

7. Трансформаторы

7.1. Назначение, устройство, принцип действия

Электрическую энергию в мощных электромашинных генераторах экономически целесообразно вырабатывать уровнем напряжения в несколько десятков киловольт. Для уменьшения потерь в линиях электропередач от источника к потребителю передача энергии производится при высоких напряжениях порядка нескольких сотен киловольт. Потребители электрической энергии, в основном, питаются низким напряжением: от сотен вольт до нескольких киловольт. Поэтому в процессе выработки, передачи и потребления электрической энергии возникает необходимость в многократном изменении уровня напряжения. Для этой цели служат трансформаторы.

Трансформатором называется статическое (без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Первые трансформаторы с разомкнутым магнитопроводом предложил в 1876г. П.Н. Яблочков, который применил их для питания электрической «свечи». В 1885г. венгерские ученые М. Дери, О. Блати, К. Циперовский разработали однофазные трансформаторы с замкнутым магнитопроводом. В 1889-1891гг. М. О. Доливо-Добровольский предложил трехфазный трансформатор.

Трансформатор рассчитан на нормальную работу только при определенных значениях частоты, мощности, токов и напряжений, называемых номинальными (указываются на щитке). Номинальная мощность трансформаторов различна. В радиоэлектронных устройствах имеются трансформаторы, мощность которых составляет десятки вольт-ампер. Мощность же одного трехфазного трансформатора для ЛЭП составляет 1 млн. кВА.

Трансформатор состоит из замкнутого сердечника, на котором расположены обмотки первичного и вторичного напряжения. Рассмотрим принцип работы однофазного двухобмоточного трансформатора (рис. 7.1).

На первичную обмотку прикладывается переменное напряжение u_1 , под действием которого по первичной обмотке протекает переменный ток i_1 . Магнитодвижущая сила этого тока $i_1 w_1$ возбуждает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_1 . Этот поток, сцепленный с

двумя обмотками трансформатора, индуцирует в них ЭДС, мгновенные значения которых будут:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

ЭДС e_1 частично компенсирует приложенное напряжение u_1 , e_2 создает напряжение u_2 на зажимах вторичной обмотки. При замыкании вторичной обмотки на нагрузку с сопротивлением Z_2 , по ней протекает ток i_2 . Магнитодвижущая сила $i_2 w_2$ возбуждает переменный магнитный поток Φ_2 , направленный встречно магнитному потоку Φ_1 (размагничивает его). Таким образом, под нагрузкой в сердечнике протекает

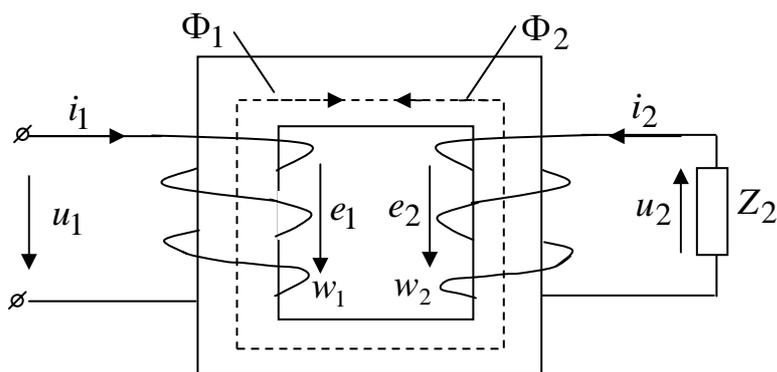


Рис. 7.1

результующий магнитный поток $\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2$.

Так как магнитный поток Φ_2 направлен встречно, то общий магнитный поток Φ уменьшается. Это вызывает уменьшение ЭДС e_1 и увеличение тока i_1 за счет разности питающей сети и ЭДС e_1 . Увеличение тока влечет за собой компенсацию изменения общего магнитного потока и, следовательно, поддержание тока i_2 . Таким образом, устанавливается новый рабочий режим.

В трансформаторе, работающем под нагрузкой, ЭДС первичной и вторичной обмотки индуцируются суммарным магнитным потоком:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

а их действующие значения равны

$$E_1 = 4.44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4.44 f w_2 \Phi_m,$$

где Φ_m – амплитудное значение магнитного потока.

Величина $k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2}$, определяющая отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток, называется **коэффициентом трансформации**.

При номинальной нагрузке мощного трансформатора его КПД очень высок, примерно 99%. Он существенно понижается лишь при малых нагрузках или у маломощных трансформаторов. Это дает возможность в первом приближении считать одинаковыми первичную и вторичную полные мощности нагруженного трансформатора: $S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2$, поэтому отношение токов у нагруженного трансформатора можно считать обратным отношению напряжений а, следовательно, и чисел витков соответствующих обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k_{12}}.$$

7.2. Уравнения идеализированного трансформатора

Трансформатор, первичная и вторичная обмотка которого не имеют активных сопротивлений и потоков рассеяния, называется *идеализированным трансформатором*.

Запишем уравнения электрического состояния идеализированного трансформатора, используя второй закон Кирхгофа:

$$u_1 = -e_1; \quad u_2 = e_2.$$

При синусоидальном напряжении u_1 магнитный поток также изменяется по синусоидальному закону. Магнитный поток определяет величину напряженности магнитного поля $H(t)$. С другой стороны, по закону полного тока:

$$H(t) = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{l_{cp}}, \quad (7.1)$$

где l_{cp} – средняя линия магнитопровода.

При заданном законе изменения напряжения на первичной обмотке u_1 сумма магнитодвижущих сил в каждый момент времени должна иметь определенное значение независимо от величины и характера нагрузки трансформатора. В частном случае – в режиме холостого хода ($i_2 = 0$) – поток создается только током холостого хода i_{1xx} :

$$H(t) = \frac{i_{1xx} w_1}{l_{cp}}. \quad (7.2)$$

Приравняв правые части выражений (7.1) и (7.2), имеем

$$i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2.$$

Откуда $i_1 = i_{1xx} - i_2 \frac{w_2}{w_1} = i_{1xx} + i'_2$, где $i'_2 = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$ – приведенный вторичный ток.

Таким образом, ток в первичной обмотке может быть представлен в виде двух составляющих: i_{1xx} и i'_2 . Первая составляющая i_{1xx} – намагничивающий ток, который создает основной магнитный поток и является постоянной величиной, зависящей от магнитных свойств сердечника. Таким образом, в трансформаторе магнитный поток не зависит от характера и величины нагрузки и определяется уровнем приложенного напряжения. Вторая составляющая i'_2 – реакция первичной обмотки на изменение нагрузки во вторичной обмотке. Эта величина переменная, зависящая от величины нагрузки.

В трансформаторе без магнитных потерь $i_{1xx} = 0$ поэтому можно считать, что $\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1}$, следовательно, преобразование энергии происходит без искажения формы кривой тока.

7.3. Схема замещения идеализированного трансформатора

Наличие магнитной связи обмоток затрудняет анализ режимов работы трансформатора. В схемах замещения магнитную связь заменяют электрической. Для этого необходимо объединить обе обмотки трансформатора в одну, сделав равными ЭДС этих обмоток $e_1 = e_2$. Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки сделать равным числу витков первичной обмотки.

Так как в трансформаторе $\frac{u_1}{u_2} = -\frac{e_1}{e_2} = -\frac{w_1}{w_2}$, то приведенное значение напряжения вторичной обмотки запишем в виде

$$u'_2 = u_1 = -u_2 \frac{w_1}{w_2}.$$

Приведенный ток вторичной обмотки определяется из условия сохранения мощности вторичной обмотки до и после преобразования

$$u_2 \cdot i_2 = u'_2 \cdot i'_2, \text{ следовательно } i'_2 = i_2 \cdot \frac{u_2}{u'_2} = -i_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

Мощность потерь до и после преобразования также должна остаться неизменной, т.е. $R_{H2} \cdot i_2^2 = R'_{H2} \cdot i'^2_2$, где R_{H2} – активное сопротивление нагрузки вторичной обмотки.

Из данного условия найдем приведенное значение активного со-

$$\text{противления } R'_{H2} = R_{H2} \cdot \frac{i_2^2}{i'^2_2} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot R_{H2}.$$

По аналогии $L'_{H2} = L_{H2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$; $C'_{H2} = C_{H2} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$.

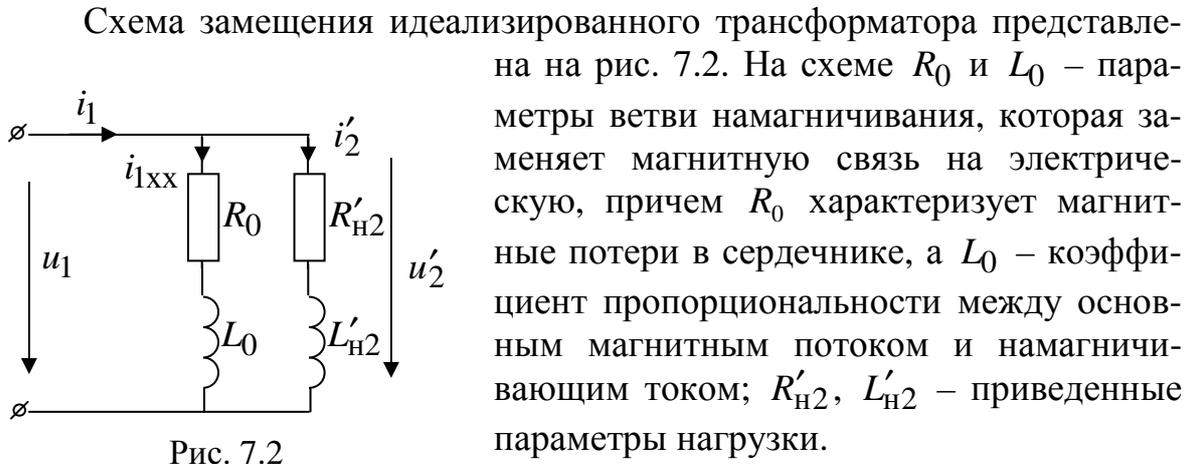


Рис. 7.2

7.4. Реальный трансформатор

Напряжение u_1 , подводимое к первичной обмотке, уравнивается не только ЭДС e_1 рабочего потока, но и ЭДС потоков рассеяния $e_{\sigma 1}$ и падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки $u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + R_1 i_1$.

Учитывая, что $e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$, получаем $u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки не равно ЭДС e_2 от рабочего потока Φ . Оно меньше на величину падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях обмотки

$$u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2.$$

Уравнение магнитного состояния останется таким же, как и для идеализированного трансформатора: $i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$.

В комплексной форме уравнения, описывающие работу реального трансформатора, выглядят следующим образом:

$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1$; $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 - R_2 \dot{I}_2$; $\dot{I}_{1xx} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$, где $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, $x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ – индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

Построение схемы замещения осуществляется по той же методике, что и для идеализированного трансформатора. Как и при рассмотрении реальной катушки, первичную и вторичную обмотки трансформатора можно представить как две последовательно соединенные катушки. Од-

на из них – «воздушная» с параметрами $R_1, L_{\sigma 1}$ и $R_2, L_{\sigma 2}$; вторая – идеализированная со стальным сердечником (рис. 7.3).

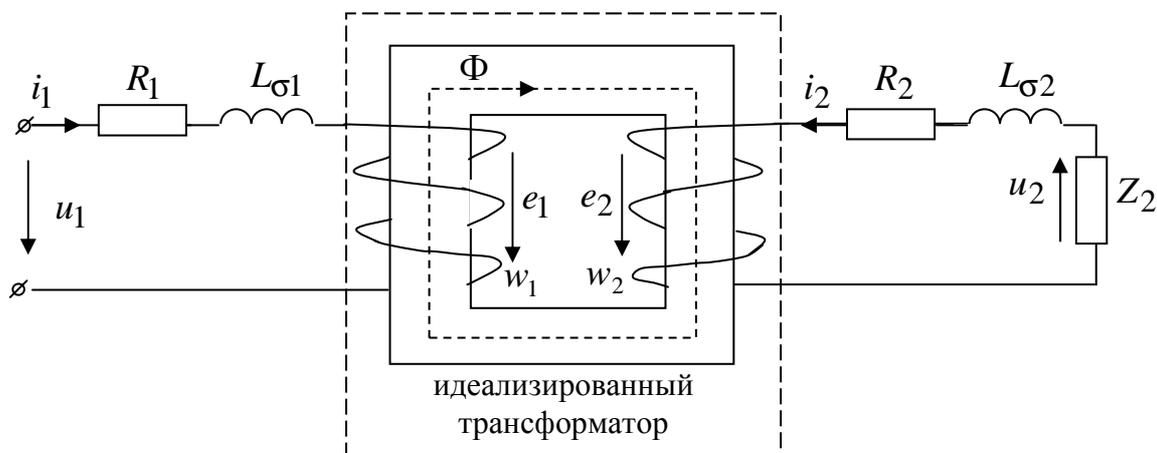


Рис. 7.3

Используя те же принципы, что и для идеализированного трансформатора, построим Т-образную схему замещения (рис. 7.4).

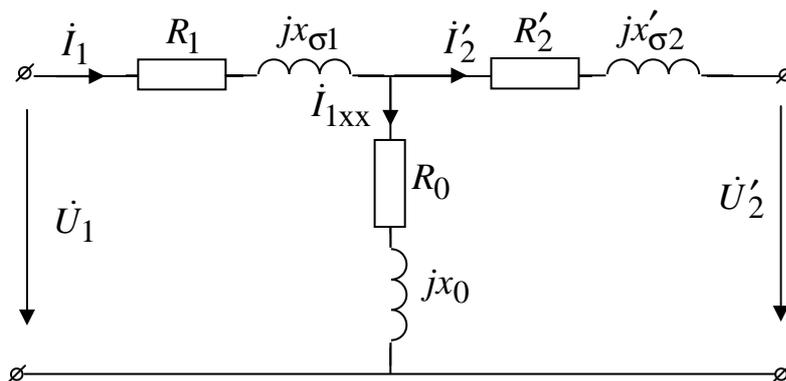


Рис. 7.4

Т-образная схема замещения имеет существенный недостаток: невозможно экспериментально определить все ее параметры. Поэтому используют приближенную Г-образную схему.

В трансформаторах большой мощности намагничивающий ток мал – $I_{1xx} = (0.05 \div 0.07)$ от тока первичной обмотки под нагрузкой. На основании этого ветвь намагничивания переносят в начало схемы (рис. 7.5), где $R_0, x_0, Z_0 = \sqrt{R_0^2 + x_0^2}$ – параметры холостого хода; $R_K = R_1 + R'_2, x_K = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}, Z_K = \sqrt{R_K^2 + x_K^2}$ – параметры короткого замыкания.

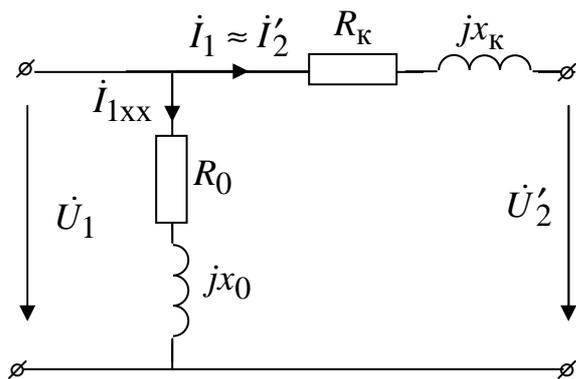


Рис. 7.5

Построение векторной диаграммы (рис. 7.6) начинаем с вектора рабочего потока и намагничивающего тока. Для построения диаграммы необходимо знать величину и характер нагрузки на вторичной обмотке. Нагрузка может быть активно индуктивной ($\varphi_2 > 0$), чисто активной ($\varphi_2 = 0$) и активно-емкостной ($\varphi_2 < 0$). Построим векторные диаграммы для всех трех

случаев.

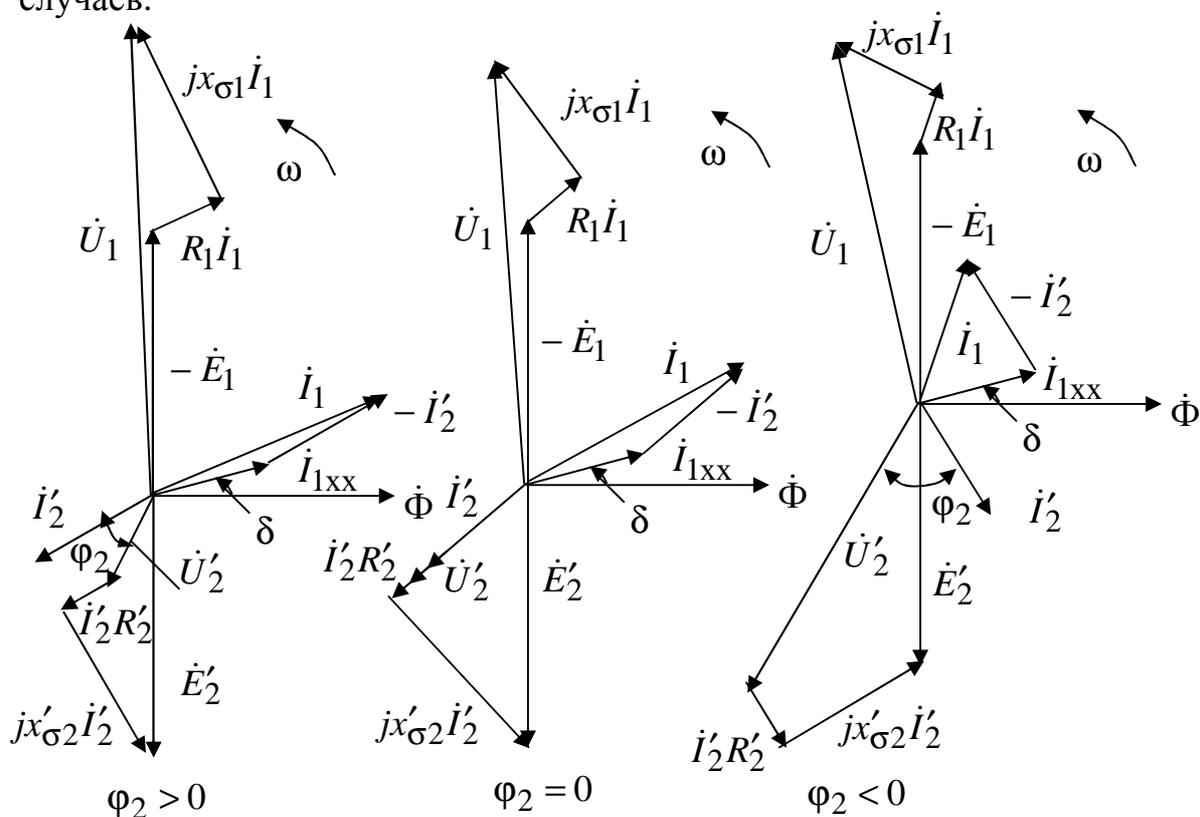


Рис. 7.6

При емкостной нагрузке напряжение на вторичной обмотке может превышать ЭДС на холостом ходу.

7.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Кроме номинальных значений мощности, напряжений, токов, частоты в паспорте трансформатора записывают ряд определяемых опытным путем параметров, называемых параметрами трансформатора в ре-

жимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Используя их, можно определить все эксплуатационные характеристики трансформатора: диапазон изменения напряжения на приемнике при изменениях тока в нем, наибольший возможный ток при КЗ, потери энергии в трансформаторе и др.

Параметрами трансформатора в режиме ХХ являются относительное значение тока I_{1XX} в процентах от I_{1H} и мощность потерь в магнитопроводе P_{XX} , измеренные при U_{1H} , параметрами в режиме КЗ – напряжение u_K в процентах от U_{1H} и мощность потерь в обмотках P_K при I_{1H} , I_{2H} .

Опыт холостого хода

Все изготовленные трансформаторы испытывают в опыте ХХ (рис. 7.7).

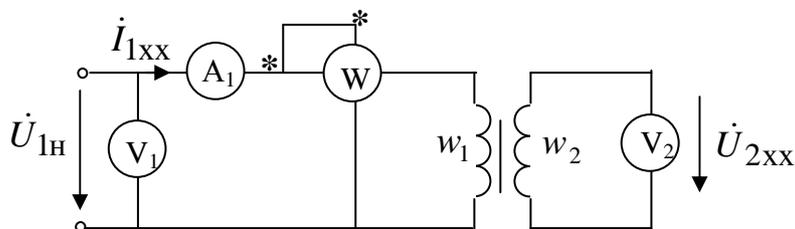


Рис. 7.7.

При этом первичная обмотка включается на напряжение сети U_{1H} , а вторичная обмотка размыкается. Измерительные приборы регистрируют, что в первичной обмотке существует небольшой ток холостого хода $I_{1XX} = (3 \div 10)\%$ от I_{1H} , и трансформатор потребляет из сети электроэнергию, мощность которой (относительно небольшую) называют потерями ХХ P_{XX} . Эта мощность измеряется ваттметром и определяется в основном потерями в магнитопроводе P_{CT} трансформатора. Мощность потерь в магнитопроводе пропорциональна Φ^2 , а так как действующее значение ЭДС E_{1XX} пропорционально Φ , то P_{XX} пропорциональна U_{1H}^2 . Потери в обмотках трансформатора (электрические $P_{эл}$) в опыте ХХ незначительны из-за малого значения тока I_{1XX} .

Из опыта ХХ можно найти полное сопротивление трансформатора и коэффициент мощности

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1XX}}; \quad \cos \varphi_{XX} = \frac{P_{XX}}{U_{1H} I_{1XX}},$$

где φ_{XX} – сдвиг фаз между U_{1H} и I_{1XX} . Также, из этого опыта находят активное и индуктивное сопротивление схемы замещения трансформатора (рис. 7.5) в режиме XX $R_0 = \frac{P_{XX}}{I_{1XX}^2}$; $x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$.

