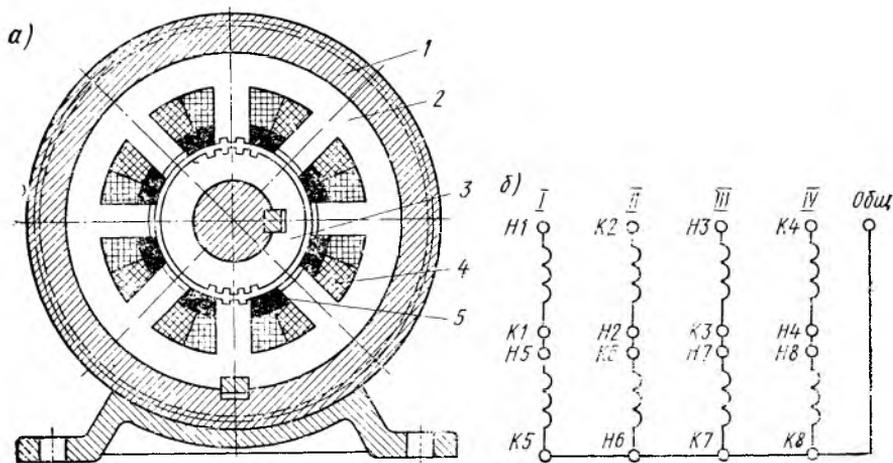


Рис. 12-14. Разрез шагового двигателя и схема соединения обмоток

Различают ШД по исполнению ротора — с активным (возбужденным) и реактивным (индукторным) роторами; по числу фаз — трех- и четырехфазные.

На рис. 12-14, а показан поперечный разрез конструкции четырехфазного ШД с реактивным ротором. В корпусе 1 запрессован шихтованный пакет статора 2, имеющий восемь полюсных выступов (у трехфазного — шесть с гребенчатыми зубцовыми зонами). На валу двигателя имеется зубчатый ротор 3, также набранный из листов электротехнической стали. Зубцы на полюсных выступах имеют тот же шаг, что и зубцы ротора, но относительно зубцов ротора зубцы смежных полюсов взаимно смещены на $1/4$ (у трехфазных — на $1/3$) зубцового деления. Катушки 4, закрепленные клиньями 5, расположены на диаметрально противоположных полюсных выступах статора и соединяются попарно последовательно: $K1-N5$, $N2-K6$, $K3-N7$, $N4-N8$, где N — начало обмотки, K — конец ее. Четыре таких обмотки соединены в звезду с выведенной общей точкой (рис. 12-14, б). Эта точка соединяется с «минусом» источника постоянного тока, а на начало обмоток фаз от электронного коммутатора в определенной последовательности подаются однополярные положительные импульсы напряжения.

При прохождении импульса тока в одной фазе статора ротор поворачивается до положения, при котором его зубцы будут соосны с зубцами статора данной фазы. Если теперь возбудить (подать импульс тока) на смежную пару диаметральных полюсных выступов статора, то ротор повернется на $\frac{1}{4}$ зубцового деления, т. е. делает элементарный шаг.

Число различных электрических состояний ШД называется *числом тактов его коммутации*. Шаг (град) перемещения ротора определяется числом n тактов коммутации и числом p пар полюсов: $\alpha = 360^\circ / (pn)$. При простом последовательном переключении фаз число тактов коммутации четырехфазного ШД равно четырем.

С помощью системы управления шаговым двигателем можно изменять шаг возбуждением различного числа смежных обмоток. Например, можно чередовать подачу импульсов тока в фазы в такой последовательности: I—I, II—II—II, III и т. д. В этом случае $n=8$, а значение шага уменьшается вдвое. Точность перемещения рабочего органа производственного механизма увеличивается.

