

Министерство образования Российской Федерации

Пензенский государственный университет

Ю.Е.Жесткова, В.С. Савоськин

Электромеханика

Методическое пособие для студентов вузов

Пенза 2003

УДК 681.3 (0.75)

Жесткова Ю.Е., Савоськин В.С. Электромеханика. Методическое пособие для студентов вузов. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. — с., ил., табл.

Рассматриваются основы теории электрических машин и электропривода, проведены электромеханические и рабочие характеристики электродвигателей постоянного и переменного тока, внешние и нагрузочные характеристики генераторов постоянного и переменного тока, пусковые и тормозные режимы, способы регулирования частоты вращения; переходные процессы в электродвигателе, а также сведения о разомкнутых и замкнутых системах.

Методическое пособие подготовлено на кафедре "Автоматизированные электроэнергетические системы" и предназначены для студентов специальности 100200 "Электроэнергетические системы и сети".

Рецензент:

А.С. Бахарев, зам. Ген. Директора ОАО «Пензаэнерго»

Издательство Пензенского государственного университета, 2003

Глава 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Вся современная практическая электротехника основана на использовании явления электромагнитной индукции. Сущность его, как известно состоит в том, что при всяком изменении магнитного потока Φ в охватывающем контуре индуцируется Э.Д.С. – E .

Явление электромагнитной индукции лежит в основе принципа действия трансформатора, представляющего собой электромагнитное устройство и имеющего две или более обмоток, размещённых на сердечнике из ферромагнитного материала.

Трансформатор, как преобразователь электрической энергии переменного тока одного уровня напряжения в энергию переменного тока другого уровня напряжения, находит широкое применение в различных электротехнических установках. При помощи трансформаторов осуществляется повышение и понижение напряжения, преобразование токов и числа фаз и – в некоторых случаях – преобразование частоты f переменного тока. Трансформаторы используются при передаче и распределении электрической энергии в энергетических установках, а также для разнообразных преобразований переменного тока в устройствах связи, радио, автоматики и т.п. В соответствии с этим номинальные мощности и напряжения трансформаторов, изготавливаемых на заводах электротехнической промышленности, колеблются в очень широких пределах от долей вольт-ампера (ВА) и вольта (В) до сотен тысяч киловольт-ампер (кВА) и сотен киловольт (кВ). В зависимости от мощности, напряжения и назначения меняется также конструкция трансформаторов.

1.1 Устройство и принцип действия трансформаторов

Современный трансформатор (особенно мощный) представляет собой сложное устройство, состоящее из большого числа различных конструктивных элементов, каждый из которых в той или иной мере оказывает влияние на его работу. Основными элементами трансформатора являются магнитопровод и обмотки.

Магнитопровод представляет собой магнитную цепь трансформатора, по которой замыкается магнитный поток [Φ], и является конструктивной и механической основой трансформатора. Он выполнен, из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Для создания магнитопровода в настоящее время применяется холоднокатаная сталь марок 3405, 3406, т.е. сталь с определенной ориентацией зерен, допускающая индукцию до 1,7 Тл. В зависимости от формы магнитопровода различают трансформаторы броневые, стержневые и тороидальные типов (рисунок 1.1. а, б, в соответственно).

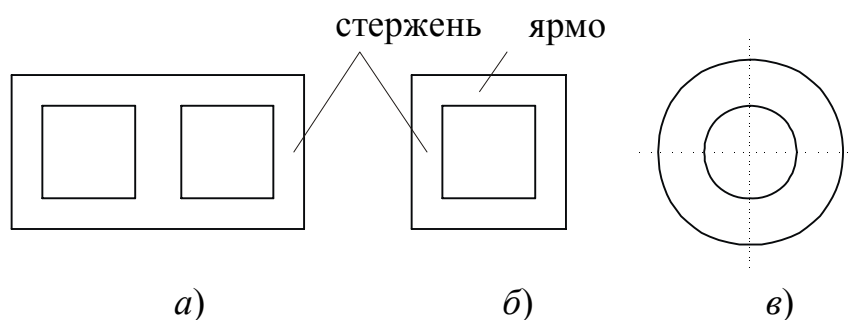


Рисунок 1.1 Магнитопроводы трансформаторов:

a – броневое типа; *б* – стержневого типа; *в* – тороидального типа.

В магнитопроводе поток Φ вызывает вихревые токи, которые разогревают трансформатор. Для уменьшения вихревых токов, т.е. потерь мощности, отдельные листы покрываются изоляционным лаком толщиной слоя 0,01 мм. Применение листовой стали и изоляционного лака, позволяет значительно уменьшить сечение магнитопровода за счет большой допустимой магнитной индукции, уменьшить диаметр витков обмотки, уменьшить массу и габариты трансформаторов.

Та часть магнитопровода, на которую насаживаются обмотки (вертикальные участки), называются стержнем, а горизонтальные участки образуют ярмо).

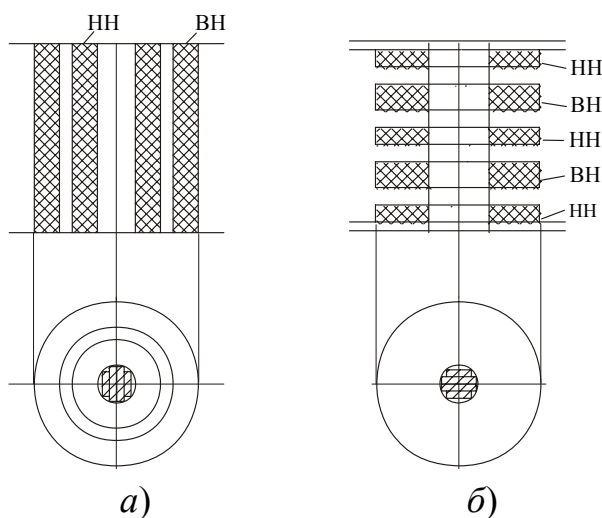


Рисунок 1.2

Обмотки трансформатора могут быть концентрическими и чередующимися. В первом случае обмотки высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений выполняют в виде цилиндров и располагают на стержне концентрически одна относительно другой (рисунок 1.2 *a*), причем обмотка НН размещается внутри обмотки ВН. Во втором случае обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров с одинаковыми диаметрами и располагаются на стержне одна над другой (рисунок 1.2 *б*). Такая обмотка применяется для

специальных электропечных трансформаторов и для сухих трансформаторов, так как обеспечивается лучшее охлаждение обмоток.

Элементы конструкции трансформатора, по которым протекает электрический ток (обмотки, отводы и др.) и которые соединены между собой по определенной схеме, образуют электрическую цепь, изолированную относительно заземленных частей конструкции трансформатора.

Активная часть трансформатора помещается в бак, служащий резервуаром для масла или другой изоляционной среды. Бак может иметь нижний или верхний разъем в зависимости от габарита трансформатора. Основные части бака: у одних трансформаторов – стенки, дно и крышка, а у других, с массой активной части более 25 тыс. – поддон и съемная часть (колокол). Колокол используют для установки вводов, выхлопной трубы, крепления расширителя, приставных устройств РПУ и установки измерительных приборов.

Магнитопровод силовых трансформаторов всех габаритов изготавливается из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали. Удельные потери мощности при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц достигают 0,4 – 1,4 Вт/кг.

Обмотки. В зависимости от габарита трансформаторов применяют различные по конструкции обмотки. Для обмотки мощных трансформаторов, как правило, применяют обмоточный провод прямоугольного сечения с бумажной изоляцией.

В трансформаторах больших мощностей применяются обмотки следующих типов:

непрерывные – для трансформаторов 110 кВ в качестве обмоток ВН, СН, НН, состоящие из ряда секций (катушек) с каналами между ними; в каждой секции по несколько витков, намотанных в виде спирали один на другой;

переплетенные – для трансформаторов 500 кВ и выше. Конструкция такой обмотки лучше обеспечивает требуемый уровень импульсной прочности изоляции;

винтовые – для обмоток НН, состоящие из ряда витков, наматываемых по винтовой линии, с масляными каналами между рядами. Каждый виток имеет несколько параллельных проводов, укладываемых вплотную в радиальном направлении.

Схемы соединения отличаются большим разнообразием (рис.1.3). Применение той или иной схемы зависит от диапазона регулирования и номинальной мощности трансформатора. Например, при одном и том же диапазоне изменения коэффициента трансформации $\pm 5\%$ при номинальной мощности примерно до 10 МВ·А применяют более простую схему с ответвлениями на середине высоты обмотки по рисунку 1.3 в, а при большей мощности – схему по рисунку 1.3 г. Это объясняется стремлением уменьшить осевые силы при КЗ, которые зависят от степени неравномерности обмотки.

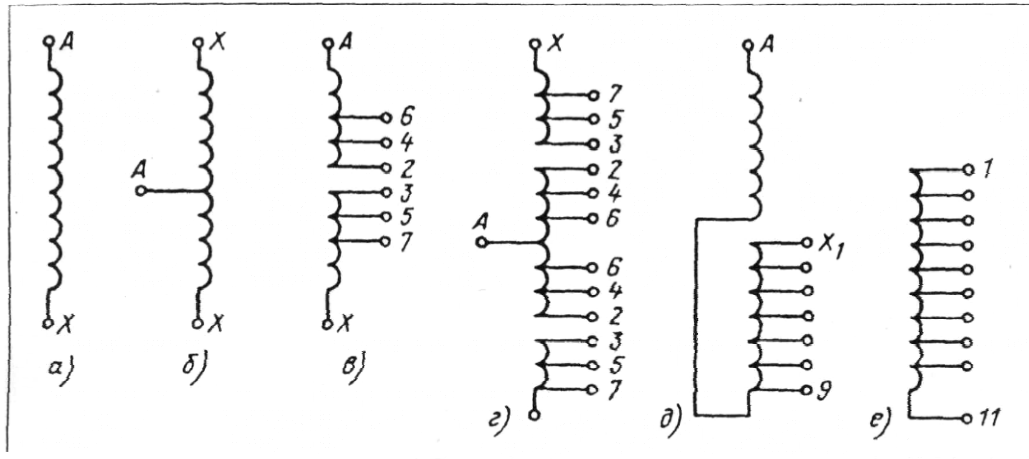


Рисунок 1.3

Принцип действия трансформатора. Принцип действия трансформатора основан на использовании явления взаимной индукции. Обмотку, к которой подводится энергия от источника (от энергосистемы), называют первичной с числом витков W_1 , а к которой подключается потребитель энергии, называют вторичной с числом витков W_2 . Пусть к обмотке W_1 , как показано на рисунке 1.4, подведено напряжение $U_1 = U_m \sin \omega t$. Под действием этого напряжения возникает в обмотке ток i_1 , намагничивающая сила $i_1 W_1$ которого создает в магнитопроводе поток Φ_1 . Этот поток большей своей частью, называемой рабочим потоком Φ_{p1} , замыкается по магнитопроводу и сцепляется со всеми витками обеих обмоток. Меньшая часть потока Φ_1 составляет поток рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ и замыкается в основном по воздуху.

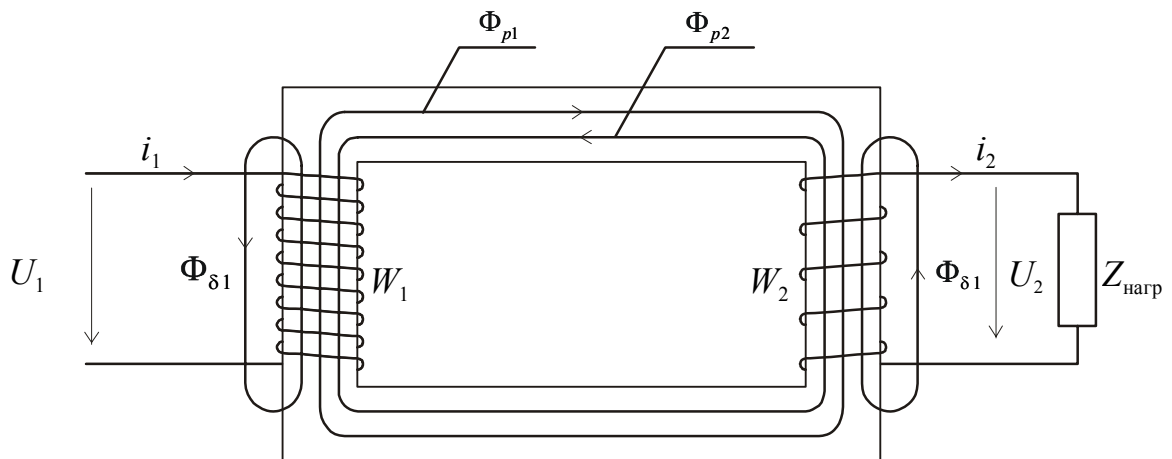


Рисунок 1.4

В первичной обмотке наводится ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_{p1}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}. \quad (1.1)$$

Во вторичной обмотке этим же потоком наводится ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi_{p1}}{dt}. \quad (1.2)$$

Здесь $d\Psi$ – изменение потокосцепления; L_1 – индуктивность первичной обмотки.

Если к вторичной обмотке подключить потребитель с сопротивлением $Z_{\text{нагр}}$, то в ней возникнет ток i_2 , и его намагничивающая сила $i_2 W_2$ создаст свой магнитный поток Φ_2 , направленный встречному потоку Φ_1 , т.е. оказывающий размагничивающее действие. В магнитопроводе образуется результирующий поток.

$$\Phi_0 = \Phi_{p1} - \Phi_{p2} = M \left(\frac{I_1}{W_2} - \frac{I_2}{W_1} \right) = \text{const}. \quad (1.3)$$

где M – индуктивность взаимной индукции.

Магнитный поток Φ_0 равен потоку Φ_{p1} в магнитопроводе при режиме холостого хода, т.е. при разомкнутом состоянии вторичной обмотки. При работе трансформатора с нагрузкой $z_{\text{нагр}}$ размагничивающее действие тока i_2 компенсируется намагничивающим действием тока i_1 , поэтому всегда существует баланс намагничивающих сил:

$$i_1 W_1 = i_0 W_1 + (-i_2 W_2). \quad (1.4)$$

где i_0 – ток первичной обмотки в режиме холостого хода (ток намагничивания).

Поток Φ_0 называется основным (рабочим) потоком и связан с намагничивающей силой $i_0 W_1$ нелинейной зависимостью. Из-за потерь мощности в стали (магнитопроводе), поток Φ_0 отстает от тока i_0 по фазе на угол α магнитного запаздывания.

Помимо потока Φ_0 действуют, как было указано выше, потоки рассеяния $\Phi_{\delta 1}$ и $\Phi_{\delta 2}$, которые замыкаются в основном по воздуху. Эти потоки сцепляются только с витками собственных обмоток. Несмотря на незначительность по величине (не более 10% от Φ) они оказывают заметное влияние на показатели и характеристики трансформатора.

Напряжение первичной обмотки уравнивается выражением

$$U_1 = i_1 R_1 + \frac{L_{\delta 1} di_1}{dt} + \frac{W_1 d\Phi_0}{dt}. \quad (1.5)$$

где $\frac{W_1 d\Phi_0}{dt} = -e_{L1}$ – ЭДС самоиндукции первичной обмотки;

$\frac{L_{\delta 1} di_1}{dt} = -e_{\delta 1}$ – ЭДС индукции рассеяния.

ЭДС вторичной обмотки

$$e_2 = i_1 R_2 + \frac{L_{\delta 2} di_2}{dt} + U_2 \quad (1.6)$$

где U_2 – напряжение на нагрузке $z_{\text{нагр}}$.

Если поток $\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t$, то ЭДС $e_{L1} = e_1$ и $e_{L2} = e_2$ соответственно будут:

$$\begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\Psi}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f_1 W_1 \sin(\omega t - \pi/2), \\ e_2 &= -\frac{d\Psi}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f_1 W_2 \sin(\omega t - \pi/2). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Действующие значения этих ЭДС соответственно равны:

$$E_1 = 2\pi f_1 W_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 W_1 f \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_m.$$

Отношение ЭДС $E_1/E_2 = W_1/W_2 = k$ – называется коэффициентом трансформации и показывает, во сколько раз ЭДС E_1 больше (или меньше) ЭДС E_2 .

Полная система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в трансформаторе, записывается так:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= i_1 R_1 + (-e_1) + \frac{L_{\sigma 1} di_1}{dt} \\ U_2 &= e_2 - i_2 R_2 - \frac{L_{\sigma 2} di_2}{dt} \\ i_0 W_1 &= i_1 W_1 + (-i_2 W_2) \end{aligned} \right\}. \quad (1.8)$$

При синусоидальном напряжении U_1 поток $\Phi(t)$, ЭДС e_1 и e_2 , токи в обмотках i_1 и i_2 получаются также синусоидальными функциями времени. Несинусоидальным будет только ток намагничивания i_0 . При замене его эквивалентным синусоидальным током систему уравнений можно записать в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1 \\ \underline{U}_2 &= -\underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 (R_2 + jx_2) \\ \underline{I}_0 W_1 &= \underline{I}_1 W_1 - \underline{I}_2 W_2 \end{aligned} \right\} (1.9)$$

В трансформаторе происходит преобразование только напряжений и токов, а мощность остается практически постоянной ($S_1 \approx S_2$). Следовательно, при уменьшении E_2 в k раз относительно E_1 ток I_2 возрастет во столько же раз, т.е. $k = I_2/I_1$.

Итак, при подключении первичной обмотки к источнику энергии (к сети энергосистемы) с напряжением U_1 во вторичной обмотке индуцируется ЭДС E_2 и она становится источником питания. К ней можно присоединить различные потребители энергии (электродвигатели, ТЭНы, осветительные приборы) с рабочим напряжением U_2 .

1.2 Векторная диаграмма трансформатора

Для лучшего уяснения электромагнитных процессов в трансформаторе комплексную систему уравнений (1.9) трансформатора можно изобразить наглядно графически в виде векторной диаграммы. Так как численные значения первичных и вторичных напряжений и токов обычно сильно отличаются друг от друга, то изображение их на векторной диаграмме в одном масштабе не представляется возможным. Эти затруднения устраняются тем, что параметры вторичной обмотки (U_2 , I_2 , R_2 , X_2) приводятся к первичному напряжению U_1 .

Если третье уравнение системы (1.9) почленно разделить на W_1 , то получим

$$I_0 = I_1 - I_2 \frac{W_2}{W_1} = I_1 - I_2', \quad (1.10)$$

где $I_2' = \frac{I_2}{k}$ – приведенный ток вторичной обмотки к первичному напряжению; это есть часть тока первичной обмотки, намагничивающая сила которой компенсируется размагничивающей силой вторичной обмотки. Учитывая, что $S_1 = S_2$, т.е. $U_1 I_1 = U_2 I_2 = U_2' I_2'$, находим: $U_2' = k U_2 = U_1$; $E_2' = k E_2 = E_1$. Так как при приведении должны быть соблюдены условия $I_2^2 R_2 = (I_2')^2 R_2'$ и $\frac{X_2}{R_2} = \frac{X_2'}{R_2'}$, следует, что

$$R_2' = k^2 R_2, \quad X_2' = k^2 X_2 \text{ и } Z_2' = k^2 Z_2.$$

С учетом приведения система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = \underline{I}_1 (R_1 + jx_1) - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 &= -\underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 + \underline{I}'_0 \underline{Z}'_0 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 (R'_2 + jx'_2) \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 - \underline{I}'_2 \end{aligned} \right\}. \quad (1.11)$$

Векторная диаграмма, соответствующая уравнениям (1.11) представлена на рисунке 1.5 для случаев резистивно-индуктивной нагрузки $\underline{Z}_{\text{нагр}} = \underline{U}'_2 / \underline{I}'_2$.

Построение векторной диаграммы (рис. 1.5) начинается с вектора магнитного потока Φ_m , так как он пронизывает витки обеих обмоток и принимается в качестве базового вектора.

В произвольном масштабе в горизонтальном направлении откладывается Φ_m , затем под углом α в опережающем направлении в выбранном масштабе откладываем вектор тока намагничивания I_0 .

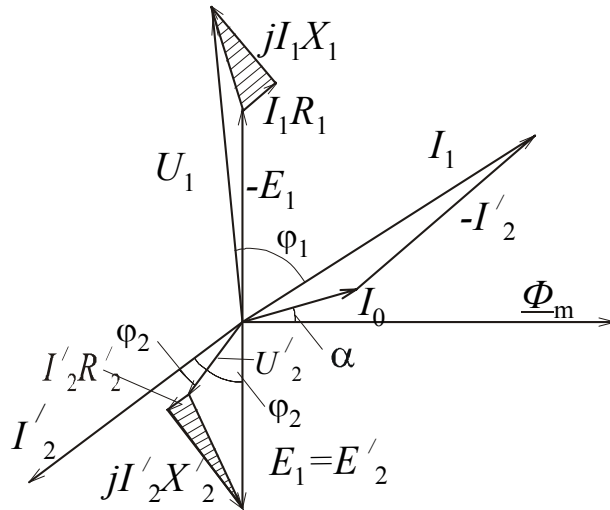


Рисунок 1.5

После под углом 90° в отстающем направлении о вектора Φ_m строится вектор $E = E'_2$ и под углом Ψ_2 от E_1 в отстающем направлении вектор тока I'_2 . Величина угла Ψ_2 определяется по форме:

$$\Psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X'_2 + X'_{\text{нагр}}}{X'_2 + X'_{\text{нагр}}}.$$

Затем под углом $\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X'_{\text{нагр}}}{R'_{\text{нагр}}}$ в опережающем от тока I'_2 направ-

лении откладывается вектор U'_2 . К концу вектора U'_2 параллельно вектору I'_2 прибавляется вектор падения напряжения на резисторе R'_2 , а перпендикулярно к току I'_2 вектор $I'_2 X'_2$. Заштрихованный треугольник является треугольником падения напряжения во вторичной обмотке трансформатора. К концу вектора E_1 , в верхней половине диаграммы, строится треугольник падения напряжения в первичной обмотке трансформатора.

1.3 Электрическая схема замещения трансформатора

При исследовании электромагнитных процессов в магнитосвязанных цепях с большим удобством для расчетов можно использовать метод электрических схем, при котором магнитные связи между цепями заменяются электрическими.

Первичные и вторичные токи, напряжения и их величины имеют одинаковые значения, если у первичной и вторичной обмоток количество витков одинаково. Рассмотрим поэтому вместо реального трансформатора эквивалентный ему так называемый приведенный трансформатор, первичные и вторичные обмотки которого имеют одинаковое число витков.

Представим себе, что реальная вторичная обмотка с числом витков W_2 заменена воображаемой, приведенной обмоткой с числом витков $W_2' = W_1$.

При этом число витков вторичной обмотки изменяется в $k = \frac{W_2'}{W_2} = \frac{W_1}{W_2}$ раз.

Величина k называется коэффициентом приведения или трансформации.

Другие приведенные параметры трансформатора представлены в предыдущем параграфе.

Если обозначить приведенное сопротивление нагрузки трансформатора через $z_{\text{нагр}}$, то $U_2' = I_2' Z'_{\text{нагр}}$.

Решая совместно систему (1.11) относительно I_1 , получаем

$$\underline{U}_1 = I_1 \left(\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_0 (\underline{Z}_2' + \underline{Z}'_{\text{нагр}})}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2' + \underline{Z}'_{\text{нагр}}} \right) = \underline{I}_1 \underline{Z}_{\text{экв}}. \quad (1.12)$$

Структура выражения в скобках показывает, что эквивалентное сопротивление $\underline{Z}_{\text{экв}}$ можно рассматривать как сопротивление цепи, схема которой полностью удовлетворяет исходной системе (1.11) (см. рис. 1.6).

Контур A12X – отражает уравнение 1 в системе, AX21 – уравнение 2, узловые точки 1 и 2 – уравнение 3. Следовательно, все связи между потоками и напряжениями можно рассчитать при помощи этой схемы, называемой схемой замещения трансформатора.

В отличие от реального трансформатора в схеме замещения цепи первичной и вторичной обмоток в точках 1 и 2 электрически соединены между собой, однако это не может привести к каким-либо недоразумениям, поскольку схемы замещения используются только для расчетов количественных связей между токами и напряжениями, существующих при нормальных условиях его работы.

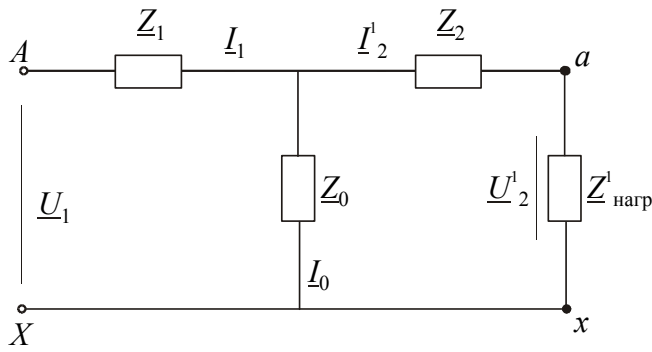


Рисунок 1.6

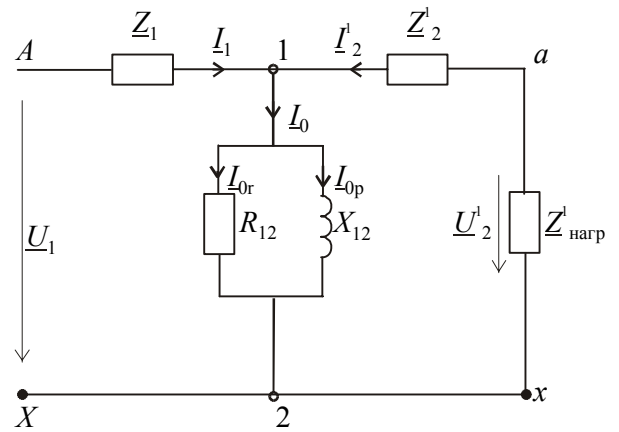


Рисунок 1.7

Система уравнений (1.11), содержащая только величину Z_0 зависящую от насыщения, более удобна для практических расчетов, чем система (1.9). Это легко пояснить при помощи схемы замещения (рис. 1.6). В ней сопротивления Z_1 и Z_2' являются постоянными величинами, а сопротивление $Z'_{нагр}$ задается при $U_1 = const$. В этом случае его ЭДС E_1 , равная напряжению между узловыми точками 1 и 2: $-E_1 = U_1 - I_1 Z_1$ колеблется в небольших пределах даже при значительных изменениях тока I_1 , поскольку $U_1 \gg I_1 Z_1$. Следовательно, насыщение магнитной системы меняется также мало и можно приблизительно принять $Z_0 = const$.

Сопротивление Z_0 оказывает влияние лишь на ток намагничивания I_0 , который при нагрузках, близких к номинальной, составляет лишь величину (3...9% от I_1 в зависимости от мощности трансформатора).

Схема замещения при $Z_0 = R_0 + jX_0 = const$ правильно учитывает изменения магнитных потерь при колебаниях нагрузки. Магнитные потери $I_0^2 R_0 = \frac{E_1^2 R_0}{Z_0^2}$, следовательно, при $R_0 = const$ и $Z_0 = const$ они изменяются пропорционально квадрату ЭДС или, что то же, квадрату индукции в магнитной системе.

Схему замещения трансформатора можно несколько видоизменить и представить так, как показано на рис. 1.7. В этом случае возможно отдельное определение резистивной I_{0r} и реактивной I_{0p} составляющих намагничивающего тока I_0 :

$$I_{0r} = \frac{E_1}{R_{12}}; \quad I_{0p} = \frac{E_1}{jX_{12}}$$

$$\text{Из сопоставления двух схем следует: } R_{12} = \frac{Z_0^2}{R_0}; \quad X_{12} = \frac{Z_0^2}{X_0}$$

1.4 Трехфазные трансформаторы

В трехфазной системе переменного тока применяют два типа трехфазных трансформаторов: 1) однофазные, включаемые в каждую фазу отдельно (рис.унок 1.8); 2) трехфазные, имеющие общую для всех фаз магнитную систему. Один из наиболее распространенных типов магнитных систем показан на рис. 1.9. Этот тип магнитных систем, предложенный в 1891 году М.О. Дольво-Добровольским, получил наибольшее распространение. Свойственная ему небольшая магнитная несимметрия фаз, не имеет практического значения. Полную магнитную симметрию можно получить, если стержни магнитопровода расположить по вершинам трехлучевой звезды, как показано на рисунке 1.10. Но при этом усложняется технология изготовления магнитопровода.

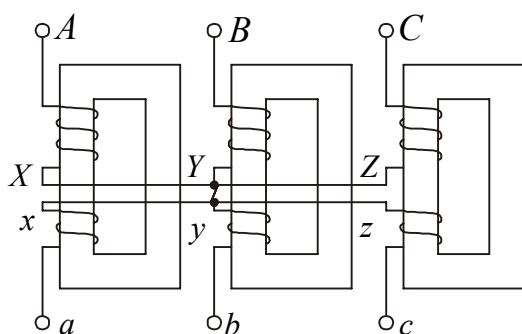


Рисунок 1.8

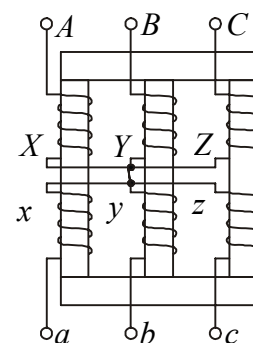


Рисунок 1.9

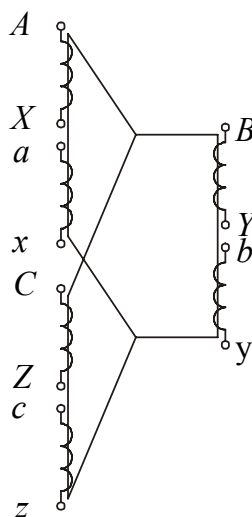


Рисунок 1.10

Рассмотренные выше дифференциальные и комплексные уравнения однофазного трансформатора, его векторные диаграммы и схема замещения можно полностью использовать для исследования работы каждой фазы трехфазной трансформаторной группы, представленной на рис. 1.6.

С достаточной точностью, пренебрегая магнитной несимметрией фаз, можно положить:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= L_{11} \frac{di_A}{dt} + L_{12} \frac{di_a}{dt} + i_A R_A \\ U_a &= -L_{22} \frac{di_a}{dt} - L_{21} \frac{di_A}{dt} - i_a R_a \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Для других фаз уравнения совершенно аналогичны.

В силу некоторой несимметрии токи намагничивания в обмотках крайних стержней (рис. 1.9) обычно несколько больше, чем в обмотке среднего стержня.

Для правильного соединения обмоток необходимо разметить начала и концы фаз высшего напряжения (A, B, C и X, Y, Z) и низшего напряжения (a, b, c и x, y, z) и передерживаться этой маркировки при монтаже и подключении к сети. Ошибка в маркировке одной из фаз может привести к тому, что ЭДС, наведенные в одноименных фазах, будут не совпадать по фазе, а будут сдвинуты относительно этого на 180° .

Группа соединения обмоток. На рис. 1.11 показаны соединения обмоток Y/Y , т.е. звезда-звезда и топографическая векторная диаграмма фазных и линейных напряжений. Напряжения \underline{U}_A и \underline{U}_a , \underline{U}_{AB} и \underline{U}_{ab} , и т.д. совпадают по фазе.

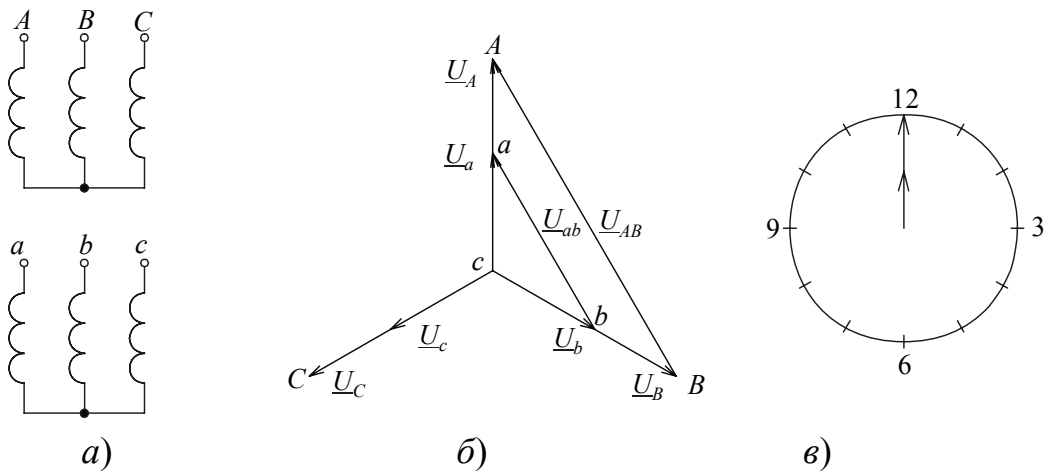


Рисунок 1.11

Если принять вектор \underline{U}_a за «часовую стрелку», а \underline{U}_A — за «минутную стрелку» часов и совместить \underline{U}_a с числом 12 на циферблате часов (1.11 в), то \underline{U}_A также совпадет с числом 12. При этом получается нулевая (или двенадцатая) группа соединения обмоток. При другой схеме соединения обмоток Y/Y (рис. 1.12) напряжения \underline{U}_A и \underline{U}_a , \underline{U}_{AB} и \underline{U}_{ab} , и т.д. находятся в противофазе, т.е. сдвинуты относительно друг друга на угол 180° . В этом случае получается шестая группа соединения обмоток. Группа в первом случае записывается: $Y/Y-0(12)$, во втором $Y/Y-6$.

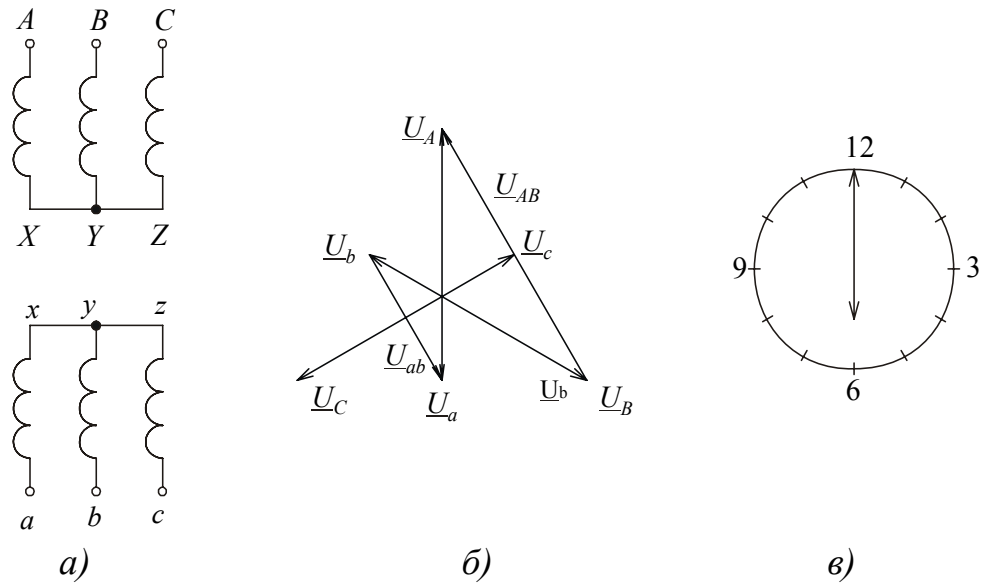


Рисунок 1.12

Если обмотки трансформатора соединены по схеме показанной на рис.1.13, т.е. по схеме Y/Δ (вторичные обмотки соединены треугольником), то угол фазового сдвига между напряжением \underline{U}_{AB} и \underline{U}_{ab} составит 330° (30°), поэтому группа соединений обмоток записывается так: $Y/\Delta - 11$.

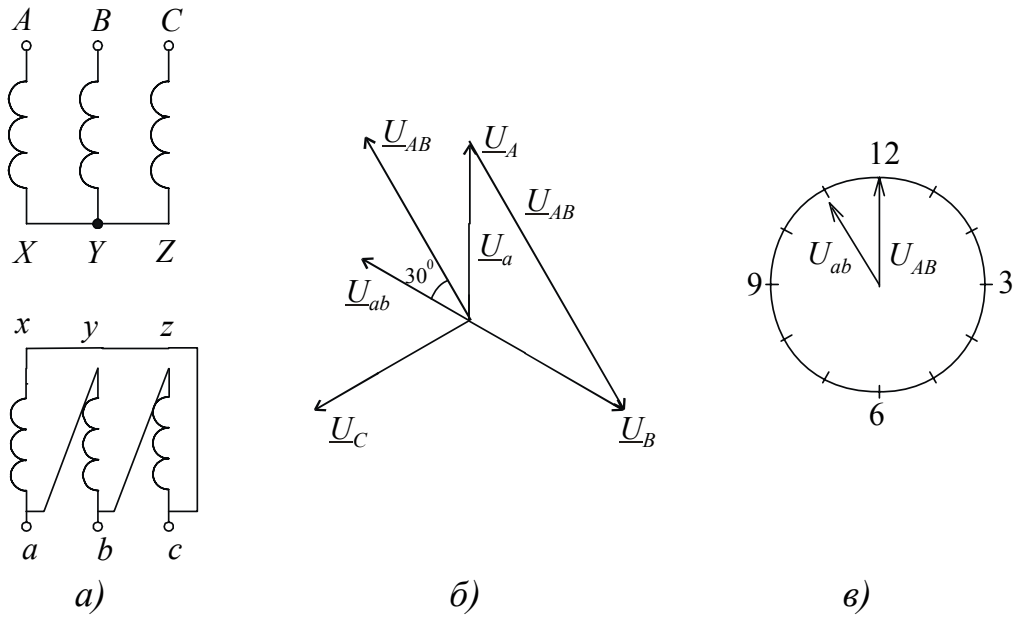


Рисунок 1.13

Наиболее часто используются на практике трансформаторы нулевой и одиннадцатой группы. ГОСТ на трансформаторы предусматривает производство трансформаторов с схемами и группами соединения обмоток ВН, СН и НН, приведенные на рисунках 1.14 – 1.19.

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов напряжений холостого хода		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				y/y_H-0
				$y/d-11$
				$y_H/d-11$
				y/z_H-11
				d/y_H-11
				$d/d-0$

РИСУНОК 1.14

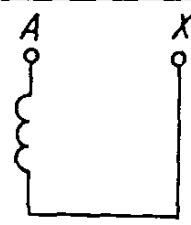
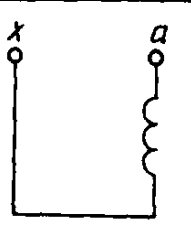

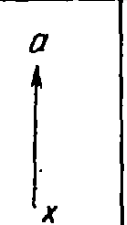
Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжений холостого хода		Условное обозначение
				

Рисунок 1.15

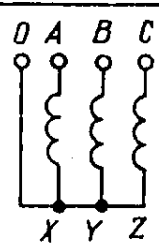
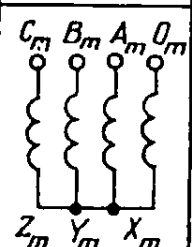
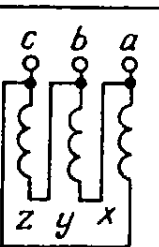
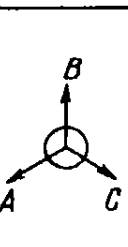
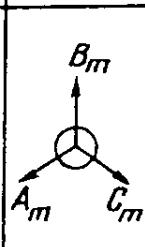
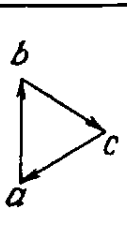
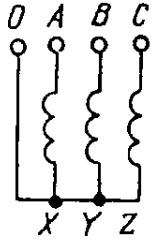
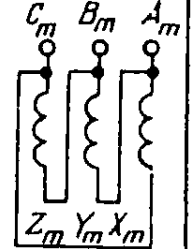
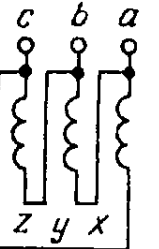
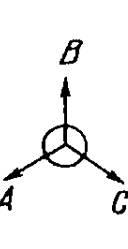
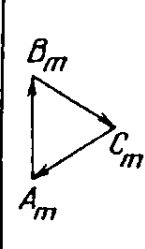
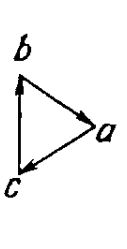
Схемы соединения обмоток			Диаграммы векторов напряжений холостого хода			Условные обозначения
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						Y _H /Y _H /Δ-0-11
						

рисунок 1.16

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжений XX		Условное обозначение
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				$Y_{\Delta}/\Delta-0-11$

Рисунок 1.17

Схемы соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжений холостого хода		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y_{\Delta}/\Delta-11-11$

Рисунок 1.18

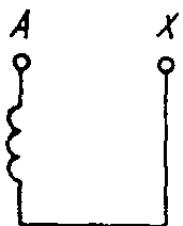
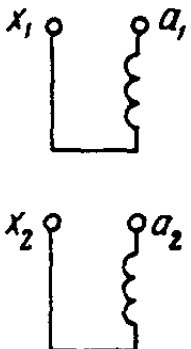

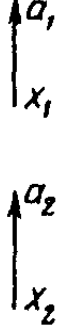
Схема соединения обмоток		Диаграмма Вектор напряжений холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН			
				1/1-1-0-0

Рисунок 1.19

1.5 Режимы работы трансформаторов

Различают несколько режимов работы трансформатора, имеющего номинальную полную мощность $S_H = U_{1H} \cdot I_{1H}$ ($S_H = \sqrt{3}U_{1H}I_{1H}$ для трехфазных трансформаторов) :

1. Номинальный режим, т.е. режим при номинальных значениях напряжения и тока первичной обмотки трансформатора;
2. Рабочий режим, при котором напряжение первичной обмотки близко к номинальному, а ток I_1 определяется фактической нагрузкой трансформатора;
3. Режим холостого хода, т.е. режим работы трансформатора, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута (ток $I_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень большим сопротивлением (например, вольтметр);
4. Режим короткого замыкания, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко ($U_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень малым сопротивлением (например, амперметр).

Режимы холостого хода и короткого замыкания возникают при авариях или создаются специально при испытании трансформатора с целью определения ряда его параметров.

А. Опыт холостого хода. Опыт холостого хода называется испытание трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке и номинальном напряжении на первичной обмотке ($U_1 = U_{1H}$). Схемы испытательных цепей представлены на рис. 1.20. Для однофазного трансформатора уравнения режима холостого хода имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_{10}(R_1 + jx_1) - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 = -\underline{I}_{10}(R_0 + jx_0) \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

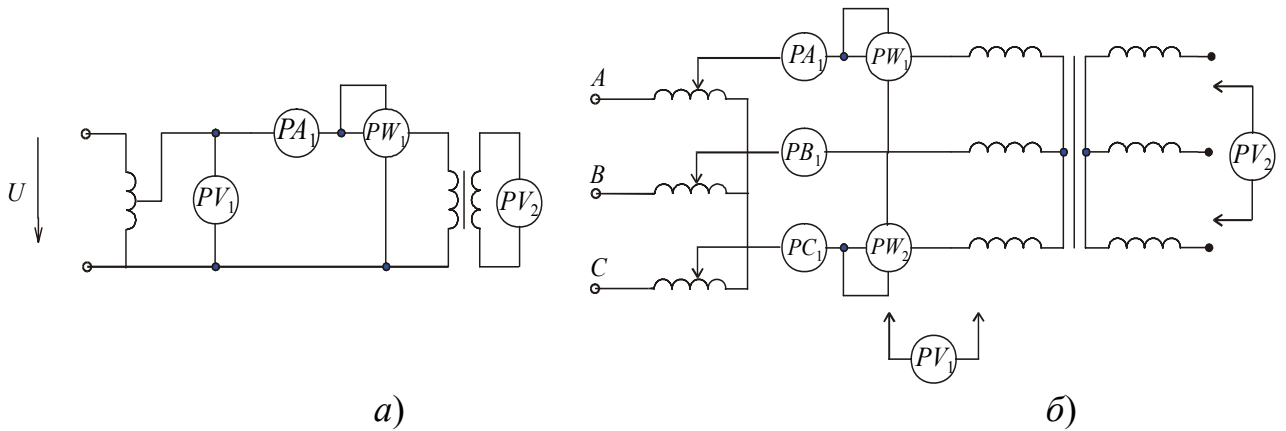


Рисунок 1.20

а) однофазный трансформатор; б) трехфазный трансформатор

На основе опытов холостого хода по показаниям измерительных приборов определяют коэффициент трансформации и потери мощности в магнитопроводе трансформатора. Кроме того при $U_1 = U_{1H}$, ток первичной обмотки будет являться током намагничивания (I_{0H}). Величина этого тока в зависимости от мощности трансформатора составляет 3...10% от номинального тока первичной обмотки (I_{1H}). Если пренебречь малыми потерями напряжения на первичной обмотке $\Delta \underline{U}_1 = \underline{I}_{10}(R_1 + jx_1)$, то можно принять $U_1 \approx E_1$. Кроме того, при разомкнутой вторичной обмотке $I_2 = 0$, следовательно $U_{20} = E_2$. Поэтому, измерив вольтметром напряжения U_{1H} и U_{20} в режиме холостого хода, можно опытным путем определить коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{1H}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2}.$$

По результатам опыта холостого хода определяют также

$$\cos \varphi_x = \frac{\Delta P_x}{U_{1H} I_{0H}} \quad \text{— для однофазного трансформатора;}$$

$$\cos \varphi_x = \frac{\Delta P_x}{\sqrt{3} U_{1H} I_{0H}} \quad \text{— для трехфазного трансформатора.}$$

А также параметры схемы замещения:

$$Z_x = \frac{U_{1H}}{I_{0H}} \quad \text{и} \quad Z_x = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} I_{0H}}, \quad R_x = \frac{\Delta P_x}{I_{0H}^2} \quad \text{и} \quad R_x = \frac{\Delta P_x}{3 I_{0H}^2}, \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}.$$

Здесь R_x – тепловой эквивалент и X_x – реактивный (индуктивный) эквивалент магнитопровода.

Построенные по данным измерений зависимости $I_0 = f(U_x)$; $\Delta P_x = f(U_x)$; $\cos \varphi_x = f(U_x)$ называют характеристиками холостого хода (рисунок 1.21), а векторная диаграмма режима представлена на рисунке 1.22.(б).

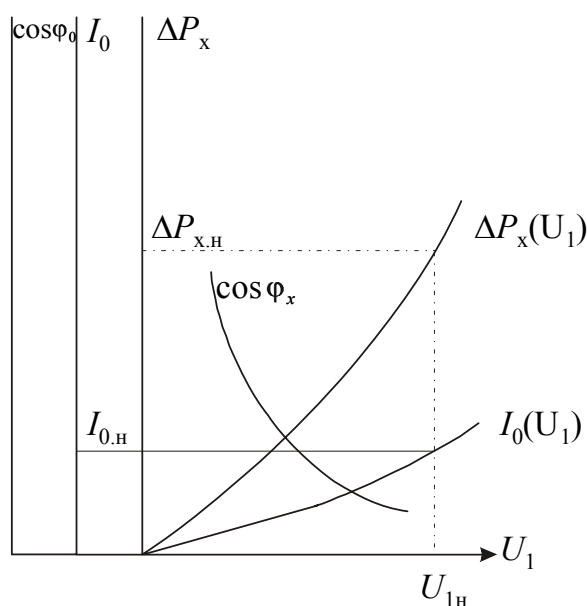


Рис. 1.21

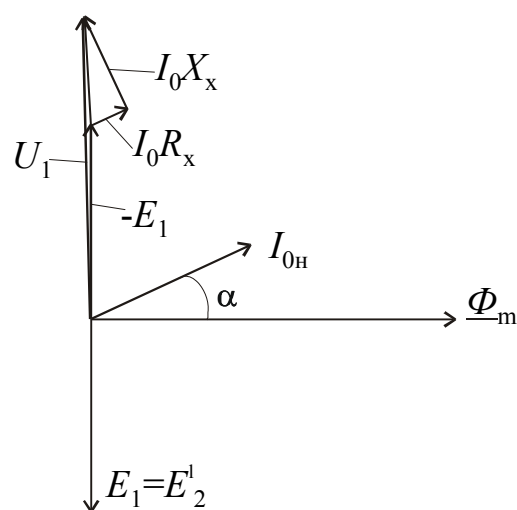


Рис. 1.22

Б. Режим и опыт короткого замыкания.

Коротким замыканием называют режим работы трансформатора, при котором вторичная $U_2=0$. В этом случае уравнения трансформатора принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 &= -\underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 - k \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = -\underline{I}'_2 \underline{Z}'_2 + \underline{E}'_2 \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 - \underline{I}'_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Режим короткого замыкания, если он в условиях эксплуатации возникает случайно, при номинальном напряжении U_1 является аварийным, т.к. при этом в обмотках трансформатора возникают большие токи, приводящие к термическому разрушению изоляции проводников, изоляционных конструкций электрических аппаратов и трансформаторов.

Если же режим короткого замыкания создать при пониженном напряжении, то он может быть использован для исследования трансформатора. С этой целью проводится «опыт короткого замыкания», при котором зажимы

вторичной обмотки замыкаются накоротко, а напряжение U_1 такой величины, при котором ток в обмотках становится равным номинальному.

Опыт короткого замыкания выполняется по схеме на рисунке 1.23.

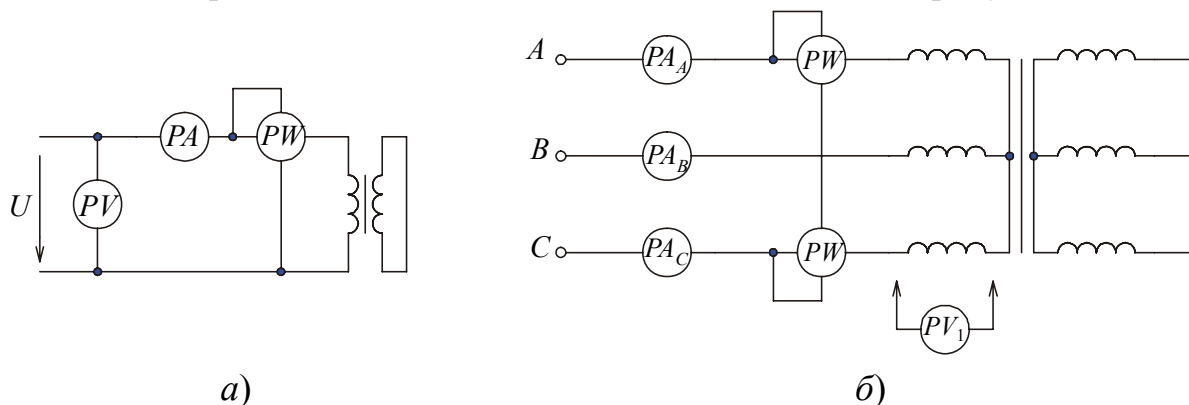


Рис. 1.23

По показаниям приборов можно определить мощность потерь в обмотках ΔP_K , т.к. потери в магнитопроводе составляют лишь 0,005...0,1% от потерь при номинальном режиме из-за пониженного напряжения $U_{1к}$. Мощность потерь при коротком замыкании и номинальных токах:

$$\Delta P_{K.НОМ} = R_1 I_{1.Н}^2 + R_2 I_{2.Н}^2 = R_K I_H^2 = (R_1 + R_2') I_H^2.$$

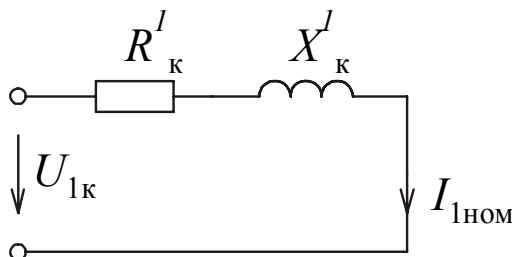


Рисунок 1.24

Напряжение короткого замыкания, как следует из рис. 1.24

$$U_{1к} = Z_K I_{НОМ}$$

Обычно $U_{1к}$ составляет 2,5...7,5% $U_{1НОМ}$: $U_K \% = \frac{z_K I_{НОМ}}{U_{1НОМ}} 100$.

Значение $U_{1к} \%$ указывается на щитке трансформатора и в техническом паспорте. Резистивная составляющая напряжения короткого замыкания определяется по формуле:

$$U_{PK} \% = \frac{100 R_K I_{НОМ}}{U_{1НОМ}} = \frac{\Delta P_{K.НОМ}}{S_{НОМ}} 100,$$

а реактивная составляющая этого напряжения $U_{PK} \% = \frac{X_K I_{НОМ}}{U_{1НОМ}} 100$.

1.6 Вторичное напряжение трансформатора

Важное значение имеет напряжение на вторичных выводах трансформатора, т.к. к этой обмотке присоединяются электродвигатели, нагревательные устройства, осветительные приборы и пр.

Например, если напряжение на осветительных лампах низкое, то они недостаточно освещают; если напряжение на зажимах асинхронного двигателя меньше номинального на 10%, то вращающий момент двигателя уменьшается на 19% и такой момент может быть недостаточным. Поэтому важно уметь найти напряжение питания устройств, подключенных к вторичной обмотке трансформатора.

Изменение вторичного напряжения определяется в процентах

$$\Delta U\% = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}} 100 = \frac{U_{1\text{ном}} - U_2'}{U_{1\text{ном}}} 100 \quad (1.16)$$

Формулу для определения $\Delta U\%$ можно получить из векторной диаграммы рисунок 1.25, построенной для схемы замещения рис. 1.24.

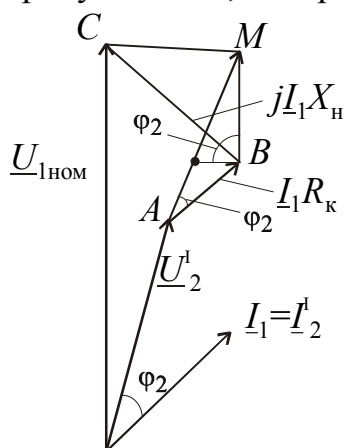


Рисунок 1.25

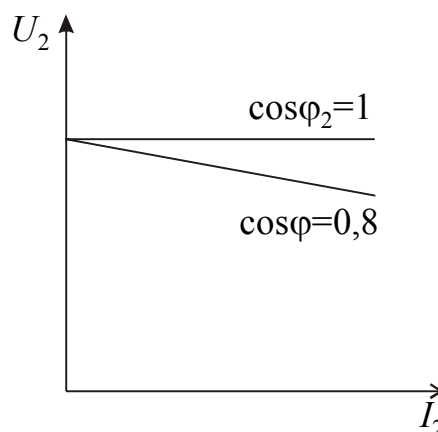


Рисунок 1.26

Практически с допустимой погрешностью можно считать, что $\overline{OC} = \overline{OM}$ и $\overline{CB} = \overline{MB}$. Тогда $\overline{OM} - \overline{OA} = \overline{AK} + \overline{KM}$. Из прямоугольных треугольников АКВ и МКВ следует, что $AK = R_k I_1 \cos \varphi_2$; $KM = X_k I_1 \sin \varphi_2$. и $U_{1\text{ном}} - U_2' = R_k I_1 \cos \varphi_2 + x_k I_1 \sin \varphi_2$.

Введем понятие коэффициента нагрузки трансформатора:

$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$. После подстановки двух соотношений в (1.16), получим:

$$\Delta U\% = \beta \frac{R_k I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} 100 \cos \varphi_2 + \beta \frac{x_k I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} 100 \sin \varphi_2,$$

$$\Delta U\% = \beta (U_{Rk} \cos \varphi_2 + U_{p.k} \sin \varphi_2),$$

где $U_{Rк}$ и $U_{р.к}$ в процентах.

Если значение ΔU найдено, то вторичное напряжение

$$U_2 = U_{2ном} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \right) = U_{2х} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100} \right). \quad (1.17)$$

1.6.1 Внешняя характеристика трансформатора

Она представляет собой зависимость между вторичным напряжением U_2 и током нагрузки I_2 при заданном напряжении на выходе U_1 . Она может быть рассчитана по каталожным данным. Внешние характеристики при резистивной и резистивно-индуктивной нагрузках представлены на рисунке 1.26. Чем больше ток нагрузки I_2 , тем меньше напряжение U_2 . В пределах от холостого хода до номинальной нагрузки, т.е. от $I_2 = 0$ до $I_2 = I_{2ном}$ ($0 \geq \beta \leq 1$), напряжение U_2 изменяется лишь на несколько процентов. Чем больше нагрузка, тем больше токи I_2 и I_1 , а значит, больше и падение напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора и, следовательно, тем меньше напряжение U_2 .

1.7 Мощность потерь и КПД трансформатора

1.7.1 Постоянные и переменные потери.

Уравнение баланса мощности в цепи с трансформатором

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_э,$$

где P_1 – активная мощность, поступающая из сети (от источника); $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ – активная мощность потребителей; $\Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_э$ – суммарная мощность потерь в трансформаторе; $\Delta P_{ст}$ – мощность потерь в стали (в магнитопроводе); $\Delta P_э$ – мощность потерь в обмотках трансформатора.

Мощность потерь в стали из-за гистерезиса и вихревых токов зависит от амплитуды магнитного потока Φ_m , а так как $\Phi_m = \text{const}$, то мощность потерь в стали не изменяется, т.е. не зависит от нагрузки при постоянном значении напряжения U_1 . Эти потери составляют 1...2% номинальной мощности. Мощность потерь в проводах обмоток зависит от нагрузки, так как $\Delta P_э = R_k I_1^2$. Зависимость потерь в стали и обмотках от коэффициента нагрузки показана на рис. 1.27.

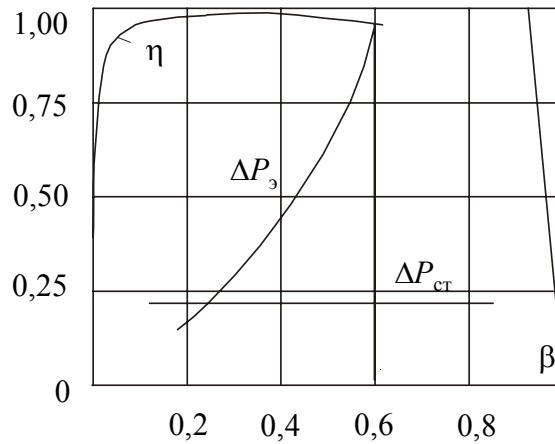


Рисунок 1.27

1.7.2 КПД трансформатора

Его можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_3} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_3}.$$

Так как коэффициент нагрузки $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$ и в опытах холостого хода и короткого замыкания было получено, что $\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_x$, а $\Delta P_3 = \Delta P_k = R_k I_1^2$, то КПД

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 \cdot t_p}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 \cdot t_p + \Delta P_x t_\Gamma + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}} \cdot t_p},$$

где $t_\Gamma = 8760$ – число часов в году, t_p – число часов работы трансформатора под нагрузкой.

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_x + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_x + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}. \quad (1.18)$$

Из (1.18) можно найти значение коэффициента β , при котором КПД принимает максимальное значение, достигающее 99,5%. Приравняв нулю производную $\frac{d\eta}{d\beta}$, получим $\beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}} = \Delta P_x$.

Откуда оптимальный коэффициент нагрузки

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_x}{\Delta P_{\text{к.ном}}}} = 0,75 \dots 0,5.$$

Таким образом, наибольшее значение КПД трансформатора будет при нагрузке 75...50% номинальной.

1.8 Многообмоточные трансформаторы

1.8.1 Область применения и классификация многообмоточных трансформаторов

В электроэнергетических системах, а также в устройствах автоматики часто возникает потребность во взаимной связи нескольких цепей или систем переменного тока разных напряжений и одинаковой частоты. Такая связь экономично реализуется при помощи многообмоточных трансформаторов.

В современных энергетических установках находят применение два типа многообмоточных трансформаторов:

- 1) трансформаторы, имеющие одну первичную обмотку и две или более вторичных;
- 2) трансформаторы, имеющие две или более первичных обмоток и одну или несколько вторичных обмоток.

1.8.2 Трехобмоточные трансформаторы с двумя вторичными обмотками

Наибольшее распространение имеют многообмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками (рис. 1.28).

Если обмотка 1 такого трансформатора присоединена к источнику переменного тока, обмотки 2 и 3 нагружены, то по аналогии с двухобмоточным трансформатором можно для его обмоток написать следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= j\omega(L_{11}\underline{I}_1 + L_{12}\underline{I}_2 + L_{13}\underline{I}_3) + R_1\underline{I}_1 \\ -\underline{U}_2 &= j\omega(L_{21}\underline{I}_1 + L_{22}\underline{I}_2 + L_{23}\underline{I}_3) + R_2\underline{I}_2 \\ -\underline{U}_3 &= j\omega(L_{31}\underline{I}_1 + L_{32}\underline{I}_2 + L_{33}\underline{I}_3) + R_3\underline{I}_3 \end{aligned} \right\}. \quad (1.19)$$

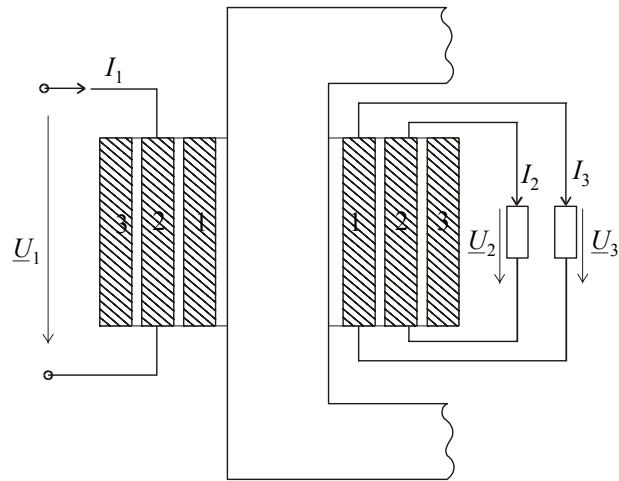


Рисунок 1.28

Условимся считать, что все три обмотки приведены к первичному напряжению ($W_1 = W_2 = W_3$), тогда опуская для упрощения индекс приведения ('), получим уравнение токов:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad (1.20)$$

(если пренебречь малым током намагничивания I_0).

Суммы напряжений $\underline{U}_1 + \underline{U}_2$ и $\underline{U}_1 + \underline{U}_3$ характеризуют падения напряжения при нагрузке в соответствующих обмотках (рис. 1.29). Совместное решение (1.19) и (1.20) позволяет написать:

$$\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2) = -(\underline{U}_3 + \underline{I}_3 \underline{Z}_3). \quad (1.21)$$

На основании (1.21) можно построить трехлучевую схему замещения, представленную на рисунке 1.30. В этой схеме Z_2 и Z_3 являются сопротивлениями нагрузок соответствующих обмоток.

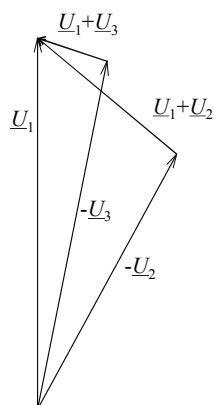


Рисунок 1.29 Фазовые сдвиги напряжений второй и третьей обмоток.

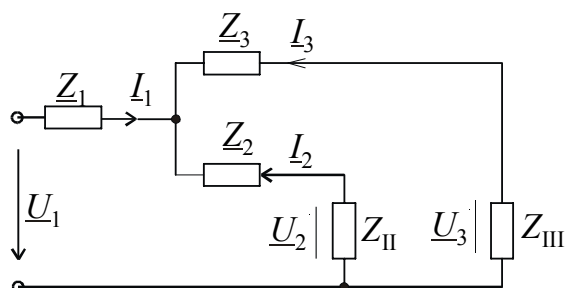


Рисунок 1.30 Схема замещения трехобмоточного трансформатора.

Характерным для трех обмоточного трансформатора является взаимное влияние вторичных обмоток. Так, при изменениях тока I_3 меняется не только напряжение U_3 , но и напряжение U_2 , так как ток I_3 , протекая по сопротивлению Z_1 , создает падение напряжения $I_3 Z_1$, которое изменяет напряжение U_2 . Чем больше сопротивление Z_1 схемы замещения, тем сильнее проявляется взаимное влияние вторичных обмоток.

1.8.3 Трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками

На крупных электростанциях иногда возникает необходимость в работе двух генераторов через один мощный повышающий трансформатор (рис. 1.31). В этих случаях применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трехфазную группу. Трансформаторы имеют бронестержневые магнитные системы.

Первичные обмотки 1 и 2 генераторного напряжения НН размещаются на разных стержнях, вторичная обмотка 3 высшего напряжения ВН имеет две параллельные цепи.

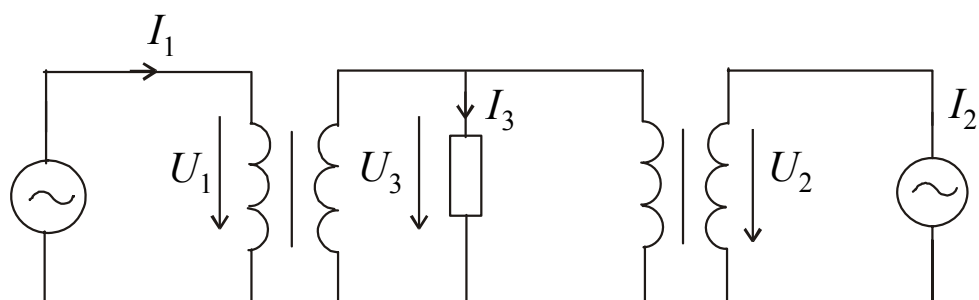


Рисунок 1.31

При таком устройстве трансформатор можно рассматривать как два отдельных трансформатора, каждая из которых питается от отдельного генератора. В частности, в них сопротивление короткого замыкания между обмотками НН и ВН одного стержня.

1.9 Автотрансформаторы

Нередко в сетях и установках высокого и сверхвысокого напряжения, а также в устройствах проводной связи и автоматики возникает необходимость сравнительно небольшого изменения напряжения, например на $\pm 10 \dots 50\%$. Использование в этих случаях обычных двух обмоточных трансформаторов не обеспечивает экономического решения задачи. Более рационально она может быть решена путем использования двух обмоточных трансформаторов, включаемых по особой схеме, получивших название автотрансформаторов.

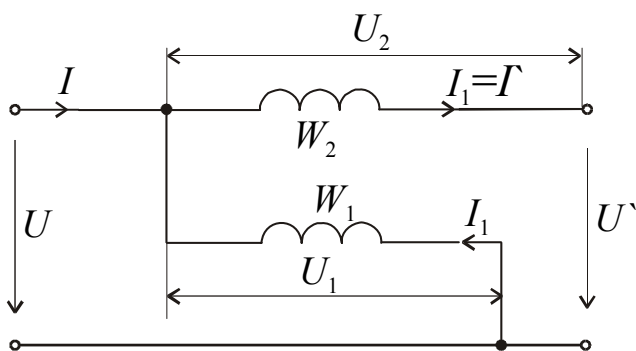


Рисунок 1.32

Предположим, что требуется изменить напряжение U в какой либо точке сети и сделать его равным U' (рис. 1.32). Для этого можно использовать трансформатор, первичная обмотка которого подключается к напряжению U , а вторичная – последовательно в сеть так, чтобы напряжению U и в сумме создавалось требуемое напряжение U' .

Трансформатор, включаемый таким образом, называют автотрансформатором.

Следует различать при применении автотрансформатора мощность «проходную» $UI \approx U'I' = U'I_2$, и мощность «расчетную» $U_1I_1 = U_2I_2$, определяющую размеры и массу. Для обычного двухобмоточного трансформатора эти мощности равны, для автотрансформатора «расчетная» обычно значительно меньше «проходной»:

$$\frac{U_2I_2}{U'I_2} = \frac{U_2}{U'} = \frac{U' - U}{U'}$$

Из этого равенства видно, что применение автотрансформатора получается выгоднее и связано с тем меньшей затратой активного материала – меди, стали, чем меньше отношение напряжений $\frac{U_2}{U'}$, т.е. чем меньше изменяется напряжение сети при помощи автотрансформатора. Снижение массы активного материала приводит к уменьшению электрических и магнитных потерь. Поэтому при одинаковой проходной мощности КПД автотрансформатора всегда выше, чем трансформатора.

1.10 Параллельная работа трансформаторов

При нескольких параллельно работающих трансформаторах можно без уменьшения требуемой для потребителей мощности ремонтировать выходящие из строя трансформаторы, иметь резерв при выходе из строя отдельных трансформаторов, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки (для уменьшения потерь), равномерно распределять нагрузки между трансформаторами. Эти преимущества привели к широкому распространению параллельной работы.

1.10.1 Условия параллельной работы

Схема двух однофазных параллельно работающих трансформаторов изображена на рис.1.33, а эквивалентная схема на рис. 1.34.

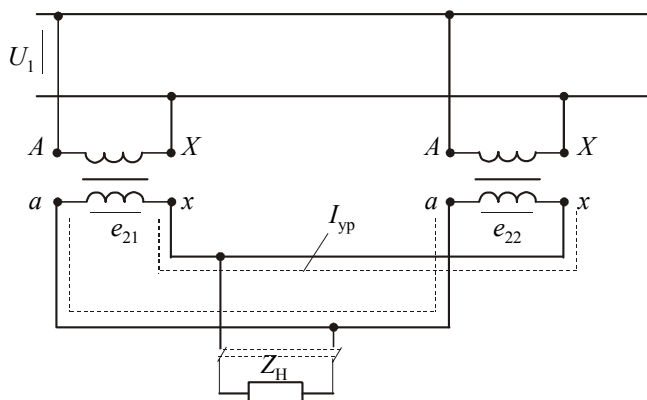


Рисунок 1.33.

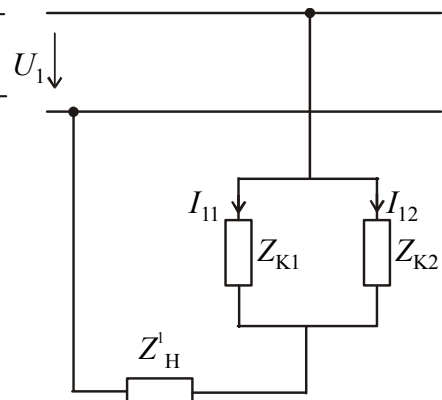


Рисунок 1.34

Под нормальной параллельной работой трансформаторов понимают работу, при которой в режиме холостого хода нет тока в цепи вторичных обмоток, а при питании потребителей (в режиме нагрузки) токи распределяются пропорционально номинальным мощностям трансформаторов.

В режиме холостого хода (рис. 1.33) в цепи вторичных обмоток может быть так называемый уравнительный ток:

$$I_{\text{ур}} = \frac{E_{21} - E_{22}}{Z_{к1} - Z_{к2}}.$$

Этот ток во вторичных обмотках загружает трансформатор и вызывает дополнительный нагрев его обмоток и расход энергии. В режиме нагрузки он накладывается на точки потребителей и создает неравномерную нагрузку трансформаторов.

Уравнительного тока в трансформаторах нет, если

$$E_{21} = E_{22} \text{ или } U_{21} = U_{22}.$$

Таким образом, первым необходимым условием нормальной параллельной работы является равенство номинальных вторичных напряжений трансформаторов.

Из эквивалентной схемы (рис. 1.34) следует, что токи в двух параллельно включенных обмотках распределяются обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания:

$$\frac{I_{21}}{I_{22}} = \frac{Z_{к2}}{Z_{к1}}. \quad (1.22)$$

Из (1.22) следует, что должны равняться сопротивления короткого замыкания ($Z_{к2} = Z_{к1}$). При этом нагрузка между трансформаторами распределяется пропорционально номинальным мощностям трансформаторов.

Для трехфазных трансформаторов также требуется идентичность групп соединения. Если это условие не выполняется, ЭДС E_{21} и E_{22} соответствующей пары обмоток не совпадают по фазе и в результате появляется уравнительный ток. Например, при наличии групп $Y/Y-0$ и $Y/\Delta-11$ угол фазового сдвига между одноименными ЭДС составит 30° и как показывают расчеты, уравнительный ток будет в 5 раз больше номинального.

1.11 Специальные трансформаторы

Выше были рассмотрены общие свойства трансформаторов как преобразователей энергии переменного тока. Эти свойства характерны для любых трансформаторов, независимо от их назначения. Однако в ряде случаев приходится применять трансформаторы для особых условий работы. Такие трансформаторы специального назначения обладают рядом особенностей, требующих дополнительного рассмотрения.

К таким трансформаторам относятся:

- а) трансформаторы для преобразования числа фаз параллельного тока;
- б) трансформаторы для выпрямительных установок;
- в) трансформаторы для преобразования частоты;
- г) трансформаторы для питания дуговых электрических печей;
- д) трансформаторы с плавным регулированием напряжения;
- е) трансформаторы для дуговой электросварки;
- ж) реакторы – регулируемые индуктивные сопротивления;
- з) измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Подробнее рассмотрим некоторые из этих трансформаторов.