Измерив вольтметром первичное U_{1H} и вторичное U_{2XX} напряжения можно с большой степенью точности определить коэффициент трансформации

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{2XX}}.$$

Этот коэффициент указывается на щитках трансформаторов в виде отношения номинальных напряжений трансформатора в режиме XX, например «6000/230» (как отношение высшего напряжения к низшему).

Опыт короткого замыкания

Следует различать режим короткого замыкания в эксплуатационных условиях и опыт короткого замыкания. Первый представляет собой аварийный режим трансформатора, когда КЗ происходит при номинальном первичном напряжении. При этом токи в обмотках могут в десятки раз превысить свои номинальные значения, что приведет к механическому и тепловому разрушению активных частей трансформатора.

В опыте КЗ вторичную обмотку замыкают накоротко (рис. 7.8), а к первичной подводится такое пониженное напряжение U_{1K} , при котором токи в обмотках равны номинальным I_{1H} и I_{2H} .

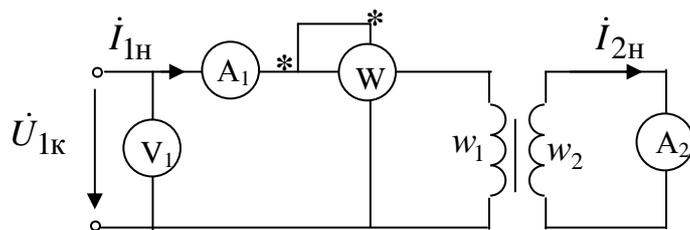


Рис. 7.8.

Относительное значение этого напряжения, называемого **напряжением КЗ**, составляет

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% = (5 \div 10)\% U_{1H}.$$

Это напряжение является одним из паспортных параметров трансформатора и используется для определения ряда эксплуатационных характеристик. В опыте КЗ активная мощность P_K , измеренная ваттмет-

ром, представляет собой мощность электрических потерь $P_{эл}$ в обмотках. В этом опыте потери в магнитопроводе $P_{ст}$ малы и составляют лишь $(0.05 \div 0.1)$ потерь при номинальном режиме из-за пониженного напряжения $U_{1к}$ и, следовательно, пренебрежимо малого основного магнитного потока Φ . Мощность потерь при КЗ и номинальных токах

$$P_k = R_1 I_{1н}^2 + R_2 I_{2н}^2.$$

По данным опыта КЗ можно найти параметры упрощенной схемы замещения (см. рис. 7.5). Для этого определяется полное сопротивление

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}, \text{ коэффициент мощности } \cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} I_{1н}}.$$

Затем рассчитываются $R_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2}$ и $x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$. При этом параметры схемы замещения

(рис. 7.4) можно определить как $x_{\sigma 1} \approx x'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} x_k$ и $R_1 \approx R'_2 = \frac{1}{2} R_k$.

7.6. Изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Из рассмотренной упрощенной схемы замещения трансформатора (см. рис. 7.5) видно, что вторичное напряжение изменяется с изменением тока приемника вследствие падения напряжения в обмотках. **Изменение вторичного напряжения** $\Delta U_2 = U_{2хх} - U_2$ определяют обычно

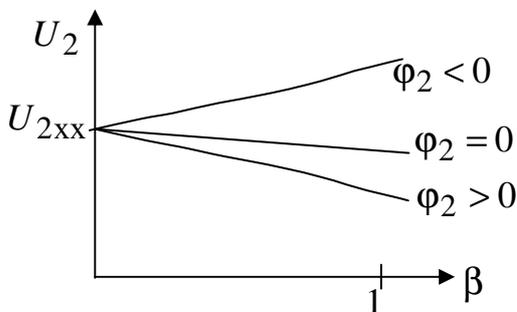


Рис. 7.9.

в процентах

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{2хх} - U_2}{U_{2хх}} \cdot 100\%.$$

Введем понятие **коэффициента нагрузки** трансформатора

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}} \approx \frac{I_2}{I_{2н}}.$$

Для трансформатора очень важной является его **внешняя характеристика**, т.е. зависимость вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки I_2 при фиксированном напряжении $U_1 = U_{1н}$ и постоянном коэффициенте мощности приемника $\varphi_2 = const$. При изменении $0 < \beta < 1$ напряжение на выходе трансформатора изменяется незначительно, что обеспечивает стабильность напряжения на нагрузке. Также, из рис. 7.9 видно, что изменение напряжения зависит от характера нагрузки.

Регулировка напряжения осуществляется изменением коэффициента трансформации. Для этого на первичной обмотке имеются отводы, позволяющие изменять число витков в пределах $\pm 5\%$. Число витков регулируется специальным переключателем.

7.7. Потери энергии и КПД трансформатора

Преобразование напряжений и токов трансформатором сопровождается потерями энергии: магнитными (потерями в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи) $P_{ст}$ и электрическими $P_{эл}$ (потерями на нагрев в обмотках).

Магнитные потери определяются величиной и частотой магнитного потока и не зависят от величины и характера нагрузки: $P_{ст} = const \approx P_{xx}$.

Электрические потери в обмотках $P_{эл}$ пропорциональны квадрату тока, и их можно выразить через мощность потерь КЗ $P_k = R_k I_{1н}^2$:

$$P_{эл} = R_k I_1^2 = R_k \frac{I_{1н}^2}{I_{1н}^2} I_1^2 = \beta^2 P_k.$$

Хотя работа трансформатора состоит в передаче полной мощности, его КПД определяют по передаваемой активной мощности и потерям энергии:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{эл} + P_{ст}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{эл} + P_{ст}} =$$

$$= \frac{U_2 \left(\frac{I_2}{I_{2н}} \right) I_{2н} \cos \varphi_2}{U_2 \left(\frac{I_2}{I_{2н}} \right) I_{2н} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_{ст}} \approx \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_{xx}},$$

где $S_H = U_2 I_{2н}$ – номинальная полная мощность. Найдем экстремум данной функции от аргумента – коэффициента нагрузки β . Для этого

приравняем к нулю производную $\frac{d\eta}{d\beta}$:

$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{S_H \cos \varphi_2 (\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_{xx}) - \beta S_H \cos \varphi_2 (S_H \cos \varphi_2 + 2\beta P_k)}{(\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_{xx})^2} = 0$$

Дробь равна нулю, если числитель равен нулю:

$$\beta S_H^2 \cos^2 \varphi_2 + S_H \cos \varphi_2 \beta^2 P_K + S_H \cos \varphi_2 P_{XX} - \beta S_H^2 \cos^2 \varphi_2 - 2\beta^2 P_K S_H \cos \varphi_2 = 0;$$

$$S_H \cos \varphi_2 P_{XX} - \beta^2 P_K S_H \cos \varphi_2 = 0; \quad S_H \cos \varphi_2 (P_{XX} - \beta^2 P_K) = 0.$$

Окончательно $P_{XX} = \beta^2 P_K$, отсюда $\beta = \sqrt{P_{XX}/P_K}$. Это означает, что максимальный КПД будет при равенстве переменных электрических потерь

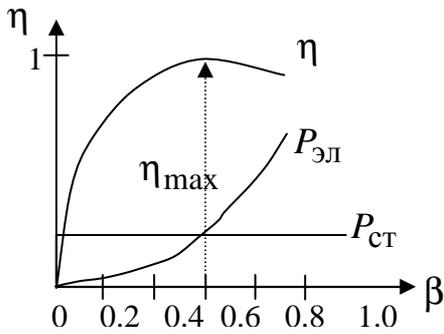


Рис. 7.10.

постоянным магнитным потерям. При нагрузках больших номинальных непропорционально возрастают переменные потери, что приводит к снижению коэффициента полезного действия.

Зависимость магнитных и электрических потерь от коэффициента нагрузки и зависимость $\eta(\beta)$ показаны на рис. 7.10. Обычно для трансформатора $P_{XX}/P_K = 0.25 \div 0.5$ и $\beta = 0.5 \div 0.7$. Следо-

вательно, наибольшее значение КПД трансформатора будет при токе нагрузки 50-70% номинального. Максимальный КПД силовых трансформаторов доходит до 99.5%. Для исключения погрешностей (класс точности приборов) КПД определяют косвенным методом по опытам ХХ и КЗ.

7.8. Трехфазные трансформаторы

Трансформирование энергии в трехфазной цепи можно осуществлять либо трехфазными групповыми трансформаторами, либо стержневыми. Первичные и вторичные обмотки трансформаторов могут соединяться либо звездой, либо треугольником.

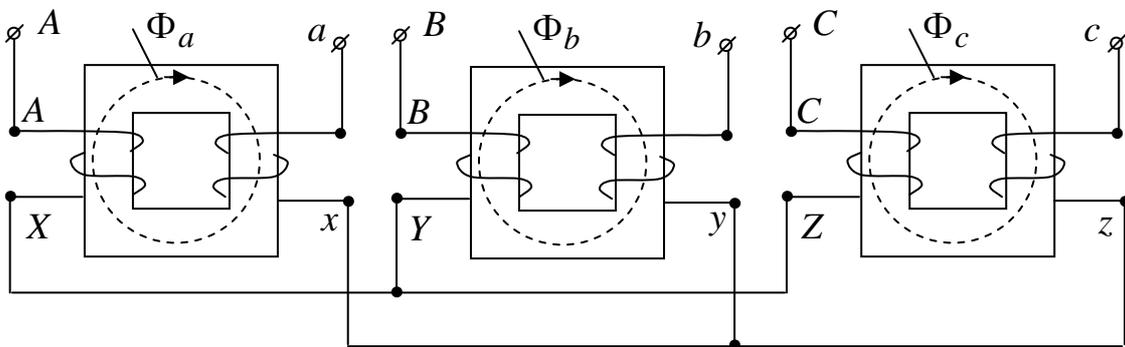


Рис. 7.11

Практически большинство трансформаторов малой и средней мощности выполняются трехфазными, а в случае больших мощностей во-

прос решается с учетом всех конкретных условий. Согласно ГОСТам трехфазные трансформаторы изготавливаются мощностью до 1 млн. кВА, но, начиная с мощности 1800 кВА, допускается применение трехфазных групп.

В групповых трансформаторах трехфазный трансформатор формируется из трех однофазных. Первичные и вторичные обмотки укладываются на отдельный сердечник. На рисунке 7.11 приведен групповой трансформатор, соединенный по схеме Y/Y.

Групповые трансформаторы имеют повышенные габариты и вес. Их достоинство – при идентичности магнитопроводов магнитные потоки образуют симметричную систему.

Для улучшения массо-габаритных показателей используют стержневые трансформаторы. Каждая фаза такого трансформатора располагается на своем стержне (рис. 7.12). Недостатком является несимметричность магнитной системы (средние силовые линии магнитных потоков отличаются друг от друга). Для устранения этого недостатка средний стержень выполняется другого сечения по сравнению с крайними. При выполнении этого условия удается получить симметричную систему магнитных потоков.

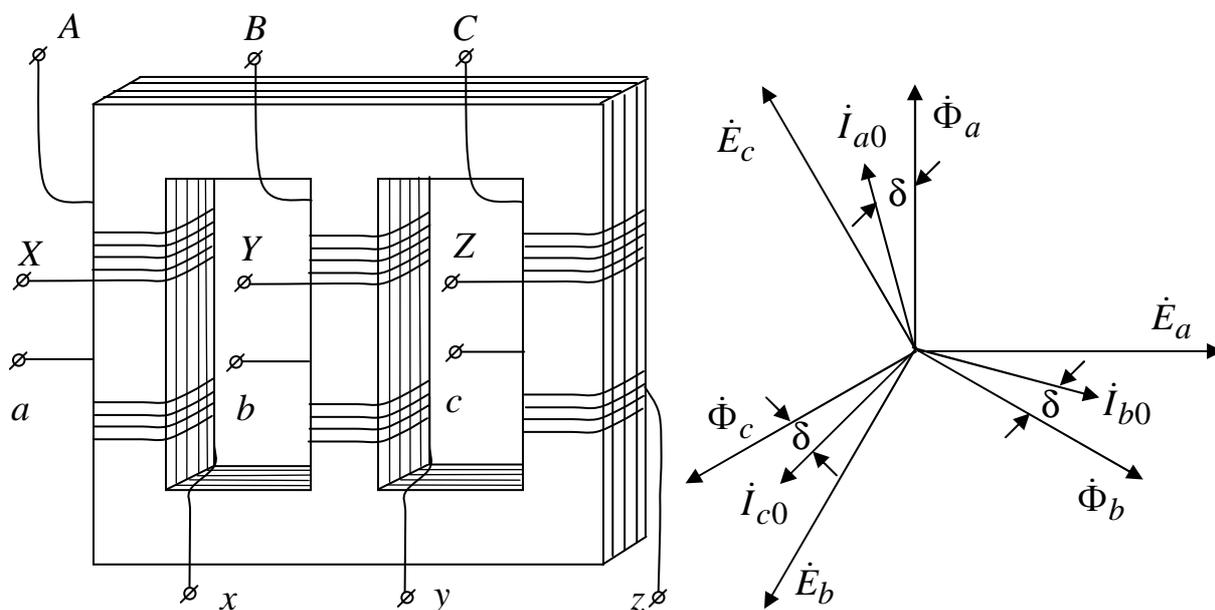


Рис. 7.12.

Рис. 7.13

Так как система оказывается симметричной и в электрическом и в магнитном смысле (рис. 7.13), все расчеты можно вести на одну фазу, т.е. теория однофазного трансформатора полностью соответствует трехфазному.

В зависимости от сдвига фаз между линейными первичным и вторичным напряжением трансформаторы разделяются на группы соеди-

нений, причем каждую группу соединений составляют трансформаторы с одинаковым сдвигом по фазе между указанными напряжениями.

Для обозначения группы соединений выбирается ряд целых чисел от 1 до 12. Условно принимается, что единица соответствует 30° , по аналогии с углом между минутной и часовой стрелками часов при 1, 2, ..., 12 час. Соответственно $2 - 60^\circ$, $3 - 90^\circ$ и т.д. При определении группы соединений с вектором напряжения обмотки высшего напряжения нужно совместить минутную стрелку, а с вектором напряжения обмотки низшего напряжения – часовую стрелку. Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения. Примеры определения группы соединений для однофазного трансформатора представлены на рис. 7.14, а и б; для трехфазного – на рис. 7.15, а и б.

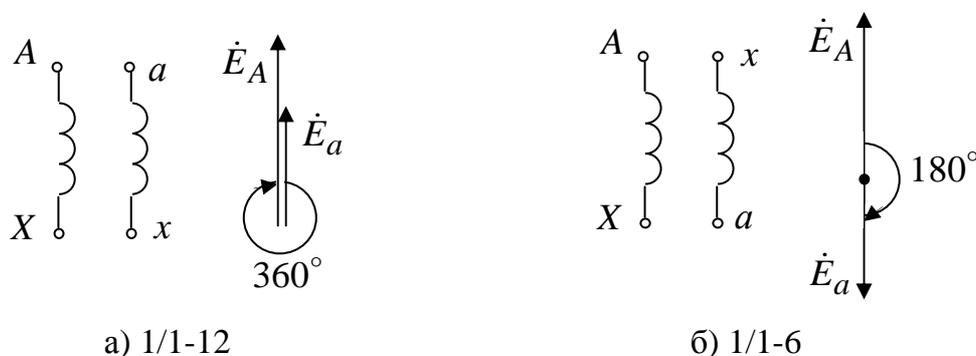


Рис. 7.14

При соединении Y/Y можно получить все четные группы соединений: 2, 4, 6, 8, 10, 12. При соединении Y/ Δ (или Δ /Y) можно получить все нечетные группы: 1, 3, 5, 7, 9, 11.

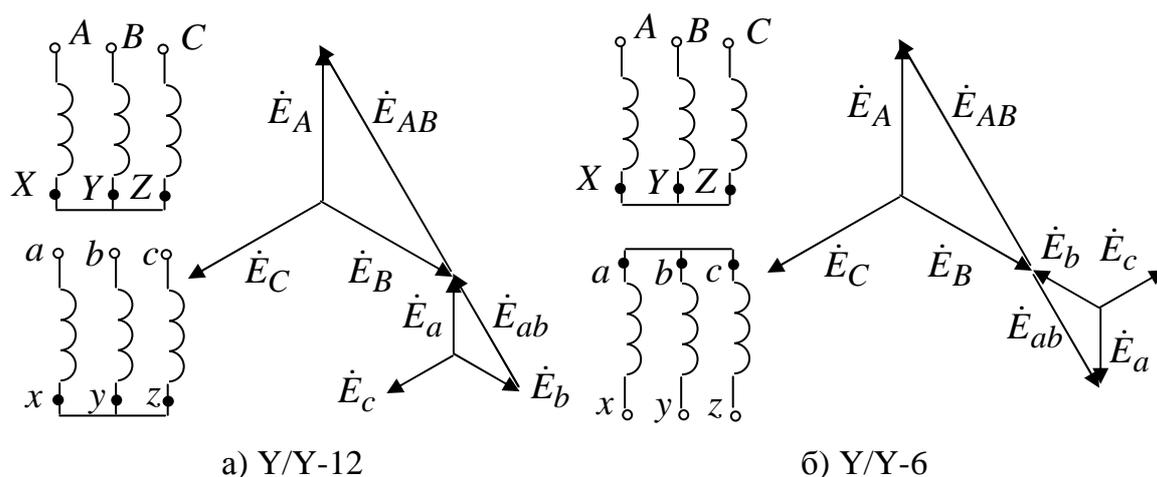


Рис. 7.15

7.9. Параллельная работа трансформаторов

На параллельную работу (рис. 7.16) трансформаторы могут быть включены только при соблюдении определенных условий:

- 1) равенство номинальных напряжений первичных и вторичных обмоток (равенство коэффициентов трансформации);
- 2) трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений;
- 3) равенство номинальных напряжений короткого замыкания.

При соблюдении первых двух условий уравнительного тока в обмотках трансформаторов не будет. Можно допустить различие в коэффициентах трансформации 0.5% от их среднего значения.

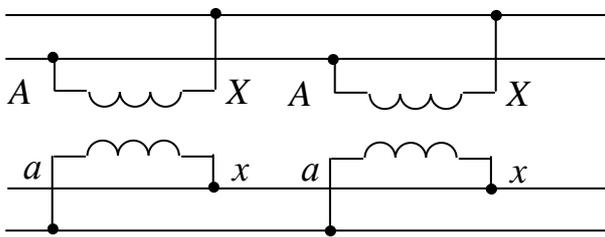


Рис. 7.16

Недопустимо включение на параллельную работу трансформаторов с разной группой соединения, так как результирующая ЭДС в контуре вторичных обмоток приведет к уравнительному току.

Соблюдение третьего условия необходимо для того, чтобы общая нагрузка распределялась пропорционально номинальным мощностям параллельно работающих трансформаторов.

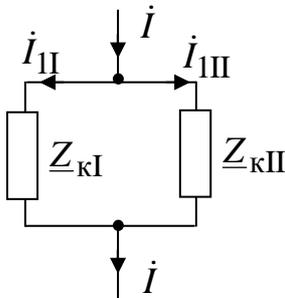


Рис. 7.17

Пренебрегая токами холостого хода, можем заменить трансформаторы (рис. 7.16) сопротивлениями короткого замыкания (рис. 7.17). Токи распределяются пропорционально сопротивлениям. Следовательно,

$$\frac{i_{1II}}{i_{1III}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}} = \frac{Z_{кII} e^{j\varphi_{кII}}}{Z_{кI} e^{j\varphi_{кI}}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}} e^{j(\varphi_{кII} - \varphi_{кI})}.$$

Значение разности углов $(\varphi_{кII} - \varphi_{кI})$ в обычных случаях (если мощности параллельно работающих трансформаторов не сильно отличаются одна от другой) близко к нулю. Переходя от отношения комплексов к отношению их модулей, имеем:

$$\frac{I_{1II}}{I_{1III}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}}. \text{ Умножим обе части этого равенства на } \frac{I_{1III}}{I_{1III}} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{1H}} \text{ и левую часть на } \frac{U_{1H}}{U_{1H}}:$$

$$\frac{I_{II}}{I_{I\Pi}} \cdot \frac{I_{I\Pi\Pi}}{I_{I\Pi\Pi}} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{1H}} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{1H}} = \frac{I_{I\Pi\Pi}}{I_{I\Pi\Pi}} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{1H}} \cdot \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}};$$

$$\frac{(I_{II}U_{1H}) \cdot (I_{I\Pi\Pi}U_{1H})}{(I_{I\Pi}U_{1H}) \cdot (I_{I\Pi\Pi}U_{1H})} = \frac{U_{кII}}{U_{кI}} \cdot \frac{U_{1H}}{U_{1H}}; \quad \frac{S_I S_{II}}{S_{I\Pi} S_{I\Pi\Pi}} = \frac{u_{кII} \%}{u_{кI} \%}.$$

Следовательно, $\frac{S_I}{S_{I\Pi}} : \frac{S_{II}}{S_{I\Pi\Pi}} = \frac{1}{u_{кI} \%} : \frac{1}{u_{кII} \%}$ – мощности параллельно работающих трансформаторов, выраженные в долях от их номинальных мощностей, относятся друг к другу, как обратные значения номинальных напряжений короткого замыкания. Практически разрешается различие между $U_{к}$ в $\pm 10\%$ от их среднего значения.

8. Трехфазные асинхронные машины

8.1. Назначение и области применения асинхронных машин

Асинхронная машина – это машина, в которой при работе возбуждается вращающееся магнитное поле, но ротор которой вращается асинхронно, т.е. со скоростью, отличной от скорости поля. Она была изобретена М.О. Доливо-Добровольским в 1888г., но до настоящего времени сохранила в основном ту простую форму, которую ей придал русский изобретатель. Асинхронные машины средней мощности (1 ÷ 100 кВт), работающие в режиме двигателя, нашли широкое применение для приводов производственных механизмов (95% приводов переменного тока имеют в своем составе асинхронный двигатель).