В отличие от синхронных шаговые двигатели при подаче импульсов на обмотки входят в синхронизм сразу и имеют естественное или принудительное торможение без выбега ротора. При отключении двигателя фаза, включенная последним импульсом, остается под током, фиксируя положение ротора, т. е. двигатель «запоминает» конечную координату. Реверс двигателя осуществляется изменением последовательности возбуждения обмоток на обратную. Непрерывное движение вала ШД, т. е. установившийся режим работы, имеет место при продолжительной подаче управляющих импульсов неизменной частоты.

Шаговые двигатели характеризуются рядом параметров и режимов, важных для применения этих двигателей в системе электропривода. *Частота приемистости* — предельная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск, реверс или останов ШД без потери шага из состояния фиксации под током. Для современных индукторных ШД эта частота достигает 0,6—1 кГц, а максимальные рабочие частоты доходят до 1—2 кГц. *Стартстопный режим* — режим движения ШД без колебаний вала в конце шага, или режим непрерывного вращения вала со средней синхронной угловой скоростью. *Статический режим ШД* — режим при установившихся значениях тока в фазах. Основным параметром этого режима является синхронизирующий момент, уравнивающий момент статической нагрузки. Синхронизирующий момент, как и для обычного синхронного двигателя, зависит от угла рассогласования магнитных осей статора и ротора. *Предельный момент нагрузки* — момент, при котором возможна устойчивая работа ШД для заданной частоты управляющих импульсов. Шаговые двигатели обычно питаются от источников неизменного напряжения, поэтому их электромагнитные моменты с ростом частоты импульсов уменьшаются. *Динамический режим* — режим работы ШД при изменении частоты управляющих импульсов. Характерный параметр этого режима — *динамическая угловая ошибка*, находящаяся в пре-

делах $\pm \pi$ при возможной устойчивой работе ШД с заданной частотой управляющих импульсов.

Шаговые двигатели в системах управления электроприводами могут приводить в действие механизмы как непосредственно (силовые ШД), так и через гидроусилители, являясь в этом случае преобразователем импульсного сигнала в угловое или линейное перемещение золотника гидроусилителя.

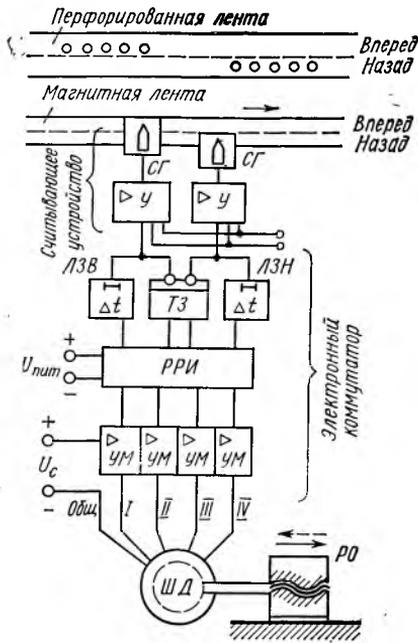


Рис. 12-15. Функциональная схема электропривода с шаговым двигателем

Вследствие дискретного действия ШД системы управления электроприводами часто выполняются разомкнутыми. На рис. 12-15 приведена функциональная схема разомкнутой системы ЧПУ с шаговым двигателем для одной координаты перемещения рабочего органа механизма.

Программа работы считывается с перфорированной или магнитной ленты с помощью считывающих головок СГ. Одна дорожка ленты служит для задания перемещения рабочего органа РО в направлении «вперед», другая — в направлении «назад». После усиления считанного сигнала в промежуточном усилителе У импульсы поступают в схему реверса, содержащую триггер знака ТЗ и линии задержки для движения