1.11.1 Трансформаторы для выпрямительных установок

Основной особенностью трансформаторов для выпрямительных установок является включение в их вторичную цепь полупроводниковых диодов и тиристоров, пропускающих переменный ток только в одном направлении, т.е. в течение полупериода. Рассмотрим простейшую однофазную схему, представленную на рис. 1.35. Ток I_2 , протекающий в этом случае по вторичной обмотке трансформатора, имеет пульсирующий характер: полуволна синусоиды – полупериодный интервал – полуволна синусоиды и т.д. (рис. 1.35,а).

Постоянная составляющая этого тока

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_2}{R},$$

где U_2 – действующее значение выходного напряжения вторичной обмотки, В; R – сопротивление нагрузки.

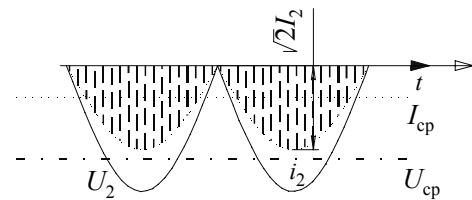
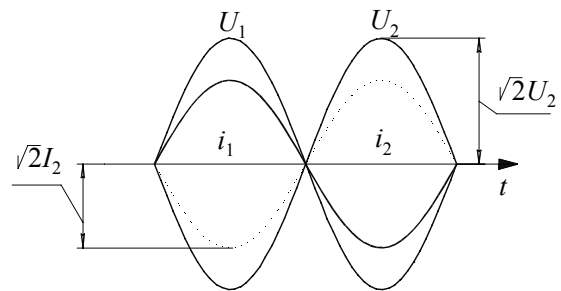
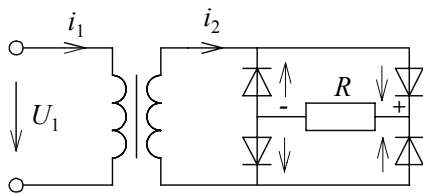
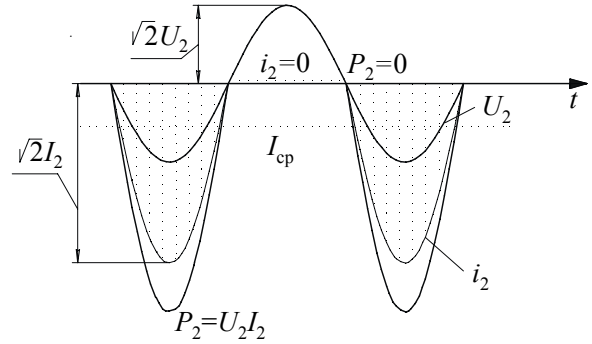
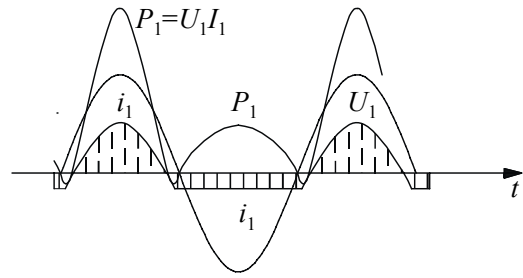
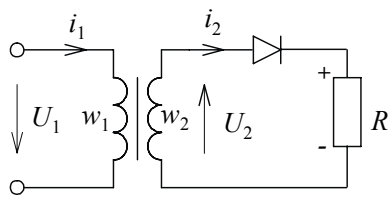


Рисунок 1.35

В первичной обмотке трансформируется только периодическая составляющая вторичного тока:

$$-i_1 = (i_2 - I_{cp}) \frac{W_2}{W_1}.$$

Как видно из рисунка 1.35, а равновесие намагничивающих сил при таком режиме в трансформаторе все время нарушено:

$$i_1 W_1 + i_2 W_2 = I_{cp} W_2.$$

Так как ток $I_{\text{ср}}$ является постоянным, небаланс намагничивающих сил приводит к подмагничиванию магнитной системы в неизменном направлении. В течение полупериода, когда $I_2 = 0$ ток $i_1 = I_{\text{ср}} \frac{W_2}{W_1}$ и из сети поступает энергия

$$A_1 = \int_0^{T/2} u_1 i_1 dt = 0,203 \frac{U_2^2 T}{R},$$

которая накапливается в магнитном поле трансформатора. В следующие полпериода, при возникновении тока i_2 , вторичная обмотка развивает энергию

$$A_2 = \int_0^{T/2} u_2 i_2 dt = \frac{U_2 I_2 T}{2} = 0,5 \frac{U_2^2 T}{R}.$$

Недостающая разность энергий $A_2 - A_1 = 0,297 \frac{U_2^2 T}{R}$ поступает в течение этого полупериода в первичную обмотку из сети и через магнитное поле передается вторичной обмотке.

Значительно лучшие условия для работы трансформатора имеют место при двухполупериодном выпрямлении с применением мостовой схемы (рисунок 1.35, б).

В этом случае по обмоткам трансформатора протекает нормальный переменный ток и не возникает неуравновешенных намагничивающих сил. Среднее значение пульсирующего тока при такой схеме:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_2}{R}.$$

$$\text{И соответственно } U_{\text{ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2.$$

Расчетная мощность трансформатора $P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{R}$, и превышает расчетную мощность выпрямительного тока $P_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{U_2^2}{R}$, причем $P_2 = 1,23 P_{\text{ср}}$.

1.11.2 Трансформаторы для дуговой электросварки

Для дуговой электросварки при помощи трансформатора обеспечивается понижение напряжения сети до напряжения зажигания дуги, которое обычно в пределах 40...70В. Характерным для сварочного трансформатора

является прерывистый режим работы с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно.

Для обеспечения качественной сварки ток должен оставаться почти неизменным. При этом условии обеспечивается устойчивое горение дуги. Для получения такого тока внешняя характеристика трансформатора должна быть резко падающей (рис. 1.36), во-вторых, необходима значительная индуктивность сварочной цепи ($\cos\varphi=0,4\dots 0,5$). Для этого трансформатор должен обладать большим рассеянием. Большая индуктивность требуется и для ограничения тока короткого замыкания, который не должен по возможности превосходить двукратного номинального значения. Поэтому индуктивное сопротивление цепи сварочного трансформатора приходится искусственно увеличивать.

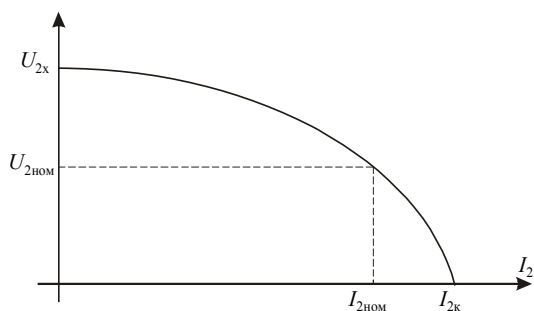


Рисунок 1.36.

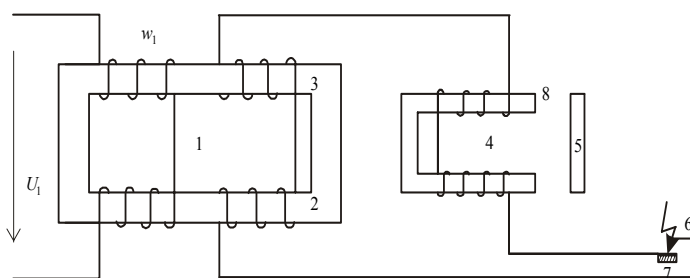


Рисунок 1.37.

Обмотки трансформатора 1 (рис. 1.35) расположен на стержнях 2 и 3 магнитопровода, что и увеличивает поток рассеяния. Ток сварки между электродом 6 и изделием 7 регулируется изменением зазора 8 между сердечником и якорем 5 дросселя 4. При коротком замыкании (залипании электрода к изделию) дроссель ограничивает ток в трансформаторе.

Рассматриваемая схема удобна для многопостовой сварки, когда от одного трансформатора питается одновременно несколько постов, каждый через свою регулируемую реактивную катушку (дроссель).

1.11.3 Реакторы

Во многих случаях в установках переменного тока приходится включать индуктивные сопротивления в отдельные цепи для ограничения и регулирования тока.

Для создания значительных индуктивных сопротивлений при повышенных частотах ($f=50\text{Гц}$) применяют обычно катушки, расположенные на магнитопроводе (рис. 1.38), называемые реакторами.

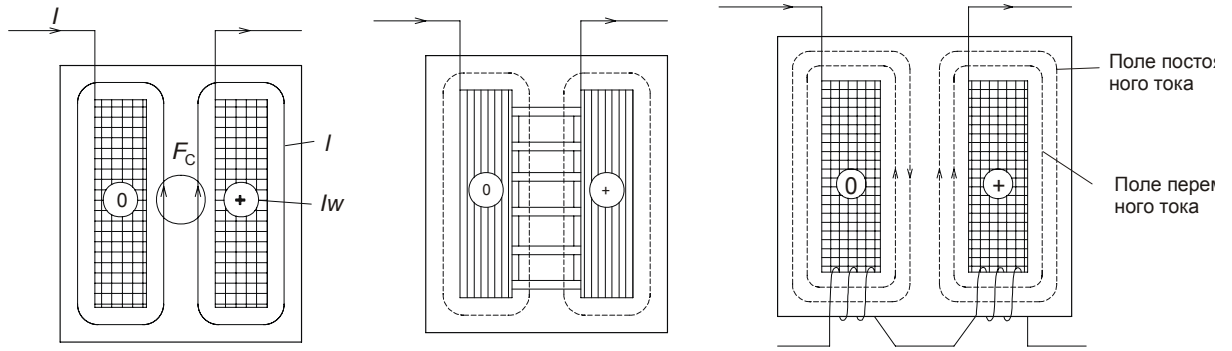


Рисунок 1.38

Допустим, что активное сечение F_c стержней и ярм магнитной системы реактора одинаково; тогда согласно закону полного тока

$$Hl = \frac{B}{\mu_0 \mu} = \sqrt{2}IW, \quad (1.23)$$

где B – магнитная индукция; l – средняя длина силовой линии поля.

Электродвижущая сила самоиндукции

$$E = 4,44 fWF_0 B. \quad (1.24)$$

Из последних двух равенств найдем значение индуктивного сопротивления реактора:

$$X_L = \frac{E}{I} \cdot \frac{\omega W^2 F_c \mu \mu_0}{l} \quad (1.25)$$

а реактивная мощность, отнесенная к 1 см^3 сердечника ($F_c = 1, l = 1$):

$$q_1 = EI = \frac{\pi f B^2}{\mu \mu_0} \left[\text{BA} / \text{см}^3 \right] \quad (1.26)$$

Формула (1.26) показывает, что выполнение реактора с замкнутой магнитной системой нецелесообразно, так как даже при максимальной индукции, реактивная мощность, приходящаяся на 1 см^3 мала.

По этой причине на практике наиболее широкое применение получили реакторы с линейными характеристиками, имеющие в магнитной цепи «воздушные» зазоры (рис. 1.38, б). Для таких систем можно считать

$$H\Sigma\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \Sigma\delta = \sqrt{2}IW \quad \text{и} \quad E = 4,44 fWF_\delta B_\delta. \quad (1.27)$$

откуда находим реактивную мощность реактора:

$$q_1 = EI = \frac{\pi f B_\delta F_\delta \Sigma\delta}{\mu_0}. \quad (1.28)$$

В этих равенствах: $\Sigma\delta$ – суммарный зазор, см; F_δ – расчетное сечение зазора, см²; B_δ – индукция в зазоре, Т. Расчетное сечение $F_\delta = F\left(1 + \frac{2\delta}{\sqrt{F}}\right)$, где F – сечение магниторода, см².

Реакторы с воздушным зазором обладают практически линейными характеристиками. Регулирование сопротивления X_L достигается изменением зазора δ или подмагничиванием (рис. 1.38).

1.11.4 Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерительные трансформаторы широко применяют в установках как переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения для измерения токов и напряжений с помощью стандартных приборов на 5А и 100В, подключаемых к этим трансформаторам. Измерительные трансформаторы изготавливают мощностью от 5 до нескольких сот вольт-ампер. Столь небольшие номинальные мощности и требования малых погрешностей при преобразовании токов и напряжений предъявляют особые требования к расчету и инструкции измерительных трансформаторов.

Трансформаторы тока (ТТ)

При измерении тока первичную обмотку однофазного трансформатора включают последовательно в цепь с измеряемым током, а вторичную замыкают на измерительные или релейные устройства с малыми сопротивлениями (рис. 1.39).

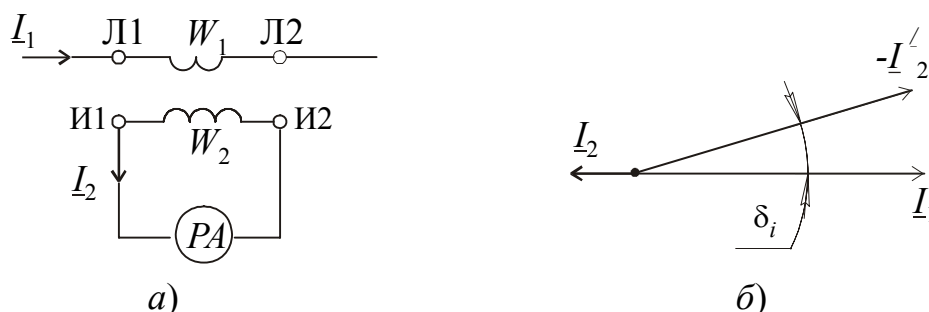


Рисунок 1.39

Как показано выше, первичный и вторичный токи связаны равенством

$$I_2' = -I_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2' + Z'}, \quad (1.29)$$

где $Z' = Z\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$ – полное приведенное сопротивление нагрузки, т.е. в случае трансформации тока – сопротивление прибора, подключаемого ко вторичной обмотке. Равенство (1.29) показывает, что сдвиг по фазе измеряемого тока I_1 и регистрируемого тока I_2' будет ближе к 180° (или к 0°) и отношение их ам-

плитуд будет тем ближе к обратному отношению чисел витков ($I_2 = I_1 \frac{W_2}{W_1}$), чем меньше модуль суммы сопротивлений $Z_2' + Z'$ по сравнению с сопротивлением z_0 . Поэтому в трансформаторах тока всегда стремятся к малым значениям сопротивления Z_2' и Z' .

Различают два вида погрешности трансформаторов тока, токовую погрешность $f_i \% = \frac{I_2 \cdot W_2 / W_1 - I_1}{I_1} \cdot 100$ и угловую погрешность, измеряемую

углом δ_1 в минутах. Угол δ_1 считается положительным, если вектор $(-I_2')$ опережает вектор I_1 . По допустимым значениям погрешностей различают пять классов точности трансформаторов тока: 0,2; 0,5; 1; 3; 10.

Угловая погрешность для трансформаторов тока первых трех классов при номинальном токе не должна соответственно превышать 10, 30 и 60'; для классов 3 и 10 угловая погрешность не ограничивается.

Трансформаторы тока могут иметь одну, две или несколько вторичных обмоток для отдельного подключения измерительных приборов и релейной аппаратуры.

Аварийным для трансформаторов тока является режим, возникающий при внезапном разрыве вторичной цепи. В этом случае напряжение на зажимах вторичной обмотки может достигнуть опасной величины для прочности изоляции и обслуживающего персонала. Нормальный их режим близок к короткому замыканию.

Трансформаторы напряжения (ТН)

При измерениях напряжения в сетях высокого напряжения и питания цепей напряжения релейной аппаратуры применяют понижающие однофазные или трехфазные ТН.

Сопротивление нагрузки таких ТН обычно значительно превосходит их сопротивление короткого замыкания, так что они работают в режиме, близком к холостому ходу.

В трансформаторе напряжения первичное и вторичное приведенное напряжения связаны между собой равенством

$$\underline{U}_2' = -\underline{U}_1 \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + c_1 \underline{Z}_2' + c_1 \underline{Z}_1}, \quad c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0}$$

Это равенство показывает, что в ТН отношение U_1/U_2 будет тем ближе к отношению чисел витков W_1/W_2 и сдвиг по фазе векторов \underline{U}_1 и $(-U_2')$ тем ближе к нулю, чем ближе отношение $\underline{Z}_1 / (\underline{Z}_1 + c_1 \underline{Z}_2' + c_1 \underline{Z}_1)$ к единице.

В трансформаторах напряжения различают два вида погрешностей (рисунок 1.40): а) погрешность напряжения, которая может быть скорректирована соответствующим уменьшением числа витков первичной обмотки и $f_U \% = \frac{U_2 \cdot W_1 / W_1 - I_1}{U_1} \cdot 100$; б) угловую погрешность δ_U , выражаемую в минутах, соответствующую сдвигу фазовому между векторами $-\underline{U}'_2$ и (U_1) ; угловую погрешность считают положительной, если вектор $-\underline{U}'_2$ опережает вектор U_1 .

ГОСТ устанавливает четыре класса точности для ТН:

класс 0,2 с максимальными погрешностями:

$$f_U = \pm 0,2\% \text{ и } \delta_U = \pm 10' ;$$

класс 0,5 с $f_U = \pm 0,5\%$ и $\delta_U = \pm 10'$;

класс 1,0 с $f_U = \pm 1\%$ и $\delta_U = \pm 40'$;

класс 3,0 с $f_U = \pm 3\%$ и δ_U не нормируется.

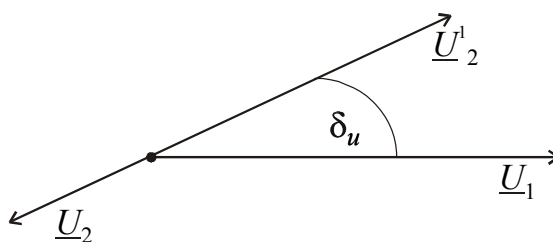


Рисунок 1.40

Глава 2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Основные сведения. История развития электропривода Типы электроприводов и движения, осуществляемые ими

Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение рабочих органов машины и управления этим движением.

Нельзя представить себе ни одного современного производственного механизма в любой области техники, который не приводился бы в действие электроприводом. В электроприводе основным элементом, непосредственно преобразующим электрическую энергию в механическую, является электротехнический двигатель, который чаще всего управляется при помощи соответствующих преобразовательных и управляющих устройств с целью формирования статических и динамических характеристик электропривода, отвечающих требованиям производственного механизма. Речь идет не только о сообщении машине вращательного или поступательного движения, но, главным образом, об обеспечении оптимального режима работы машины, при котором достигается наибольшая производительность при высокой точности.

Структурная схема современного автоматизированного электропривода приведена на рис.2.1. В ней можно выделить три основных элемента:

1) электродвигательное устройство ЭД, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механической энергии в электрическую. На схеме электродвигатель представлен двумя элементами: электромеханическим преобразователем энергии ЭМП (на вход которого подаются электрические сигналы в виде напряжения и тока), преобразующим электрическую мощность в механическую, и массой ротора двигателя РД, на которую воздействует момент M двигателя при угловой скорости ω ;

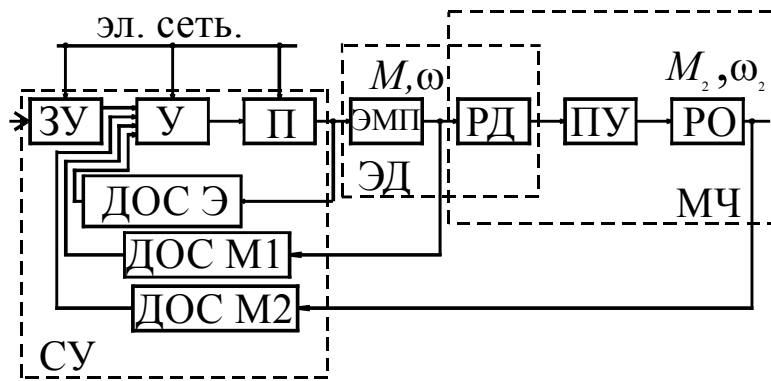


Рисунок 2.1 Структурная схема современного привода

2) механическая часть привода МЧ, включающая рабочий механизм (орган) РО, передаточный механизм ПМ, предназначен для передачи механической энергии от электродвигателя к рабочему органу и для изменения вида и частоты вращения и усилия (момента вращения);

3) система управления СУ, состоящая из силового преобразователя П, управляющего устройства У, задающего устройства ЗУ и датчиков обратных связей – электрических ДОСЭ и механических ДОСМ. Преобразователь П предназначен для питания двигателя и создания управляющего воздействия на него. Он преобразует род тока или напряжения, или частоту. Устройство У, управляющее преобразователем П, получает командные сигналы от задающего устройства ЗУ, а информацию о текущем состоянии электропривода и технологического процесса – от датчиков обратных связей. В нем текущее состояние электропривода и технологического процесса сравниваются с заданными и при наличии рассогласования вырабатывается управляющий сигнал, воздействующий через преобразователь П на электропривод в направлении возникшего рассогласования с требуемой точностью и быстродействием.

Разнообразные электроприводы с учетом их исторического развития и с точки зрения способов распределения механической энергии можно разделить на три основных типа: групповой электропривод; индивидуальный и многодвигательный.

Групповой электропривод обеспечивает движение рабочих органов нескольких машин или нескольких рабочих органов одной машины. Передача механической энергии от одного двигателя к нескольким машинам и ее распределение между ними производится с помощью одной или нескольких трансмиссий (рис.2.2).

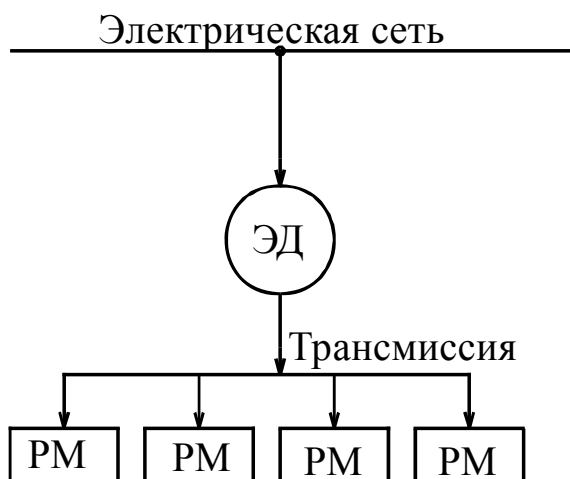


Рисунок 2.2 Структура схема группового привода

Индивидуальный привод, по сравнению, с групповым, обладает рядом преимуществ: производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями и передаточными устройствами; улучшаются условия работы и повышается производительность труда вследствие облегчения управления отдельными механизмами, уменьшения запыленности помещений, лучшего освещения рабочих мест; снижает травматизм обслуживающего персонала. Кроме того, индивидуальный электропривод отличается более высокими энергетическими показателями. Схема такого привода представлена на рис.2.3.

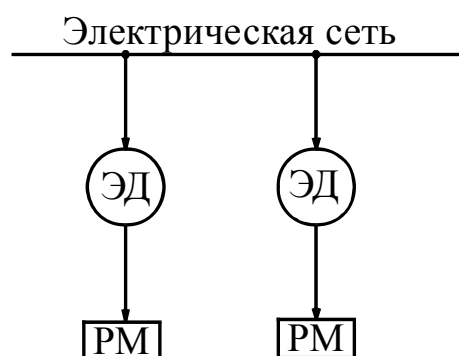


Рисунок 2.3 Структурная схема индивидуального привода

Многодвигательный привод – разновидность взаимосвязанного привода. Содержит несколько электрически или механически связанных между собой электродвигателей, причем каждый из них выполняет свою функциональную задачу. Чаще всего это безредукторный привод, то есть каждый отдельный двигатель соединяется непосредственно со своим рабочим органом. Многодвигательный привод широко применяется в таких современных машинах как копировальные металлорежущие станки и станки с ЧПУ, в бумагоделательные машины, текстильные агрегаты, прокатные станы и прочие механизмы.

По степени управляемости электропривод может быть:

1) *нерегулируемый* – для приведения в действие рабочего органа машины с одной рабочей частотой вращения, параметры привода могут изменяться только в результате внешних (возмущающих) воздействий;

2) *регулируемый* – для сообщения изменяемой или неизменяемой частоты вращения рабочему органу машины, параметры привода могут изменяться под воздействием управляющего устройства целенаправленно;

3) *программно – управляемый* – управляемый в соответствии с заданной программой;

4) *следящий* – автоматически обрабатывающий перемещения рабочего органа машины с определенной точностью в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

5) *адаптивный* – автоматически избирающий структуру и параметры систему управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

По роду тока применяются электроприводы *постоянного* и *переменного* тока.

По уровню автоматизации различают:

- 1) *неавтоматизированный*, в котором управление ручное;
- 2) *автоматизированный* – управляется автоматическим регулятором параметров;
- 3) *автоматический* – управляющее воздействие вырабатывается без участия оператора.

2.2 Краткий исторический обзор развития электропривода

Ускоренное развитие промышленности стало возможным лишь при переходе от ручного привода исполнительных механизмов к механическим приводам. Еще в глубокой древности применялись простейшие способы механизации работ с помощью водяных колес, приводимых во вращение силой подающей воды. С развитием капитализма в 18 веке появились многие фабрики, где широко применялись водяные, а затем паровые двигатели. Вплоть до конца 19 века единственным приводом был чисто трансмиссионный, так как паровая машина соединялась с помощью ремней с рабочими машинами.

Переход к более совершенному типу привода – индивидуальному или более прогрессивному – многодвигательному, стал возможным лишь на базе широкой электрификации промышленности. Строительство электрических

станций, подача электрической энергии на большие расстояния и применение электропривода создали новую эпоху в развитии народного хозяйства.

Возможность создания электродвигателя была обусловлена успехами в области электромагнетизма. Вторая четверть девятнадцатого века характеризуется созданием различных физических приборов, наглядно демонстрирующих превращение электрической энергии в механическую. Первый электродвигатель, с помощью которого осуществлен электропривод, был построен в 1834-1838 гг. академиком Б.С. Якоби. Однако отсутствие экономичных источников электрической энергии не позволило внедрить электропривод в промышленность. До создания промышленного типа электрического генератора (З.Грамм, 1870 г.) встречались лишь отдельные случаи применения электропривода.

Появление переменного однофазного тока сыграло существенную роль в развитии электротехники вообще, однако попытки решения проблемы централизованного производства и распределения энергии на переменном токе не привели к заметным сдвигам в области электропривода вследствие того, что электродвигатели однофазного тока не имели пускового вращающего момента.

Открытие явления вращающегося магнитного поля в 80-х годах прошлого века (Г.Феррарис и Н.Тесла) положило начало конструированию многофазных двигателей. Наиболее экономичной среди многофазных систем оказалась система трехфазного тока, основы которой были разработаны в 1889-1891 гг. М.О. Доливо-Добровольским. Система трехфазного тока явилась тем новым техническим средством, с помощью которого разрешался весь комплекс проблемы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Создание трехфазного асинхронного двигателя ознаменовало новый этап в развитии электропривода и открыло широкую дорогу промышленному применению электричества.

Несомненные экономические и технические преимущества электропривода позволили вытеснить устаревшие приводы и занять первое место во всех отраслях промышленности.

В России развитие электропривода получило широкий размах в годы пятилеток в связи с общей индустриализацией. В 1925 г. выходит из печати книга профессора С.А. Ринкевича «Электрическое распределение механической энергии», явившаяся первым систематизированным трудом, в котором с большой полнотой рассматривались вопросы теории и практики электропривода. Дальнейшее развитие этой проблемы нашло свое отражение в труде профессора В.К. Попова «Применение электродвигателей в промышленности» (1932-1939гг).

Рост электрификации и автоматизации и создание на этой базе более современных машин ведут к огромному повышению производительности труда. Поэтому при оценке эффективности электропривода учитывают его влияние на производительность машины и себестоимости продукции. Себестоимость единицы продукции определяется по формуле:

$$A = (a + б + в + г)/Б,$$

где а – затраты на сырье; б - затраты на рабочую силу; в - затраты на электроэнергию; г - накладные расходы; Б – общее количество продукции, выработанное за время, к которому отнесены составляющие числителя.

Рациональный электропривод способствует росту параметра Б, коренным образом изменяет условия работы, повышает качество продукции и облегчает труд оператора.

Глава 3 МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Статические нагрузки

Во время работы любого механизма в ней возникает некоторое противодействующее усилие. Например, при фрезеровании, сверлении, точении в месте соприкосновения инструмента и обрабатываемой детали появляется сила трения, всегда направленная против движения и стремящаяся затормозить движение. Если изменить направление вращения фрезы, сверла или детали на токарном станке, то и сила трения изменит свое направление. Значение ее будет зависеть от твердости материала, подачи и глубины резания. Такую силу называют *статической силой* сопротивления F_c , а момент ею вызванный – *статическим моментом* сопротивления M_c . Электродвигатель должен постоянно преодолевать этот момент, поэтому он и потребляет от сети электроэнергию.

Статический момент сопротивления, возникающий только при движении и всегда направленный против движения, называется *реактивным*. Большинство механизмов – вентилятор, насос, транспортные средства – имеют реактивный момент сопротивления.

Статический момент сопротивления, направленный всегда в какую-либо одну сторону, независимо от направления вращения, называют *активным*. Например, подъемное устройство поднимает груз. Вес груза направлен вниз и создает

$$M_c = GD / 2 \text{ (Нм)},$$

где G - вес груза, D - диаметр барабана, м.

Очевидно, что и при спуске груза направление M_c будет вниз. К механизмам с активным M_c относятся подъемные краны, лифты, шахтные подъемные машины, то есть механизмы, в которых преодолеваются силы тяжести.

Существуют механизмы, в которых двигатель преодолевает силы упругости. Например, если двигатель сжимает пружину, то момент сопротивления

направлен против движения; если же двигатель вращать в противоположном направлении, то момент пружины будет помогать вращению двигателя.

Существуют механизмы, в которых одновременно возникают оба вида моментов: реактивный и активный. Например, эскалатор метро, конвейер и канатная дорога, установленные наклонно, роторный эскалатор преодолевает силы тяжести и трения.

Следует отметить, что механизмов только с активным M_c не бывает. В любом подъемном механизме существуют силы трения и, следовательно, реактивный M_c , но он часто пренебрежимо мал.

На рис. 3.1. показаны механические характеристики, то есть зависимость угловой скорости от M_c для активного (кривая 1) и реактивного (кривая 2) моментов.

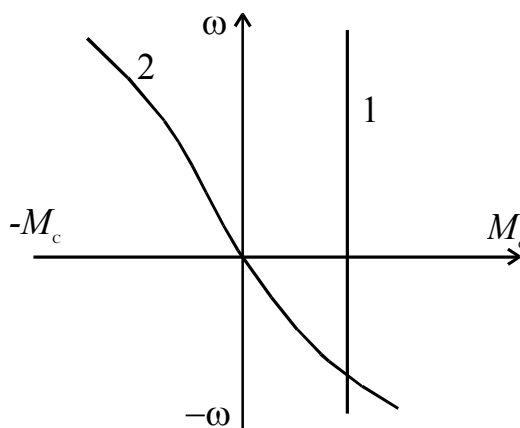


Рисунок 3.1 Механические характеристики $\omega = f(M_c)$ рабочих машин.

3.2 Уравнение движения электропривода

В механическом движении участвуют подвижная часть электродвигателя (ротор или якорь), элементы механического передаточного устройства и

рабочего органа машины. Совокупность этих элементов называют кинематической или механической частью электропривода.

Движение любого элемента механической части подчиняется известным из курса физики законом механики (в частности первому закону Ньютона). Поступательное и вращательное движение элемента описывается соответственно следующими уравнениями:

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}; \quad (3.1)$$

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}, \quad (3.2)$$

где $\sum F$ и $\sum M$ - соответственно совокупность сил и моментов, действующих на элемент; m и J - масса и момент инерции элемента; t - время.

В большинстве случаев масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, их производные оказываются равными нулю и уравнения (3.1) и (3.2) упрощаются:

$$\sum F = m \frac{dv}{dt} = ma; \quad (3.3)$$

$$\sum M = J \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon, \quad (3.4)$$

где $a = dv/dt$ и $\varepsilon = d\omega/dt$ - соответственно ускорения при поступательном и вращательном движении.

Уравнения (3.3) и (3.4) отражают то, что ускорение движения механического элемента пропорционально алгебраической сумме действующих на него сил (моментов) и обратно пропорционально его массе (моменту инерции).

Если

$$dv/dt = d\omega/dt = 0,$$

то

$$\sum F = 0; \sum M = 0. \quad (3.5)$$

Другими словами, элемент будет двигаться с неизменной скоростью (или находится в состоянии покоя, что является частным случаем движения с нулевой скоростью), если сумма сил или моментов, к нему приложенных, будет равна нулю. Такое движение называют установившимся.

При $\sum F > 0$ и $\sum M > 0$ элемент будет двигаться с ускорением, а при $\sum F < 0$ и $\sum M < 0$ – с замедлением. Таким образом, при неравномерном вращении всегда имеется некоторая разность между вращающим и моментом сопротивления:

$$M_{\text{дин}} = M - M_{\text{с}}, \quad (3.6)$$

где $M_{\text{дин}}$ - динамический момент, Н·м.

Уравнение (3.6) называется основным уравнением электропривода для вращательного движения. Для поступательного движения динамическая сила

$$F_{\text{дин}} = F - F_{\text{с}}$$

где F - движущая сила, Н; $F_{\text{с}}$ - статическая сила сопротивления, Н.

Примеры основного уравнения:

1) $M - M_{\text{с}} = -M_{\text{дин}}$ привод работает в двигательном режиме с замедлением ($-M_{\text{дин}}$);

2) $M - M_{\text{с}} = M_{\text{дин}}$ уравнение соответствует работе электропривода с ускорением при уменьшении нагрузки;

3) $-M + M_{\text{с}} = M_{\text{дин}}$ уравнение соответствует работе двигателя в тормозном режиме, но привод работает с ускорением.

3.3 Приведение моментов и сил сопротивления инерционных масс и моментов инерции

В большинстве практических случаев в инженерных расчетах при решении задач, не требующих большой точности, и для механических звеньев, обладающих небольшими зазорами и большой жесткостью, можно пренебречь зазорами и упругостью, приняв механические связи абсолютно жесткими. При этом допущении движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов, поэтому движение электропривода можно рассматривать на каком – либо одном механическом элементе. Обычно в качестве такого элемента принимают вал двигателя.

Приведение моментов сопротивления от одной оси вращения к другой может быть произведено на основании энергетического баланса системы. При этом потери мощности в промежуточных передачах учитываются введением в расчеты соответствующего КПД η_n . Обозначим через ω_M - угловую скорость вала производственного механизма. На основании равенства мощностей получим:

$$M_{c,m} \omega_M \frac{1}{\eta_n} = M_c \omega_D,$$

откуда

$$M_c = M_{c,m} \frac{\omega_M}{\omega_D} \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_{c,m} / (i \cdot \eta_n), \quad (3.7)$$

где $M_{c,m}$ - момент сопротивления производственного механизма; M_c – тот же момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, Н·м; $i = \omega_D / \omega_M$ – передаточное число редуктора.

При наличии нескольких ступеней передач между двигателем и механизмом с передаточными числами i_1, i_2, \dots, i_n и соответствующими КПД $\eta_{п1}, \eta_{п2}, \dots, \eta_{пn}$ момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, определяется формулой

$$M_c = M_{c,m} \frac{1}{i_1, i_2, \dots, i_n} \cdot \frac{1}{\eta_{п1}, \eta_{п2}, \dots, \eta_{пn}}. \quad (3.8)$$

Приведение моментов инерции к одной оси вращения основано на том, что суммарный запас кинетической энергии движущихся частей привода, отнесенный к одной оси, остается неизменным. В таком случае можно записать:

$$J \frac{\omega_d^2}{2} = J_d \frac{\omega_d^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2}, \quad (3.9)$$

откуда результирующий момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J = J_d + J_1 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_d} \right)^2 + \dots + J_n \cdot \left(\frac{\omega_n}{\omega_d} \right)^2, \quad (3.10)$$

где J_d – момент инерции ротора двигателя с муфтами или ведущими шестернями на нем.

Иногда в каталогах для двигателей указывается значение *махового момента* GD^2 , кгс·м². В этом случае моменты инерции ротора двигателя, кг·м², в системе СИ вычисляются по формуле:

$$J_p = GD^2 / 4. \quad (3.11)$$

Приведение масс, движущихся поступательно, осуществляется также на основании равенства запаса кинетической энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega_d^2}{2},$$

отсюда момент инерции, приведенный к валу двигателя,

$$J = m \cdot (v / \omega_d)^2. \quad (3.12)$$

3.4 Механические характеристики производственных механизмов

Установившиеся режимы

При рассмотрении работы электродвигателя, приводящего в действие производственный механизм, необходимо, прежде всего, выявить соответствие механических характеристик двигателя характеристике производственного механизма. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации электропривода необходимо изучить эти характеристики.

Зависимость между приведенными к валу двигателя угловой скоростью и моментом сопротивления механизма $\omega = f(M_c)$ называют механической характеристикой производственного механизма.

Различные производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Однако можно получить некоторые обобщения, если воспользоваться следующей эмпирической формулой:

$$M_c = M_0 + (M_{c.\text{ном}} - M_0) \cdot (\omega / \omega_{\text{ном}})^x. \quad (3.13)$$

где M_c – момент сопротивления производственного механизма при скорости ω ; M_0 – момент трения в движущихся частях механизма; $M_{c.\text{ном}}$ – момент сопротивления при номинальной скорости $\omega_{\text{ном}}$; x – показатель степени, характеризующий изменение момента при изменении скорости.

Приведенная формула позволяет разделить механические характеристики на следующие категории:

1. Не зависящая от скорости механическая характеристика (прямая 1 рис. 3.2). При этом $x=0$ и момент сопротивления M_c не зависит от скорости ω . Подобной характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, механизмы подачи станков, поршневые насосы при неизменной высоте подачи.

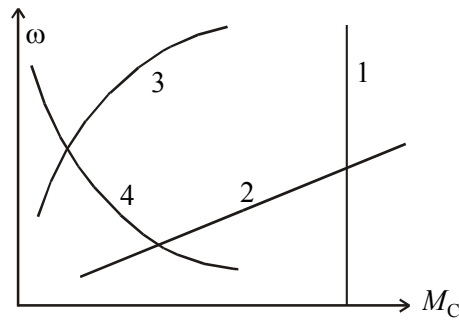


Рисунок 3.2

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика (прямая 2 на рис. 3.2). В этом случае $x = 1$ и момент M_c линейно зависит от скорости ω , увеличиваясь с ее возрастанием (для упрощения принято $M_0 = 0$)

3. Нелинейно-возрастающая механическая характеристика (кривая 3 на рис. 3.2). Этой характеристике соответствует $x = 2$; момент M_c здесь зависит от квадрата скорости. Механизмы, обладающие такой характеристикой (или с вентиляторным моментом), это центробежные насосы, гребные винты судов и т.п.

4. Нелинейно-спадающая механическая характеристика (кривая 4, рис. 3.2). При этом $x = 1$ и момент сопротивления M_c изменяется обратно пропорционально скорости, а момент потребления остается постоянной. Такой характеристикой обладают некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки, моталки в текстильной промышленности.

3.5 Время ускорения и замедления привода

Время переходных режимов привода: пуска, торможения, перехода от одной скорости к другой влияет на производительность механизма. Определение времени переходных процессов основано на интегрировании уравнения движения привода. Разделяя переменные, получаем:

$$dt = Jd\omega / (M - M_c) \quad (3.14)$$

время, необходимое для изменения скорости привода от ω_1 до ω_2 ,

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J(\omega_2 - \omega_1) / (M - M_c), \quad (3.15)$$

для решения этого интеграла необходимо знать зависимости моментов двигателя и механизма от скорости. В простейшем случае, приняв $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ и $J = \text{const}$, получим

$$t_{1,2} = J \cdot (\omega_2 - \omega_1) / (M - M_c). \quad (3.16)$$

Этим уравнением можно воспользоваться, например, для расчета времени пуска привода. Если значение момента двигателя во время пуска обозначить через $M_{\text{п}}$, то получим

$$t_{\text{п}} = J \cdot \omega_{\text{н}} / (M_{\text{п}} - M_c). \quad (3.17)$$

В тех случаях, когда динамический момент имеет отрицательное значение, привод замедляется. Для такого случая уравнение моментов будет иметь вид:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

Отсюда следует выражение для времени торможения:

$$t_{\text{T}} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J \cdot d\omega}{-(M + M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J \cdot d\omega}{M + M_c}. \quad (3.18)$$

Полагая в частном случае $J = \text{const}$, $M = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$, получаем

$$t_{\text{T}} = J \frac{\omega_1 - \omega_2}{M + M_c}. \quad (3.19)$$

Если момент двигателя и момент сопротивления находится в сложной зависимости от скорости, уравнение движения аналитически не решается. В

этом случае приходится пользоваться приближенными графическими или графо - аналитическими методами. В качестве примера рассмотрим метод пропорций и метод конечных приращений. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости $d\omega$ и времени dt малыми конечными приращениями $\Delta\omega$ и Δt . При этом предполагается, что в уравнение движения подставляются средние значения моментов для каждого интервала изменения скорости. Эти средние значения моментов находятся графическим путем на основании механических характеристик двигателя и производственного механизма.

Рассмотрим применение метода пропорций на примере привода вентилятора от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Уравнение движения при этом запишется как

$$M - M_c = J\Delta\omega / \Delta t$$

Считая, что в некотором интервале времени Δt разность моментов $M - M_c$ остается постоянной, получаем пропорцию:

$$(M - M_c) / J = \Delta\omega / \Delta t. \quad (3.20)$$

На рис. 3.3. показан ход графического построения кривой угловой скорости $\omega = f(t)$, выполненного на основании пропорции (3.20), и нахождение времени пуска двигателя. Построение ведется следующим образом. В левом квадрате строятся характеристики $M = f(\omega)$ и $M_c = f_1(\omega)$ - двигателя и механизма. Графически находится из разность $M - M_c = \psi(\omega)$ - кривая динамического момента, изображаемая в том же квадрате. Последнюю кривую заменяют ступенчатой с участками $M - M_c = \text{const}$. От числа участков зависит точность построений и конечные результаты. Точность тем выше, чем на большее число участков разбита кривая $M - M_c = \psi(\omega)$

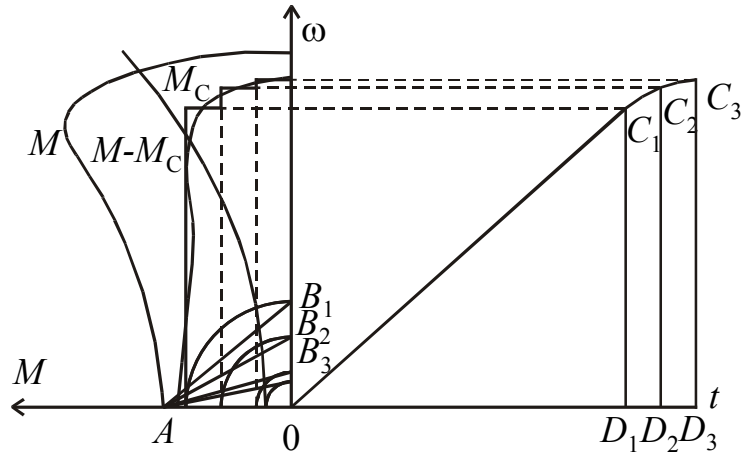


Рисунок 3.3

Полученные на отдельных участках значения динамических моментов откладываются вверх на оси ординат. Так для первого участка получен отрезок OB_1 , для второго – OB_2 , для третьего – OB_3 . Отмеченные на оси ординат точки B_1 , B_2 и B_3 соединяют прямыми с точкой A , находящуюся от начала координат на расстоянии, пропорциональном величине J . Затем от точки O проводят прямую OC_1 , параллельную OB_1 . Эта прямая характеризует искомую функцию $\omega = f(t)$ для первого участка моментов. Действительно $OB_1/OA = C_1D_1/OD_1$, но $OB_1 = M - M_c$; $OA = J$; $C_1D_1 = \Delta\omega_1$, следовательно, отрезок OD_1 соответствует времени пуска на первом участке, т.е. $OD_1 = \Delta t$. Проводя аналогичные построения для последующих участков, строим кривую скорости двигателя и находим искомое время пуска привода $t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$.

При построении следует учитывать масштабы величин, связанных соотношением

$$m_M / m_J = m_\omega / m_t$$

Если задаться масштабами m_M, m_ω, m_t , то можно определить m_J - масштаб момента инерции.

Глава 4. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1 Устройство и принцип действия

Асинхронной называется такая машина переменного тока, в которой частота вращения ротора n при определенной частоте переменного тока ($f = \text{const}$) изменяется в зависимости от нагрузки на валу (P или I) при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$.

По конструктивному признаку асинхронные машины бывают двух типов:

- а) бесколлекторные (с короткозамкнутым ротором);
- б) коллекторные (с фазным ротором).

На практике асинхронная машина чаще всего используется в качестве электродвигателя. Поэтому при изучении асинхронной машины в режиме двигателя необходимо уяснить:

- вопросы принципа действия и устройства;
- характеристики, позволяющие оценивать асинхронный двигатель как объект практического использования. К ним относятся естественные и искусственные механические, пусковые, регулировочные, тормозные и рабочие;
- область применения и методы выбора электродвигателей для конкретных производственных механизмов и различных режимов работы.

Асинхронный двигатель, как и любая машина переменного тока, состоит из двух основных частей – неподвижной части, называемой статором, и вращающейся части, называемой ротором.

Три неподвижные обмотки, размещенные в пазах полого цилиндра (рис. 4.1) под углом 120° друг другу, образуют статор, а четвертая – вращающаяся в пазах цилиндра, насаженного на вал, образует ротор (рис. 4.2).

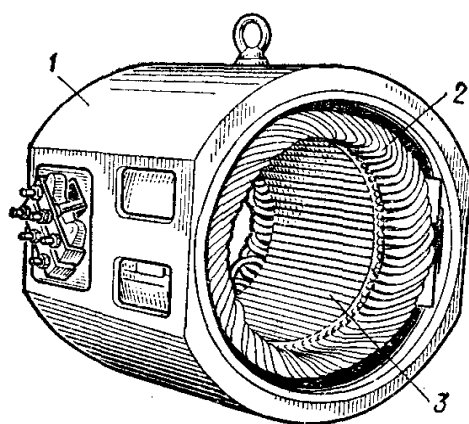


Рисунок 4.1

Сердечники статора и ротора в целях уменьшения вихревых токов в двигателе выполняются из листовой электротехнической стали. Статор состоит из корпуса 1, представляющего собой основание всего двигателя. Он выполняется из стали, чугуна или алюминия и должен обладать достаточной механической прочностью. В корпус 1 вмонтирован сердечник 3 статора, представляющий собой полый цилиндр, на внутренней поверхности которого имеются пазы для размещения обмотки 2. Обмотка статора состоит из трех отдельных частей, называемых фазами. Фазы могут быть соединены между собой звездой или треугольником.

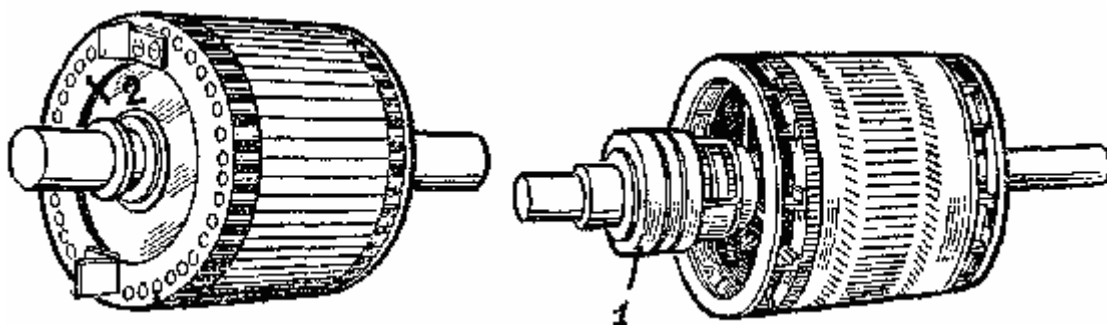


Рисунок 4.2

Обмотка ротора бывает 2-х видов – короткозамкнутая и фазная. На рис. 4.2, а изображен короткозамкнутый ротор, на рис. 4.2, б – фазный. Коротко-

замкнутая обмотка состоит из стержней 1, размещенных в пазах, и замыкающих колец 2. Стержни и замыкающие кольца выполняются из меди или алюминия. Фазная обмотка выполняется по тому же принципу, что и обмотка статора. Начала фаз обмотки присоединяются к контактными кольцам 1, изолированных друг от друга. К кольцам прижимаются медно-графитовые щетки (на рисунки не показаны). С помощью колец и щеток в цепь ротора можно, при необходимости, включать дополнительные резисторы R_d , которые могут быть либо пусковыми, либо регулировочными.

Для получения вращающегося магнитного поля используются три неподвижные обмотки статора. Соединим концы обмоток в один узел "n", а к начала подведем напряжение трехфазной системы U_1 (рис. 4.3).

При протекании тока в обмотке от начала к концу вокруг нее создается магнитный поток $\Phi_t = \Phi_m \cdot \sin \omega t$. Векторы магнитной индукции $\vec{B} = \Phi / S$ имеют указанные на рисунке направления. Мгновенные значения этих индукций можно выразить равенствами:

$$\begin{aligned} B_A &= B_m \cdot \sin \omega t, \\ B_B &= B_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ B_C &= B_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \tag{4.1}$$

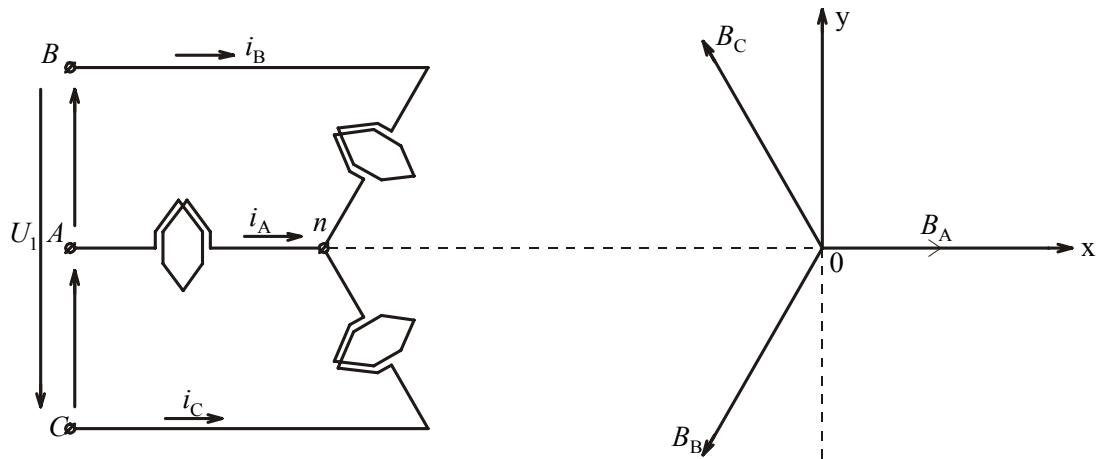


Рисунок 4.3

В результате наложения магнитных полей отдельных фаз в пространстве вокруг обмоток получается поле круговое и вращающееся.

Для доказательства определим проекции результирующего вектора $B_{рез}$ на взаимно перпендикулярные оси (ХОУ) по проекциям составляющих B_A, B_B, B_C . Если при этом модули проекций в произвольный момент времени равны по величине, то поле круговое, и если изменяется по закону синуса – вращающиеся.

Пусть ось ОХ совпадает с направлением вектора B_A . Проекция результирующего вектора на ось ОХ равна сумме проекций составляющих на эту ось:

$$\sum B_x = B_A \cdot \cos 0^0 + B_B \cdot \cos(-120^0) + B_C \cdot \cos(-240^0) = B_A - \frac{1}{2} B_B - \frac{1}{2} B_C. \quad (4.2)$$

Подставим вместо мгновенных значений из (4.1), тогда получится:

$$\begin{aligned} \sum B_x &= B_m \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= B_m \left(\sin \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right) = 1,5 B_m \sin \omega t. \quad (4.3) \end{aligned}$$

Составим аналогичное выражение для суммы проекций составляющих на ось OX:

$$\sum B_y = B_A \cos 0^0 + B_B \cos(-120^0) + B_C \cos(-240^0) = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_B + \frac{\sqrt{3}}{2} B_C. \quad (4.4)$$

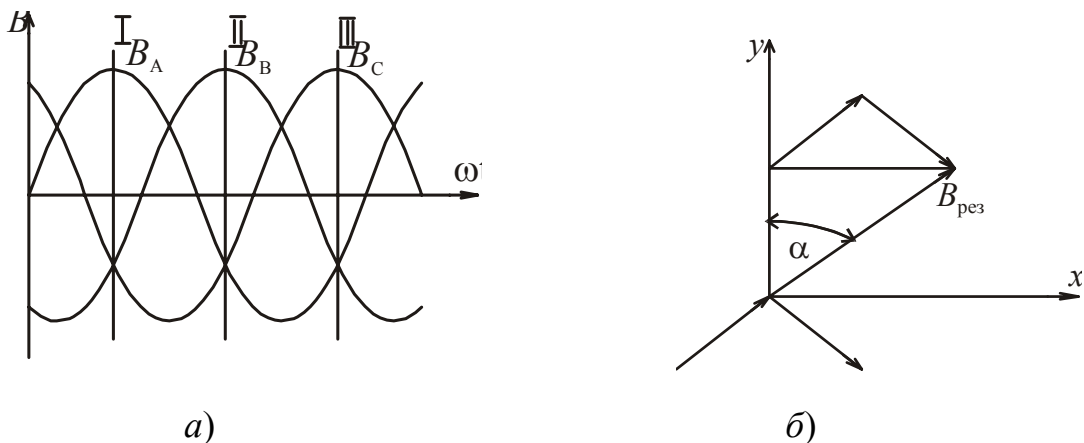
$$\sum B_y = B_m \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 1,5 B_m \cos \omega t. \quad (4.5)$$

Результирующий вектор находится по формуле:

$$B_{\text{рез}} = \sqrt{(\sum B_x)^2 + (\sum B_y)^2} = 1,5 B_m \quad (4.6)$$

Результирующий вектор получится постоянной длины и изменяется по закону синуса, значит поле круговое и вращающееся.

Для подтверждения приведем следующую иллюстрацию. Найдем графически величину результирующего вектора по графику изменения фазных индукций для различных моментов времени (рис. 4.4). По этим рисункам не трудно видеть, что результирующий вектор индукции $B_{\text{рез}}$ есть величина постоянная и последовательно проходит через те фазы, где индукция фазы достигает амплитудного значения ($B = B_m$).



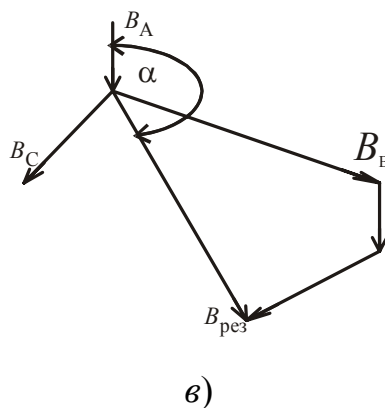


Рисунок.4.4

Угол α между результирующим вектором $B_{рез}$ и осью OY можно определить из соотношения:

$$tg \alpha = \frac{1,5B_m \sin \omega t}{1,5B_m \cos \omega t} = tg \omega t ,$$

то есть $\alpha = \omega t$.

– Установили, что магнитное поле вращается со скоростью ω - угловой частотой переменного тока.

– Пересечение проводников обмотки ротора вращающимся магнитным полем приводит к появлению Э.Д.С., а, следовательно, и тока i_p . В результате взаимодействия проводника ротора с током i_p и магнитного поля (B) возникает вращающий момент, увлекающий ротор вслед за вращением поля статора.

Рассмотрим, как это происходит.

Пусть поле статора вращается по направлению вращения часовой стрелки и имеет указанную на рис. 4.5 полярность. Если ротор неподвижен или вращается в ту же сторону медленнее ($\omega_p < \omega_0$), то линия поля статора перемещается относительно линии ротора слева направо, со скоростью $\omega_0 - \omega_p$.

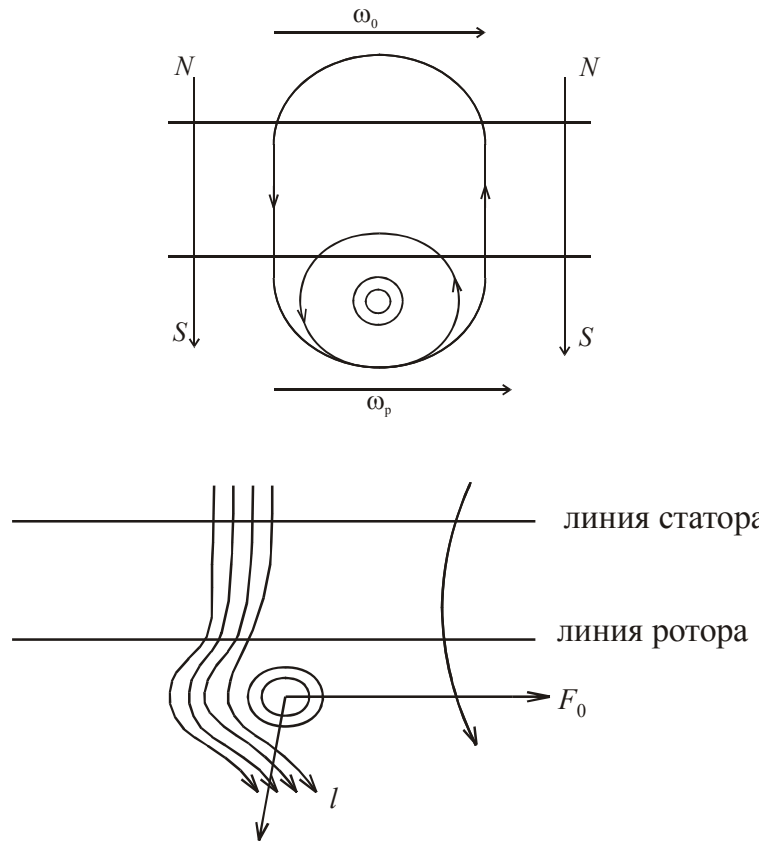


Рисунок.4.5

По правилу правой руки определяем направление индуцированной Э.Д.С. (e_p) и активной составляющей тока I_{pa} .

Последний создает свое круговое поле вокруг проводника указанного на рисунке направления. Это поле складывается с основным полем, в результате чего слева от проводника будет усиление, а справа-ослабление основного поля. Электромагнитное усиление F имеет направление слева направо, поэтому ротор увлекается во вращение в направлении вращения магнитного поля, если при этом $M_{вр} \geq M_c + M_{тр} = Fl$, где l - радиус ротора. Частота вращения ротора $\omega < \omega_0$ - частоты вращения поля.

Чтобы индуцируемая в единицу времени Э.Д.С. (e_p), а значит и ток ротора (i_p) были как можно большими, нужна большая разность между частотами вращения:

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p.$$

Выходим, что Э.Д.С. ротора пропорциональна относительной разности скоростей (ω_0 и ω).

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0}.$$

Полученная величина называется скольжением асинхронного двигателя, характеризует степень отставания ротора от поля статора и является важнейшим параметром асинхронного двигателя. Для различных типов и типовых размеров асинхронных двигателей номинальное скольжение составляет $s_H = 0,02 \dots 0,12$. Для малых мощностей $s_H = 0,02 \dots 0,05$, для больших – больше. Чем больше скорость вращения ротора – ω , тем меньше скольжение s , тем меньше Э.Д.С. ротора e_p , тем меньше вращающий момент $M_{вр}$. При $\omega = 0$, $s = 0$, $e_p = 0$, $M_{вр} = 0$. Как только на вал насаживается нагрузка, ротор начнет вращаться медленнее, это вызовет рост Э.Д.С., а значит момент вращения, способного преодолеть момент сопротивления и тормозной момент.

Итак, чтобы ротор вращался и преодолевал момент сопротивления и собственный тормозной момент он должен вращаться медленнее поля статора. В этом суть работы асинхронного двигателя.

Рост нагрузки на валу M_c обуславливает рост тока (I) в обмотках статора, то есть вызывает рост потребляемой мощности из сети. Неограниченный рост потребляемой мощности чреват опасностью термического разрушения изоляции обмоток статора.

4.2 Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

О степени допустимой загрузки двигателя без опасности термического разрушения изоляции можно судить по электромеханической характеристике, которая выражает зависимость момента вращения от скольжения:

$$M_{\text{вр}} = f(s) \quad (4.7)$$

Коль скоро асинхронный двигатель используется для вращения исполнительных механизмов машин, то нас в первую очередь должны интересовать момент вращения ($M_{\text{вр}}$), механическая мощность ($P_{\text{мех}}$) и взаимосвязь между ними.

Известно, что механическая мощность двигателя связана с моментом формулой:

$$M_{\text{вр}} = P_{\text{мех}} / \omega, \quad (4.8)$$

так как $\omega = \omega_0(1 - s)$, где для многополюсной машины $\omega_0 = \frac{\omega}{p}$, p - число пар полюсов, выражение для момента можно представить так:

$$M_{\text{вр}} = \frac{p}{\omega(1-s)} P_{\text{мех}}. \quad (4.9)$$

Механическая мощность из электромагнитного условия определяется формулой:

$$P_{\text{мех}} = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}, \quad (4.10)$$

где I_2 и R_2 - ток и сопротивление обмотки ротора. Так как $I_2 R_2 = E_2 \cos \psi_2$, а $E_2 / s = E_{2н}$ - Э.Д.С. ротора при наличии нагрузки на валу, то

$$M_{\text{вр}} = E_{2н} I_2 \cdot \cos \psi_2. \quad (4.11)$$

Подставим вместо Э.Д.С. ее значение $E_{2н} = 4,44 f \cdot w_2 \cdot \Phi_m$, тогда окончательное выражение для момента будет

$$M_{\text{вр}} = \kappa \cdot \Phi \cdot I_2 \cos \psi_2. \quad (4.12)$$

Вращающий момент пропорционален величине тока ротора и магнитного потока, созданного обмоткой статора.

В формуле (4.12) все три параметра зависят от скольжения s . Ток I_2 с ростом s увеличивается, так как растет Э.Д.С. E_2 . Сначала, пока $s\omega \cdot L_2 = x_2$ меньше R_2 , ток I_2 растет быстро, затем, когда $x_2 > R_2$, рост тока замедляется.

Коэффициент мощности ротора:

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s\omega \cdot L_2)^2}}. \quad (4.13)$$

С ростом скольжения s сначала $\cos \psi_2$ уменьшается медленно, а затем, когда $x_2 > R_2$ уменьшается быстрее.

С ростом скольжения растет ток I_1 в цепи обмотки статора, а следовательно $\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 z_1$ уменьшается, поэтому уменьшается магнитный поток

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot \omega_1}. \quad (4.14)$$

Итак, в формуле (4.12) поток Φ и $\cos \psi_2$ убывают с ростом скольжения, а ток I_2 - растет (рис.4.6). Если ток I_2 заменить через приведенное значение: $I_2 = k \cdot I'_2$, а $I'_2 = \frac{U'_2}{\sqrt{(r'_2/s)^2 + (x'_2)^2}}$, то уравнение (4.12) видоизменяется:

$$M_{\text{вр}} = \frac{3p}{\omega} \cdot \frac{U_2^2 \cdot R'_2 / s}{(R'_2 / s)^2 + (x'_2)^2} \quad (4.15)$$

или

$$M_{\text{вр}} = \frac{3p}{\omega \cdot s} \cdot \frac{U_1^2 \cdot R'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}, \quad (4.16)$$

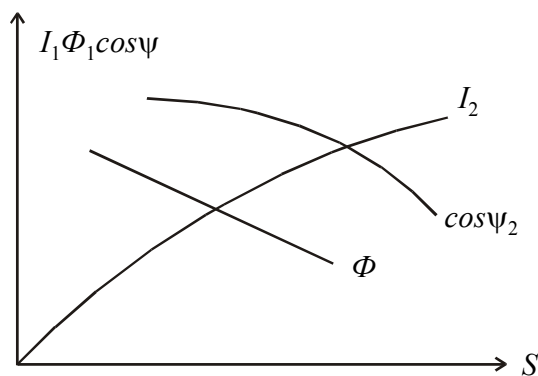


Рисунок 4.6

где R_1 и x_1 - активное и индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом. Некоторому скольжению, называемому критическим $/s_{\text{кр}}/$ соответствует максимальное значение вращающего момента $/M_{\text{вр}} = M_m/$. Чтобы найти его значение через параметры машины, продифференцируем (4.16) по ds и приравняем полученный результат к нулю.

Из полученного равенства определяется $s_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$ или

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{x_1 + x'_2}, \text{ т.к. } R_1 \ll x_1 \text{ и } x'_2.$$

Для различных типоразмеров машин критическое скольжение имеет значение $s_{кр} = 0,04 \dots 0,14$.

Графическое выражение (4.16) представлено на рис. 4.7, чаще механическую характеристику выражают как $\omega = f(m)$ (рис.4.8).

Участок характеристики от ω_0 до точки С называется устойчивым,

а участок CM_n – неустойчивым. В свою очередь устойчивый участок делится на две зоны: рабочую – $\omega_0 A$ и допустимого кратковременного перегруза – АС. Если момент сопротивления M_c окажется близким максимальному моменту M_m (рабочая точка А на характеристике окажется вблизи С), то при снижении нагрузки двигатель автоматически увеличивает угловую скорость вращения, то есть рабочая точка А на характеристике возвращается в исходное положение. Двигатель при работе на этом участке сохраняет способность к саморегулированию. На участке CM_n с ростом скольжения от $s_{кр}$ до 1 момент, развиваемый двигателем интенсивно уменьшается, то есть переходит в режим «опрокидывания» (короткого замыкания)

Если в (4.16) подставить значение $s_{кр}$, то получается выражение для определения максимального момента, развиваемого двигателем:

$$M_m = \frac{3p}{2\omega} \cdot \frac{U_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{3p}{2\omega} \cdot \frac{U_1^2}{R_1 + x_1 + x'_2}, \quad (4.17)$$

а при неизвестных сопротивлениях обмоток статора и ротора формулу (4.16) можно заменить экспериментальным уравнением

$$M_{вр} = \frac{2M_m \cdot (1 + s_{кр} \cdot R_1 / R'_2)}{s / s_{кр} + s_{кр} / s + 2s_{кр} R_1 / R'_2}, \quad (14.18)$$

получившее название формулы Класа.

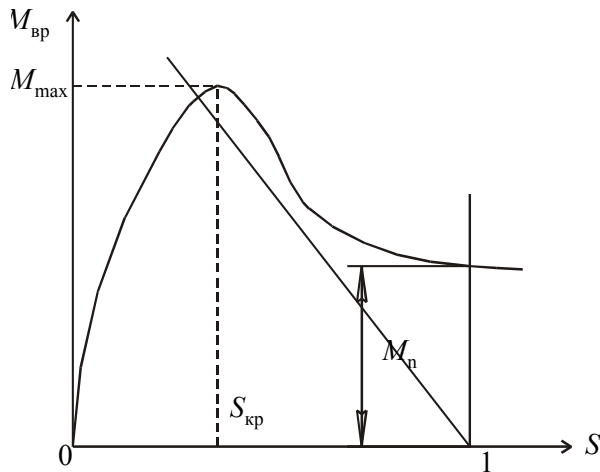


Рисунок 4.7

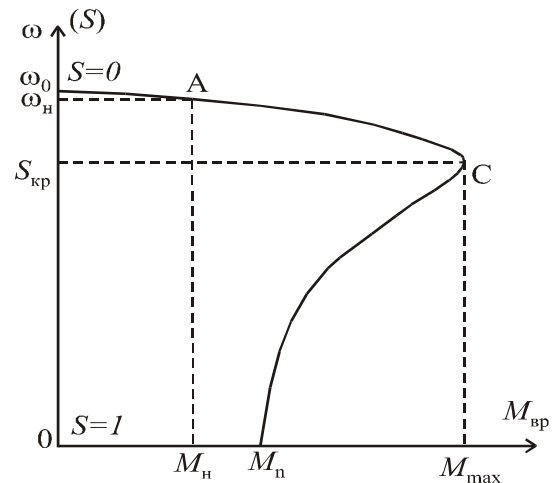


Рисунок 4.8

Для двигателей средней и большой мощности формулу (4.18) можно

представить в упрощенном виде:

$$M_{вр} = \frac{2M_m}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}.$$

Как рабочий, так и другие участки характеристики двигателя определяются качеством и свойствами изоляции обмотки статора, в частности, ее термической прочностью и виброустойчивостью.

Максимальный момент, развиваемый двигателем, определяет перегрузочную способность, выражаемую соотношением $\lambda = M_m / M_{ном}$.

Общепромышленная серия двигателей 4А имеет коэффициент перегрузочной способности $\lambda = 2,2$, а специальные высокомоментные двигатели имеют $\lambda = 2,3 \dots 3,3$.

4.3 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя понимают зависимости:

$$P_1, I_1, M, \omega, \eta, \cos \varphi = f(P_2) \text{ при } U_1 = \text{const и } f = f_{ном} = \text{const}$$

Эти характеристики представлены на рис. 4.9.

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, ротор вращается со скоростью $\omega = \omega_0$.

По мере увеличения нагрузки на валу скольжение возрастает, причем быстрее при больших нагрузках, чем при малых. При номинальной нагрузке обычно скольжение $s_{ном} = 1,5 \dots 5\%$. Такой узкий диапазон обусловлен жестким соотношением

$$s = \Delta P_{э2} / P_{эм},$$

где $\Delta P_{\omega 2}$ – потери мощности в обмотке ротора, $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность двигателя. Исходя из необходимости обеспечения высокого К.П.Д. это соотношение ограничено весьма узким пределом. В соответствии с этим зависимость $\omega = f(P_2)$ представляет собой кривую, весьма слабо наклонную к оси абсцисс. Так как в пределах до номинальной нагрузки $\omega \approx \text{const}$, то зависимость $M_1 = f(P_2)$ имеет почти линейный характер. Асинхронный двигатель потребляет из сети значительно отстающий от напряжения ток I_1 , почти независимый от нагрузки в пределах до $0,6P_{2\text{ном}}$. Поэтому во всем диапазоне изменения нагрузки $\cos \varphi < 1$, достигая максимума при $P_2 \approx (0,75 \dots 0,8)P_{2\text{ном}}$, а при холостом ходе $\cos \varphi_0 \leq 0,3$.

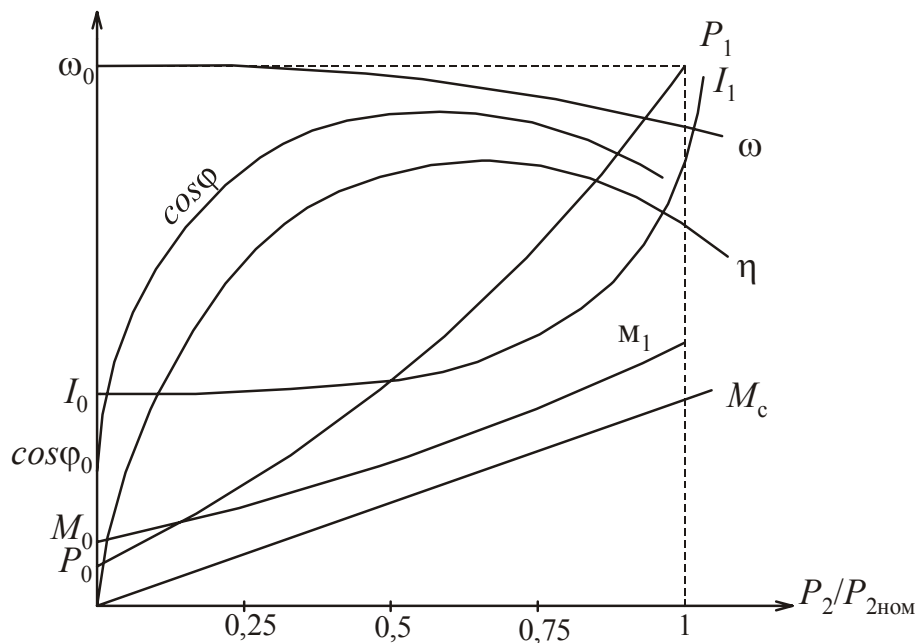


Рисунок. 4.9

Вращающий момент M_1 , развиваемый двигателем, уравнивается моментом сопротивления M_c и моментом M_0 , идущим на преодоление механических потерь в двигателе:

$$M_1 = M_c + M_0 = P_2 / \omega + M_0.$$

При холостом ходе двигателя вращающий момент $M_1 = M_0$, и с увеличением нагрузки на валу этот момент растет, причем из-за уменьшения угловой скорости ω ротора увеличение вращающего момента происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу, и кривая M_1 незначительно отклоняется кверху от прямой линии.

Ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, при малых нагрузках на валу имеет большую реактивную составляющую и очень малую резистивную. При

больших нагрузках резистивная составляющая быстро увеличивается, поэтому кривая тока резко огибается кверху.