Асинхронные двигатели производят мощностью от нескольких десятков Ватт до 15000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Одной из основных причин исключительно широкого распространения асинхронного двигателя является простота конструкции, что обеспечивает низкую себестоимость, надежность, высокий срок службы. В машине отсутствуют какие-либо легко повреждающиеся или быстро изнашивающиеся электрические части, поэтому нет необходимости в частых ревизиях. В асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором нет скользящего контакта, что позволяет использовать его в агрессивных средах. К достоинствам асинхронного двигателя также относится высокий пусковой момент (в 1.8 ÷ 2 раза превышает номинальный) и высокая перегрузочная способность (максимальный момент в 2 ÷ 2.5 раза превышает номинальный). Асинхронный двигатель может работать с длительной перегрузкой, допускает частые пуски, остановки и реверсы.

Основные недостатки асинхронных двигателей – сложность регулирования частоты вращения и относительно низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$). У асинхронного двигателя коэффициент мощности при полной нагрузке может достигать значения $0.85 \div 0.9$; при недогрузках двигателя он резко уменьшается и при холостом ходе составляет $0.2 \div 0.3$.

8.2. Устройство асинхронной машины

Асинхронная машина состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора. Статор состоит из магнитопровода с пазами. Магнитопровод набирается из отдельных колец, изготовленных из листов электротехнической стали толщиной 0.5 мм, причем эти кольца изолированы друг от друга слоем лака. Это делается для уменьшения магнитных потерь от вихревых токов и гистерезиса. В пазы статора укладывается трехфазная обмотка, которая может быть соединена либо в звезду, либо в треугольник. Пакет статора запрессован в корпус – станину, который крепится к неподвижному жесткому основанию. Станина может быть выполнена из пластмассы, алюминия или чугуна. Начала и концы фазных обмоток выведены на клеммник, закреплённый на станине.

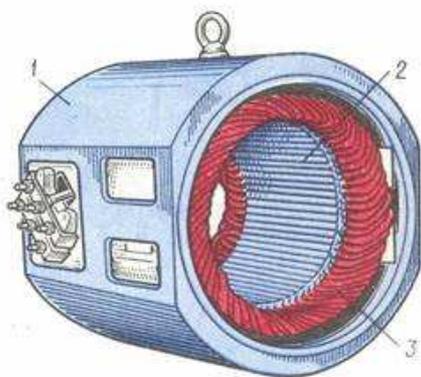


Рис. 8.1. Сердечник статора
1 – станина; 2– листы;
3 – трехфазная обмотка

Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/ Δ . Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{\text{л}} = 660\text{В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{\text{л}} = 380\text{В}$ – по схеме треугольник.

Ротор асинхронной машины представляет собой цилиндрический сердечник, собранный из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. Сердечник ротора насажен на вал, который вращается в подшипниках, укрепленных в боковых щитах, называемых подшипниковыми щитами. В пазах ротора располагаются витки обмотки ротора.

В большинстве двигателей (80%) применяется короткозамкнутый ротор (рис.8.2, б). Он значительно дешевле и его обслуживание значительно проще. Обмотка такого ротора (рис. 8.2, б) выполняется из алюминия путем заливки его в пазы ротора под избыточным давлением. Короткозамкнутую обмотку называют «беличья клетка» (рис. 8.2, а), и в электрическом отношении она представляет собой многофазную обмотку, соединенную звездой и замкнутую накоротко.

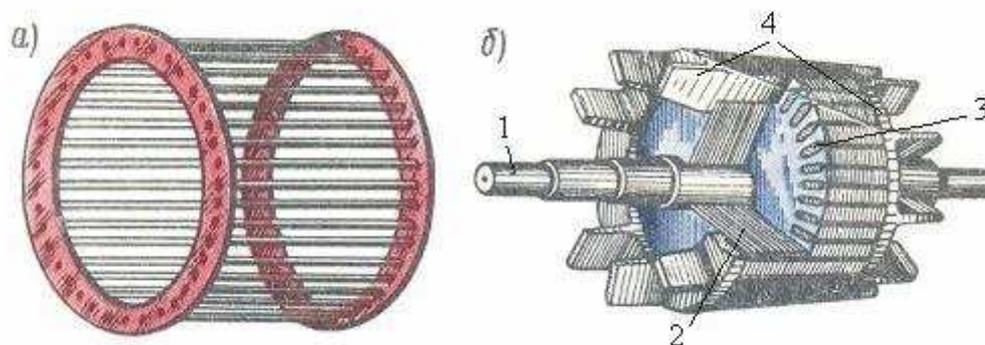


Рис. 8.2.

а – «беличья клетка»; б – короткозамкнутый ротор,
 где 1 – вал; 2– листы ротора; 3 – стержни;
 4 – торцевые кольца

На рис. 8.3 приведен вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.

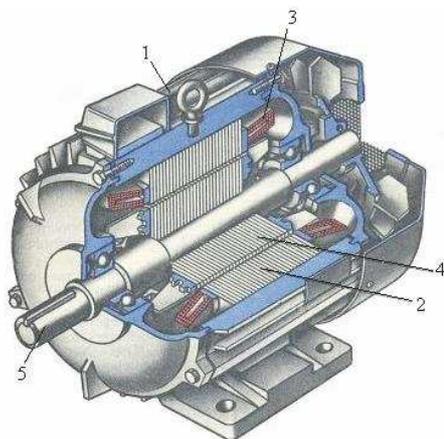


Рис. 8.3

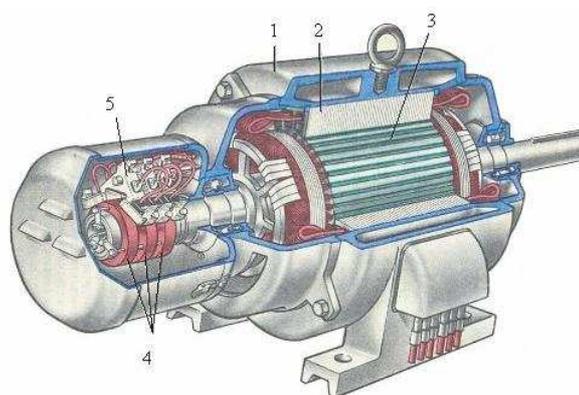
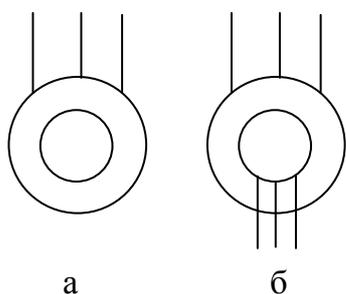


Рис. 8.4

На рис. 8.4 приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – статор, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки. Обмотка фазного ротора выполняется по типу статорной и может быть соединена либо звездой, либо треугольником.

Концы обмотки ротора выводятся на контактные кольца, расположенные на валу машины. На кольца наложены щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки обмотка ротора



а
б
Рис. 8.5

присоединена к трехфазному реостату. Включение реостата в цепь ротора дает возможность существенно улучшить условия пуска двигателя – уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент, кроме того, с помощью реостата, включенного в цепь ротора, можно плавно регулировать скорость двигателя.

На рис. 8.5 приведены условные обозначения асинхронных машин с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором на схеме замещения.

8.3. Создание вращающегося магнитного поля

Если три катушки, расположенные по окружности под углом 120° друг относительно друга, включить в трехфазную сеть переменного тока, а в центре этой окружности поместить магнитную стрелку на оси, то стрелка придет во вращение. Следовательно, эти три катушки создают вращающееся магнитное поле.

Рассмотрим механизм создания вращающегося магнитного поля. Зависимости токов в катушках от времени изображены на рис. 8.6. Выберем четыре момента времени t_1 , t_2 , t_3 и t_4 через одну шестую часть периода. Для каждого из этих моментов последовательно изобразим направление результирующего магнитного поля внутри статора трехфазной машины, которая имеет три обмотки по одному витку (рис. 8.6). Начала обмоток обозначим буквами A , B и C , а концы – X , Y и Z соответственно. Ток в начале обмотки будем считать направленным к нам (обозначается точкой), если его значение положительно. Крестиком обозначено направление от нас. В момент времени t_1 обмотка $A-X$ потока не создает ($i_A = 0$); в начале обмотки B ток направлен от нас ($i_B < 0$), а в конце этой обмотки Y – к нам; в начале обмотки C ток направлен к нам ($i_C > 0$), а в конце этой обмотки Z – от нас. Таким образом в двух расположенных рядом проводниках C и Y , перпендикулярных к плоскости чертежа, токи в момент t_1 направлены в одну сторону и создают магнитное поле, направленное по правилу буравчика против часовой стрелки, а токи в проводниках B и Z создают магнитное поле, направленное по часовой стрелке. Оба магнитных поля в центре статора имеют одинаковое направление (вверх) и складываются. Направление суммар-

ного магнитного поля показано на рис. 8.6 стрелкой. Определяя аналогичным образом направление суммарного магнитного поля в моменты времени t_2 , t_3 и t_4 , мы увидим, что направление магнитного поля за половину периода измениться на 180° . Легко убедиться, что за период направление суммарного магнитного поля сделает один оборот и, следовательно, скорость вращения магнитного поля в данном случае будет равна частоте переменного тока. В этом случае обмотка статора создает магнитное поле с одной парой полюсов и называется двухполюсной.

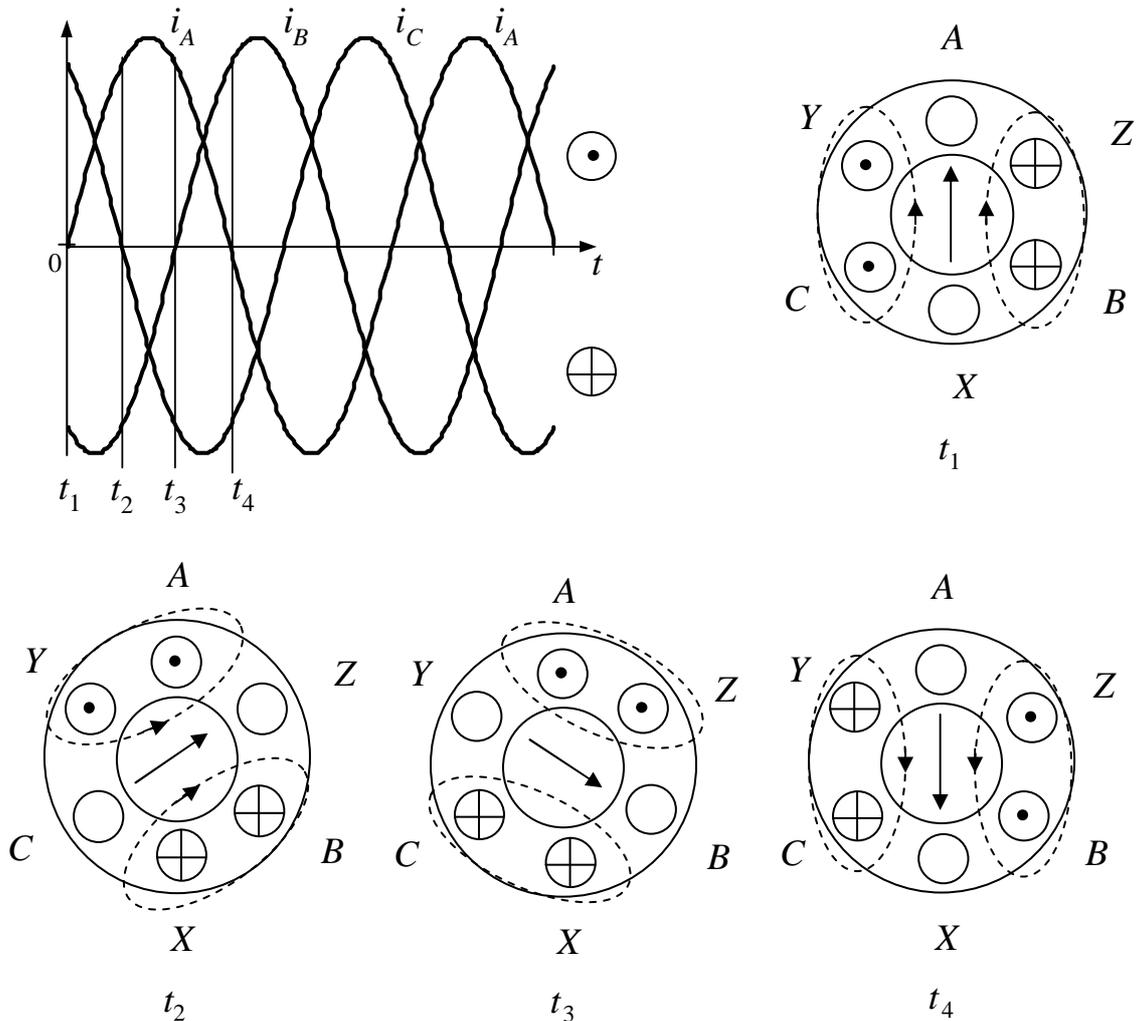


Рис. 8.6

Таким образом, внутри статора существует постоянное по значению равномерно вращающееся магнитное поле. Основным условием создания такого поля является пространственный и временной сдвиг токов на 120° .

Этот способ создания вращающегося магнитного поля положен в основу устройства трехфазных асинхронных двигателей. Если поменять

любые две фазы местами (при этом изменится последовательность токов), то суммарное магнитное поле будет вращаться против часовой стрелки. Изменением последовательности чередования фаз пользуются для изменения направления вращения ротора, т.е. для реверсирования.

Если обмотка статора состоит из шести катушек (по две последовательно соединенные катушки на каждую фазу), размещенных в двенадцати пазах, то за половину периода переменного тока вектор магнитной индукции повернется на четверть оборота, а за полный период – на пол-оборота. Вместо двух полюсов на трех обмотках теперь магнитное поле имеет четыре полюса (две пары полюсов).

Таким образом, если обмотка статора имеет 2, 3, 4 и т.д. пары полюсов, то вектор магнитной индукции за время одного периода изменения тока повернется соответственно на $1/2$, $1/3$, $1/4$ и т.д. часть окружности статора. В общем случае, обозначив буквой p число пар полюсов, мы можем сделать вывод, что угол, описанный вектором магнитной индукции за время одного периода изменения тока, равен одной p -й части окружности статора и, следовательно, скорость вращения магнитного поля n_1 обратно пропорциональна числу пар полюсов:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (об/мин),}$$

где f – частота переменного тока в Гц, а коэффициент 60 появился из-за того, что n_1 принято измерять в оборотах в минуту.

Поскольку число пар полюсов может быть только целым, то скорость вращения магнитного поля может принимать только определенные значения, представленные в таблице 1.

Таблица 1

p	1	2	3	4	5	6	8	12	24
n_1	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	125

8.4. Режимы работы трехфазной асинхронной машины

Режим двигателя: на обмотку статора подается симметричная система токов и в машине создается вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_1 . Силовые линии этого поля пересекают обмотку ротора, и в ней по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, и по обмотке протекают токи. Взаимодействие вращающегося магнитного поля и токов ротора создает вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения

n_2 соответствует равенству вращающего момента $M_{вр}$ тормозному M_T , приложенному к валу от приводимого во вращение механизма, и внутренних сил трения. Такой режим работы асинхронной машины является двигательным и, очевидно, при нем $0 \leq n_2 < n_1$. По принципу работы ротор не может иметь скорость, равную n_1 , т.к. в этом случае ротор оказывается неподвижным по отношению к полю статора и в обмотке ротора не наводится ЭДС. Такой режим называется режимом идеального холостого хода.

Относительную разность частот вращения магнитного поля и ротора называют *скольжением*:
$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Очевидно, что при двигательном режиме $0 < s < 1$ и асинхронная машина преобразует электрическую энергию в механическую.

Режим генератора: В режим генератора машина переходит в том случае, если ротор сторонними силами (например, каким-либо двигателем) приводится во вращение в ту же сторону, что и поле статора со скоростью, большей чем n_1 . В этом случае ЭДС ротора меняет знак на противоположный и избыток подведенной механической мощности преобразуется в электрическую и отдается в сеть. Таким образом, машина потребляет из сети реактивную мощность для создания вращающегося магнитного поля и отдает в сеть активную мощность.

Источником реактивной энергии может служить синхронный генератор, работающий параллельно с асинхронным на общую сеть, следовательно, асинхронный генератор не может работать независимо, а работая параллельно на сеть, он своим реактивным током ухудшает общий коэффициент мощности установки. Однако возможна и автономная работа асинхронного генератора, так как необходимую реактивную мощность могут давать включенные параллельно с ним статические конденсаторы. В генераторном режиме $s < 0$.

Режим электромагнитного тормоза: Машина переходит в этот режим, если к валу приложен активный момент, направленный против вращения магнитного поля. При этом он больше момента, развиваемого двигателем. Ротор при этом вращается в противоположную вращению поля сторону и $s > 1$. Режим тормоза применяется для быстрой остановки двигателя или когда целесообразно использовать асинхронную машину для торможения приводного механизма, например в крановых и подъемных устройствах при спуске грузов. Для того чтобы перевести двигатель в режим тормоза, применяется противовключение, т.е. посредством переключения двух проводов, питающих статор, изменяется

направление вращения магнитного поля, и оно становится противоположным направлению вращения ротора.

Таким образом, характерной особенностью асинхронной машины является наличие скольжения, т.е. неравенство частот вращения. Только при этом условии в проводниках обмотки ротора индуцируется ЭДС и возникает момент. По этой причине машину называют асинхронной (ее ротор вращается не синхронно с полем).



Рис. 8.7

На рис. 8.7 построена линейная характеристика $n_2(s)$, на которой отображены все режимы работы асинхронной машины.

На практике чаще всего встречается двигательный режим, поэтому теорию асинхронных машин будем изучать применительно к этому режиму с последующим обобщением ее на другие режимы работы.

8.5. Механическая характеристика двигателя

Под механической характеристикой понимают зависимость установившейся частоты вращения от момента, развиваемого двигателем. Различают естественные и искусственные характеристики. Естественная – это характеристика, снятая при номинальном напряжении и отсутствии дополнительных сопротивлений в контурах машины. Все остальные характеристики – искусственные.

Для асинхронного двигателя могут быть построены характеристики как в осях M, s (рис. 8.9); так и в осях n_2, M (рис 8.10).

Для асинхронных двигателей средней мощности характерны следующие соотношения:

$$1) \text{ кратность пускового момента } m_{\Pi} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}} = 1.8 \div 2;$$

2) кратность максимального момента $m_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2 \div 2.5$.

m_{\max} характеризует перегрузочную способность двигателя. Максимальный момент достигается при критическом скольжении $s_{\text{кр}}$. Максимум вращающего момента разделяет кривую (рис. 8.9) на устойчивую часть от $s = 0$ до $s_{\text{кр}}$ и неустойчивую часть от $s_{\text{кр}}$ до $s = 1$, в пределах которой вращающий момент уменьшается с ростом скольжения.

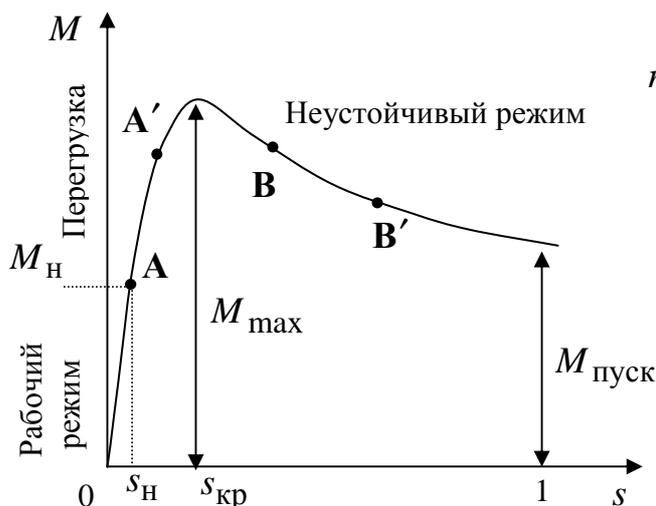


Рис. 8.9

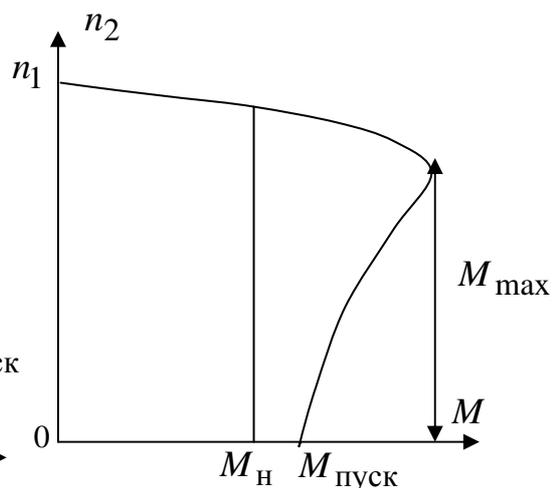


Рис. 8.10

Рассмотрим условия саморегулирования машины. Предположим, что машина работала при номинальном вращающем моменте в точке **A** (рис. 8.9). При внезапном увеличении нагрузки скорость вращения ротора падает, что приводит к увеличению скольжения s и машина развивает больший момент (точка **A'**). Условие устойчивости машины $\frac{dM}{ds} > 0$. У работающего двигателя динамическое равновесие моментов автоматически восстанавливается при увеличении скольжения, пока тормозной момент меньше максимального. Но когда тормозной момент становится равным максимальному, тогда при дальнейшем увеличении нагрузки, возрастание скольжения будет лишь уменьшать вращающий момент; таким образом, динамическое равновесие, нарушенное увеличением нагрузки, не восстанавливается, и вследствие преобладания тормозного момента двигатель останавливается. Условие неустойчивой работы машины $\frac{dM}{ds} < 0$. Например, если машина работала в точке **B**, то при увеличении нагрузки частота вращения уменьшается, скольже-

ние возрастает, но вращающий момент уменьшается (точка \mathbf{B}'). Если продолжать увеличивать нагрузку, машина может остановиться.

Для упрощенного анализа можно пользоваться приближенным уравнением механической характеристики:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}.$$

Для целей электропривода большое значение имеет зависимость скорости двигателя от нагрузки на валу $n_2 = f(M)$. Анализируя эту зависимость, можно сделать вывод, что скорость асинхронного двигателя лишь незначительно снижается при увеличении вращающего момента в пределах от нуля до максимального значения. Такая механическая характеристика называется *жесткой*.