«вперед» ЛЗВ и «назад» ЛЗН. Триггер знака, получив соответствующий сигнал, подготавливает реверсивный распределитель импульсов РПИ для коммутации токов в обмотках фаз ШД в требуемой последовательности: I, II — II, III — III, IV — IV, I — движение «вперед» или I, IV — IV, III — III, II — II, I — движение «назад». Задержанные импульсы поступают на вход РПИ. Распределенные по фазам импульсы усиливаются в усилителях мощности УМ и в заданной последовательности возбуждают обмотки двигателя. Каждому импульсу программы соответствует перемещение рабочего органа РО на один шаг в необходимом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизированный электропривод/Под общей ред. *И. И. Петрова, М. М. Соколова, М. Г. Юнькова*. — М.: Энергия, 1980.
- Андреев В. П., Сабинин Ю. А.* Основы электропривода. — Л.— М.: Госэнергиздат, 1963.
- Бурдун Г. Д.* Справочник по международной системе единиц. — М.: Издательство стандартов, 1977.
- Вешневский С. Н.* Характеристики двигателей в электроприводе. — М.— Л.: Энергия, 1966.
- Зимин Е. Н., Яковлев В. И.* Автоматическое управление электроприводами. — М.: Высшая школа, 1979.
- Крановое электрооборудование: Справочник/*Алексеев Ю. В., Богословский А. П., Певзнер Е. М.* и др.; Под ред. *А. А. Рабиновича*. — М.: Энергия, 1979.
- Киблицкий В. А.* Системы управления с бесконтактными логическими элементами. — М.: Энергия, 1976.
- Мейстель А. М., Найдис В. А., Херсонский Ю. И.* Комплектные тиристорные устройства для управления асинхронными электроприводами. — М.: Энергия, 1971.
- Основы автоматизированного электропривода/*Чиликин М. Г., Соколов М. М., Терехов В. М., Шинянский А. В.* — М.: Энергия, 1974.
- Преображенский В. И.* Выбор полупроводниковых вентилях для электроприводов. — М.: Энергия, 1971.
- Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе./*Бернштейн А. Я., Гусляцкий Ю. М., Кудрявцев А. В., Сарбатов Р. С.* — М.: Энергия, 1980.
- Хализев Г. П., Серов В. И.* Расчет пусковых, тормозных и регулировочных устройств для электродвигателей. — М.: Высшая школа, 1966.
- Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С.* Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Блокирование электрическое** 180
- Величина номинальная** 22
— относительная 22
— приведенная 37, 38
- Время запаздывания** 98, 99
— переходного процесса 93
— пуска (разгона) 91, 93
— торможения 91
— цикла 121, 154
- Диаграмма нагрузочная рабочей машины** 119
— — электропривода 119
- Диапазон регулирования** 59
- Жесткость механической характеристики** 14
- Задатчик интенсивности** 100
- Инвертор автономный** 82, 222
- Каскад электрический** 83
- Коэффициент заполнения импульсов** 77
— загрузки 112
— полезного действия 8, 19
— ухудшения теплоотдачи 119
- Метод аналитический** 104
— графо-аналитический 102, 107
— средних потерь 123
— эквивалентного момента 125
— — тока 123
— эквивалентной мощности 125
- Момент активный** 7
— динамический 9
— допустимый 62
— инерции 10
— короткого замыкания 25
— критический (максимальный) 14, 41
— опрокидывающий 41
— пусковой 14
— реактивный 7
— эквивалентный 125
— электромагнитный 20, 40
- Мощность потерь** 16
— статическая 8
— эквивалентная 125
- Нагрузка электропривода статическая** 7
- Отсечка токовая** 216
- Падение угловой скорости статическое** 24
- Перегрузочная способность** 41
- Переключатель статический** 202
— импульсный (коммутатор) 76
- Постоянная времени электромеханическая** 92, 95
- Потери мощности переменные** 111
— — переходного процесса 114
— — постоянные 111
— — установившиеся 111
— — холостого хода 16
— — электрические 17
- Превышение температуры** 117
- Преобразователь частоты вентильный** 67
- Продолжительность включения** 121, 154
- Реверсирование** 28, 163
- Регулирование угловой скорости двухзонное** 66
— — — импульсное 75
— — — параметрическое 59, 62
— — — реостатное 62
— — — частотное 80
- Режим двигательный** 15
— динамического торможения 17, 28
— идеального холостого хода 17
— короткого замыкания двигателя 17
— кратковременный 121
— перемежающийся 121
— повторно-кратковременный 121
— продолжительный 120
— рекуперативного торможения 16, 27
— старт-стопный 225
— тормозной 16
— торможения противовключением 16, 28