Потребляемая мощность P_1 имеет почти линейный характер. Ее незначительное отклонение вверх объясняется увеличением электрических потерь в обмотках. Изменение $\cos \varphi$ при росте нагрузки происходит пропорционально росту резистивной составляющей тока I_1 . При увеличении нагрузки $\cos \varphi$ резко повышается, достигая наибольшего значения 0,8...0,9. При нагрузках $P_2 > P_{2\text{ном}}$ происходит некоторое снижение $\cos \varphi$, так как из-за увеличения скольжения растет $f_2 = sf_1$ и, следовательно, реактивное сопротивление ротора x_2 .

В асинхронных двигателях существуют потери в обмотках $\Delta P_{\text{э}1}$ и $\Delta P_{\text{э}2}$, потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$, потери механические $\Delta P_{\text{мех}}$ и дополнительные $\Delta P_{\text{доп}}$. Полные потери равняются сумме:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{э}1} + \Delta P_{\text{э}2} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}}$$

Кривая К.П.Д. имеет характер общий для любой электрической машины и трансформаторов. При холостом ходе $\eta = 0$, а с повышением нагрузки резко увеличивается, достигая максимального значения при равенстве переменных и постоянных потерь, то есть когда $\Delta P_{\text{э}1} + \Delta P_{\text{э}2} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}}$. Такое условие бывает при $P_2 = (0,65...0,75)P_{2\text{ном}}$. При дальнейшем росте нагрузки К.П.Д. начинает уменьшаться из-за интенсивного роста потерь мощности в обмотках, так как растет ток I_1 . Количественно К.П.Д. оценивается как

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta P_{\Sigma}) / P_1.$$

Глава 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическая машина постоянного тока используется на практике, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, то есть обладает свойством обратимости, впервые сформулированного Э.Х. Ленцем в 1835 году. В режиме генератора машина постоянного тока преобразует механическую работу, подводимую к валу от первичного двигателя, в электрическую энергию постоянного тока, а в режиме двигателя осуществляет обратное преобразование: электрическую энергию в механическую работу вращательного или поступательного движения.

Машина постоянного тока была первой электрической машиной-преобразователем электрической энергии в механическую работу – разработана в 1838г. Б.С. Якоби применил двигатель постоянного тока для привода паромы. С развитием техники переменного тока удельный вес машины постоянного тока в общем выпуске электрических машин постепенно уменьшался из-за более сложной конструкции и меньшей надежности. Вместе с тем у машин постоянного тока есть преимущества, обуславливающие их возрастающее сегодня применение в современной технике. Так, широкий диапазон и плавность регулирования частоты вращения обусловили применение двигателя постоянного тока в современном автоматизированном электроприводе.

5.1 Устройство и принцип действия машины постоянного тока

На рис. 5.1 представлена простейшая машина постоянного тока, а на рис. 5.2 дано схематическое изображение этой машины в осевом направлении.

Машина состоит из двух основных частей. Неподвижная часть (1) называется индуктором, состоит из полюсов и стального ярма, к которому прикрепляются полюсы.

Назначением индуктора является создание в машине рабочего магнитного потока.

Вращающаяся часть машины состоит из укрепленных на валу цилиндрического якоря (2) и коллектора (3). Якорь состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали, и обмотки, укрепленной на сердечнике якоря. Концы обмотки соединены с медными пластинами коллектора, число которых равно удвоенному числу витков. На коллектор наложены две неподвижные щетки (4), с помощью которых обмотки якоря соединяются с внешней цепью.

где $B_{\text{ср}}$ – среднее значение индукции на протяжении полюсного деления τ ; $\tau = \pi D_a / (2p)$ – полюсное деление; D_a – диаметр якоря.

Учитывая, что $B_{\text{ср}} \cdot l \cdot \tau = \Phi_0$,

получим

$$E = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \omega \cdot \Phi_0 = C\omega \cdot \Phi_0. \quad (5.1)$$

Если внешний участок цепи замкнуть на резистор R , то по цепи пойдет ток I_a . При этом на якорь, в обмотке которого ток I_a действует электромагнитный момент, противодействующий вращающему моменту первичного двигателя. Величина электромагнитного момента

$$M = N \cdot \frac{\Phi_0}{\tau \cdot 2a} \cdot I_a \cdot \frac{D_a}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi_0 \cdot I_a = C \cdot \Phi_0 \cdot I_a. \quad (5.2)$$

Ток в витках обмотки якоря I_a , как и э.д.с. e_a , переменный. Однако во внешней цепи направление тока будет постоянным, что обеспечивается работой коллектора.

Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразовывает переменный ток обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи.

Уравнение электрического состояния цепи якоря имеет вид

$$E = U + I_a \cdot R_a. \quad (5.3)$$

где R_a – сопротивление цепи якоря.

5.1.2 Режим двигателя

Если к обмотке якоря подвести напряжение от источника постоянного тока, на якорь будет действовать электромагнитный момент. Величина этого момента определяется формулой (5.2). При достаточном значении $M_{\text{эм}}$ якорь машины придет во вращение и будет развивать механическую мощность.. Момент $M_{\text{эм}}$ при этом является вращающим, тогда как в генераторе он противодействующий.

Если исходит из условия, что при той же полярности магнитного поля направление вращения генератора и двигателя (рис. 5.2) были одинаковы, то направление действия электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$, а следовательно, направление тока I_a у двигателя должно быть обратным по сравнению с током генератора.

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток в обмотке якоря и работает, таким образом, в качестве механического инвертора тока.

Проводники обмотки якоря двигателя также вращаются в магнитном поле, и поэтому в обмотке якоря двигателя тоже индуцируются Э.д.с. E_a , направление которой такое же, как и в генераторе. Таким образом, в двигателе Э.д.с. якоря направлена против тока и приложенного напряжения U .

Приложенное к якорю двигателя напряжение уравновешивается противо – Э.д.с. и падением напряжения в обмотке якоря :

$$U = E_a + I_a R_a . \quad (5.4)$$

5.1.3 Преобразование энергии в машине постоянного тока

В установившемся режиме работы в соответствии с первым законом Ньютона вращающие и противодействующие моменты уравновешивают друг друга. В генераторе электромагнитный момент

$$M_{эм} = M_B - M_{тр} - M_0 \quad . \quad (5.5)$$

где M_B – момент на валу генератора, развиваемый первичным двигателем; $M_{тр}$ – момент сил трения в подшипниках, о воздух и на коллекторе, M_0 – тормозной момент, вызываемый потерями на гистерезис и вихревые токи в сердечнике якоря.

В двигателе

$$M_{эм} = M_B + M_{тр} + M_0 \quad . \quad (5.6)$$

где $M_B = M_c$ – момент сопротивления на валу двигателя, развиваемый рабочей машиной (станок, насос, вентилятор).

В генераторе $M_{эм}$ является противодействующим, а в двигателе – вращающим, причем в обоих случаях $M_{эм}$ и M_B противоположны по направлению.

Развиваемая электромагнитным моментом мощность называется электромагнитной мощностью и равна

$$P_{эм} = M_{эм} \cdot \omega$$

или

$$P_{эм} = E_a \cdot I_a . \quad (5.7)$$

В обмотке якоря под действием Э.д.с. E_a и тока развивается электрическая мощность якоря $P_a = E_a \cdot I_a$, то есть электрическая мощность равна электро-

магнитной мощности якоря, что отражает процесс преобразования механической энергии в электрическую в генераторе и обратный процесс в двигателе.

Умножая (5.3) и (5.4) на для генератора будем иметь

$$UI_a = E_a I_a - I_a^2 R_a, \quad (5.8)$$

а для двигателя

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a. \quad (5.9)$$

Левые части этих выражений представляют собой электрические мощности на зажимах якоря, первые члены правых частей – электромагнитную мощность и последние члены – электрические потери мощности в якоре.

5.1.4 Способы возбуждения машин постоянного тока

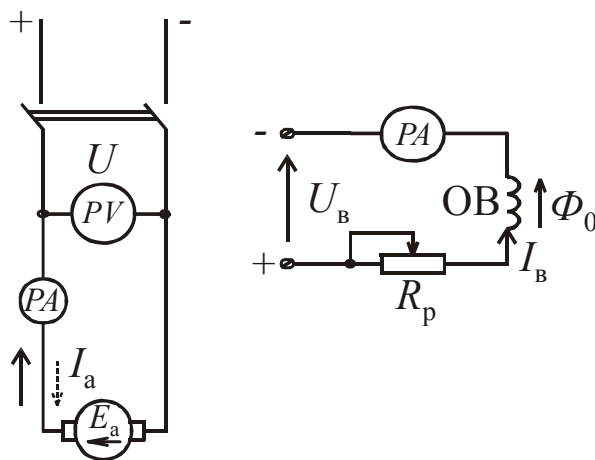
Свойства машин постоянного тока определяются в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают машины:

1) с независимым возбуждением, когда обмотка возбуждения питается от отдельного источника энергии постоянного тока (рис.5.3, а);

2) с параллельным возбуждением, когда обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря (рис.5.3, б);

3) с последовательным возбуждением, когда обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис.5.3, в);

4) со смешанным возбуждением, когда имеются две обмотки возбуждения: одна включается параллельно с якорем, другая последовательно с ней. (рис. 5.3, г) и двигателей независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (сплошные стрелки тока I_a – генераторный режим, пунктирные – двигательный режим).



а)

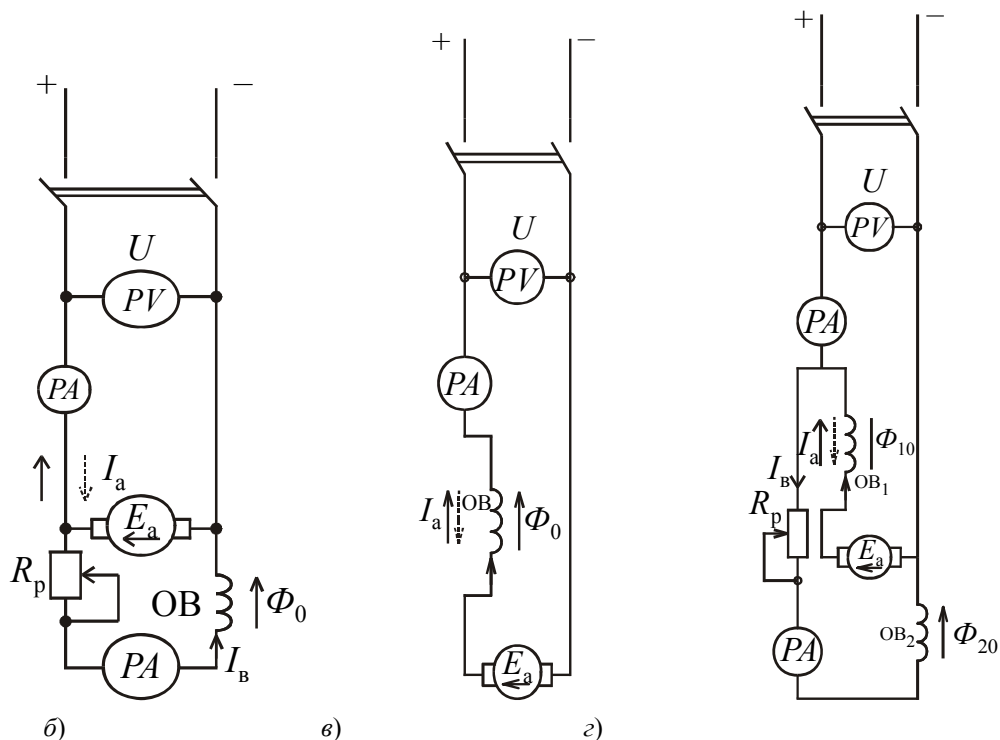


Рис.5.3.

5.2 Генераторы постоянного тока

Все генераторы различных способов возбуждения имеют одинаковую конструкцию и отличаются только выполнением обмотки возбуждения и способом ее подключения относительно якоря. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготавливают из провода малого сечения; ток в этих обмотках достигает (1,0...3) % от номинального тока якоря. Обмотка последовательного возбуждения имеет малое число витков из провода большого сечения. Ток возбуждения в этой обмотке равняется току якоря ($I_B = I_a$).

5.2.1 Генератор с независимым возбуждением

В этом генераторе (рис. 5.4) ток возбуждения I_B не зависит от тока якоря I_a , который равен току нагрузки I_H . Величина тока возбуждения определяется только положением регулировочного реостата R_p , включенного в цепь обмотки возбуждения:

$$I_B = U_B / (R_B + R_p)$$

где R_B – сопротивление обмотки возбуждения.

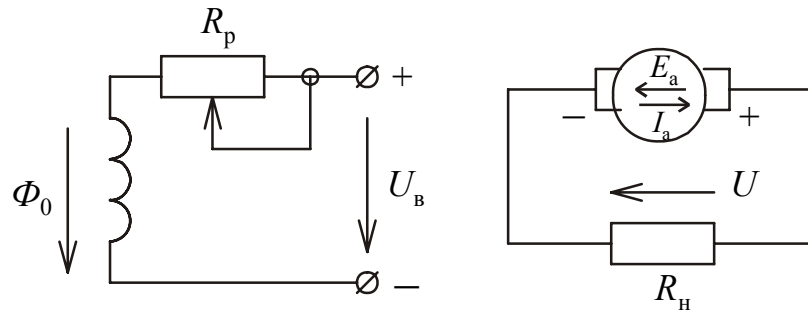


Рисунок 5.4.

Основными характеристиками, определяющими свойства генератора постоянного тока, являются характеристики холостого хода (магнитная характеристика), нагрузочная, внешняя и регулировочная.

Характеристикой холостого хода (рис. 5.5, а) называют зависимость $U = f(I_B)$ при $\omega = \text{const}$ и $I_a = I_H = 0$. При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение на зажимах якоря равно Э.Д.С. ($U = \overline{c\phi\omega} = E$). Обычно при получении характеристики холостого хода $\omega = \text{const}$, поэтому величина напряжения (Э.Д.С.) зависит только от магнитного потока, то есть от тока возбуждения. Поэтому эту характеристику иначе называют магнитной характеристикой машины.

Характеристику холостого хода легко получить экспериментально. Вначале устанавливают ток возбуждения таким, чтобы $U_0 \approx 1,25U_{\text{ном}}$; затем уменьшают ток возбуждения до нуля. При $I_B = 0$ в обмотке якоря остаточным потоком индуктируется остаточное напряжение $U_{\text{ост}} \approx (0,02 \dots 0,04)U_{\text{ном}}$.

Нагрузочную характеристику, отражающую зависимость $U = f(I_B)$ при $I_H = \text{const}$, получают аналогичным путем. Она проходит ниже характеристики холостого хода. Разность ординат этих кривых обусловлена размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения в якорной цепи.

Внешней характеристикой (рис. 5.5, б) называют зависимость $U = f(I_H)$ при $I_B = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$. В режиме нагрузки напряжение генератора

$$U = E - I_a R_a.$$

С увеличением нагрузки напряжение уменьшается по двум причинам:

– из-за увеличения падения напряжения на сопротивлении цепи якоря $\Delta U_a = I_a R_a$;

– из-за уменьшения Э.Д.С. E в результате размагничивающего действия реакции якоря.

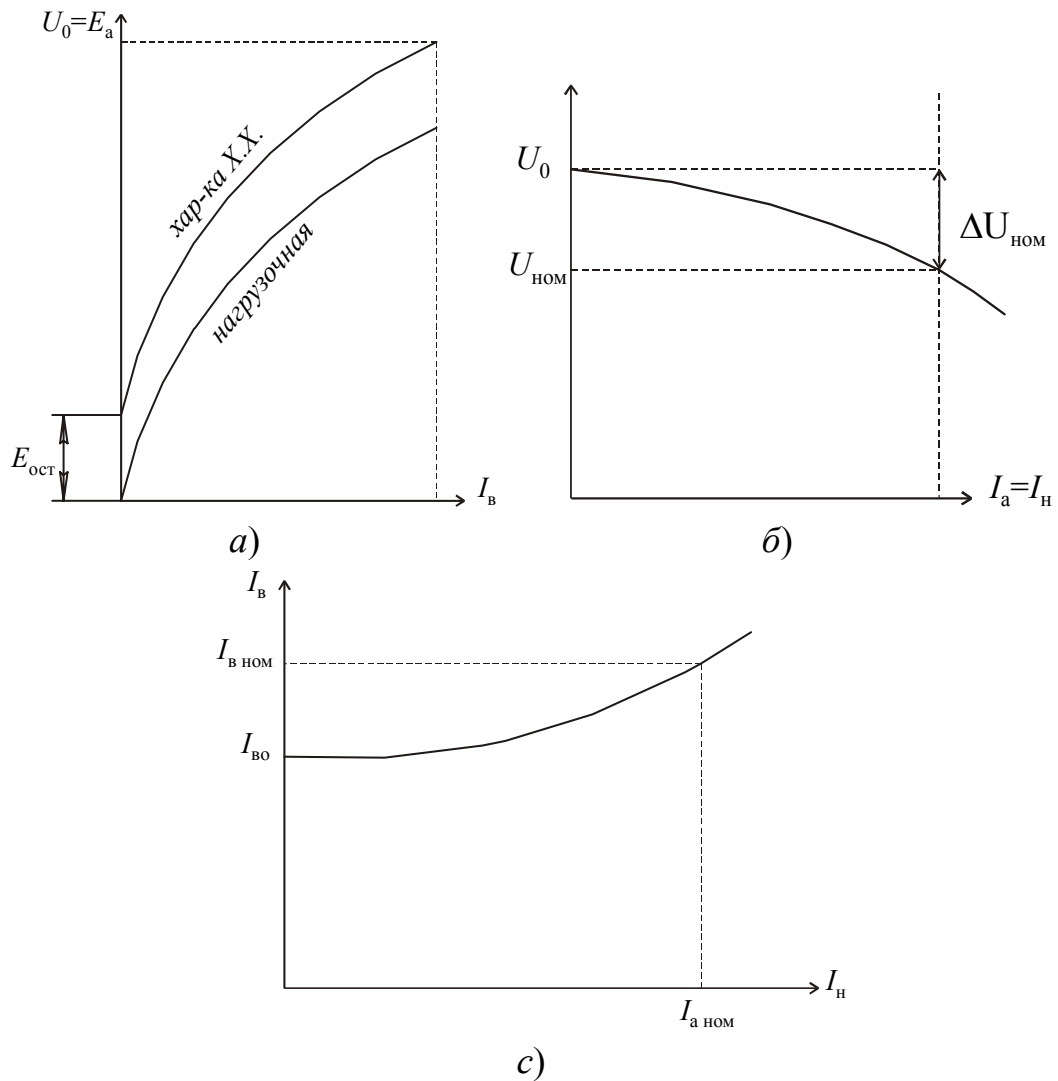


Рисунок 5.5

Изменение напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода

$$\Delta U = (U_0 - U_{НОМ}) / U_{НОМ} \approx (0,05 \dots 0,15) U_{НОМ}$$

Регулировочной характеристикой (рис. 5.5, в) называют зависимость $I_B = f(I_H)$ при $U = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$. Она показывает каким образом следует регулировать ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении нагрузки. Очевидно, что по мере роста нагрузки нужно увеличивать ток возбуждения.

5.2.2 Генератор с параллельным возбуждением

В этом генераторе (рис.5.6, а) обмотка возбуждения присоединена параллельно нагрузке. Следовательно, в машине используется принцип само-

возбуждения, при котором ток в обмотке возбуждения обусловлен Э.Д.С. самого якоря.

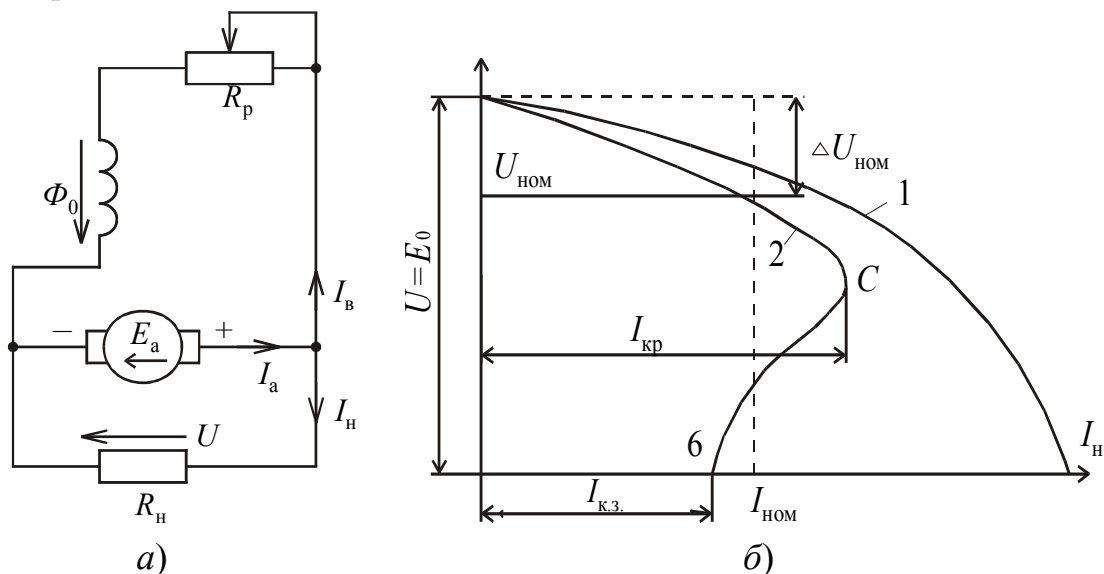


Рисунок 5.6.

Внешняя характеристика данного генератора представляет собой зависимость $U = f(I_H)$ при $\omega = \text{const}$ и $R_p = \text{const}$ (рис.5.6, б кривая 2). Она располагается ниже внешней характеристики генератора независимого возбуждения (кривая 1). Объясняется это тем, что существует третья причина – уменьшение тока возбуждения $I_B = U / (R_B + R_p)$, который зависит от напряжения Э.Д.С.

5.2.3 Генератор со смешанным возбуждением

В этом генераторе (рис. 5.7, а) имеется две обмотки возбуждения: параллельная и последовательная (вспомогательная).

Согласованное включение двух обмоток возбуждения позволяет получать приблизительно постоянное напряжение при изменении нагрузки. Внешние характеристики генератора при согласованном и несогласованном включении представлены на рис. 5.7, б (кривые 1 и 2 соответственно).

Подбирая число витков последовательной обмотки, так чтобы при номинальной нагрузке создаваемое ею напряжение $\Delta U_{\text{посл}}$ компенсировало падение напряжения ΔU при работе только одной параллельной обмотки. При этом напряжение U при изменении нагрузки от нуля до $I_{\text{ном}}$ остается практически без изменения. Если последовательную обмотку включить наоборот, то ее намагничивающая сила будет направлена встречно намагничивающей силе параллельной обмотки. В результате Э.Д.С.. $E = c\omega(\Phi_{01} - \Phi_{02})$ и внешняя характеристика будет крутопадающая (кривая 2).

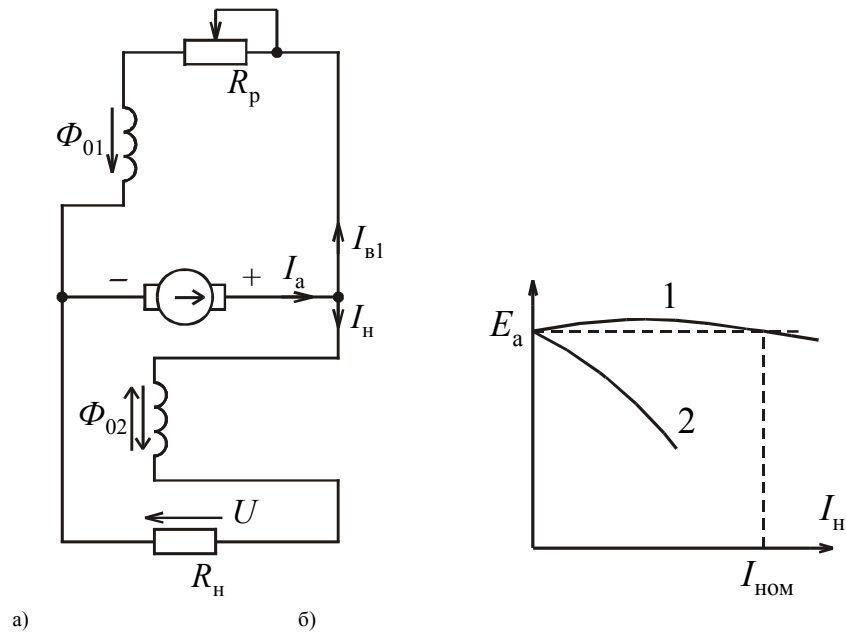


Рисунок 5.7

5.3 Электродвигатели постоянного тока

Машина постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением (рис.5.8), подключенная к сети с напряжением U будет работать в двигательном режиме, если $U > E$.

При этом ток в цепи якоря I_a будет противоположно направлению Э.Д.С. В соответствии с этим электромагнитный момент $M_{эм}$ будет вращающим. Уравнение электрического состояния цепи якоря имеет вид:

$$U = E_a + I_a R_a. \quad (5.10)$$

При работе машины в двигательном режиме Э.Д.С.. E_a и вращающий момент M определяется теми же формулами, что и для генератора:

$$E = c \omega \Phi$$

$$M = c I_a \Phi. \quad (5.11)$$

Если (5.11) подставить в (5.10), можно получить формулу для определения скорости вращения:

$$\omega = \frac{U}{c \Phi} - \frac{M R_a}{c^2 \Phi^2}$$

или

$$\omega = \omega_0 - \Delta \omega. \quad (5.12)$$

где $\omega_0 = U / (c\Phi)$ – скорость вращения при холостом ходе;
 $\Delta\omega = MR_a / (c^2\Phi^2)$ – уменьшение скорости, обусловленное ростом момента
 сопротивления на валу.

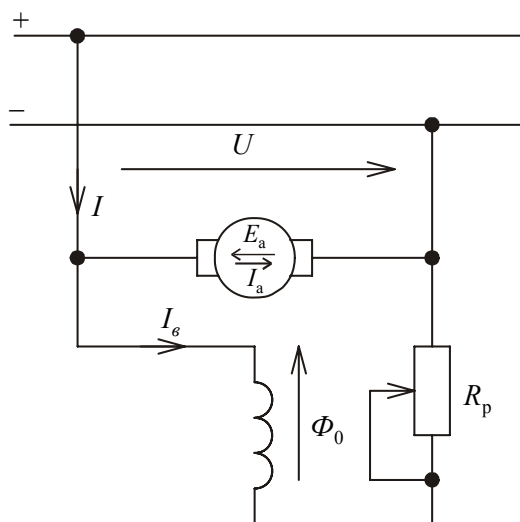


Рисунок 5.8

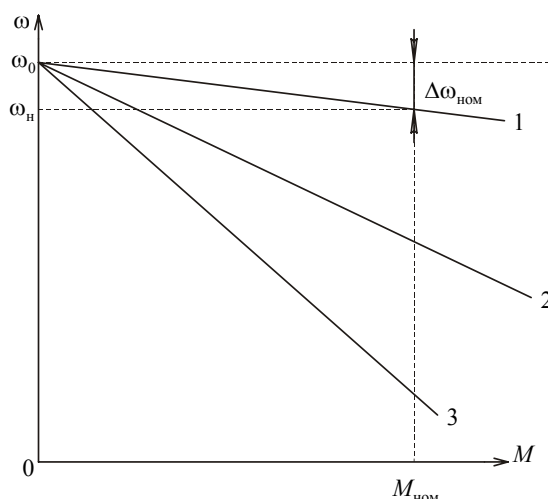


Рисунок 5.9.

При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря и номинальном напряжении механическая характеристика будет весьма жесткой, то есть имеет слабый наклон относительно оси моментов. Такая характеристика называется естественной (прямая 1 на рис. 5.9).

При включении в цепь якоря добавочного резистора R_d угол наклона механической характеристики возрастает (прямые 2,3 на рис. 5.9). Чем больше добавочное сопротивление, тем больше угол наклона, то есть тем «мягче» характеристика. Такие характеристики называются искусственными.

Регулировочный реостат R_p позволяет изменять ток возбуждения двигателя I_B и, следовательно, магнитный поток Φ . Как видно из (5.12), при этом будет изменяться и скорость вращения ω . В цепь обмотки возбуждения выключатели и предохранители не устанавливают, так как при разрыве цепи возбуждения (при $I_B = 0$) и малой нагрузке на валу скорость вращения резко возрастает (двигатель идет в «разнос»). При этом сильно увеличивается ток якоря и возникает круговой огонь на коллекторе.

5.3.1 Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

На рис. 5.10 представлены рабочие характеристики двигателя постоянного тока. Они являются зависимостями потребляемой мощности P_1 тока $I_a \approx I_H$, скорости вращения ω , момента M и коэффициента полезного действия η от полезной мощности P_2 при $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$.

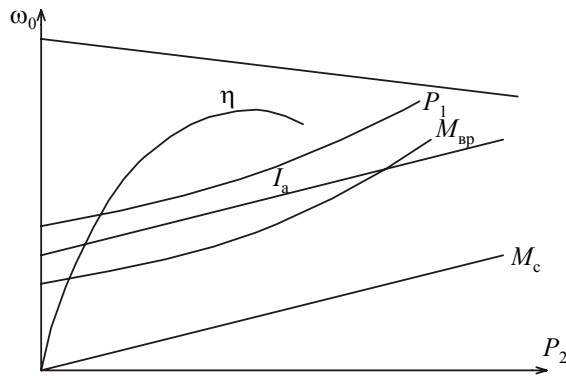


Рисунок 5.10

Зависимость $\omega = f(P_2)$ называется скоростной характеристикой. Скорость вращения получается из уравнения (5.12):

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi}. \quad (5.13)$$

Так как $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$, то скорость вращения зависит от падения напряжения $I_a R_a$ и потока реакции якоря Φ_a . С увеличением нагрузки, то есть тока якоря I_a скорость вращения уменьшается, тогда как от второй причины – увеличивается, поскольку реакция действует размагничивающим образом. Первый фактор – нормальное явление, т.к. повышает устойчивость работы двигателя, второй фактор – крайне нежелательное. Для его нейтрализации двигатель снабжается небольшой последовательной обмоткой стабилизирующей, магнитный поток которой $\Phi_{ст}$ равняется потоку реакции якоря $\Phi_я$ и противоположный по знаку. В результате действия всех факторов скоростная характеристика получается прямолинейной со слабым наклоном к оси мощностей.

При известном характере $\omega = f(P_2)$ нетрудно определить закон изменения $M = f(P_2)$. Момент сопротивления на валу M_c изменяется по линейному закону, а вращающий момент двигателя $M_{вр} = P_2 / \omega$. Если бы была $\omega = \text{const}$, то вращающий момент также изменялся бы линейно. Но ω уменьшается с ростом нагрузки, поэтому кривая $M_{вр}$ слегка огибается кверху.

Так как $M_{вр} = c\Phi I_a$, то кривая тока $I_a(P_2)$ имеет аналогичный с моментом характер.

Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет типичный для всех типов электрических машин характер, быстро растет при увеличении нагрузки от холостого хода до $P_{2\text{ном}}/4$; достигает при $P_{\text{ном}}/2$ значения, близкого к предельному, и затем в пределах изменения нагрузки от $P_{2\text{ном}}/2$ до $P_{2\text{ном}}$ остается почти постоянным. Обычно у двигателей малой мощности $\eta = 0,78 \dots 0,85$, у крупных машин $\eta = 0,86 \dots 0,94$. Величина К.П.Д. обусловлена потерями мощности, которые связаны с нагревом обмотки якоря $\Delta P_{\text{эа}}$, а также с нагревом остальных частей машины из-за гистерезиса и вихревых токов $\Delta P_{\text{ст}}$ и, наконец, с механическими и дополнительными потерями ($\Delta P_{\text{мех}}, \Delta P_{\text{доп}}$).

Потери $\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{пост}}$ неизменны при постоянной скорости вращения и токе возбуждения и не зависят от нагрузки машины.

Потери в меди $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{эа}} + \Delta P_{\text{в}} = I_{\text{а}}^2 R_{\text{а}} + I_{\text{в}}^2 (R_{\text{в}} + R_{\text{р}})$ считаются переменными и обусловлены изменением нагрузки.

Потребляемая из сети мощность $P = P_2 + \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$, а К.П.Д. $\eta = P_2 / P_1$.

5.4 Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением

В этом двигателе (рис. 5.11, а) ток возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{а}}$, поэтому магнитный поток Φ является функцией тока якоря, то есть нагрузки. При токе якоря $I_{\text{а}} < (0,8 \dots 0,9) \cdot I_{\text{ном}}$, когда магнитная система машины не насыщена $\Phi = \kappa I_{\text{а}}$, причем коэффициент пропорциональности κ в значительном диапазоне нагрузок остается практически постоянным. При дальнейшем возрастании тока якоря поток Φ растет медленнее, так как магнитная система переходит в состояние насыщения. При $I_{\text{а}} > I_{\text{ном}}$ можно считать, что поток $\Phi = \text{const}$.

Учитывая, что $\Phi = \kappa \cdot I_{\text{а}}$, уравнение механической характеристики можно записать как

$$\omega = \frac{U - I_{\text{а}} \cdot (R_{\text{а}} + R_{\text{в}} + R_{\text{р}})}{с\kappa\kappa_{\text{а}}} = \frac{U}{с\kappa\kappa_{\text{а}}} - \frac{\sum R}{с\kappa} \quad (5.14)$$

так как $I_{\text{а}} = \sqrt{M / с\kappa}$, то

$$\omega = \frac{\sqrt{с\kappa} \cdot U}{с\kappa \cdot \sqrt{M}} - \frac{\sum R}{с\kappa} \quad (5.15)$$

если обозначить $\frac{1}{\sqrt{c_k}} = C_1$, $\frac{\sum R}{c_k} = c_2$, то уравнение механической характеристики будет

$$\omega = c_1 \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2. \quad (5.16)$$

При токе якоря $I_a > I_{\text{НОМ}}$ зависимость $\omega = f(M)$ (рис.5.11, б) становится практически линейной.

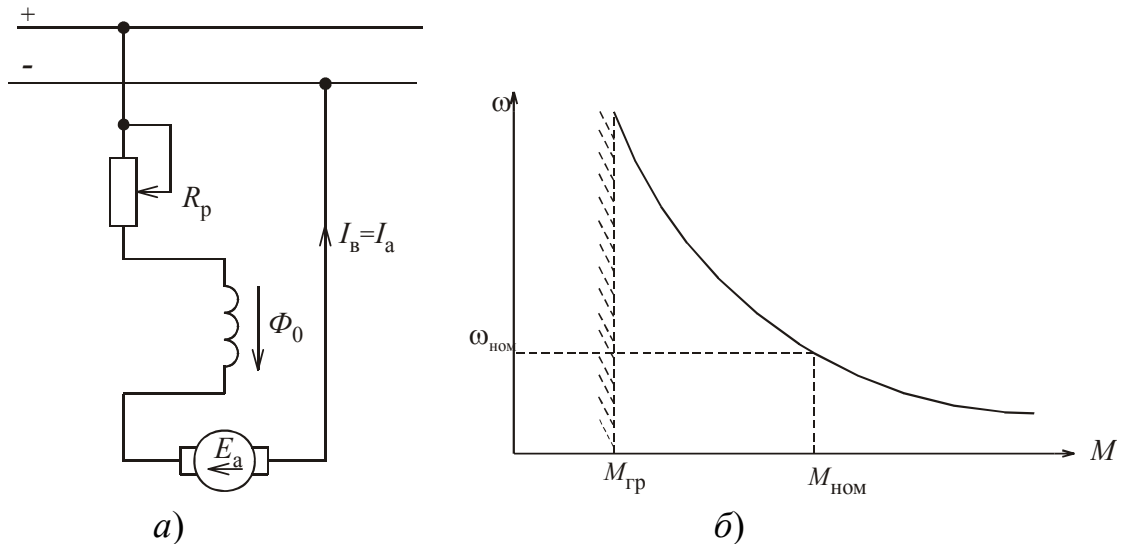


Рисунок 5.11.

Поскольку у двигателей параллельного возбуждения $M \sim I_a$, а у двигателей последовательного возбуждения приблизительно $M \sim I_a^2$ и при пуске допускается $I_{\text{ап}} = (1,5 \dots 2)I_{\text{НОМ}}$, то двигатели последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с двигателем параллельного возбуждения. Кроме того, у двигателей параллельного возбуждения $\omega \approx \text{const}$, а у двигателей последовательного возбуждения $\omega \sim U / \sqrt{M}$. Поэтому у двигателей параллельного возбуждения

$$P_2 = \omega M \sim M,$$

а у двигателей последовательного возбуждения

$$P_2 = \omega M \sim \sqrt{M},$$

таким образом, у двигателей последовательного возбуждения при изменении момента сопротивления на валу ($M = M_{\text{ст}}$) в широких пределах мощность изменяется в меньших пределах, чем у двигателей параллельного возбуждения.

Поэтому для двигателей последовательного возбуждения менее опасны перегрузки по моменту. В связи с этим двигатели последовательного возбуждения имеют существенные преимущества в случае тяжелых пусков и изменения момента нагрузки в широких пределах. Они широко применяются для

электрической тяги (трамвай, троллейбус, электровоз и тепловоз на железной дороге) и в подъемных установках.

5.5 Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения

В этом двигателе (рис. 5.12, а) магнитный поток Φ создается в результате совместного действия двух обмоток возбуждения – параллельной и последовательной. Поэтому его механическая характеристика (рис. 5.12, б) располагается между характеристиками двигателей с параллельным (прямая 1) и последовательным (кривая 2) возбуждением. Эта характеристика представлена в виде кривой 3. Одним из достоинств двигателя со смешанным возбуждением является при достаточной мягкости механической характеристики возможность работать в режиме холостого хода, так как ω_0 имеет конечное значение.

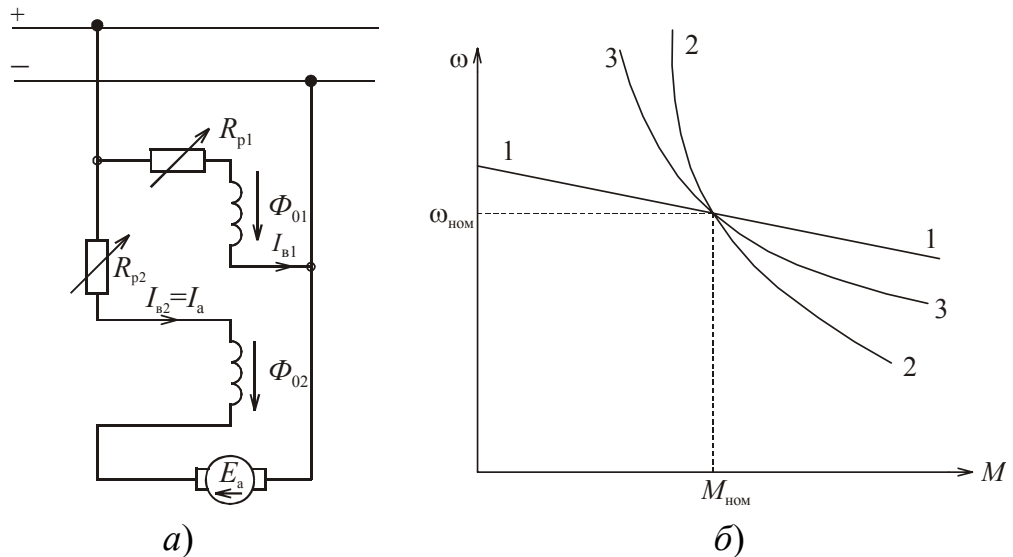


Рисунок 5.12

Таким образом, двигатель со смешанным возбуждением обладает всеми преимуществами как машины с параллельным и машины с последовательным возбуждением.

Глава 6. Синхронные машины

6.1 Принцип действия синхронной машины

Статор 1 синхронной машины (рис.6.1, а) выполнен так же, как и асинхронный: на нем расположена трехфазная обмотка (Ax , $Bу$, Cz). Обмотку ротора, питающегося от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения Φ .

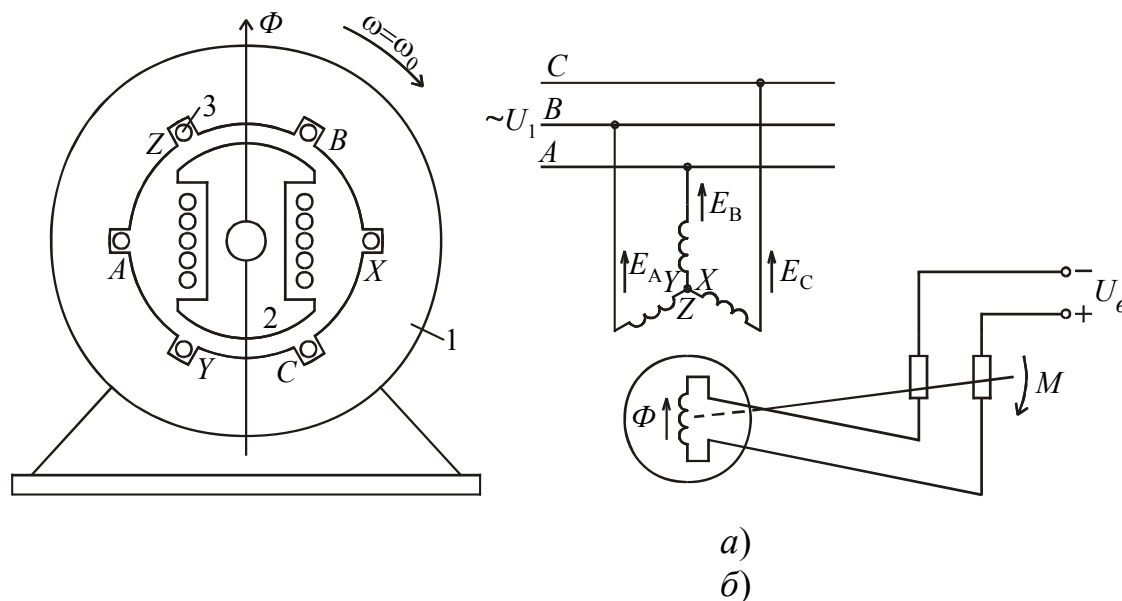


Рисунок .6.1

Вращающуюся обмотку ротора 4 соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6. При вращении ротора 2 с некоторой скоростью ω поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора 3 и индуцирует в ее фазах переменную Э.Д.С. E , изменяющуюся с частотой

$$f_1 = p\omega / 2\pi .$$

Если обмотку статора включить в трехфазную сеть, то в ней возникнут токи (I_A, I_B, I_C), создающие магнитное поле, вращающееся с неизменной синхронной скоростью ω при постоянной частоте тока f_1 . Поток обмотки ротора вращаясь вместе с ротором со скоростью ω , будет неподвижно относительно поля статора. Машина переменного тока, скорость вращения ротора которой находится в строгой зависимости от частоты тока сети и равна скорости вращения магнитного поля, участвующего в процессе преобразования энергии называется *синхронной*.

В синхронной машине обмотку, в которой наводится Э.Д.С. (E_A, E_B, E_C) и протекает ток нагрузки (I_A, I_B, I_C), называют обмоткой яко-

ря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения – индуктором. Следовательно, в машине на рис. 6.1, статор является якорем, а ротор – индуктором.

Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку. Или параллельно с сетью, которой подключены другие генераторы. При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, то есть работать генератором или двигателем.

В результате взаимодействия вращающегося поля статора с током I_B , протекающим в обмотке ротора, создается электромагнитный момент $M_{эм}$, который при работе машины двигателем будет вращающим, а при работе генератором – тормозным.

Таким образом, синхронная машина имеет следующие особенности, характерные для установившихся режимов работы:

а) ротор машины, работающей как в двигательном, так и генераторном режимах, вращается с постоянной угловой скоростью вращающегося магнитного поля, то есть $\omega = \omega_0$;

б) частота изменения Э.Д.С. E , индуктируемой в обмотке якоря (статора), пропорциональна угловой скорости вращения ротора;

в) в обмотке ротора Э.Д.С. не индуктируется, а ее намагничивающая сила определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы.

В машине с неподвижным якорем применяют две конструкции ротора: явнополюсную (рис. 16.2 .а) и неявнополюсную (рис. 6.2 .б). Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя и большим числом полюсов. Обмотку возбуждения выполняют в этом случае в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и укрепляют при помощи полюсных наконечников.

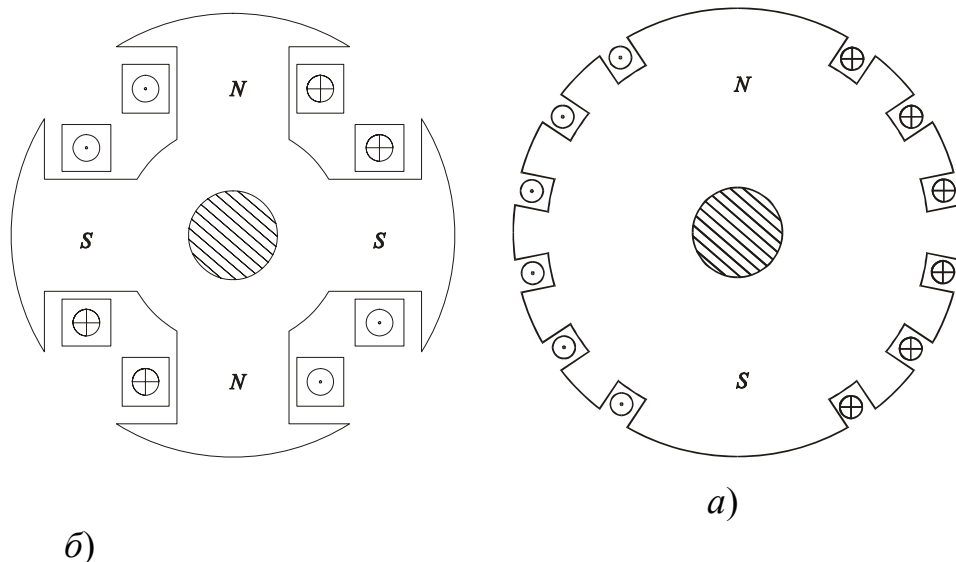


Рисунок. 6.2

Двух и четырехполюсные машины, работающие при угловых скоростях 157 и 314 рад/с (1500 и 3000 об/мин) изготавливают, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условию обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора.

6.2 Синхронный двигатель

Как было указано выше, синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу приложить момент сопротивления. При этом машина начинает потреблять из сети активную мощность и развивать вращающий момент. Скорость вращения ротора остается неизменной, жестко связанной с частотой сети соотношением $\omega = \omega_0 = 2\pi f_1 / p$, что является важнейшим эксплуатационным свойством синхронных двигателей.

6.2.1 Векторные диаграммы

Для явнополюсной и неявнополюсной машины комплексные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} -\underline{U}_c &= \underline{E}_0 - jI_d x_d - jI_q x_q; \\ -\underline{U}_c &= \underline{E}_0 - jI_a x_{сн} \end{aligned} \right\} , \quad (6.1)$$

где $I_d x_d$ – продольные составляющие тока якоря и индуктивного сопротивления обмотки якоря, обусловленного продольной составляющей потока реакции якоря соответственно; $I_q x_q$ – поперечные составляющие тока якоря и индуктивного сопротивления обмотки якоря, обусловленного поперечной составляющей потока реакции якоря соответственно; $x_{сн} = x_a + x_{sa}$ – синхронное индуктивное сопротивление машины; x_{sa} – индуктивное сопротивление обмотки якоря, обусловленное потоком рассеивания.

Построение векторных диаграмм по уравнениям (рис. 6.1 и рис. 6.3., а и б) рекомендуется начать с изображения векторов \underline{U}_c и $-\underline{U}_c$. Далее строится вектор \underline{I}_a , резистивная составляющая которого совпадает с направлением вектора \underline{U}_c , и определяет вектор \underline{E}_0 .

При построении диаграммы для явнополюсной машины (рис. 6.3, а) нужно вначале определить направление вектора \underline{E}_0 прибавив к $-\underline{U}_c$ вспомогательный вектор $-jI_a x_q$.

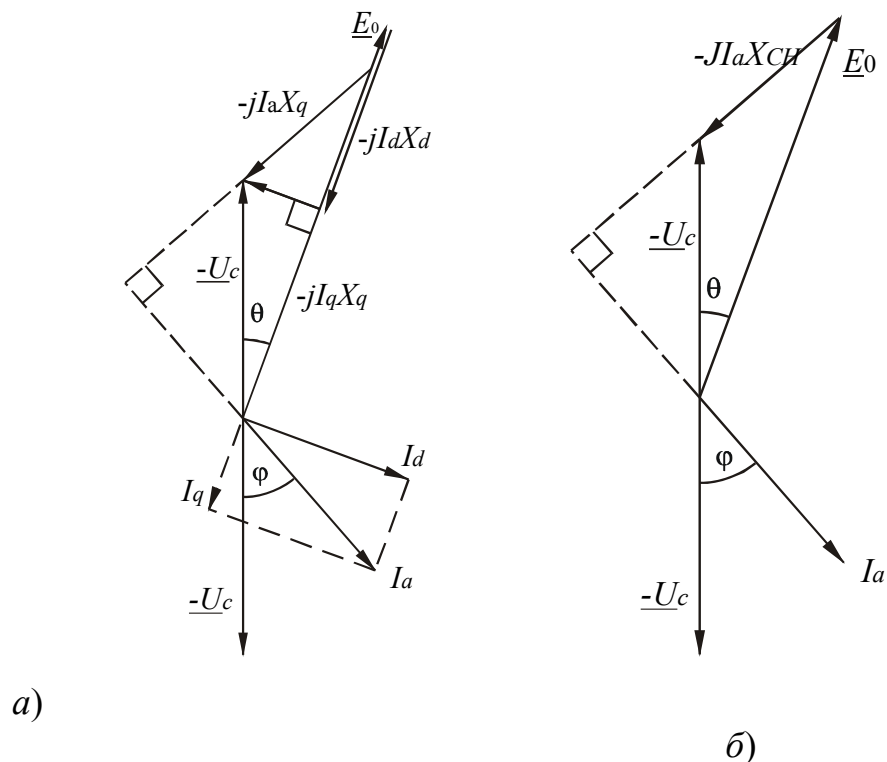


Рисунок 6.3

Для выяснения свойств синхронного двигателя рассмотрим его работу при изменении момента сопротивления M_c и постоянном токе возбуждения; при этом для упрощения рассуждений будем пользоваться векторной диаграммой неявнополюсной машины. Допустим, что двигатель работает при

$\cos \varphi = 1$, чему на векторной диаграмме (рис. 6.4, а) соответствует ток I_{a1} и угол θ_1 . С повышением нагрузки увеличивается угол между векторами \underline{E}_0 и $-\underline{U}_c$ до некоторого значения θ_2 , так как вращающий момент $M_{вр} = M_c$ пропорционален $\sin \theta$.

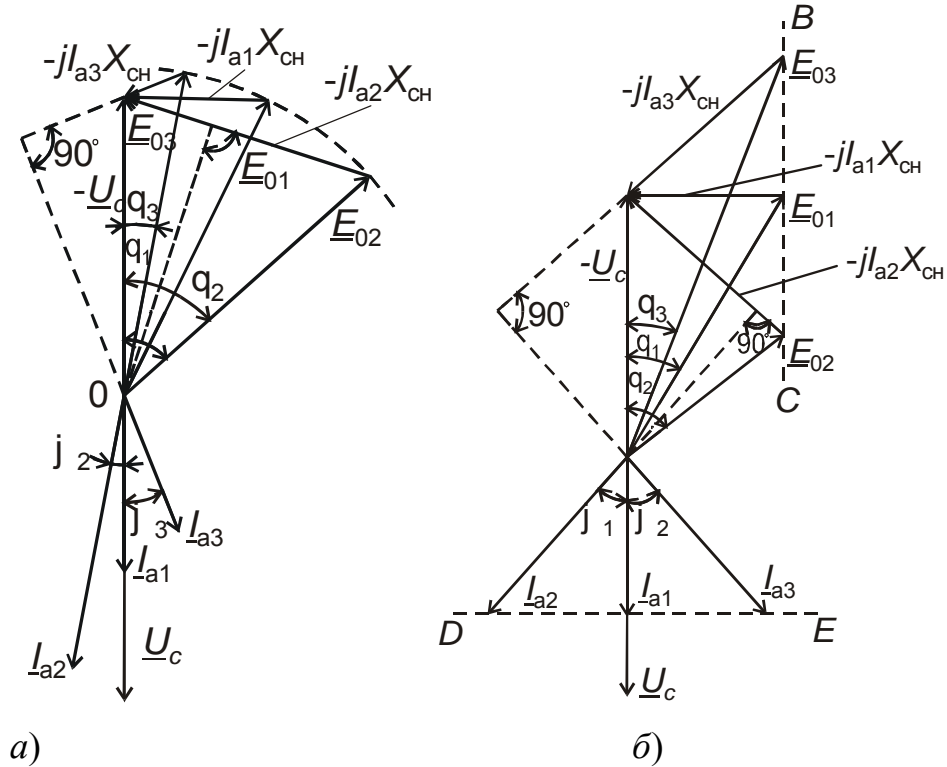


Рисунок 6.4

При этом конец вектора \underline{E}_0 перемещается по окружности с радиусом E_0 , и при принятых условиях ($I_B = \text{const}, E_0 = \text{const}, U_c = \text{const}$) вектор тока I_a также поворачивается вокруг точки 0, располагаясь перпендикулярно вектору $-jI_a x_{сн}$.

Из диаграммы видно, что ток I_{a2} будет иметь отстающую реактивную составляющую. Если нагрузка снизится, то угол θ уменьшится до θ_3 . При этом ток I_{a3} будет иметь опережающую реактивную составляющую.

Следовательно, изменение активной мощности синхронного двигателя приводит к изменению его $\cos \varphi$, : при уменьшении нагрузки вектор тока поворачивается в сторону опережения и двигатель может работать с $\cos \varphi = 1$ или с опережающим током; при увеличении нагрузки вектор тока поворачивается в сторону отставания и $\cos \varphi$ уменьшается.

Если при неизменной нагрузке менять ток возбуждения, то будет меняться только реактивная мощность, то есть $\cos \varphi$. Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 6.4, б. Если двигатель работает с $\cos \varphi = 1$, то этому режиму соответствуют Э.Д.С. E_{01} и угол θ_1 . При уменьшении тока возбуждения Э.Д.С. E_0 снижается до E_{02} . Поскольку активная мощность неизменна, из условия $P = P_{эм} = mU_c(E_0 / x_{сн}) \sin \theta = \text{const}$ получим, что $E_{01} \sin \theta_1 = E_{02} \sin \theta_2$. Отсюда следует, что конец вектора \underline{E}_0 при изменении тока возбуждения I_B будет перемещаться по прямой ВС параллельной вектору U_c . Вектор $-jI_a x_{сн}$ поворачивается вокруг точки А, оставаясь перпендикулярной вектору тока \underline{I}_a . Конец последнего описывает прямую ДК, перпендикулярной вектору U_c . Поэтому при недовозбуждении ток \underline{I}_a будет отставать от напряжения U_c , то есть двигатель потребляет из сети реактивную мощность Q , а при перевозбуждении ток \underline{I}_a будет опережающим, то есть двигатель будет отдавать в сеть реактивную мощность.

6.2.2 Рабочие характеристики

Рабочие характеристики (рис. 6.5) представляют собой зависимость тока I_a , потребляемой мощности P_1 , К.П.Д. η и $\cos \varphi$ от полезной мощности P_2 при ($I_B = \text{const}, f_1 = \text{const}, U_c = \text{const}$). Зависимость $P_1 = f(P_2)$ имеет практически линейный характер. Ток двигателя в режиме холостого хода имеет реактивный характер, а по мере роста нагрузки растет резистивная его составляющая, в связи, с чем зависимость $I_a = f(P_2)$ является нелинейной.

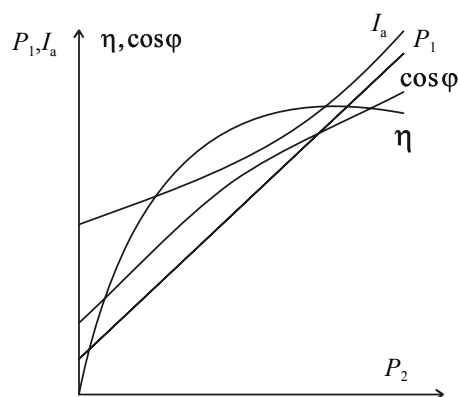


Рисунок.6.5.

Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет характер, общий для всех электрических машин. Синхронные двигатели могут работать при $\cos \varphi = 1$, но обычно их вы-

бирают на работу при номинальной нагрузке с опережающим током (когда $I_B > I_{B.ном}$), при этом $\cos \varphi_{ном} = /0,8...0,9/$.

В этом случае улучшается суммарный $\cos \varphi$, сети, от которой питаются синхронные двигатели, так как создаваемая ими реактивная мощность Q потребляется асинхронными двигателями, работающими параллельно.

В качестве достоинств и недостатков следует заметить:

Достоинства синхронных двигателей

1. Возможность работать с $\cos \varphi = 1$ и опережающим током, это приводит к улучшению $\cos \varphi$, сети, а также к уменьшению размеров самого двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя подобной мощности. При работе с опережающим током синхронный двигатель работает генератором реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что приводит к снижению потребления этой мощности от генераторов электростанций;

2. Менее чувствителен к колебаниям напряжения, так как его максимальный момент $M_m \sim U_c$, а у асинхронного двигателя $M_m \sim U_c^2$;

3. Имеет строго постоянную угловую скорость вращения независимо от момента сопротивления на валу.

Недостатки синхронных двигателей

1. Наличие контактных колец, щеток и пусковой обмотки усложняют конструкцию, что снижает надежность;

2. Сравнительно сложный пуск в ход;

3. Скорость вращения ротора можно регулировать только изменением частоты переменного тока f .

Глава 7. Микромашины устройств автоматики

Широко распространенными элементами автоматики и вычислительной техники являются электрические машины. Это, как правило, машины небольшой мощности от 15 до 500..600 Вт, которые принято называть электрическими микромашинами. Электрические микромашины в системах автоматики, телемеханике и вычислительной технике выполняют различные функции: приводят в движение всевозможные механизмы и узлы; обеспечивают дистанционное управление, регулирование и контроль; обеспечивают преобразование механических величин в электрические, и наоборот, электрических величин одного вида – в электрические другого вида; обеспечивают работу следящих систем; производят преобразование координат и пр.

Большое количество всевозможных микромашин, исчисляемое десятками миллионов штук в год, выпускается для бытовой техники. Они обеспечивают работу холодильников, стиральных машин, пылесосов, магнитофонов, кофемолок, соковыжималок, вентиляторов, электробритв и пр.

В зависимости от назначения все электрические микромашины можно разделить на две большие группы:

А – общепромышленного (широкого) применения.

Б – автоматических устройств.

Разделение это несколько условно, так как иногда одна и та же машина применяется и в промышленности, и в бытовой технике, и в устройствах автоматики.

А. Электрические микромашины общепромышленного применения. В эту группу входят в основном микроэлектродвигатели. По роду тока их разделяют на двигатели переменного, постоянного тока и универсальные, способные работать как от сети переменного, так и от сети постоянного тока.

В качестве микродвигателей переменного тока в настоящее время используют асинхронные, синхронные и коллекторные микромашины.

Асинхронные и синхронные микродвигатели бывают трехфазными, однофазными и универсальными. Последние работают как от трехфазной, так и от однофазной сети переменного тока. Большинство асинхронных микродвигателей имеют короткозамкнутый ротор. Некоторые выпускаются с полым ферромагнитным ротором. Однофазные двигатели могут быть либо с пусковыми фазосдвигающими элементами (конденсатором), либо с пусковыми постоянно включенными элементами (с пусковым и рабочим конденсаторами). Синхронные микродвигатели – это реактивные, гистерезисные двигатели и двигатели с постоянными магнитами. Коллекторные двигатели могут

быть постоянного, переменного тока и универсальными. Коллекторные двигатели постоянного тока выпускаются либо с параллельным (независимым), либо с последовательным возбуждением, либо с постоянными магнитами.

подавляющее большинство микродвигателей переменного тока широкого применения выпускаются для работы от сети с частотой 50 Гц и стандартными напряжениями 127, 220, 380В. Микродвигатели постоянного тока работают от сетей с напряжениями 110 и 220В. Лишь незначительная часть их выпускаются для работы при пониженном напряжении 6, 12, 24В.

В. Электрические микромашины автоматических устройств. Микромашины этой группы значительно разнообразнее машин группы А. Они используются либо как силовые, либо как исполнительные двигатели следящих систем, либо как различные преобразовательные элементы.

В зависимости от функций, выполняемые в схемах автоматики, телемеханике и вычислительной технике, то есть по своему назначению, все они разделяются на пять групп:

1. Силовые микродвигатели автоматики;
2. Исполнительные или управляемые;
3. Информационные микромашины;
4. Электронные преобразователи;
5. Электрические микромашины гидроскопических систем.

7.1 Асинхронные микродвигатели общепромышленного применения

Трехфазные микродвигатели. Свойства трехфазных микродвигателей мало отличаются от свойств трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором средней и большой мощности. Особенность их состоит в том, что по сравнению с двигателями средней и большой мощности они имеют повышенное активное сопротивление обмотки ротора и работают поэтому с повышенным скольжением при номинальном режиме. Это значит, что механическая характеристика в рабочей зоне является более «мягкой», то есть диапазон возможного регулирования скорости вращения более шире.

Однофазные и двухфазные микродвигатели. Однофазные асинхронные двигатели питаются от сети однофазного тока, но обмотка статора может

быть при этом однофазной или двухфазной. Устройство ротора однофазного двигателя такое же, как у трехфазного.

Если статор имеет лишь одну обмотку ОВ, питаемую от сети гармоническим током (рис.7.1) тогда намагничивающая сила F_a этой обмотки создает пульсирующий в пространстве магнитный поток Φ , который наводит Э.Д.С. и ток в обмотке ротора. Намагничивающие силы статора F_c и ротора F_p будут равны и противоположны по направлению; результирующая намагничивающая сила равна нулю и, следовательно, пусковой момент равен нулю, ротор не вращается. Однако если ротор при помощи какой-либо посторонней силы привести во вращение, то в дальнейшем он будет вращаться, хотя эта сила (момент) будет снята. Это явление можно объяснить, если представить пульсирующее поле в виде суммы двух вращающихся в противоположных направлениях.

Магнитных полей (рис. 7.2). Один из потоков обозначим Φ_1 , другой – Φ_2 . Амплитудные значения вращающихся потоков одинаковы и равны половине амплитуде пульсирующего потока Φ .

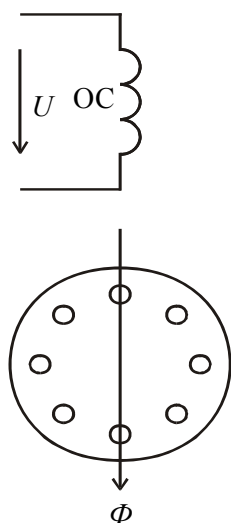


Рисунок 7.1

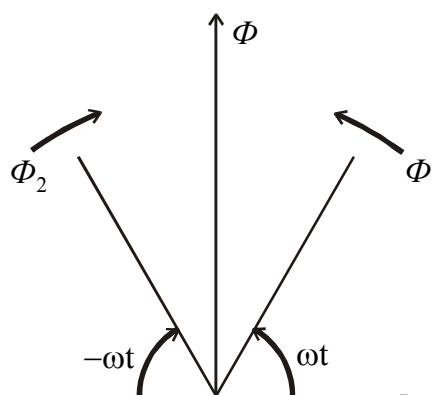


Рисунок 7.2

Рассматривая вращающиеся поля независимо, можно установить, что одно поле, взаимодействуя с ротором, создает вращающий момент одного направления M_1 , а другое поле – момент противоположного направления M_2 . Тогда результирующий момент $M = M_1 - M_2$. На рис. 7.3 показаны механические характеристики $\omega(M_1)$ и $\omega(M_2)$. Механическая характеристика однофазного двигателя $\omega(M)$ находится графическим сложением этих характеристик.

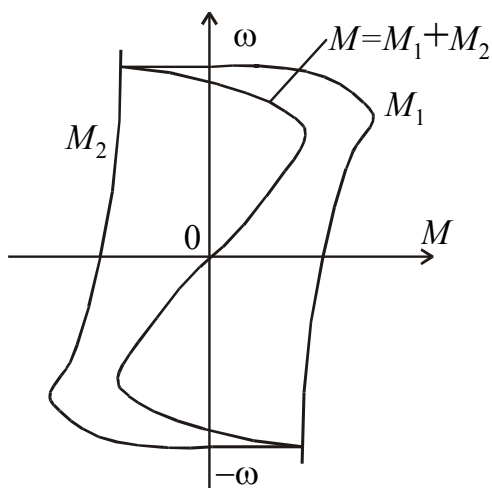


Рисунок 7.3

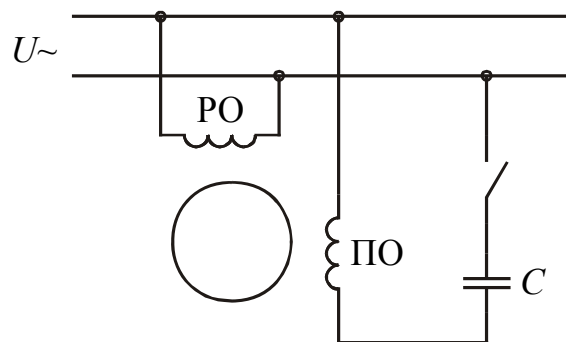


Рисунок 7.4

Из механической характеристики однофазного двигателя видно, что пусковой момент равен нулю. Для того, чтобы однофазный двигатель пустить в работу не прибегая к сторонней силе, на статоре размещают вторую обмотку, сдвинутую в пространстве на 90° относительно первой (рис. 7.4). В цепь второй обмотки включен конденсатор C , создающий в цепи этой обмотки фазовый сдвиг тока. Первую обмотку называют рабочей (РО), вторую – пусковой (ПО). Токи РО и ПО образуют вращающееся магнитное поле, создающее при взаимодействии с ротором вращающий момент, приводящий ротор двигателя во вращение. После разгона ротора пусковая обмотка может быть отключена от сети.

Однофазный асинхронный двигатель с расщепленными полюсами (рис.7.5) имеет статор с явно выраженными полюсами, на которых расположена рабочая обмотка РО. Каждый полюс разделен на две части. На узкой части помещен короткозамкнутый виток w_k . Ротор двигателя короткозамкнутый. Пульсирующий поток Φ_1 , созданный переменной намагничивающей силой рабочей обмотки статора, пронизывает короткозамкнутый виток и наводит в нем Э.Д.С. E_k , которая вызывает появление тока в витке и магнитного потока Φ_k . Этот поток сдвинут по фазе относительно потока Φ_1 и, складываясь с ним, создает в зоне короткозамкнутого витка результирующий магнитный поток, сдвинутый по фазе относительно потока, то есть в зоне короткозамкнутого витка наблюдается усиление поля, а в зоне другой половины полюса действует только поток ϕ_2 .

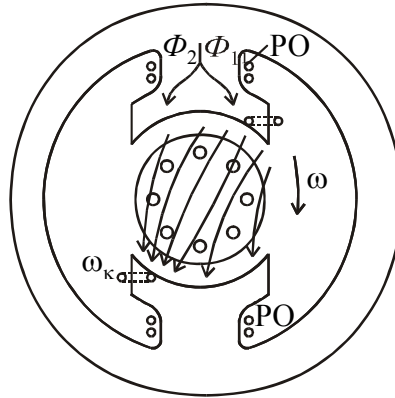


Рисунок 7.5

В результате под полюсом действует два потока – разнесенные в пространстве и сдвинутые по времени, что обеспечивает получение вращающегося поля.

7.2 Асинхронные исполнительные двигатели

Асинхронные исполнительные двигатели, применяемые в устройствах автоматики, служат для преобразования подводимого к ним электрического сигнала в механическое перемещение вала. При заданном моменте сопротивления на валу скорость вращения должна строго соответствовать подводимому напряжению и меняться при изменении его величины или фазы. Таким образом, исполнительные двигатели являются управляемыми

7.2.1 Способы управления

В качестве исполнительных двигателей переменного тока применяют главным образом двухфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (рис.7.6). Одна из обмоток статора ОВ, называется обмоткой возбуждения, подключается к сети с постоянным действующим значением напряжения. Ко второй обмотке статора ОУ, называемой обмоткой управления, подводится напряжение управления от управляющего устройства (УУ).

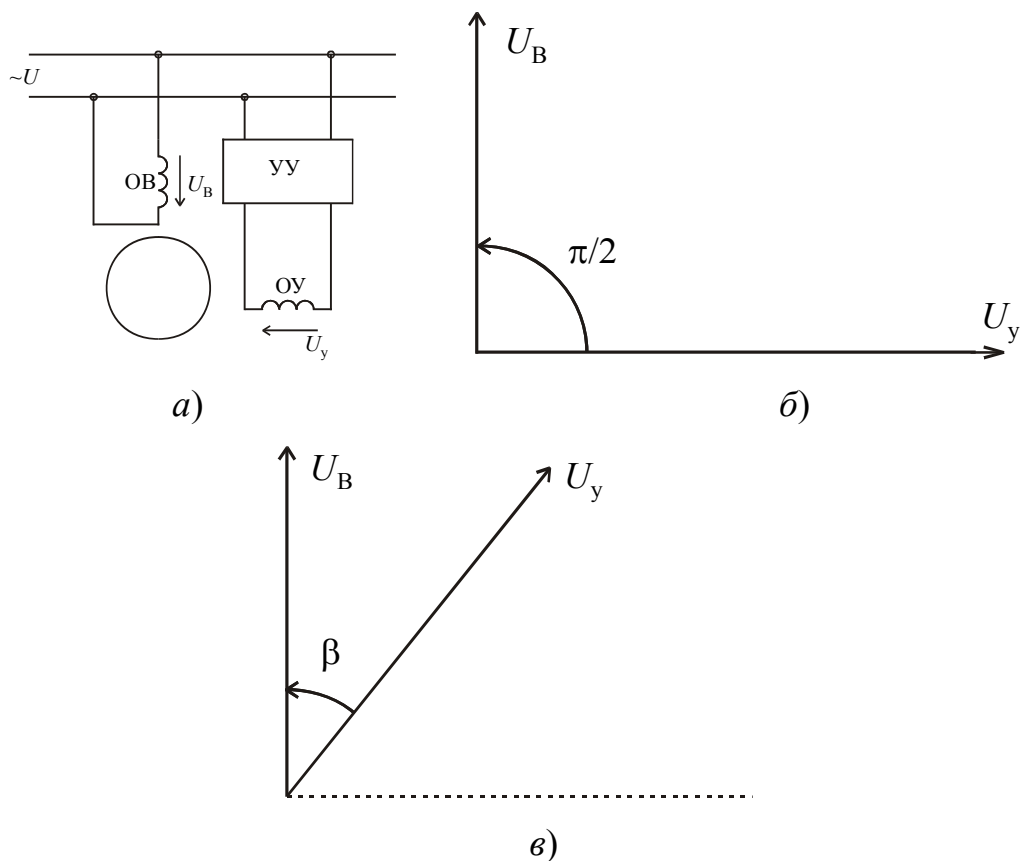


Рисунок 7.6

Различают три способа управления скоростью вращения: амплитудное, фазовое и амплитудно-фазовое.

При амплитудном управлении изменяется только величина напряжения управления. Величина напряжения управления может быть оценена коэффициентом сигнала

$$\alpha = U_y / U_B = U_y / U_{y..ном} \quad (7.1)$$

Векторы напряжений управления и возбуждения при всех значениях коэффициента α образуют угол 90° (рис.7.6, б). При $\alpha = 1$ магнитное поле, создаваемое обмотками возбуждения и управления, будет круговым; при $\alpha < 1$ – эллиптическим; при $\alpha = 0$ – пульсирующим. Изменение направления вращения осуществляется изменением фазы напряжения управления на 180° .

При фазовом управлении напряжение управления остается неизменным по величине, а регулирование угловой скорости вращения достигается изменением угла фазового сдвига β между U_y и U_B (рис.7.6, в). В качестве коэффициента сигнала при фазовом управлении принимается отношение проекции напряжения управления на горизонтальную ось к напряжению возбуждения, то есть

$$\alpha = \frac{U_{y.\text{ном}} \cdot \sin \beta}{U_{\text{в}}} = \sin \beta$$

при

$$U_{y.\text{ном}} = U_{\text{в}}. \quad (7.2)$$

При угле $\beta = 90^\circ$ ($\sin \beta = 1$) поле будет круговым, скорость вращения максимальная ($\omega = \omega_{\text{max}}$); при $\sin \beta < 1$ - эллиптическим; при $\sin \beta = 0$ - пульсирующим.