Механическая характеристика асинхронного двигателя в пределах от $s = 0$ до $s_{\text{кр}}$ является жесткой, в остальной своей части нужно считать ее мягкой.

8.6. Пуск в ход асинхронных двигателей

В силу электрической, магнитной и механической инерционности пуск в ход асинхронных двигателей сопровождается электромеханическими переходными процессами. Это вызывает возникновение значительных пусковых токов и моментов, что может привести к механическим и тепловым повреждениям электрической машины. В зависимости от габаритов и массы вращающихся частей переходные процессы могут длиться от долей секунды до десятков секунд.

Кроме того, аппараты защиты (в частности плавкие предохранители) рассчитаны на $2 \div 2.5$ кратное превышение номинального тока. При большей кратности они просто не выполняют свои функции – защиту двигателя от длительных перегрузок и коротких замыканий.

Поэтому возникает задача ограничения пусковых токов и моментов. Пусковые свойства асинхронного двигателя определяются особенностями его конструкции, в частности устройством ротора.

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Пусковые условия такого двигателя могут быть существенно улучшены ценой некоторого усложнения его конструкции и обслуживания. У такого двигателя в каждую фазу цепи ротора вводится пусковой секционированный реостат (рис. 8.11). Характеристики 1,2,3 – искусствен-

ные, соответствующие работе асинхронного двигателя с введенными в цепь ротора секциями реостата, имеющего сопротивления $R_{\Pi}, R'_{\Pi}, R''_{\Pi}$; характеристика 4 – естественная, которую имеет двигатель при выведенном пусковом реостате. Критическое скольжение пропорционально активному сопротивлению цепи ротора. Полное сопротивление реостата подбирается таким образом, чтобы $s_{кр} = 1$. В этом случае в момент пуска двигатель развивает максимальный момент (применяется для тяжелых условий пуска).

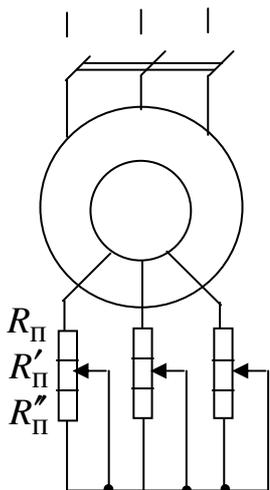


Рис. 8.11

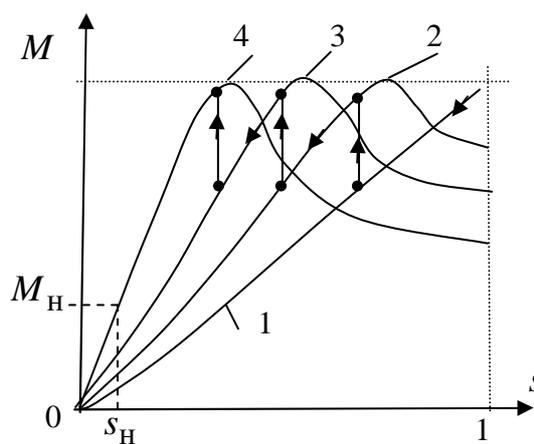


Рис. 8.12

Пуск двигателя происходит с момента включения обмотки статора в сеть. При этом в ротор вводят все секции пускового реостата, благодаря чему начальный пусковой момент значительно увеличивается (характеристика 1), а пусковой ток уменьшается. По мере разгона двигателя токи ротора и статора уменьшаются, и часть пускового реостата R''_{Π} закорачивают. Рабочая точка перемещается на новую характеристику 2, соответствующую сопротивлению реостата $R_{\Pi} + R'_{\Pi}$, а затем на характеристику 3. В конце пуска закорачивают весь пусковой реостат, и рабочая точка перемещается по естественной механической характеристике 4 до номинального момента (рис. 8.12).

Применение пускового реостата значительно улучшает пусковые условия асинхронного двигателя, повышая пусковой момент и уменьшая бросок тока. Недостатками фазного ротора являются удорожание машины, усложнение ее обслуживания, а также длительность и сложность управления ступенями пускового реостата.

Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором

В большинстве случаев применяется прямой пуск. Такой пуск исключительно прост и быстр. Необходим рубильник или для двигателя высокого напряжения – масляный выключатель. При прямом пуске кратность пускового тока высока, примерно $5.5 \div 7$ (для двигателей мощностью $0.6 \div 100$ кВт). Такой кратковременный толчок пускового тока относительно безопасен для двигателя, но вызывает потери напряжения в сети, и может неблагоприятно сказаться на других потребителях, подключенных к этой сети. По этим причинам допустимая номинальная мощность асинхронных двигателей, пускаемых прямым включением, зависит от мощности распределительной сети. В мощных сетях промышленных предприятий допускается прямой пуск двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 1000 кВт и даже выше, но в большинстве случаев эта мощность не должна превышать 100 кВт.

Следует обратить внимание еще на один недостаток. У нормальных двигателей с короткозамкнутым ротором кратность пускового момента лежит в пределах $1 \div 2$. Таким образом, двигатель при пуске потребляет большую силу тока, а развивает относительно небольшой вращающий момент.

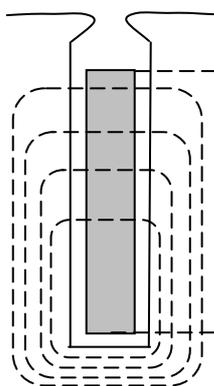


Рис. 8.13

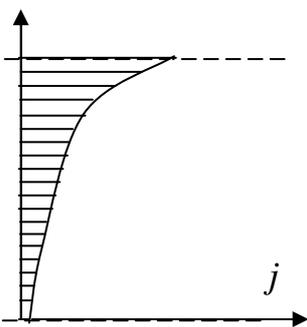


Рис. 8.14

Для облегчения процесса пуска применяют двигатели с *глубокими пазами*. Обмотка ротора этого двигателя изготавливается из прямоугольных стержней малой ширины и большой высоты, которые помещаются в глубокие пазы в сердечнике ротора. В таких пазах ощутимо проявляется эффект вытеснения тока, т.е.

переменный ток распределяется по сечению стержня неравномерно. На рис. 8.13 показаны магнитные линии поля рассеяния, замыкающиеся поперек глубокого паза, в котором расположен стержень обмотки с током. Представим себе, что стержень по высоте разделен на большое число слоев. Нижние слои стержня сцепляются с большим числом магнитных линий, чем верхние. Поэтому их индуктивное сопротивление больше, чем у верхних слоев. При большой частоте токов в обмотке ротора $f_2 = sf$, где f – частота сети (при пуске $s = 1$) индуктивное сопротивление отдельных слоев значительно выше их активного сопротивления. Поэтому распределение тока по слоям будет определяться, в ос-

новном, их индуктивными сопротивлениями. Таким образом, ток в стержне вытесняется в верхнюю часть паза в процессе пуска. При этом площадь сечения стержня используется не полностью, и вследствие этого увеличивается активное сопротивление обмотки ротора R_2 , что приводит к повышению пускового момента, а увеличение индуктивного сопротивления уменьшает пусковой ток. По мере разгона скольжение уменьшается ($s_H = 0.03 \div 0.05$) и эффект вытеснения практически не проявляется, ток распределяется по сечению стержня почти равномерно и двигатель работает, как обычный короткозамкнутый. На рис. 8.14 показано распределение плотности тока j от высоты стержня.

Наиболее заметно эффект вытеснения тока проявляется в двигателях с **двойной клеткой**. Короткозамкнутый ротор снабжается двумя клетками, лежащими в теле ротора одна над другой: верхней – пусковой и нижней – рабочей. Верхняя клетка выполнена из марганцовистой латуни (высокое удельное сопротивление), нижняя – из красной меди, и ее стержни имеют большее сечение. Таким образом, активное сопротивление верхней клетки значительно больше активного сопротивления нижней (в $4 \div 5$ раз). Индуктивность нижней клетки велика, так как стержни этой клетки окружены сталью. У верхней клетки индуктивность значительно меньше, так как поток рассеяния вокруг ее стержней встречает на своем пути большое магнитное сопротивление воздушного промежутка между ротором и статором.

В первый момент пуска двигателя (пока $s = 1$) частота токов в роторе равна частоте сети; в этих условиях полное сопротивление внутренней клетки обуславливается главным образом ее большим индуктивным сопротивлением. Таким образом, при пуске двигателя в роторе имеет место вытеснение тока из внутренней клетки. В то же время полное сопротивление наружной клетки определяется преимущественно ее активным сопротивлением, и ток этой клетки создает большой пусковой момент. По мере разбега ротора частота токов в нем уменьшается и вместе с тем уменьшается и влияние индуктивного сопротивления на распределение токов. При номинальной скорости частота токов ротора имеет значение порядка 1 Гц: в этих условиях индуктивные сопротивления рассеяния весьма малы и распределение токов между клетками ротора определяется отношением активных сопротивлений клеток. Поэтому большая часть тока проходит по нижней клетке, а результирующее активное и полное сопротивления ротора в таких условиях малы, как у обычного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Таким образом, у двигателей с двойной беличьей клеткой активное сопротивление обмотки ротора меняется в зависимости от изменения

скольжения – оно велико при пуске и мало при рабочем скольжении, благодаря чему двигатель развивает повышенный пусковой момент при пониженном пусковом токе.

8.7. Методы регулирования частоты вращения двигателей

Частота вращения ротора асинхронного двигателя определяется соотношением: $n_2 = \frac{60f}{p}(1-s)$ следовательно, изменять ее можно меняя частоту сети, скольжение или число пар полюсов.

Для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором обычно используется метод частотного регулирования и метод изменения числа пар полюсов вращающегося магнитного поля. Для регулирования частоты вращения двигателя с фазным ротором применяется метод реостатного регулирования.

Частотное регулирование

Наиболее перспективным методом управления частотой вращения асинхронного двигателя является регулирование частоты переменного тока в обмотках статора.

При изменении частоты питающего напряжения при неизменном напряжении сети U_1 изменяется и магнитный поток $\Phi = \frac{U_1}{C_e n_1}$, где C_e – постоянный коэффициент. Для сохранения магнитного потока, а, следовательно, и момента постоянными используют пропорциональное регулирование: $\frac{U_1}{f} = const$ – одновременно с регулированием частоты должно изменяться и действующее значение напряжения.

Эту задачу решают с помощью современных электронных устройств, которые включают между сетью и асинхронным двигателем. Сначала напряжение трехфазной сети выпрямляется, а затем инвертор преобразует выпрямленное напряжение в трехфазную систему напряжений нужной частоты. В системе преобразования предусмотрено автоматическое согласование значений U_1 и f , обеспечивающее требуемое значение максимального момента. Такие преобразователи называются тиристорными и основаны на полупроводниковых электронных приборах – тиристорах.

Семейство механических характеристик с частотным регулированием представлено на рис. 8.15.

Логика работы тиристорного преобразователя зависит от того, в какую сторону от номинальной частоты требуется осуществлять регулирование. Если нужно обеспечить частоту, меньше номинальной $n < n_1$, преобразователь автоматически одновременно с уменьшением f уменьшает значение U_1 , сохраняя неизменность максимального момента. Для случая $n > n_{ном}$ соблюдение условия постоянства M_{max} не выполняется, т.к. требует регулирования напряжения U_1 выше номинального. Также, во избежание перегрузки двигателя по мощности его длительная работа при частотах вращения, выше номинальных, допустима только

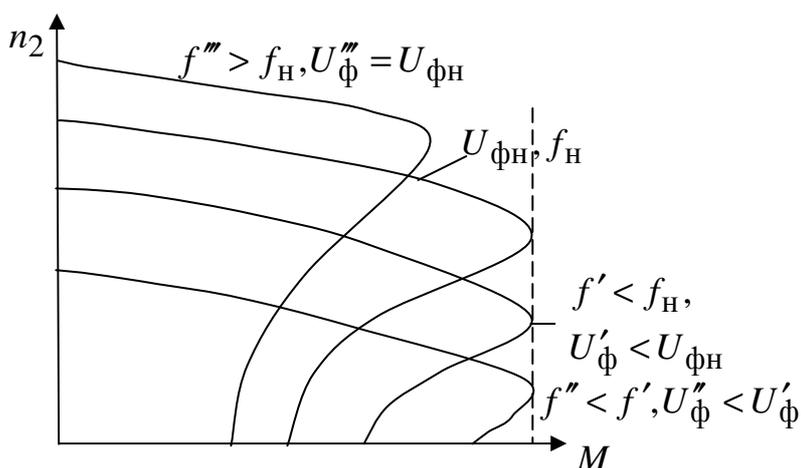


Рис. 8.15

при снижении нагрузки на валу.

Необходимо отметить, что при частотном регулировании мощность будет изменяться пропорционально частоте, например, при уменьшении частоты в 2 раза вдвое уменьшается и мощность, отдаваемая двигателем на валу.

Достоинствами метода частотного регулирования являются экономичность, плавность и большой диапазон регулирования. Но в настоящее время преобразователь частоты по цене может быть равным асинхронному двигателю.

Регулирование изменением числа пар полюсов

Ступенчатое изменение угловой скорости двигателя в широких пределах переключением числа пар полюсов осуществимо ценой усложнения и удорожания его конструкции.

При постоянной частоте сети угловая скорость поля зависит только от числа полюсов этого поля, определяемого обмоткой статора. Если на статоре поместить две отдельные обмотки – одну, образующую p пар, а другую, образующую p' пар полюсов, то, включив в сеть первую или вторую обмотку, мы получим скорость поля: $n_c = \frac{60f}{p}$ или $n'_c = \frac{60f}{p'}$;

следовательно, $\frac{n_c}{n'_c} = \frac{p'}{p}$, т.е. соответственным образом будут различаться и частоты вращения ротора.

Регулирование скорости путем переключения числа пар полюсов – ступенчатое. Следует иметь в виду, что частоты вращения при частоте сети 50 Гц и $p = 1$ и 2 соответственно 3000 и 1500 об/мин, а при $p = 5$ и 6 – 600 и 500 об/мин. При большем числе пар полюсов разница между частотами вращения уменьшается.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростными. Промышленностью выпускаются двигатели на две, три и четыре скорости.

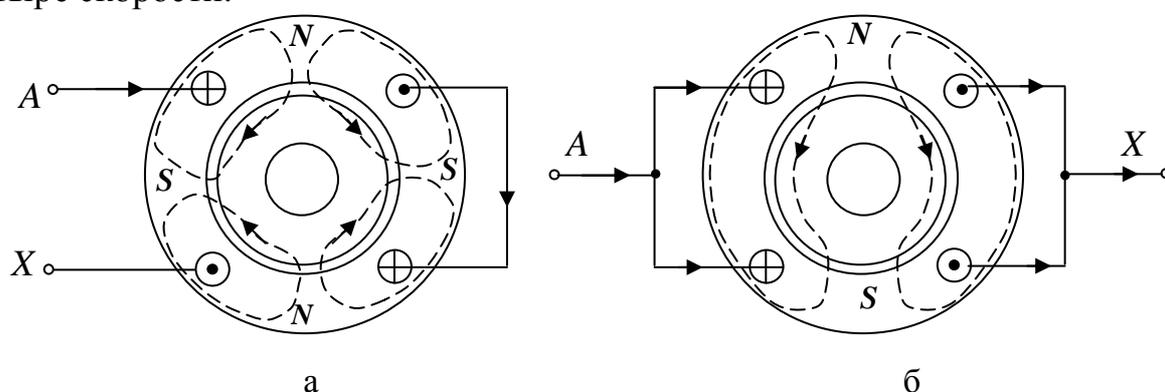


Рис. 8.16

Для изменения числа пар полюсов в одни и те же пазы статора можно уложить отдельные обмотки с разными числами полюсов. В зависимости от необходимой частоты вращения включается одна или другая обмотка. Двумя отдельными обмотками снабжаются статоры только у двигателей небольшой мощности; у двигателей большой мощности целесообразнее переключение катушек одной и той же обмотки для получения различного числа пар полюсов. Пример такого переключения двух катушек одной фазы показан на рис. 8.16, а, б. В первом случае катушки включены последовательно, во втором – параллельно. В результате изменится направление тока в проводниках, составляющих фазу обмотки, и топография магнитного поля станет иной. При последовательном соединении катушек образуются четыре полюса, при параллельном – лишь два.

Достоинствами данного способа являются экономичность и большой диапазон регулирования, к недостаткам следует отнести большую дискретность изменения частоты и усложнение конструкции обмотки статора.

Реостатное регулирование

Данный способ требует применения двигателя с фазным ротором, в цепь которого, как при пуске (см. рис. 8.11) вводится трехфазный реостат. Но этот реостат должен быть рассчитан на длительную нагрузку током ротора, а не на кратковременную, как пусковой реостат. Увеличение активного сопротивления цепи ротора изменяет характеристику

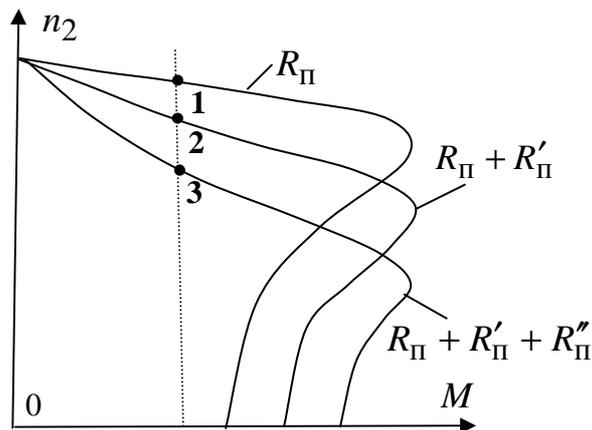


Рис. 8.17

$n_2(M)$, делает ее более полой. Если при постоянном моменте на валу двигателя увеличивать сопротивление цепи ротора путем постепенного увеличения сопротивления реостата ($R_{\text{П}} < R'_{\text{П}} < R''_{\text{П}}$), то рабочая точка будет смещаться с одной кривой на следующую, соответствующую возросшему сопротивлению цепи ротора (точки 1, 2, 3). В результате частота вращения двигателя

будет уменьшаться.

Этим путем можно изменять частоту вращения ротора в пределах от номинального скольжения до полной остановки. Но при таком способе регулирования неизбежны относительно большие потери энергии. Например, для уменьшения скорости двигателя на 25%, нужно включить такое сопротивление в цепь ротора, в котором будет бесполезно превращаться в тепло четверть энергии вращающегося поля. Реостатное регулирование также неэффективно при малых нагрузках, так как частота вращения практически не меняется. Недостатком такого реостатного регулирования может являться и то обстоятельство, что включение сопротивления в цепь ротора делает его механическую характеристику мягче, следовательно, уменьшает устойчивость работы двигателя, так как при включенном реостате малые изменения нагрузки на валу вызывают значительные изменения частоты вращения двигателя.

8.8. Рабочие характеристики двигателя

Рабочими характеристиками называют зависимости мощности, потребляемой двигателем P_1 , потребляемого тока обмотки статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, скорости вращения двигателя n_2 , КПД

$\eta = \frac{P_2}{P_1}$ и вращающего момента M от полезной мощности двигателя, отдаваемой на валу P_2 . Эти характеристики определяют основные эксплуатационные свойства асинхронного двигателя и снимаются при номинальных частоте сети f и напряжении на зажимах статора $U_1 = U_H$.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя средней мощности показаны на рис. 8.18.

Зависимость $n_2 = f(P_2)$ мало отличается по форме от $n_2 = f(M)$,

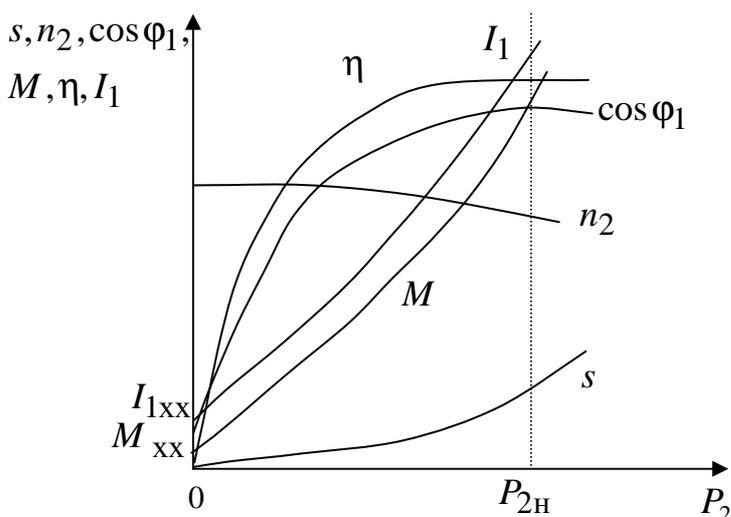


Рис. 8.18

она также может быть названа жесткой. Зависимость тока I_1 от P_2 аналогична зависимости тока первичной обмотки трансформатора от мощности нагрузки. С ростом мощности увеличивается ток ротора I_2 , при этом возрастает и ток статора I_1 , компенсируя размагничивающее действие тока ротора I_2 , при этом

обеспечивается неизменность магнитного потока вращающегося магнитного поля. В асинхронном двигателе ток холостого хода I_{xx} может достигать 50% от номинального значения (из-за наличия воздушного зазора, увеличивающего магнитное сопротивление).

Вращающий момент M складывается из полезного момента M_2 (полезный момент, отдаваемый на валу двигателя) и момента холостого хода M_{xx} (затрачивается на покрытие механических потерь двигателя и не зависит от нагрузки).

Полезный момент $M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2}$, где

$\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ [рад/с] – механическая угловая скорость вращения ротора. Если бы Ω_2 была постоянна, то зависимость $M_2(P_2)$ была бы линейна, но скорость двигателя немного уменьшается с увеличением P_2 , поэтому график зависимости $M_2(P_2)$ немного отклоняется вверх. Соответственно график вращающего момента $M(P_2)$, складывающегося из момента холостого хода и полезного момента $M_2(P_2)$, пересекает ось

ординат в точке, соответствующей $M_{\text{хх}}$, а затем он почти прямолинейн и лишь немного изгибается вверх.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ оценивает соотношение между активной P_1 и реактивной Q_1 мощностями двигателя $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$.