Связь обратная по напряжению 214
— — по току 215
— — по скорости 86
Синтез логический 192
Система регулирования (управления)
замкнутая 206
— — разомкнутая 157
— — комбинированная 158
Скольжение двигателя 39
— — динамического торможения 51
— критическое 40
Скорость угловая идеального холостого хода 14, 23
— — подсинхронная 55
Сопrotивление номинальное 20, 38
— пусковое 102, 106
— регулировочное 105
— секции пусковой 102
— ступени пусковой 102
— тормозное 105
Способ регулирования параметрический 59
— — широтно-импульсный 77
— — частотно-импульсный 77
Схема электрическая 160

Температура установившаяся 117
Ток короткого замыкания 25
— намагничивающий 51
— переключения 103
— эквивалентный 124
Торможение динамическое 17, 28, 35, 50
— противovключением 49, 16, 28, 34
— рекуперативное 16, 27, 49

Управление электроприводом автоматическое 157
— — бесконтактное 190
— — релейно-контакторное 159
— — ручное 157
Уравнение движения электропривода 12
Устойчивость скорости 60
Устройство передаточное 6
— формирующее 210

Формирование переходного процесса 101
Формула Клосса 41
Функция логическая 191

Характеристика двигательного режима 16
— динамическая 98
— искусственная 14
— механическая 13, 23, 40
— реостатная 24
— статическая 24
— тормозных режимов 16
— универсальная 31
— экскаваторная 101
— электромеханическая 23, 40

Шунтирование якоря 74

Электропривод групповой 4
— — многодвигательный 4
— — одиночный 4
Экономичность регулирования 60*

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>стр.</i>
Предисловие	3
Введение	4
<i>Раздел первый. Основы электропривода</i>	<i>6</i>
<i>Глава 1. Механика электропривода</i>	<i>6</i>
§ 1-1. Статические и динамические моменты в электроприводе и введение их к одной оси вращения	6
§ 1-2. Уравнение движения электропривода	11
§ 1-3. Понятие о механических характеристиках	12
<i>Глава 2. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока</i>	<i>15</i>
§ 2-1. Основные режимы работы двигателей в системе электропривода	15
§ 2-2. Основные понятия и соотношения для двигателей	17
§ 2-3. Относительные величины в электроприводе	21
§ 2-4. Механические и электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения в двигательном режиме	23
§ 2-5. Механические и электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения в тормозных режимах	27
§ 2-6. Механические и электромеханические характеристики двигателей последовательного и смешанного возбуждения	31
<i>Глава 3. Электромеханические свойства двигателей переменного тока</i>	<i>36</i>
§ 3-1. Основные понятия и соотношения для асинхронных двигателей	36
§ 3-2. Механические характеристики асинхронных двигателей в двигательном режиме	40
§ 3-3. Механические характеристики асинхронных двигателей в тормозных режимах	49
§ 3-4. Механические и угловая характеристики синхронного двигателя. Регулирование возбуждения и реактивной мощности	54
<i>Глава 4. Регулирование скорости электроприводов</i>	<i>58</i>
§ 4-1. Общие понятия о регулировании скорости	58
§ 4-2. Допустимая нагрузка на двигатели при работе на регулировочных характеристиках	60
§ 4-3. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока изменением параметров двигателя	62
§ 4-4. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с помощью преобразователей напряжения и специальных схем	64
§ 4-5. Регулирование скорости электроприводов переменного тока	78
§ 4-6. Синхронное вращение электроприводов	89
<i>Глава 5. Переходные процессы в электроприводах</i>	<i>90</i>
§ 5-1. Переходные процессы при линейных и нелинейных характеристиках двигателя и механизма	90
§ 5-2. Переходные процессы в системах электропривода с преобразовательными устройствами	96
<i>Глава 6. Расчет лусковых, тормозных и регулировочных сопротивлений</i>	<i>102</i>
§ 6-1. Расчет сопротивлений для двигателей постоянного тока	102
§ 6-2. Расчет сопротивлений в роторной цепи асинхронного двигателя	106
§ 6-3. Расчет сопротивлений в цепи статора асинхронного двигателя	109
<i>Глава 7. Потери мощности и энергии в электроприводах</i>	<i>111</i>
§ 7-1. Потери в установившихся режимах	111
§ 7-2. Потери при переходных процессах	113