При амплитудно-фазовым управлении изменяется как амплитуда управления, так и угол фазового сдвига между $U_{\text{в}}$ и $U_{\text{у}}$.

При всех методах управления угловая скорость вращения двигателя изменяется за счет образования эллиптического поля, которое можно представить в виде двух круговых полей прямой и обратной последовательностей. Изменение напряжения на обмотке управления по величине или фазе приводит к изменению соотношений между прямым и обратным магнитными потоками. В этой связи меняется наклон механической характеристики, а следовательно, и скорость вращения двигателя. Уменьшение скорости добиваются путем увеличения эллиптичности магнитного поля, то есть увеличение поля обратной последовательности, которое создает тормозной момент. При этом возрастают и потери мощности в двигателе.

К управляемым двигателям предъявляют специфические требования, связанные с условиями их работы в системах автоматического регулирования:

- 1) широкий диапазон регулирования угловой скорости при изменении напряжения управления по величине и по фазе;
- 2) близкие к линейным механические $\omega = f(M)$ при $U_{\text{у}} = \text{const}$ и регулировочные $\omega = f(U_{\text{у}})$ при $M = \text{const}$ характеристики;
- 3) высокое быстродействие (малый момент инерции ротора);
- 4) большой пусковой момент;
- 5) малое напряжение трогания (малый момент трения);
- 6) малая мощность управления;
- 7) отсутствие самопроизвольного вращения (самоход при $U_{\text{у}} \rightarrow 0$.)

Для удовлетворения этих требований (особенно пп.1, 2, 7) резистивное сопротивление ротора выбирается таким, чтобы $s_{кр} = R_2' / (x_1 + x_2') = 3 \dots 4$. При этом механическая характеристика получается практически линейной и отсутствует самоход.

7.2.2 Амплитудное управление

При амплитудном управлении напряжение изменяется только по величине, оставаясь сдвинутым по фазе на 90^0 относительно напряжения. Для упрощения рассуждений эллиптическое поле представим как сумму двух полей, вращающихся в противоположных направлениях. Поэтому при

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{B.пр} &= 0,5(\underline{U}_B + \alpha \underline{U}_B) = 0,5\underline{U}_B(1 + \alpha) \\ \underline{U}_{B.обр} &= 0,5(\underline{U}_B - \alpha \underline{U}_B) = 0,5\underline{U}_B(1 - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

Токи прямой и обратной последовательности будут соответственно

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{B.пр} &= 0,5\underline{U}_B(1 + \alpha) / \underline{z}_{пр} \\ \underline{I}_{B.обр} &= 0,5\underline{U}_B(1 - \alpha) / \underline{z}_{обр} \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Аналогично определяются токи прямой и обратной последовательности в обмотке управления с учетом того, что

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{y.пр} &= -jU_{в.пр} = -j0,5U_B(1 + \alpha); \\ \underline{U}_{y.обр} &= +jU_{в.обр} = j0,5U_B(1 - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

Сопротивления $z_{пр}$ и $z_{обр}$ определяют как полные сопротивления соответствующих схем замещения:

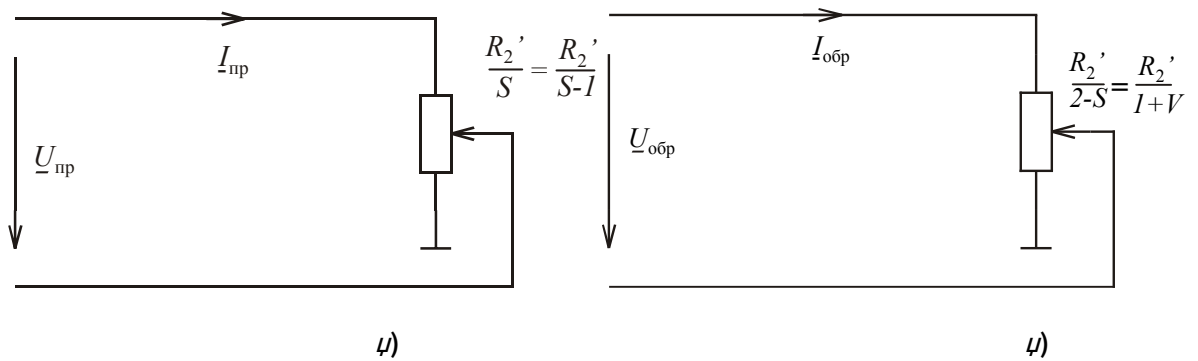
$$\underline{z}_{y.пр} = \underline{z}_{в.пр}; \quad \underline{z}_{y.обр} = \underline{z}_{в.обр};$$

Учитывая, что $R_2' \gg x_k$, последним можно пренебречь, тогда

$$\frac{R_2'}{s_{пр}} = \frac{R_2'}{(\omega_0 - \omega) / \omega_0} = \frac{R_2'}{1 - \nu} \cdot \frac{R_2'}{s_{обр}} = \frac{R_2'}{(\omega_0 - \omega) / \omega_0} = \frac{R_2'}{1 + \nu} \quad (7.6)$$

где $\nu = \omega / \omega_0$ – относительная скорость вращения ротора.

По этой причине упрощенные схемы замещения для прямой и обратной последовательности представляются (рис.7.7, а и б)



7.7

В соответствии с этими упрощенными схемами замещения

$$\left. \begin{aligned} I_{y.пр} &= -j0,5U_B(1+\alpha)(1-\nu)/R'_{2y} \\ I_{y.обр} &= j0,5U_B(1-\alpha)(1+\nu)/R'_{2y} \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

Полученные значения составляющих токов позволяют построить механические, регулировочные и другие характеристики, определяющие свойства исполнительного двигателя в схемах автоматического регулирования.

7.2.3 Механические характеристики

Электромагнитные мощности для прямого и обратного полей могут быть определены (для обеих фаз статора) на основании упрощенных схем замещения по формулам:

$$\left. \begin{aligned} P_{эм.пр.} &= 2I_{y.пр}^2 \cdot \frac{R'_{2y}}{1-\nu} = \frac{2U_B^2(1+\alpha)^2(1-\nu)^2 \cdot \frac{R'_{2y}}{1-\nu}}{4R_{2y}'^2} = \frac{U_B^2}{2R_{2y}'^2} \cdot (1+\alpha)^2(1-\nu) \\ P_{эм.обр.} &= 2I_{y.обр}^2 \cdot \frac{R'_{2y}}{1+\nu} = \frac{U_B^2}{2R_{2y}'^2} (1-\alpha)^2(1+\nu) \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Мощность поля обратной последовательности создает тормозящий момент, следовательно, результирующая электромагнитная мощность двигателя

$$P_{эм} = P_{эм.пр} - P_{эм.обр} = U_B^2 \left(2\alpha - (1+\alpha^2)\nu \right) / R_{2y}'^2 \quad (7.9)$$

$$M = P_{эм} / \omega_0 = U_B^2 \left(2\alpha - (1+\alpha^2)\nu \right) / (\omega_0 R_{2y}'^2) \quad (7.10)$$

Выразим момент в относительных единицах, приняв за базовую величину значение момента M_K при круговом поле ($\alpha = 1$) и неподвижном роторе ($\nu = 0$). Так как $M_K = 2U_B^2 / (\omega_0 R'_{2Y})$, то относительный момент

$$m = M / M_K = \alpha - 0,5(1 + \alpha^2)\nu. \quad (7.11).$$

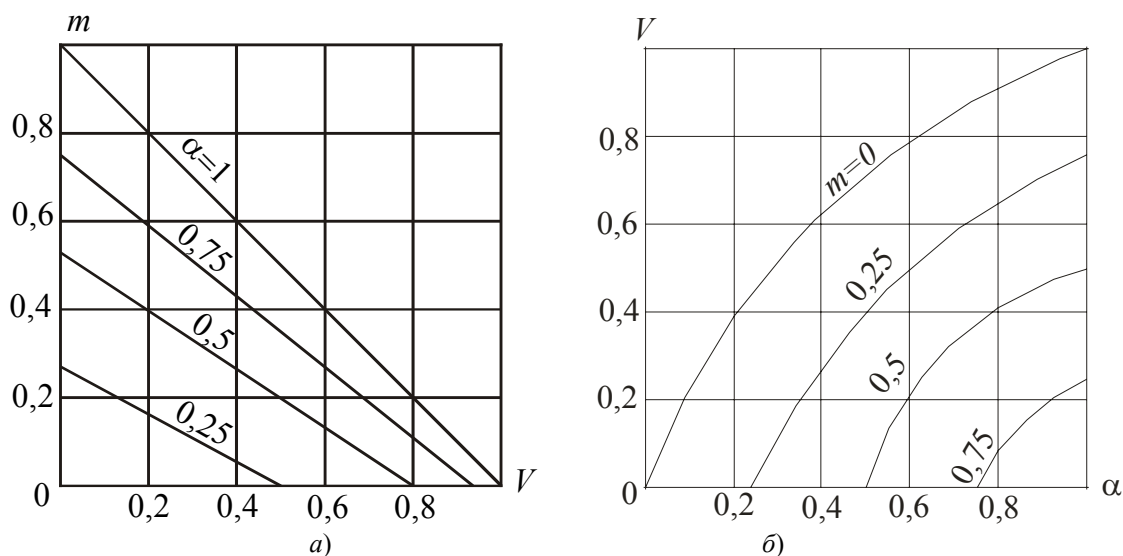


Рисунок 7.8

По формуле (7.11) строятся механические характеристики (рис. 7.8, а) в относительных единицах $m = f(\nu)$. При неизменном коэффициенте сигнала α эта зависимость является прямолинейной. Недостатком асинхронных исполнительных двигателей является непараллельность механических характеристик, полученных при различных значениях коэффициента сигнала α .

Относительную скорость вращения при холостом ходе можно получить из условия $m = 0$, то есть

$$\alpha - 0,5(1 + \alpha^2)\nu_0 = 0$$

откуда

$$\nu_0 = 2\alpha / (1 + \alpha^2).$$

7.2.4 Регулировочные характеристики

Эти характеристики показывают, как изменяется скорость вращения двигателя при изменении α , если момент сопротивления на валу (нагрузка) остается постоянным. Уравнение регулировочной характеристики получим, решая (7.11) относительно ν :

$$\nu = 2(\alpha - m)/(1 + \alpha^2). \quad (7.12)$$

на рис. 7.8, б показаны зависимости $\nu = f(\alpha)$, построенные при различных значениях момента m . Начальные точки на оси абсцисс, характеризуют чувствительность двигателя. Минимальное напряжение, при котором ротор переходит во вращение, называют напряжением трогания. Из рисунка видно, что даже в идеализированном двигателе регулировочные характеристики нелинейны, что вызывает затруднение при проектировании устройств автоматики.

7.2.5 Мощности управления и возбуждения

Ток идеализированного двигателя является чисто резистивным, поэтому мощности обмоток управления и возбуждения запишутся соответственно:

$$P_Y = U_Y I_Y = \alpha U_B I_Y; P_B = U_B I_B. \quad (7.13)$$

ток управления

$$I_Y = I_{Y.пр} + I_{Y.о.о} = -\frac{jU_B}{R'_{2Y}}(\alpha - \nu)$$

С учетом этого мощность управления

$$P_Y = U_B^2 \cdot \alpha \cdot (\alpha - \nu) / R'_{2Y}. \quad (7.14)$$

Аналогично ток и мощность обмотки возбуждения

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{B.пр} + \underline{I}_{B.обр} = \underline{U}_B (1 - \alpha\nu) / R'_{2B} \quad (7.15)$$

и

$$P_B = U_B^2 (1 - \alpha\nu) / R'_{2B}. \quad (7.16)$$

При круговом поле и неподвижном роторе, то есть вся мощность, потребляемая двигателем при круговом поле, поровну подводится из обеих обмоток. Относительные мощности можно выразить формулами:

$$\left. \begin{aligned} p_y &= P_y / P_k = 0,5\alpha(\alpha - v) \\ p_B &= P_B / P_k = 0,5\alpha(\alpha - v) \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

На рис. 7.9 приведены зависимости относительных мощностей управления (кривые 1) и возбуждения (кривые 2) от относительной скорости вращения для постоянных значений α .

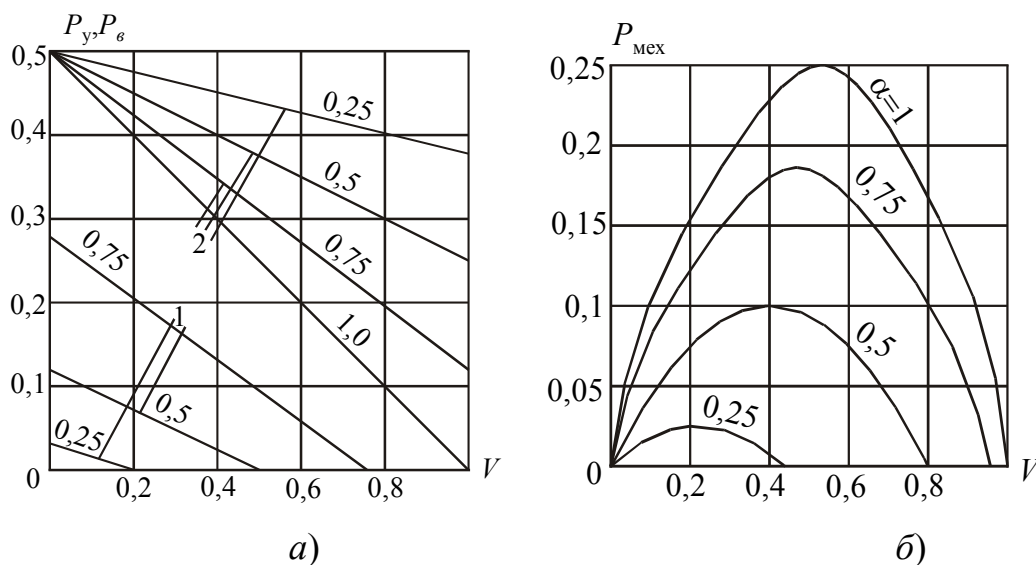


Рисунок 7.9

7.2.6 Механическая мощность

Механическая мощность двигателя в относительных единицах

$$p_{\text{мех}} = mv = \alpha v - 0,5(1 + \alpha^2)v^2. \quad (7.18)$$

При заданном α максимум механической мощности имеет место при относительной скорости вращения, определяемой из уравнения

$$dp_{\text{мех}} / dv = 0 \quad (7.19)$$

или

$$\alpha - (1 + \alpha^2)v_{\text{макс}} = 0. \quad (7.20)$$

откуда

$$v_{\text{макс}} = \alpha / (1 + \alpha^2) = v_0 / 2. \quad (7.21)$$

Подставляя значение $v_{\text{макс}}$, получим максимальное значение механической мощности

$$P_{\text{мех.макс}} = \frac{\alpha^2}{2(1 + \alpha^2)}. \quad (7.22)$$

на рис. 7.9, б показаны изменения механической мощности в зависимости от величины при различных α . Из этих графиков видно, что при уменьшении α использование двигателя ухудшается.

7.3 Фазовое управление

При фазовом управлении действующее значение напряжения управления остается постоянным по величине, но изменяется фазовый сдвиг, так что векторы напряжений образуют угол β . Так как, $U_y = U_B = U$, то

$$\left. \begin{aligned} U_{B.\text{п.п}} = U_{y.\text{п.}} = U_{\text{пр}} &= U \cos \frac{90 - \beta}{2} = U \sqrt{0,5(1 + \sin \beta)}; \\ U_{B.\text{обр}} = U_{y.\text{о.о}} = U_{\text{обр}} &= U \sin \frac{90 - \beta}{2} = U \sqrt{0,5(1 - \sin \beta)}; \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

Так как $z_{y.\text{п.}} = z_{B.\text{пр}} = z_{\text{пр}}$; $z_{y.\text{о.о}} = z_{B.\text{обр}} = z_{\text{обр}}$, то выражения для токов принимают вид:

$$I_{\text{пр}} = \frac{U}{z_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{1 + \sin \beta}{2}}; I_{\text{обр}} = \frac{U}{z_{\text{обр}}} \sqrt{\frac{1 - \sin \beta}{2}}. \quad (7.24)$$

Если пренебречь всеми сопротивлениями обмоток, кроме R'_2 (идеализированный двигатель), то полные сопротивления схем замещения

$$z_{\text{пр}} = R'_2 / (1 - v); z_{\text{обр}} = R'_2 / (1 + v). \quad (7.25)$$

При этом формулы токов прямой и обратной последовательности примут вид:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{пр}} &= \frac{U}{R'_2} \sqrt{\frac{1 + \sin \beta}{2}} (1 - v) \\ I_{\text{обр}} &= \frac{U}{R'_2} \sqrt{\frac{1 - \sin \beta}{2}} (1 + v) \end{aligned} \right\} \quad (7.26)$$

7.3.1 Механические и регулировочные характеристики

С учетом (7.26) электромагнитная мощность двигателя

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМ.пр}} - P_{\text{ЭМ.обр}} = 2I_{\text{пр}}^2 \frac{R'_2}{1-v} - 2I_{\text{обр}}^2 \frac{R'_2}{1+v} = \frac{2U^2}{R'_2} (\sin \beta - v). \quad (7.27)$$

следовательно, электромагнитный момент

$$M = P_{\text{ЭМ}} / \omega_0 = 2U^2 (\sin \beta - v) / (\omega_0 R'_2). \quad (7.28)$$

Принимая за базовую величину $M_{\text{к}} = 2U^2 / (\omega_0 R'_2)$, находим относительные значения момента и скорости вращения

$$m = M / M_{\text{к}} = \sin \beta - v. \quad (7.29)$$

$$v = \sin \beta - m. \quad (7.30)$$

Механические характеристики, построенные по (7.29), изображены на рис. 7.10, а. Они являются прямолинейными и параллельными. Наклон их при малых α больший, чем при амплитудном управлении. Это объясняется тем, что при одном и том же коэффициенте сигнала $\alpha = \sin \beta < 1$ ток обратной последовательности при фазовом управлении больше чем при амплитудном, вследствие чего при фазовом управлении будет меньшей и относительная скорость вращения в режиме холостого хода.

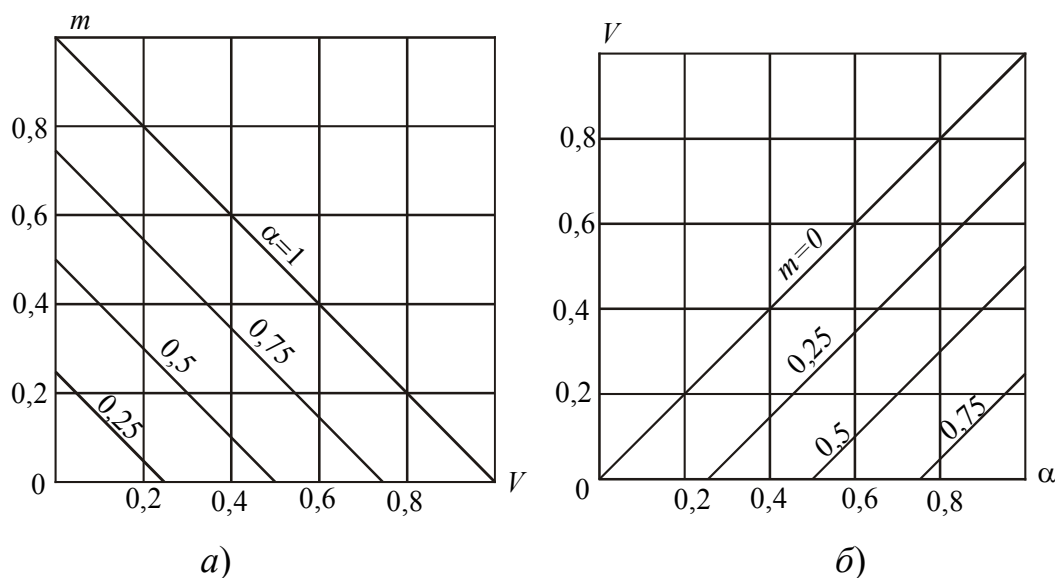


Рисунок 7.10

Данное обстоятельство является существенным преимуществом фазового управления. Особенно ярко это преимущество проявляется при сравнении регулировочных характеристик. Как следует из (7.30), регулировочные характеристики (рис. 7.10, б) идеализированного двигателя при фазовом управлении являются линейными.

7.3.2 Мощность управления

Механические и регулировочные характеристики исполнительного двигателя при фазовом управлении лучше, чем при амплитудном. Однако фазовое управление применяют сравнительно редко из-за большой мощности управления при малых коэффициентах сигнала. Действительно, при неподвижном роторе полная мощность обмотки управления

$$S_y = U_y I_y = U_y^2 / z_y = \text{const},$$

то есть не зависит от $\alpha = \sin \beta$, так как значение напряжения управления остается неизменным. Другим недостатком фазового управления является сравнительная сложность изменения фазы управляющего сигнала.

7.4 Электрические микромашины постоянного тока

7.4.1 Тахогенераторы постоянного тока (ТГ)

Тахогенераторы постоянного тока выполняются с постоянными магнитами на статоре (рис. 7.11, *а*) или с электромагнитным возбуждением (рис. 7.11, *б*) от независимого источника энергии. В них используются якорь обычного типа, полый или дисковый с печатной обмоткой.

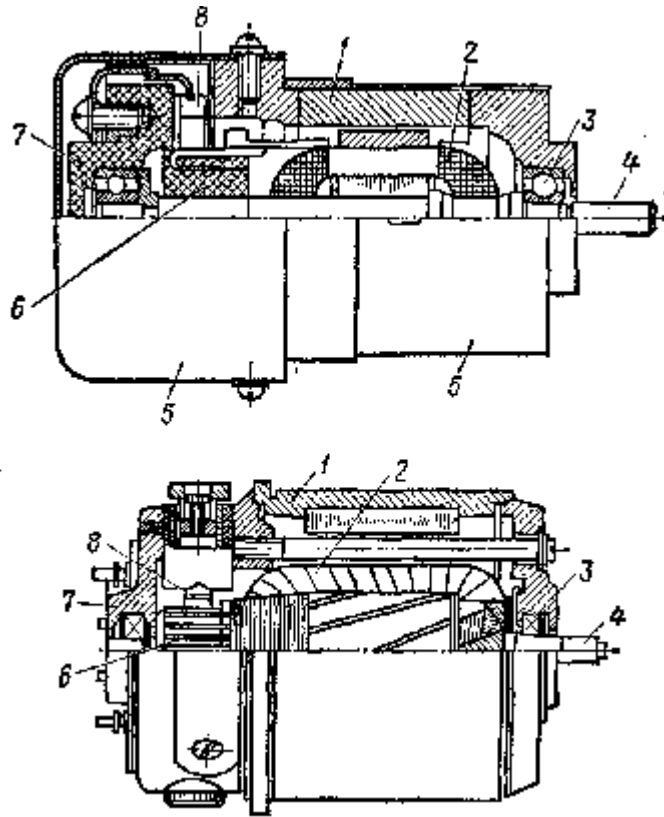


Рисунок 7.11 Устройство тахогенератора постоянного тока

1-корпус с полюсами; 2- якорь; 3- подшипник; 4- вал; 5- кожух; 6- коллектор; 7- шит; 8- щетки.

При неизменном потоке возбуждения Э.Д.С. тахогенератора пропорциональна угловой скорости вращения якоря:

$$E = c\Phi\omega, \quad (7.31)$$

что является основой для использования машины постоянного тока в качестве тахогенератора.

Выходное напряжение его

$$U = E - I_a \sum R_a = E - \frac{U}{R_H} \sum R_a, \quad (7.32)$$

где R_H – сопротивление нагрузки (вольтметра).

Из (7.31) и (7.32) находят уравнение выходной характеристики тахогенератора:

$$U = \frac{E}{1 + \sum R_a / R_H} = \frac{c\Phi\omega}{1 + \sum R_a / R_H}. \quad (7.33)$$

На рис.7.12 показаны выходные характеристики для различных сопротивлений нагрузки при идеализированных условиях (при $\Phi = \text{const}$ и

$\sum R_a = \text{const}$). Эти характеристики являются линейными, их угол наклона к оси абсцисс уменьшается при снижении сопротивления нагрузки.

Следовательно, эти тахогенераторы можно применять только при неизменной нагрузке, то есть совместно с индикатором (вольтметром) или другим устройством, на который рассчитан данный тахогенератор. Номинальные угловые скорости вращения составляют, но наиболее распространены машины с $\omega = 157 \div 314$ рад/с (или $1500 \div 3000$ об/мин).

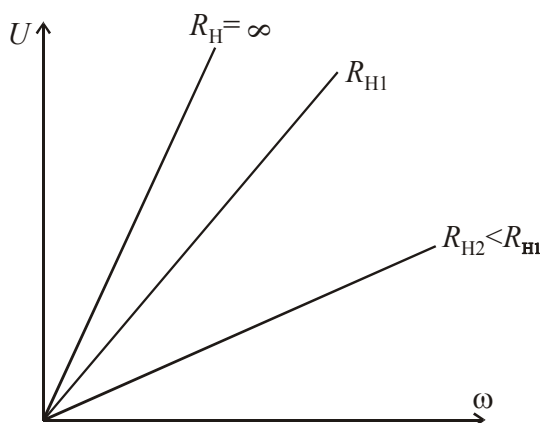


Рисунок 7.12

Достоинствами тахогенераторов постоянного тока являются малые габариты и масса при большой выходной мощности; в машинах с возбуждением от постоянных магнитов не требуется дополнительный источник энергии для возбуждения. Однако по сравнению с тахогенераторами переменного тока имеет ряд недостатков: сложность конструкции, высокая стоимость, искрение под щетками.

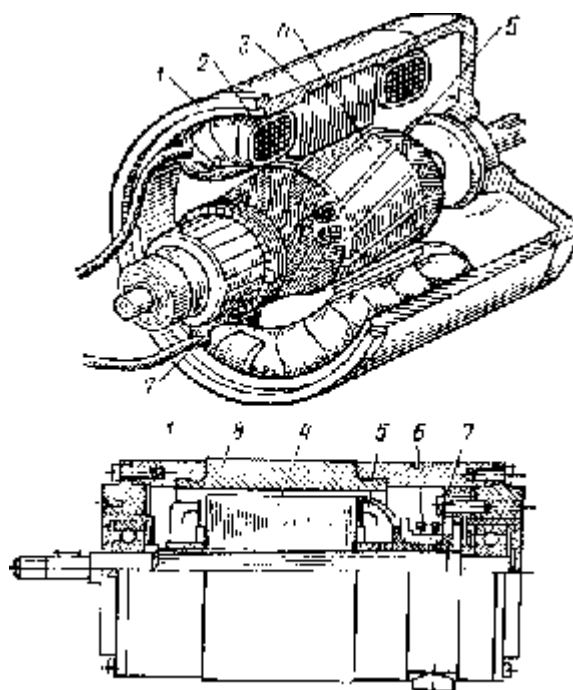
7.4.2 Микродвигатели постоянного тока

Микродвигатели постоянного тока, применяемые в автоматических устройствах, используют для вращения различных механизмов и преобразования электрического сигнала в механическое перемещение вала.

В зависимости от конструкции якоря микродвигатели постоянного тока подразделяют на двигатели с якорем обычного типа, полым якорем, беспазовым (гладким) якорем, а также с дисковым и цилиндрическим якорем с печатной обмоткой.

В машинах с якорем обычного типа магнитный поток создается обмоткой возбуждения, расположенной на полюсах (рис. 7.13, а) или постоянными магнитами (рис. 7.13, б). В этих двигателях магнитную систему делают ненасыщенной, чтобы реакция якоря не оказывала влияние на магнитный поток машины, а, следовательно, и на скорость ее вращения. Обмотку якоря укладывают в пазах сердечника якоря и присоединяют к коллектору, так же как и

в машинах постоянного тока общепромышленного исполнения. Ток к этой обмотке подводится с помощью щеткодержателей трубчатой или другой конструкции.



цццццц 7.13

1-корпус (станина), 2-обмотка возбуждения, 3-полюс, 4-якорь, 5- обмотка якоря, 6-щеткодержатель, 7- коллектор, 8-постоянный магнит.

Микродвигатели с полым якорем. Магнитный поток в них создается обмоткой возбуждения (рис. 7.14, *а*) или постоянными магнитами (рис. 7.14, *б*). Якорь представляет собой полый стакан, расположенный между полюсами и неподвижным ферромагнитным сердечником, который насаживают на втулку подшипникового щита. Вместо сердечника внутри якоря может быть установлен неподвижный цилиндрический постоянный магнит. Обмотку якоря укладывают на цилиндрический каркас и заливают эпоксидной смолой; концы секций обмотки, как и в обычном двигателе, соединяют с пластинами коллектора. После полимеризации эпоксидной смолы якорь с коллектором представляет собой монолитную конструкцию.

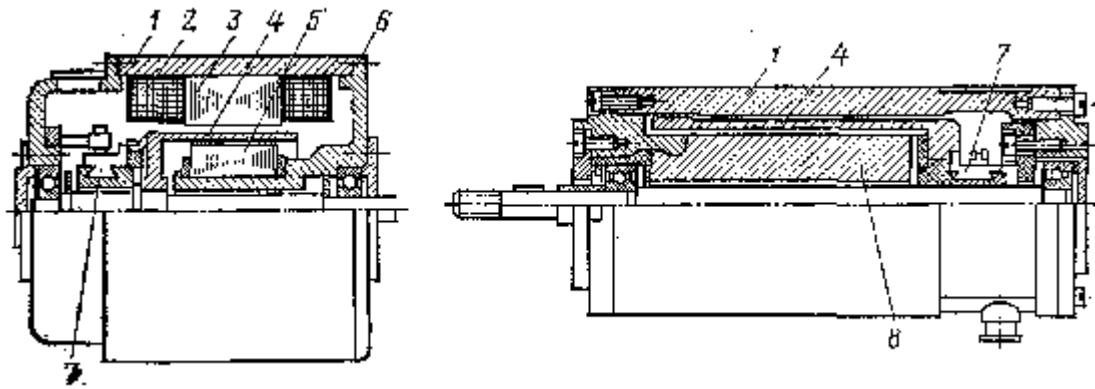


Рисунок 7.14 Устройство микродвигателей с полым якорем.

1- корпус; 2- обмотка возбуждения; 3- полюс; 4- полый якорь; 5- ферромагнитный якорь; 6- подшипниковый шит; 7- коллектор; 8- постоянный магнит.

Момент инерции полого якоря невелик, благодаря чему существенно повышается быстродействие двигателя. Отсутствие насыщения в зубцах позволяет значительно увеличить индукцию в воздушном зазоре машины, т.е. ее магнитный поток и номинальный вращающий момент по сравнению с микродвигателями, имеющими якорь обычного типа, что также способствует повышению быстродействия двигателя. Большим достоинством микродвигателей с полым ротором является то обстоятельство, что у них секции обмотки якоря окружены не ферромагнитным материалом, а воздухом и имеют, поэтому гораздо меньшую индуктивность. Это существенно улучшает условия коммутации двигателя, что в свою очередь увеличивает срок службы щеток и повышает стабильность характеристик двигателя. Щетки в таких микродвигателях работают практически без искрения даже при кратковременных перегрузках, вследствие чего можно применять большие форсировки для ускорения протекания переходных процессов.

Недостатками микродвигателей с полым якорем является необходимость значительного увеличения намагничивающей силы обмотки возбуждения, так как воздушный зазор у них гораздо больше, чем в обычных двигателях. Последнее приводит к некоторому увеличению массы, габаритных размеров машины и потерь мощности в обмотке возбуждения. Однако К.П.Д. рассматриваемых двигателей из-за отсутствия потерь в стали имеет примерно такую же величину, как и у микродвигателей с якорем обычной конструкции ($\eta = 0,3 \div 0,45$) в двигателях 1-15 Вт.

Микродвигатели с беспазовым (гладким) якорем. Обмотку якоря укладывают не в пазах, а на гладкой наружной поверхности якоря (рис.7.15). Ее выполняют в два слоя и заливают эпоксидной смолой с ферромагнитным наполнителем; каждый слой обмотки стягивают стеклолентой. Микродвига-

тели этого типа имеют более высокое быстродействие, по сравнению с машинами с зубчатым якорем из-за большей индукции в воздушном зазоре (в данном случае она не ограничивается насыщением зубцов) и меньшего момента инерции якоря. Уменьшение момента здесь возможно, поскольку лучшие условия коммутации и позволяют значительно увеличить длину якоря, а, следовательно, и уменьшить его диаметр. Перегрузочная способность и срок службы щеток этих микродвигателей примерно такие же, как и микродвигателей с полым ротором. В последнее время беспазовые якоря начали применять не только в микродвигателях, но и в электрических машинах малой и средней мощностей.

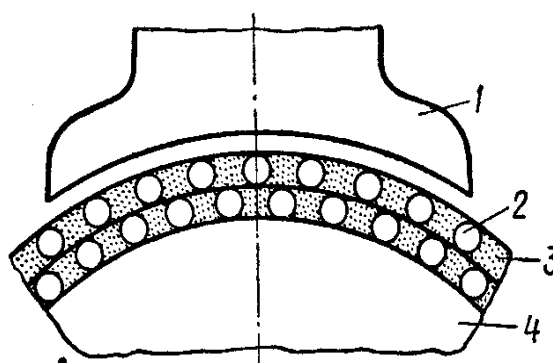


Рисунок 7.15 Принципиальная схема устройства двигателя с беспазовым (гладким) якорем.

1-полюс; 2- обмотка якоря; 3- эпоксидальная смола; 4- сердечник якоря.

Микродвигатели с печатной обмоткой якоря. Их могут выполнять с дисковым и цилиндрическим якорем.

Машины с дисковым якорем (рис. 7.16) имеют плоскую печатную обмотку якоря, нанесенную на тонком диске из немагнитного материала (керамики, текстолита, алюминия). Возбуждение осуществляется постоянными магнитами с полюсными наконечниками, имеющими форму кольцевых сегментов. Создаваемый ими магнитный поток проходит в аксиальном направлении через два воздушных зазора и дисковый якорь с печатной обмоткой и замыкается по двум кольцам из магнитно-мягкой стали, выполняющим роль ярма. Постоянные магниты или электромагниты могут быть расположены по одну сторону диска, как показано на рис. 7.16 или симметрично с обеих сторон.

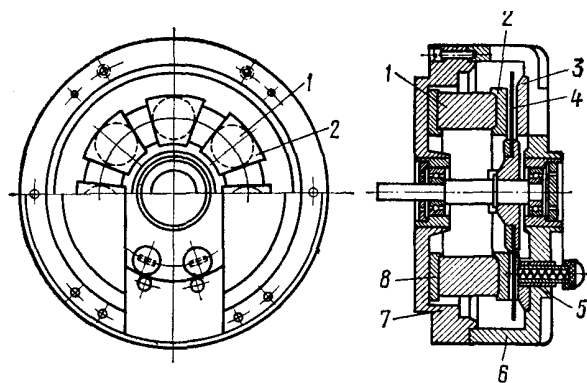


Рисунок 7.16 Устройство двигателя с печатным дисковым якорем

1-постоянные магниты; 2-полюсные наконечники; 3 и 8-стальные кольца; 4-диск якоря; 5-щеткодержатель; 6- подшипниковый шит; 7- корпус.

Печатную обмотку (рис. 7.17) наносят на дисковый якорь электрохимическим способом; проводники ее располагают радиально по обе стороны диска и соединяют их гальваническими соединениями через сквозные отверстия в диске; изоляцией между отдельными проводниками служит воздух и материал диска. Все процессы нанесения проводников на диск и их соединения в обмотку полностью механизированы.

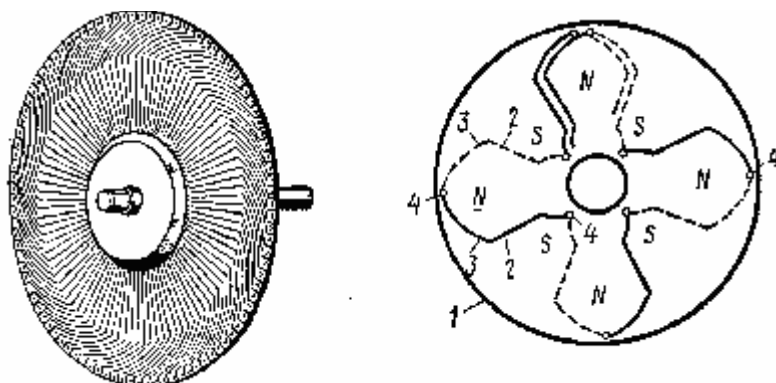


Рисунок 7.17.Дисковый якорь с печатной обмоткой (а) и принципиальная схема обмотки для восьмиполюсной машины (б).

1-диск; 2-активные части обмотки; 3- лобовые части; 4- гальванические соединения между двумя сторонами каждой секции.

Каждая секция печатной обмотки состоит из двух проводников, расположенных на различных сторонах диска (на рис. 7.17, б они показаны сплошными и штриховыми линиями). Поскольку число активных проводников ограничено размерами диска, для увеличения напряжения применяют простую волновую обмотку. Для уменьшения длины лобовых соединений эти машины выполняют многополюсными ($2p = 6 \div 8$). В некоторых случаях применяют полюсные наконечники, выступающие за внешние лобовые соединения, которые при этом становятся частями обмотки (в них индуктируется Э.Д.С.)

Обычно машины с печатной обмоткой якоря не имеют коллектора; роль его выполняют части проводников, расположенные на одной из сторон дискового якоря, по которым скользят щетки. Однако в некоторых конструкциях для повышения срока службы печатной обмотки на валу якоря устанавливают коллектор, к которому выводят концы секций. Для подвода тока к печатной обмотке якоря в большинстве случаев используют серебряно-графитные щетки, имеющие незначительные падения напряжения в переходном контакте. В данном случае такие щетки целесообразно применять, так как секции печатной обмотки, окруженные воздухом, имеют малую индуктивность и в них возникает весьма малая реактивная Э.Д.С.

Вращающий момент в двигателях с дисковым якорем создается, так же как в двигателях с цилиндрическим якорем, в результате взаимодействия тока в обмотке якоря с магнитным полем. Он действует в плоскости дискового якоря и приводит его во вращение. В исполнительных двигателях диск иногда изготавливают не из изоляционного материала, а из алюминия с целью ускорения торможения двигателя после снятия управляющего сигнала. При вращении такого диска в нем возникают вихревые токи, создающие тормозной момент, пропорциональный частоте вращения. Тормозной момент значительно уменьшает установившуюся скорость вращения двигателя, а, следовательно, время разгона до установившейся скорости.

Преимуществами машин с печатными обмотками якоря являются:

- малый момент инерции якоря, что обеспечивает высокое быстродействие исполнительных двигателей;
- хорошие условия коммутации из-за малой индуктивности секций, что повышает срок службы щеток и позволяет сильно увеличивать перегрузочную способность машины;
- лучшие условия охлаждения печатной обмотки по сравнению с обмоткой, уложенной в пазах якоря; это дает возможность значительно повысить плотность тока в проводниках обмотки якоря (до 30-40 А/мм² при длительном режиме; до 100 А/мм² при кратковременных перегрузках) и уменьшить благодаря этому массу и габаритные размеры машин;
- незначительное влияние реакции якоря, так как в якоре отсутствуют ферромагнитные элементы и его поток замыкается в основном по воздуху;
- небольшой шум из-за отсутствия на якоре зубцов и малой массы его, вследствие чего вращение якоря практически происходит без вибраций;
- технологичность конструкции, исключая необходимость процессов намотки и пайки обмоток, и приспособленность ее к массовому механизированному производству; это обстоятельство снижает стоимость машины и повышает ее надежность.

Недостатками машин с печатными обмотками якоря по сравнению с машинами обычного типа являются:

- большая М.Д.С. возбуждения из-за увеличенного воздушного зазора;
- увеличенные потери вследствие повышенной плотности тока в обмотке якоря, а при электромагнитном возбуждении также и вследствие увеличенных потерь мощности в обмотке возбуждения. Однако в рассматриваемых машинах практически отсутствуют потери в стали, поэтому при возбуждении их от постоянных магнитов К.П.Д. имеет приблизительно такое же значение, как и в обычных машинах;

7.4.3 Управление микродвигателями постоянного тока

В исполнительных двигателях постоянного тока обмотки якоря и главных полюсов питаются от разных источников энергии. Одна из них (условно называется обмоткой возбуждения) подключена к источнику с неизменным напряжением U_B , а на другую (обмотку управления) подается напряжение U_y только при необходимости вращения вала двигателя. В зависимости от того, на какую обмотку подается управляющий сигнал, различают два способа управления – якорное и полюсное (рис. 7.18). В двигателях с возбуждением от постоянных магнитов управляющий сигнал подается на обмотку якоря.

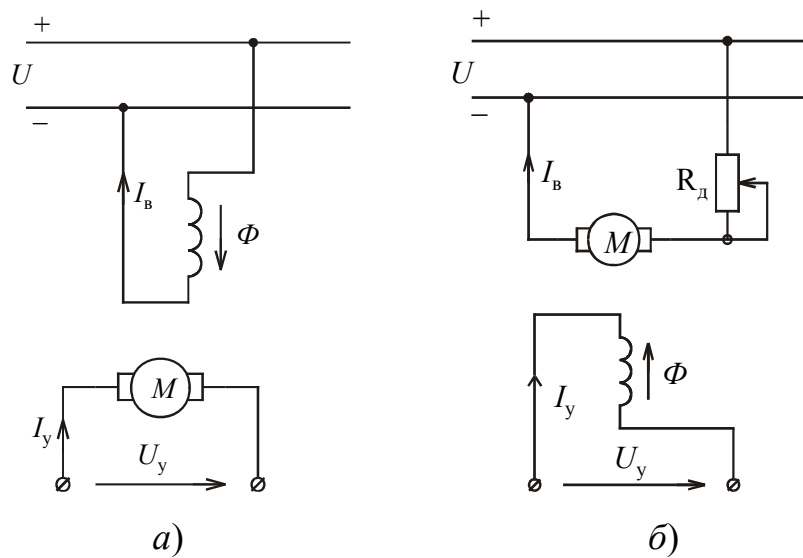


Рисунок 7.18

При якорном управлении напряжение управления U_y подается на обмотку якоря; обмотка главных полюсов присоединена к сети постоянного тока с неизменным напряжением. Следовательно, коэффициент сигнала $\alpha = U_y / U_B$ или $\alpha = U_y / U_{y.n.n}$, если возбуждение от постоянных магнитов. Когда $U_y = 0$, ток в якоре I_y и вращающий момент M отсутствуют. Изменяя U_y , можно регулировать скорость вращения якоря. При $U_B = \text{const}$ магнитный поток $\Phi = K'_\phi \cdot I_B = K_\phi \cdot U_B$, ($K_\phi = K'_\phi / R_B$)

Ток якоря (управления)

$$I_y = \frac{U - E}{R_y} = \frac{\alpha \cdot U_B - CK_\phi U_B \omega}{R_y}. \quad (7.34)$$

где R_y - суммарное сопротивление цепи якоря.

Следовательно, вращающий момент двигателя

$$M = cK_\phi U_B I_y \quad (7.35)$$

или с учетом (7.34)

$$M = (cK_\phi \alpha U_B^2 - C^2 K_\phi^2 U_B \omega) / R_y. \quad (7.36)$$

Примем за базовую единицу момент M_K , развиваемый двигателем при $\omega = 0$ и $\alpha = 1$:

$$M_K = cK_\Phi U_B^2 / R_y. \quad (7.37)$$

Тогда

$$m = M / M_K = \alpha - cK_\Phi \omega. \quad (7.38)$$

Скорость вращения при холостом ходе и $\alpha = 1$

$$\omega_0 = \frac{U_B}{c\Phi} = \frac{U_B}{cK_\Phi U_B} = \frac{1}{cK_\Phi}, \quad (7.39)$$

а относительная скорость вращения

$$v = \omega / \omega_0 = cK_\Phi \omega. \quad (7.40)$$

Таким образом, уравнение механической характеристики в относительных единицах примет вид

$$m = \alpha - v. \quad (7.41)$$

а уравнение регулировочной характеристики

$$v = \alpha - m. \quad (7.42)$$

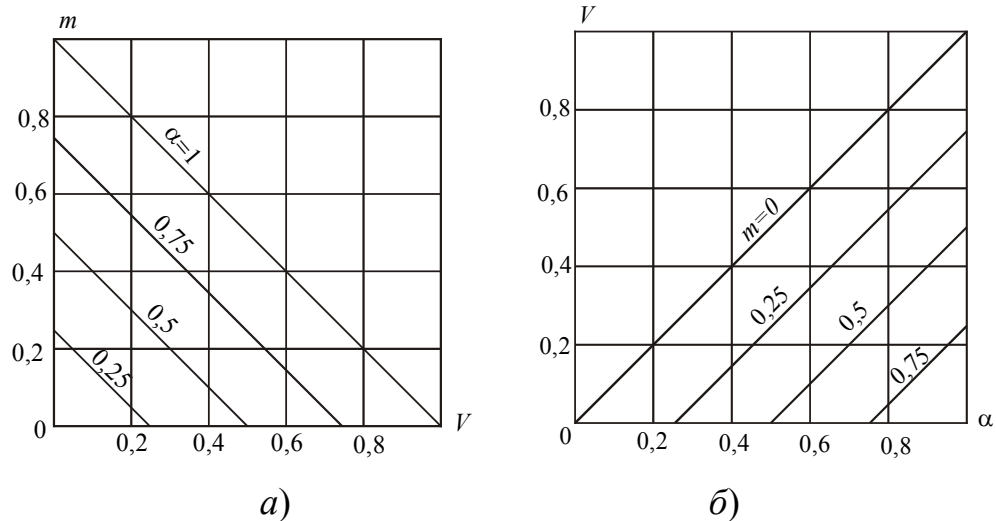


Рисунок 7.19

Как механические характеристики при различных значениях α , так и регулировочные при различных значениях m прямолинейны и параллельны (рис. 7.19, а и б) соответственно.

Мощность управления

$$p_y = U_y I_y = \alpha \cdot U_B \frac{\alpha \cdot U_B - v U_B}{R_y}. \quad (7.43)$$

$$I_B = \frac{U_B - E}{R_B} = \frac{U_B - cK_\Phi \cdot \alpha \cdot U_B \cdot \omega}{R_B} \quad (7.48)$$

вращающий момент

$$M = c\Phi \cdot I_B = cK_\Phi \alpha \cdot U_B I_B \quad (7.49)$$

или с учетом (7.48)

$$M = c \cdot K_\Phi \cdot U_B^2 (1 - \alpha \cdot c \cdot K_\Phi \omega) \alpha / R_y . \quad (7.50)$$

Принимая за базовую единицу $M_K = c \cdot K_\Phi \cdot U_B^2 / R_y$, получим

$$m = M / M_K = \alpha (1 - \alpha \cdot c \cdot K_\Phi \omega) \quad (7.51)$$

с учетом $v = \omega / \omega_0 = c \cdot K_\Phi \omega$ уравнение механической характеристики примет вид

$$m = \alpha (1 - \alpha v). \quad (7.52)$$

Семейство механических характеристик при различных α , показаны на рис. 7.21, а, а регулировочные при различных значениях m в соответствии с уравнением

$$v = (\alpha - m) / \alpha^2 \quad (7.53)$$

на рис. 7.21, б эти характеристики нелинейны, а некоторые из них неоднозначны, то есть имеют два корня.

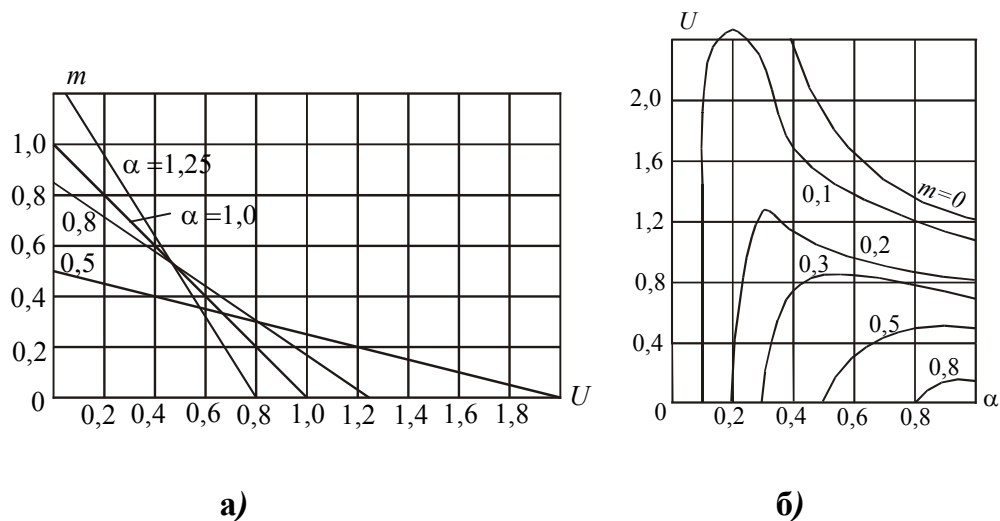


Рисунок 7.21

Мощность управления

$$P_y = U_y I_y = \alpha^2 U_B^2 / R_y \quad (7.54)$$

то есть она пропорциональна квадрату коэффициента сигнала и не зависит от скорости вращения.

Механическая мощность в относительных единицах (рис. 7.22)

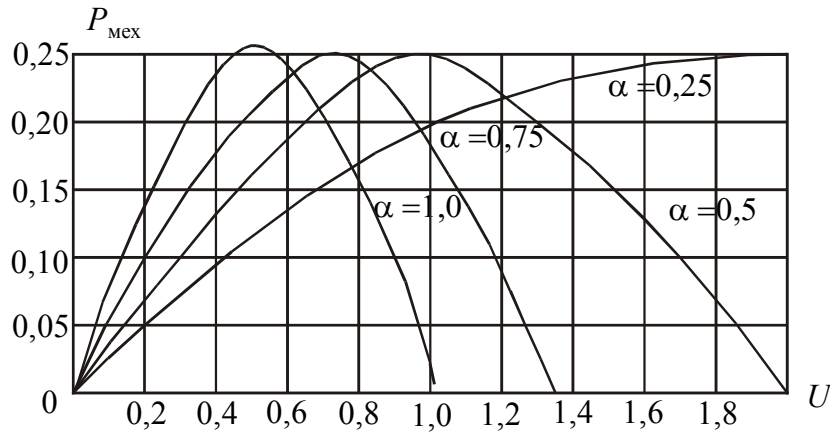


Рисунок 7.22

$$P_{\text{мех}} = mv = (\alpha - \alpha^2 v) \cdot v. \quad (7.55)$$

Максимум механической мощности и критическую скорость $v_{\text{кр}}$, при которой он имеет место, находят из $dP_{\text{мех}} / dv = 0$, откуда

$$P_{\text{мех.мах}} = \left(\alpha - \alpha^2 \cdot \frac{0,5}{2} \right) \frac{0,5}{2} = 0,25, \quad (7.56)$$

$$v_{\text{кр}} = 0,5 / \alpha = 0,5v. \quad (7.57)$$

7.5 Синхронные микромашины и шаговые двигатели

в автоматических устройствах широко применяют синхронные микродвигатели мощностью от единиц ватта до нескольких сотен ватт. Особенностью таких двигателей является то, что их скорость вращения $\omega = \omega_0$ жестко связана с частотой переменного тока f_1 , поэтому их используют в устройствах, где требуется поддерживать постоянную скорость вращения (в электрических часовых механизмах, лентопротяжных механизмах самопишущих приборов, программных устройствах и др.)

В зависимости от особенностей электромагнитной системы синхронные микромашины разделяют на следующие типы: двигатели и генераторы с постоянными магнитами; реактивные двигатели; гистерезисные двигатели; шаговые (импульсные) двигатели. Эти микромашины выполняют обычно без

обмотки возбуждения на роторе, что значительно повышает их эксплуатационную надежность и упрощает конструкцию.

7.5.1 Синхронные микромашины с постоянными магнитами

Синхронные микромашины с постоянными магнитами широко используют в качестве микродвигателей и тахогенераторов. В этих машинах источником возбуждения используются постоянные магниты с большой коэрцитивной силой. Их располагают на роторе, поэтому такую машину называют с активным ротором. Статор имеет обычную конструкцию: в его пазах размещают одно-, двух- или трехфазную обмотку.

В микродвигателях на роторе кроме блока постоянных магнитов укладывают в пазах по 3...5 витков пусковой обмотки типа «белчья клетка». Последняя по окончании процесса пуска выполняет роль демпфера, препятствующего качаниям ротора, то есть выпадению из синхронизма.

Наибольшее применение получили микродвигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным (рис.7.23, а) и аксиальным (рис. 7.23, б) расположением блока постоянных магнитов.

Пуск синхронных микродвигателей с постоянными магнитами обычно производят непосредственным включением в сеть. Разгон двигателя происходит за счет асинхронного вращающего момента M_{ac} , возникающего в результате взаимодействия магнитного потока с током в пусковой обмотке ротора.

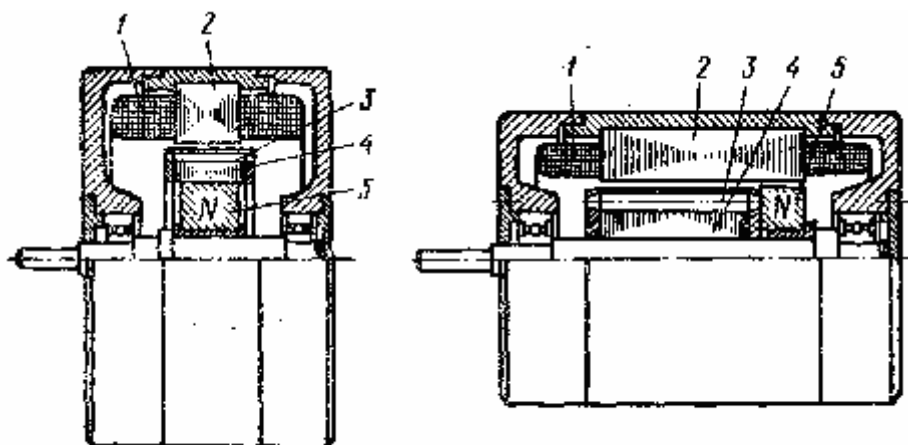


Рисунок 7.23. Устройство синхронного двигателя.

1-обмотка статора; 2- статор; 3- пусковая «белчья клетка»;
4- пакет ротора; 5- постоянные магниты.

Особенностью рассматриваемого двигателя является наличие кроме асинхронного вращающего момента M_{ac} , тормозного момента M_T , образующийся из-за наличия на роторе постоянных магнитов. В процессе разгона

двигателя поток постоянных магнитов пересекает витки обмотки статора и наводит в них Э.Д.С. E_{1n} , изменяющуюся с переменной частотой, пропорциональной скорости вращения ротора. Э.Д.С. E_{1n} , вызывает в витках статора ток, который взаимодействует с потоком ротора и создает момент тормозной M_T .

Физическая причина возникновения M_{ac} и M_T одинакова: первый возникает как результат взаимодействия потока статора с током пусковой обмотки, второй – результат взаимодействия потока ротора с током обмотки статора. Их зависимость от скольжения, а также результирующего момента показаны на рис. 7.24.

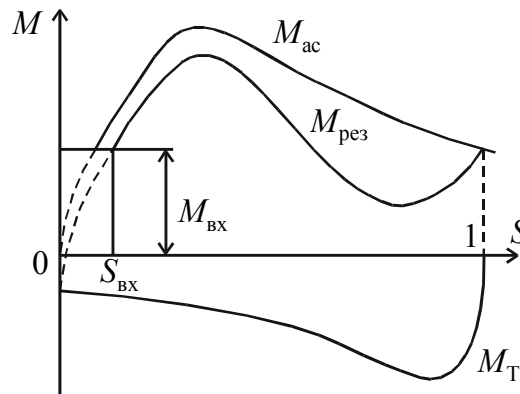


Рисунок 7.24

$$M_{рез} = M_{ac} + M_T = f(s)$$

Вход в синхронизм происходит при скольжении $s_{вх}$, при котором пусковая обмотка развивает достаточно большой момент $M_{вх}$. Двигатели с постоянными магнитами по сравнению с другими синхронными микромашинами обладают хорошими энергетическими показателями (К.П.Д. и $\cos \varphi$), повышенной устойчивостью работы в синхронном режиме и высокой стабильностью скорости вращения.

7.5.2 Реактивный микродвигатель

Реактивным двигателем называют синхронный двигатель с явнополюсным ротором без обмотки возбуждения, у которого магнитный поток создается реактивным током статора. Вращающий момент в таком двигателе возникает из-за различия магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям. При этом явнополюсный двигатель стремится ориентироваться так, чтобы магнитное сопротивление для силовых линий поля было минимальным. Вследствие этого появляются тангенциальные силы F_T (рис. 7.25), образующие вращающий момент, и ротор вращается в том же направлении и с той же скоростью ω_0 , что и поле статора.

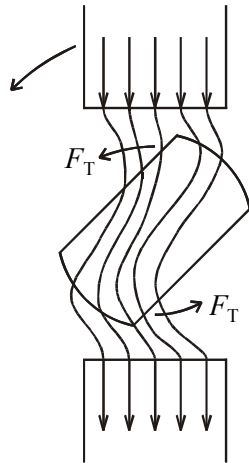


Рисунок 7.25

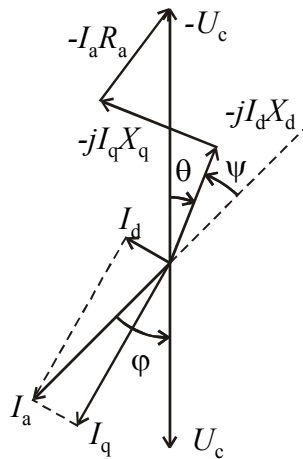


Рисунок 7.26

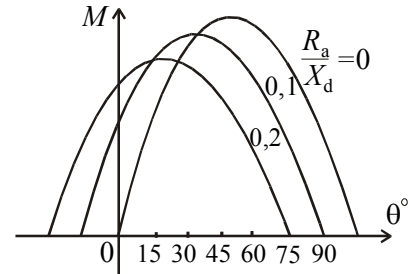


Рисунок 7.27

Электромагнитный момент реактивного двигателя определяется по формуле:

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\omega_0} = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\omega_0(x_d x_q + R^2)} \cdot \left((x_d x_q - R_a^2) \sin^2 \theta - 2R_a(x_d + x_q) \sin^2 \theta + 2R \cdot x_q \right) \quad (7.58)$$

В микромашинах резистивное сопротивление R_a имеет такой же порядок, как и реактивные сопротивления, вследствие чего потери мощности в нем оказывают влияние на величину электромагнитного момента, а, следовательно, и угловую характеристику. Из векторной диаграммы (рис. 7.26) микродвигателя, работающего – без возбуждения при $E_0 = 0$ и учета R_a следует выражение (7.58) для электромагнитного момента.

С увеличением R_a максимальный момент M_{\max} уменьшается, и угловая характеристика (рис. 7.27) сдвигается в область меньших углов θ . Максимальный момент реактивного двигателя соответствует углу $\theta = 25...45^\circ$.

Устойчивость работы двигателя зависит от величины удельного синхронизирующего момента $m_{\text{сн.уд}}$ – электромагнитного момента, приходящегося на один градус угла θ . Этот момент обычно определяют при значениях θ , близких нулю, то есть при $m_{\text{сн.уд}} = (dM / d\theta)_{\theta=0}$. Величина удельного синхронизирующего момента зависит от приложенного напряжения U и отношения x_q / x_d .

Начальный пусковой момент равен нулю. Следовательно, реактивные двигатели должны иметь пусковую обмотку типа «беличья клетка» для асинхронного пуска.

Реактивные двигатели проще по конструкции, надежнее в работе и дешевле по сравнению с двигателями с обмоткой возбуждения на роторе. Ос-

новными недостатками являются небольшой начальный пусковой момент и низкий $\cos \varphi \leq 0,5$. Последнее объясняется тем, что магнитный поток Φ создается реактивной составляющей тока статора, величина которой из-за повышенного сопротивления магнитной цепи машины довольно велика.

7.5.3 Гистерезисные двигатели

Гистерезисным двигателем называют синхронный двигатель, вращающий момент которого создается за счет явления гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного материала ротора.

В гистерезисном двигателе при синхронной скорости вращения ротор намагничивается под действием магнитного поля статора. При этом из-за явления гистерезиса ось намагничивания отстает от оси вращающегося магнитного поля статора на некоторый угол θ_r гистерезисного сдвига, вследствие чего возникают потенциальные составляющие F_T сил взаимодействия между полюсами ротора и статора (рис. 7.28, а). Поскольку угол θ_r определяется только свойствами материала ротора (стальной цилиндр из магнитотвердого материала), тангенциальные силы F_T и создаваемый ими гистерезисный момент не зависит от скорости вращения. Чем шире петля гистерезиса материала ротора, тем больше угол θ_r и гистерезисного момента M_r .

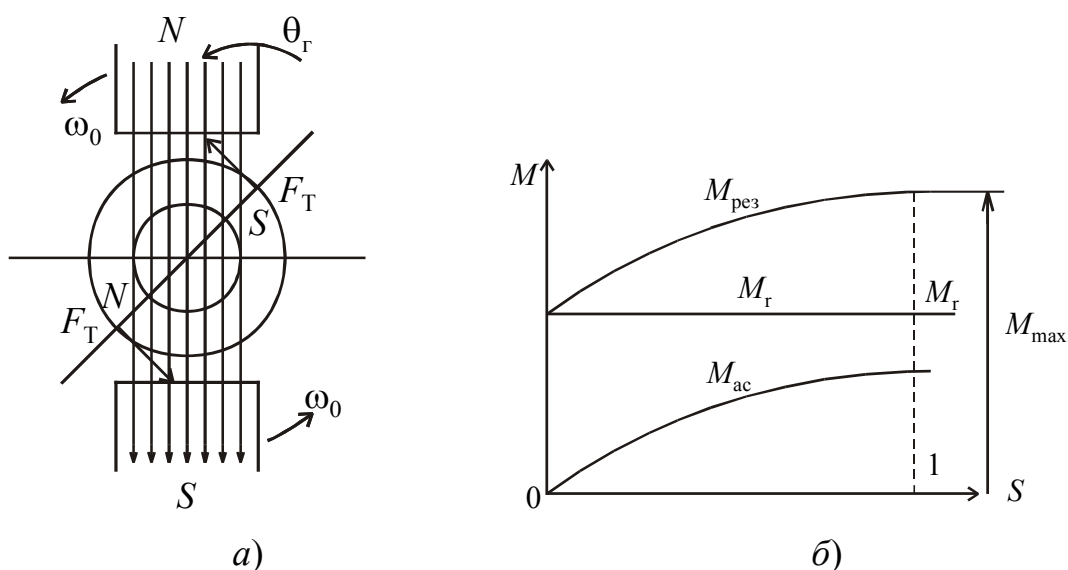


Рисунок 7.28

При пуске двигателя, когда скорость вращения $\omega > 0$, кроме M_r появляется асинхронный момент $M_{ас}$, возникающий в результате взаимодействия вращающегося поля с вихревыми токами ротора. Так как ротор имеет большое сопротивление типа R , то зависимость $M_{ас} = f(s)$ близка к линейной и достигает максимальной величины при $s = 1$ (рис. 7.28, б)

Результирующий момент

$$M_{\text{рез}} = M_{\Gamma} + M_{\text{ас}}. \quad (7.59)$$

Электромагнитный момент при асинхронном режиме пропорциональный потерям в роторе $\Delta P_{\text{эл2}}$, поделенным на скольжение s , следовательно, гистерезисный и асинхронный момент

$$M_{\Gamma} = \frac{\Delta P_{\Gamma}}{\omega_0 s} = s \cdot \Delta P_{\Gamma.н} / (\omega_0 s) = \Delta P_{\Gamma.н} / \omega_0 = \text{const}. \quad (7.60)$$

$$M_{\text{ас}} = \frac{\Delta P_{\text{вих}}}{\omega_0 s} = \frac{s^2 \Delta P_{\text{вих.н}}}{s \omega_0} = s \Delta P_{\text{вих.н}} / \omega_0. \quad (7.61)$$

где $\Delta P_{\Gamma.н}$ – потери мощности на гистерезис при неподвижном роторе ($s = 1$); $\Delta P_{\text{вих.н}}$ – потери мощности, идущие на создание вихревых токов в роторе, которые пропорциональны f_2^2 при неподвижном роторе.

Следовательно, момент $M_{\text{ас}}$ зависит от скольжения, а момент M_{Γ} не зависит от скольжения (рис. 7.28, б), наибольшего значения $M_{\text{рез}}$ достигает в начальный момент пуска, то есть при $s = 1$.

Гистерезисные двигатели могут работать как в синхронном, так и асинхронном режимах. Однако в асинхронном режиме работа двигателя неэкономична, так как возрастают потери на перемагничивание ротора:

$$\Delta P = \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{вих}} = s \cdot \Delta P_{\Gamma.н} + s^2 \cdot \Delta P_{\text{вих.н}} \quad (7.62)$$

Следовательно, при переходе в асинхронный режим К.П.Д. гистерезисного двигателя резко уменьшается.

Одной из разновидностей гистерезисного двигателя является двигатель с экранированными полюсами. Этот двигатель (рис. 7.29) имеет явнополюсный статор с однофазной катушечной обмоткой.

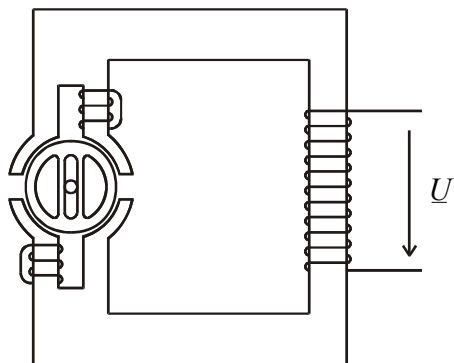


Рисунок 7.29

На полюсах статора размещены экранирующие короткозамкнутые витки, охватывающие половину каждого полюса. Они создают фазовый сдвиг между магнитными потоками, пронизывающими экранированную и неэкранированные части полюсов, в результате чего в двигателе создается вращающее магнитное поле.

Ротор состоит из нескольких дисков, выполненных из магнитотвердого материала. Кольцевой обод в дисках позволяет получить асинхронный и гистерезисный моменты. Диаметральная перемычка в роторе обеспечивает возникновение реактивного момента. По окончании пуска ротор вращается с синхронной скоростью под действием гистерезисного и реактивного моментов.

Достоинствами гистерезисных двигателей являются простота конструкции, надежность в работе, малый пусковой ток ($I_{п} / I_{ном} = 1,2 \dots 1,5$), сравнительно высокий К.П.Д. до 60%. Недостатки – повышенная стоимость (ротор из магнитотвердых материалов) и низкий $\cos \varphi$.

7.5.4 Шаговые (импульсные) двигатели

Шаговые двигатели представляют собой синхронные микродвигатели, у которых питание фаз обмотки статора (якоря) осуществляется путем подачи импульсов напряжения от электронного коммутатора. Под воздействием каждого импульса ротор двигателя совершает определенное угловое перемещение, называемое шагом.

На рис. 7.30 изображена принципиальная схема m – фазного шагового двигателя без обмотки возбуждения на роторе.

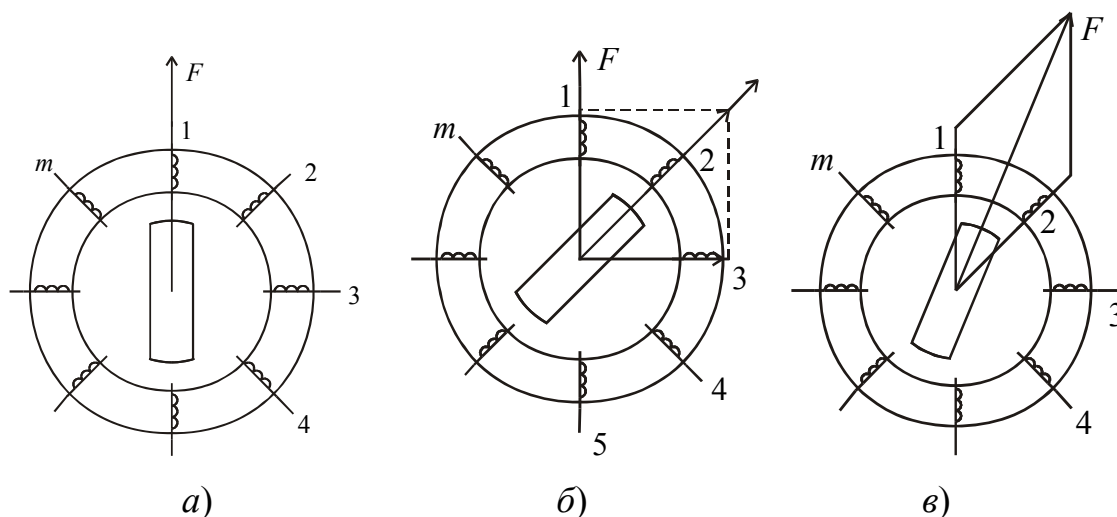


Рисунок 7.30

Если питать поочередно фазы (обмотки управления 1,2,3... m однополярными импульсами напряжения, то ротор двигателя будет скачкообразно перемещаться в положения, при которых его ось совпадает с осями обмоток

управления $1, 2, \dots, m$. Следовательно, ротор будет иметь m устойчивых состояний, соответствующих направлению вектора намагничивающей силы F (рис. 7.30, *a*) в данный момент времени; при этом шаг перемещения ротора равен $\alpha = 2\pi / m$.

Для увеличения результирующей намагничивающей силы, а следовательно, синхронизирующего момента обычно одновременно подают питание на две или три обмотки, что показано на рис. 7.30, *б* и *в*). Если поочередно включать то четное (две), то нечетное (одна, три) число обмоток управления, то ротор будет иметь $2m$ устойчивые состояния и шаг $\alpha = 2\pi / m$. Управление двигателем, при котором фазы обмотки якоря включают поочередно равными группами по две или при называют симметричным, поочередное включение неравных групп фаз – несимметричным способом управления.

Применение шагового двигателя целесообразно для привода механизмов, имеющих старт-стопное движение, или механизмов, с непрерывным движением, если управляющий сигнал задан в виде последовательности импульсов (лентопротяжных устройств ввода и вывода информации, приводов станков с ЧПУ).

В двигателях с постоянными магнитами ротор выполняют в виде постоянного магнита литой или составной конструкции без полюсных наконечников. Статор имеет явно выраженные полюсы, вокруг которых в пазах размещают обмотки управления (рис. 7.31).

В рассматриваемом двигателе магнитное поле якоря может иметь четыре различных состояния, которым соответствуют различные направления тока в фазах 1 и 2 его обмотки:

Порядок коммутации фаз 1 и 2 обмотки якоря представлен на рис. 7.31, *г* в виде временной диаграммы изменения токов I_{a1} и I_{a2} в этих фазах. Каждому импульсу тока соответствует определенное положение ротора двигателя. Рекомендуемую систему коммутации называют четырехтактной разнополярной и сокращенно обозначают следующим образом: (+1)-(+2)-(-1)-(-2)-(+1)-...

Для уменьшения шага двигателя выполняют многополюсными наиболее часто используют восьмиполюсные шаговые двигатели. Шаг двигателя представляет собой угол поворота ротора за один такт:

$$\alpha_{\text{ш}} = 360 / kр$$

где k – число тактов в одном цикле; p – число пар полюсов. Частота вращения ротора двигателя зависит от частоты подачи импульсов f_1 :

$$n = 60 f_1 \alpha_{\text{ш}} / 360 = 60 f_1 / kр. \quad (7.63)$$

Диапазон изменения частоты вращения при четырехтактной коммутации составляет $n_{\max} = 2000 \dots 3000 \text{ об/мин}$.