При изменении нагрузки двигателя от холостого хода до номинального режима реактивная мощность остается практически неизменной, так как ее значение определяется обратимыми процессами периодического изменения запаса энергии магнитного поля машины, магнитный поток которого поддерживается практически постоянным.

В режиме холостого хода, когда необратимые процессы преобразования энергии определяются только потерями на нагрев, активная мощность мала, и значение коэффициента мощности также мало. При возрастании нагрузки на валу активная мощность увеличивается, и, при неизменном значении реактивной мощности, растет коэффициент мощности, который в режиме, близком к номинальному, достигает своего наибольшего значения ($0.7 \div 0.95$).

Дальнейшее увеличение тормозного момента на валу приводит к снижению коэффициента мощности, так как рост токов в обмотках приводит к насыщению машины, значительным полям рассеяния, что вызывает возрастание реактивной мощности и уменьшение коэффициента мощности.

Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной мощности P_2 к подводимой от сети P_1 : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, а подводимая мощность равна сумме полезной мощности и мощностей всех потерь в двигателе: $P_1 = P_2 + P_{\text{пот}}$.

Потери можно разделить на постоянные, практически не зависящие от нагрузки, и переменные от нее зависящие.

Постоянными потерями можно считать потери в стали сердечника статора от гистерезиса и вихревых токов и потери механические. Они определяются экспериментально из опыта холостого хода двигателя.

Переменными потерями являются потери на нагревание проводников обмоток статора и ротора:

$$P_{\text{пр1}} = 3I_1^2 R_1; \quad P_{\text{пр2}} = m_2 I_2^2 R_2,$$

где m_2 – число фаз обмотки ротора.

Своего максимального значения ($65 \div 95\%$) КПД достигает, когда переменные потери равны постоянным. У большинства двигателей этот

максимум КПД имеет место при нагрузке, равной 75% номинальной, так как двигатели проектируются с учетом того обстоятельства, что далеко не всегда они полностью загружены.

8.9. Способы электрического торможения асинхронного двигателя

В ряде случаев возникает необходимость экстренного торможения двигателя. Наиболее эффективным является противовключение. В этом

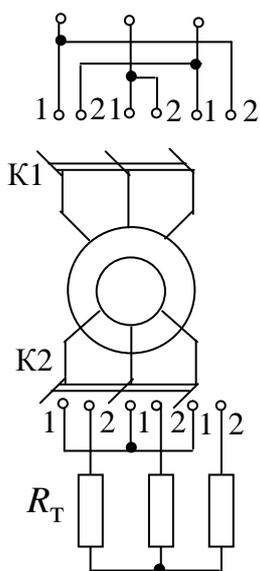


Рис. 8.19

случае, изменяя порядок чередования фаз статора, добиваются изменения направления вращения магнитного поля. В силу механической инерции ротор продолжает вращаться в исходном направлении. Асинхронная машина переходит в режим электромагнитного тормоза со скольжением $s > 1$. При этом частота ЭДС в роторе существенно возрастает, что приведет к росту ЭДС и токов в роторе. Для ограничения токов в роторе на момент торможения в цепь ротора вводится дополнительное сопротивление R_T . Схема торможения противовключением приведена на рис. 8.19.

В момент начала торможения (ключ K1 в статорной обмотке переводится из положения 1 в положение 2) в цепь ротора вводится добавочное сопротивление R_T (ключ K2 в роторной обмотке переводится из положения 1 в положение 2). При полной остановке ротора питание статорной обмотки отключается.

Торможение асинхронного двигателя можно осуществить путем подключения двух фаз обмотки статора на постоянное напряжение (рис. 8.20). В момент торможения обмотки статора отключаются от трехфазной сети переменного тока и подключаются к сети постоянного тока (ключ K переводится из положения 1 в положение 2). Ротор вращается в постоянном в пространстве и времени магнитном поле, что приводит к быстрой остановке асинхронного двигателя.

В момент начала торможения (ключ K1 в статорной обмотке переводится из положения 1 в положение 2) в цепь ротора вводится добавочное сопротивление R_T (ключ K2 в роторной обмотке переводится из положения 1 в положение 2). При полной остановке ротора питание статорной обмотки отключается.

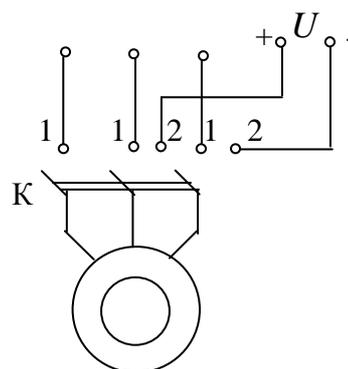


Рис. 8.20

8.10. Двухфазные и однофазные двигатели

Для ряда исполнительных механизмов автоматики, бытовых приборов и т.д. необходимы надежные двигатели переменного тока небольшой мощности, питаемые от одной фазы трехфазной системы. Обмотка ротора ввиду их малой мощности выполняется всегда короткозамкнутой.

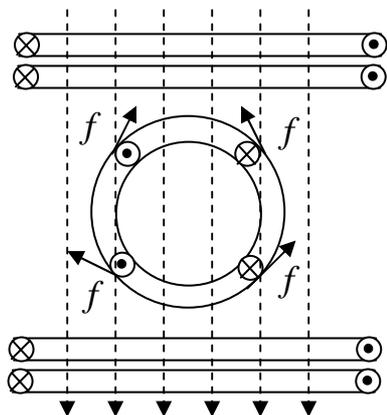


Рис. 8.21

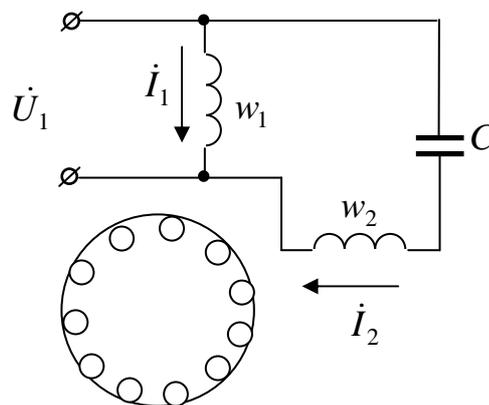


Рис. 8.22

Если снабдить статор двигателя только одной фазной обмоткой, то переменный ток, по ней протекающий, будет возбуждать в машине, пока ее ротор неподвижен, переменное магнитное поле, ось которого неподвижна. Это поле будет индуцировать в проводниках обмотки ротора токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, создадут электромагнитные силы f (рис. 8.21). Так как эти силы окажутся противоположно направленными в правой и левой половинах ротора, то результирующий момент будет равен нулю. Следовательно, при наличии одной обмотки начальный пусковой момент однофазного двигателя равен нулю, и двигатель сам с места тронуться не сможет.

Применяются два способа создания пускового момента, поэтому двигатели делятся на однофазные и двухфазные.

Двухфазные двигатели помимо обмотки, включаемой на напряжение сети с числом витков w_1 , снабжаются второй обмоткой (w_2), которая соединяется последовательно с конденсатором (конденсаторные двигатели). Электрическая схема такого двигателя представлена на рис. 8.22. В пазах статора таких двигателей размещаются две фазные обмотки, каждая из которых занимает половину всех пазов. Смещение катушек в пространстве и временной сдвиг токов I_1 и I_2 обеспечивают условия образования вращающегося магнитного поля.

В качестве двухфазного можно использовать малый трехфазный асинхронный двигатель. Для этой цели две фазные обмотки соединяются последовательно и включаются под напряжение, а третья обмотка соединяется последовательно с конденсатором и включается под то же напряжение (емкость выбирается из расчета 10мкФ на 1кВт мощности двигателя).

Однофазный двигатель не развивает начального пускового момента. Но если ротор однофазного двигателя раскрутить в любую сторону при помощи внешней силы, то в дальнейшем этот ротор будет вращаться самостоятельно и может развивать значительный вращающий момент.

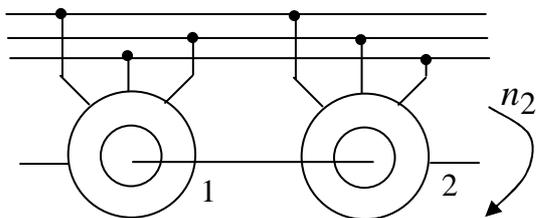


Рис. 8.23

Сходные условия создаются у трехфазного двигателя при перегорании предохранителя в одной из фаз. В таких условиях однофазного питания трехфазный двигатель будет продолжать работать. Но во избежание перегрева двух обмоток, остающихся включенными, необходимо,

чтобы нагрузка двигателя не превышала 50 ÷ 60% номинальной.

Однофазный асинхронный двигатель можно представить как два одинаковых трехфазных асинхронных двигателя, соединенных общим валом и имеющих различный порядок чередования фаз (рис. 8.23). Если

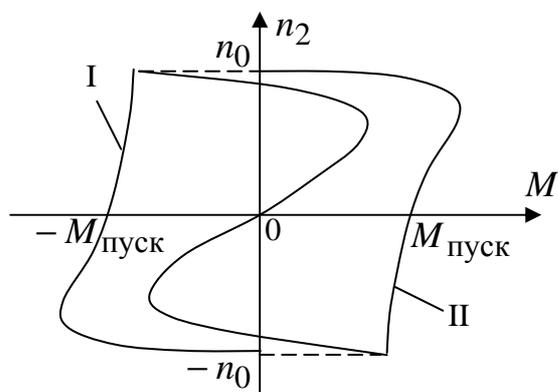


Рис. 8.24

общий вал привести во вращение, то одна машина будет работать в двигательном режиме, а вторая – в режиме электромагнитного тормоза. Из-за разности моментов I и II машины появляется результирующий вращающий момент (рис. 8.24).

В этих условиях вращающий момент, создаваемый прямо вращающимся полем (прямое поле – вращается в одну сторону с ротором), становится значительно больше момента, развиваемого обратным вращающимся полем.

В результате ротор может не только самостоятельно вращаться, но и приводить во вращение какой-либо механизм.

Задача пуска в ход однофазного двигателя решается посредством применения пускового устройства. Чаще всего это дополнительная обмотка, подобная второй обмотке двухфазного двигателя, но отключае-

мая по окончании пуска, так как она рассчитывается лишь на кратковременную нагрузку током. Последовательно с этой обмоткой включается фазосмещающее устройство (например, емкость).

9. Машины постоянного тока

9.1. Назначение и области применения машин постоянного тока

Электрические машины постоянного тока широко применяются в качестве двигателей, несколько меньше – в качестве генераторов. Широкое распространение двигателей постоянного тока объясняется простыми и надежными способами регулирования частоты вращения в широких пределах, большими пусковыми моментами и перегрузочной способностью, чем у двигателей переменного тока. Поэтому их широко используют в электроприводах, требующих глубокого регулирования частоты вращения (металлургическая промышленность, транспорт и т.п.). Генераторы постоянного тока находят широкое применение для питания электролитических ванн, зарядки аккумуляторов, высококачественной сварки.

Диапазон мощностей машин постоянного тока достаточно широк – от единиц ватт до десятков тысяч киловатт (крупные двигатели для прокатных станов, гребных винтов кораблей).

Основной недостаток машин постоянного тока связан с работой щеточно-коллекторного узла. При определенных неблагоприятных условиях щетки могут искрить, что снижает надежность работы и требует надзора и ухода за машиной. Такую машину нельзя использовать во взрывоопасных средах. Коллектор усложняет и удорожает ее конструкцию и эксплуатацию по сравнению с бесколлекторной машиной переменного тока. Тем не менее, область применения машин постоянного тока, достаточно обширна, а появление простых и малогабаритных полупроводниковых выпрямителей позволило широко применять в сетях переменного тока двигатели постоянного тока, соединенные с этими выпрямителями.

9.2. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока (МПТ) состоит из неподвижной части, называемой статором, служащей для возбуждения главного магнитного поля, и вращающейся части, которая называется якорем (ротор).

Статор и якорь отделены друг от друга небольшим воздушным зазором. На рис. 9.1. показан упрощенный поперечный разрез статора четырехполюсной МПТ.

Статор состоит из станины, на которой укрепляются главные полюсы для возбуждения основного магнитного потока и дополнительные полюсы для хорошей коммутации машины.

Главный полюс состоит из сердечника, набранного из листовой электротехнической стали и укрепленного болтами на станине, и обмотки возбуждения. Сердечник на свободном конце снабжается полюсным наконечником для создания требуемого распределения магнитного потока.

Обмотка возбуждения либо питается от постороннего источника постоянного тока, либо от зажимов якорной обмотки. Катушки обмотки возбуждения соединяются последовательно так, чтобы полюсы N и S статора чередовались.

Станина является ярмом машины, т.е. частью, замыкающей магнитную цепь главного потока. Она изготавливается массивной из литой стали, так как магнитный поток в ней относительно постоянен. Дополнительные полюсы устанавливаются на станине между основными. Их сердечники крепятся болтами к станине, а катушки их обмоток соединяются последовательно с якорем.

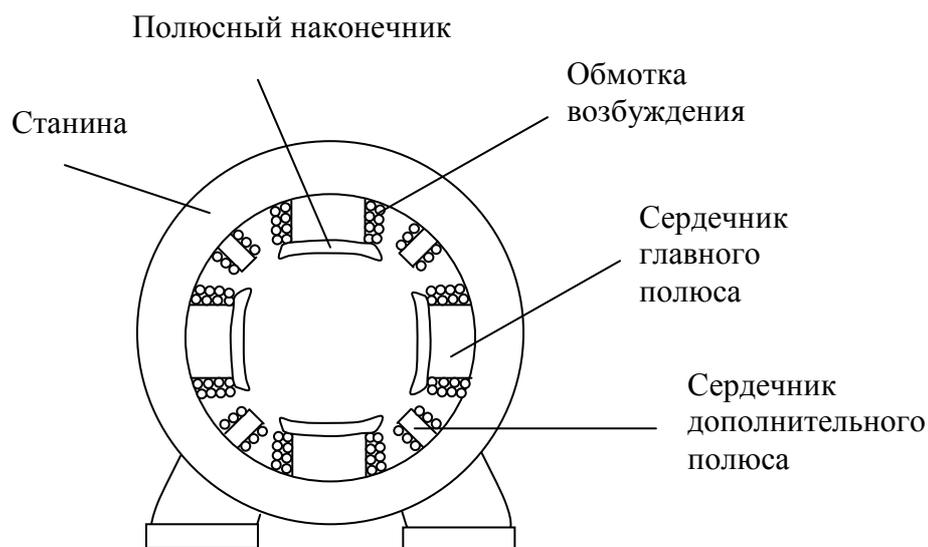


Рис. 9.1

Якорем называют часть машины, в обмотке которой при вращении ее относительно главного магнитного поля индуцируется ЭДС. В машине постоянного тока якорь (рис. 9.2.) состоит из зубчатого сердечника 1, обмотки 2, уложенной в пазах сердечника, и коллектора 3, насаженного на вал якоря. Сердечник набирается из листов электротехнической стали толщиной 0.5 мм, изолированных друг от друга лаком. Для

отвода тока от коллектора служат угольные или медные щетки, установленные в щеткодержателях.

Коллектор – это полый цилиндр, собранный из изолированных друг от друга клинообразных медных пластин 1 (рис. 9.3). Пластины коллектора изолированы также от вала машины. Проводами 2 они соединяются с витками обмотки, размещенной в пазах ротора. На коллектор опираются угольные или металлоугольные щетки 3, помещенные в щеткодержателях, которые крепятся к подшипниковым щитам. Через неподвижные щетки вращающаяся обмотка соединяется с внешней цепью.

Применение коллектора необходимо в генераторах постоянного тока для выпрямления переменной ЭДС, индуцируемой во вращающейся обмотке, а в двигателях постоянного тока коллектор нужен для получения постоянного по направлению вращающего момента.

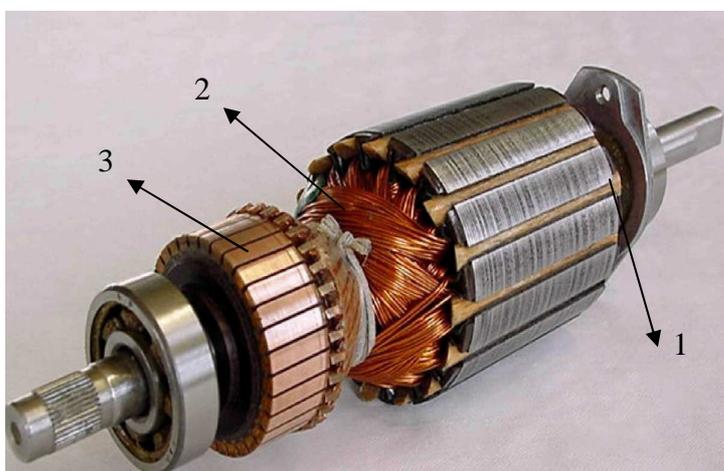


Рис. 9.2

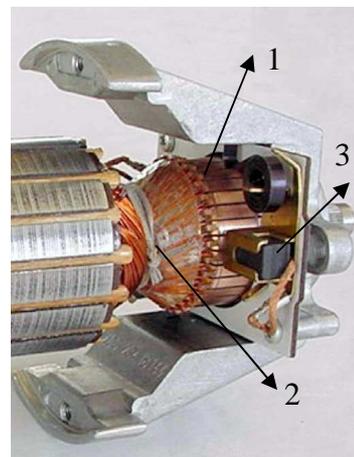


Рис. 9.3

9.3. Режимы работы машины постоянного тока

Как и все электрические машины, машины постоянного тока обратимы.

Машина работает в режиме **генератора**, если ее вращает первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки с приемником. При таких условиях под действием ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, в замкнутой цепи якорь-приемник возникает ток (рис. 9.4, а), совпадающий с ЭДС по направлению. ЭДС якоря рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi \cdot n,$$

где C_E – постоянный для данной машины коэффициент (зависит от числа полюсов, числа параллельных ветвей), n – частота вращения якоря.

Уравнение электрического состояния цепи якоря

$$E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря.

Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает на валу генератора тормозной момент, который преодолевается первичным двигателем. Генератор преобразует механическую энергию в электрическую.

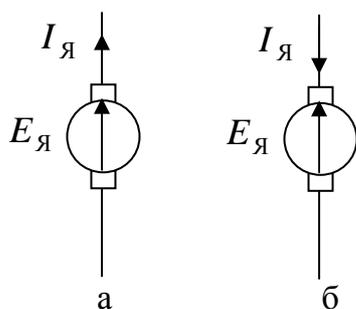


Рис. 9.4

В *двигательном* режиме цепи якоря и возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии. Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает вращающий момент равный

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}},$$

где $C_M = C_E \cdot \frac{60}{2\pi}$ – величина, постоянная для данной машины.

Под действием момента якорь вращается, преодолевая момент нагрузки на валу. При этом ЭДС якоря противодействует току в цепи якоря и направлена ему навстречу (рис. 9.4, б). Приложенное к зажимам якоря двигателя напряжение равно сумме противо-ЭДС и падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря $R_{\text{я}}$: $U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$. Отсюда ток якоря двигателя

$$I_{\text{я}} = \frac{(U - E_{\text{я}})}{R_{\text{я}}}.$$

Возбуждение главного магнитного поля возможно с помощью либо электромагнитов, либо постоянных магнитов (менее распространено).

Все рабочие характеристики машины постоянного тока зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, цепи эти могут быть независимы одна от другой, в соответствие с этим принято различать параллельное, последовательное, смешанное и независимое возбуждение машин. Мощность, затрачиваемая в цепи возбуждения, при любом способе включения обмотки возбуждения мала, порядка 5% номинальной мощности у малых машин и менее 1% у больших. Это делает возможным экономичное управление работой машины постоянного тока.

9.4. Выпрямление переменной ЭДС

На рис. 9.5, а изображена упрощенная модель МПТ. Пусть якорь приведен во вращение двигателем в направлении движения часовой стрелки, обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного напряжения, а внешняя цепь отключена от якоря. При вращении якорной обмотки ее проводники будут пересекать магнитные линии поля статора и в них по закону электромагнитной индукции наведется ЭДС $e = B_n l v$, где B_n – нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре; l – активная длина проводника; v – линейная скорость.

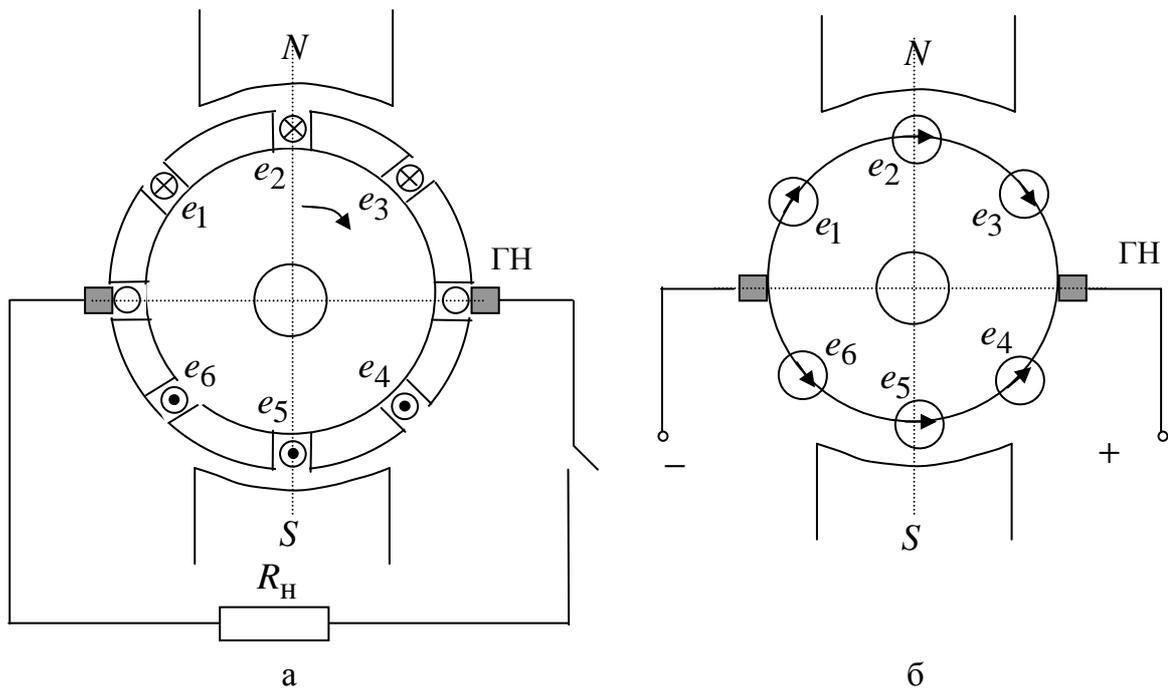


Рис. 9.5

Применяя правило правой руки, можно убедиться, что направление ЭДС $e_1 - e_3$ во всех проводниках, движущихся в зоне северного полюса, будет одинаковым – от переднего торца якоря к заднему (обозначено знаком креста). В проводниках, движущихся в зоне южного полюса, ЭДС будет направлена от заднего торца якоря к переднему ($e_4 - e_6$) (обозначено точкой на рис. 9.5, а).