	<i>стр.</i>
Глава 8. Выбор двигателей	116
§ 8-1. Нагревание и охлаждение двигателей	116
§ 8-2. Нагрузочные диаграммы и режимы работы двигателей	119
§ 8-3. Расчет и выбор мощности двигателей при различных режимах работы	122
§ 8-4. Допустимая частота рабочих циклов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	130
§ 8-5. Особенности выбора двигателя по мощности регулируемого электропривода	131
§ 8-6. Выбор системы электропривода по технико-экономическим показателям	133
Раздел второй. Управление электроприводом	137
Глава 9. Электромеханические аппараты и устройства управления электроприводом	137
§ 9-1. Общие сведения	137
§ 9-2. Выключатели и предохранители	138
§ 9-3. Контактные реле	140
§ 9-4. Командные аппараты и датчики	147
§ 9-5. Реостаты, тормозные электромагниты	151
§ 9-6. Выбор силовых резисторов и аппаратов управления	153
Глава 10. Релейно-контакторное управление электроприводом	157
§ 10-1. Основные положения и понятия	157
§ 10-2. Принципы управления электроприводами. Выполнение электрических схем	159
§ 10-3. Типовые узлы схем включения двигателей и выведения резисторов	162
§ 10-4. Типовые узлы схем управления в функции различных величин	169
§ 10-5. Защита в схемах управления электроприводами	175
§ 10-6. Управление асинхронными двигателями	181
§ 10-7. Управление синхронными двигателями	184
§ 10-8. Управление двигателями постоянного тока	187
Глава 11. Управление электроприводом с применением бесконтактных аппаратов	190
§ 11-1. Принцип бесконтактного управления	190
§ 11-2. Логические элементы, применяемые для управления электроприводом	192
§ 11-3. Узлы схем для управления электроприводом с применением логических элементов	197
§ 11-4. Узлы схем для управления электроприводом с применением тиристоров	201
Глава 12. Управление электроприводом с помощью непрерывно действующих (замкнутых) систем	206
§ 12-1. Принцип построения замкнутых систем управления электроприводами	206
§ 12-2. Элементы и устройства автоматического управления электроприводами в замкнутых системах	208
§ 12-3. Системы автоматического регулирования скорости и момента электропривода	214
§ 12-4. Системы автоматического управления с полупроводниковыми преобразователями напряжения и частоты	217
§ 12-5. Дискретные электроприводы с шаговыми двигателями	223
Список литературы	227
Предметный указатель	228
	231

Василий Матвеевич Васин
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Заведующая редакцией Н. И. Хрусталева. Редактор С. М. Ово-
дова. Художник А. А. Акимов. Художественный редактор
В. И. Мешалкин. Технический редактор Э. М. Чижевский.
Корректор Г. И. Кострикова

ИБ № 4342

Изд. № СТД-387 Сдано в набор 22.12.83. Подп. в печать 23.03.84. Т-05071.
Формат 60×90/16. Бум. тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высо-
кая. Объем 14,5 усл. печ. л. Усл. кр.-отг. 14,5. Уч.-изд. л. 15,67.

Тираж 56 000 экз. Зак. № 2166. Цена 80 коп.
Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4,
Неглинная ул., 29/14

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7