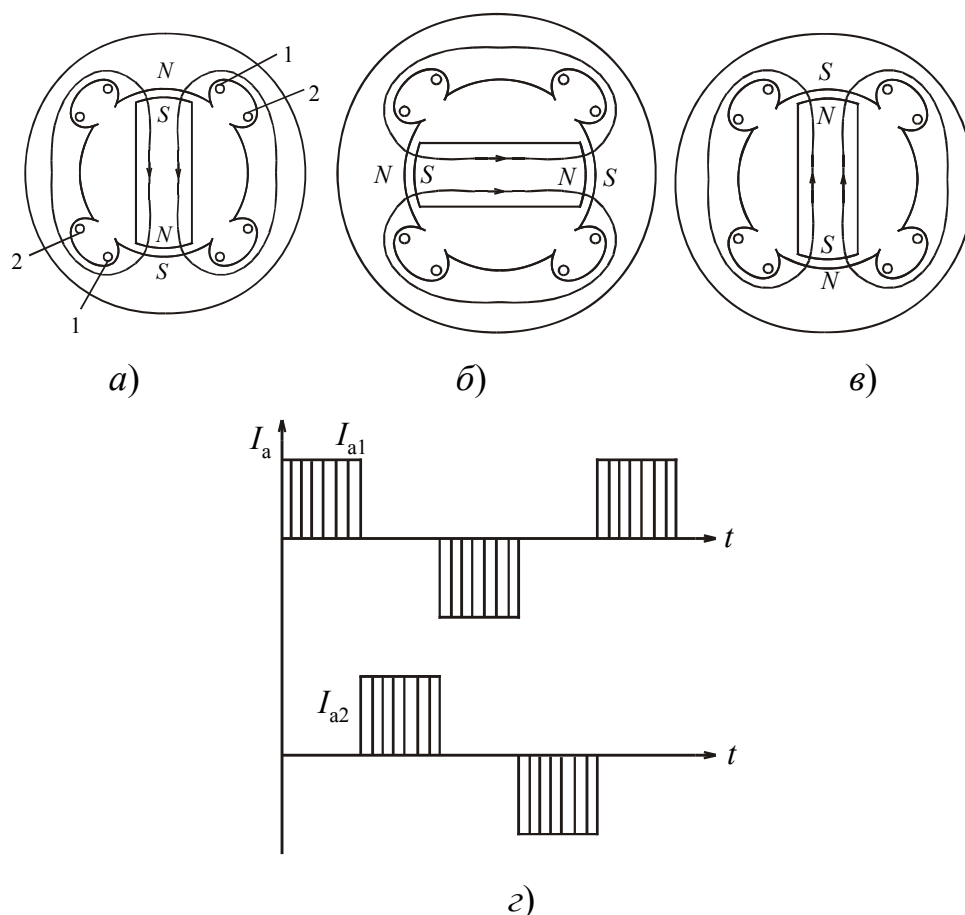


Рисунок 7.31.

- 1) ток в фазе 1 направлен от начала к концу; фаза 2 обесточена;
- 2) ток в фазе 2 направлен от начала к концу; фаза 1 обесточена;
- 3) ток в фазе 1 направлен от конца к началу; фаза 2 обесточена;
- 4) ток в фазе 2 направлен от конца к началу; фаза 1 обесточена.

Ротор реактивного двигателя выполняют из магнитомягкого материала. На статоре размещается многофазная обмотка управления, получающая питание от электронного коммутатора. На рис. 7.32 схематично показаны три такта работы реактивного шагового двигателя с трехфазной обмоткой управления и шестью полюсами на статоре; на роторе имеются только два полюса (могут быть роторы и с четырьмя полюсами).

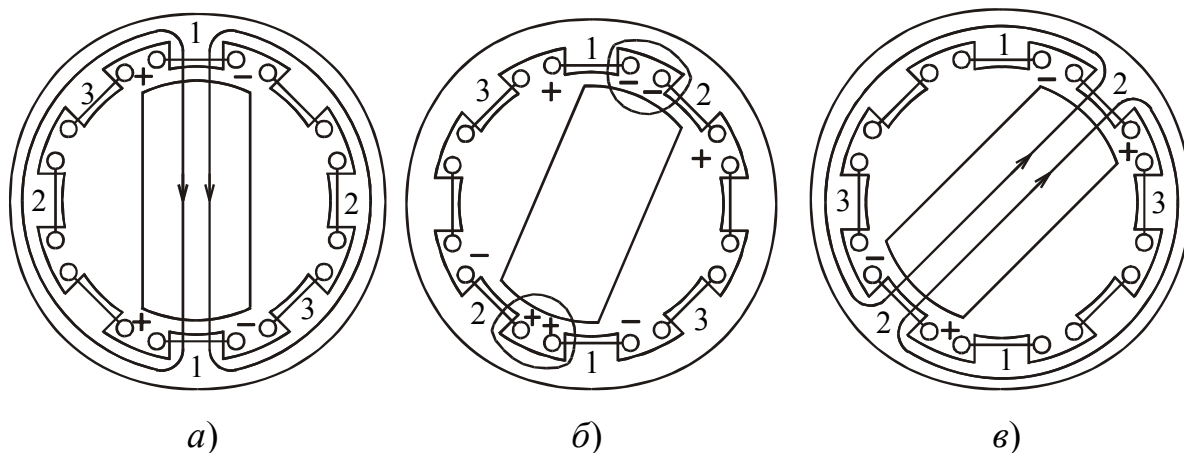


Рисунок 7.32

Когда в фазе 1 будет ток, ротор занимает положение, показанное на рис. 7.32, а. В следующий момент времени питание подается одновременно на фазы 1 и 2, и ротор поворачивается в положение рис. 7.32, б, соответствующее наибольшей магнитной проницаемости для потока, созданного этими фазами. Далее питание фазы 1 отключается, и ротор поворачивается в положение рис. 7.32 (в). Таким образом, коммутация обмоток происходит по схеме: (1)-(12)-(2)-(23)-(3)-(31)-(1)..., то есть коммутация является несимметричной, шеститактной, однополярной (рис. 7.33).

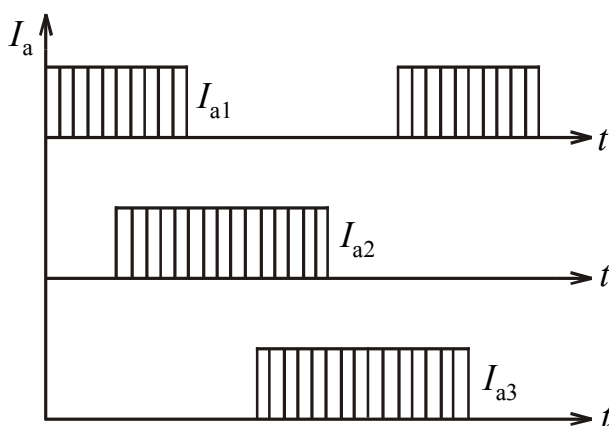


Рисунок 7.33

При этом шаг перемещения $\alpha_{ш} = 30^0$. Возможна и трехтактная коммутация по схеме: (1)-(2)-(3)-(1) или (12)-(23)-(31)-(12).

Особенностью работы шагового двигателя является широкий диапазон регулирования скорости вращения путем изменения частоты подачи управляющих импульсов тока в соответствующие обмотки управления. Таким же образом осуществляют фиксированную остановку, пуск и изменение направления вращения. В зависимости от частоты управляющих импульсов различают следующие режимы работы шаговых двигателей: статический, квазистационарный, установившийся и переходный.

Статический режим – это наличие в обмотке управления постоянного тока, создающего неподвижное поле. Ротор при этом занимает фиксированное положение.

Квазистационарный режим – это режим обработки единичных шагов, например, в приводах старт – стопных механизмов, лентопротяжных и других подобных механизмов.

Установившийся режим – это режим, соответствующий постоянной частоте управляющих импульсов. Ротор имеет постоянную скорость вращения.

Переходные режимы – основные эксплуатационные режимы шаговых двигателей, включающие в себя пуск, торможение, реверс, переход с одной частоты на другую. Основным требованием, предъявляемым к шаговым двигателям в переходных режимах, является сохранение синхронизма при изменении частоты управляющих импульсов – отсутствие потери шага.

Для каждого шагового двигателя существует некоторая предельная частота подачи управляющих импульсов $f_{пр}$, при которой ротор еще следует за скачкообразным, изменяющимся полем статора. Эту частоту называют частотой приемистости. Этот параметр характеризует пусковые свойства двигателя - максимальную частоту управляющих импульсов, при которой возможен пуск без выпадения из синхронизма.

7.6 Однофазные коллекторные двигатели

Разработанные М.О. Доливо-Добровольским в 1889 – 91гг трехфазная система переменного тока и трехфазные асинхронные двигатели получили всеобщее распространение. Большим достоинством асинхронных двигателей является простота их конструкции, надежность в работе и невысокая стоимость. Вместе с тем им присущи следующие *недостатки*: 1) трудности экономичного регулирования скорости вращения; 2) потребление реактивной мощности и понижение $\cos \varphi$. Эти недостатки асинхронных двигателей стимулировали разработку коллекторных двигателей переменного тока, допускающих плавное и экономичное регулирование скорости вращения.

Различные виды коллекторных машин переменного тока используются в промышленности и на транспорте. Однако в целом их применение ограничено. Причинами этого являются: 1) трудности коммутации; 2) сложность их устройства; 3) высокая стоимость (1,5..2 раза больше стоимости двигателей постоянного тока и в 4...6 раз больше стоимости асинхронных двигателей).

В данном параграфе дается описание устройства, принципа действия и характеристик однофазных и универсальных коллекторных машин малой мощности, используемых в бытовой технике.

7.6.1 Однофазный коллекторный двигатель с последовательным возбуждением

Однофазный двигатель с последовательным возбуждением имеет такое же устройство и схему соединения обмоток (рис. 7.34), как и двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, однако во избежание больших потерь на вихревые токи сердечник статора собирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга.

В рассматриваемом двигателе магнитный поток Φ и ток якоря (возбуждения) переменные. Между ними существует небольшой угол α фазового сдвига, обусловленного потерями в стали: $i = I_m \sin \omega t$, $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha)$ (рис. 7.35). Так как вращающий момент определяется произведением тока в якоре и магнитного потока, то

$$M = C I \Phi = \frac{PN}{2\pi a} I_m \Phi_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \alpha) =$$

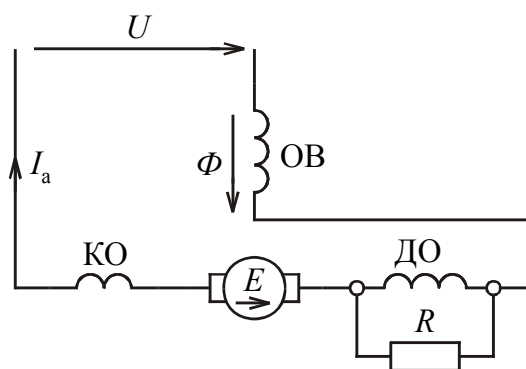
$$= \frac{PN}{4\pi a} I_m \Phi_m (\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)) \quad , \quad (7.64)$$

то есть вращающий момент является суммой двух моментов, один из которых представляет собой постоянную величину

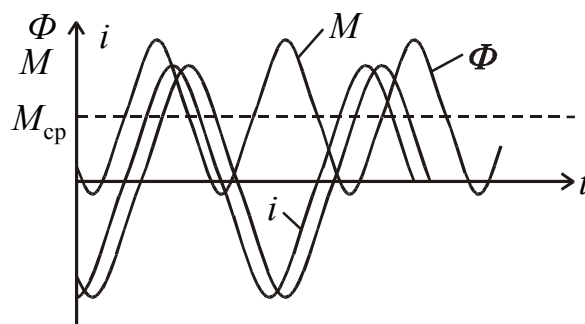
$$M_{\text{ср}} = \frac{PN}{4\pi a} I_m \Phi_m \cos \alpha \quad , \quad (7.65)$$

а другой - переменную, изменяющуюся во времени с двойной частотой:

$$M_{\text{пер}} = \frac{PN}{4\pi a} I_m \Phi_m \cos(2\omega t - \alpha). \quad (7.66)$$



цифры 7.34



цифры 7.35

Таким образом, однофазный коллекторный двигатель развивает вращающий момент, изменяющийся во времени с двойной частотой. Вследствие механической инерции якорь не успевает изменять свою скорость, так что изменение вращающего момента не отражается на скорости вращения, то

есть двигатель работает как бы с постоянным моментом $M_{\text{ср}}$ и с постоянной скоростью ($\omega_0 = \text{const}$).

Уравнение второго закона Кирхгофа для двигателя записывается как

$$\underline{U} = \underline{E} + \underline{I}_a (R + jX). \quad (7.67)$$

где R и X - резистивное и индуктивное сопротивления последовательно включенных обмоток якоря, возбуждения, компенсационной и дополнительных полюсов.

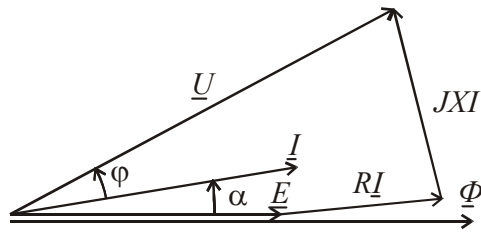


Рисунок 7.36.

Уравнению (7.67) соответствует векторная диаграмма на рис. 7.36. Э.Д.С. якоря, индуцируемая в результате вращения в магнитном поле полюсов, совпадает с вектором потока Φ . Наличие индуктивного сопротивления X вызывает появление фазового сдвига φ между напряжением и током. Обычно $\cos \varphi \approx 0,70 \dots 0,95$ причем $\cos \varphi$ тем больше, чем больше скорость вращения двигателя.

Маломощные двигатели ($P_H \leq 0,5 \text{ кВт}$) с последовательным возбуждением выполняются без добавочных полюсов, что упрощает конструкцию машины. Применение компенсационной обмотки уменьшает индуктивное сопротивление двигателя, повышает $\cos \varphi$ и улучшает условия коммутации.

Маломощные двигатели получили широкое применение в бытовой технике, когда требуются большие скорости вращения (ручной инструмент, пылесосы, полотеры, швейные машины и др.).

Маломощные двигатели с последовательным возбуждением часто изготавливаются для питания как от сети переменного, так и от сети постоянного тока. В этом случае их называют универсальными двигателями с последовательным возбуждением. При питании постоянным током индуктивное падение напряжения отсутствует, и поэтому при одинаковых питающих напряжениях и нагрузках на валу скорость вращения при постоянном токе будет больше, чем при переменном. Более того, электромагнитный момент, развиваемый двигателем при переменном токе:

$$M_{\text{ср}} = \frac{PN}{4\pi a} I_m \Phi_m = \frac{PN}{2\pi a} I \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}},$$

а при постоянном токе

$$M_{\text{пост}} = \frac{PN}{2\pi a} I \Phi_m.$$

Таким образом, при прочих равных условиях, при работе машины от сети переменного тока вращающий момент в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем при питании от сети постоянного тока. На рис. 7.37, а показана принципиальная схема универсального маломощного двигателя, а на рис. 17.37, б – характеристики двигателя.

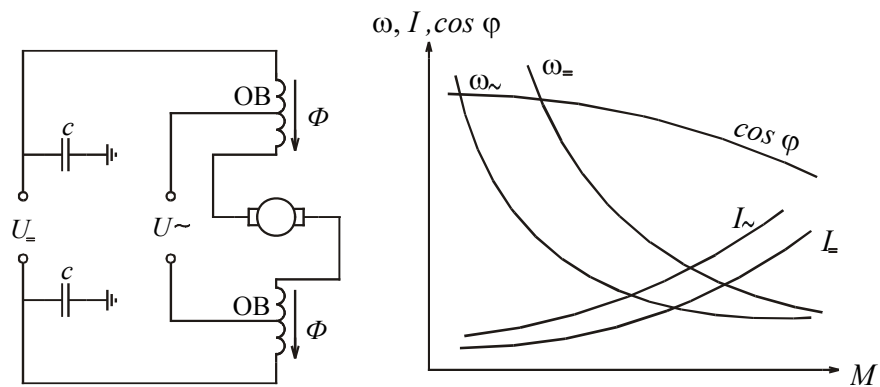


Рисунок 7.37

Характеристики показывают, что при работе от сети переменного тока двигатель потребляет больший ток I_{\sim} , чем при работе от сети постоянного тока $I_{=}$. Уменьшение скорости вращения с ростом нагрузки при работе на переменном токе происходит быстрее, чем при работе от сети постоянного тока.

Глава 8. Регулирование угловой скорости электродвигателей постоянного и переменного тока

История развития электропривода показывает, что на первом этапе он был групповым и нерегулируемым. Использование электродвигателя в таком приводе было сравнительно малоэффективным. В современной промышленности большинство производственных механизмов и машин работают с изменяющейся скоростью вращения. К этой группе относятся металлорежущие станки, прокатные станы, подъемно-транспортные машины и др. С помощью электропривода обеспечиваются различные скорости движения рабочих органов, стабилизация скорости на заданном уровне, а также изменение скорости в соответствии с произвольно изменяющимся задающим сигналом (слежение) или заранее заданной программой (программное движение).

Регулированием называется целенаправленное изменение скорости вращения путем воздействия на двигатель (при неизменных параметрах механической передачи) при помощи специального устройства – регулятора.

Регулирование скорости оценивается шестью основными показателями.

Диапазон регулирования. Этот показатель определяется отношением максимальной скорости ω_{\max} к минимальной ω_{\min} при номинальном токе двигателя:

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

(при $I = I_{\text{ном}}$) обычно диапазон выражают в цифрах, например: 2:1, 6:1, 1:4 и т.д.

Стабильность скорости. Характеризует изменение скорости при возможных колебаниях нагрузки на валу двигателя. Этот показатель определяется жесткостью механической характеристики двигателя. Чем она больше, тем стабильнее скорость при изменениях момента нагрузки и наоборот.

Плавность регулирования скорости. Этот показатель определяется изменением скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую. Чем больше в заданном диапазоне регулирования скорости момент, тем больше может быть получено искусственных характеристик, тем плавнее будет происходить регулирование скорости.

Направление регулирования скорости. В зависимости от способа воздействия на двигатели и тем самым вида получаемых искусственных характеристик, его скорость может увеличиваться и уменьшаться по сравнению с работой на естественной характеристике при данном моменте нагрузки. В

первом случае говорят о регулировании скорости вверх от основной, во втором случае – о регулировании скорости вниз.

Допустимая нагрузка двигателя. Электрический двигатель рассчитан и спроектирован таким образом, что, работая на естественной характеристике с номинальной скоростью, током, моментом и мощностью, он не нагревается выше определенной температуры, на которую рассчитана его изоляция. В этом случае срок его службы является нормативным и составляет обычно 20-25 лет. Поскольку нагрев двигателя определяется потерями энергии в нем, пропорциональными квадрату тока, его нормативный нагрев будет при протекании номинального тока двигателя.

При регулировании скорости двигатель работает уже на искусственных характеристиках, при отличающихся от паспортных условиях. Для сохранения нормативного нагрева двигателя и тем самым расчетного срока его службы нагрузка двигателя может быть не выше номинальной.

Экономичность регулирования скорости. Она будет тем выше, чем меньше затраты связанные с созданием системы регулируемого электропривода, и тем ниже потери энергии при регулировании скорости вращения. Возникшие при этом потери мощности ΔP определяют КПД регулируемого привода:

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P)$$

8.1 Регулирование скорости вращения якоря двигателя

постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения

Двигатель независимого (параллельного) возбуждения

В процессе регулирования скорости мощность и момент, развиваемые двигателем, могут изменяться, но в любом случае они не должны превышать номинального значения.

Из формулы $P = \omega M$ следует, что если $M = M_{\text{ном}}$, то при номинальной скорости ($\omega_{\text{ном}}$) мощность, развиваемая двигателем, будет номинальной, а сам двигатель нагревается до допустимой температуры.

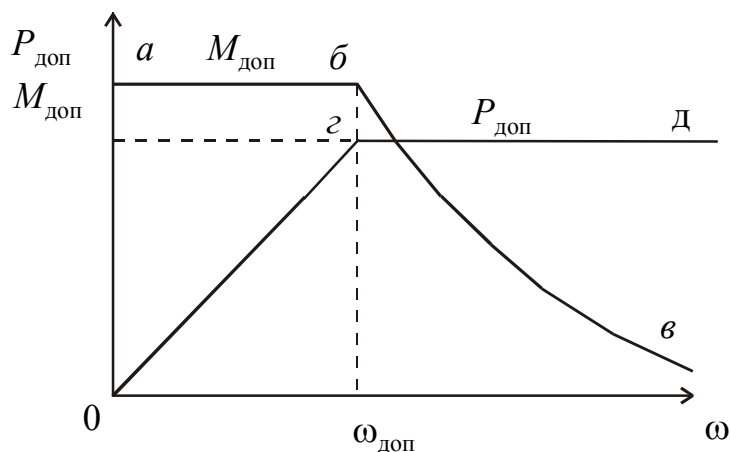


Рисунок 8.1

Если нужно регулировать скорость механизмов с постоянным моментом (участок а – б, рис.8.1), то с ее увеличением мощность растет прямолинейно (участок 0–г) до допустимого значения. Если же скорость нужно увеличивать в еще большей степени, то приходится снижать момент (участок б–в), чтобы мощность осталась на уровне допустимой (участок г – д).

Таким образом, электропривод в процессе регулирования скорости может работать в двух режимах: 1) при постоянном моменте, 2) при постоянной мощности.

Из уравнения механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{M(R_a - R_d)}{c^2\Phi^2}$$

следует, что возможны три способа регулирования скорости:

изменением сопротивления R_d в цепи якоря;

изменением потока возбуждения Φ ;

изменением подводимого напряжения U .

Рассмотрим вкратце сущность каждого из способов:

Регулирование угловой скорости изменением сопротивления резистора R_d в цепи якоря

Пусть двигатель работает от сети постоянного тока напряжением

$U = \text{const}$ и потребляет ток I_{a1} при скорости вращения ω_1 (рис.8.2). В этом случае статический момент нагрузки $M_c = \text{const}$ и магнитный поток $\Phi = \text{const}$, то есть регулирование скорости начинается при установившемся режиме.

Из условия равновесия Э.Д.С. и моментов следует:

$$I_{a1} = \frac{U - c\omega_1\Phi}{R_a} \quad , \text{ A} \quad (8.1)$$

$$M_1 = cI_{a1}\Phi = M_c \quad , \text{ нм} \quad (8.2)$$

Чтобы изменить ω_1 , нужно изменить сопротивление резистора R_d , включенного в цепь якоря (рис. 8.3).

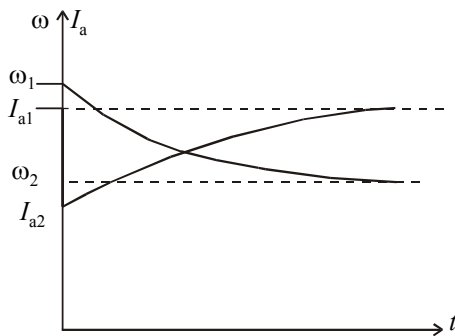


Рисунок 8.2

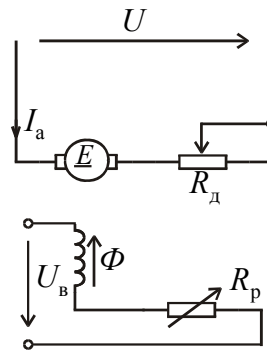


Рисунок 8.3

Так как якорь обладает заметной механической инерцией, то в первый момент после ввода R_d ток скачком уменьшается до

$$I_{a2} = \frac{U - c\omega_1\Phi}{R_a + R_d} = I_{a1} \frac{R_a}{R_a + R_d} \quad (8.3)$$

а момент, развиваемый двигателем

$$M_2 = c\Phi I_{a2} = M_1 \frac{R_a}{R_a + R_d} \quad (8.4).$$

Ток и момент уменьшаются мгновенно в отношении, \dots тогда как момент сопротивления $M_c = \text{const}$. Поэтому по условию равновесия моментов на валу появляется динамический момент:

$$\begin{aligned} M_J &= M_2 - M_1 = M_1 \frac{R_a}{R_a + R_d} - M_1 = \\ &= -M_1 \frac{R_d}{R_a + R_d} = -M_c \frac{R_d}{R_a + R_d}. \end{aligned} \quad (8.5).$$

Под действием этого момента скорость начинает уменьшаться. На этом завершается первый этап регулирования. Далее при уменьшении ω Э.Д.С. E

уменьшается, соответственно чему числитель выражения (8.3) начинает возрастать, то есть увеличивается ток I_A двигателя. Такой рост тока длится до тех пор, пока динамический момент $M_{\text{дин}}$ не станет равен нулю. А это будет в тот момент, когда ток якоря возрастет до первоначального значения $I_A = I_{A1}$. После этого двигатель начнет работать с новой устойчивой скоростью:

$$\omega_2 = \frac{U - I_a(R_a + R_d)}{c\Phi} \quad (8.6)$$

Полезная мощность $P_2 = M_2\omega_2$ уменьшается пропорционально угловой скорости, а потребляемая из сети мощность $P_1 = U(I_a + I_B)$ не изменяется. Поэтому К.П.Д. η – уменьшается. Эффективность данного способа сравнительно низкая, и имеет ограниченное применение, несмотря на легкость и простоту реализации.

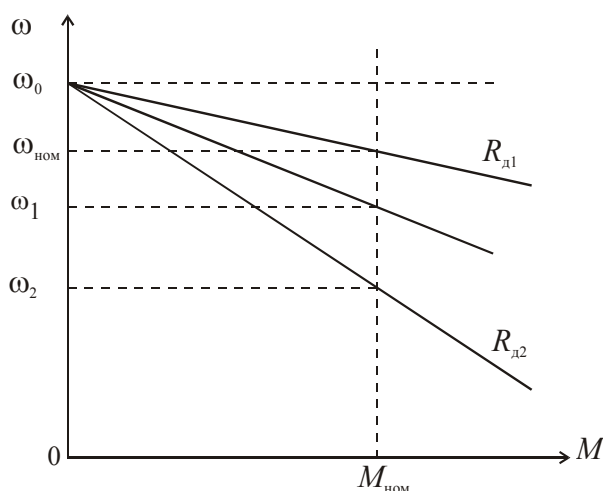


Рисунок 8.4

На рис.8.4, изображены естественная и искусственная механические характеристики двигателя при $R_{д1} < R_{д2}$. При этом, каждому значению R_d , соответствует определенная угловая скорость ω при неизменном моменте $M_{\text{ном}}$.

Регулирование скорости вращения изменением магнитного потока Φ

Регулирование угловой скорости изменением потока возбуждения осуществляется введением сопротивления R_p в цепь обмотки возбуждения, то есть уменьшением тока возбуждения. С уменьшением потока возбуждения угловая скорость увеличивается. Физически этот процесс можно объяснить

следующим образом. Пусть момент сопротивления $M_c = \text{const}$. При уменьшении потока Φ уменьшается Э.Д.С. якоря $E = c\Phi\omega$. Следовательно, ток якоря увеличивается. Это приводит к возрастанию вращающего момента и ускорению двигателя. Одновременно растет Э.Д.С., а ток якоря уменьшается до величины, обеспечивающей требуемый момент при ослабленном магнитном поле.

В соответствии с тем, что $\omega_0 = U/c\Phi$, уменьшение потока приводит к увеличению скорости холостого хода ω_0 . Ток короткого замыкания $I_{кз} = U/R_a$ (при $\omega=0$) от магнитного потока не зависит и при его варьировании будет оставаться неизменным. Отмеченные положения позволяют представить семейство электромеханических характеристик (рис. 8.5, а) при различных значениях магнитного потока соответственно $\Phi_{\text{ном}} > \Phi_1 > \Phi_2$.

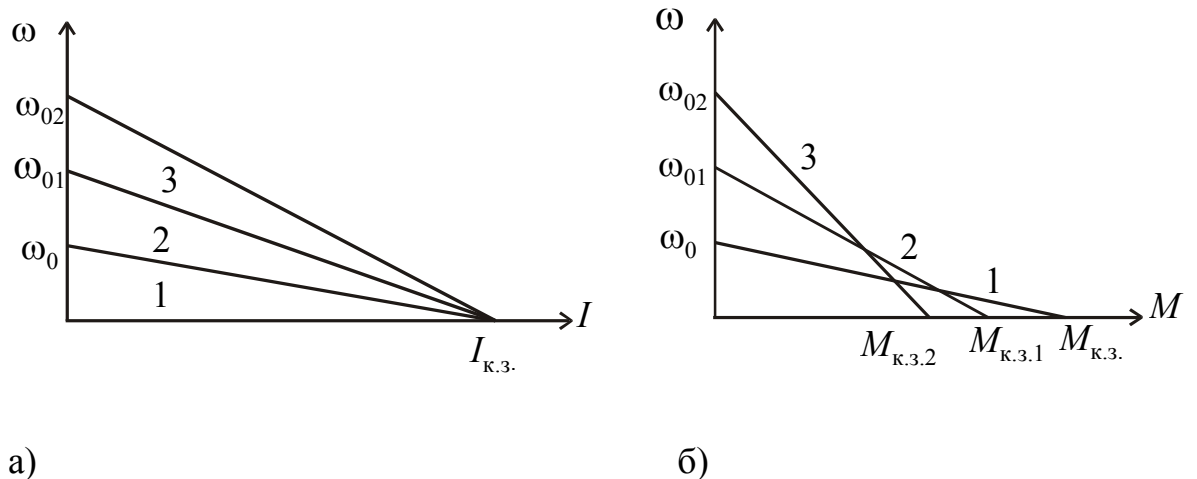


Рисунок 8.5

Момент короткого замыкания $M_{кз} = M_{\Pi} = c\Phi\Phi_{кз}$ при уменьшении магнитного потока Φ будет также снижаться, так как $I_{кз} = \text{const}$. В результате механические характеристики имеют вид прямых, показанных на рис.8.5, б.

Рассмотренный способ регулирования скорости прост, экономичен, так как ток возбуждения сравнительно мал и потери энергии в регулировочном реостате незначительны. При использовании многоступенчатого реостата скорость можно изменять плавно и в широких пределах. Обычно диапазон регулирования $D = 2:1$; более широкий диапазон не рекомендуется из-за ухудшения коммутации.

Недостатком этого способа является возможность регулирования скорости только в сторону увеличения. Другим недостатком считается уменьшение момента M_k (см. рис.8.5, б), а, следовательно, и допустимого момента сопротивления на валу.

Допустимую нагрузку при работе двигателя на искусственных характеристиках можно определить по известному правилу, полагая $I_a = I_{\text{ном}}$, т.е. $M_{\text{с.доп}} = c\Phi_{\text{и}}I_{\text{ном}}$, где $\Phi_{\text{и}}$ – магнитный поток, обусловивший искусственную характеристику.

Так как $\Phi_{\text{и}} < \Phi_{\text{ном}}$, то и $M_{\text{доп.}} < M_{\text{ном.}}$, т.е. двигатель постоянного тока по условию нагрева не может быть нагружен на искусственных характеристиках номинальным моментом сопротивления $M_{\text{сном.}}$. Для определения $M_{\text{доп}}$ выполним следующее. Э.Д.С. якоря на естественной и искусственной характеристиках при номинальном токе

$$E_e = c\Phi_{\text{ном}}\omega_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_a,$$

$$E_{\text{и}} = c\Phi_{\text{и}}\omega_{\text{и}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_a.$$

Так как, $U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}R_a = \text{const}$ то из равенства $E_e = E_{\text{и}}$ вытекает следующее соотношение:

$$\Phi_{\text{и}} = \Phi_{\text{ном}} \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{и}}}, \quad (8.7)$$

где $\omega_{\text{и}}$ – скорость на искусственной характеристике при $I_a = I_{\text{ном}}$. Подставляя (7.7) в выражения для допустимого момента, получаем

$$M_{\text{доп}} \omega_{\text{и}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} = \text{const} \quad (8.8)$$

Как видно из (8.8), при работе двигателя на искусственных характеристиках он может быть нагружен на свою номинальную мощность. Таким образом, при регулировании скорости этим способом целесообразно двигатель нагружать до номинальной мощности при работе на любой искусственной характеристике.

3. Регулирование угловой скорости изменением подводимого напряжения

Данный способ широко используется для регулирования скорости электропривода при высоких требованиях к показателям его качества. По этой причине этот способ является основным при создании автоматизированных электроприводов постоянного тока.

Реализация этого способа предусматривает питание якоря от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется по величине и может изменяться при необходимости по полярности.

Напряжение питания можно подавать от индивидуального генератора (в системе генератор – двигатель); регулировочного трансформатора или автотрансформатора с выпрямителем электромашинного усилителя; тиристорного преобразователя. Возможно применение этих способов в совокупности друг с другом, а также использование обратных связей. Эти факторы в значительной мере определяют свойства электропривода: экономичность регулирования, плавность, диапазон, нечеткость характеристик и даже возможность изменения формы механической характеристики.

Система генератор – двигатель (Г – М). Приводной двигатель (обычно асинхронный или синхронный) приводит во вращение якорь возбудителя В и генератора G (рис.8.6). Обмотки возбуждения ОВГ, ОВМ, ОВВ машин постоянного тока питаются от возбудителя.

С помощью реостата $R_{рг}$ регулируется Э.Д.С. генератора по величине, а полярность изменяется переключателем. При этом соответственно изменяется напряжение U_a на якоре двигателя. Схема позволяет плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения двигателя по величине и направлению. Диапазон регулирования может достигать значения $D=40:1$. Механические характеристики при таком способе регулирования представлены на рис.8.7.

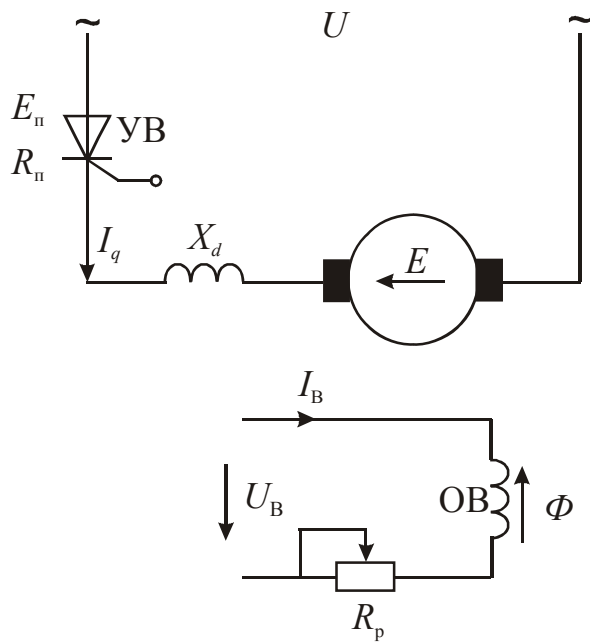


Рисунок 8.6

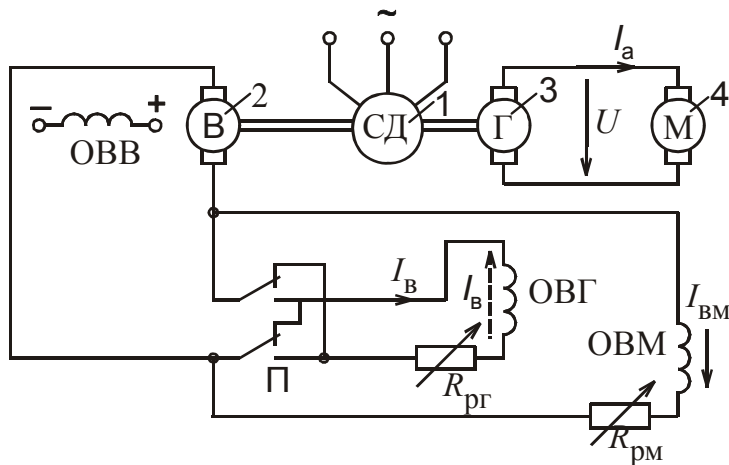


Рисунок 8.7

Уравнение механической характеристики двигателя в системе Г – М имеет вид:

$$\omega = \frac{E}{C\Phi} - \frac{M(R_{a.Г} + R_{a.М})}{C^2\Phi^2}, \quad (8.8)$$

где $E = C_{Г}\Phi_{Г}\omega_{Г}$ – Э.Д.С. генератора.

Механические характеристики (2 ...8), построенные по формуле (7.8), несколько мягче (угол наклона больше, чем характеристики 1), чем естественная из-за сопротивления $R_{a.Г}$. Вместе с тем они все остаются прямоли-

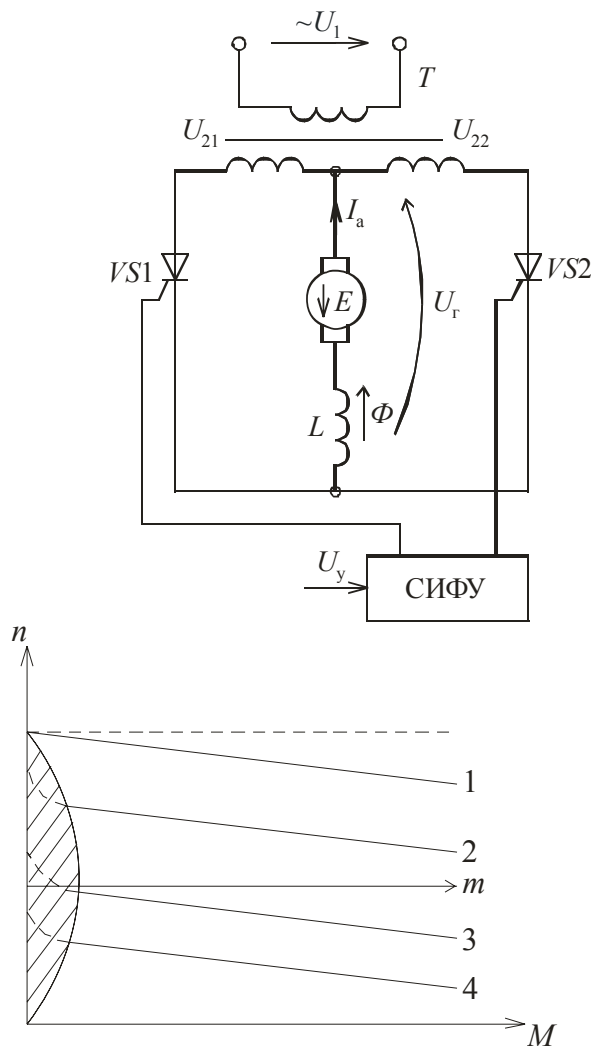
нейными и параллельными. Характеристики 7 и 8 получены при изменении полярности Э.Д.С. E на обратную.

К недостаткам данной системы можно отнести громоздкость агрегата, сложность обслуживания, низкий КПД, значительная инерционность. Поэтому система $G - M$ в последнее время вытесняется другими, преимущественно тиристорными.

Система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП – М).

Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время в регулируемом электроприводе постоянного тока, являются полупроводниковые статические преобразователи. Они представляют собой управляемые реверсивные или нереверсивные выпрямители, собранные по нулевой или мостовой однофазной или трехфазной схеме.

Принцип действия, свойства и характеристики системы ТП – М рассмотрим на примере схемы (рис. 8.8, а), в которой использован однофазный двухполупериодный нереверсивный тиристорный выпрямитель, собранный по нулевой схеме.



а)
б)

Рисунок 8.8

Преобразователь включает в себя согласующий трансформатор Т, имеющий две вторичные обмотки, два тиристора V_{S1} и V_{S2} , сглаживающий реактор (дроссель насыщения L) и систему импульсно-фазового управления тиристорами СИФУ. Преобразователь обеспечивает регулирование напряжения на якоре двигателя за счет изменения его среднего значения U_α . Это достигается регулированием с помощью СИФУ по сигналу U_y угла α открывания тиристора.

Когда $\alpha = 0$, то есть тиристоры V_{S1} и V_{S2} получают импульсы управления от СИФУ в указанный момент, преобразователь осуществляет двухполупериодное выпрямление и к якору приложено наибольшее напряжение $U_{\alpha 0}$. Если теперь импульс управления подать с задержкой на угол $\alpha \neq 0$, то среднее значение напряжения на якоре уменьшается. Зависимость среднего значения напряжения многофазного преобразователя от угла открывания тиристора α имеет вид:

$$U_d = U_m m \sin(\pi / m) \cos(\alpha / \pi) = U_{\alpha 0} \cos \alpha, \quad (8.9)$$

где m – число фаз; U_m – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора; U_d – среднее значение напряжения на якоре двигателя при $\alpha = 0$.

Ввиду пульсирующего характера напряжения преобразователя ток в цепи якоря также является пульсирующим. Такой характер тока оказывает отрицательное влияние на работу двигателя, приводя к ухудшению условий работы его коллектора, дополнительным потерям энергии и нагреву. Для уменьшения пульсаций тока в цепь якоря включается сглаживающий реактор, индуктивность L которого выбирается в зависимости от допустимого уровня пульсаций тока.

Уравнение механической характеристики (рис. 8.8, б) имеет вид:

$$\omega = \frac{U_{d0} \cos \alpha}{C\Phi} - \frac{M(R_a + R_n)}{C^2\Phi^2}, \quad (8.10)$$

где $R_n = X_T m / (2\pi) + R_T + R_L$ – эквивалентное сопротивление преобразователя; X_T , R_T – соответственно приведенные ко вторичной обмотке

индуктивное сопротивление рассеяния и резистивное сопротивление обмоток трансформатора; R_L – резистивное сопротивление сглаживающего реактора.

Особенностью характеристик двигателя является наличие области, выделенной пунктирной линией и заштрихованной, где характеристики нелинейны. В этой области имеет место режим прерывистого тока и вызванное этим заметное уменьшение жесткости характеристики.

Меньшим углам открывания соответствует большее U_d и более высокая скорость вращения якоря; при $\alpha = \pi/2, U_d = 0$ и двигатель работает в режиме динамического торможения.

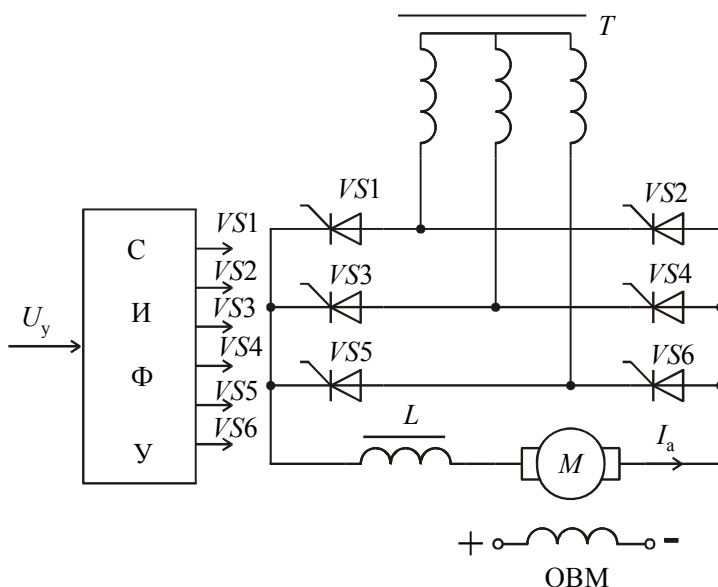


Рисунок 8.9

На рис.8.9 приведена схема электропривода с трехфазным мостовым выпрямителем. Механические характеристики двигателя при использовании этого типа выпрямителя аналогичны показанным на рис.8.8, б. Вместе с тем пульсации тока в якоре при использовании такого управляемого выпрямителя меньше, чем в схеме рис. 8.8, а. В некоторых случаях можно не использовать согласующий трансформатор T .

Для получения характеристики двигателя во всех четырех квадрантах используются реверсивные управляемые выпрямители, которые состоят из двух нереверсивных выпрямителей. Работу двигателя в четырех квадрантах можно обеспечить также за счет изменения тока в обмотках возбуждения двигателя.

8.1 Регулирование скорости вращения якоря электродвигателя с последовательным возбуждением

В электроприводе ряда подъемных машин и механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ). Основной особенностью этих двигателей является включение обмотки возбуждения последовательно с якорем (рис.8.10), вследствие чего ток якоря одновременно является и током возбуждения.

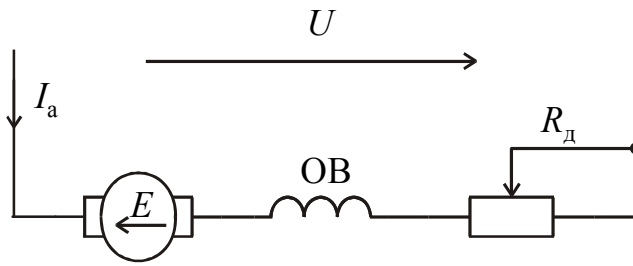


Рисунок 8.10

Регулирование тока, момента и скорости двигателя с помощью резистора R_d отличается простотой своей реализации. Для получения семейства искусственных характеристик при $R_d = U_{a.г}$ проведем анализ уравнений электромеханической и механической характеристик, представленных в виде:

$$\omega = U / c_k I_a - R / c_k \quad (8.11)$$

$$\omega = U / \sqrt{c_{km}} - R / c_k \quad (8.12)$$

соответственно.

Здесь $K I_a = \Phi$ – магнитный поток, созданный током якоря (возбуждения).

Так как при $I, M \rightarrow 0$ магнитный поток $\Phi = K I_a \rightarrow 0$, а $\omega \rightarrow \infty$, то все искусственные характеристики имеют своей вертикальной асимптотой ось скорости. Для определения их расположения относительно естественной характеристики выполним следующее.

Используя (8.11), запишем значения скорости двигателя на естественной $\omega_e(I)$, при $R_d = 0$ и искусственной $\omega_{и}(I)$ при $R_d > 0$ характеристиках при каком-то любом фиксированном токе якоря I_a .

Найдем отношение этих скоростей, отметив, что поскольку ток при нахождении отношения может быть сокращен. После простых преобразований получаем:

$$\omega_{и} = \omega_e \frac{U_{ном} - I_{a.ном} (R_a + R_{ОВ} + R_d)}{U_{ном} - I_{a.ном} (R_a + R_{ОВ})} \quad (8.13)$$

Выражение (8.13) позволяет определить расположение искусственных электромеханических характеристик, относительно естественной. Так как числитель в (8.13) при $R_d > 0$ всегда меньше знаменателя, то и $\omega_{и} < \omega_e$. Ис-

искусственные электромеханические характеристики 2, 3 лежат ниже естественной 1, причем, чем больше R_d , тем больше снижение скорости (рис. 8.11).

Аналогичный анализ показывает, что искусственные механические характеристики подчиняются той же закономерности (рис.8.11, б).

Регулирование скорости якоря данным способом характеризуется такими показателями: диапазон равен $D = 2 \dots 3$; направление регулирования скорости – вниз; плавность регулирования определяется плавностью изменения R_d ; допустимая нагрузка – номинальный момент; способ экономически оправдан при малых диапазонах регулирования или кратковременной работе на пониженных скоростях

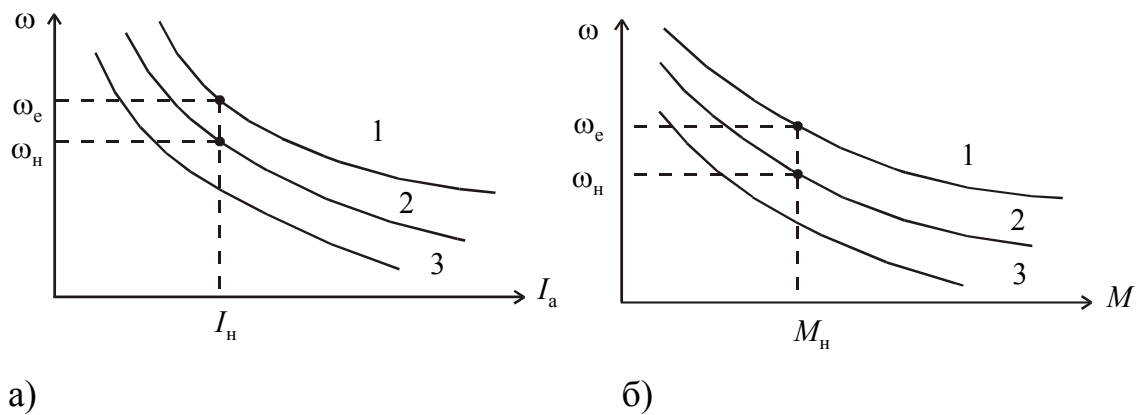


Рисунок 8.11

При регулировании скорости изменением напряжения питания двигателя (рис.8.12, а) подключается к управляемому выпрямителю, выходное напряжение которого регулируется в соответствии с изменением входного управляющего сигнала U_y .

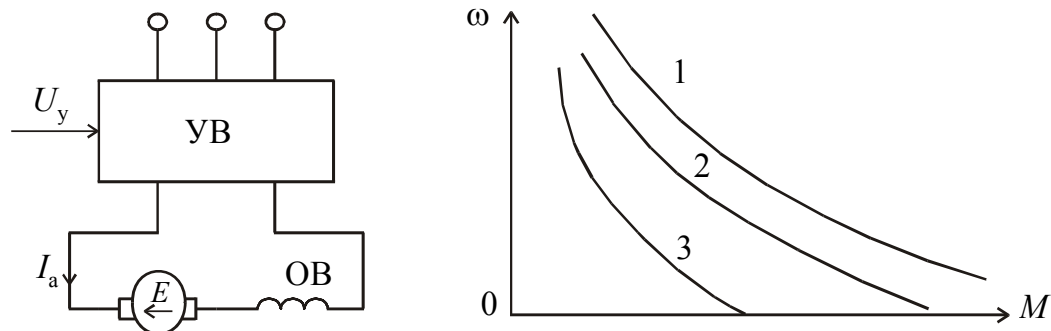


Рисунок 8.12

Механические характеристики при различных напряжениях преобразователя показаны на рис.8.12, б. При $U = U_{ном}$ и пренебрежении внутренним сопротивлением управляемого выпрямителя двигатель работает на естественной характеристике 1.

При снижении напряжения в соответствии с (8.12) его скорость снижается и искусственные характеристики 2 и 3 располагаются ниже естественной. При $I_a \rightarrow 0, M \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0, \omega \rightarrow 0$, т.е. ось скорости является асимптотой характеристик двигателя.

8.3 Регулирование скорости вращения ротора асинхронного двигателя

Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем (АД) является самым массовым видом привода в промышленности, сельском хозяйстве и бытовой технике. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, их меньшими массогабаритными параметрами, стоимостью и надежностью в работе.

В основную общепромышленную серию 4А входят двигатели на мощности от 0,66 до 400 кВт, которые выпускаются в самых различных модификациях и конструктивных исполнениях: с повышенным пусковым моментом и скольжением; с фазным ротором; со встроенной температурной защитой; с электромагнитным тормозом; взрыво – и искростойкие и химостойкие .

Для электропривода крановых механизмов производятся специализированные двигатели МТФ, МТКФ и 4МТ, отличающиеся улучшенными технико-эксплуатационными показателями.

Двигатели серии АИ, выпускаемые на мощности от 0,75 до 160 кВт, имеют технические параметры, унифицированные среди стран-членов Интерэлектро.

Кроме того , выпускаются АД серий В и ВР, предназначенные для работы во взрыво – и пожароопасных средах.

Основной областью применения АД вплоть до недавнего времени являлся нерегулируемый электропривод. В последние годы в связи с разработкой и серийным выпуском тиристорных преобразователей частоты и напряжения стали создаваться регулируемые асинхронные электроприводы с характеристиками, не уступающими по своим показателям электроприводам постоянного тока.

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

- Изменением числа пар полюсов;
- Изменением частоты напряжения питания;
- Изменением величины напряжения питания;
- Изменением сопротивления в цепи ротора.

8.3.1 Изменение числа пар полюсов

Из выражения

$$\omega_0 = 2\pi f / p \quad (8.14)$$

следует, что при изменении числа p скорость вращения ротора будет изменяться. Для этой цели промышленностью выпускаются специальные АД с короткозамкнутым ротором, позволяющие за счет переключения обмоток изменить число пар полюсов статора. Такие двигатели называются многоскоростными и выполняются для регулирования с постоянной мощностью, так и с постоянным моментом. Для изменения p существуют две схемы переключения обмотки статора: с одинарной звезды на двойную (рис. 8.13, а) и с треугольника на двойную звезду (рис. 8.13, б).

Для правильного составления этих схем руководствуются обозначениями выводов обмотки статора. На рис.8.13 цифра перед буквой С обозначает номер полуобмотки. Маркировка С1, С2, С3 обозначает начало, а С4, С5, С6 – конец катушек обмотки.

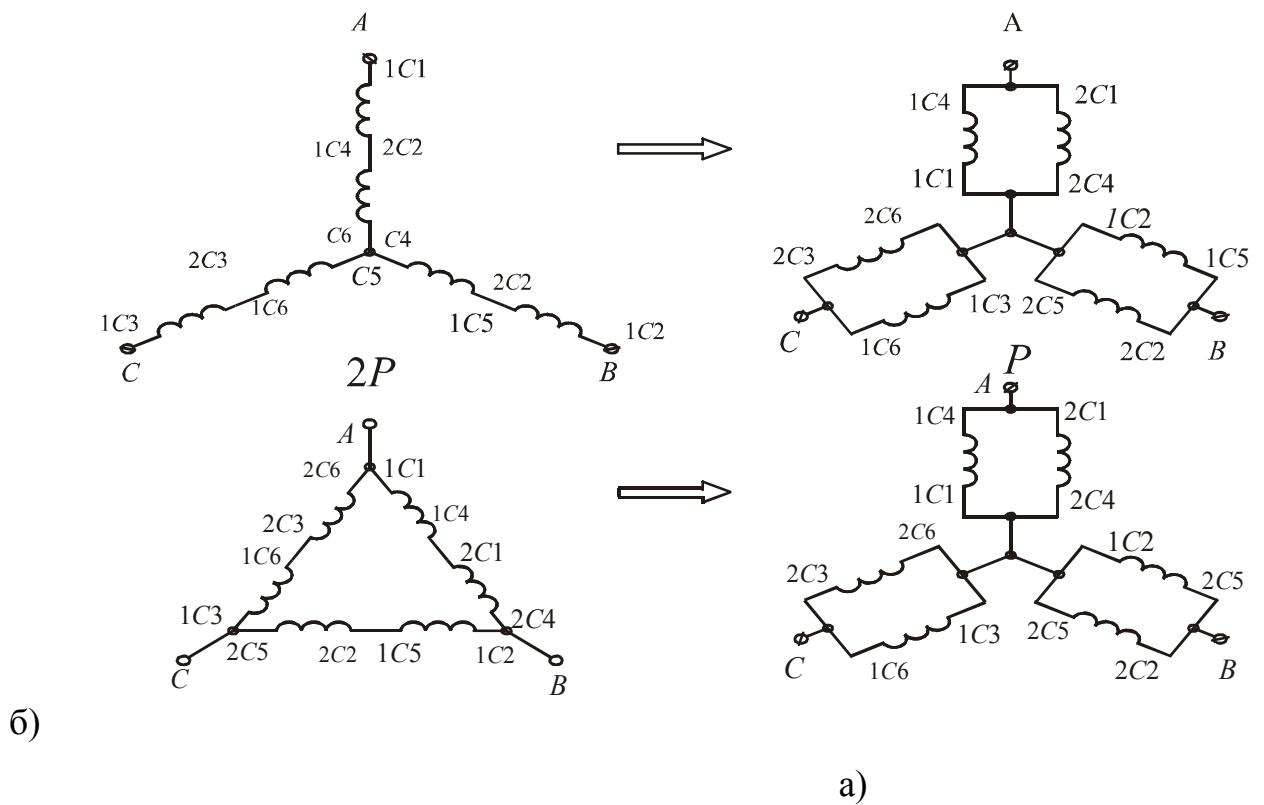


Рисунок 8.13

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

$$P_{Y \text{ ном}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_Y \quad (8.15)$$

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

$$P_{YY} = 2\sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{YY} \quad (8.16)$$

Так как при номинальной нагрузке $\cos \varphi_Y \approx \cos \varphi_{YY}$, то, разделив (8.16) на (8.15), получим $P_{YY} = 2P_Y$.

Вращающий момент двигателя до и после переключения остается неизменным, ($M_Y = M_{YY}$) и показан на рис. 8.14, а.

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

$$P_{\Delta \text{ ном}} = 3 U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\Delta} \quad (8.17)$$

После переключения на двойную звезду (число пар полюсов p) угловая скорость ротора возрастает, ток в фазе сети $I = 2I_{\text{ном}}$, и мощность двигателя определяется выражением (8.16). Взяв отношение (8.17) и (8.16), при равенстве $\cos \varphi_{\Delta} = \cos \varphi_{Y\bar{Y}}$ получим

$$\frac{P_{\Delta\text{ном}}}{P_{Y\bar{Y}\text{ном}}} = \frac{3I_{\text{ном}}U_{\text{ном}}}{2\sqrt{3}U_{\text{ном}}I_{\text{ном}}} = 0,866, \quad (8.18)$$

то есть при обеих схемах включения, мощность двигателя остается примерно одной и той же ($P = \text{const}$).

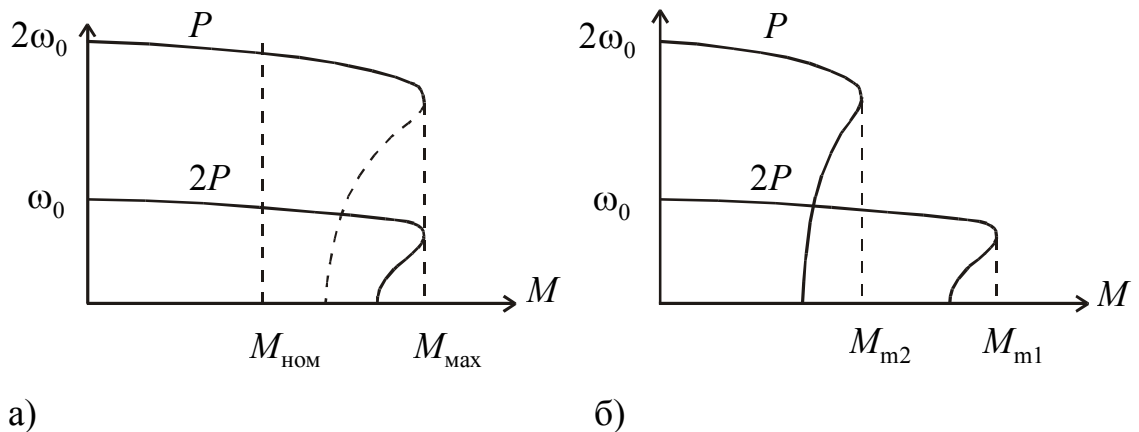


Рисунок 8.14

Вращающий момент двигателя:

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

изменяется пропорционально изменению скорости:

$$M_{\Delta} / M_{Y\bar{Y}} \approx \omega_{Y\bar{Y}} / \omega_{\Delta}.$$

Механические характеристики для схемы « $\Delta/Y\bar{Y}$ » изображены на рис. 8.14, б.

Способ регулирования скорости изменением числа пар полюсов прост в реализации и экономичен. Недостаток – ступенчатое регулирование и небольшое число скоростей.

Изменение частоты напряжения питания

При этом способе регулирование можно производить как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения скоростей. Данный способ, называемый частотным, является одним из наиболее перспективных, и широко внедряется в настоящее время. Принцип его заключается в том, что измене-

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p},$$

нию частоты напряжения питания, соответствует угловая скорость то есть получают различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а полученные характеристики отличаются высокой жесткостью.

Для получения высоких энергетических показателей – коэффициентов полезного действия и мощности, перегрузочной способности – одновременно с изменением частоты f необходимо изменять напряжение питания U . Закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки M_c .

При постоянном моменте нагрузки $M_c = \text{const}$ напряжение на статоре должно изменяться пропорционально его частоте, то есть $U_1/f_1 = \text{const}$, а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости вращения, оно запишется в виде $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$.

Для вентиляторного характера момента нагрузки это соотношение имеет вид $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

Таким образом, при реализации частотного способа регулирования скорости АД должен быть использован преобразователь частоты, который позволяет также регулировать и напряжения на статоре. Механические характеристики для указанных трех случаев представлены на рис. 8.15.

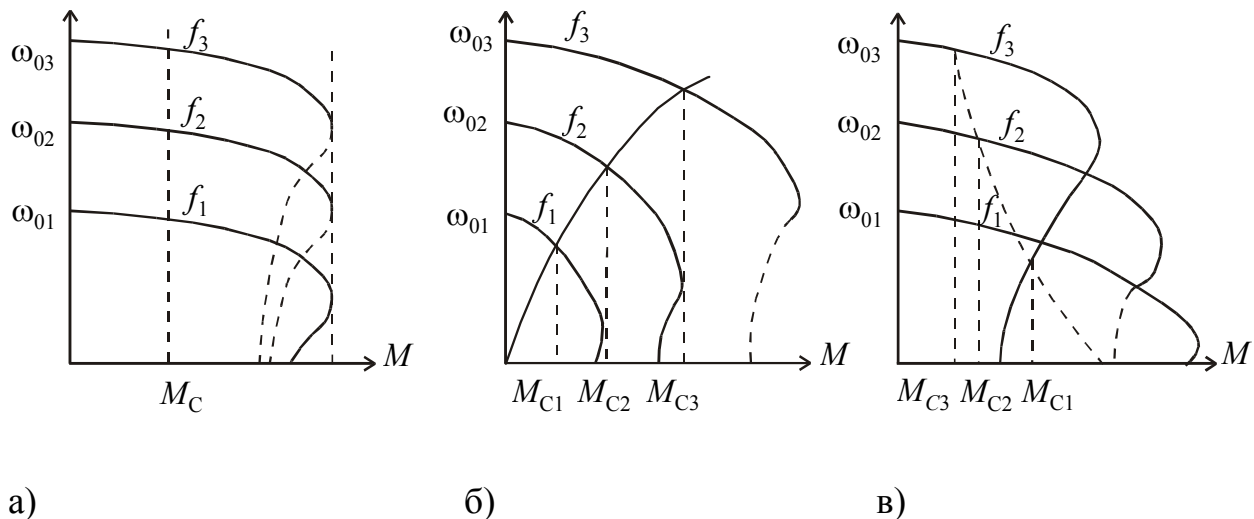


Рисунок 8.15

На рис. 8.15 приведены механические характеристики, при $M_c = \text{const}$; на рис. 8.15,б – при $M_c = \text{var}$ (вентиляторная нагрузка); на рис. 8.15, в – при $P_{ст} = \text{const}$.

Регулирование скорости вращения выше номинальной (при $f > 50$ Гц) допустимо в 2-3 раза. Это ограничение обусловлено прочностью крепления обмотки ротора, а также повышенными потерями мощности в стали статора. Кроме того, по условиям нормальной работы АД нельзя повышать напряжение сверх номинального. Поэтому, регулирование скоростей в этой области ведется при $U = U_m = \text{const}$, в связи с чем максимальный момент M_m будет уменьшаться при увеличении частоты f выше номинальной.

Способ регулирования скорости изменением частоты позволяет получить жесткие механические характеристики. Потери мощности при работе на искусственных характеристиках невелики, так как двигатель работает на линейных участках при небольших значениях скольжения. При наличии соответствующего преобразователя частоты можно получить желаемую плавность регулирования.

В современном электроприводе применяются различные преобразователи частоты: электромашинные и вентильные (полупроводниковые). Электромашинным преобразователям свойственен ряд существенных недостатков, основным из которых – низкий К.П.Д. из-за четырехкратного преобразования энергии, громоздкость и инерционность.

В настоящее время наибольшее распространение получили вентильные преобразователи частоты. Поэтому вентильный электропривод переменного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый преобразователь на тиристорах, называется системой «преобразователь частоты – двигатель» (ПЧ – Д).

Появление статических ПЧ расширило применение АД, позволило достигнуть высоких скоростей, недостижимых для двигателей постоянного тока.

В качестве статических ПЧ наибольшее распространение получили две их разновидности:

- 1) Автономный инвертор со звеном постоянного тока, который требует предварительного выпрямления переменного тока сети и последующего инвертирования;

- 2) ПЧ с непосредственной связью, в котором совмещены функции выпрямителя и инвертора.

Наибольшее распространение, получили ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока, выполненные на тиристорах. Структурная схема электропривода с таким преобразователем показана на рис. 8.16.

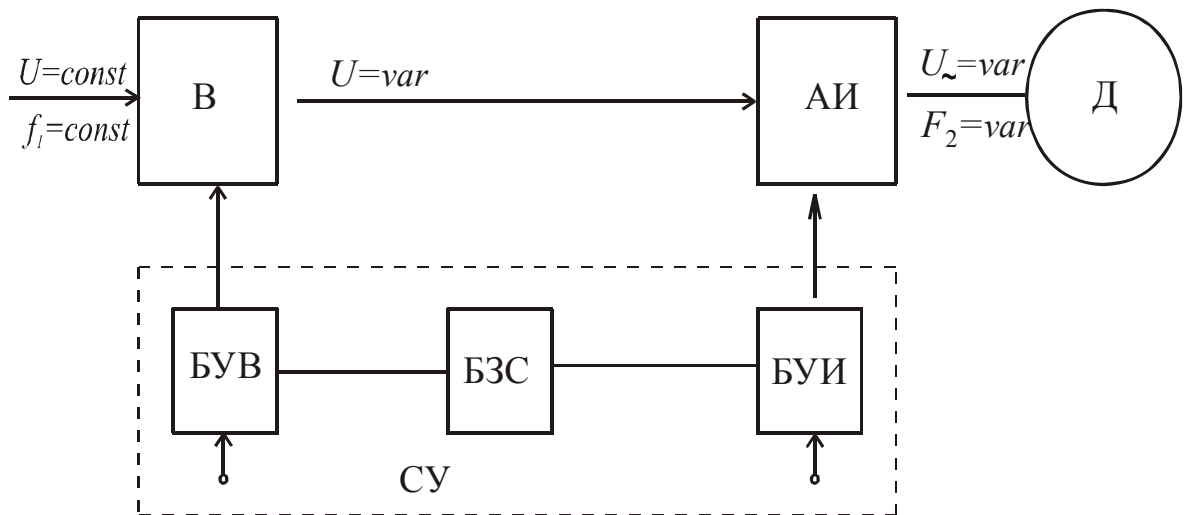


Рисунок 8.16

Преобразователь состоит из трех основных узлов: управляемого выпрямителя В, преобразующего энергию сети переменного тока напряжением U и частотой f_1 в энергию постоянного тока при регулируемом напряжении $U = V_{\text{var}}$; автономного инвертора АИ, преобразующего энергию постоянного тока в энергию переменного тока напряжением $U = \text{var}$ и частотой $f_2 = \text{var}$ на выходе; систему управления СУ с блоками управления выпрямителем БУВ, инвертором – БУИ и задания скоростей – БЗС для отдельного регулирования частоты и напряжения.

Автономный инвертор выполняется по различным схемам. Одна из возможных схем – схема параллельного инвертора напряжения с диодами реактивного тока и автотрансформаторной коммутацией – изображена на рис. 8.17, а; диаграмма формирования выходного напряжения требуемой частоты – на рис. 8.17, б.

Тиристоры VS1-VS6 инвертора являются коммутирующими элементами, посредством которых каждая обмотка фазы с разной полярностью подключается к напряжению. Принцип действия схемы основан на разряде коммутирующего конденсатора С1 – С6 на соответствующую половину обмотки L1 – L6 автотрансформатора.

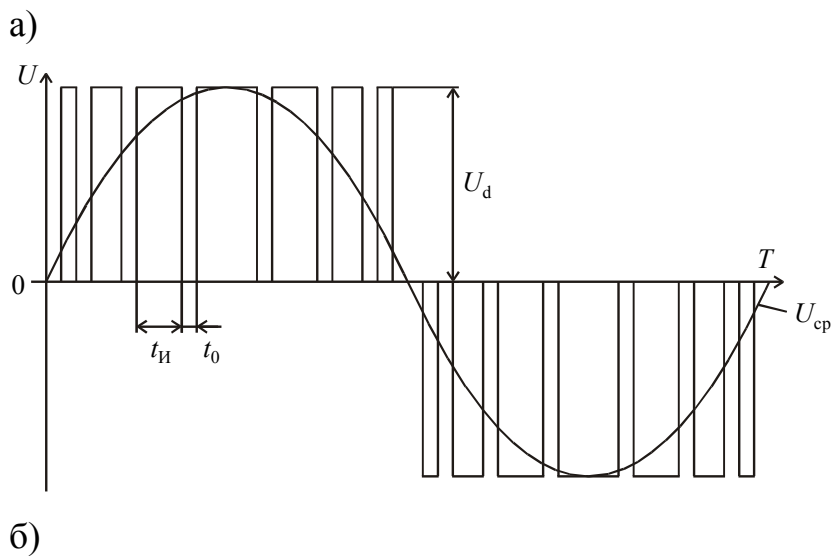
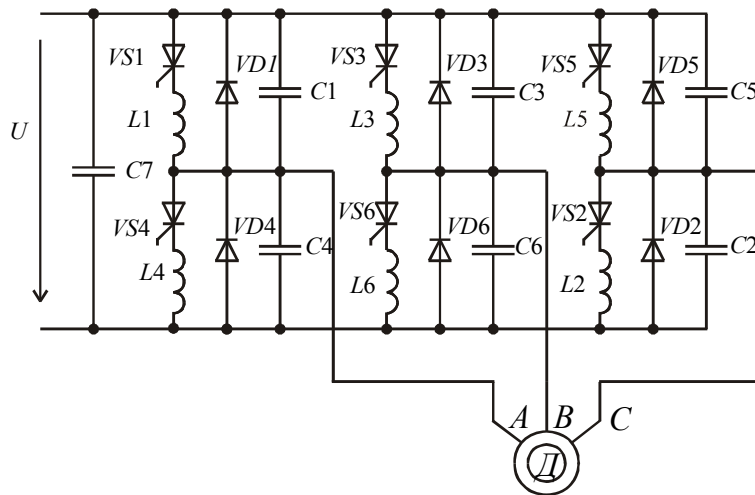


Рисунок 8.17

Последовательность открывания тиристоров соответствует их порядковым номерам в схеме. Например, если открыты тиристоры VS1 и VS2, то ток в двигателе проходит по фазам А и С, при этом одновременно заряжается конденсатор С4. Для закрывания VS1 и открывания VS3 одновременно подается кратковременный управляющий импульс на тиристор VS4 (порядка десятка микросекунд) и более длительный импульс на тиристор VS3. Открывание VS4 вызывает разряд С4 через обмотку L4. В обмотке L1 наводится напряжение, которое запирает тиристор VS1. Более длительный импульс, поданный на управляющий электрод VS3, вызывает его открывание. Угол открытого состояния тиристора в этой схеме $\lambda = \pi$.

При подаче управляющего импульса на время t_n в обмотку фаз двигателя за счет индуктивности запасается электромагнитная энергия. При паузе

(отрезок t_0) эта энергия возвращается в источник постоянного тока через диоды обратного тока VD1-VD6 в тот момент, когда мгновенные значения токов имеют направления противоположные мгновенным значениям напряжения.

В рассматриваемом инверторе тиристоры можно запирают в любой момент времени и таким образом осуществлять широкое импульсное регулирование выходного напряжения U_α . Широтноимпульсное регулирование за счет изменения ширины импульса U_α позволяет модулировать или изменять среднее значение напряжения U_{cp} по синусоидальному закону (рис. 8.17, б). При модулировании U_{cp} разность между прямоугольной и основной (синусоидальной) формой напряжения выравнивается за счет индуктивных элементов, входящих в силовую цепь инвертора.

Приведенная на рис. 8.17, б схема ПЧ – Д является хотя и распространенной, но далеко не единственной. Есть ПЧ, которые отличаются способами регулирования напряжения и видами искусственной коммутации тиристоров.

Изменение величины сопротивления в цепи роторной цепи

АД с фазным ротором (реостатное регулирование)

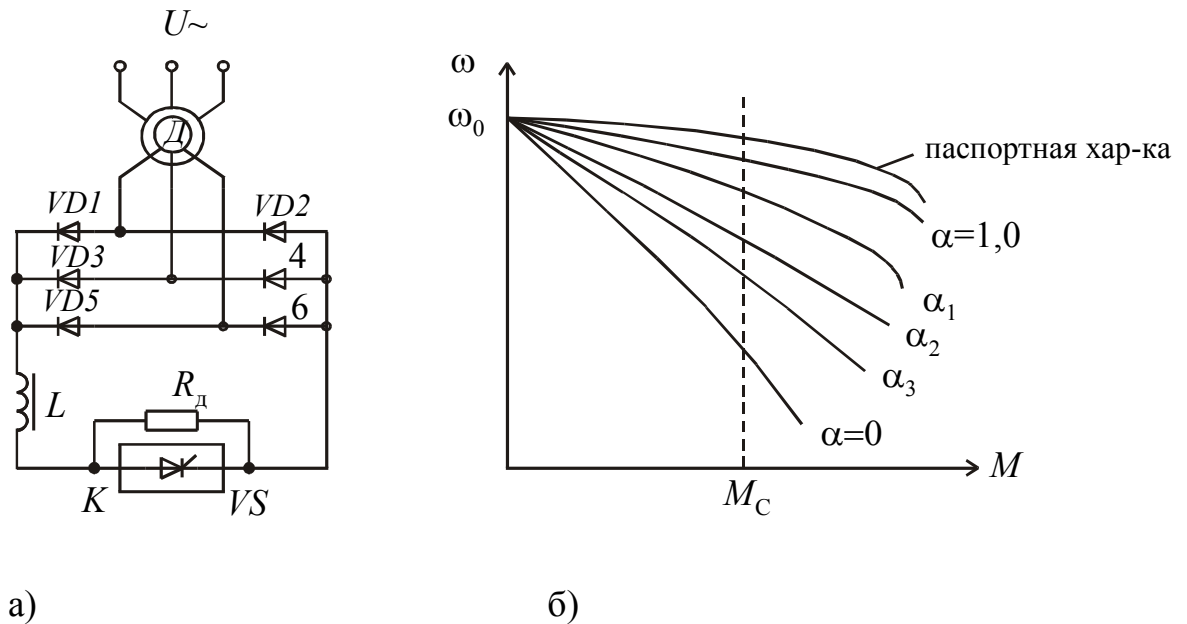


Рисунок 8.18

При изменении R_d ступенями получают реостатные характеристики. Из рассмотрения этих характеристик при различных значениях R_d видно, что регулировать скорость возможно только в сторону уменьшения. Недостатки метода те же, что и для двигателя постоянного тока.