Геометрическая нейтраль (ГН) – это линия, проходящая через середину межполюсного пространства и середину машины. **Физическая нейтраль (ФН)** – это линия, проходящая через точки окружности якоря, где магнитная индукция равна нулю. В момент перехода проводников через ГН (рис. 9.5, б) ЭДС в них наводиться не будет, так как здесь нормальная составляющая магнитной индукции равна нулю. Следова-

тельно, при вращении якоря в его проводниках, перемещающихся из зоны одного полюса в зону другого полюса, наводятся переменные ЭДС. Ток в обмотке якоря не возникает, так как алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС всех последовательно соединенных проводников этой обмотки равна нулю. Если установить неподвижные щетки для осуществления скользящего контакта с проводниками на ГН, то между щетками всегда будут находиться проводники обмотки с одинаково направленными ЭДС, сумма которых максимальна и постоянна.

Щетки делят обмотку якоря на две части с одинаковым числом последовательно соединенных проводников. Эти части обмотки называют **параллельными ветвями**.

Благодаря наличию щеток напряжение на зажимах машины постоянно, хотя в каждом из проводников обмотки ее якоря индуцируется переменная ЭДС.

При непосредственном контакте щеток с обмоткой якоря условия работы контактов мало благоприятны из-за высокой окружной скорости на поверхности якоря. Поэтому щетки устанавливаются на пластины коллектора, которые соединены проводниками с соответствующими секциями якоря. Щетки через пластины коллектора также соединяют параллельно ветви обмотки, но диаметр коллектора значительно меньше диаметра якоря, благодаря чему существенно меньше его окружная скорость, а механически пластины коллектора значительно прочнее проводников обмотки якоря.

В генераторе щетки и коллектор необходимы для выпрямления переменной ЭДС витков обмотки. В двигателе коллектор и щетки обеспечивают непрерывность вращения. По всем проводникам параллельной

ветви обмотки якоря проходит один и тот же ток $I = \frac{I_{я}}{2a}$, где $2a$ – число

параллельных ветвей. Если на все эти проводники воздействует электромагнитная сила одного и того же направления, то двигатель развивает наибольший вращающий момент. Когда же проводник переходит из области одного полюса в область другого полюса, то одновременно щетки и коллектор производят переключение направления тока, проходящего по проводнику. Благодаря этим переключениям сохраняется неизменным направление вращающего момента.

9.5. Реакция якоря

Реакцией якоря называется воздействие магнитного потока обмотки якоря на магнитный поток возбуждения. В большинстве случаев это нежелательное явление, искажающее основное магнитное поле и тем

самым ухудшающее условия работы машины, поэтому при конструировании машины предусматриваются меры для уменьшения влияния реакции якоря.

Пока ток проходит только по обмотке возбуждения (ток якоря равен нулю), магнитное поле машины симметрично по отношению к оси сердечников полюсов и под полюсами почти равномерно. Но когда по обмотке якоря проходит ток, он создает свое магнитное поле.

При нагрузке машины поле якоря накладывается на основное поле и искажает его. Поток в машине смещается по направлению ее вращения в генераторном режиме или против направления в двигательном режиме. При этом поток распределяется несимметрично по отношению к оси полюсов – ослабляется под одним краем и усиливается под другим, при этом ФН смещается по отношению к ГН. Вследствие этого между щетками в каждой параллельной ветви обмотки окажутся несколько секций, направление ЭДС в которых будет противоположно направлению ЭДС всех остальных секций, что вызовет уменьшение ЭДС якоря.

При работе машины в генераторном режиме реакция якоря вызывает понижение напряжения, при работе в двигательном режиме – изменение вращающего момента и частоты вращения.

Искажение магнитного поля под полюсами сопровождается значительным местным повышением магнитной индукции. Мгновенные значения ЭДС, индуктируемой в секции обмотки при ее движении, пропорциональны этой индукции. Следовательно, искажение поля может вызвать такое повышение напряжения между соседними пластинами коллектора (свыше $30 \div 50$ В), при котором между этими пластинами возможно возникновение весьма опасных устойчивых дуговых разрядов (кругового огня по коллектору).

Для ослабления реакции якоря при конструировании машины предусматривается увеличение магнитного сопротивления на пути потока якоря – воздушный зазор между якорем и полюсными наконечниками делается относительно большим, а сечение зубцов якоря выбирается таким, чтобы индукция в них была велика.

Для того чтобы предупредить смещение ФН из-за реакции якоря, большинство современных машин снабжается **дополнительными полюсами**, которые устанавливаются на станине по линии ГН. Обмотки дополнительных полюсов соединяются через щетки последовательно с обмоткой якоря так, чтобы направление МДС дополнительных полюсов было противоположно направлению МДС реакции якоря. Таким образом, дополнительные полюсы компенсируют поле реакции якоря при любых нагрузках машины.

9.6. Генератор независимого возбуждения

При независимом возбуждении цепи возбуждения и якоря электрически разделены, поэтому ток возбуждения не зависит от напряжения генератора и от нагрузки (рис. 9.6). Это дает возможность регулировать магнитный поток в очень широких пределах. Для такой регулировки в цепь возбуждения вводится регулировочный реостат $R_{\text{ш}}$.

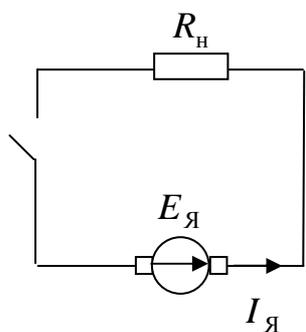


Рис. 9.6

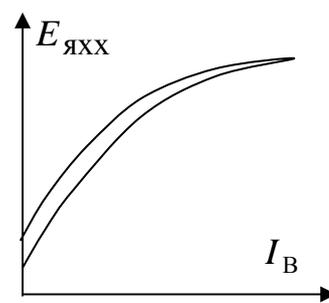
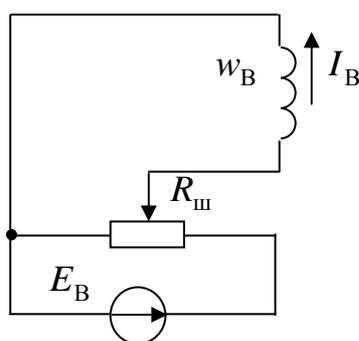


Рис. 9.7

Мощность, необходимая для цепи возбуждения, составляет только 1-3% номинальной мощности генератора. Это дает возможность весьма экономично осуществлять регулирование работы генератора.

Изменение тока возбуждения изменяет главный магнитный поток и пропорционально ему ЭДС $E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi \cdot n$. Зависимость ЭДС от тока возбуждения при разомкнутой цепи якоря ($I_{\text{я}} = 0$) и постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ называется **характеристикой холостого хода** $E_{\text{я}}(I_{\text{в}})$. Если цепь возбуждения разомкнута ($I_{\text{в}} = 0$), то в станине генератора от предыдущей работы сохраняется некоторая остаточная индукция. При вращении якоря в поле остаточной индукции в его обмотке индуцируется малая ЭДС холостого хода $E_{\text{яxx}}$.

Чтобы снять характеристику холостого хода, нужно подать напряжение на обмотку возбуждения и постепенно увеличивать $I_{\text{в}}$ до максимально допустимого значения, отмечая соответствующие значения ЭДС (восходящая ветвь). Затем, путем постепенного понижения тока возбуждения, можно получить нисходящую ветвь характеристики. Она расположится несколько выше восходящей ветви вследствие возросшего влияния гистерезиса (рис. 9.7). После выключения возбуждения остаточный магнетизм, а, следовательно, и ЭДС будут существенно больше, чем в исходных условиях. Но этот остаточный магнетизм неустойчив, и спустя некоторое время после выключения возбуждения, поток и ЭДС, им индуцируемая при вращении якоря, уменьшаются до значения, соответствующего начальным условиям.

Таким образом, характеристика холостого хода имеет форму петли, что является естественным следствием наличия стали в магнитной цепи машины. Характеристика холостого хода в верхней своей части заметно загибается в сторону оси абсцисс. Это – следствие насыщения стали машины. В большинстве случаев генераторы постоянного тока работают в условиях, соответствующих насыщенной части характеристики. Благодаря насыщению напряжение генератора меньше колеблется при изменениях нагрузки, так как ослабляется влияние реакции якоря на основной поток и ЭДС машины.

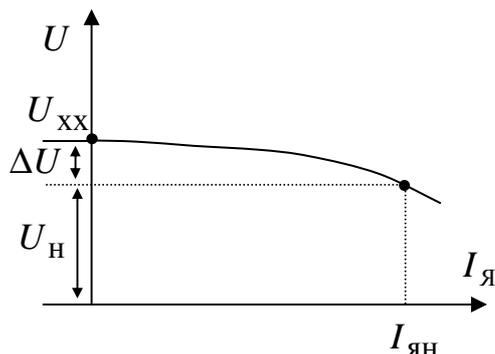


Рис. 9.8

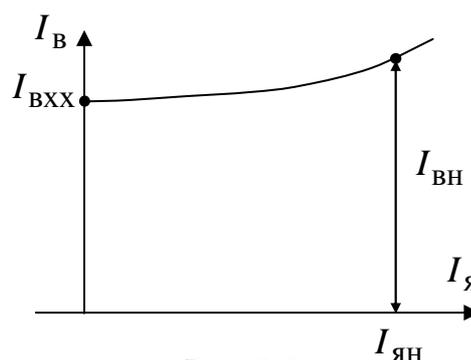


Рис. 9.9

Второй важной характеристикой генератора является зависимость его напряжения U от силы тока якоря $I_{я}$ при неизменных $I_{в}$ и частоте вращения n . Эта зависимость называется *внешней характеристикой* (рис. 9.8). Напряжение на зажимах цепи якоря генератора меньше его ЭДС из-за падения напряжения на активном сопротивлении $R_{я}$ обмотки якоря: $U = E_{я} - I_{я}R_{я}$.

Зависимость $U(I_{я})$ была бы линейна, если бы ЭДС $E_{я}$ оставалась постоянной. Но магнитный поток машины с ростом нагрузки уменьшается под воздействием реакции якоря, а вместе с ним пропорционально уменьшается и ЭДС якоря. В результате внешняя характеристика изгибается в сторону оси абсцисс. На основании внешней характеристики определяется *номинальное изменение напряжения* на генераторе. Это – выраженное в процентах относительное изменение напряжения на его зажимах, вызываемое изменением нагрузки от номинальной до нуля при неизменном $I_{в}$ и постоянной скорости:

$$\Delta U = \frac{U_{хх} - U_{н}}{U_{н}} \cdot 100\% .$$

У генераторов без компенсационной обмотки эта величина достигает $5 \div 10\%$.

Если увеличивать $I_{\text{я}}$ сверх номинального значения, то напряжение генератора станет дальше понижаться, но машина будет уже в условиях перегрузки. Обмотка якоря, щетки и коллектор начнут перегреваться, а под щетками начнется сильное искрение.

Для нормальной работы приемников электроэнергии необходимо поддерживать постоянным напряжение на их зажимах, несмотря на изменение общей нагрузки генератора. Это осуществляется посредством регулирования $I_{\text{в}}$. **Регулировочной характеристикой генератора** называется зависимость $I_{\text{в}}$ от тока якоря $I_{\text{я}}$ при постоянном напряжении U и частоте вращения n . Такая характеристика показывает, как надо изменять $I_{\text{в}}$ чтобы при изменениях нагрузки поддерживать постоянным напряжение на зажимах генератора. Характеристика сначала почти прямолинейная (рис. 9.9), но затем загибается вверх, вследствие влияния насыщения магнитопровода машины.

9.7. Генератор с параллельным возбуждением

У генератора с параллельным возбуждением цепь обмотки возбуждения соединяется параллельно с цепью якоря, и часть тока якоря служит для возбуждения главного магнитного поля машины (рис. 9.10). Эти генераторы применяются наиболее часто, так как они не требуют дополнительного источника электроэнергии для цепи возбуждения, что существенно упрощает обслуживание машины: вместе с тем напряжение таких генераторов мало изменяется из-за колебаний нагрузки.

$I_{\text{в}} = (0.05 \div 0.01)I_{\text{я}}$, а напряжение U на зажимах цепей якоря и возбуждения одно и то же. Следовательно, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = U / I_{\text{в}}$ должно быть велико (обмотка возбуждения имеет большое число витков тонкого провода)

При пуске в ход такого генератора для создания магнитного потока в магнитопроводе используется явление самовозбуждения. Сначала ток в якоря, а, следовательно, и в обмотке возбуждения отсутствует, но в массивной станине всегда сохраняется небольшой поток остаточного намагничивания $\Phi_{\text{ост}}$, равный $1 \div 3\%$ от номинального потока. Он остается как следствие намагничивания машины, имевшего место ранее при ее работе. Когда двигатель начинает вращать якорь генератора, остаточный поток индуцирует в обмотке якоря небольшую ЭДС $E_{\text{я}}$, которая создает небольшой $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения, а, следовательно, возникает МДС возбуждения. По отношению к $\Phi_{\text{ост}}$ она должна быть направлена согласно, т.е. подмагничивать магнитопровод генератора,

что имеет место при правильном соединении обмотки возбуждения с якорем. При таком соединении I_B усиливает магнитное поле машины, а последнее индуцирует большую ЭДС в обмотке якоря. Возрастание ЭДС вызывает дальнейшее увеличение I_B . Увеличение потока и I_B ограничивается насыщением магнитной цепи.

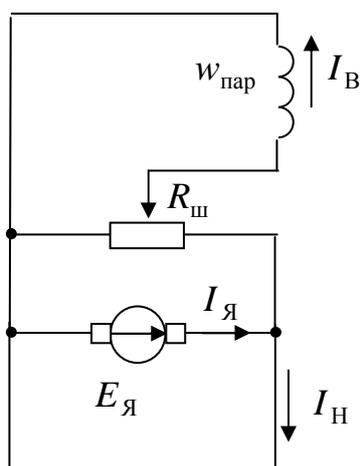


Рис. 9.10

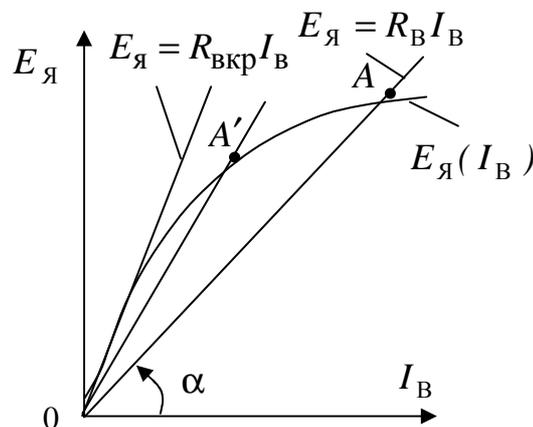


Рис. 9.11

Если пренебречь сопротивлением цепи якоря $R_я \ll R_B$, то установившийся I_B определяется из условия: $E_я = U = R_B I_B$. Этому условию соответствует точка пересечения A характеристики холостого хода и прямой $E_я = R_B I_B$ (рис. 9.11). Угол α наклона прямой $E_я = R_B I_B$ к оси абсцисс зависит от R_B . Если уменьшать I_B , вводя реостат в цепь возбуждения, то точка пересечения смещается влево (A'). При достаточно большом сопротивлении цепи возбуждения, называемом **критическим** $R_{вкр}$, машина не возбуждается (рис. 9.11).

Если машина потеряла остаточный магнетизм (из-за короткого замыкания или механических ударов), то для его восстановления нужен посторонний источник постоянного тока. Этот источник нужно на короткий срок замкнуть на обмотку возбуждения, а затем использовать созданное остаточное намагничивание для нормального возбуждения.

Характеристика холостого хода практически не отличается от характеристики при независимом возбуждении, так как влияние на эту характеристику падения напряжения $R_B I_B$ и реакция якоря от тока возбуждения ничтожно. Совпадают и регулировочные характеристики.

Но внешняя характеристика (рис. 9.12) при параллельном возбуждении генератора (кривая а) идет значительно ниже, чем при независимом возбуждении (кривая б), из-за уменьшения тока возбуждения при

снижении напряжения ($I_B = U/R_B$). При независимом возбуждении понижение напряжения вызывается двумя причинами: увеличением падения напряжения на $R_{\text{я}}$ и реакцией якоря. При параллельном возбуждении к этим двум причинам добавляется третья – I_B .

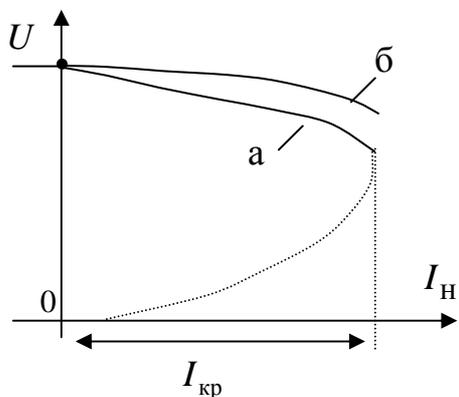


Рис. 9.12

Ток якоря, при котором машина переходит в условия саморазмагничивания, называется **критическим**. Его значение больше номинального в $2 \div 2.5$ раза. Участок внешней характеристики ниже $I_{\text{кр}}$ (штриховая линия на рис. 9.12) соответствует неустойчивому режиму.

Изменение напряжения у генератора при параллельном возбуждении значительно больше, чем при независимом,

и составляет $8 \div 15\%$.

9.8. Генераторы с последовательным и смешанным возбуждением

В генераторе с последовательным возбуждением якорь соединен последовательно с обмоткой возбуждения, благодаря чему ток нагрузки является вместе с тем током возбуждения (рис. 9.13). Обмотка возбуждения такой машины выполняется из провода, рассчитанного на большой ток якоря – число витков такой обмотки мало.

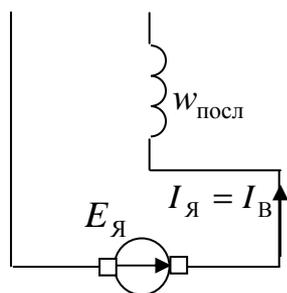


Рис. 9.13

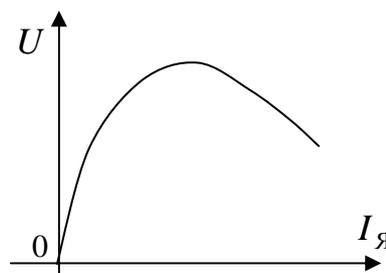


Рис. 9.14

При холостом ходе такого генератора ЭДС в обмотке якоря индуцируется только потоком остаточного намагничивания, поэтому снять характеристику холостого хода у этого генератора нельзя. Отсутствует у него также и регулировочная характеристика.

Напряжение генератора (рис. 9.14) сначала возрастает с увеличением тока якоря. Затем вид характеристики начинает изменяться из-за

магнитного насыщения (ЭДС якоря перестает увеличиваться, в то время как продолжает возрастать падение напряжения на $R_{\text{я}}$) и реакции якоря. В результате напряжение генератора при дальнейшем возрастании нагрузки уменьшается. Из-за непостоянства напряжения генераторы с последовательным возбуждением применяются лишь в немногих специальных случаях.

Генератор со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения: параллельную $w_{\text{пар}}$ и последовательную $w_{\text{посл}}$ (рис. 9.15). У такого генератора напряжение остается практически постоянным при изменении нагрузки в определенных пределах (кривая а на рис. 9.16).

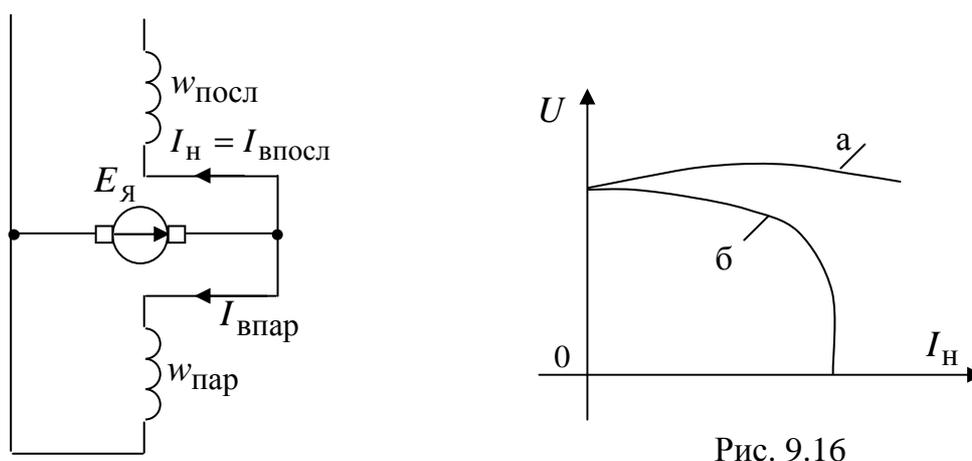


Рис. 9.15

Рис. 9.16

С этой целью последовательную и параллельную обмотки возбуждения включают согласно, и их магнитные потоки складываются. В этом случае ЭДС от магнитного потока последовательной обмотки компенсирует падение напряжения в обмотке якоря и уменьшение ЭДС от снижения $I_{\text{в}}$. При встречном включении обмоток напряжение генератора при нагрузке резко падает (кривая б на рис. 9.16). Такая внешняя характеристика необходима, например, в аппаратах для электродуговой сварки.