При импульсном изменении сопротивления R_d плавность регулирования существенно ухудшается, для чего применяется тиристорный коммутатор К (рис. 8.18, а). Добавочный резистор R_d включается через трехфазный выпрямитель и сглаживающую индуктивность L.

В квазиустановившемся режиме коммутации изменение коэффициента заполнения импульсов α приводит к изменению эквивалентного внешнего сопротивления $R_{\text{эк}} = R_d \cdot (1 - 2\alpha)$. В результате $R_{2\Sigma} = R_{2ВВ} + R_{\text{эк}}$ увеличивается, а скорость уменьшается. Механическая характеристика при импульсном изменении сопротивления роторной цепи приведена на рис. 8.18, б.

При $\alpha = 1$ механическая характеристика не совпадает с паспортной из-за того, что тиристорный коммутатор при открытом тиристоре обладает конечным сопротивлением.

Глава 9. Переходные процессы в электроприводах

9.1 Общие сведения о переходных процессах

Во время пуска электродвигателя или его остановки, во время изменения скорости, реверсирования возникают переходные режимы. Они имеют место при сбросе нагрузки или внезапных перегрузках, в момент скачкообразного изменения напряжения сети или сопротивления в цепи якоря и возбуждения. При этом происходит не только изменения угловой скорости, но и изменение момента на валу двигателя, тока в обмотках, мощности, получаемой из сети, и другие явления, называемые переходными процессами.

В переходном режиме электропривода одновременно и взаимосвязано действуют переходные механические, электромагнитные, тепловые процессы. Механические и электромагнитные в совокупности называются электро-механическими процессами. При протекающем электро-механическом процессе более медленный тепловой процесс существенного влияния на изменение параметров электропривода не оказывает. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться только электро-механический переходный процесс. Этот процесс обусловлен инерционными массами электропривода и электромагнитной инерцией обмоток электрических двигателей и других устройств в системе привода.

Цель расчета и анализа переходных процессов – определение времени переходного процесса и зависимостей $\omega(t), M(t), I(t)$, а в некоторых случаях – установление зависимости пройденного в переходном режиме пути или угла поворота механизма.

Сложность расчета переходных процессов зависит от того, какой вид имеет совместная характеристика двигателя и механизма: прямолинейный или криволинейный.

9.2 Переходные процессы при линейных характеристиках

двигателя и механизма

Из основного уравнения движения электропривода получаем

$$M - M_c = Jd\omega / dt,$$

где $M - M_c = M_{\text{дин}}$ – динамический момент.

Решая уравнение движения относительно dt , получается

$$dt = Jd\omega / (M - M_c) \tag{9.1}$$

Время, необходимое для изменения угловой скорости электропривода от начальной ω_H до конечной (установившейся) ω_y ,

$$t_{1,2} = \int_{\omega_H}^{\omega_y} J d\omega / (M - M_c) \quad (9.2)$$

Из (9.2) видно, что теоретически $t = \infty$, так как при $M = M_c$ величина, стоящая под знаком интеграла, стремится к бесконечности. В практических расчетах считают, что переходный процесс заканчивается при $\omega = (0,95 \dots 0,98) \omega_y$.

В простейшем случае при $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ и $J = \text{const}$ время переходного процесса

$$t_{1,2} = J(\omega_y - \omega_H) / (M - M_c), \quad (9.3)$$

где M – момент, развиваемый двигателем при переходном процессе; в (9.3) считается постоянным в течение всего процесса и принимается равным среднему моменту M_{cp} .

Время разгона электропривода из неподвижного состояния до номинальной скорости при $M_{cp} = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$

$$t_{1,2} = J\omega_{ном} / (M_{cp} - M_c) \quad (9.4)$$

Так как при торможении двигателя M_c действует согласно M_{cp} , то время торможения при тех же условиях от $\omega_{ном}$ до $\omega = 0$

$$t_T = J\omega_{ном} / (M_{cp} - M_c) \quad (9.5)$$

Для ряда рабочих машин в процессе работы $M_c = \text{const}$, так как в основном он обуславливается силами трения. У этих машин зависимость $M_{cp}(\omega)$ выражается прямой линией, параллельной оси абсцисс (см. рис. 9.1), то есть считается, что характеристика механизма линейная. Совместная характеристика, построенная по уравнению (9.1), будет прямолинейной. Она пересекает ось ординат в точке $\omega_{уст}$, а ось абсцисс – в точке короткого замыкания ($M^{до}$).

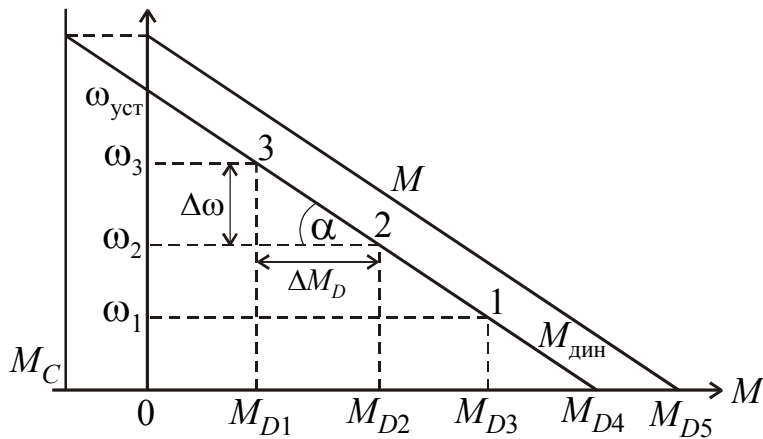


Рисунок 9.1

При включении двигателя динамический момент в точке короткого замыкания максимальный (это $M^{до}$), а следовательно, и ускорение $d\omega/dt$ в начале пуска будет наибольшим. Скорость резко возрастает, затем её рост замедляется и вовсе прекращается (кривая 1, рис.9.2, а).

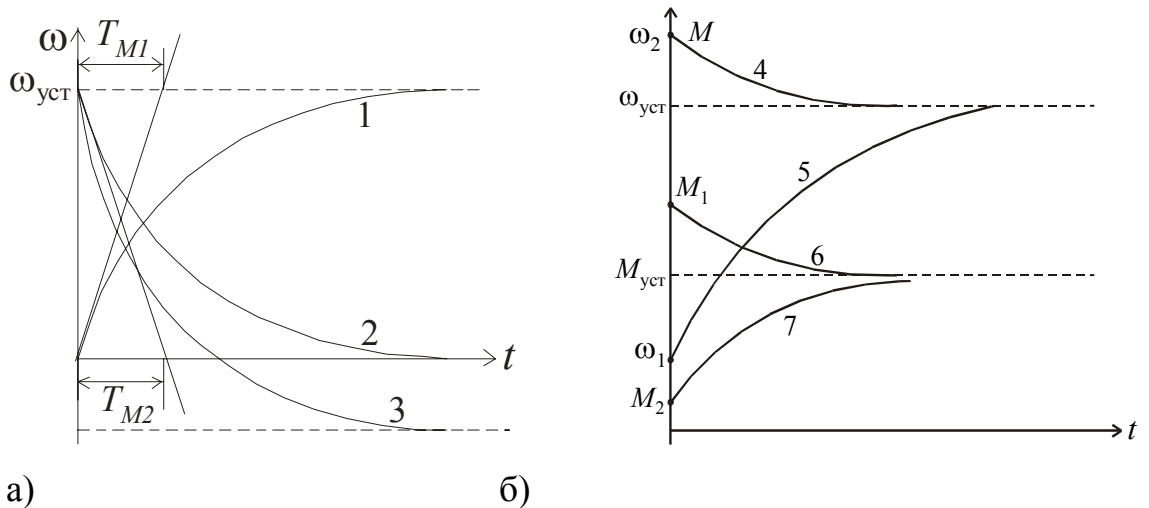


Рисунок 9.2

Математически кривую 1 называют возрастающей экспонентой, записывают в виде уравнения

$$\omega = \omega_{уст} (1 - e^{-t/T_M})$$

где $e = 2,72$ – основание натурального логарифма; t – время, прошедшее от начала переходного процесса, T_M – электромеханическая постоянная времени, характеризующая скорость переходного процесса.

Постоянную времени можно найти по любому отрезку прямой совместной характеристики

$$T_M = J(\omega_3 - \omega_2) / (M_{D2} - M_{D3}) = J\Delta\omega / \Delta M_D. \quad (9.6)$$

Если же известна вся характеристика в пределах квадранта то

$$T_M = J(\omega_{уст} - \omega) / M_D \quad (9.7)$$

В обеих формулах дробь пропорциональна $\operatorname{tg}\alpha$, то есть углу наклона характеристики.

Для двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения при $M_c = \text{const}$

$$T_M = J R_a / (c\Phi)^2,$$

а для асинхронного двигателя в пределах прямолинейного участка характеристики при $M_c = \text{const}$

$$T_M = J\omega_0 S_{\text{ном}} / M_{\text{ном}}$$

Графически T_M определяют по касательной, проведённой к экспоненте через начальную точку так, как это показано на рис. 9.2.а где определяются T_{M1} и T_{M2} .

При отключении двигателя и реактивном статическом моменте сопротивления угловая скорость изменяется по падающей до нуля экспоненте 2(рис. 9.2, а):

$$\omega = \omega_{уст} e^{-t/T_M}$$

Получается свободный выбег, где вращающий момент

$$M = 0, \text{ а } M_{\text{дин}} = -M_c.$$

Если же двигатель останавливать, включив на тормозной режим, то

$$M_{\text{дин}} = -M - M_c.$$

и постоянная времени будет меньше, то есть электропривод остановится быстрее (кривая 3).

При регулировании скорости вверх или при сбросе нагрузки угловая скорость увеличивается от ω_1 до $\omega_{уст}$ (кривая 5, рис 9.2.б), тогда экспонента

$$\omega = \omega_{уст}(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_1 e^{-t/T_M} \quad (9.8)$$

При уменьшении скорости (кривая 4, рис. 9.2.б) экспонента выражается аналогичным уравнением:

$$\omega = \omega_{уст}(1 - e^{-t/T_M}) + \omega_2 e^{-t/T_M} \quad (9.9)$$

Изменение момента во времени переходного процесса также носит экспоненциальный характер:

$$M = M_{уст}(-1 - e^{-t/T_M}) + M_{уст} e^{-t/T_M} \quad (9.10)$$

При увеличении скорости момент уменьшается, а при уменьшении – увеличивается (кривая 6 и 7, рис. 9.2.б).

Если динамический момент изменяется от $M^{д2}$ до $M^{д3}$, а угловая скорость от ω_2 до ω_3 , (см. рис. 9.1), то путь, пройденный электродвигателем за время t^3 , то есть угол поворота ротора (рад):

$$\Phi_3 = \omega_{уст} t^3 - T_M (\omega_{уст} - \omega_2) (1 - e^{-t^3/T_M}) \quad (9.11)$$

Если же на втором отрезке совместной характеристики $M^{дин} = 0$, то

$$\Phi_2 = \omega_1 t_2 + (M_{дин} / J) (t_2^2 / 2) \quad (9.12)$$

9.3 Переходные процессы при нелинейных характеристиках

Ряд производственных механизмов (вентиляторы, насосы, некоторые механизмы трения) имеют нелинейную механическую характеристику, то есть с увеличением угловой скорости M_c 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 ω (M).

Если механическая характеристика двигателя или рабочего механизма нелинейная, то совместная характеристика также будет нелинейной.

При работе таких двигателей со статическими нагрузками указанных механизмов (9.8, 9.9 и 9.10), поэтому прежде чем приступить к расчету переходного процесса, следует разделить совместную характеристику на отдельные участки такой длины, чтобы можно было бы пренебречь их кривизной и считать их прямолинейными. Далее можно воспользоваться одним из двух методов: линеаризации или конечных приращений. Рассмотрим первый из них на примере.

Пример 9.1 Определить время переходного процесса при пуске и путь, пройденный за это время для электродвигателя с механической характеристикой, заданной по точкам:

ω , рад/с		20	32	40	60	80	100	120	140	160	180	200
М, н·м	146	162	165	163	140	94	16	-65	-120	-156	-168	-175

Момент сопротивления механизма $M_c = 30$ н·м, общий момент инерции $J = 1,2$ кг·м².

Решение. Строим совместную характеристику (рис. 9.3) по формуле $M_{дин} = M - M_c$ и разбиваем ее на отдельные участки:

$$\omega_1 = 20 \text{ рад/сек}, \omega_2 = 42 \text{ рад/сек}, \omega_3 = 60 \text{ рад/сек}, \omega_4 = 76 \text{ рад/сек},$$

$$\omega_5 = \omega_{уст} = 90 \text{ рад/сек}.$$

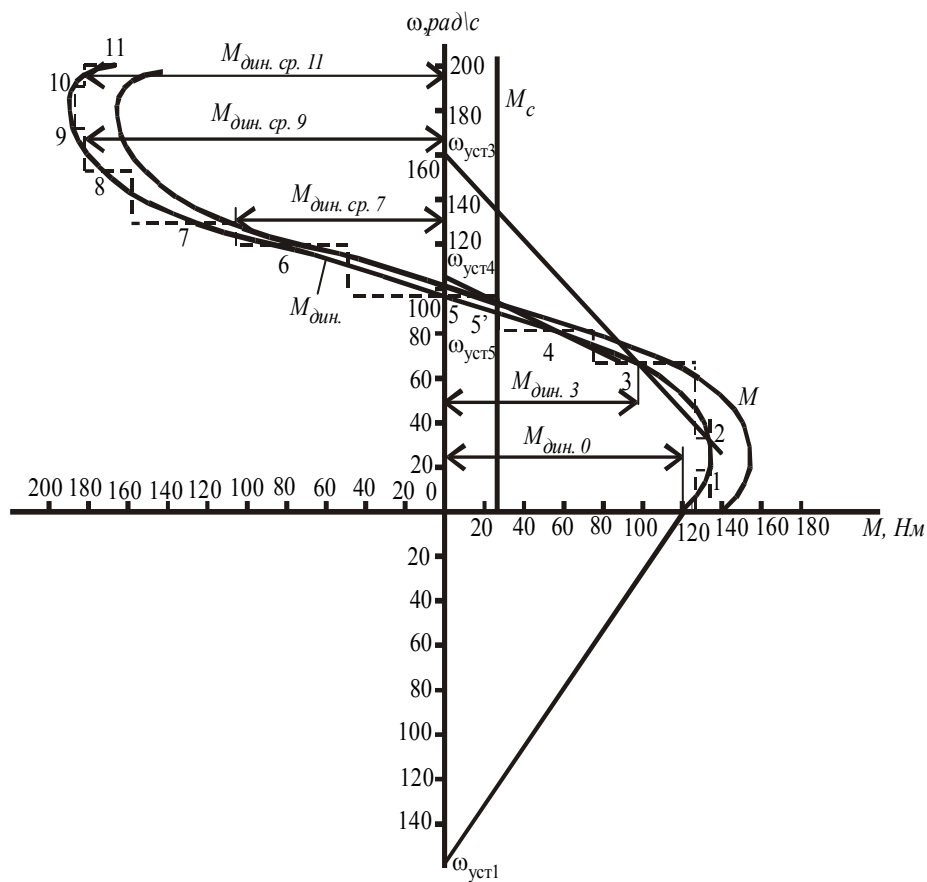


Рисунок 9.3

По методу линеаризации через начало, и конец каждого участка проводим прямую до пересечения с вертикальной осью. Получим установившиеся скорости участков и соответствующие $M_{\text{дин}}$:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{уст}1} &= -170 \text{ рад/сек}, \quad \omega_{\text{уст}3} = 160 \text{ рад/сек}, \quad \omega_{\text{уст}4} = 108 \text{ рад/сек}, \\ \omega_{\text{уст}5} &= 95 \text{ рад/сек}; \quad M_{\text{дин}0} = 116 \text{ н·м}, \quad M_{\text{дин}1} = M_{\text{дин}2} = 138 \text{ н·м}, \\ M_{\text{дин}3} &= 113 \text{ н·м}, \quad M_{\text{дин}4} = 75 \text{ н·м}, \quad M_{\text{дин}5} = 80 \text{ н·м}.\end{aligned}$$

Для первого участка (0 – 1).

$$T_{\text{м}1} = J(\omega_{\text{уст}1} - \omega_0) / M_{\text{дин}0} = 1,2(-150 - 0) / 116 = -1,55 \text{ с};$$

$$t_1 = T_{\text{м}1} \ln(M_{\text{дин}0} / M_{\text{дин}1}) = -1,55 \ln(116/132) = 0,197 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \omega_{\text{уст}1} t_1 - T_{\text{м}1} (\omega_{\text{уст}1} - \omega_0) (1 - e^{-t_1/T_{\text{м}1}}) = \\ &= -150 \cdot 0,197 - 1,55 \cdot 150 (1 - e^{-0,197/1,55}) = 0,675 \text{ рад}.\end{aligned}$$

Для второго участка (1 – 2).

$$t_2 = J(\omega_2 - \omega_1) / M_{\text{дин}2} = 1,2(42 - 20) / 132 = 0,2 \text{ с};$$

$$\varphi_2 = \omega_1 t_2 + M_{\text{дин}2} t_2^2 = 20 \cdot 0,2 + 132 \cdot 0,2^2 / (2 \cdot 1,2) = 6,2 \text{ рад}.$$

Для третьего участка (2 – 3).

$$T_{\text{м}3} = J(\omega_{\text{уст}3} - \omega_2) / M_{\text{дин}2} = 1,2(160 - 42) / 132 = 1,01 \text{ с};$$

$$t_3 = T_{\text{м}3} \ln(M_{\text{дин}2} / M_{\text{дин}3}) = 1,07 \ln(132/113) = 0,168 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}\varphi_3 &= \omega_{\text{уст}3} t_3 - T_{\text{м}3} (\omega_{\text{уст}3} - \omega_2) (1 - e^{-t_3/T_{\text{м}3}}) = \\ &= 160 \cdot 0,168 - 1,25(160 - 42) (1 - e^{-0,168/1,25}) = 8,3 \text{ рад}.\end{aligned}$$

Для четвертого участка (3 – 4).

$$T_{\text{м}4} = J(\omega_{\text{уст}4} - \omega_3) / M_{\text{дин}3} = 1,2(108 - 60) / 113 = 0,51 \text{ с};$$

$$t_4 = T_{\text{м}4} \ln(M_{\text{дин}3} / M_{\text{дин}4}) = 0,54 \cdot \ln(113/75) = 0,21 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}\varphi_4 &= \omega_{\text{уст}4} t_4 - T_{\text{м}4} (\omega_{\text{уст}4} - \omega_3) (1 - e^{-t_4/T_{\text{м}4}}) = \\ &= 108 \cdot 0,21 - 0,51(108 - 60) (1 - e^{-0,21/0,51}) = 14,5 \text{ рад}.\end{aligned}$$

Для упрощения расчета пятого участка (4 – 5) примем, что переходный процесс заканчивается в точке 5 при $\omega_{уст5} = 0,98 \omega_{уст} = 0,98 \cdot 95 = 93 \text{ р/с}$, что соответствует согласно графику $M_{дин5} = 10 \text{ Н} \cdot \text{М}$, и определяем:

$$T_{м5} = J(\omega_{уст5} - \omega_4) / M_{дин4} = 1,2(95 - 76) / 75 = 0,304 \text{ с};$$

$$t_5 = T_{м5} \ln(M_{дин4} / M_{дин5}) = 0,304 \ln(75 / 10) = 0,612 \text{ с};$$

$$\varphi_5 = \omega_{уст5} t_5 - T_{м5} (\omega_{уст5} - \omega_4) \left(1 - e^{-t_5 / T_{м5}}\right) = 53,1 \text{ рад}.$$

Общее время переходного процесса и путь, пройденный за это время:

$$t_{об} = \sum t_i = 0,197 + 0,2 + 0,168 + 0,21 + 0,612 = 1,38 \text{ с};$$

$$\varphi_{об} = \sum \varphi_i = 0,675 + 6,2 + 8,3 + 14,5 + 53,1 = 82,77 \text{ рад}.$$

9.4 Переходные процессы в системах электропривода с преобразовательными устройствами

При питании двигателей от управляемых преобразователей по системам УВ-Д, ПЧ-Д переходные процессы пуска и торможения следуют за постепенным изменением напряжения или частот переменного тока во времени.

Постепенное изменение этих параметров достигается путем подачи на вход системы управления преобразователя сигнала управления в виде напряжения U_y . Если его изменять во времени по определенному закону, то можно сформировать необходимый переходный процесс. Рассмотрим наиболее типичную в этом отношении тему «управляемый выпрямитель – двигатель» с тиристорным выпрямителем.

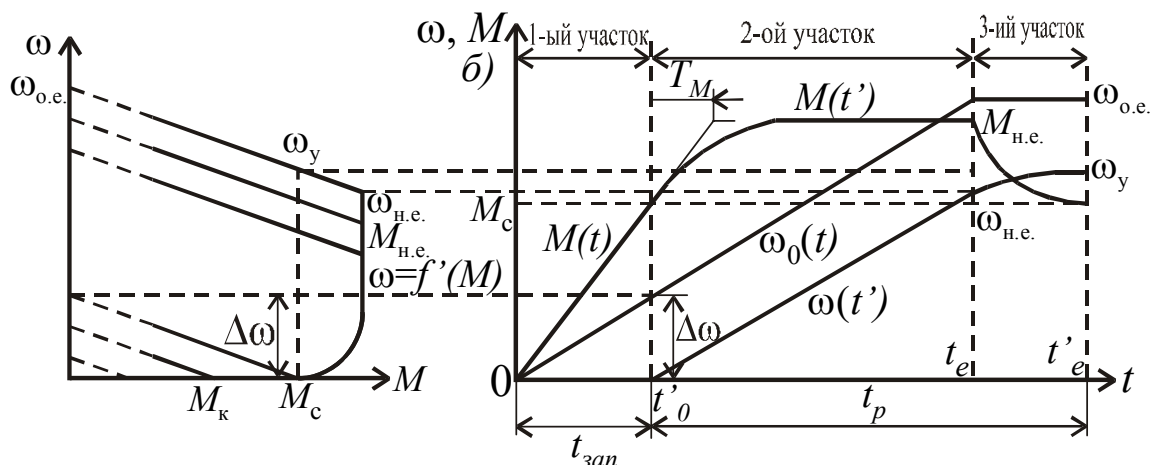


Рисунок 9.4

Тиристорный выпрямитель практически не обладает инерционностью, поэтому его выходное напряжение изменяется за изменением во времени

сигнала управления U_y . Пуск и разгон электропривода осуществляют обычно при изменении напряжения преобразователя $u_{\text{пр}}$ от нуля до $U_{\text{ном}}$ по линейному закону

$$u_{\text{пр}} = k t,$$

где k – коэффициент, характеризующий скорость нарастания $u_{\text{пр}}$.

Переходный процесс в электроприводе начинается с момента подключения двигателя к источнику питания, напряжение которого в начальный момент времени равно нулю. Если реактивный, то при увеличении напряжения преобразователя якорь двигателя остается неподвижным, пока $M_k < M_c$ (рис. 9.4, а). При этом ускорение $\varepsilon_{\text{пр}}$, с которым изменяется напряжение преобразователя, будет положительным и значение $\omega_0(t) = \varepsilon_{\text{пр}} t$, что свидетельствует о процессе разгона якоря. Вращение якоря начнется при $M_k = M_c$, $U_{\text{пр}} = IR = M_c R / (c\Phi)^2$, что соответствует увеличению $\omega_0(t)$ до значения $\Delta\omega$.

Время до начала движения электропривода, в течение которого нарастают $\varepsilon_{\text{пр}}$ и M , называется временем запаздывания $t_{\text{зап}}$. Таким образом, время $t_{\text{зап}}$ будет определять участок I переходного процесса (рис. 9.4, б).

Для промежутка времени $t_{\text{зап}}$, когда скорость еще равна нулю, момент изменяется во времени по линейному закону (участок I). Для дальнейшего увеличения скорости электропривода напряжение на выходе преобразователя, пропорциональное $\varepsilon_{\text{пр}}$, такое должно увеличиваться по линейному закону. Значение динамического момента, равного $M - M_c$, при разгоне якоря будет изменяться по кривой $\omega = f(M)$, показанной на рис. 9.4, а, связывающая значения ω и M в переходном процессе, называется динамической механической характеристикой двигателя.

Значения угловой скорости, и момента двигателя в процессе разгона двигателя изменяются по динамической характеристике до точки начальных значений момента $M_{\text{н.е}}$ и скорости $\omega_{\text{н.е}}$. Этому перемещению рабочей точки на графике $\omega(t)$, $M(t)$ (рис. 8.4, 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 естествен-

ной характеристике двигателя до ω_y и M_c показаны на участке III от точки t_e до t'_e . Общее время разгона t_p равно времени от t'_0 до t'_e .

Глава 10. Расчет мощности электроприводов

10.1 Общие положения

Исходными данными для правильного расчета мощности и выбора типа электропривода являются технологические и конструктивные требования, которые возникают в связи с эффективным использованием производственных механизмов, а именно обеспечением высокой производительности, надежности и точности их работы. Так одним из главных элементов электропривода, определяющим в значительной степени его технические и экономические показатели, является электродвигатель, то в данной главе, прежде всего, рассматриваются вопросы расчета мощности электродвигателей, работающих в различных режимах.

Применение двигателей недостаточной мощности может вызвать нарушение в нормальной работе механизма, понижение его производительности, аварию и выход из строя двигателя. Использование же двигателя повышенной мощности приводит к неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению энергетических показателей электропривода, уменьшению КПД, а в установках переменного тока, кроме того, ухудшению коэффициента мощности, что в свою очередь на непроизводительную загрузку преобразовательных устройств и распределительной сети.

Кроме как по мощности, нужно правильно выбрать двигатель по исполнению, т.е. по способу защиты, по способу охлаждения и климатическому исполнению.

Выбор мощности двигателя обуславливается характером изменения статической нагрузки на его валу, а также условиями протекания переходных процессов в электроприводе.

По характеру изменения статического момента производственные механизмы подразделяются на следующие группы:

1. Механизмы, у которых статический момент остается постоянным, не зависящим от скорости. К ним относятся механизм подъема мостового крана, механизмы, работающие на преодолении сил трения, например, механизмы подачи металлорежущих станков: $M_c = \text{const}$. Однако значение этого момента, оставаясь независимым от скорости, может изменяться в широких пределах.

2. Механизмы, M_c которых зависит от угловой скорости, например, центробежные вентилятор и насос, центрифуга, главные приводы металлорежущих станков и др.:

$$M_c = M_0 + K\omega^2,$$

где M_0 – момент холостого хода.

3. Механизмы, у которых M_c зависит от пути. Сюда относятся устройства с кривошипными передачами, где нагрузки изменяются в зависимости от угла поворота кривошипа φ – это ножницы для разрезания металла, прессы, поршневые компрессоры:

$$M_c = M_0 + M_m \sin \varphi,$$

где M_0, M_m – соответственно момент холостого хода механизма и максимальный момент.

При работе двигателя в любом режиме, с той или иной нагрузкой в нем возникают потери энергии, определяющие нагрев двигателя, а, следовательно, его мощность и габариты. Поэтому, прежде всего, необходимо уделить внимание нахождению потерь энергии в электроприводах с двигателем постоянного и переменного тока как в установившемся, так и в переходном режиме.

10.2 Потери энергии в электроприводах постоянного и переменного тока

Потери энергии в двигателе складываются из переменных, зависящих от величины нагрузки на валу, и постоянных потерь, не зависящих от этой нагрузки.

Для электропривода постоянного тока суммарные потери мощности равны:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{пос}} + \Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}} + I_a^2 R_a, \quad (10.1)$$

где $\Delta P_{\text{В}}, \Delta P_{\text{СТ}}, \Delta P_{\text{мех}}, \Delta P_{\text{доп}}$ – соответственно потери мощности на возбуждение, потери в стали, механические и дополнительные, $I_a^2 R$ – потери мощности в цепи якоря.

Аналогично для асинхронного двигателя:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{СТ}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доп}} + 3(I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2). \quad (10.2)$$

Переменные потери могут быть выражены также через электромагнитный момент и относительную скорость (или скольжение), а именно:

1) для двигателей постоянного тока независимого возбуждения:

$$\Delta P_{\text{пер}} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = P_{\text{ЭМ}} \Delta\omega / \omega_0, \quad (10.3)$$

где $P_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная мощность, $\Delta\omega, \omega_0$ – соответственно перепад угловой скорости, обусловленный моментом нагрузки M_c , и угловая скорость идеального холостого хода.

2) для асинхронного двигателя:

$$\Delta P_{\text{пер}} = M\omega_0 S(1 + R_1 / R_2^1) = P_{\text{эм}} S(1 + R_1 / R_2^1), \quad (10.4)$$

Так, например, при установившемся режиме потребляемая двигателем постоянного тока мощность из сети

$$P_1 = UI_a = EI_a + I_a^2 R_a, \quad (10.5)$$

Последнее уравнение можно переписать так:

$$c\Phi\omega_0 I_a = c\Phi\omega I_a + \Delta P_{\text{пер}},$$

откуда
$$\Delta P_{\text{пер}} = c\Phi\omega_0 I_a \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0},$$

или

$$\Delta P_{\text{пер}} = P_1 \delta, \text{ где } \delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (10.6)$$

В переходных режимах целесообразно находить не среднее значение потерь мощности, а расход и потери энергии за время переходного процесса.

Потери энергии в двигателе за время переходного процесса $t_{\text{п}}$ в общем случае равны:

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{п}}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{\text{п}}} (\Delta P_{\text{пос}} - \Delta P_{\text{пер}})(t) dt \quad (10.7)$$

Так как по сравнению с переменными постоянные потери в переходном режиме малы, то в дальнейшем они учитываться не будут. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения потери энергии при пуске равны:

$$\Delta A_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} M(\omega_0 - \omega) dt. \quad (10.8)$$

Если пуск совершается вхолостую ($M_c=0$), то из уравнения движения следует: $dt = J \frac{d\omega}{M}$, тогда

$$\Delta A_{\text{п0}} = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) d\omega$$

или

$$\Delta A_{\text{п0}} = J\omega_0^2 / 2. \quad (10.9).$$

Следовательно, потери энергии при пуске двигателя вхолостую определяются запасом кинетической энергии, накопленной массами привода к концу пуска.

Расход энергии из сети равен $A_{эл} = J\omega_0^2$.

При пуске двигателя под нагрузкой в предположении, что $M_c = \text{const}$, потери энергии

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} M(\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{\Pi}} (M_c + M_{\text{дин}})(\omega_0 - \omega) dt.$$

Так как $dt = Jd\omega / M_{\text{дин}}$, то после преобразований

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^{\omega_c} J(\omega_0 - \omega) d\omega + M_c \int_0^{t_{\Pi}} (\omega_0 - \omega) dt,$$

или

$$\Delta A_{\Pi} = J(\omega_0\omega_c - \omega_c^2 / 2) + M_c(\omega_0 t_{\Pi} - \int_0^{t_{\Pi}} \omega dt) \quad (10.10)$$

Первый член в (10.10) представляет собой потери энергии в якорной цепи, обусловленные разгоном инерциальных масс привода ($\Delta A_{\Pi, \text{дин}}$), а второй – потери, вызванные наличием момента нагрузки ($\Delta A_{\Pi, \text{с}}$).

Следовательно (10.10) можно переписать так:

$$\Delta A_{\Pi} = \Delta A_{\Pi, \text{дин}} + \Delta A_{\Pi, \text{с}}$$

Если ω_c мало отличается от ω_0 , то $\Delta A_{\Pi, \text{дин}} \cong J\omega_0^2 / 2$;

$$\Delta A_{\Pi, \text{с}} = M_c(\omega_0 t_{\Pi} - \int_0^{t_{\Pi}} \omega dt).$$

Пусковые потери энергии в асинхронном, если пренебречь постоянной составляющей потерь $\Delta P_{\text{пос}}$ и влиянием тока холостого хода

($I_1 \approx I_2'$), можно определить по формуле

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} 3I_2'^2 (R_1 + R_2^1) dt. \quad (10.11)$$

При $M_c = 0$

$$dt = -(J\omega_0 / M) ds.$$

Выражая потери мощности в роторной цепи через мощность скольжения, т.е. $3I_2'^2 \cdot R_2^1 = M\omega_0 s$, в результате преобразований получаем

$$\Delta A_{\Pi} = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} J\omega_0^2 s (1 + \frac{R_1}{R_2^1}) ds,$$

или, учитывая, что $S_{\text{нач.}}=1$, и $S_{\text{кон.}}=0$,

$$\Delta A_{\text{п0}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2^1}\right) \quad (10.12)$$

Из (10.12) следует, что потери при пуске состоят:

1) из потерь в роторной цепи: $\Delta A_{\text{по2}} = J\omega_0^2 / 2$, определяемых запасом кинетической энергии, которую приобретает привод к концу пуска;

2) из потерь в статорной цепи: $\Delta A_{\text{по1}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R_2^1}$, зависящих от сопро-

тивлений резисторов R_1 и R_2^1 , чем больше R_2^1 , тем меньше потери в статоре асинхронного двигателя. Уменьшение потерь в статоре с ростом R_2^1 объясняется уменьшением пускового тока.

В двигателях единой серии с короткозамкнутым ротором $R_1 = R_2^1$, т.е. в этом случае $\Delta A_{\text{по1}} = \Delta A_{\text{по2}}$.

Потери энергии при пуске под нагрузкой ($M_c = \text{const}$) могут быть определены по формуле

$$\Delta A_{\text{п}} \approx A_{\text{п0}} \frac{M_{\text{п.ср}}}{M_{\text{п.ср}} - M_c}, \quad (10.13)$$

где $M_{\text{п.ср.}} = \frac{(\lambda + K_{\text{п}}) \cdot M_{\text{ном}}}{2}$ – средний пусковой момент асинхронного двигателя; $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$; $K_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$, $M_{\text{п}}$ – пусковой момент.

10.3 Нагрев и охлаждение двигателя

□□□□□□□□□□□□ □□□□□ □□□□□ □□□□□□□□□□□□□□□□

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше габариты.

Исследование тепловых процессов в двигателях, производится при следующих допущениях: 1) двигатель рассматривается как однородное тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью; 2) теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды; 3) температура окружающей среды постоянна; 4) теплоемкость двигателя, мощность тепловых потерь и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

При этих допущениях и неизменной нагрузке на валу уравнение теплового баланса двигателя имеет вид:

$$Qdt = A\tau dt + Cd\tau, \quad (10.14)$$

где Q – количество теплоты (мощность потерь в двигателе), выделяемое двигателем в единицу времени, Дж/с.

A – теплоотдача двигателя – количество теплоты, отдаваемой двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур в 1°C , Дж/(с· $^\circ\text{C}$); τ – превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды (перегрев), $^\circ\text{C}$, равно $\tau = t_{\text{д}}^0 - t_{\text{а.с}}^0$; C – теплоемкость двигателя – количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1°C , Дж/ $^\circ\text{C}$.

Разделив члены (10.14) на $A dt$, получим:

$$\frac{Q}{A} = \tau + \frac{Cd\tau}{A dt}$$

или

$$\tau + T_{\text{н}} \frac{d\tau}{dt} = \tau_{\text{у}}, \quad (10.15)$$

где $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева двигателя – время, в течение которого превышение температуры от $\tau=0$ достигло бы установившегося значения $\tau_{\text{у}}$ при $Q = \text{const}$ и отсутствии теплоотдачи в окружающую среду, $T_{\text{н}} = \frac{C}{A}$.

Решение уравнения (10.15).

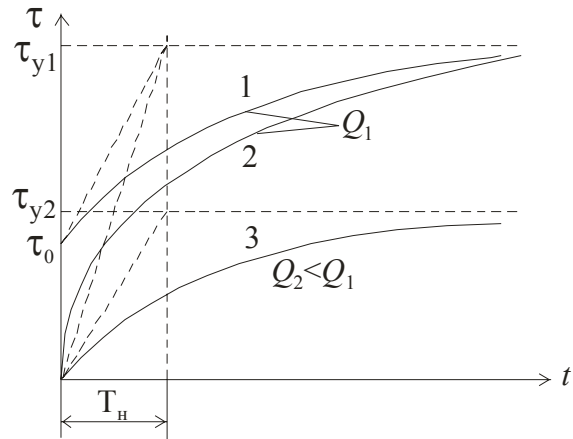
$$\tau = \tau_{\text{у}}(1 + e^{-t/T_{\text{н}}}) + \tau_0 e^{-t/T_{\text{н}}}, \quad (10.16)$$

где $\tau_{\text{у}}, \tau_0$ – установившееся (конечное) и начальное значение перегрева соответственно; $\tau_{\text{у}} = Q/A$.

Если $\tau_0 = 0$, то (10.16) примет вид:

$$\tau = \tau_{\text{у}}(1 + e^{-t/T_{\text{н}}}), \quad (10.17)$$

Согласно (10.16) и (10.17) на рис. 10.1 построены кривые 1 и 2 нагрева двигателя соответственно при $\tau_0 > 0$ и $\tau_0 = 0$ при одной и той же нагрузке ($Q_1 = \text{const}$). Если двигатель будет нагружен меньше ($Q_2 < Q_1$), то этому случаю отвечает кривая 3 при условии, что $\tau_0 = 0$.



□□□□□ 10.1

Практически нагрев двигателя достигает установившегося значения через отрезок времени

$$t = (3 \dots 4) T_{\text{н}}$$

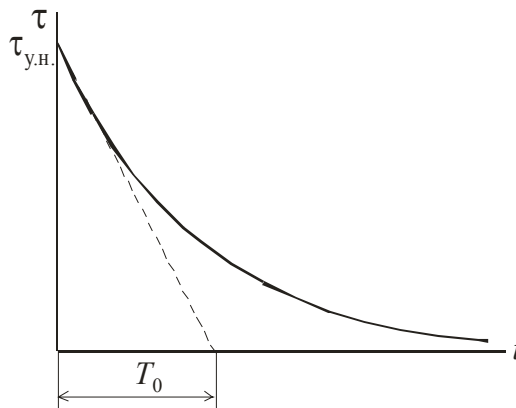
Если охлаждение двигателя после отключения от сети идет до температуры окружающей среды, то

$$\tau = \tau_{\text{у.н}} \cdot e^{-t/T_0} \tag{10.18}$$

Кривая охлаждения показана на рис. 10.2.

Вследствие изменения условий охлаждения при отключении самовентилируемых двигателей по сравнению с рабочим периодом, постоянная времени охлаждения T_0 больше постоянной времени нагрева $T_{\text{н}}$.

Отношение $\beta_0 = T_{\text{н}} / T_0$ называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи.



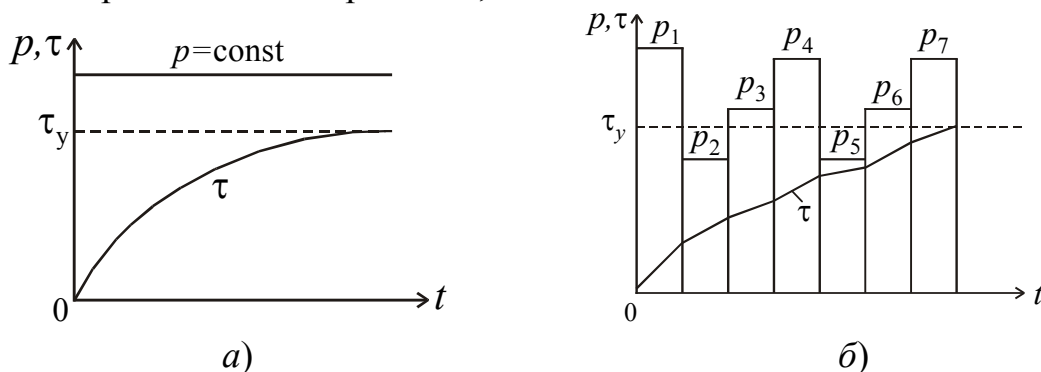
□□□□□□ 10.2

Законы нагрева и охлаждения двигателей были рассмотрены для случаев, когда нагрузка на валу оставалась неизменной, и перегрев τ достигал установившегося значения. На практике нагрузка двигателя в процессе работы не всегда постоянна и изменяется при изменении технологических параметров рабочей машины.

Для учета разнообразных условий, изменяющих нагрузку на валу, рассчитывают и строят нагрузочные диаграммы, представляющие собой график изменения во времени значений мощности или момента.

Все многообразие режимов представляется в виде восьми стандартизированных режимов с условными обозначениями от $S1$ до $S8$, что позволяет более точно рассчитывать требуемую мощность двигателя.

1. Продолжительный режим работы ($S1$) с неизменной или с измененной нагрузкой; характеризуется тем, что за время непрерывной работы перегрев двигателя достигает установившейся температуры (t_y). Графики такого режима представлены на рис. 10.3, *а* и *б*.



□□□□□□ 10.3

2. Кратковременным режимом работы ($S2$) называется режим, при котором периоды неизменной нагрузки чередуются с периодами пауз, при этом

за время работы двигатель не нагревается до установившегося значения перегрева, а за время паузы двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. График режима $S2$ представлен на рис. 10.4

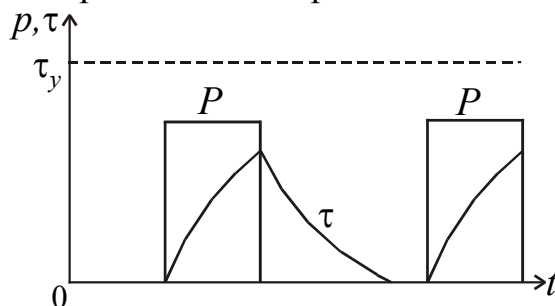


Рисунок 10.4

3. Повторно-кратковременный режим работы ($S3$) называется режим, при котором кратковременные периоды работы чередуются с периодами пауз, причем за время работы перегрев не достигает установившегося значения, а за время паузы — не охлаждается до температуры среды (рис. 10.5).

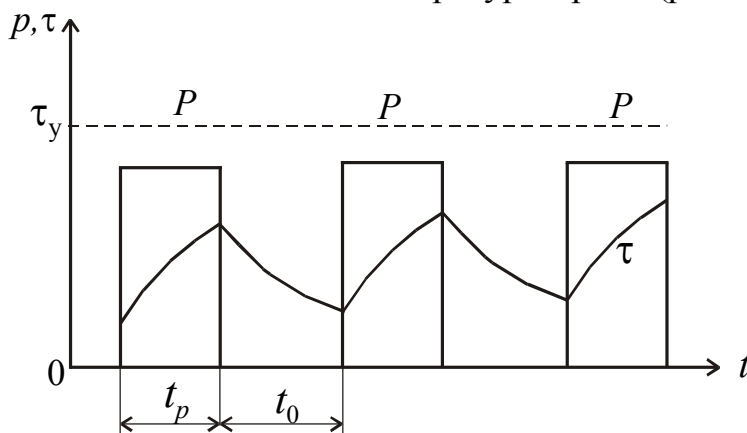


Рисунок 10.5

Обычно в этом режиме продолжительность цикла ($t_y = t_p + t_0$) не превышает 10 минут; и режим характеризуется относительной продолжительностью включения, %. $ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100$, которая определяется по формуле

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100, \text{ где } \frac{t_p}{t_{ц}} = \varepsilon.$$

Режимы $S4 - S8$ являются разновидностью основных режимов $S1 - S3$, характеризующихся: ограниченным числом пусков в час ($S4$); с частыми пусками и электрическим торможением ($S5$); рабочие периоды чередуются с режимами холостого хода ($S6$); частыми реверсами ($S7$) и двумя или более угловыми скоростями ($S8$).

10.4 Расчет мощности и выбор двигателей для различных режимов работы

Надежная продолжительная работа двигателя возможна только в том случае, когда он правильно рассчитан и выбран по тепловому и динамическим режимам и соответствует условиям окружающей среды.

Применение двигателя любого типа прежде всего связано с подбором его по мощности. Необходимую мощность двигателей при имеющемся или заданном графике статической нагрузки $P_c(t)$ определяют с таким расчетом, чтобы можно было воспользоваться номинальными(паспортными) данными двигателя.

10.4.1 Продолжительная неизменная нагрузка (режим S1)

Существует значительное число механизмов, работающих продолжительно с неизменной нагрузкой без регулирования скоростей. Примером таких механизмов могут служить вентилятор, насос, универсальный зубофрезерный станок и т.п. Расчет мощности двигателя в подобных случаях весьма прост, если известна мощность, потребляемая механизмом. Условием выбора мощности двигателя является соотношение

$$P_{\text{ном}} \geq P_c$$

Так, например, мощность двигателя для вентилятора

$$P_p = \frac{V \cdot p}{\eta_{\text{вен}} 102} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (10.19)$$

где V – производительность (подача) вентилятора $\text{м}^3/\text{с}$; p – давление (напор) на выходе вентилятора, $\text{н}/\text{м}^2$; $\eta_{\text{вен}}$ – КПД вентилятора (от 0,3 до 0,8 – меньшие значения относятся к вентиляторам малой и средней мощности).

Мощность двигателя для насоса определяется по формуле

$$P_p = \frac{\gamma V H g}{102 \eta_n \eta_{\text{пер}}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (10.20)$$

где V – производительность насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H – расчетная высота подъема (напор), м; γ – плотность перекачиваемой жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение силы тяжести; η_n – КПД насоса (для поршневых 0,8...0,9; центробежных высокого давления 0,5...0,8; низкого давления 0,3...0,6); $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи (редуктора).

□□□ □□□□□□□□□□□□□□ □□□□□□, □□□□□□□□□□□ □ □□□□□□□□□ □□□□□□□□□

$$P_p = \frac{FV}{\eta_c \eta_{\text{пер}}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} . \quad (10.21)$$

где F – усилие резания, н; v – скорость резания, м/с; η – КПД станка;

10.4.2 Продолжительный переменный режим (S6)

При продолжительной переменной нагрузке, ступенчатый график которой представлен на рис. 10.6, определить мощность двигателя сложнее, чем при неизменной нагрузке.

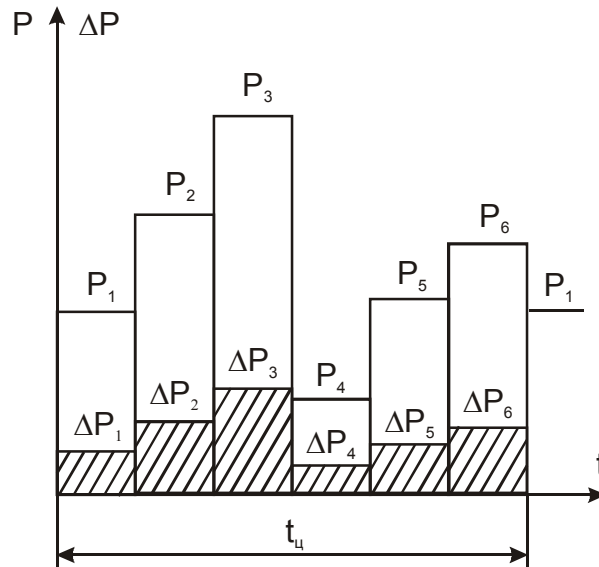


Рисунок 10.6

Выбор мощности по наибольшему значению P_3 повлечет к недоиспользованию двигателя при меньших значениях мощностей. Это приведет к ухудшению энергетических и экономических показателей электропривода.

Расчетную мощность двигателя при такой нагрузке можно определить различными способами: методом средних потерь и методом эквивалентных значений мощности, момента и тока.

Методом средних потерь предварительно определяют расчетную мощность по формуле

$$P_p = P_{cp} K_{зап}; \quad (10.22),$$

где $K_{зап} = 1,1 \dots 1,3$ – учитывает превышение действительной мощности над средней;

$$P_{cp} = \sum_1^m P_i t_i / t_{ц}, \quad (10.23)$$

P_i – мощность нагрузки в i -ом интервале; t_i – время работы двигателя на i -ом интервале с нагрузкой P_i ; m – число интервалов в цикле; $t_{ц}$ – время цикла.

По (10.21) из каталога выбирают двигатель мощностью $P_{\text{ном}} \geq P_p$. Далее, учитывая, что перегрев двигателя при неизменной теплоотдаче определяется средними потерями за цикл

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_1^m \Delta P_i t_i / t_{\text{ц}}. \quad (10.24).$$

Сравниваем последние с номинальными потерями предварительно выбранного двигателя.

Двигатель будет выбран правильно, если

$$\Delta P_{\text{с}} < \Delta P_{\text{ном}} \quad (10.25)$$

Если температура окружающей среды $t_{\text{о.с.}}$ отличается от 40°C , то условие (10.24) можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}} (t_{\text{доп}}^\circ + t_{\text{о.с.}}) / (t_{\text{доп}}^\circ - 40^\circ). \quad (10.26).$$

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 действительного тока двигателя при переменной нагрузке расчетным неизменным током, называемым эквивалентным, который вызовет в двигателе те же потери, что и действительный ток.

При этом, делаются следующие допущения: 1) постоянные потери $\Delta P_{\text{пос}}$ в двигателе (в стали, на трение, вентиляцию), не зависящие от значения нагрузки, неизменны в течение всего рабочего периода; 2) резистивное сопротивление обмоток двигателя практически неизменно. Тогда, например, в двигателе постоянного тока средние потери мощностей

$$\Delta P_{\text{ср}} = \Delta P_{\text{пос}} + I_{\text{э}}^2 R_{\Sigma}, \quad (10.27),$$

$$\text{где } I_{\text{э}}^2 = \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \sum I_i^2 t_i / t_{\text{ц}},$$

откуда искомое значение эквивалентного тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}}, \quad (10.27).$$

Расчетный эквивалентный ток сопоставляется с номинальным током выбираемого двигателя. При этом $I_{\text{э}} < I_{\text{ном}}$. После этого выбранный двигатель проверяется по допустимому перегрузу из условия

$$I_{\max} / I_{\text{ном}} \leq \lambda_i,$$

где I_{\max} – максимальное значение тока (при наибольшей, нагрузке по заданному графику);

λ_i – допустимый коэффициент перегрузки по току, например, для двигателя постоянного тока $\lambda_i = 2 \dots 2,5$.

Если окажется, что последнее условие не выполняется, то необходимо выбрать двигатель большей мощности, т.е. уже по условию перегруза.

В ряде случаев известно не изменение тока двигателя, а зависимость момента сопротивления на валу от времени.

Метод эквивалентного момента основан на использовании пропорциональной зависимости между током и моментом. Для режима переменной нагрузки эквивалентный момент

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (10.28)$$

Условием выбора двигателя является соотношение

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} n}{9550} \leq P_{\text{ном}}. \quad (10.29)$$

Далее производится сравнение двух расчетных величин, как и в методе эквивалентного тока, т.е. осуществляется проверка по перегрузу из условия

$$M_{\max} / M_{\text{ном}} \leq \lambda_M.$$

Метод эквивалентной мощности основан на использовании зависимости $P = M\omega$, т.е. при работе механизма без резких колебаний угловой скорости.

Тогда график нагрузки задается мощностью, которую должен развивать выбираемый двигатель. Выбор мощностей по условию нагрева производится по формуле

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (10.30)$$

Условием выбора двигателя является соотношение $P_{\text{э}} \leq P_{\text{ном}}$.

Далее, как и в предыдущих случаях, выбранный двигатель проводится по условию перегруза.

Таким образом, методы эквивалентной мощности и эквивалентного момента применимы главным образом для двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения и асинхронных двигателей при работе в установившемся режиме.

Из трех эквивалентных методов наиболее приемлемым является метод эквивалентного тока, так как он значительно точнее учитывает потери мощности в двигателе, т.е. перегрев двигателя в режимах $S6 - S8$.

10.4.3 Кратковременный режим (S2)

Расчет мощности двигателя при такой нагрузке основан на предположении, что за время работы двигателя перегрев должен достигнуть допустимого значения ($\tau \leq \tau_{\text{доп}}$). При этом двигатель полностью используется по перегрузочной способности. То есть, чтобы не было недоиспользования, двигатель нагружают большей мощностью так, чтобы к концу рабочего времени перегрев достиг установившегося значения.

К механизмам с таким режимом относятся как правило вспомогательные механизмы, где двигатель работает на преодоление сил трения.

Мощность, затраченная на преодоление сил трения при перемещении, например, узла металлорежущего станка, определяется по формуле:

$$P_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \nu \cdot 10^{-3} = GV\mu \cdot 10^{-3}, \quad (10.31)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, н; ν – скорость перемещения узла, м/с; G – масса перемещаемого узла, кг; μ – коэффициент трения движения.

Расчетную мощность двигателя при этом определяют как

$$P_{\text{т}} = P_{\text{тр}} / \eta \lambda, \quad (10.32)$$

где $\eta = 0,1 \dots 0,2$ – К.П.Д. передачи при трении; $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ – коэффициент перегрузочной способности.

С учетом допустимого перегруза по каталогу выбирают двигатель мощностью

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{р}}.$$

Угловая скорость двигателя при работе с перегрузом будет несколько меньше и определяется соотношением

$$\omega_{\lambda} = \omega_0 (1 - s_{\text{ном}} \lambda), \quad (10.33)$$

где $\omega_0 = \pi n / 30$.

В этом случае момент на валу двигателя будет

$$M_{\lambda} = \frac{10^3 P_{\text{ном}}}{\omega_0 (1 - \lambda s_{\text{ном}})}. \quad (10.34)$$

В начале пуска требуемый момент определяется как

$$M_{n_0} = \frac{10^3 P_{\text{НОМ}}}{\omega_0 (1 - \lambda S_{\text{НОМ}})} \cdot \frac{\mu_0}{\mu} \quad (10.35)$$

где μ_0 – коэффициент трения покоя.

Итак, в начале по (10.32) выбираем двигатель с номинальной мощностью $P_{\text{НОМ}}$ и моментом $M_{\text{НОМ}}$. Вычисляем затем $M_{\text{П0}}$ и сравниваем с $M_{\text{НОМ}}$. Двигатель выбран правильно, если

$$M_{\text{П0}} \leq M_{\text{НОМ}}.$$

10.4.4 Повторно-кратковременный режим работы (S3)

Нагрузочная диаграмма показана на рис. 10.5. Мощность двигателя при этом режиме работы выбирается исходя из эквивалентных значений по формулам (10.27; 10.28; 10.30) с учетом ПВ, % и сравнения их с номинальными.

Продолжительность цикла, т.е. суммарное время работы и пауз не должна превышать 10 мин, в противном случае двигатель должен выбираться как для продолжительного режима работы.

Для улучшения экономических показателей электропривод работающих в режиме S3, выпускается специальная серия двигателей с повышенным пусковым и максимальным моментом. Для двигателей этой серии в паспортных данных кроме основных величин указывается ПВ %.

Кроме того, в каталогах указывается мощность, которую он может развивать при каждом из нормируемых значений ПВ (15, 25, 40, 60 и 100%).

Если при режиме S3 статическая нагрузка двигателя, время работы и пауз от цикла к циклу не меняются и относительная продолжительность включения $\text{ПВ}_\text{д} = \text{ПВ}_\text{ст}$ то двигатель выбирается путем сравнения расчетной мощности с номинальной:

$$P_p \leq P_{\varepsilon \text{НОМ}}, \quad (10.36)$$

где $P_p = P_\varepsilon$ – эквивалентная мощность, найденная по (9.28 или 9.29); $P_{\varepsilon \text{НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя при $\text{ПВ}_\text{ст}$.

Если известно, что в переходных режимах (пуск, торможение) теплоотдача двигателя ухудшается, то расчетная относительна, продолжительность уточняется по формуле.

$$\varepsilon_\phi = \frac{\sum t_p + \sum t_{\text{П}} + \sum t_{\text{Т}}}{\sum t_{\text{П}} + \sum \beta_0 t_0 + \sum \beta(t_{\text{П}} + t_{\text{Т}})},$$

где t_{Π}, t_{Γ} – время пуска и торможения; β_0 – коэффициент, учитывающий ухудшения охлаждения при остановке; β – то же при пуске и торможении.

Пересчет расчетной мощности P_p при на стандартное $\varepsilon_{\text{СТ}}$ производится по формуле

$$P_{\text{СТ}} = P_p \sqrt{\varepsilon_{\Phi} / \varepsilon_{\text{СТ}}} . \quad (10.37)$$

Аналогично определяется расчетная мощность и выбор двигателя по каталогу в случае, если относительная продолжительность работы не равна стандартной, то есть

$$\varepsilon_{\Phi} \neq \varepsilon_{\text{СТ}} \text{ или } (\text{ПВ}_{\Phi} \neq \text{ПВ}_{\text{СТ}}) .$$

Предположим, двигатель работает с $\text{ПВ}_{\Phi} < \text{ПВ}_{\text{СТ}}$. В любом случае перегрев двигателя не должен превосходить допустимой величины $\tau_{\text{доп}}$. Это возможно, если средние потери мощности за цикл при Р и ПВ фактически не будут превышать средних потерь за тот же цикл при $P_{\text{НОМ}}$ и $\text{ПВ}_{\text{СТ}}$, т.е.

$$\Delta P_{\text{НОМ}} \text{ПВ}_{\text{СТ}} = \Delta P_{\Phi} \text{ПВ}_{\Phi} ,$$

откуда
$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \Delta P_{\Phi} \frac{\text{ПВ}_{\Phi}}{\text{ПВ}_{\text{СТ}}} .$$

При работе двигателя с различными продолжительностями включения ПВ его эквивалентная мощность должна оставаться постоянной, т.е.

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1}{t_{\text{Ц}}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{НОМ}}^2 t_p}{t_{\text{Ц}}}} ,$$

откуда

$$P_{\text{НОМ}} = P_1 \sqrt{\frac{\text{ПВ}_1}{\text{ПВ}_{\text{СТ}}}} . \quad (10.38)$$

После выбора по мощности двигатель проверяют на перегруз. Механического перегруза нет, если

$$M_{\text{max}} \leq 0.85 \lambda M_{\text{НОМ}} ,$$

где 0,85 – коэффициент запаса.

В продолжительном режиме работы у двигателя постоянного тока нагрузка ограничивается допустимым током, который определяется соотношением $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5) I_{\text{НОМ}}$. Условия отсутствия перегруза $I_{\text{max}} \leq I_{\text{доп}}$, где $I_{\text{max}} = P_{\text{max}} / (U \eta)$, P_{max} – максимальная мощность по диаграмме нагрузки.

Глава 11. Управление электроприводами

В этой главе будут рассмотрены разомкнутые схемы управления, в которых для управления электроприводом (ЭП) не используются обратные связи по его параметрам. Эти схемы, отличаясь простотой своей реализации, широко используются там, где требуется высокое качество управления движением ЭП, в частности для пуска, реверса, торможения двигателей.

Разомкнутые схемы обеспечивают защиту ЭП, питающей сети и технологического оборудования при возникновении различных ненормальных режимов - коротких замыканий, перегрузок, исчезновение напряжения или обрыве фазы питающей сети. Для этого они содержат соответствующие аппараты и устройства, находящиеся во взаимодействии с устройствами управления. В разомкнутых схемах управления главным образом используется релейно – контактная аппаратура, в состав которой входят командные аппараты, силовые коммутационные аппараты с ручным и дистанционным управлением, реле управления и защиты.

11.1 Электрические аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относятся командные маломощные устройства – кнопки и ключи управления, командоаппараты и силовые коммутационные аппараты – рубильники, пакетные выключатели и силовые контроллеры.

Кнопки управления. Эти аппараты предназначены для подачи оператором управляющего воздействия на ЭП. Они различаются по величине – нормальные и малогабаритные, по числу замыкающих контактов, по формуле толкателя. Две, три или более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию. Одноцепные кнопки управления выпускают с замыкающими и размыкающими контактами (рис.11.1,*a*)

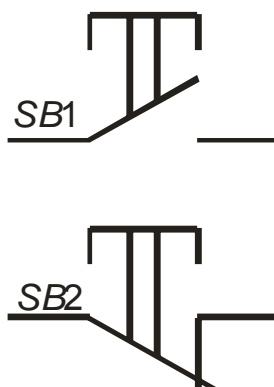


Рисунок 11.1, *a*

Отметим, что контакты на схемах изображаются в нормальном состоянии, т.е. когда на них нет электрического, механического, магнитного или другого воздействия. Двухцепные кнопки имеют обе пары показанных контактов, т.е. нормально разомкнутые и нормально замкнутые, с единым приводом способностью их является возвращаться в исходное (нормальное) положение (самовозврат) после снятия воздействия. Промышленность выпускает кнопки серии КУ120 и КЕ, предназначенные для работы в цепях переменного тока с напряжением до 500В и постоянного тока с напряжением до 220В и токами до 4А.

Ключи управления (универсальные переключатели). Эти аппараты предназначены для подачи управляющего воздействия на ЭП и имеют два или более фиксированных положений рукоятки и несколько замыкающих и размыкающих контактов (рис.11.1,б).

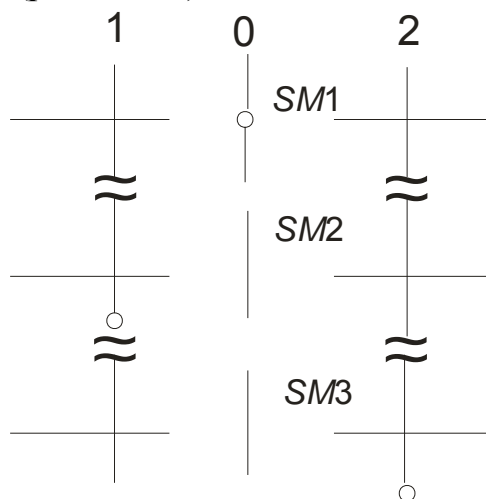


Рисунок 11.1, б

В среднее положение рукоятки (позиция 0) замкнут контакт *SM1*, что обозначается точкой на схеме, а контакты *SM2* и *SM3* разомкнуты. В положении 1 ключа замыкается контакт *SM2* и размыкается *SM1*. Количество контактов ключей и диаграмма их работы могут быть самыми различными.

Универсальные переключатели серий УП5300, УП5400 и ПКУЗ используются для коммутации цепей катушек контакторов, масляных выключателей, управления многоскоростными асинхронными двигателями и в ряде других случаев.

Командоконтроллеры (командоаппараты). Эти аппараты управления служат для коммутации несколько маломощных (ток нагрузки до 16А) электрических цепей. Имеют ручное управление от рукоятки или педали с несколькими положениями.

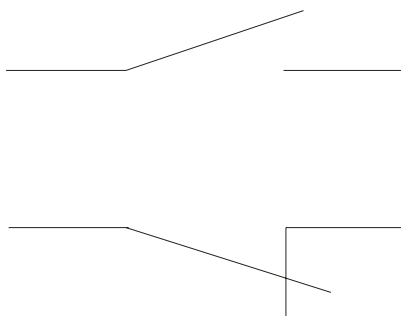


Рисунок 11.1, в

Такие аппараты находят применение в схемах управления ЭП кранов, металлургического оборудования, электрифицированного трансформатора.

Промышленностью выпускаются командоаппараты общепромышленного назначения серии КА для коммутации тока в цепях постоянного тока напряжением до 440В и переменного тока напряжением до 500В.

Рубильники. Простейший силовой коммутационный аппарат, который в основном предназначается для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей двигателей постоянного и переменного тока напряжением до 500В. Они различаются по величине коммутируемого тока, количеству полюсов, виду приводов рукоятки и числу ее положений (два или три). Рубильники серии Р и РА выпускаются на токи 100-160А, напряжения 220-660В и имеют 1-3 полюса.

Пакетные выключатели. Разновидность рубильников характеризуется тем, что их контактная система набирается из отдельных пакетов по числу полюсов (коммутируемых цепей). Пакет состоит из изолятора, в пазах которого находятся неподвижный контакт с винтовыми зажимами для подключения проводов и пружинный контакт с устройствами искрогашения. Промышленность выпускает пакетные выключатели типа ПВМ, ППМ, ПУ, ОКП, ПВП 11, предназначенные для коммутации электрических цепей постоянного тока напряжением до 220В и токами до 400А и переменного тока до 250А при напряжении до 380В.

11.2 Электрические аппараты дистанционного управления

К аппаратам дистанционного управления относятся контакторы, магнитные пускатели и реле, коммутация контактов которых осуществляется при подаче на их катушки электрического сигнала (напряжения или тока) и снятие этого сигнала. Другими словами, они являются двухпозиционными коммутационными аппаратами с самовозвратом, включение и выключение которых осуществляется электрическим сигналом.

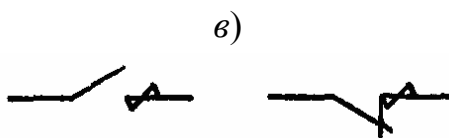
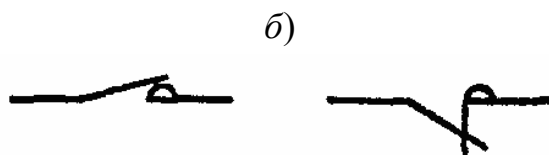
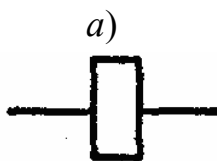
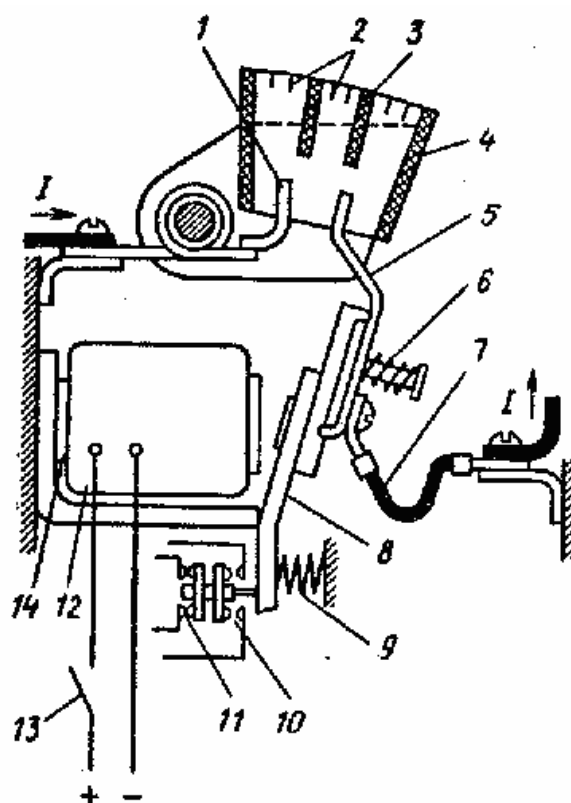
Контактор – представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных коммутаций силовых цепей двигателей. Контакторы различаются: по роду тока коммутируемой цепи (постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного тока); по количеству главных контактов (одно-, двух-, и многополюсные); по роду тока цепи

катушки (с управлением от постоянного и переменного токов); по номинальному току и напряжению коммутируемых цепей; по конструктивному исполнению.

Контактор постоянного тока показан на рис.11.2,*а*. На неподвижном сердечнике 14 магнитной системы контактора установлена втягивающая катушка 12. С подвижной частью магнитной системы, якорем 8, связан подвижный главный контакт 5, который присоединяется к цепи тока при помощи гибкого проводника 7. При подаче напряжения на катушку 12 (замыкании контакта 13) якорь притягивается к сердечнику и контакт 5 замыкается с неподвижным главным контактом 1, что обеспечивает коммутация тока I. Необходимое нажатие главных контактов в их рабочем положении обеспечивается пружиной 6. С якорем 8 связаны также вспомогательные, или блокировочные контакты мостикового типа, - замыкающие 10 и размыкающие 11, предназначенные для работы в цепях управления. Блок - контакты 10 замыкаются и 11 размыкаются одновременно с замыканием главных контактов, их условное обозначение показано на (рис.11.2,*б*).

Отключение контактора производится снятием напряжения с катушки 12 (контакт 13 размыкается). При этом подвижная система контактора под действием силы тяжести и возвратной пружины 9 приходит в «нормальное» состояние. Возникающая при расхождении контактов дуга гасится в щелевой дугогасительной камере 4, изготовляемой из жаростойкого изоляционного материала. Для облегчения гашения дуги применяются камеры с изоляционными перегородками 3, которые способствуют удлинению дуги и увеличению ее сопротивления, а иногда устанавливается гасительная решетка из коротких металлических пластин 2.

На рис.11.2,*б,в,г* показаны условные обозначения элементов контактора: соответственно втягивающей катушки, замыкающих и размыкающих контактов без дугогашения и с дугогашением.



г)

Рисунок 11.2

Контакторы переменного тока по принципу своей работы и основным элементом конструкции не отключаются от контакторов постоянного тока. Особенности их работы связаны с питанием втягивающей катушки переменным током, что приводит к повышенному потреблению энергии при срабатывании. Кроме того, пульсирующий магнитный ток, создаваемый переменным током катушки, вызывают вибрацию и гудение магнитного провода, а значит повышенный нагрев. Для уменьшения этих нежелательных факторов

магнитопровод набирают из тонких листов, а на полюс якоря помещают короткозамкнутый виток, способствующий удержанию якоря в притянутом состоянии в момент перехода через нуль постоянного потока.

Магнитный пускатель представляет собой специализированный комплексный аппарат, предназначенный для управления трехфазными асинхронными двигателями. Кроме подключения двигателя к сети и его отключения пускатель обеспечивает защиту двигателя к сети и его отключения пускатель обеспечивает защиту двигателя от перегрузок (тепловую защиту), а всей электроустановки от последствий коротких замыканий. Одновременно обеспечивает сигнализацию о работе привода. В соответствии с функциями в состав магнитного пускателя входят контактор, кнопки управления, тепловые или максимально - токовые реле, сигнальные лампы (зеленая или красная), которые размещаются в одном корпусе. Выпускаемые промышленностью магнитные пускатели различаются между собой по назначению (реверсивные или нереверсивные), наличию тех или иных реле, уровням коммутируемых токов, напряжению главной управляемой цепи.

Пускатели серии ПМА выпускаются на коммутируемые токи 6.3; 10; 25; 40; 63; 100 и 160А; серии ПМЕ - на токи 6.3; 10; 25А; серии ПМЛ - на токи 10, 25, 40, 63А.

Электромагнитное реле. Представляет собой аппарат, предназначенный для коммутации слаботочных цепей управления ЭП в соответствии с электрическим сигналом, подаваемым на его катушку. Область применения реле весьма широкая. Они используются в качестве датчиков тока и напряжения, промежуточных элементов для передачи команд из одной цепи в другую и размножения сигналов, датчиков координат ЭП и технологических параметров рабочих механизмов. Другими словами, они выполняют самые разнообразные функции управления, контроль, защита и блокирование в автоматизированном ЭП. Электромагнитное реле работает следующим образом (рис 11.3).

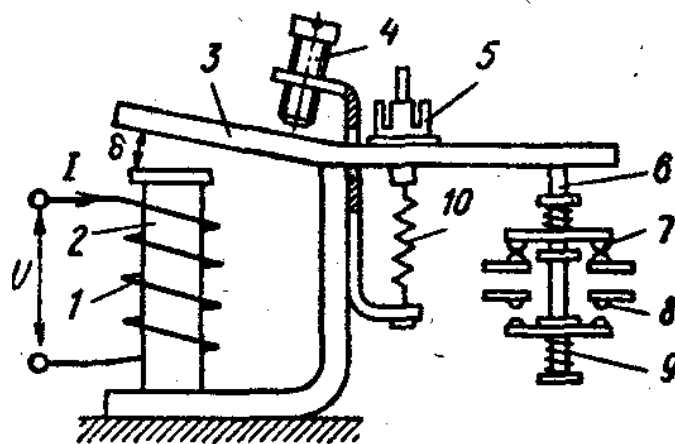


Рисунок 11.3

На сердечнике 2 магнитной системы находится катушка 1, на которую подается входной электрический сигнал. Когда ток (напряжение) в цепи катушки превысит некоторое значение, называемое током (напряжением) срабатывания реле, создаваемая им электромагнитная сила станет больше противодействующей силы пружины 10. Якорь 3 к сердечнику 2 и траверса 6 обеспечит замыкание контактов 8 и размыкания контактов 7. Сила нажатия в контактах создается пружиной 9. Если уменьшить ток (напряжение) в катушке, то якорь под действием пружины 10 перейдет в исходное положение, и контакты реле 7 и 8 вернуться в "нормальное" (исходное) положение.

Ток (напряжение) срабатывания реле может регулироваться в определенных пределах изменением силы натяжения возвратной пружины 10 с помощью чайки 5, а также за счет зазора 8, величина которого может регулироваться с помощью винта 4. При затяжке пружины или увеличении зазора 8 ток (напряжение) срабатывания возрастает.

Реле постоянного тока серии РЭВ-800 применяются в схемах управления ЭП в качестве реле тока, напряжения, времени и промежуточных, а РЭВ-310 - реле тока и напряжения. Они изготавливаются с катушками на напряжение от 12 до 220В и могут иметь от одного до четырех пар контактов.

Герконовые электромагнитные реле (герконы) имеют ту особенность, что их контакты герметизированы, что повышает их износостойкость и надежность в работе. Рассмотрим устройство простейшего реле – геркона (рис.11.4).

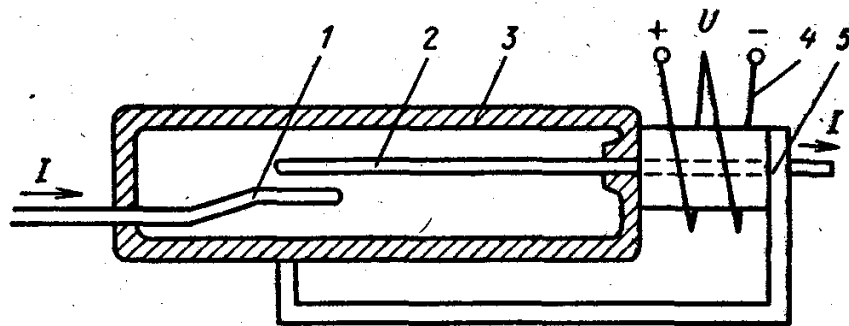


Рисунок 11.4

Внутри стеклянной капсулы 3, наполненной инертным газом, располагаются неподвижный 1 и подвижный 2 контакты, изготовленные из сплава железа с никелем. Капсула 3 охвачена магнитопроводом 5, на части которого располагается катушка реле 4.

Если на катушку 4 подать напряжение U , то ток в ней создает магнитный поток Φ , замыкающийся в магнитопроводе 5, контактах 1 и 2. Под действием этого потока конец подвижного контакта 2 перемещается вниз и замыкается с контактом 1, в результате чего цепь коммутируемого тока I замыкается.

При снятии напряжения U с катушки подвижный контакт возвращается в "нормальное" (исходное) положение. Коммутируемый ток достигает 5А при напряжении 100В.

11.3 Датчики времени скорости тока и положения

В цепях контроля работы схемы управления ЭП необходима информация о текущих значениях его скорости, тока, момента ЭДС и других координат, а также времени. Устройства, которые выдают подобную информацию в виде электрических сигналов, получили название измерительных преобразователей или датчиков.

Датчики времени. При построении схем управления в функции времени в качестве датчиков используются различные реле времени - электромагнитные, роторные, электронные, анкерные и пневматические. Рассмотрим принцип действия некоторых датчиков и их основные технические характеристики.

Электромагнитное реле времени состоит из неподвижной части магнитопровода 2, на котором устанавливается катушка 1 (рис.11.5), и подвижной части магнитной цепи (якорь 6) с установленными на ней контактами 8 и 9. При отсутствии напряжения на катушке якорь 6 под действием пружины 4 находится в верхнем (поднятом) положении.

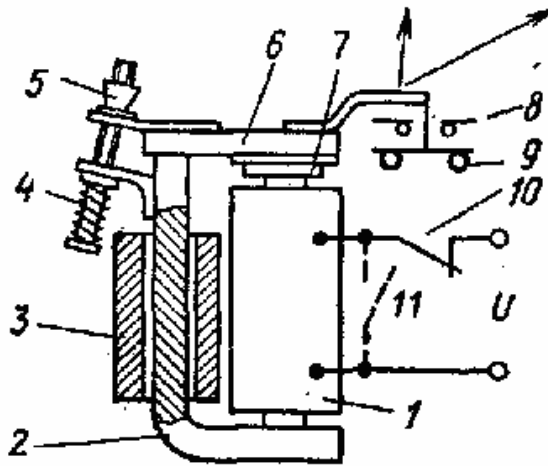


Рисунок 11.5, а.

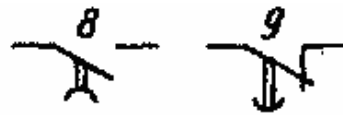


Рисунок 11.5, б.

Особенностью конструкции реле времени является наличие на магнитопроводе 2 массивной медной трубки (гильзы), которая и обеспечивает выдержку времени реле при отключении его катушки. Включение реле происходит, как у обычного электромагнитного реле, подачей напряжения на катушку 1 после замыкания контакта 10. Якорь 6, притягиваясь к сердечнику, осуществляет без выдержки времени переключение контактов 8 и 9. Выдержка времени обеспечивается за счет замедления возврата якоря в исходное положение. После снятия напряжения уменьшающийся магнитный поток Φ создает в гильзе вихревые токи, которые, по правилу Ленца, своим магнитным потоком $\Phi_{в}$ поддерживают основной поток (замедляют скорость уменьшения основного потока).

В соответствии с таким принципом действия реле времени обеспечивает выдержку времени при размыкании замыкающего контакта и замыкании размыкающего контакта (рис. 11.5, б).

Выдержка времени реле регулируется ступенчато путем установки латунной немагнитной прокладки 7 определенной толщины, или плавно за счет изменения натяжения пружины 4 с помощью чайки 5. Чем меньше будет затянута пружина, тем больше будет выдержка времени и наоборот.

Электронное реле времени обычно выполняется на базе транзисторов и конденсаторов, время разряда и заряда которых определяет выдержку времени (рис. 11.6).

В исходном положении внешний управляющий контакт K замкнут и на базе транзистора $VT1$ подан отрицательный потенциал источника питания GB . Транзистор открыт, при этом потенциал базы $VT2$ будет положительным по отношению к этому эмиттеру и он будет заперт. В результате выходное реле KV будет отключено. В исходном положении конденсатор C будет заряжен с показанной на рисунке полярностью своих пластин.

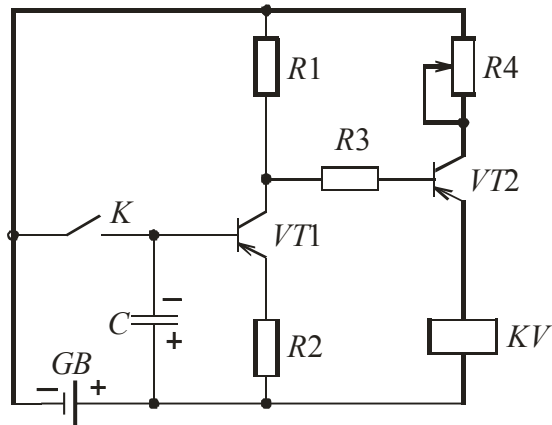


Рисунок 11.6

Команда на начало отсчета времени подается размыканием контакта K . После чего начинается разряд конденсатора через резистор R_2 и переход эмиттер - база транзистора $VT1$. В конце разряда $VT1$ запирается, что приведет к появлению на базе $VT2$ отрицательного потенциала. Он открывается, по обмотке реле KV будет ток, и оно сработает, переключив свои контакты (на рис. не показаны). Отсчет времени в этот момент закончится.

Реле скорости. Информация о величине скорости ЭП может быть получена от различных датчиков скорости, а также и от самого двигателя. Скорость двигателя постоянного и переменного тока определяет величину их противо-ЭДС. Таким образом, если использовать величину ЭДС в качестве измеряемой (контролируемой) переменной, то будет получена информация о величине скорости.

Электромеханическое реле контроля скорости (РКС) работает по принципу асинхронного двигателя. Ротор реле (рис. 11.7,а) представляет собой постоянный магнит 1, соединенный с помощью валика с валом двигателя.

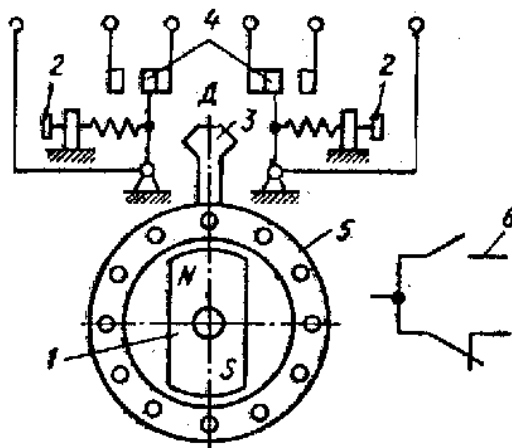


Рисунок 11.7, а

Постоянный магнит помещен внутри алюминиевого цилиндра 5, имеющего обмотку в виде беличьей клетки. Цилиндр может поворачиваться

вокруг оси валика на небольшой угол и переключать при этом с помощью упора 3 контакты 4(6). При неподвижном роторе упор занимает нейтральное положение, и контакты реле находятся в "нормальном" положении. При вращении магнита 1 уже при небольших скоростях на цилиндр 5 начинает действовать вращающий момент, под действием которого он поворачивается и обеспечивает с помощью упора 3 переключения контактов 4 и 6. Величина скорости, при которой переключаются контакты реле, задается с помощью настроечных винтов 2.

Реле контроля скорости этого типа удобно использовать при автоматизации процесса торможения, когда требуется отключить двигатель от сети при снижении его скорости до нуля.

Тахогенератор (ТГ). Как датчик скорости двигателей используется в основном в основном в системах автоматизированного ЭП (рис.11.7, б).

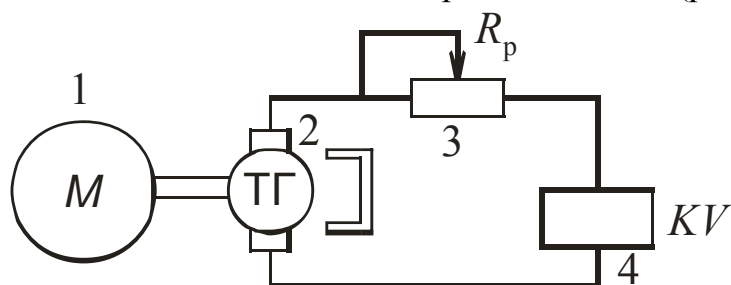


Рисунок 11.7, б

К якорию тахогенератора 2 подключена обмотка 4 реле напряжения, последовательно с которой включен регулировочный резистор 3. Реле срабатывает при определенной скорости двигателя 1 в зависимости от положения движка реостата 3 и своими контактами коммутирует соответствующие цепи управления. Наибольшее распространение в автоматизированном ЭП нашли ТГ постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типов ЭТ-4 и ЭТ-7; ТМГ-30П; ТД-103ПМ и ТД-201-ПМ и с обмотками возбуждения серии ТГ, СЛ, ТД, а также асинхронные и синхронные тахогенераторы.

Нередко в качестве датчика скорости используется схема с двигателем постоянного тока, называемая тахометрическим мостом (рис. 11.8).

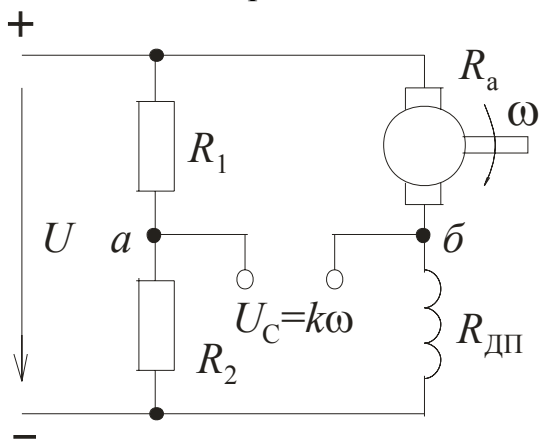


Рисунок 11.8

Схема представляет собой мост образованный резисторами R_1 , R_2 , R_a , $R_{дп}$ (дополнительных полюсов). Если выбрать сопротивления резисторов R_1 и R_2 так, чтобы соблюдалось условие $R_a R_2 = R_1 R_{дп}$ то, мост будет сбалансирован и напряжение на его диагонали (между точками А и Б) не зависит от тока якоря и будет равно

$$U_c = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot C\Phi\omega = k_c\omega,$$

т.е. пропорционально скорости двигателя.

Датчики положения. К датчикам положения, которые широко используются в системах управления ЭП, относятся путевые и конечные выключатели различных типов. Они используются для получения сигналов при достижении ЭП или исполнительным механизмом определенных положений, которые затем поступают в цепи управления, защиты и сигнализации. Конечные выключатели применяются главным образом для предотвращения выхода исполнительных органов из рабочей зоны. Таким образом, путевые выключатели используются для подачи команд управления в схему в определенных точках пути исполнительных органов.

Путевые и конечные выключатели бывают бесконтактными и контактными. После в зависимости от вида привода их контактных систем делятся на вращающиеся, рычажные и нажимные.

Вращающиеся выключатели имеют привод от валика, соединяемого с валом двигателя. На валике расположены кулачковые шайбы, воздействующие на контактную систему выключателя.

Рычажные выключатели имеют привод своей контактной системы от поворотного рычага, на который воздействует движущая часть ЭП или исполнительного органа. Возврат рычага и контактов в исходное положение осуществляется под действием пружины.

В нажимных выключателях переключения контактов происходит при нажатии на шток выключателя, возврат которого в исходное положение осуществляется под действием пружины.

Промышленность выпускает несколько типов контактных путевых и конечных выключателей. К ним относятся выключатели серии КУ-700, ВУ-150 и ВК-200 ВК-300, ВПК-1000, 2000 и 3000. Они позволяют коммутировать одну или две цепи при уровнях переменного тока до 10А и напряжении до 500В и постоянного тока до 1,5А при напряжении до 220В.

Бесконтактные индукционные датчики положения (рис.11.9) имеют разомкнутый магнитопровод 1 с катушкой 2, параллельно которой включен конденсатор 6. Катушка с конденсатором включен в цепь переменного тока вместе с обмоткой реле 4. Когда якорь 3 датчика, закрепленный на исполни-

тельном органе не замыкает магнитопровод 1 (пунктирное положение), индуктивное сопротивление катушки 2 мало, ток в цепи большой и реле 4 находится в выключенном состоянии.

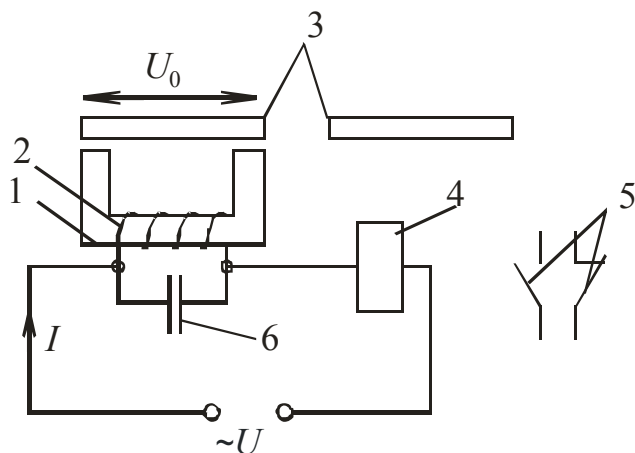


Рисунок 11.9

Когда якорь 3 займет положение над магнитопроводом 1, индуктивное сопротивление катушки 2 возрастает и за счет подбора емкости конденсатора 6 наступает резонанс токов, который характеризуется резким уменьшением тока в цепи. Реле 4 при этом отключается, что вызывает переключение контактов 5 в цепи управления.

11.4 Виды и аппараты защиты блокировок, и сигнализации в электроприводе

Для обеспечения надежной работы электропривода и технологического оборудования в схемах управления предусматривается специальная защитная аппаратура. Этой же цели служат и различные блокировки, обеспечивающие заданный порядок операций по управлению одним или несколькими ЭП и технологическим оборудованием, а также предотвращающие при этом ошибочные действия оператора. Кроме того, во многих случаях целесообразно осуществлять контроль за состоянием и режимом работы отдельных узлов электропривода, что обеспечивается с помощью средств сигнализации, измерительных и регистрирующих приборов.

Аппараты максимально-токовой защиты. При работе ЭП может произойти короткое замыкание электрических цепей, а также увеличение тока в силовых цепях двигателя сверх допустимого предела вызванное, например, стопорением движения исполнительного органа рабочей машины, обрывом фазы асинхронного или синхронного двигателей, резким снижением тока возбуждения двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения. Для защиты электроустановки от появляющихся в этих случаях сверхтоков предусматриваются максимально-токовая защита, которая может реализоваться с помощью плавных предохранителей, максимально-токовых реле или автоматических выключателей.

Плавкие предохранители FV включаются в каждую линию (фазу) питающей двигатель сети между выключателем Q и контактами линейного контактора KM для асинхронного двигателя (рис.11.10,*а*) и для двигателя постоянного тока (рис.11.10, *б*). Цепи управления также защищаются плавкими предохранителями (рис.11.10, *в*).

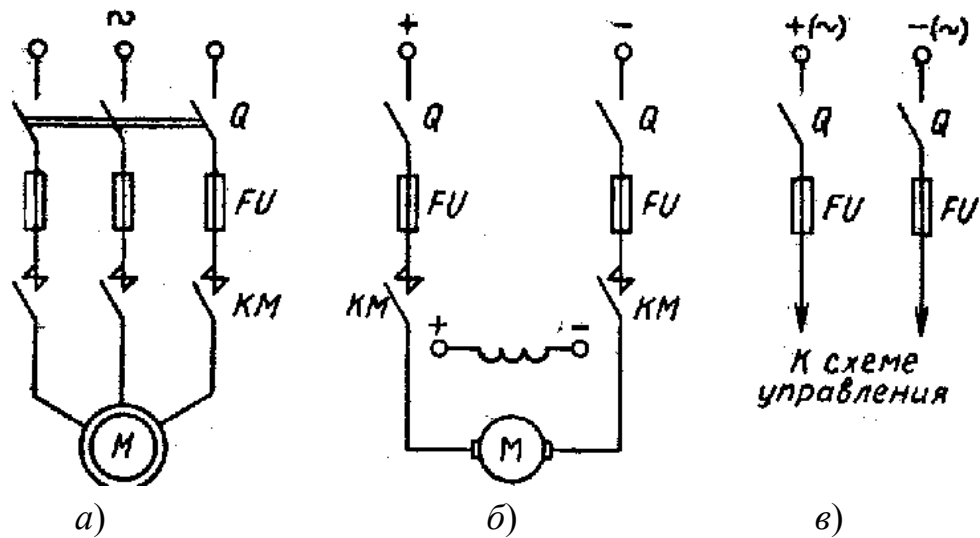


Рисунок 11.10

Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка и дугогасительное устройство. Выбор плавкой вставки предохранителей производится по току, который производится таким образом, чтобы при пуске двигателя она не перегорала от пускового тока. Так при защите магистрали питающей сети, через которую питаются двигатели, ток плавкой вставки выбирается по условию

$$I_{\text{вст}} > I_n / (1.6 \dots 2.5) + \sum_{i=1}^{m-1} I_{\text{ном } i}$$

где I_n -пусковой ток наиболее мощного двигателя; $I_{\text{ном } i}$ i -номинальный ток i -го двигателя, питающегося по данной магистрали; m -число двигателей, питающихся по данной магистрали.

Меньшее значение коэффициента(1,6) принимается для тяжелых условий пуска, большее значение (2,5)– для нормальных условий пуска (быстрый разгон двигателя).

□□ □□□□ □□□□□□□□ (□□.10.10, μ □ μ) □□ □□□□□ □□□□□ □□□□□□□□ □□□□□□

$$I_{\text{вст}} \geq I_n / (1.6 \dots 2.5).$$

Выбранная плавкая вставка должна быть проверена по значению тока двухфазного короткого замыкания. Условия проверки:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} / I_{\text{вст}} \geq 4 \dots 7.$$

Согласно правилам безопасности кратность, равная 4, допускается в сетях напряжением 380 и 660В, где требуется плавкая вставка на номинальный ток 160 и 200А, а также в сетях с фазным напряжением 127В независимо от требуемой величины тока плавкой вставки.

Реле максимального тока используется в основном в электроприводе средней и большой мощности. Катушки этих реле *FA1* и *FA2* включаются в две фазы трехфазного асинхронного двигателя и в один или два полюса двигателя постоянного тока между выключателем *Q* и контактами линейного контактора *KM* (рис.11.11,*а* и *б*). Размыкающие контакты этих реле включены в цепь катушки *KM* линейного контактора (рис.11.11, *в*).

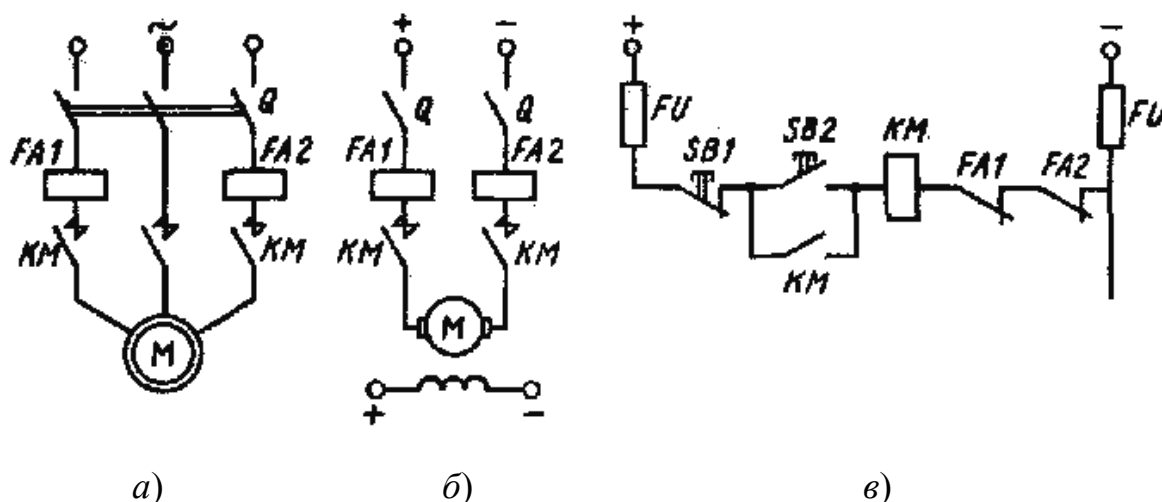


Рисунок 11.11

При возникновении сверхтоков в контролируемых цепях, превышающих установки (I_y) реле *FA1* и *FA2*, их контакторы в цепи управления размыкаются, и контакты линейного контактора *KM* отключают двигатель от питающей сети.

В качестве реле максимального тока в ЭП применяются реле типов РЭВ-570 для цепей постоянного тока от 0.6 до 1200А и РЭВ-571Т для цепей переменного тока от 0.6 до 630А. Они допускают регулировку своей установки (тока срабатывания) в пределах $(0.7...3.0)I_{ном}$ (РЭВ-570) и $(0.7...2.0)I_{ном}$ (РЭВ-571Т) и имеют время срабатывания $t_c=0.05с$.

Установки реле выбираются таким образом, чтобы не происходило отключение двигателя при пуске и других переходных процессах, когда токи в силовых цепях могут в несколько раз превышать номинальный уровень.

При защите магистрали ток уставки максимальной защиты фидерного автомата или магнитного пускателя по условию

$$I_y \geq I_n + \sum_{i=1}^{m-1} I_{ном i},$$

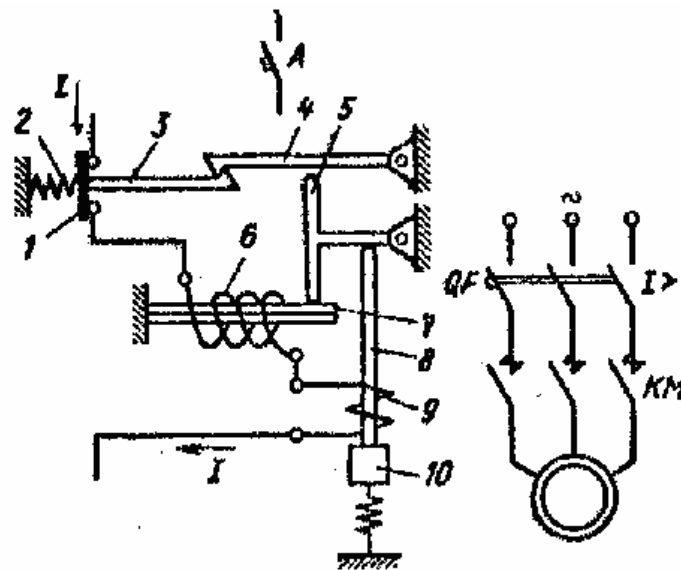
где I_n -пусковой ток наиболее мощного двигателя; $\sum_{i=1}^{m-1} I_{\text{НОМ}i}$ – сумма номинальных токов остальных двигателей.

$$I_y \geq I_n.$$

Выбранная установка должна быть проверена по току двухфазного замыкания. Условие проверки:

$$I_K^{(2)} / I_y \geq 1.5.$$

Автоматические выключатели. Это комплексные многоцелевые аппараты, которые могут обеспечивать как ручное включение и отключение двигателей, так и защиту от сверхтоков и перегрузов. Для выполнения этих функций автомат имеет контактную группу, замыкание которых всегда происходит вручную с помощью рукоятки или кнопки, а размыкание - вручную или автоматически от действия теплового или максимального реле.



a)

б)

Рисунок 11.12

Контролируемый ток I протекает через контакт 1 автомата, нагреватель теплового реле 6, катушку 9 реле максимального тока.

При коротком замыкании в контролируемой цепи сердечник 10 максимального реле втягивается в катушку 9 и толкателем 8 действует на рычаг 5. Последний поднимает защелку 4. Освобождается рычаг 3, и под действием пружины 2 размыкаются контакты 1 автомата.

Устройства, предназначенные для управления электродвигателями, должны обеспечивать надежную работу в течение всего срока службы. При этом должны быть обеспечены следующие условия: надежность работы, безопасность, простота монтажа и обслуживания, экономичность. Требования к устройствам управления электродвигателями изложены в стандартах ГОСТ 7, ГОСТ 6.

Устройства управления электродвигателями должны обеспечивать работу электродвигателя в режиме холостого хода, пуска, торможения, реверсирования, защиты от перегрузки и короткого замыкания. Устройства управления электродвигателями должны обеспечивать работу электродвигателя в режиме холостого хода, пуска, торможения, реверсирования, защиты от перегрузки и короткого замыкания. Устройства управления электродвигателями должны обеспечивать работу электродвигателя в режиме холостого хода, пуска, торможения, реверсирования, защиты от перегрузки и короткого замыкания.

Электрическая блокировка в схемах ЭП. Они служат для обеспечения заданной последовательности операций управления, предотвращения аварийных ситуаций и ошибочных действий со стороны оператора.

Так, например, при работе двух контакторов КМ1 и КМ2 перекрестное включение их размыкающих контактов в цепи катушек не допускает включения одного контактора при включенном другом. Такой вид блокировки применяется в реверсивных ЭП, где недопустимо одновременное включение двух контакторов, или в ЭП с электрическим торможением двигателя, где торможение может начаться только после отключения двигателя.

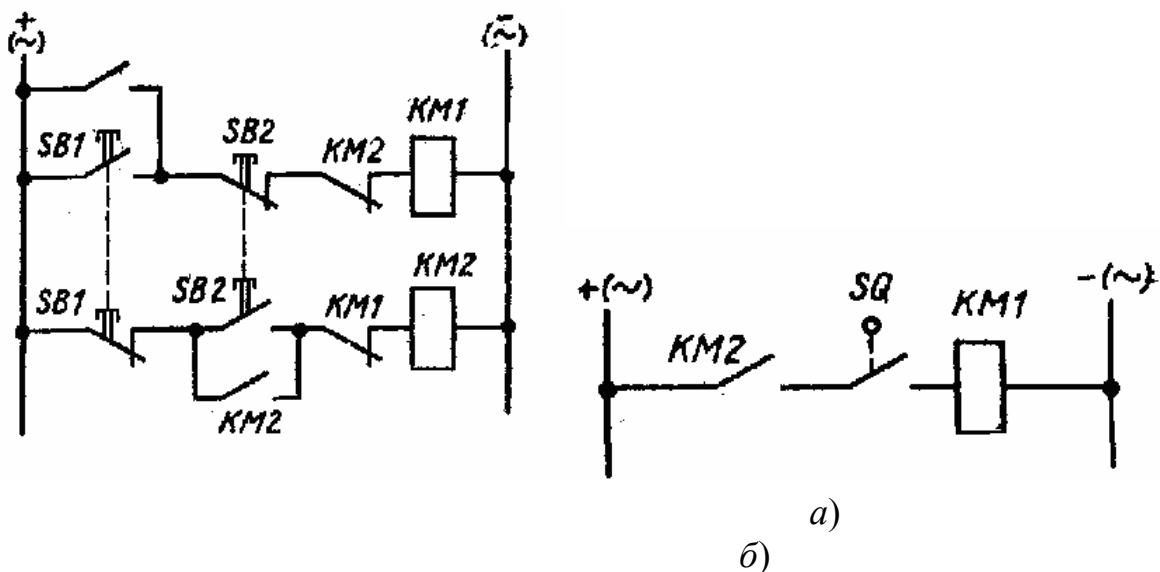


Рисунок 11.13

Одновременное включение двух контакторов предотвращается и с помощью использования двухцепных кнопок управления SB1 и SB2, имеющих замыкающие и размыкающие контакты. Как видно из схемы, нажатие любой кнопки приводит к замыканию цепи одного контактора и размыканию цепи другого.

Сигнализация в схемах управления ЭП. Для контроля хода технологического процесса или последовательности выполняемых операций состояние защиты и наличие напряжения питания или какого-либо электрического

сигнала применяется сигнализация, которая может быть световой (сигнальные лампы, табло), звуковой (звонок) и визуальной (указательное реле, измерительный прибор).

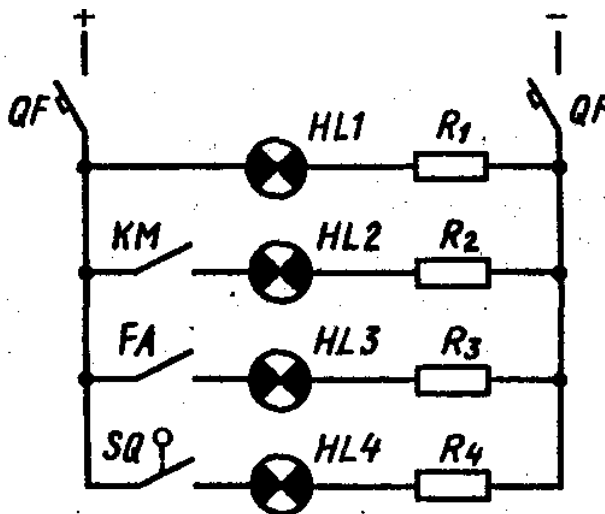


Рисунок 11.14

Лампа *HL1* в схеме управления ЭП сигнализирует о подаче напряжения (включение автомата *QF*), лампа *HL2* – о включении контактора *КМ*, лампа *HL3* – о срабатывании реле максимального тока *FA*, *HL4* – о срабатывании конечного выключателя *SQ*.

Схема обеспечивает прямой (без ограничения тока) пуск АД, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий предохранителями *FA* и перегруза (тепловыми реле *КК*). Для пуска АД замыкают выключатель *QF* и нажимают кнопку *SB1*. Получает питание контактор *КМ*, который своими контактами подключает двигатель к источнику питания, а вспомогательным контактом шунтирует пусковую кнопку *SB1*. Происходит разгон ротора по естественной характеристике. Для отключения АД нажимают кнопку остановки *SB2*, контактор *КМ* обесточивается и отключает двигатель от сети. Начинается торможение двигателя по закону свободного выбега под действием момента нагрузки на его валу.

11.5 Типовые узлы и схемы управления электроприводов с двигателями постоянного тока

Управление пуском, реверсом и торможением двигателя постоянного тока (ДПТ) в большинстве случаев осуществляется в функции времени, скорости (ЭДС), тока или пути. Рассмотрим ряд типовых схем, с помощью которых реализуются указанные режимы.]

Типовая схема пуска ДПТ с независимым возбуждением в функции времени.

Эта схема содержит кнопки управления (рис.11.15, *a*) *SB1* (пуск) и *SB2* (останов, стоп ДПТ), линейный контактор *КМ1*, обеспечивающий подключение ДПТ к сети, и контактор ускорения *КМ2* для шунтирования пускового

реостата R_g . В качестве датчика времени в схеме использовано электромагнитное реле KT . При подключении схемы к источнику питания происходит возбуждение ДПТ и срабатывает реле KT , размыкая свой размыкающий контакт в цепи контактора $KM2$ подготавливая двигатель к пуску.

Пуск ДПТ начинается после нажатия кнопки $SB1$, в результате чего получает питание контактор $KM1$, который своим главным контактом подключает ДПТ к источнику питания. Двигатель начинает разгон с резистором в цепи якоря. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора $KM1$ разрывает цепь питания катушки реле времени KT . Через интервал времени Δt_{KT} после прекращения питания катушки, реле времени, называемой выдержкой времени, размыкающий контакт KT замыкается в цепи катушки контактора $KM2$, последний включается и своим главным контактом шунтирует пусковой реостат R_g в цепи якоря. Таким образом, при пуске ДПТ в течение времени Δt_{KT} разгоняется по искусственной характеристике 1 (рис. 11.15, б), а после шунтировки резистора R_g – по естественной 2. Величина сопротивления резистора R_g выбрана таким образом, что в момент включения двигателя ток I_1 в цепи якоря и соответственно момент M_1 не превышают допустимого уровня. За время Δt_{KT} после начала пуска скорость вращения двигателя достигает величины ω_1 , а ток в цепи якоря снижается до уровня I_2 (рис.11.15,в). После шунтировки R_g происходит бросок тока в цепи якоря до I_1 , который не превышает допустимого уровня.

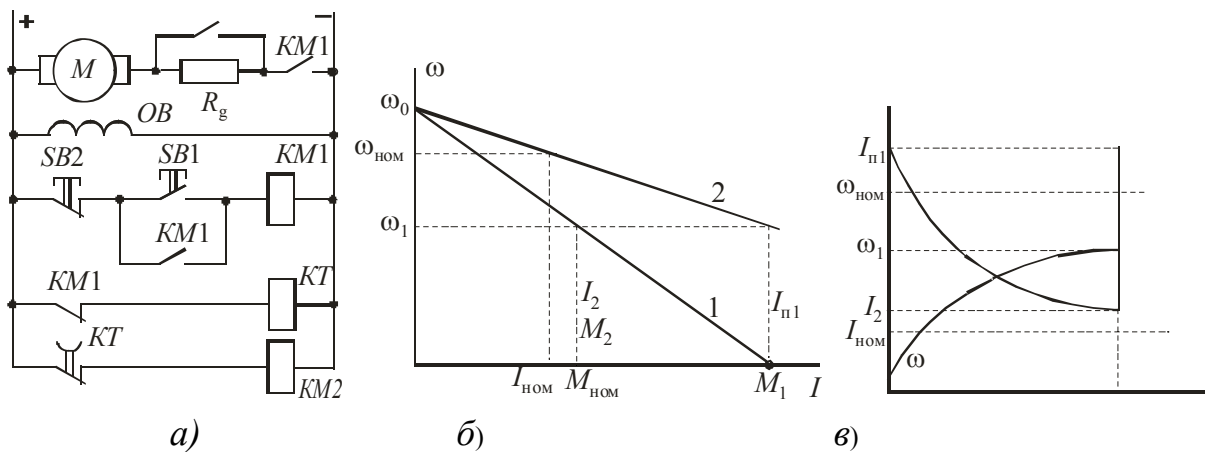


Рисунок.11.15 Типовая схема пуска двигателя в две ступени в функции ЭДС и диагностического торможения в функции времени.

В этой схеме (рис.11.16, а) в качестве датчика скорости (ЭДС) использован якорь M , к которому подключены катушки контакторов ускорения $KM1$ и $KM2$. С помощью регулировочных резисторов R_{y1} и R_{y2} эти контакторы

могут быть настроены на срабатывание при определенных скоростях двигателя.

Для осуществления торможения в схеме предусмотрен резистор R_{g3} , подключение и отключение, которого осуществляется контактором торможения $KМЗ$. Для обеспечения выдержки времени используется реле KT , размыкающий контакт которого включен в цепь контактора торможения $KМ2$.

После подключения схемы к источнику питания происходит возбуждение ДПТ, причем аппараты схемы остаются в исходном положении. Пуск ДПТ осуществляется нажатием кнопки $SB1$, что приводит к срабатыванию линейного контактора $KМ$ и подключению якоря ДПТ к источнику питания. Двигатель начинает разгон с включенными резисторами $R_{g1} + R_{g2}$ по характеристике (рис.11.16,б). По мере увеличения скорости якоря растет его ЭДС и соответственно напряжение на катушках контакторов $KМ1$ и $KМ2$. При скорости ω_1 срабатывает контактор $KМ1$, шунтируя своим контактом первую ступень пускового реостата R_{g1} , и двигатель переходит на характеристику 2. При скорости ω_2 работает $KМ2$, шунтируя вторую ступень R_{g2} . Двигатель переходит на естественную характеристику 3 и заканчивает свой разгон в точке установившегося режима, определяемой пересечением естественной характеристики 3 и характеристики нагрузки $\omega (M_c)$.

Для перехода к режиму торможения нажимается кнопка $SB2$. Катушка контактора $KМ$ теряет питание, размыкается замыкающий контакт $KМ$ и ДПТ отключается от источника питания. Размыкающий контакт $KМ$ в цепи контактора торможения $KМЗ$ замыкается, последний срабатывает и своим главным контактом подключает резистор R_{g3} к якорю м, переводя ДПТ в режим динамического торможения по характеристике 4 (11.16,б). Одновременно размыкается замыкающий контакт $KМ$ в цепи реле времени KT , оно теряет питание и начинает отсчет времени. Через интервал времени Δt который соответствует снижению скорости ДПТ до нуля, реле времени KT отключается и своим контактом разрывает цепь питания контактора $KМЗ$. Резистор R_{g3} отключается от якоря M двигателя, торможение заканчивается, и схема возвращается в свое исходное положение.

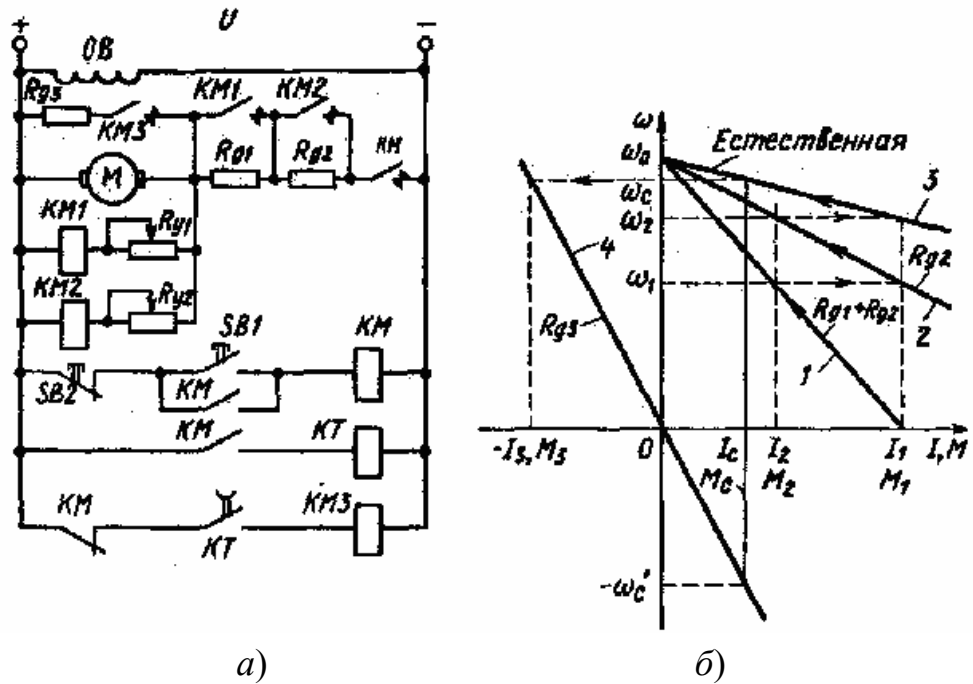


Рис.11.16

11.6. Типовые узлы и схемы управления электроприводов с асинхронными двигателями

Типовые схемы релейно-контакторного управления АД строятся по тем же принципам, что и двигатели постоянного тока.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно пускаются прямым подключением к сети без ограничения пусковых токов. В этих случаях они управляются с помощью магнитных пускателей, которые одновременно обеспечивают и некоторые виды их защиты.

Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя (рис.11.17) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора KM и двух встроенных в него типовых реле защиты KK .

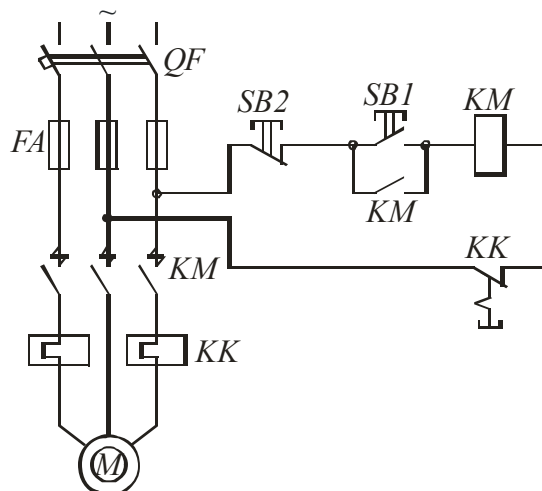


Рисунок 11.17

На рис. 11.18 представлена реверсивная схема управления АД, основным элементом которой является магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора $KM1$ и $KM2$ и два тепловых реле защиты KK .

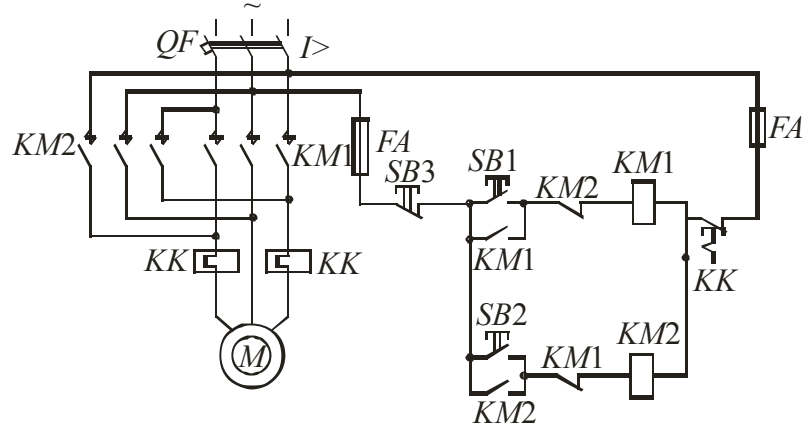


Рисунок 11.18

Схема обеспечивает прямой пуск и реверс АД, а также торможения противовключения при ручном управлении. В схеме предусмотрена защита от перегруза (реле KK) и коротких замыканий в статора с помощью автоматического выключателя, оснащенного максимально-токовым расщепителем ($I>$) и управления с помощью предохранителей FA . Кроме того, схема управления осуществляет нулевую защиту от исчезновения напряжения сети (контакторы $KM1$ и $KM2$).

Пуск двигателя в направлениях “Вперед” или “Назад” осуществляется нажатием соответственно кнопок $SB1$ и $SB2$. Это приводит к срабатыванию контактора $KM1$ или $KM2$ и подключению АД к сети при включенном автомате QF .

Для реверса или торможения АД вначале нажимается кнопка $SB3$ (“Стоп”), что приводит к отключению включенного до этого момента контактора (например, $KM1$), после чего нажимается кнопка $SB2$. Это приводит к включению контактора $KM2$ и подаче на АД напряжения источника питания с другим порядком чередования фаз. Магнитное поле АД изменяет свое направление вращения и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов – торможения противовключением и разгона в обратном направлении.

В случае необходимости только торможения АД при достижении им нулевой скорости должна быть нажата кнопка $SB3$, что приведет к отключению АД из сети и возвращению схемы в исходное положение.

Во избежания короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного нажатия кнопок $SB1$ и $SB2$, в реверсивных магнитных пускателях предусмотрена электрическая блокировка в виде

размыкающих контактов $KM1$ и $KM2$ перекрестно включенных в цепи катушек $KM2$ и $KM1$ соответственно.

На рис. 11.19 представлена схема прямого пуска и динамического торможения в функции времени.

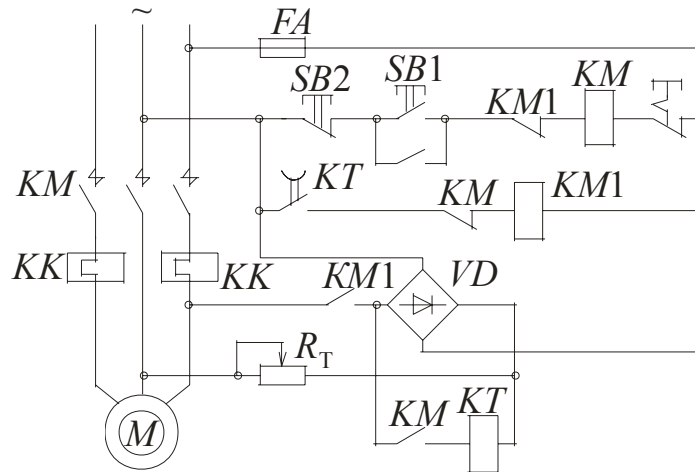


Рисунок 11.19

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки $SB1$, после чего срабатывает линейный контактор KM , подключающий двигатель и сети. Одновременно замыкается контакт KM в цепи реле времени KT . Его срабатывание подготавливает своим замыкающим контактом цепь аппарата $KM1$ -контактора торможения.

Для остановки АД нажимается кнопка $SB3$. Контактор KM отключается, размыкая свои контакты в цепи статора АД и отключая тем самым его от цепи переменного тока. Одновременно с этим замыкается контакт KM в цепи аппарата $KM1$ и размыкается контакт KM в цепи реле KT . Это приводит к включению контактора $KM1$, подаче в обмотку статора постоянного тока от выпрямителя VD через резистор R_T и переводу двигателя в режим динамического торможения. Реле времени KT , потеряв питание, начинает отсчет времени. Через интервал времени, соответствующий времени останова АД, реле KT размыкает свой контакт в цепи контактора $KM1$, тот отключается, прекращая подачу постоянного тока в цепь статора. Схема возвращается в исходное положение.

Панель типа ПДУ 6220. Эта панель входит в состав нормализованной серии панелей управления АД с фазным и короткозамкнутым ротором и обеспечивает пуск в 2 ступени и динамическое торможение в функции времени (рис. 11.20). При подаче на схему напряжений постоянного 220В и переменного 380В тока (замкнутое состояние $Q1$, $Q2$ и автомата QF) происходит включение реле времени $KT1$, чем подготавливается двигатель к пуску с полным пусковым резистором $R_{Э1} + R_{Э2}$ в цепи ротора. Одновременно с этим, если рукоятка командоконтроллера SA находится в нулевой (средней) позиции и максимально-токовые реле $FA1$ – $FA3$ не включены, включается реле

защиты KV от понижения питающего напряжения и подготовит схему к работе.

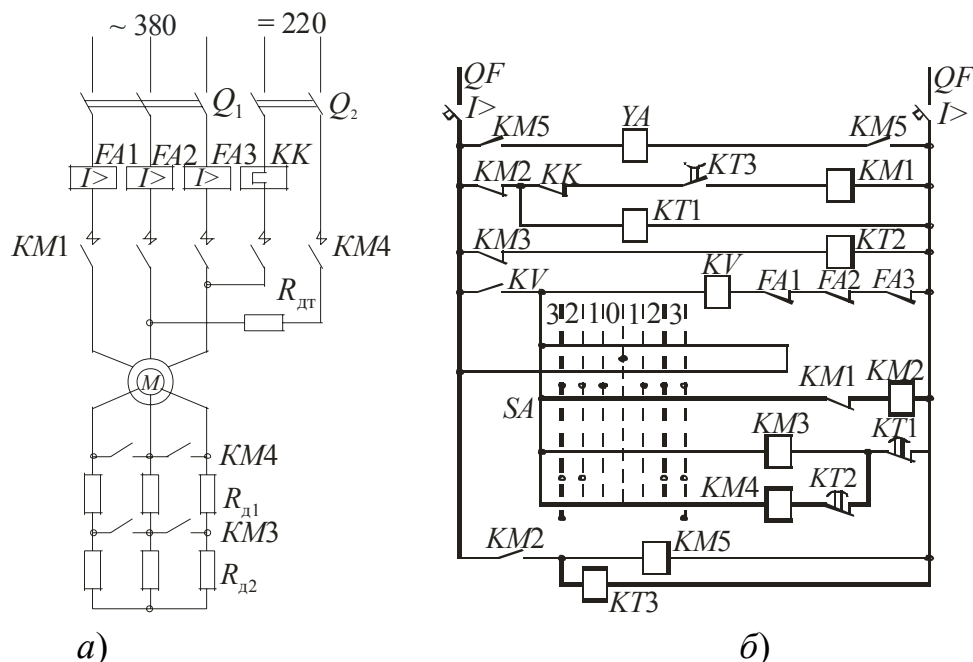


Рисунок 11.20

Пуск двигателя осуществляется по любой из двух искусственных характеристик или естественной характеристике, для чего рукоятка универсального переключателя SA должна устанавливаться соответственно в положение 1, 2 или 3. При этом включается линейный контактор $KM2$, подключающий АД к сети, контактор управления тормозом $KM5$, подключающий к сети катушку YA электромагнитного тормоза, который при этом растормаживает двигатель, и реле времени $KT3$, управляющее процессом динамического торможения. При переводе SA в положение 2 или 3 включаются контакторы ускорения $KM3$ и $KM4$ и скорость АД увеличивается.

Торможение АД происходит при переводе рукоятки SA в нулевое положение. При этом отключаются контакторы $KM2$ и $KM5$ и включится контактор динамического торможения $KM1$, который подключит двигатель к источнику постоянного тока. В результате этого будет идти интенсивный процесс комбинированного (механического и динамического) торможения АД, которое закончится после отсчета реле $KT3$ своей выдержки времени, соответствующей времени торможения.

11.7 Релейно-контакторные схемы управления синхронным двигателем

Релейно-контакторные схемы управления синхронным двигателем (СД) кроме операций по включению и отключению двигателя и ограничения пусковых токов должны обеспечивать его синхронизацию с сетью.

Типовая схема управления возбуждения СД в функции скорости.

Подключение обмотки возбуждения к источнику U_B осуществляется контактором $KM2$ (рис. 11.21), который управляется реле скорости KR . Катушка этого реле связана с частью разрядного резистора R_p через диод VD . При включении контактора $KM1$ (его цепи управления не показаны) обмотка статора СД подключается к сети переменного тока и образует вращающееся магнитное поле, которое создает вращающий момент. Под действием этого момента ротор начинает разгоняться, а в обмотке возбуждения индуцируется ЭДС. Под действием последней по катушке реле KR начнет протекать выпрямленный ток; оно сработает и разомкнет цепь питания контактора $KM2$. Тем самым разгон СД будет происходить без тока возбуждения закороченной на разрядный резистор R_p обмоткой возбуждения.

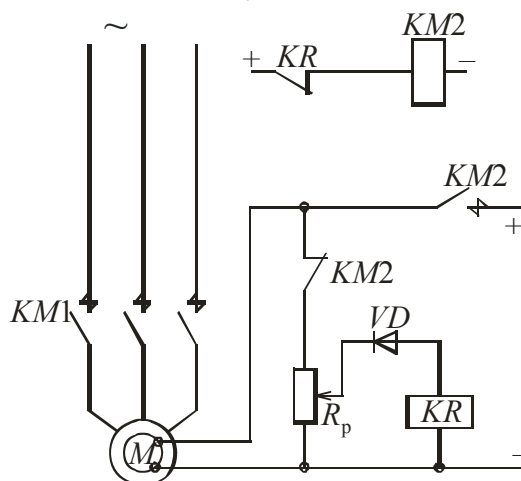


Рисунок.11.21

По мере роста скорости ротора его ЭДС, а тем самым ток в катушке реле KR , снижаются. При подсинхронной скорости ток в катушке реле станет меньше тока опускания, оно отключится и вызовет тем самым выключение контактора $KM2$. Этот контактор подключит обмотку возбуждения к источнику питания с напряжением U_B и произойдет синхронизация СД с сетью, то есть его скорость станет $\omega_0 = 2\pi f/p$

Схема панели управления СД типа ПУ 7502

Она (рис. 11.22) обеспечивает прямой пуск СД и форсировку возбуждения при снижении уровня питающего напряжения. В схеме предусмотрены также защиты: тепловая (реле KK и трансформаторы тока $TA1$ и $TA2$), токовая (автоматы $QF1$ и $QF2$), от снижения напряжения сети переменного тока (реле $KV2$, $KV3$) и постоянного тока (реле $KV1$).

Пуск СД может быть осуществлен только при нормальных уровнях питающих схему напряжений постоянного и переменного тока. В этом случае, если рукоятка командоконтроллера SA находится в среднем положении и включены автоматы $QF1$ и $QF2$, срабатывают реле напряжения $KV2$, $KV3$ и реле времени KT , что подготавливает схему к пуску СД. При переводе руко-

ятки в положение “включено” срабатывает реле *KV1* и катушка линейного контактора *KM1* подключается к источнику; к обмотке статора подводится напряжение и ротор начинает разгон. При подсинхронной скорости происходит возбуждение возбудителя *G* и соответственно СД, который втягивается в синхронизм.

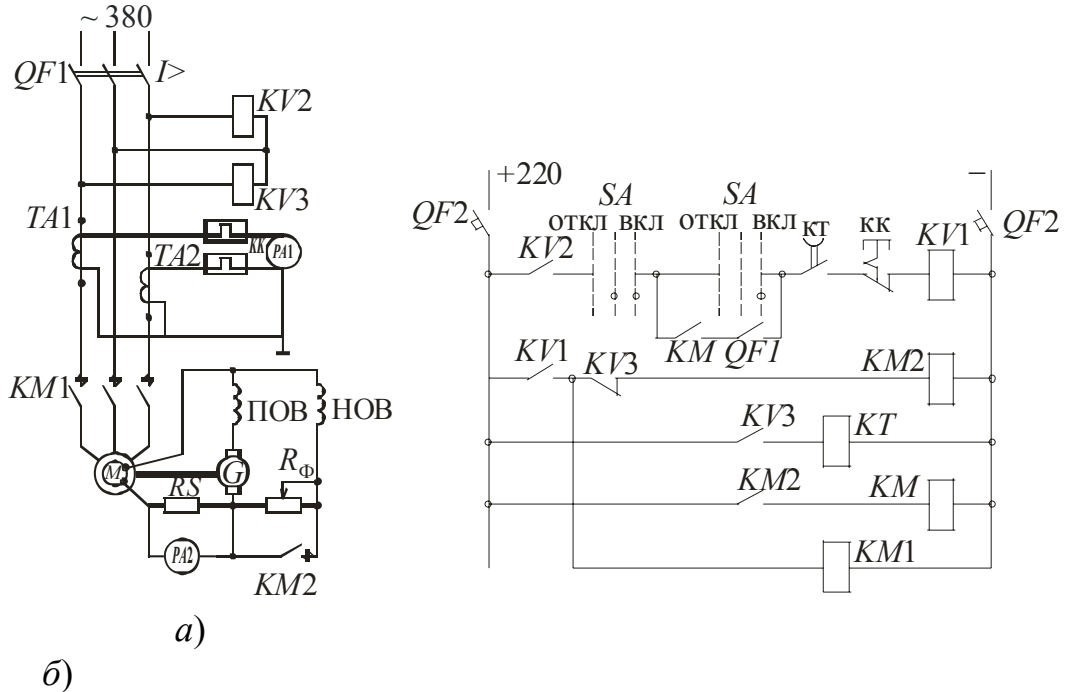


Рисунок 11.22

Для контроля тока статора СД в схеме предусмотрен амперметр *PA1*, а токовозбуждение СД – амперметр *PA2*, питаемый от шунта *RS*.

12 ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

12.1 Общие сведения о замкнутых системах

Рассмотренные в предыдущей главе схемы управления двигателями постоянного и переменного тока – это разомкнутые системы. Они не предусматривали обратного влияния выходной величины на входную, например, скорости вращения якоря на входные величины, такие, как напряжение на якоре или ток возбуждения. С помощью разомкнутых систем можно запустить двигатель реверсировать, регулировать скорость, останавливать, действуя вручную на кнопки или другие командоаппараты. Для промышленных электроустановок чаще требуются более сложные режимы, например, поддерживать скорость вращения постоянной или изменять ее по определенному, заранее заданному закону. Такую задачу могут выполнять только замкнутые системы с применением обратных связей.

Таким образом, замкнутые системы электроприводов применяются в случаях, когда требуется обеспечить движение исполнительных органов рабочих машин с высокими показателями – большим диапазоном регулирования скорости и точностью держания, заданными качеством переходных процессов и точностью остановки, а также высокой экономичностью и оптимальным функционированием технологического оборудования и самого электропривода. Основным признаком замкнутых систем является такое автоматическое управление электроприводом, при котором последний наилучшим образом выполняет свои функции при всевозможных управляющих и внешних воздействиях через рабочую машину или электропривод.

Замкнутые системы электропривода строятся по принципам компенсации возмущения и отклонения, называемому также принципом обратной связи. Подавляющее большинство замкнутых систем создаются по принципу отклонения. Он характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход электропривода со входом, откуда и пошло название замкнутых систем. Рассмотрим принцип отклонения на примере регулирования скорости (сигнал обратной связи $U_{o.c.} = K_{o.c.} \omega$) подается на вход электропривода (рис. 12.1), где он вычитается из сигнала задания скорости U_3 .

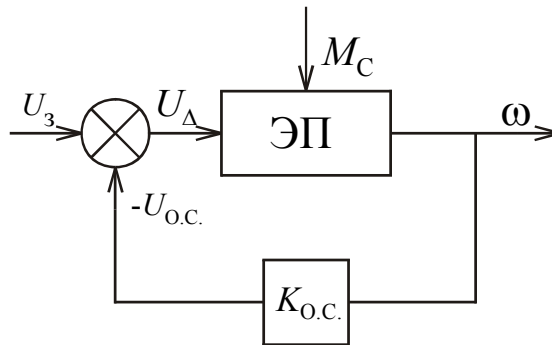


Рисунок 12.1

Управление электроприводом осуществляется сигналом отклонения $U_{\Delta} = U_{з} - U_{о.с.}$ (его называют также сигналом рассогласования или ошибки). Этот сигнал при отклонении скорости от заданного уровня автоматически изменяется необходимым образом и устраняет с помощью системы управления это отклонение.

Все виды применяемых в замкнутых электроприводах обратных связей делятся на положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие. Положительной называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (складывается) с задающим сигналом, в то время как отрицательная обратная связь направлена встречно (знак «минус»).

Жесткая обратная связь характеризуется тем, что она действует как в установившемся, так и в переходных режимах электропривода. Сигнал гибкой обратной связи вырабатывается только в переходных режимах электропривода и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и т.д.

Линейная обратная связь характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, $U_{о.с.}$, в то время как при реализации нелинейной обратной связи эта зависимость нелинейная.

В зависимости от вида регулируемой координаты используются все названные выше связи по скорости и положению, току, напряжению и магнитному потоку.

Для обеспечения требуемого качества технологических процессов часто подаются сигналы технологических датчиков, например: температуры, усилия резания, давления, расхода и т.п. В этом случае электропривод вместе с рабочей машиной, реализующей технологический процесс, образуют систему автоматического регулирования вида рис.12.2.

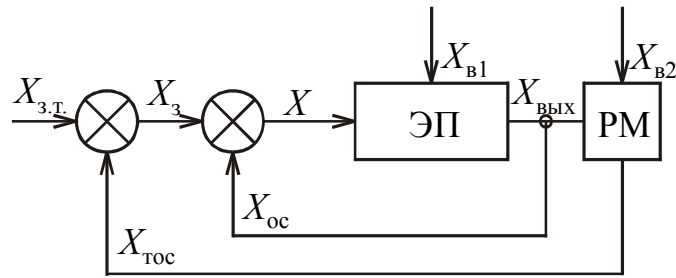


Рисунок 12.2

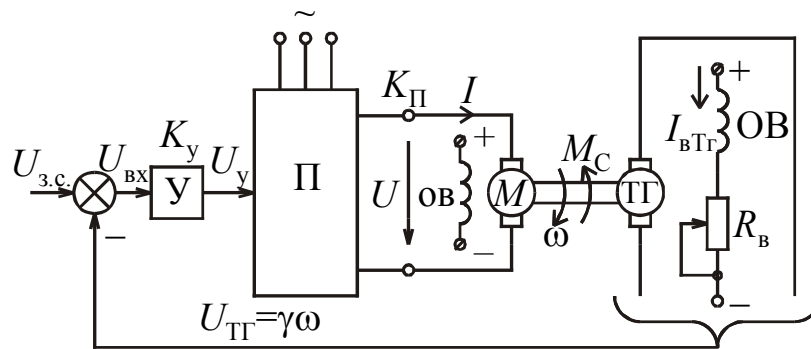
В этой системе электропривод является силовым регулирующим устройством, выходная координата которого $X_{\text{вых}}$ (например, ω) является управляющим воздействием для рабочей машины РМ и обеспечивает заданный ход технологического процесса при изменениях как его сигнала задания $X_{\text{з.т.}}$, так и возмущающего воздействия $X_{\text{в2}}$. Сигналом задания в этом случае является сигнал рассогласования между сигналами задания $X_{\text{з.т.}}$ технологического параметра и технологической обратной связи $X_{\text{т.о.с.}}$.

12.2 Замкнутые системы управления электроприводами с двигателями постоянного тока

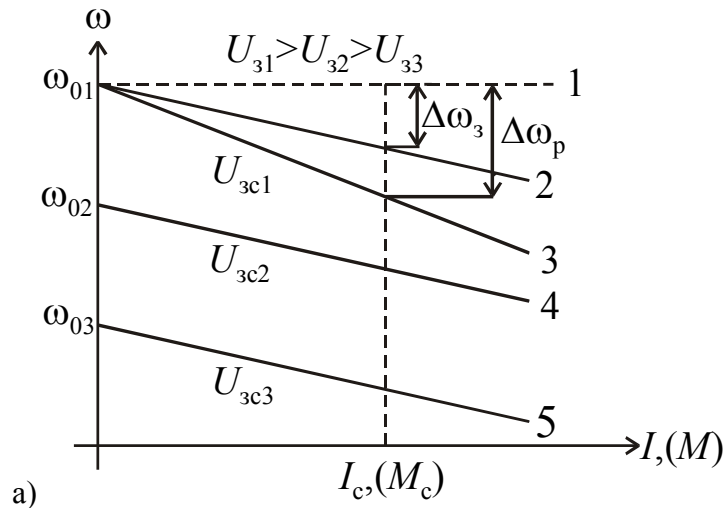
Характеристики разомкнутых электроприводов, построенных по схеме «преобразователь – двигатель» (П – Д), имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления преобразователя. Для получения значительных диапазонов высокой точности регулирования скоростей требуются более жесткие характеристики, которые можно получить только в замкнутой системе П – Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования скорости и момента, что также требует перехода к замкнутой системе. Рассмотрим принципы построения и действия замкнутых систем регулирования скорости, тока, момента и положения с использованием различных обратных связей.

12.2.2 Замкнутая система П – Д с отрицательной ОС по скорости ДПТ независимого возбуждения.

Основу структурной схемы составляет разомкнутая система. На валу ДПТ находится датчик скорости – тахогенератор ТГ (рис. 12.3) выходное напряжение которого $U_{\text{ТГ}} = \gamma\omega$, пропорционально скорости ДПТ, является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности γ носит название коэффициент обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора $I_{\text{в.ТГ}}$.



a)



a)

б)

Рисунок 12.3

Сигнал обратной связи $U_{ТГ} = U_{o.c}$ сравнивается с задающим сигналом скорости $U_{3.c}$ и их разность в виде сигнала рассогласования подается на вход дополнительного усилителя $У$, который с коэффициентом K_y усиливает сигнал рассогласования и подает его в виде сигнала управления U_y на вход преобразователя Π .

Для получения формул для характеристик ДПТ в замкнутой системе воспользуемся выражениями:

$$U_{BX} = U_{3.c} - \gamma\omega; \quad (12.1)$$

$$U_y = K_y U_{BX}; \quad (12.2)$$

$$U = K_{\Pi} U_y; \quad (12.3)$$

После несложных преобразований получаем следующие формулы для характеристик ДПТ в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{K_y \cdot K_{\Pi} \cdot U_{3.c}}{C_1(1 + K_c)} - \frac{I_a(R_a + R_{\Pi})}{C_1(1 + K_c)} = \omega_0 - \Delta\omega; \quad (12.4)$$

$$\omega = \frac{K_y \cdot K_{\Pi} \cdot U_{3.c}}{C_1(1 + K_c)} - \frac{M(R_a + R_{\Pi})}{C_1^2(1 + K_c)} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (12.5)$$

где $C_1 = C \Phi_{\text{ном}}$; $K_c = \gamma K_y K_{\Pi} / C_1$ – общий коэффициент усиления системы П – Д; R_{Π} – сопротивление преобразователя.

Для анализа жесткости получаемых характеристик сравним перепады скорости в разомкнутой $\Delta\omega_p$ и замкнутой $\Delta\omega_3$ системах при одном и том же токе или моменте. Согласно (12.4) и (12.5) имеем:

$$\Delta\omega_p = I_a (R_a + R_p) / C_1, \quad (12.6)$$

$$\Delta\omega_3 = I_a (R_a + R_{\Pi}) / C_1(1 + K_c) = \Delta\omega_p / (1 + K_c). \quad (12.7)$$

Так как $K_c > 0$, то всегда $\Delta\omega_3 < \Delta\omega_p$, то есть жесткость получаемых характеристик в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Эти характеристики, показанные на рис. 12.3,б, представляют собой параллельные линии 2, 4 и 5.

Рассмотрим физическую сторону процесса регулирования скорости. Предположим, что ДПТ работает под нагрузкой в установившемся режиме и по каким-то причинам увеличился момент нагрузки M_c . Так как развиваемый двигателем момент стал меньше момента нагрузки, его скорость начнет снижаться и соответственно будет снижаться сигнал обратной связи $U_{\text{тг}}$. Это, в свою очередь, приводит к увеличению сигналов рассогласования $U_{\text{вх}}$ и управления U_y и приводит к повышению выходного напряжения преобразователя, а следовательно, скорости ДПТ.

При уменьшении нагрузки M_c обратная связь действует в обратном направлении, приводя к снижению выходного напряжения преобразователя.

12.2.2 Замкнутая система электропривода с ДПТ с обратными связям по скорости и току

Для получения жестких характеристик электропривода, необходимых для регулирования скорости, и мягких характеристик, требуемых для ограничения тока и момента, т.е. при регулировании двух (или более) координат, применяются различные сочетания обратных связей. В схеме электропривода с нелинейными ОС по скорости и току (рис. 12.4,а) для обеспечения нелинейности цепей обратных связей использованы узел УТО (устройство токоограничения) и узел ограничения скорости УСО, характеристики которых показаны внутри соответствующих условных обозначений.

Работа УТО в соответствии с его характеристикой $U_{o.T}(I)$ происходит следующим образом. При токе якоря меньшим заданного тока отсечки, т.е. пока $I_a \leq I_{o.Tc.}$, сигнал обратной связи на выходе УТО равен нулю. Другими словами, электропривод в диапазоне тока $0 \dots I_{o.Tc.}$ является разомкнутым и имеет характеристики на рис. 12.4, б в зоне А. При $I_a > I_{o.Tc.}$ на выходе УТО появляется сигнал отрицательной обратной связи $U_{o.T} = \beta I_a$, электропривод становится замкнутым и начинает работать в зоне В. Для пояснения вида характеристик электропривода в этой зоне занимает выражение для сигнала рассогласования

$$U_{BX} = U_{3.c} - \beta I_a, \quad (12.8)$$

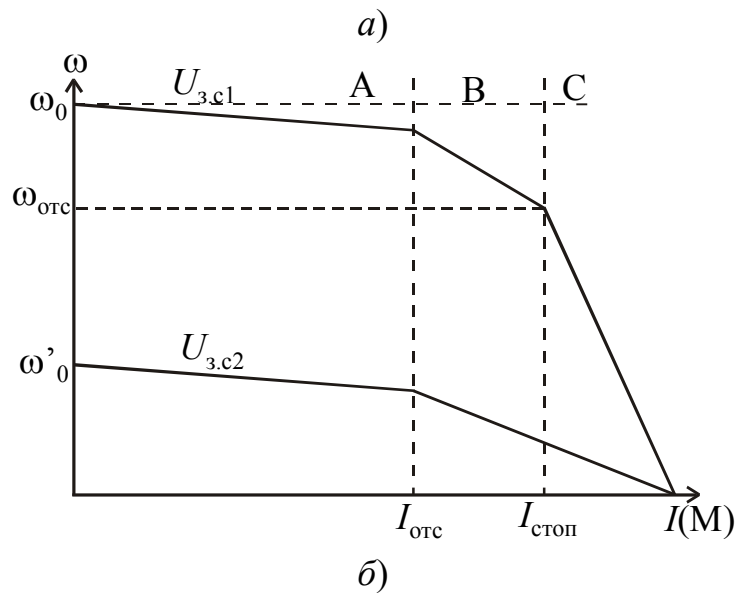
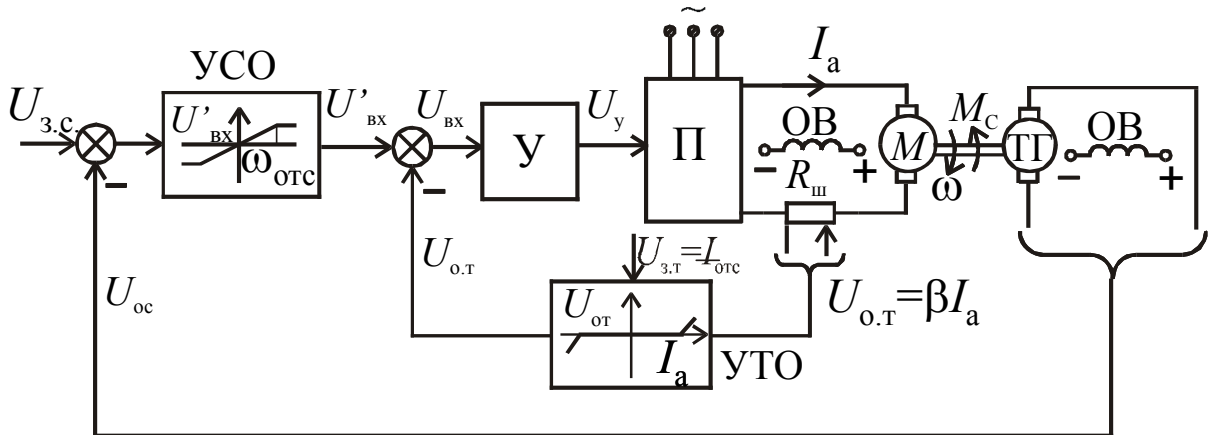


Рисунок 12.4

Из (12.4) видно, что при увеличении тока якоря I_a сигнал U_{BX} уменьшается, что приводит к уменьшению выходного напряжения преобразователя Π и соответствующему увеличению тока якоря.

Характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), что отражает эффект регулирования (ограничения) тока и соответственно момента. Уровень ограничения тока определяется задающим сигналом (уставкой) $U_{з.т}$. Ток при нулевой скорости двигателя получил название тока стопорения $I_{стоп}$.

Приведенная схема соответствует структуре с общим усилителем и нелинейными обратными связями, нелинейность которых приводит к разделению области механических характеристик на три зоны – А, В и С.

В зоне А в диапазоне тока якоря $0 \dots I_{отс}$ действует только ОС по скорости, обеспечивая жесткие характеристики электропривода. В зоне В при $I_a \geq I_{отс}$ вступает в действие УТО и характеристики становятся мягче. При дальнейшем увеличении тока и уменьшении скорости ниже скорости отсечки $\omega_{отс}$ перестает действовать УСО и за счет действия ОС по току характеристики становятся еще мягче (зона С), обеспечивая требуемое ограничение тока и момента.

12.2.3 Схема серийного электропривода ЭТЗР.

Для привода механизмов различных металлообрабатывающих станков, требующих регулирования скорости в диапазоне до $10^3 : 1$ при мощности до 11 кВт, используется схема серийного электропривода типа ЭТЗР. (рис. 12.5).