В ряде случаев целесообразно питать определенную группу потребителей от нескольких генераторов, которые включаются параллельно и работают на общую сеть. Для совместной работы используются генераторы независимого, параллельного или смешанного возбуждения.

9.9. Пуск двигателя постоянного тока

При пуске двигателя необходимо обеспечить надлежащее значение пускового момента и предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока, опасного для двигателя.

Возможны три способа пуска двигателя: 1) прямой, при котором обмотка якоря подключается прямо к сети; 2) реостатный с помощью пускового реостата, который включается последовательно в цепь якоря; 3) при пониженном напряжении, подводимом к якорю.

При прямом пуске в первый момент при $n = 0$ в якоре не наводится противо-ЭДС ($E_{\text{я}} = 0$) и начальный пусковой ток ограничивается только малым внутренним сопротивлением обмотки якоря

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{H}}}{R_{\text{я}}} \approx (10 \div 30)I_{\text{H}}.$$

Такой большой ток вызывает опасное искрение на коллекторе и чрезмерно большой пусковой момент $M_{\text{пуск}} = C_M \Phi_{\text{пуск}} I_{\text{пуск}}$, задающий рывок или удар по валу, отрицательно воздействующий на передачу и рабочий механизм, приводимый во вращение двигателем. Прямой пуск применяется для двигателей малой мощности (до 1 кВт), у которых сопротивление якоря относительно велико, а время разгона мало (меньше 1 с). В этом случае обмотка якоря не успевает нагреться, и толчок момента оказывается сравнительно небольшим.

Наибольшее распространение получил реостатный пуск. Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат, сопротивление которого выбирают с таким расчетом, чтобы $I_{\text{пуск}}$ не превышал $(2 \div 2,5)I_{\text{H}}$. По мере увеличения частоты вращения двигателя пусковой реостат выводят. Пусковые реостаты могут быть как с ручным, так и с автоматическим управлением.

В двигателях большой мощности пусковой реостат вызывает значительные потери энергии, особенно при частых пусках. В этом случае можно использовать пуск при пониженном напряжении, подводимом к якорю двигателя от источника с регулируемым напряжением, например, в системах генератор-двигатель.

Среди всех электродвигателей двигатели постоянного тока имеют лучшие пусковые качества. При относительно небольшом пусковом токе $(2 \div 2,5)I_{\text{H}}$ они могут создавать достаточно большой пусковой момент $(2,5 \div 4)M_{\text{H}}$. Это обеспечивает быстрый разгон приводимых ими механизмов.

9.10. Двигатель с параллельным и независимым возбуждением

Схема включения двигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 9.17, где $R_{\text{пуск}}$ – пусковой, $R_{\text{ш}}, R_{\text{ря}}$ – регулировочные реостаты.

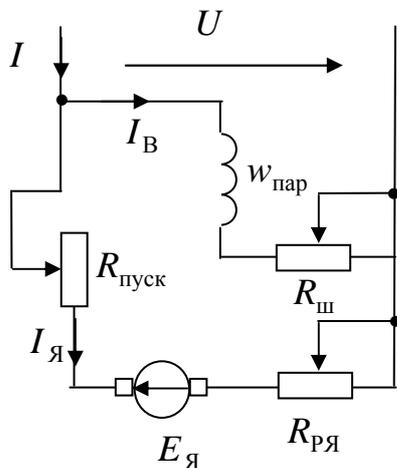


Рис. 9.17

Если обмотку возбуждения (ОВ) такого двигателя подключить через регулировочный реостат к другому источнику постоянного напряжения, то получится двигатель с независимым возбуждением.

Электродвижущая сила пропорциональна магнитному потоку, и при пуске она должна быстро возрастать. Поэтому при пуске ОВ включается на полное напряжение сети при выведенном реостате $R_{\text{ш}}$. Так как $M \equiv \Phi$, то при пуске при наибольшем магнитном потоке Φ вращающий момент достигнет наибольшего значения, что существенно

облегчает момент пуска.

Так как $E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi \cdot n$, то, учитывая, что $I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ получаем уравнение частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E \Phi}. \quad (9.1)$$

Изменение n может происходить за счет изменения нагрузки и магнитного потока. Увеличение тока нагрузки незначительно изменяет падение напряжения $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ из-за малого сопротивления $R_{\text{я}}$. Из-за реакции якоря при увеличении тока нагрузки Φ немного уменьшается, что приводит к незначительному увеличению n . Таким образом, частота вращения двигателя с параллельным возбуждением изменяется очень мало (3 ÷ 8%).

Если считать $\Phi = \text{const}$, то естественная механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением $n(M)$ является жесткой (рис. 9.18).

В установившемся режиме $M_{\text{вр}} = M_{\text{торм}}$. Если увеличить нагрузку на валу, то сначала равновесие моментов нарушается, и n уменьшается. Но это вызывает уменьшение ЭДС $E_{\text{я}}$, а, следовательно, и увеличение $I_{\text{я}}$. Пропорционально $I_{\text{я}}$ возрастает вращающий момент, и при немного понизившейся n , равновесие моментов восстанавливается.

Как следует из выражения (9.1) частоту вращения можно регулировать тремя способами: 1) реостатным – изменение суммарного сопротивления цепи якоря; 2) полюсным – изменение магнитного потока полюсов; 3) якорным – изменение напряжения, подводимого к якорю.

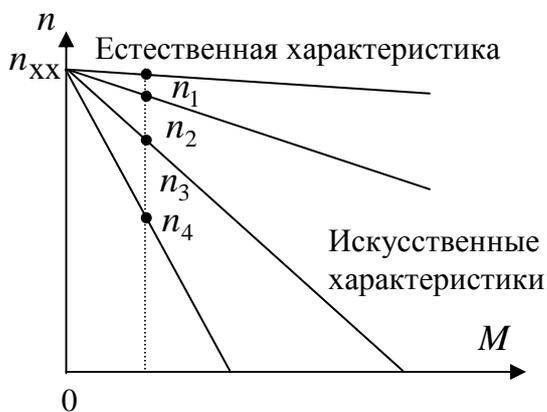


Рис. 9.18

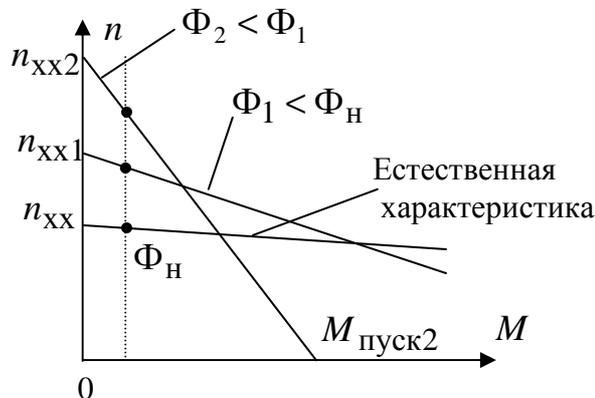


Рис. 9.19

Реостатное регулирование осуществляется введением реостата $R_{р\dot{я}}$ в цепь якоря. Изменяя сопротивление этого реостата, можно получить семейство искусственных механических характеристик более мягких, чем естественная. Если при неизменном моменте на валу постепенно увеличивать сопротивление реостата $R_{р\dot{я}}$, то точка n , показывающая на рис. 9.18 частоту вращения двигателя, будет перемещаться с одной характеристики на другую (точки $n_1 - n_4$). Следовательно, с помощью реостата $R_{р\dot{я}}$ можно только уменьшать частоту вращения двигателя. Такое регулирование неэкономично из-за значительной мощности потерь $R_{р\dot{я}} I_{\dot{я}}^2$ и применяется лишь для двигателей небольшой мощности.

Полюсное регулирование частоты осуществляется изменением Φ за счет регулирования $I_{\dot{в}}$ реостатом $R_{ш}$. Частота вращения при холостом ходе – $n_{хх} = \frac{U}{C_E \Phi_{пуск}}$. Механические характеристики двигателя при

различных значениях магнитного потока показаны на рис. 9.19. Каждому значению Φ соответствуют свои значения $n_{хх}$ и пускового момента. Если момент, прикладываемый к валу, меньше номинального, то при уменьшении магнитного потока частота вращения возрастает.

Рассмотрим электромеханический переходный процесс установления нового значения частоты вращения (\uparrow – увеличение величины, \downarrow – уменьшение):

$$I_{\dot{в}} \downarrow \Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow E_{\dot{я}} \downarrow \Rightarrow I_{\dot{я}} \uparrow \Rightarrow M_{вр} > M_{торм} \Rightarrow n \uparrow \Rightarrow E_{\dot{я}} \uparrow \Rightarrow M_{вр}, I_{\dot{я}} \downarrow.$$

В результате при равенстве моментов устанавливается повышенное значение частоты вращения.

При нагрузке на валу, большей номинальной полюсное регулирование применять нельзя, так как с уменьшением магнитного потока ток якоря превысит номинальный. Поэтому регулирование можно производить лишь в области, расположенной выше естественной характеристики, что позволяет только повышать частоту вращения.

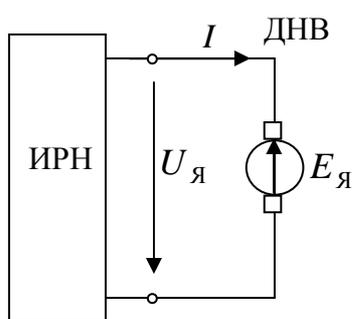


Рис. 9.20

Полюсное регулирование является экономичным, так как из-за относительно малой мощности обмотки возбуждения небольшими оказываются и потери мощности в регулировочном реостате и, следовательно, КПД двигателя практически не уменьшается.

Якорное регулирование частоты вращения безреостатным изменением напряжения на якоре осуществимо только при независимом возбуждении, так как при параллельном возбуждении одновременно изменялся бы и магнитный поток, что привело бы к изменению тока якоря, но не частоты вращения.

От источника регулируемого напряжения (ИРН) на якорь двигателя независимого возбуждения (ДНВ) (рис. 9.20) подается напряжение, которое можно плавно изменять от нуля до номинального и обратно с переменной полярностью. При якорном регулировании двигателя пусковой реостат не нужен, так как пуск начинается с малого напряжения. Механические характеристики двигателя при различных значениях напряжения на якоре и $I_B = const$ представляются параллельными прямыми (рис. 9.21).

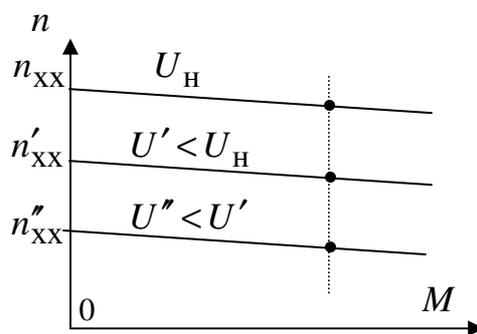


Рис. 9.21

Электромеханический переходный процесс при якорном регулировании происходит следующим образом:

$$U' < U_H \Rightarrow I_{я}, M_{вр} \downarrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow E_{я} \downarrow \Rightarrow I_{я}, M_{вр} \uparrow.$$

При $M_{вр} = M_{торм}$ частота перестает уменьшаться, и если $M_{торм}$ не изменился, то ток якоря останется прежним.

В качестве ИРН может быть использован генератор независимого возбуждения или управляемый выпрямитель. Такие установки имеют меньшую массу и больший КПД.

9.11. Двигатель с последовательным возбуждением

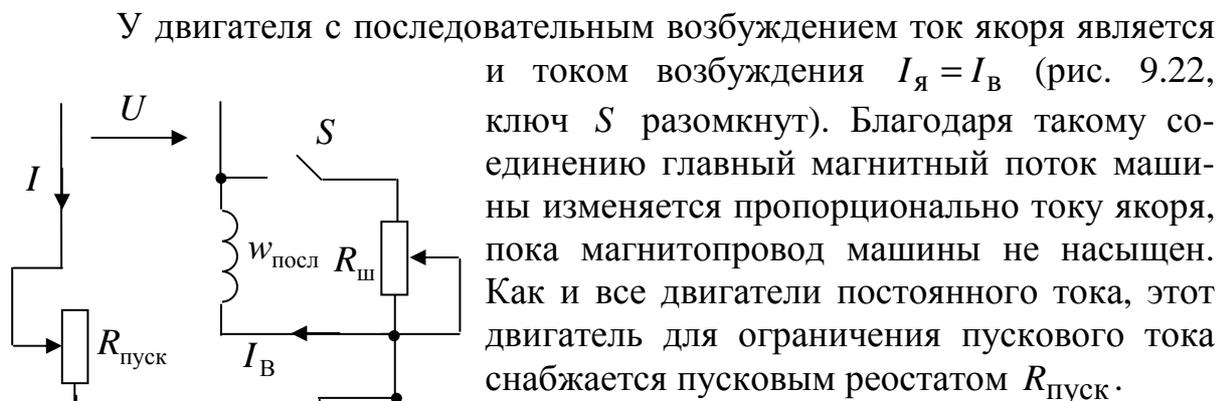


Рис. 9.22

У двигателя с последовательным возбуждением ток якоря является и током возбуждения $I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$ (рис. 9.22, ключ S разомкнут). Благодаря такому соединению главный магнитный поток машины изменяется пропорционально току якоря, пока магнитопровод машины не насыщен. Как и все двигатели постоянного тока, этот двигатель для ограничения пускового тока снабжается пусковым реостатом $R_{\text{пуск}}$.

Магнитный поток двигателя с последовательным возбуждением при ненасыщенном магнитопроводе прямо пропорционален МДС его обмотки возбуждения –

$I_{\text{я}} w_{\text{посл}}$ и обратно пропорционален магнитному сопротивлению машины $R_{\text{М}}$, таким образом $\Phi = \frac{I_{\text{я}} w_{\text{посл}}}{R_{\text{М}}}$. Подставив это выражение в уравне-

ния момента и частоты вращения двигателей постоянного тока, получим уравнение частоты вращения двигателя

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) I_{\text{я}}}{C_E w_{\text{посл}} I_{\text{я}} / R_{\text{М}}}$$

и уравнение его вращающего момента $M_{\text{вр}} = C_M w_{\text{посл}} I_{\text{я}}^2 / R_{\text{М}}$.

Последнее уравнение показывает, что вращающий момент двигателя возрастает пропорционально квадрату тока, поэтому начальная часть кривой зависимости момента от тока имеет вид параболы (рис. 9.23). Но при сильном насыщении магнитной цепи поток почти перестает увеличиваться с увеличением $I_{\text{в}}$, и момент в дальнейшем возрастает приблизительно пропорционально току.

Частота вращения двигателя убывает почти обратно пропорционально току, пока не сказывается магнитное насыщение. Механическая характеристика двигателя, показанная на рис. 9.24 (кривая 1), при $I_{\text{в1}} = I_{\text{я}}$, называется естественной характеристикой. При увеличении нагрузки на валу двигателя ток возрастает относительно медленно и обратно пропорционально ему уменьшается частота вращения. Например, если пренебречь насыщением магнитной цепи и реакцией якоря, то можно считать, что при увеличении вдвое момента на валу двигателя

ток возрастает лишь до 140% первоначального значения, а частота вращения уменьшается до 70%.

У двигателя с параллельным возбуждением повышение вдвое момента на валу лишь незначительно уменьшит частоту вращения, зато ток двигателя увеличится до 200% первоначального.

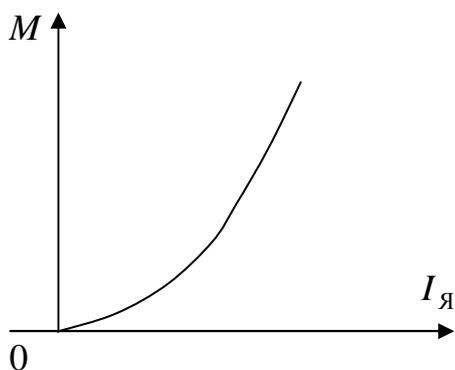


Рис. 9.23

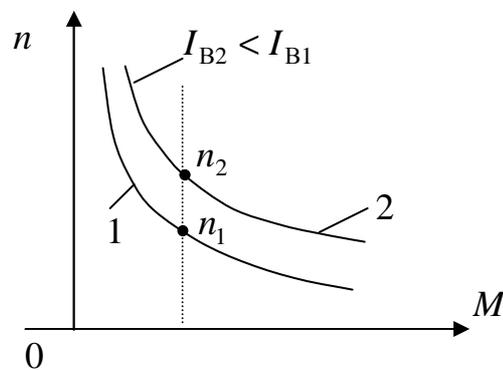


Рис. 9.24

Двигатель с последовательным возбуждением может выдерживать сильные перегрузки при умеренном увеличении тока. Это его ценное свойство. При уменьшении нагрузки на валу двигателя его ток медленно уменьшается, зато быстро повышается частота вращения и при нагрузках, примерно меньших 25% номинальной, частота достигает значений, опасных для механической целостности двигателя, – двигатель «разносит». Поэтому двигатели последовательного возбуждения не следует пускать вхолостую или с малой нагрузкой.

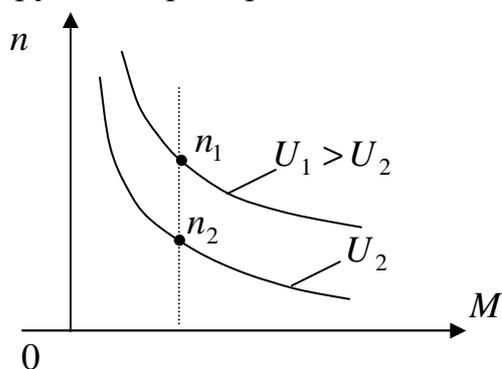


Рис. 9.25

Естественная механическая характеристика двигателя мягкая, так как изменение момента сильно сказывается на частоте вращения двигателя. Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения производится также тремя способами.

Реостатное регулирование в цепи рабочего тока реостатом $R_{р\dot{я}}$ дает снижение частоты вращения. Оно является не экономичным, как и в двигателе параллельного возбуждения.

Полюсное регулирование осуществляется шунтированием обмотки возбуждения реостатом $R_{ш}$ (см. рис. 9.22, ключ S замкнут). При шунтировании обмотки возбуждения уменьшается магнитный поток и возрастает частота вращения. Одновременно увеличивается ток двигателя.

На рис. 9.24 кривая 2 – искусственная механическая характеристика, которая получается при шунтировании обмотки возбуждения двигателя резистором с постоянным сопротивлением $R_{ш}$.

Возможно регулирование двигателя путем изменения напряжения на якоре (рис. 9.25). Такое регулирование позволяет изменять частоту вращения вниз от номинального значения с сохранением высокого КПД.

Высокая перегрузочная способность и мягкая характеристика двигателя с последовательным возбуждением особенно ценны для электрической тяги (трамвай, метрополитен, электрические железные дороги и т.д.). Для их энергоснабжения строятся преобразовательные подстанции, выпрямляющие переменный ток. На некоторых электрических железных дорогах преобразование переменного тока в постоянный осуществляется на самом электровазоне, обычно посредством тиристоров.

Эти двигатели подходят также для работы в качестве крановых двигателей там, где имеются источники постоянного тока.

9.12. Двигатель со смешанным возбуждением

Двигатель с параллельным возбуждением имеет жесткую механическую характеристику, а двигатель с последовательным возбуждением – мягкую характеристику. В ряде случаев желательна некоторая промежуточная форма характеристики.

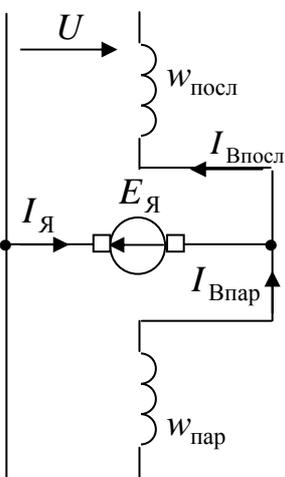


Рис. 9.26

Магнитный поток двигателя смешанного возбуждения за счет последовательной обмотки будет увеличиваться с ростом тока якоря. Увеличение магнитного потока будет тем больше, чем больше число витков последовательной обмотки. Поэтому двигатель смешанного возбуждения имеет бо-

Простейший способ получения такой характеристики – применение смешанного возбуждения. В двигателях смешанного возбуждения магнитный поток создается действием двух обмоток возбуждения – параллельной и последовательной (рис. 9.26). Обычно обмотки возбуждения включают согласно.

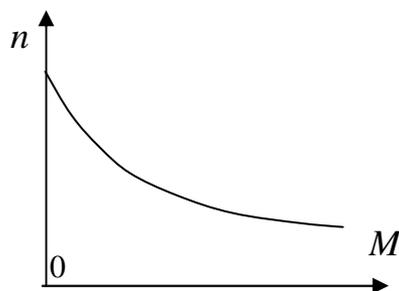


Рис. 9.27

лее мягкую механическую характеристику по сравнению с двигателем параллельного возбуждения, но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения.

В двигателе с последовательно-параллельным возбуждением преобладает последовательное возбуждение, но благодаря наличию параллельной обмотки нарастание частоты вращения двигателя при уменьшении нагрузки на валу ограничено (рис. 9.27).

В двигателе с параллельно-последовательным возбуждением преобладает параллельное возбуждение. Наличие дополнительной последовательной обмотки стабилизирует основной магнитный поток двигателя и немного смягчает его жесткую механическую характеристику.