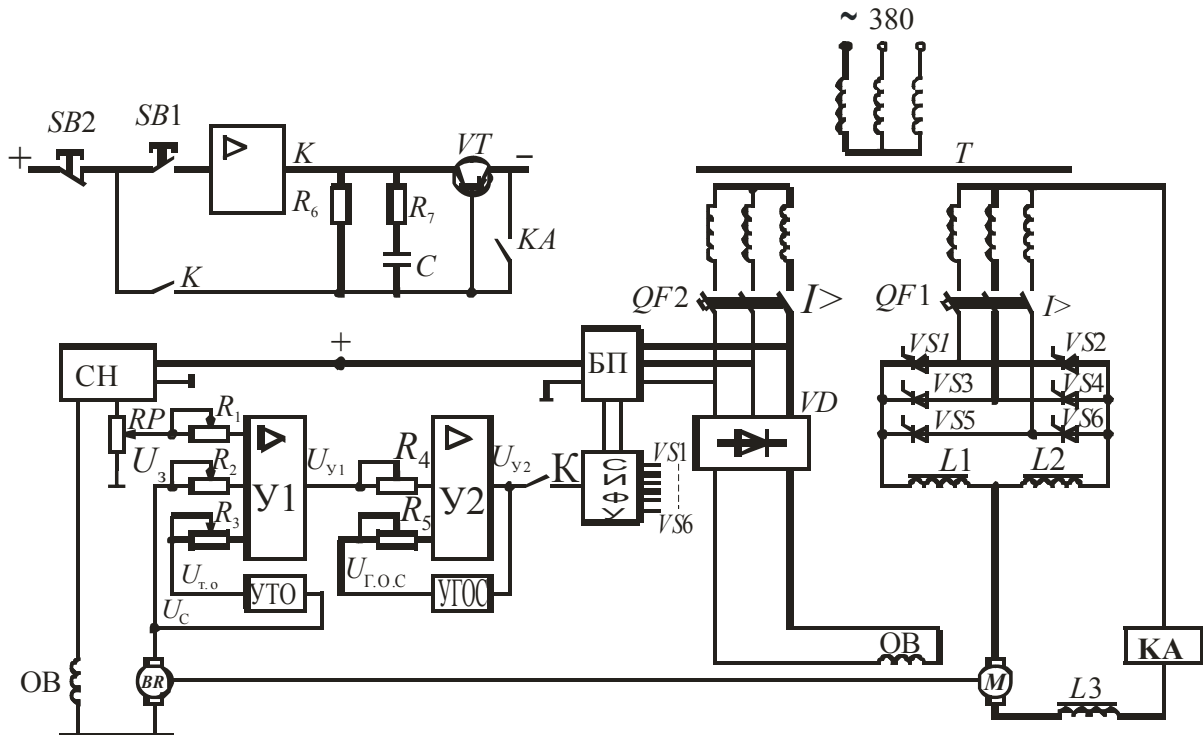


Рисунок 12.5

Электропривод этого типа выполнен в виде замкнутой системы регулирования скорости с отрицательной ОС по скорости, которая в зависимости от настройки обеспечивает относительный переход скорости в пределах (0,5...10)% при изменении момента нагрузки от $0,1M_{\text{ном}}$ до $M_{\text{ном}}$. В электроприводе обеспечивается также регулирование тока с помощью УТО. Для обеспечения устойчивости и требуемого качества переходных процессов в схеме предусмотрены гибкие ОС по скорости ДПТ и

результатирующему сигналу управления U_{y2} .

Якорь ДПТ серии ПБСТ, 2П или ПГТ, имеющего встроенный тахогенератор BR , получает питание от тиристорного преобразователя, содержащего силовую часть (тиристора $VS1-VS6$) и СИФУ.

Для уменьшения переменной составляющей уравнивающего тока используются ограничительные реакторы $L1$ и $L2$. Включение в цепь якоря сглаживающего реактора $L3$ позволяет исключить режим прерывистого тока и повысить использование ДПТ по току.

Управление тиристорами $VS1-VS6$ обеспечивается транзисторной СИФУ, работающей по вертикальному принципу. Она имеет три канала, каждый из которых работает на два транзистора, включенных в одну фазу.

Питание электропривода обеспечивается от трехфазного трансформатора T с двумя вторичными обмотками. К одной из них, имеющей нулевой вывод, подключена силовая часть привода, а ко второй – через выпрямитель VD обмотка возбуждения OB и блок питания БП, с которым соединена схема управления. Обмотка возбуждения тахогенератора OB получает питание от стабилизатора напряжения CH .

В состав схемы управления электропривода входят промежуточный усилитель $U1$, усилитель мощности $U2$, узел токоограничения УТО, узел гибкой обратной связи УГОС, задающий потенциометр RP , кнопки управления $SB1$ и $SB2$ и пусковое реле K .

Промежуточный сигнал управления U_{y1} формируется как алгебраическая сумма сигналов задающего U_3 , тахогенератора U_c и токоограничения $U_{то}$, для выработки которого используется нелинейная положительная ОС по скорости ДПТ. При токе якоря, меньшем тока отсечки, работает только контур регулирования. При токе якоря, превышающем ток отсечки, за счет нелинейности цепи токоограничения отрицательна ОС по скорости ДПТ отключается и начинает действовать положительная ОС, обеспечивая ограничение тока и момента на заданном уровне.

Сигнал управления U_{y1} вместе с сигналом корректирующей гибкой ОС $U_{г.ос}$ поступает на вход усилителя $У2$ и после усиления в виде результирующего сигнала U_{y2} подается на вход СИФУ через замыкающий контакт пускового реле $К$. Управление этим реле осуществляется с помощью кнопок управления: $SB1$ при пуске ДПТ и $SB2$ при его останове, реверсирование ДПТ обеспечивается путем изменения полярности задающего сигнала U_3 .

В электроприводе ЭТЗР обеспечивается ряд защит, блокировок и сигнализаций. Токовое реле $КА$, катушка которого включена в цепь якоря ДПТ, а контакт – в цепь питания реле $К$, обеспечивает максимально-токовую защиту ДПТ. При его срабатывании отключается реле $К$, с тиристорных сматываются сигналы управления и ДПТ отключается от источника питания.

Автоматы $QF1$ и $QF2$ обеспечивают максимально-токовую защиту силовой части тиристорного преобразователя обмотки возбуждения ДПТ и схемы управления.

12.2.4 Схема электропривода с использованием микропроцессора

Рассмотрим схему электропривода с двигателем постоянного тока (М) для регулирования положения исполнительного органа робототехнического устройства с использованием микропроцессорного управления (рис.12.6).

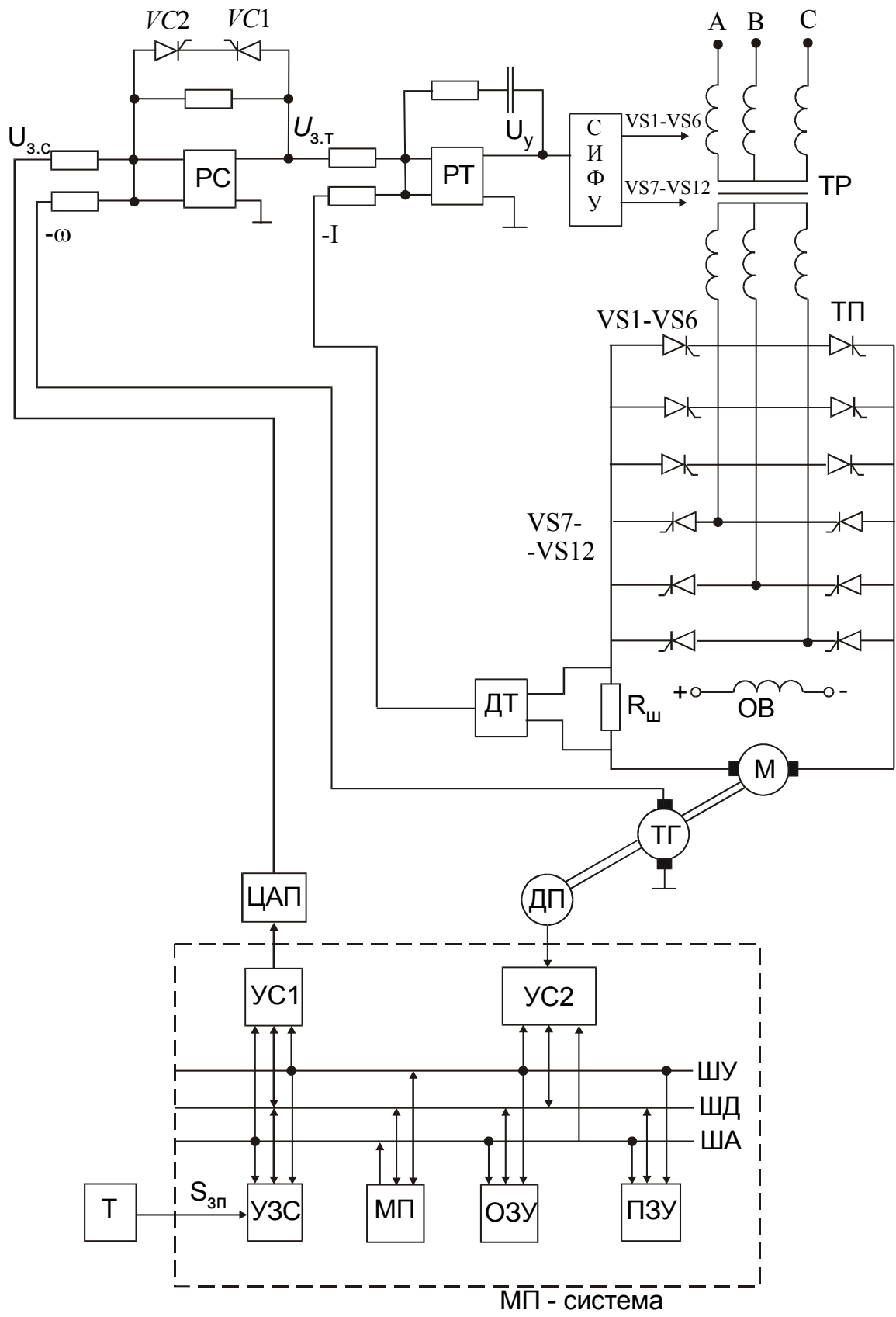
Этот электропривод должен обеспечивать перемещение и точное позиционирование исполнительного органа ротора в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 12.7, для чего в нем используется ОС по положению. Для обеспечения высокой точности позиционирования в электроприводе осуществляется также регулирование тока (момента) и скоростей ДПТ.

Схема иллюстрирует характерный пример выполнения подобных схем, когда в них применяются как аналоговые, так и цифровые узлы и устройства управления. Такие схемы, получившие название цифроаналоговых, позволяют сочетать в себе лучшие свойства обоих видов устройств управления.

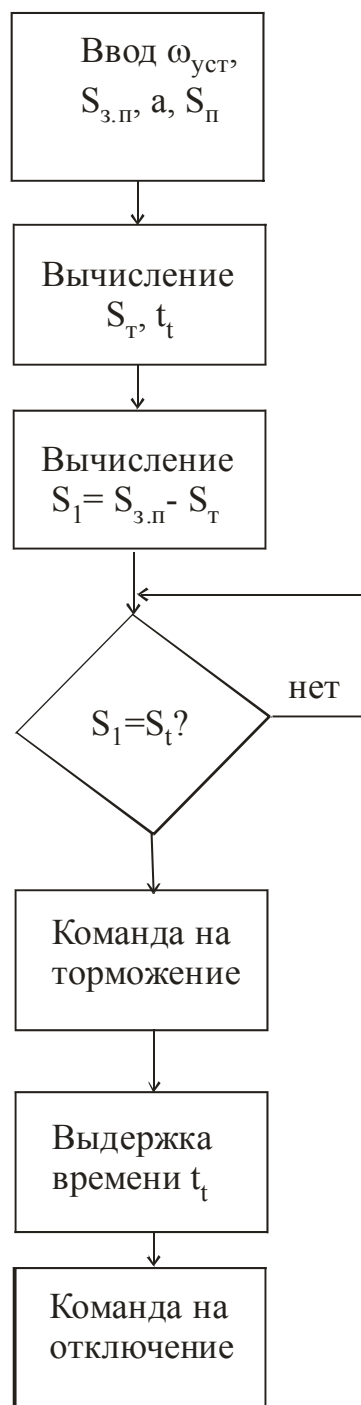
Силовая часть электропривода образована трехфазным мостовым реверсивным тиристорным преобразователем ТП, питающимся от трансформатора ТР. Схема управления построена по принципу подчиненного регулирования координат.

Регулирование тока производится аналоговым пропорционально-интегральным регулятором тока РТ, на вход которого поступают сигналы

ОС по току от датчика тока ДТ и сигнал задания тока $U_{зТ}$ с выхода регулятора скорости РС.



a)



б)

Рисунок 12.6

Аналоговый П-регулятор скорости РС формирует сигнал задания тока $U_{зт}$ на основе своего задающего сигнала $U_{зс}$, поступающего на него с внешнего контура положения, и сигнала ОС по скорости, вырабатываемого тахогенератором ТГ. Стабилитроны $VC1$ и $VC2$

ограничивают сигнал на выходе РС, чем обеспечивается ограничение тока и момента двигателя.

Регулирование положения осуществляется с помощью микропроцессорной системы, включающей в себя микропроцессор МП, устройство памяти ОЗУ и РЗУ, устройства сопряжения УС1 – УС3, цифровой датчик положения ДП, цифроаналоговый преобразователь ЦАП. Сигнал задания положения $S_{зп}$ поступает (задается) с терминала Т, подключаемого к микропроцессорной системе через УС3.

Работа цифрового регулятора положения на основе микропроцессорной системы может основываться на одном из двух принципов. Первый принцип предусматривает реализацию статической характеристики РП в виде параболы, которая обеспечивает оптимальный график движения электропривода, показанный на рис. 12.7. Такой регулятор можно реализовать программным путем, записав в ПЗУ эту нелинейную характеристику РП.

Рис.12.7 НЕТ

Второй принцип работы РП основан на вычислении момента начала торможения электропривода, что также позволяет получить показанные на рис.12.8 графики движения. Рассмотрим этот способ подробнее.

Реализация способа основана на том, что при известных скорости $\omega_{уст}$ и ускорении электропривода $a = (M - M_c)/J_2$ могут быть рассчитаны время t_T и путь S_T на участке торможения электропривода в конце отработки заданного перемещения $S_{зп}$ по следующим формулам:

$$t_T = \omega_{уст} / a; S_T = \omega_{уст}^2 / (2a). \quad (12.9)$$

Алгоритм работы микропроцессорной системы при выработке сигнала на торможение приведен на рис. 12.6,б. Для его реализации в МП-систему вводятся данные по величинам $\omega_{уст}$, a , $S_{зп}$ сигнал $S_{п}$ датчика положения, пропорциональный текущему положению вала двигателя и исполнительного органа. Микропроцессорная система производит вычисление по (12.9) t_T и S_T разности $S_1 = S_{зп} - S_T$. Затем сопоставляются величины этой разности S_1 с сигналом датчика положения

S_{II} . Как только S_I станет равным S_{II} , выдается от микропроцессорной системы команда на торможение электропривода, начинается отчет выдержки времени t_T и по истечении этого интервала вырабатывается команда на отключение электропривода.

12.3 Замкнутые схемы управления электропривода с двигателями переменного тока

Замкнутые электроприводы с двигателями переменного тока в настоящее время применяются сравнительно мало. Это исторически сложившееся положение, в соответствии с которым регулируемый электропривод строился главным образом с использованием двигателя постоянного тока. В последнее время в связи с созданием средств управления регулируемый электропривод переменного тока начал быстро развиваться.

12.3.1 Замкнутая схема управления асинхронного электропривода, выполненного по системе «тиристорный регулятор напряжения – двигатель» (ТРН – АД)

Рассмотрим схему регулирования скорости АД с использованием ОС по скорости (рис.12.8,а). Между сетью и статором АД включены 3 пары встречно – параллельно соединенных транзисторов $VS1 - VS6$, образующих силовую часть ТРН. Управляющие электроды транзисторов подсоединены к выходам СИФУ, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от сигнала управления U_y . К валу АД подсоединен токогенератор ТГ. Его ЭДС $E_{ТГ}$ сравнивается с задающим напряжением $U_{з.с}$, снимаемым с задающего потенциометра скорости ЗП, причем эти напряжения включены навстречу друг другу. Разность напряжений $U_{з.с}$ и $E_{ТГ}$, равная напряжению управления

$$U_y = U_{з.с} - E_{ТГ} = U_{з.с}. \quad (12.10)$$

подступает на вход СИФУ. При увеличении этого сигнала угол управления тиристорами α уменьшается, подаваемое на АД напряжение увеличивается и наоборот.

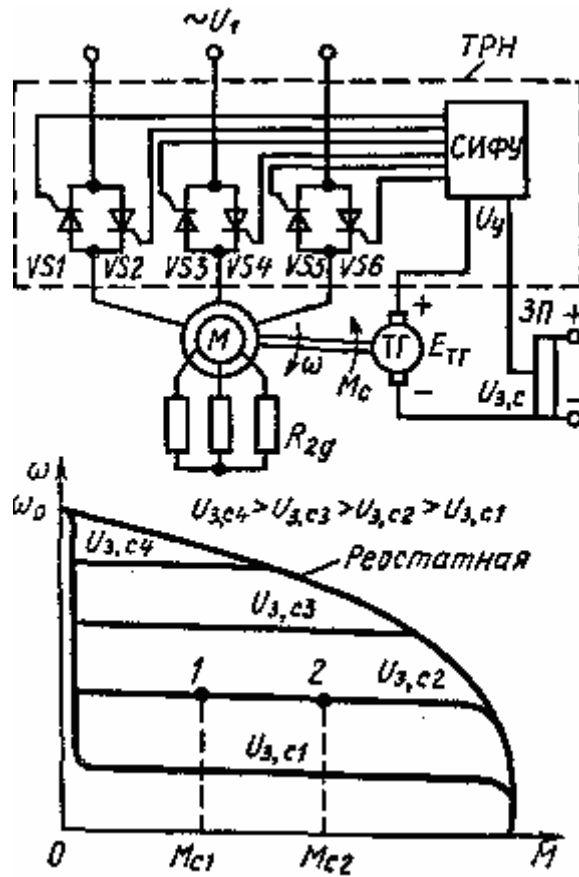


Рисунок 12.8 а, б

Рассмотрим работу электропривода при изменении момента нагрузки M_c на валу двигателя и постоянном задании скорости сигналом $U_{3,c2}$. Допустим также, что в исходном положении АД работал в точке при моменте M_{c1} (рис.12.8,б), а затем произошло его увеличение до значения M_{c2} .

При увеличении нагрузки скорость начинает уменьшаться, соответственно начнет уменьшаться и ЭДС токогенератора $E_{ТГ}$. Уменьшение $E_{ТГ}$ вызывает согласно (12.10) увеличение напряжения управления U_y , что приведет к уменьшению угла открывания тиристорov и увеличению подаваемого на АД напряжения. Момент, развиваемый двигателем, увеличивается и в точке 2 сравняется с M_{c2} . Таким образом, увеличение момента нагрузки привело к небольшому снижению скорости АД, т.е. другими словами, его характеристики стали весьма жесткими.

При уменьшении момента нагрузки M_c будет автоматически происходить снижение напряжения на АД и тем самым поддержание его скорости вращения на заданном уровне.

Изменяя с помощью потенциометра ЗП значение задающего напряжения $U_{з.с}$, можно получить ряд механических характеристик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью АД.

12.3.2 Замкнутая система электропривода с частотным управлением АД

Примером замкнутого электропривода переменного тока может служить серия ЭКТ (или ЭКТ2). Эти электроприводы обеспечивают регулирование скорости, силы тока и момента трехфазного АД с короткозамкнутым ротором за счет изменения частоты и величины подводимого к нему напряжения. Упрощенная функциональная схема этого электропривода в однолинейном исполнении приведена на рис. 12.9,а, механические же характеристики – на рис. 12.9,б.

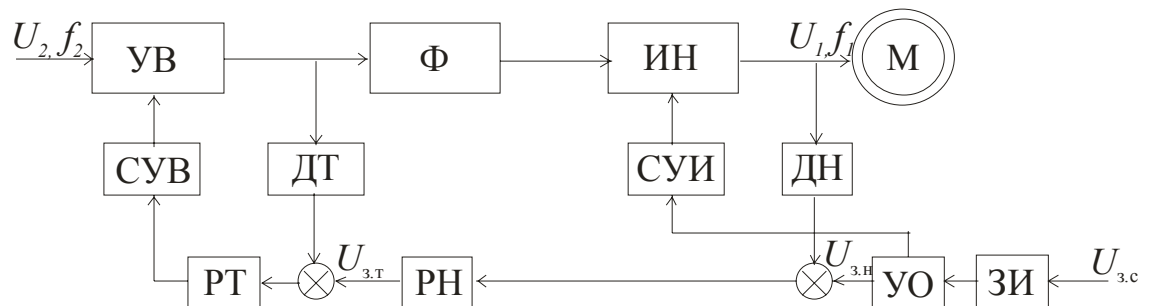


Рисунок 12.9

В качестве силового преобразователя в электроприводе используется тиристорный преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из управляемого выпрямителя УВ и инвертора напряжения ИН со своими схемами управления СУВ и СУИ соответственно. Между УВ и ИН включен силовой фильтр Ф, обеспечивающий фильтрацию выходного напряжения УВ и циркуляцию реактивной мощности в силовой части схемы.

Схема управления электропривода построена по принципу подчиненного регулирования и имеет два контура – внутренний (тока) и внешний (напряжения). Регулирование этих параметров обеспечивается пропорционально-интегральными регуляторами тока РТ и напряжения РН по сигналам датчиков ДТ и напряжения ДН. При частотах ниже номинальной схема управления поддерживает отношение $U/f = \text{const}$, а при частотах выше номинальной напряжение остается неизменным ($U = U_{\text{ном}}$), что обеспечивается усилителем-ограничителем УО.

Преобразователь частоты обеспечивает рабочие диапазоны изменения частоты (5...80 Гц) при $f_{\text{ном}} = 50$ Гц и (15...240 Гц) при $f_{\text{ном}} = 200$ Гц. Диапазон регулирования напряжения составляет (0...380 В).

Примерный вид механических характеристик электропривода при различных сигналах задания скорости $U_{3,с}$ приведен на рис. 12.9,б.

Кроме всего этого схема ЭКТ содержит усилитель постоянного тока сигнала задатчика интенсивности ЗИ, усиливающего $U_{3,с}$; защиту от коротких замыканий; от снижения питающего напряжения ниже $0,85 U_{\text{ном}}$; тепловую; от обрыва фазы; от прекращения принудительного охлаждения тиристоров.

12.3.3 Следящий электропривод переменного тока пропорционального действия

В следящем электроприводе широкое применение находят АД, которые отличаются надежностью в работе и долговечностью. При создании маломощных (до 1 кВт) следящих электроприводов обычно используют двухфазные короткозамкнутые АД (рис.12.10).

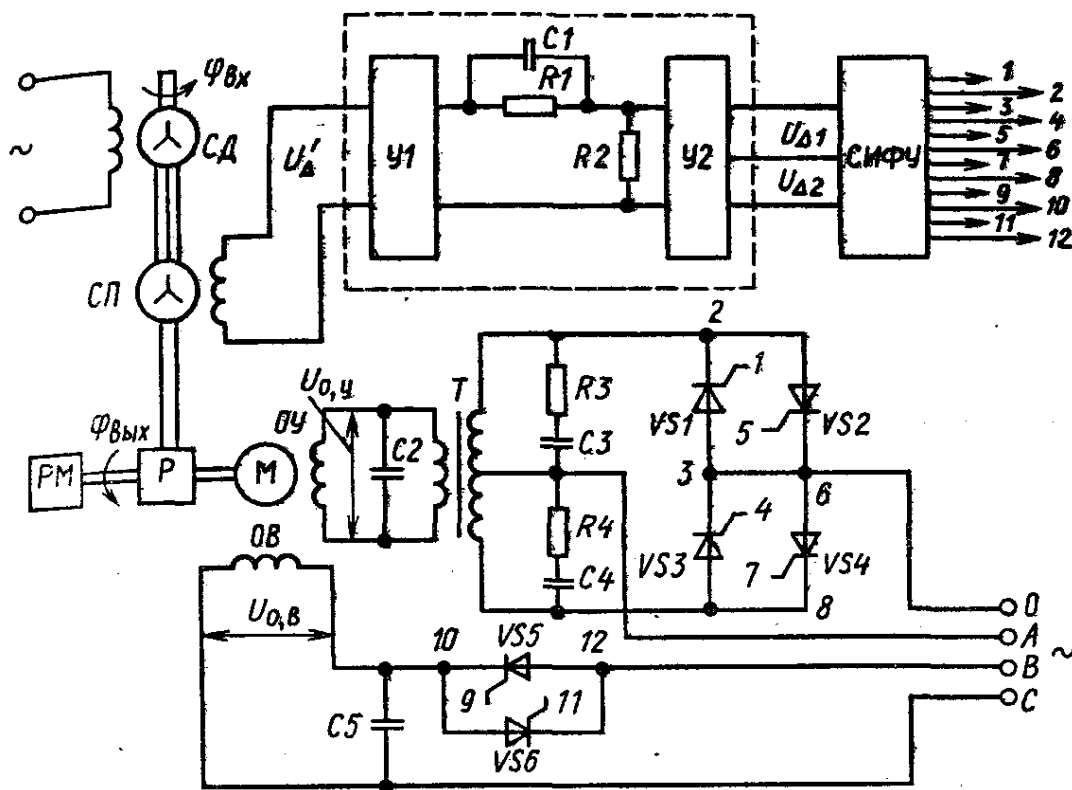


Рис.12.10

Двигатель M имеет обмотки возбуждения OB и управления OY , которые питаются сдвинутыми по фазе на 90° напряжениями. Регулирование скорости АД осуществляется изменением напряжения на

ОУ, которая получает питание от фазы А через тиристоры $VS1 - VS4$. Обмотка возбуждения связана с фазами В и С через тиристоры $VS5 - VS6$. Тиристоры $VS1 - VS6$ образуют тиристорный регулятор переменного тока. Они попарно включены по встречно – параллельной схеме, что обеспечивает протекание тока по обмоткам в оба полупериода переменного напряжения.

Рассогласование между задающей осью и валом электропривода измеряется с помощью сельсинной пары, состоящей из сельсин – датчика СД и сельсин-приемника СП. Положение ротора СД задает входной сигнал $\varphi_{ВХ}$, а положение ротора СП определяет угол поворота вала электропривода $\varphi_{ВЫХ}$. Сигнал рассогласования U'_{Δ} , снимаемый с обмотки статора СП, пропорциональный разности углов $\varphi_{ВХ}$ и $\varphi_{ВЫХ}$, а фаза этого напряжения определяется знаком этой разности.

Сигнал рассогласования U'_{Δ} , вырабатываемый сельсинами СД и СП, подается на вход фазочувствительного усилителя У1. После прохождения сигнала через корректирующее звено, состоящее из резисторов R_1, R_2 и конденсатора $C1$, сигнал рассогласования усиливается усилителем У2 и в виде напряжений $U_{\Delta 1}$ и $U_{\Delta 2}$ поступает на блок управления тиристорами.

При появлении сигнала U'_{Δ} в зависимости от его фазы на выходе усилителя У2 появляется напряжение $U_{\Delta 1}$ или $U_{\Delta 2}$. При возникновении, например, напряжения $U_{\Delta 1}$ СИФУ подает импульсы управления на тиристоры $VS1, VS2, VS5$ и $VS6$. Тиристоры открываются, и на ОУ и ОВ подаются напряжения $U_{ОУ}$ и $U_{ОВ}$, которые пропорциональны сигналу U'_{Δ} . Двигатель начинает вращаться, уменьшая угол рассогласования $\Delta\varphi = \varphi_{ВХ} - \varphi_{ВЫХ}$ между осями сельсинов СД и СП.

При другой фазе сигнала U'_{Δ} , что имеет место при изменении знака $\Delta\varphi$, на выходе усилителя У2 появляется напряжение $U_{\Delta 2}$. Этот сигнал вызывает включение тиристоров $VS3, VS4$, и на обмотку управления ОУ будет подано напряжение $U_{ОУ}$, сдвинутое по фазе на 180 по сравнению с предыдущим сигналом. Поскольку одновременно с этим откроются тиристоры $VS5$ и $VS6$ и ОВ также получит питание, двигатель М начнет вращаться, но уже в другом направлении. Таким образом, за счет изменения фазы напряжения $U_{ОУ}$ осуществляется реверс двигателя, что обеспечивает отработку угла рассогласования любого знака.

Конденсаторы $C2-C5$ и резисторы R_3, R_4 служат для сглаживания пульсаций напряжения на обмотках двигателя.

12.3.4 Электропривод с числовым программным управлением

Электропривод с программным управлением обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины по определенной, наперед заданной программе. Чаще всего электропривод с таким управлением применяется при обработке деталей на металлообрабатывающих станках. Такой электропривод представляет собой универсальную систему программного управления (СПУ). Применительно к обработке различных изделий на станках, где она находит основное применение, эта система обеспечивает существенное повышение производительности труда и качества обработки деталей.

При использовании электропривода с ЧПУ все технологические данные по обработке изделий – скорости и перемещения изделий или инструмента, их направление, последовательность операций при обработке и т.д. – задаются в виде чисел. Совокупность всех чисел образует программу обработки данного изделия, которая предварительно соответствующим образом рассчитывается, кодируется, записывается на тот или иной носитель (перфоленду, перфокарту или магнитную ленту).

Перед обработкой изделия программа вводится в программное устройство, которое в дальнейшем обеспечивает обработку изделия без непосредственного участия рабочего-станочника. Для обработки изделия другого вида нужно только сменить программу, что значительно сокращает время обработки за счет исключения вспомогательных операций (подвод и отвод инструмента, измерение детали, установка величин подачи и скорости резания).

Таким образом, СПУ и ЧПУ представляет собой разновидность цифрового электропривода с программным управлением.

Системы ЧПУ делятся на аналоговые (непрерывные) и дискретные (импульсные).

Системы ЧПУ работают в одном из двух режимов: позиционирования или контурной обработки. Позиционные (координатные) системы ЧПУ обеспечивают точную установку инструмента относительно изделия или их прямолинейное перемещение. Такие режимы бывают при фрезеровании, сверлении или расточке нескольких отверстий. Инструмент или изделие при этом перемещаются по кратчайшим, прямолинейным путям между точками установки (позициями) инструмента. Контурные (функциональные) системы ЧПУ обеспечивают перемещение инструмента или изделия по произвольным траекториям, что требуется при контурной обработке изделий различной конфигурации.

При отличии действительного положения от заданного в систему управления электропривода поступают дополнительные управляющие сигналы, корректирующие положение инструмента или изделия. Тем самым обеспечивается высокая точность обработки изделия.

Подготовленный программоноситель ПН, содержащий программу обработки изделия в закодированном виде, помещается в устройство ввода электропривода. В устройстве ввода и обработки программы УВОП (рис.12.11) с помощью фотосчитывателя ФС и усилителя – формирователя УФ осуществляется покадровое считывание и преобразование закодированной информации в электрические сигналы. Пока информация одного считываемого кадра записывается в буферную (промежуточную) память, в рабочей памяти и последующих блоках системы ЧПУ осуществляется обработка информации предыдущих кадров. По мере освобождения рабочей памяти в нее вводится информация из буферной памяти, что обеспечивает непрерывность процесса управления станком. Буферная и рабочая памяти входят в устройство памяти УП.

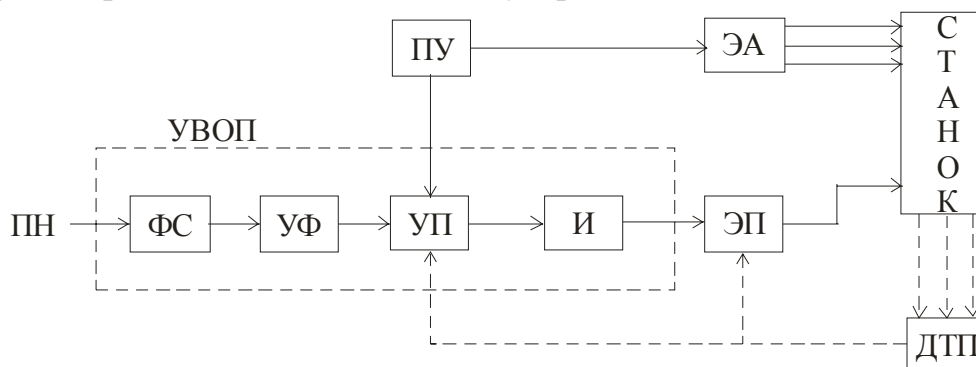


рис.12.11.

Из рабочей памяти электрические сигналы поступают на вход интерполятора (дешифратора) и, который преобразует закодированные сигналы в электрические импульсы и подает их на вход электропривода. Электропривод, осуществляя обработку этой последовательности импульсов, обеспечивает перемещение исполнительного органа станка, при этом количество импульсов определяет величину перемещения, а частота их следования – скорость перемещения. Устройство памяти УП связано с пультом управления ПУ.

Система ЧПУ иногда дополняется датчиками параметров технологического процесса (блок ДТП) и координат электропривода.

В последнее время информация записывается не на перфоленте или перфокарте, а на магнитной ленте в виде так называемого унитарного кода, т.е. непрерывной последовательности импульсов управления,

обеспечивающих перемещение исполнительных органов станка в соответствии с количеством поступающих импульсов.

Для примера рассмотрим структурную схему системы ЧПУ с шаговым двигателем (рис.12.12), с помощью которого перемещается стол фрезерного станка по одной координате.

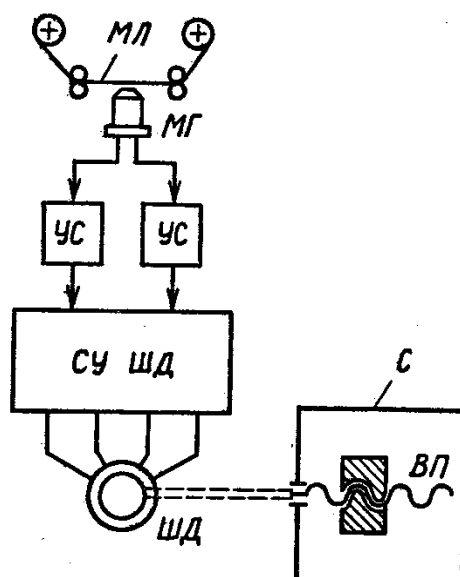


Рисунок 12.12

Программа перемещения стола С, записанная на магнитную ленту МЛ в виде последовательности импульсов, считывается с помощью магнитной головки МГ. В зависимости от требуемого направления движения импульсы управления направляются по одному из каналов и после усиления в блоках УС поступает на вход схемы управления шаговым двигателем СУ ШД. Двигатель обрабатывает командные импульсы и через механическую винтовую передачу ВП перемещает стол С. Общее число импульсов определяет величину, а их частота – скорость перемещения стола. Для перемещения стола по другой координате используется другой аналогичный электропривод.

По своим техническим возможностям и особенностям структуры системы ЧПУ делятся на 4 группы, имеющие в соответствии с Международной классификацией обозначения *HNC*, *SNC*, *CNC*, *DNC*.

Система *HNC* (Hand numerical control) обеспечивает оперативное управление с ручным заданием программы с пульта управления. Система *SNC* (stored numerical control) содержит устройство памяти для хранения программ и обеспечивает обработку партии одинаковых заготовок с однократным считыванием программы перед обработкой. Система *CNC* (Computer numerical control) базируется на применении микро – ЭВМ, позволяющей программировать свою работу и вырабатывать требуемый

алгоритм управления. Система *DNC* (Direct numerical control) позволяет осуществлять прямое цифровое управление группой станков с ЧПУ систем *SNC* и *CNC*. Система *DNC* предусматривает также использование в своей структуре ЭВМ.

В настоящее время наибольшее развитие получили системы ЧПУ с применением микропроцессоров и микро – ЭВМ (рис.12.13).

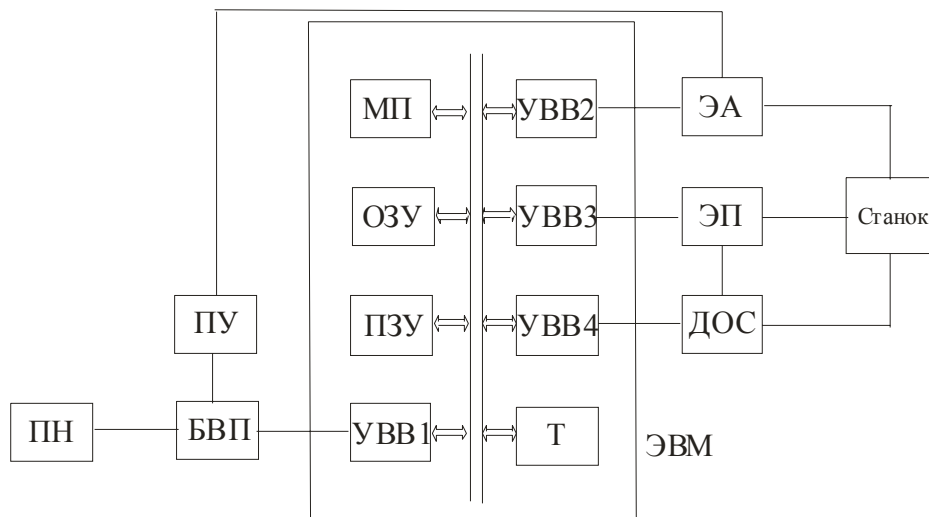


Рисунок 12.13

Управляющая программа вводится в ЭВМ с программоносителя ПН (или пульта управления ПУ) через блок ввода программы БВП и устройства ввода – вывода УВВ1. Далее она поступает в устройство памяти микро – ЭВМ. В постоянном запоминающем устройстве ПЗУ хранятся постоянные части программы, данные для декодирования, интерполирования и необходимых вычислений.

В оперативное запоминающее устройство ОЗУ поступает, кроме данных управляющей программы, текущая информация от датчиков обратной связи ДОС о ходе технологического процесса, состоянии защит и блокировок, на основании чего вырабатывается управляющее воздействие на электропривод и устройства электроавтоматики станка ЭА.

Связь микро-ЭВМ с электрооборудованием станка осуществляется через устройство ввода – вывода УВВ2 – УВВ4. Кроме указанных блоков ЭВМ включает в себя микропроцессор МП и таймер Т.

Микро-ЭВМ в системах ЧПУ позволяют осуществлять управление несколькими электроприводами, обеспечивающими движение инструмента по различным координатам.

Современные отечественные станки ЧПУ базируются на мини-ЭВМ типа “Электроника-60”. К ним, в частности, относятся контурно-позиционные системы типов 2С65 с тремя координатами (токарные,

карусельные, зубофрезерные станки и робототехнические комплексы) и 2P22 (токарные и шлифовальные станки), контурные системы типов 2С42 (вертикально-фрезерные-расточные и шлифовальные станки), и 2P32 (токарные и фрезерные станки). На базе специализированной ЭВМ типа “Электроника НЦ” созданы контурно-позиционные системы ЧПУ для токарных станков и кузнечно-прессового оборудования типов НЦ-31 (две управляющие координаты) и НЦ-80-31 (восемь управляемых координат).

13 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ УСТАНОВОК

13.1 Общие сведения об электрическом нагреве и электрических печах

В настоящее время большие работы ведутся по разработке новых видов и совершенствованию существующих электротермических и электролизных установок, которые способны обеспечивать значительную экономию сырьевых, энергетических и трудовых ресурсов.

Электронагрев металлов по сравнению с пламенным нагревом обеспечивает экономию первичных энергетических ресурсов, т.е. является энергосберегающей технологией. Одновременно электротермические процессы являются ресурсосберегающими. Они позволяют значительно снизить потери материалов при их тепловой обработке (на угар, окалину и т.д.).

Электрический нагрев применяют в различных отраслях промышленности. Этот способ по сравнению с другими способами нагрева имеет ряд преимуществ: получение высоких температур нагрева; простота регулирования температуры нагрева в больших диапазонах; нагрев в среде нейтральных газов или в вакууме и др. Электрический нагрев используют при термической обработке металлов, для получения высококачественных металлов и сплавов, полупроводниковых материалов, закалки, сушки и др. Для электрического нагрева применяют электропечи и электронагревательные установки, называемые электротермическими установками. Они работают на переменном токе, величина которого в некоторых установках достигает нескольких тысяч ампер при сравнительно низких напряжениях. Поэтому питание электротермических установок, как правило, осуществляется через понижающие трансформаторы. В зависимости от способа превращения электроэнергии в тепловую электронагревательные установки делят на печи сопротивления и дуговые; печи и установки индукционного и диэлектрического нагрева.

Электропечи сопротивления бывают прямого нагрева и косвенного действия. В печах прямого нагрева ток пропускают через нагреваемое тело, которое может быть твердым и жидким. В электропечах сопротивления косвенного действия, превращение электрической энергии в тепловую происходит в нагревательных элементах, от которых тепло передается через окружающую среду нагреваемому телу.

В дуговых печах электрическая энергия превращается в тепловую при возникновении электрической дуги. Различают дуговые печи прямого и косвенного действия. В печах прямого действия дуга образуется между

электродом и нагреваемым телом; такими печами являются трехфазные сталеплавильные печи и вакуумные дуговые печи. В дуговых печах косвенного действия дуга образуется между двумя электродами и тепло передается нагреваемому телу. Для выплавки ферросплавов, карбида кальция и чугуна применяют рудотермические печи, которые представляют собой комбинацию дуговых печей прямого действия и печей сопротивления прямого действия.

Индукционные печи и установки работают по принципу выделения тепла в нагреваемом теле током, индуктированным быстропеременным магнитным полем. Индукционные печи могут быть со стальным сердечником и без него. Печи с сердечником питаются током промышленной частоты (50 Гц.), печи без сердечника – током повышенной частоты. Печи с сердечником представляют собой своеобразный трансформатор, в котором первичная обмотка – индуктор – включена в сеть переменного тока, а вторичную обмотку заменяет нагреваемое тело.

В электропечах и установках диэлектрического нагрева выделение тепла в нагреваемом теле происходит за счет диэлектрических потерь в диэлектрике или полупроводнике, помещенном в переменное электрическое поле. Такое тело, помещенное в переменное электрическое поле, представляет собой конденсатор, к пластинам (обкладкам) которого подводится ток высокой частоты $10^6 - 10^9$ Гц, напряжением 6 – 10 кВ. Мощность, КПД и удельный расход электроэнергии электропечи любого типа определяют тепловым расчетом, который основывается на законах теплопередачи.

13.2 Приемники и потребители электроэнергии

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПЭУ) электроприемником называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Потребителем электрической энергии является электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Отдельные технологические установки – потребители электрической энергии – могут иметь несколько приемников энергии. Это относится и к электрическим, электролизным и гальваническим установкам. Например, дуговая сталеплавильная печь как потребитель электроэнергии имеет несколько электроприемников: сам плавильный агрегат, приводы

механизмов печи (наклона, поворота ванны, подъема и отворота свода и др.), преобразователь устройства электромагнитного перемешивания, источник оперативного тока для питания цепей управления, защиты и блокировок и пр.

Основными параметрами приемников электроэнергии являются номинальная (установленная мощность, напряжение, род тока и его частота), режим работы, удельный расход электроэнергии, электровооруженность труда, стабильность расположения оборудования.

Для ряда потребителей определение номинальной мощности имеет свои особенности. Так, для плавильных электропечей сварочных агрегатов под ней понимается номинальная мощность питающего трансформатора, кВА или кВт, а для приемников с повторно-кратковременным режимом работы – мощность, приведенная к продолжительному режиму.

Основным применяемым током в электроустановках промышленных предприятий является переменный ток, трехфазный или однофазный. Токоприемники постоянного тока получают энергию от преобразователя и ее применение должно быть всегда технически и экономически обосновано. Главными потребителями постоянного тока являются электроприводы с двигателями стандартного напряжения, питающиеся непосредственно от общей распределительной сети постоянного тока, электролизные установки, плазменно-дуговые, вакуумно-дуговые печи, питающиеся от специальных преобразователей с нестандартным напряжением, внутриводской электрифицированный транспорт. Доля электроэнергии на постоянном токе, потребляемой промышленностью достигает значительной величины, а в отдельных случаях, например, в цветной металлургии в электролизных установках, она может достигать 85–90%.

Номинальным напряжением электроприемника $U_{\text{ном}}$ называют напряжение, обеспечивающее его нормальную работу. Различают установки с номинальным напряжением до и свыше 1000В. В установках до 1000В применяют трехфазные междуфазные (линейные) напряжения 36, 42, 220, 380, 660В, однофазные переменные 12, 24, 36, 40, 127, 220, 380В, постоянные 12, 24, 36, 48, 60, 110, 220, 440В. Общепромышленные системы переменного трехфазного тока до 1 кВ выполняются четырехпроводными с глухо-заземленной нейтралью и трехпроводными с изолированной нейтралью.

Глухо-заземленной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

Изолированной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству, или присоединенная к ним через приборы сигнализации, измерения, защиты, имеющие большое сопротивление.

Электроустановки выше 1 кВ делятся на установки в сетях с эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю) и электроустановки в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю).

В России, европейских странах и странах Азии и Африки стандартной частотой является частота 50 Гц, а в США и странах Западного полушария принята частота 60 Гц. Однако приемники электроэнергии используют не только переменный ток стандартной частоты. Широкое распространение получил переменный ток других частот (пониженных, средних и высоких).

Переменный ток пониженной частоты применяется для питания установок:

Электромагнитного перемешивания стали в дуговых печах (0,5 – 1,5 Гц.)

Контактной электросварки (2 – 5 Гц).

Мощных электрических печей, например электрошлаковых (2 – 10 Гц.)

Регулируемых асинхронных электроприводов мощных механизмов (10 – 40 Гц).

Индукционных установок для подогрева крупных изделий из цветных металлов (5 – 20 Гц).

Такие установки обычно имеют индивидуальные полупроводниковые преобразователи.

В индукционных установках различного типа применяются средние (500, 800, 1000, 2400, 8000 Гц) и высокие частоты (от десятков килогерц до единиц мегагерц).

С точки зрения бесперебойности электроснабжения по ПЭУ различают три категории электроприемников.

Первая категория – нарушение электроснабжения может повлечь за собой опасность для жизни людей или значительный ущерб народному хозяйству, связанный с повреждением оборудования, массовым браком продукции или длительным расстройством сложного технологического процесса.

Вторая категория – перерыв в электроснабжении этих приемников связан с массовым недоотпуском продукции, простоем рабочих, механизмов и промышленного транспорта.

Третья категория – все приемники, не принадлежащие первым двум категориям (подсобные цепи, вспомогательные производства, малые населенные пункты и пр.).

На современных предприятиях обычно потребители первой категории составляют примерно 20, второй 70 и третьей 5%. Электроприемники первой категории снабжены устройствами автоматического ввода резервного питания (АВР) на случай отказа основного источника. Перерыв в питании допускается на время срабатывания устройства АВР.

Электроприемники второй категории обеспечиваются питанием также по двум независимым линиям, но перевод на резервное питание осуществляется действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригадой в течение определенного промежутка времени, но не превышающего обычно 30 минут.

Электроприемники третьей категории могут иметь один источник питания, но при условии, что перерыв в электроснабжении не превысит одних суток.

Важной характеристикой электроприемника, играющей большую роль в определении расчетных нагрузок в потреблении энергии является удельный расход электроэнергии $\omega_{уд}$. Он равен:

$$\omega_{уд} = W/M ,$$

где W – количество затраченной электроэнергии, M – продукция, выпущенная за тот же промежуток времени.

Характерным показателем электропотребления является электровооруженность труда. Если известно число часов, отработанных одним рабочим в год, $T_{раб}$, то электровооруженность в киловаттах на одного рабочего будет равна:

$$P_{эв.т} = W_{эв.т} / T_{раб} ,$$

где $W_{эв.т}$ – количество кВт/ч, приходящихся в год на одного рабочего.

13.3 Особенности электротермических, электролизных и гальванических установок как потребителей электроэнергии

13.3.1 Рудотермические печи

Одним из наиболее энергоемких приемников являются рудотермические печи (РТП). До 8% всей выработанной в стране электроэнергии идет на нужды рудной электротермии. РТП используются для производства ферросплавов, сплавов цветных металлов, карбида кальция, желтого фосфора и в других технологических процессах.

РТП питаются обычно трехфазным электрическим током промышленной частоты. Используются трех – и шестиэлектродные печи с большим разнообразием геометрических параметров и конфигураций ванн (круглых, овальных, прямоугольных и т.д.). Электроснабжение РТП производят на напряжении 6 – 220 кВ по системе глубокого ввода через понизительные трансформаторы; токи на низкой стороне достигают 100 кА.

Большинство РТП имеют непрерывный режим работы, длящийся несколько месяцев. Поэтому их коэффициент включения близок к единице. При работе в стационарном режиме ток и напряжение печи имеют практически синусоидальную форму. Расход электроэнергии значителен и в зависимости от вида получаемого продукта достигает $(3 - 10) \cdot 10^3$ кВт/ч на 1 т.

Естественный коэффициент мощности РТП зависит от вида технологического процесса и составляет 0,72 – 0,97. Ферросплавные печи имеют $\cos\varphi$ в пределах 0,77 – 0,9, который снижается с ростом единичной мощности агрегата. У карбидных печей составляет 0,73 – 0,93. Самое низкое значение $\cos\varphi$ имеют печи по производству силикоалюминия, которое лежит в пределах 0,7 – 0,72. Печи, требующие больших токов и меньших вторичных напряжений, имеют более низкое значение $\cos\varphi$. С увеличением мощности и геометрических размеров $\cos\varphi$ всех тепловых печей уменьшается.

Сравнительно низкие значения $\cos\varphi$ из-за высоких единичных мощностей вызывают значительное потребление из системы реактивной мощности. Для уменьшения загрузки подводящих сетей реактивной мощностью и снижения потерь энергии крупные РТП снабжаются индивидуальными или групповыми установками компенсации реактивной мощности (как поперечной, так и продольной).

В настоящее время наиболее применение получили шестиэлектродные ферросплавные печи мощностью 63 МВА (57 – 58 МВт), хорошо зарекомендовавшие себя на практике. Разработаны проекты 12-электродных кольцевых печей, которые могут применяться при мощностях 100 МВт и выше.

Важным путем обеспечения высоких электротехнических характеристик мощных РТП является снижение частоты переменного тока. Кроме компенсирующего фактора пониженной частоты вызывают ослабление поверхностного эффекта и эффекта близости в проводниках короткой (вторичной) сети, в результате чего значительно снижаются активные потери и нагрев конструкций, при этом растет КПД печи и снижается расход электроэнергии.

Особенность РТП являются частая коммутация их электрооборудования. Для регулирования электрического режима применяются системы управления типа АРР – 1, «Фоскар», Ш – 9701 и др., один из контуров которых использует переключатель ступеней напряжения трансформатора (ПСН). В результате число переключений ступеней напряжения достигает 300 – 400 в сутки. ПСН является одним из наиболее ненадежных узлов электрооборудования печей. Поэтому идет разработка тиристорных переключателей, допускающих до $1 \cdot 10^6$ переключений.

13.3.2 Дуговые печи

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются основными электрометаллургическими агрегатами для выплавки черных металлов (стали и чугуна). В России применяются ДСП емкостью до 200 т и мощностью до 90 МВА. Они представляют собой трехэлектродные устройства, питаемые от высоковольтной сети током промышленной частоты через понизительные трансформаторы. Рабочие токи дуги достигают до 70 кА.

Дуговые сталеплавильные печи переменного тока наряду с достоинствами имеют существенные недостатки, которые заставляют разрабатывать альтернативные конструкции печей. К таким новым видам печей относятся дуговые печи постоянного тока (ДППТ) и плазменные дуговые печи с керамическим тиглем.

Постоянный ток упрощает проблему снижения реактивного сопротивления печи, значительно повышая $\cos\varphi$ питающей сети.

Дуговая печь постоянного тока представляет собой ванну аналогичную ванне ДСП, в которую опущен один электрод (рис. 13.1,*a*).

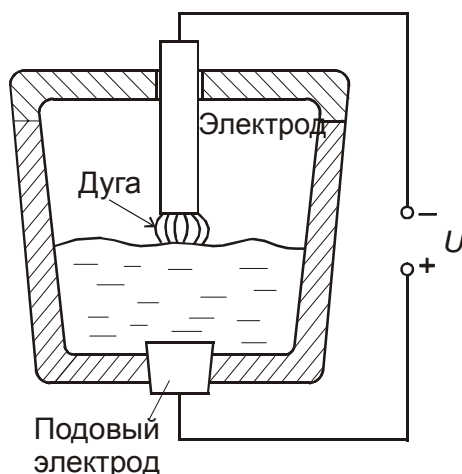


Рисунок 13.1, а

Питание производится по схеме «электрод – подовый электрод» на прямой полярности (катодом является электрод, анодом – металл). Подовый электрод устанавливается в центре подины и охлаждается водой или воздухом. Узел ввода электрода и дверца рабочего окна хорошо уплотнены, что позволяет полностью ликвидировать подсос воздуха, выброс продуктов плавки в атмосферу цеха и проводить работу с контролируемой атмосферой.

Печь емкостью 12 т имеет мощность до 9 МВт, удельный расход электроэнергии на расплавление составляет 490 – 520 кВт.ч/т.

Дуга постоянного тока горит устойчиво, ее столб имеет форму спирали, радиус витков которой увеличивается по направлению от катода к расплавленному металлу. Такая форма столба создает интенсивное собственное продольное магнитное поле, хорошо стабилизирующее дугу в пространстве и компенсирующее возмущение, возникающее от несимметрично расположенных токоподводов. При этом столб интенсивно вращается вокруг центральной оси спирали, что вызывает и вращение катодного пятна на электроде, в результате чего катод имеет равномерный износ.

Для питания ДППТ используются регулируемые тиристорные преобразователи VS со вторичным напряжением 900В (рис. 13.1, б).

Электрошлаковые печи

Электрошлаковые печи являются одним из основных агрегатов специальной электрометаллургии, позволяющей получать слитки и отливки высокого качества. Они широко применяются на металлургических и машиностроительных заводах. Для электрошлаковых

процессов существует широкая номенклатура печей различной конфигурации с увеличенной мощностью от 630 до 15000 кВА.

Электрошлаковые печи разделяются на металлургические печи электрошлакового переплава (ЭШП), в которых получают гладкие слитки различных форм сечения, и на печи электрошлакового литья (ЭШЛ), предназначенные для получения отливок сложной формы.

Основным элементом электрошлаковой печи является ванна расплавленного шлака, который является электролитом и имеет достаточно высокую ионную проводимость. Электрошлаковый процесс в принципе бездуговой, что обеспечивается подбором питающего ванну напряжения (35 – 55В), положением электрода в шлаке и уровнем вводимой мощности. Поэтому электрошлаковая печь, как приемник энергии, есть по сути печь сопротивления косвенного действия с жидким нагревателем.

Большинство печей питаются переменным током промышленной частоты (рис.13.2,*а*), но нередко, в целях оптимизации металлургических процессов, используются варианты с постоянным током (схема *б*), переменным током с постоянной составляющей (схема *в*) и постоянным реверсивным током (схема *г*).

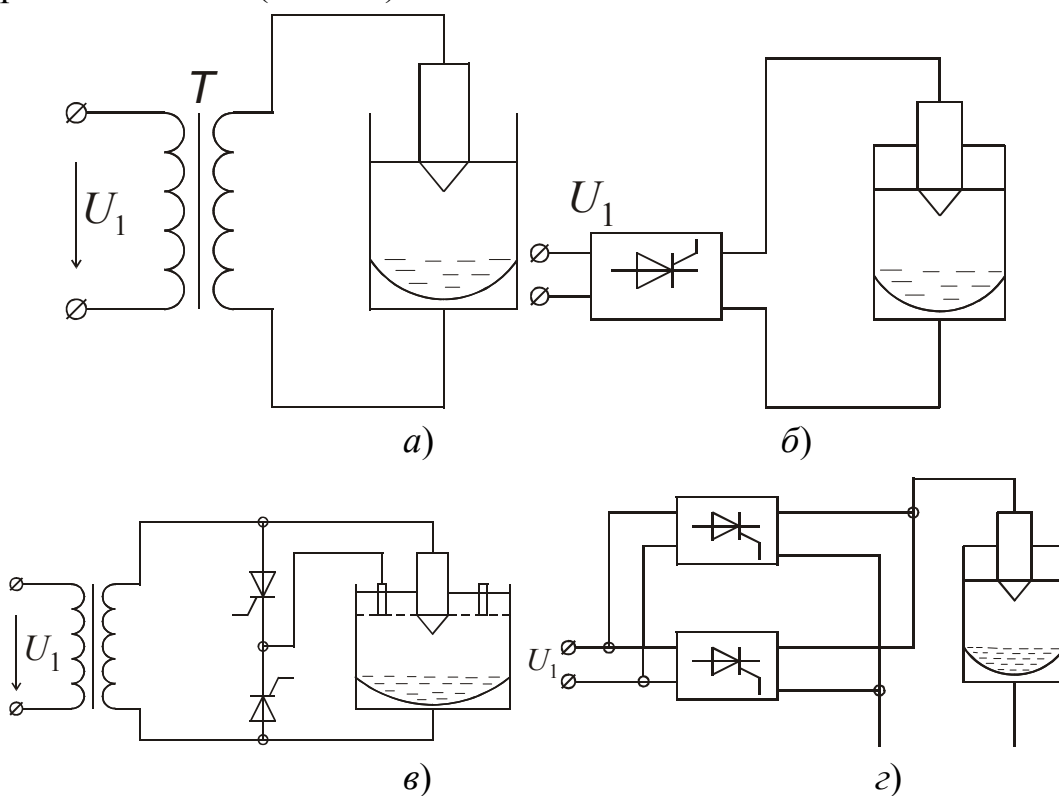


Рисунок 13.2

Питание печей осуществляется в зависимости от мощности либо от цеховой сети напряжением $U = 0,4$ кВ, либо от высоковольтных печных подстанций напряжением 6 – 10 кВ через специальные понизительные трансформаторы.

13.3 Установки электролиза алюминия

Электролиз – это химический процесс. Возникает он при прохождении электрического тока через электролиты (соли, щелочи и кислоты, проводящие электрический ток), растворенные в воде или расплавленные. При этом под действием разности потенциалов положительные ионы (катионы) направляются к катоду – электроду, соединенному с отрицательным полюсом источника тока, а отрицательные ионы (анионы) перемещаются к аноду – электроду, соединенному с положительным полюсом. Электролиз широко используется при получении химически чистых металлов: меди, цинка, алюминия, магния, никеля, кобальта и т.д., а также для покрытия металлом различных деталей и предметов.

Количество вещества, которое может быть выделено на электродах, пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит, и определяется законом Фарадея:

$$Q = \alpha It . \quad (13.2)$$

где Q – количество вещества, выделенное из электролита, г; I – ток, проходящий через электролит, А; t – время прохождения тока, с; α – электрохимический элемент (количество вещества, выделенное за 1 А.ч), г/А.ч.

Электролиз металлов ведут в режимах, обеспечивающих их максимальное выделение. Так, для получения алюминия из его окиси Al_2O_3 создают разность потенциалов анод – катод в 1,7В, поддерживают температуру электролиза в пределах 940 – 950°С и его определенную концентрацию.

Электролиз осуществляют в электролизных ваннах (электролизерах), состоящих из трех основных частей: катодного и анодного устройств и токоподводящей ошиновки (рис 13.3). Катод собирают из угольных блоков, на которых выделяется расплавленный алюминий. Анод может перемещаться сверху по направлению к катоду при помощи специальных механизмов. Эти механизмы обеспечивают непрерывную подачу анода в расплав, поддерживая неизменным расстояние между анодом и катодом. На аноде выделяется кислород, способствующий быстрому обгоранию анода. В процессе электролиза алюминия одновременно участвует ряд

последовательно соединенных ванн. Количество ванн в серии определяет производительность цеха и может насчитывать в крупных цехах до 150 шт. Для подвода электроэнергии и соединения электролизных ванн между собой используют токоподводящие и соединительные шины. При выборе сечения шин расчетная плотность тока принимается $0,6 - 1 \text{ А/мм}^2$

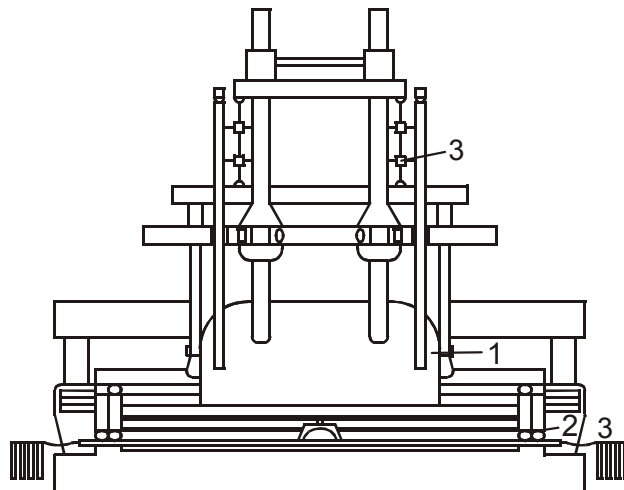


Рисунок 13.3

Токоподводящая ошиновка (3) электролизера делится на анодную (1) и катодную (2) части. Все электролизеры соединяют в электрическую цепь последовательно, поэтому катодную ошиновку предыдущего соединяют с анодной ошиновкой последующего электролизера.

Для получения постоянного тока на первых алюминиевых заводах применяли мотор – генераторные установки, вращающиеся агрегаты довольно значительных габаритов и с низким КПД. На смену им пришли полупроводниковые выпрямители серии ВАКД (с воздушным охлаждением) и ВАКВ 2 (с водяным охлаждением), которые выпускаются промышленностью на ток 6300, 12500, 25000А; напряжение 75, 150, 300, 450, 600, 850 В с автоматической стабилизацией выпрямленного тока. Регулирование выпрямленного тока под нагрузкой осуществляют с помощью ступенчатого переключения силового трансформатора, а плавное – с помощью дросселя насыщения с магнитными усилителями.

Выпрямители на 300 – 850В выполнены по трехфазной мостовой схеме и имеют 12-фазный режим выпрямления, а на 75 и 150В имеют 6-фазный режим выпрямления.

Выпрямительные устройства состоят из: силового трансформатора на 6, 10 и 36кВ мощностью 8000 – 40000кВА; выпрямительного блока на кремниевых вентилях ВЛ-200 или В-200 с номинальным током 200А; быстродействующих предохранителей на ток 400А; дроссели насыщения для плавного регулирования выпрямленного напряжения; уравнивающих

дросселей; щита управления с аппаратурой защиты, управления и сигнализации; шкафа автоматического ввода резерва.

Принципиальная схема силовой части преобразователя ВАКВ2 и ВАКД на ток 25000А, напряжение 300, 450, 600 и 650В с автоматической стабилизацией выпрямленного тока, состоящего из четырех блоков на ток 6250А каждый, дана на рис. 13.4.

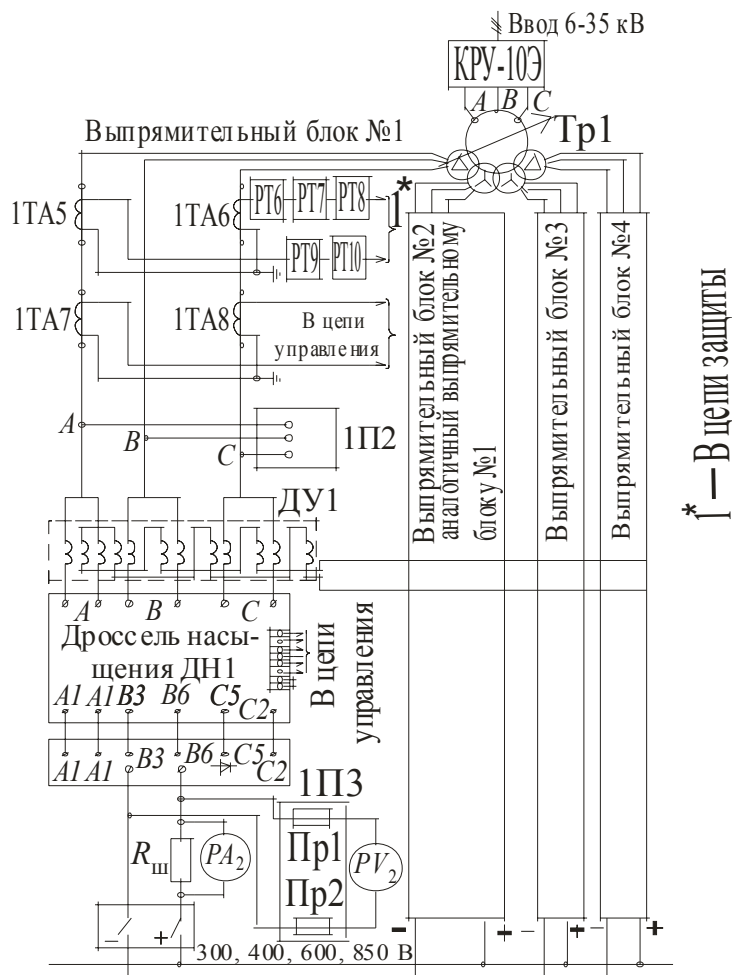


Рисунок 13.4

Электроэнергию преобразователи получают от высоковольтной сети 6 – 35 кВ через комплектные распределительные устройства с масляными выключателями, с аппаратурой защиты и измерения.

На действующих алюминиевых заводах применяют выпрямительные устройства на 450 и 600В; для мощных электролизных цехов на крупных сериях в 150 ванн, включенных последовательно, требуется выпрямленное напряжение 850В. Это уменьшает капитальные затраты и облегчает эксплуатацию.

Для получения рафинированной электротехнической меди используют электролизеры, питающиеся от преобразовательных устройств ВАКД и ВАКВ2, напряжением 300 и 450В.

13.5 Установки гальванического покрытия металлов

Гальваническое покрытие металла другим металлом позволяет значительно экономить цветные металлы и защищать от коррозии, повышать износостойкость изделий и придавать ему эстетичный вид.

При этом изделие (катод) соединяют с «минусом» источника постоянного тока и погружают в ванну с электролитом. Электрод из покрываемого металла (анод), также погруженный в электролит, соединяют с «плюсом» источника. В результате электролиза растворов (гальваностегии) металл (анод) переносится в электролит и осаждается на изделии (катоде). Электрические ванны бывают различного типа: стационарные, колокольные, барабанные, полуавтоматические и автоматические конвейерные линии.

В качестве электролитов используют различные растворы кислот и щелочей, причем температура в ваннах для нанесения покрытия не должна быть ниже + 20°C и выше + 80°C.

Толщина наносимого слоя покрытия зависит от назначения и требования к покрытиям. Так например, покрытие черных металлов цинком для защиты от коррозии имеет толщину 10 – 50 мкм, свинцовые покрытия алюминия и его сплавов 75 – 150 мкм. Время выдержки деталей в ванне зависит от толщины покрытия, плотности покрываемого металла и катодной плотности тока.

Наиболее распространенными видами металлопокрытий являются: цинкование, свинцование, серебрение, золочение, никелирование, хромирование, кадмирование, меднение, лужение.

Характеристика основных гальванических процессов приведена в табл. 13.1, причем все процессы требуют регулирования тока.

Установки для гальванических покрытий оборудованы системами автоматического поддержания заданного режима и механизмами с электроприводом для перемещения деталей из одной ванны в другую.

Режим в ванне определяется температурой, плотностью тока, уровнем и составом электролита.

Основные гальванические процессы.

Таблица 13.1

Вид покрытия	Напряжение ванны, В	Полярность на ванне	Вид покрытия	Напряжение ванны, В	Полярность на ванне
Цинкование	3,5 – 5	Катод	Хромирование	10 – 11	Анод – Катод
Кадмирование цианистое	3,5 – 5	Катод	Оксидирование	12	
Лужение щелочное	3,5 – 5	Катод	Никелирование	4 – 8	Катод
Меднение	3,5 – 5	Катод	Никелирование и лужение во вращающихся колоколах	10 – 11	Катод

Основными потребителями электроэнергии в гальванических установках являются электролитические ванны, требующие ток большой величины (до 10кА и выше) при напряжении 6 – 12В.

В настоящее время для питания гальванических ванн используют полупроводниковые выпрямители напряжением 6 – 28В на токи 200 – 3000А. Они имеют малые габариты, высокий КПД; в них отсутствуют быстроизнашивающиеся вращающиеся части, они просты в эксплуатации и бесшумны.

Выпрямительные устройства состоят из понижающего трансформатора и группы выпрямительных мостов. В зависимости от напряжения и тока нагрузки выпрямительные мосты соединяют в группы параллельно или последовательно и получают блоки на различное напряжение и токи.

Монтируют блоки вместе с пускорегулирующей аппаратурой в закрытых уплотненных шкафах. Это позволяет размещать их вблизи ванн, что удобно в эксплуатации. Объединение нескольких шкафов позволяет получить токи 7500 – 10000А при напряжении 12В и токи 200 – 3000А при напряжении 6, 9, 12 и 24В.

В цехах покрытия металлов применяют групповую схему питания гальванических ванн, при которой от одного преобразователя питается одновременно несколько ванн (рис. 13.5), а также индивидуальную – каждая гальваническая ванна питается от собственного преобразователя. В последнем случае регулирование тока ванны и управление процессом покрытия осуществляется автоматически на полупроводниковом преобразователе.

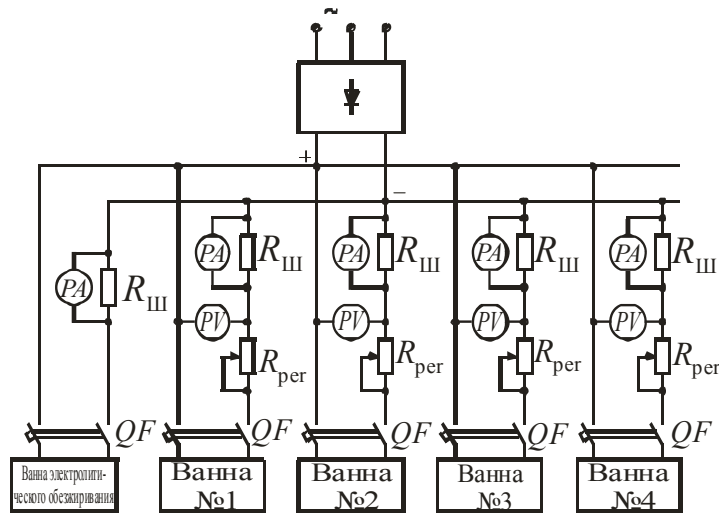


Рисунок 13.5

Схема группового питания гальванических ванн от выпрямительного агрегата зависит от покрытия, т.к. часто именно этим определяется напряжение на ванне и величина тока, проходящего через ванну. Для получения повышенных напряжений источники энергии включают последовательно, а при необходимости получения больших токов – параллельно. Ванны обычно включают на главные шины последовательно с регулировочным реостатом и измерительными приборами: амперметром и вольтметром, измеряющими ток в ванне и напряжение в ней.

Для поддержания необходимого режима и параметров гальванических ванн применяют автоматические устройства – регуляторы плотности тока, температуры, заданной кислотности и уровня электролита.

Регуляторы плотности тока работают на принципе измерительного элемента, получающего входной сигнал от зонда, погруженного в ванну с электролитом и передающего выходной сигнал на серводвигатель (Д) регулировочного трансформатора (АТ). Плотность тока в электролите пропорциональна току в измерительном зонде I_k (рис.13.6). Этот ток протекает по резистору R_{III} , создает падение напряжения, которое попадает на вход измерительного элемента (на схеме не показан). Выходной параметр измерительного элемента компенсируется до нуля построечным резистором R_{II} при работе ванн происходит отклонение плотности тока от заданного значения, в сопротивлении R_{III} создается падение напряжения. При этом компенсация нарушается и на выходе измерительного элемента появляется сигнал, который воздействует на серводвигатель Д. Последний перемещает движок АТ в направлении уменьшения полученного сигнала.

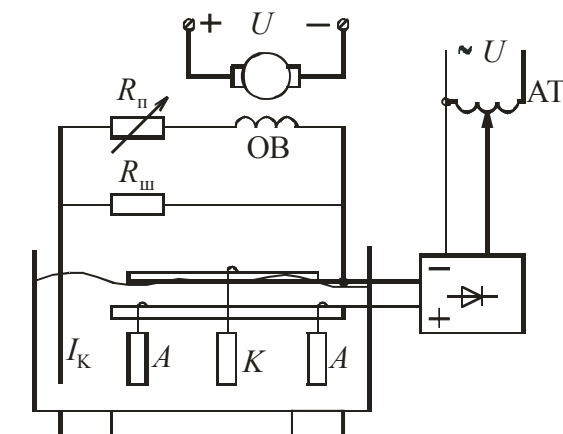


Рисунок 13.6

В качестве регулятора температуры в ванне используют электроконтактный термометр, контакт которого при снижении температуры замыкается. Через промежуточное реле сигнал подается на включение электромагнита, управляющего вентилем горячей воды, пара или на включение нагревательных элементов, встроенным в стенки ванны.

Аналогичные системы предусмотрены для регулирования кислотности электролита и изменения направления тока в ванне.

Перед покрытием изделия проходят целый ряд ванн, где производится обезжиривание, промывание в холодной и горячей воде, травление, осветление, сушка. Для этой цели применяют автоматические линии гальванических покрытий, состоящие из необходимого набора ванн, связанных общей транспортной системой.