9.13. Потери энергии и КПД машин постоянного тока

Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока показана на рис. 9.28. Мощность P_1 энергии, подводимой из сети, делится между цепью якоря $P_{\text{я}}$ (большая часть) и цепью возбуждения $P_{\text{в}} = UI_{\text{в}}$ (несколько процентов). Небольшую часть мощности цепи якоря составляет мощность потерь на нагревание обмотки, остальную часть – механическая мощность $P_{\text{мех}}$. Чтобы определить полезную мощность P_2 на валу двигателя, нужно отнять от механической мощности мощность потерь в стали $P_{\text{ст}}$ (из-за гистерезиса и вихревых токов) и мощность механических потерь на трение $P_{\text{м.п.}}$ в подшипниках, щеток на коллекторе и о воздух.

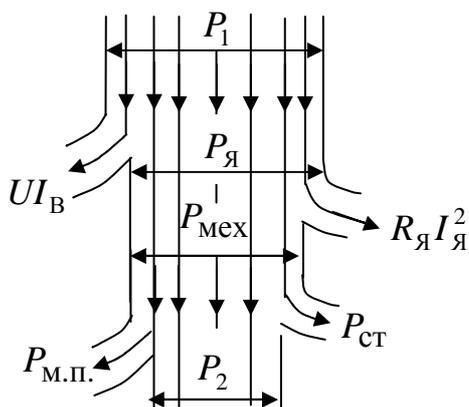


Рис. 9.28

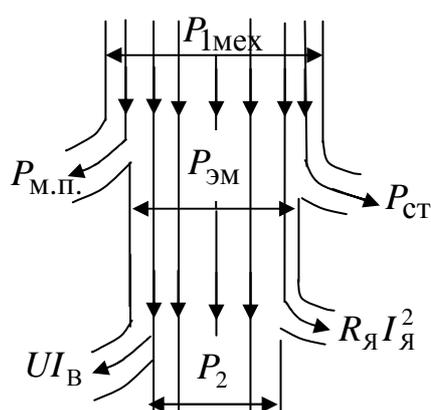


Рис. 9.29

Диаграмма преобразования энергии в генераторе постоянного тока приведена на рис. 9.29. К генератору подводится механическая мощность $P_{1\text{мех}}$. Часть этой мощности расходуется на механические потери $P_{\text{м.п.}}$ и магнитные потери $P_{\text{ст}}$, а остальная часть преобразуется в элек-

трическую мощность, которая называется электромагнитной мощностью $P_{эм}$. Полезная электрическая мощность генератора P_2 меньше электромагнитной мощности на значение электрических потерь в обмотках якоря $R_я I_я^2$ и возбуждения $U I_в$.

9.14. Способы электрического торможения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока параллельного возбуждения

В двигателях параллельного возбуждения различают три способа электрического торможения: генераторное рекуперативное, генераторное динамическое, торможение противовключением (рис. 9.30).

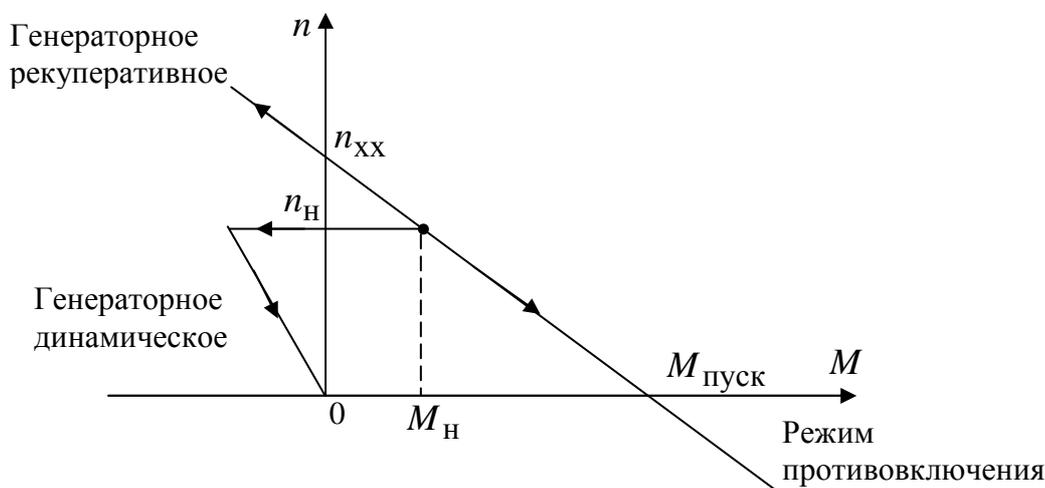


Рис. 9.30

Генераторное рекуперативное торможение возникает в том случае, когда на вал двигателя прикладывается активный момент нагрузки, превышающий момент, развиваемый двигателем и направленный в сторону вращения двигателя. В этом случае ротор двигателя разгоняется до скорости, превышающей скорость холостого хода, и машина переходит в генераторный режим. При этом ток якоря меняет знак на противоположный, и прикладываемая механическая энергия, преобразуясь в машине в электрическую, отдается в сеть.

При генераторном динамическом торможении обмотка якоря отключается от сети и подключается на сопротивление торможения R_T . Двигатель переходит в режим генератора параллельного возбуждения. Механическая энергия, запасенная во вращающихся массах машины, преобразуясь в электрическую, выделяется в виде тепловых потерь на сопротивлении торможения.

При торможении противовключением изменяется полярность тока либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря. При этом момент двигателя меняет знак на противоположный. Двигатель начинает тормозиться, и, при достижении скорости вращения нуля, он отключается от сети.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения

Так как в таких двигателях скорость холостого хода не определена, используются только два способа электрического торможения: генераторное динамическое и торможение противовключением.

10. Синхронные машины

10.1. Общие сведения

Синхронной называется электрическая машина, частота вращения которой связана постоянным отношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена.

Как все электрические машины, синхронные машины обратимы: они могут работать в режимах генератора и двигателя. В настоящее время основными источниками электроэнергии остаются синхронные генераторы на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях (ТЭС, АЭС, ГЭС).

Трехфазные синхронные генераторы – самые мощные электрические машины. Единичная мощность синхронных генераторов, устанавливаемых на ГЭС, достигла 640 МВт, а на ТЭС – $800 \div 1200$ МВт.

Синхронные двигатели также являются самыми мощными среди всех электродвигателей. Так, единичная мощность синхронных двигателей для крупных насосов, компрессоров достигает нескольких десятков мегаватт.

Особенностью синхронной машины, работающей в энергосистеме, является возможность регулирования ее коэффициента мощности по значению и характеру. Для улучшения коэффициента мощности крупных электроустановок на электрических подстанциях устанавливают специальные синхронные двигатели, работающие в режиме холостого хода с опережающим по фазе током. Их называют компенсаторами реактивной мощности. Мощность крупных синхронных компенсаторов составляет 50, 100, 160 МВт.

Также выпускаются синхронные генераторы и двигатели значительно меньших номинальных мощностей. Синхронные генераторы мощностью до десятков или сотен киловатт используют как автономные источники питания с приводом от двигателей внутреннего сгорания.

Синхронные двигатели мощностью выше 100 кВт имеют определенные преимущества перед асинхронными, хотя они сложнее в эксплуатации и дороже, чем асинхронные.

10.2. Устройство синхронной машины

Основными частями синхронной машины являются статор и ротор, причем статор не отличается от статора асинхронной машины. Сердечник статора собран из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали и укреплен внутри массивного корпуса. В пазах с внутренней стороны статора размещена обмотка переменного тока, в большинстве случаев трехфазная.

Ротор синхронной машины представляет электромагнит – явнополюсный (рис. 10.1, где 1 – полюс; 2 – полюсной наконечник; 3 – обмотка возбуждения) или неявнополюсный (рис. 10.2, где 1 – полюс; 2 – обмотка возбуждения). Ток в обмотку ротора поступает через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока – возбуждателя.

У многополюсной синхронной машины ротор имеет p пар полюсов, а токи в обмотке статора образуют тоже p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как у асинхронной машины). Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная частота вращения

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Неявнополюсные роторы применяются в синхронных машинах большой мощности, имеющих одну или две пары полюсов и соответственно частоту вращения $n = 3000$ или 1500 об/мин. Изготовление синхронных машин большой мощности с такими частотами вращения при явнополюсной конструкции ротора невозможно по условиям механической прочности ротора. Неявнополюсные роторы имеют синхронные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами на ТЭС и АЭС. Такие машины называют турбогенераторами. Неявнополюсный ротор изготавливается из массивной стальной поковки – “бочки”. Обмотка постоянного тока укрепляется в пазах, выфрезированных в роторе по всей его длине (рис. 10.2). Мощность таких генераторов достигает до 500 000 кВА в одной машине. По условиям механической прочности диаметр ротора при $n = 3000$ об/мин не должен превышать 1.2 – 1.3 м, а активная длина ротора должна быть не более 6.5 м.

Явнополюсные роторы применяются в синхронных машинах с большим числом полюсов и, соответственно, относительно низкой частотой вращения. Такие роторы имеют синхронные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами на ГЭС. Такие генераторы называют гидрогенераторами. Гидравлическая турбина вращается относительно медленно, поэтому частота вращения гидрогенераторов от 60 до нескольких сотен оборотов в минуту, чему соответствует несколько десятков пар полюсов. Вследствие относительно малых частот вращения генераторы к гидравлическим турбинам имеют значительно большую массу на единицу мощности (свыше 8 кг/кВА), чем генераторы к паровым турбинам (менее 2.5 кг/кВА). Самые мощные гидрогенераторы имеют диаметр ротора около 12 м при относительно небольшой длине – 2.5 м, число полюсов – 42 и частоту вращения 143 об/мин.

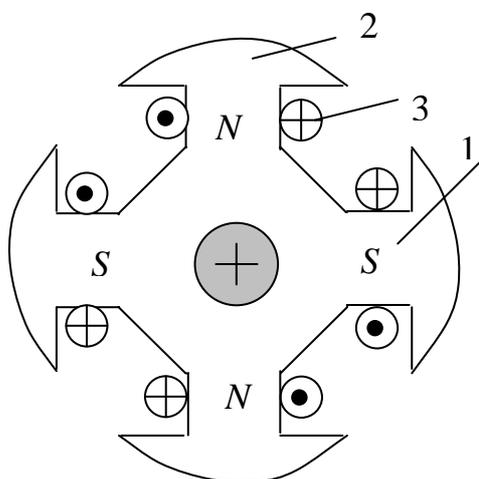


Рис. 10.1

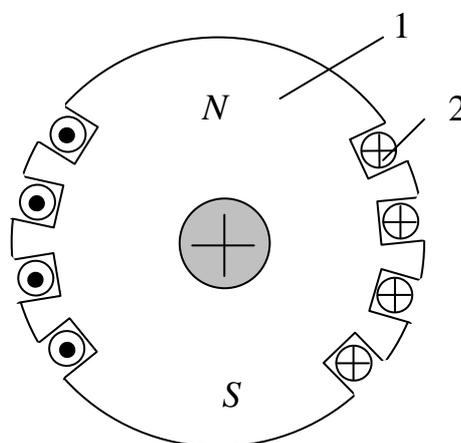


Рис. 10.2

Источниками постоянного напряжения для обмоток возбуждения являются специальные устройства, называемые возбудителями. Простейшим возбудителем является самовозбуждающийся генератор постоянного тока, установленный на валу синхронного генератора. Его мощность составляет 1 ÷ 3% мощности синхронного генератора. С увеличением единичной мощности синхронного генератора возбудитель с коллектором стал ненадежным (истираются щетки, возрастает опасность искрения на коллекторе), поэтому в последнее время все большее применение находят вентильные системы возбуждения с диодами и тиристорами.

10.3. Режимы работы синхронной машины

Режим работы синхронной машины определяется взаимодействием магнитных полей, создаваемых токами в обмотках статора и ротора. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающий (генератор) или тормозной (двигатель) момент.

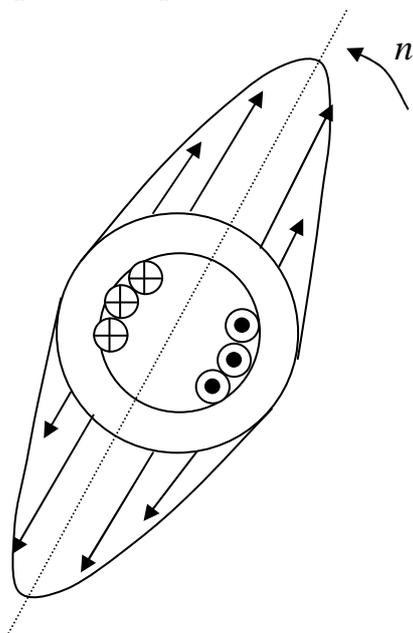


Рис. 10.3

Рассмотрим режимы работы двухполюсной машины. На обмотку статора подается симметричная система токов и в машине создается вращающееся магнитное поле. В обмотке возбуждения протекают постоянные токи. Если пренебречь всеми видами потерь энергии в синхронной машине, то при отсутствии момента на валу (режим холостого хода), ось полюсов ротора будет совпадать с осью полюсов статора (рис. 10.3).

Для того чтобы заставить синхронную машину, включенную в сеть, работать в режиме *генератора*, отдавая энергию, необходимо увеличить вращающий механический момент $M_{вр}$, приложенный первичным двигателем к валу машины.

Тогда под действием возросшего вращающего момента ось магнитных полюсов ротора повернется на некоторый угол θ относительно оси полюсов статора в направлении вращения (см. рис. 10.4). Так как при этом результирующее магнитное поле, создаваемое наложением магнитных полей статора и ротора, изменится, то ток в обмотках статора также изменится. Взаимодействие этого тока с магнитным полем ротора создает тормозной момент M_T , действующий на ротор. Это и означает преобразование энергии механического движения первичного двигателя в электрическую энергию генератора.

Если приложить к валу машины вместо вращающего тормозной момент механической нагрузки, то ось полюсов ротора повернется на некоторый угол θ (угол нагрузки) относительно оси полюсов статора против направления вращения (рис. 10.5). Вновь изменятся токи в обмотках статора и возникнут электромагнитные силы взаимодействия токов обмоток статора и магнитного поля ротора, но на этот раз эти силы будут стремиться увлечь ротор в направлении вращения. Электро-

магнитные силы создадут теперь вращающий момент. Электрическая энергия сети будет преобразовываться в механическую энергию на валу машины, т.е. синхронная машина перейдет в режим *двигателя*.

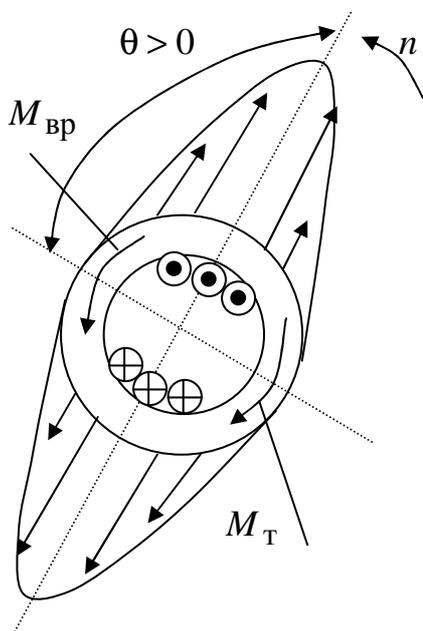


Рис. 10.4

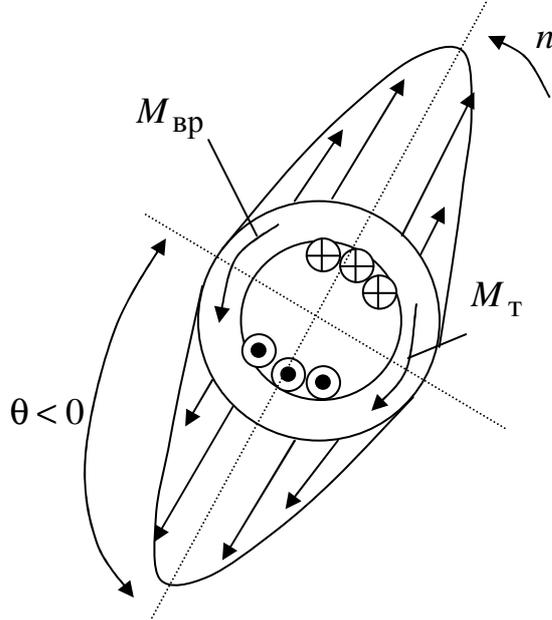


Рис. 10.5

Синхронная машина работает в режиме генератора или двигателя в зависимости от механического воздействия на вал машины, причем электромагнитные силы играют роль упругой связи между ротором и статором.

10.4. Уравнение электрического состояния, векторная диаграмма и схема замещения фазы синхронного генератора

В синхронной машине существует магнитное поле возбуждения и магнитное поле токов статора (полем рассеяния статорной обмотки пренебрегаем). Каждое из этих полей индуцирует во всех трех фазах обмотки статора ЭДС. Для качественного рассмотрения процессов в синхронной машине примем, что ее магнитная цепь не насыщена. Это дает возможность считать магнитные поля независимыми и использовать принцип наложения.

Ток возбуждения (ток в обмотке ротора) создает основное магнитное поле. Синусоидально изменяющееся потокосцепление $\psi_0(t)$ основного магнитного поля индуцирует в фазной обмотке статора ЭДС $e_0(t)$, действующее значение которой

$$E_0 = 4.44 f \psi_{0m}.$$

Зависимость амплитуды потокосцепления от тока возбуждения ротора I_p представлена на рис. 10.6 и повторяет кривую намагничивания $B(H)$ магнитной системы синхронной машины. Важной характеристикой синхронной машины является **характеристика холостого хода**, которая представляет собой зависимость ЭДС E_0 от тока возбуждения

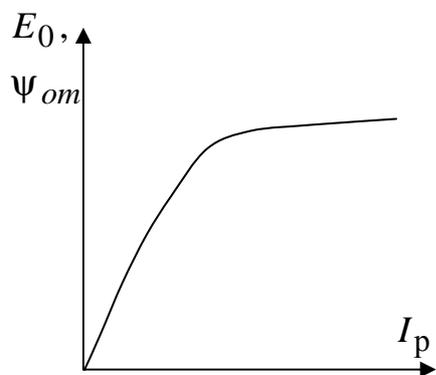


Рис. 10.6

I_p . Она аналогична кривой намагничивания (рис. 10.6), так как ЭДС пропорциональна потокосцеплению. Характеристика холостого хода может быть получена опытным путем в режиме холостого хода машины и позволяет оценить насыщение магнитной цепи машины.

Токи обмотки статора создают вращающееся магнитное поле. Изменяющееся потокосцепление этого поля $\psi_a(t)$ наводит в фазе обмотки статора ЭДС $e_a(t)$.

Результирующая ЭДС статорной обмотки

$$e_{рез} = e_0 + e_a \quad (10.1)$$

или в комплексной форме $\dot{E}_{рез} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$. (10.2)

Эта ЭДС определяется результирующим потокосцеплением $\dot{\Psi}_{рез} = \dot{\Psi}_0 + \dot{\Psi}_a$, которое создано магнитными полями токов статора и ротора. Уравнения (10.1) и (10.2) использованы при построении векторной диаграммы рис. 10.7. Вектор $\dot{\Psi}_0$ опережает \dot{E}_0 на 90° . Вектор тока статора \dot{I} имеет направление, соответствующее активно-индуктивной нагрузке. Потокосцепление $\dot{\Psi}_a$, создаваемое током \dot{I} , совпадает с ним по фазе. Вектор ЭДС \dot{E}_a отстает от $\dot{\Psi}_a$ на 90° . Результирующие векторы $\dot{\Psi}_{рез}$ и $\dot{E}_{рез}$ определяются геометрическим сложением векторов. Направление вектора $\dot{\Psi}_0$ относительно $\dot{\Psi}_{рез}$ характеризует пространственное смещение осей магнитного поля ротора и результирующего магнитного поля. Поэтому угол между этими векторами соответствует углу рассогласования θ . Из построения следует, что сдвиг между векторами \dot{E}_0 и $\dot{E}_{рез}$ также соответствует углу θ .

Согласно второму закону Кирхгофа сумма индуцируемых в фазе обмотки статора ЭДС равна напряжению фазы обмотки статора плюс падение напряжения в активном сопротивлении этой обмотки

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = U + IR.$$

Заменяем ЭДС \dot{E}_a падением напряжения на индуктивном сопротивлении X обмотки $\dot{E}_a = -jxI$. Величина x называется **синхронным индуктивным сопротивлением**.

В синхронных машинах обычно $R \ll x$. Пренебрегая падением напряжения в активном сопротивлении обмотки, получим упрощенное уравнение электрического состояния фазы синхронного генератора

$$\dot{E}_0 = U + jxI. \quad (10.3)$$

Из этого уравнения следует, что **синхронный генератор – это источник ЭДС \dot{E}_0 , внутреннее сопротивление которого имеет индуктивный характер**.

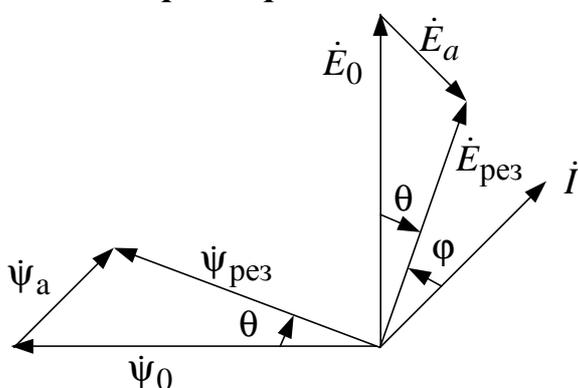


Рис. 10.7

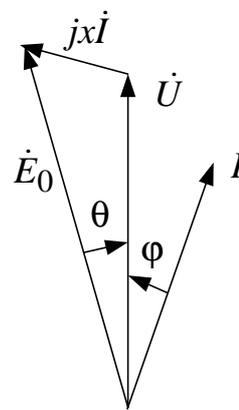


Рис. 10.8

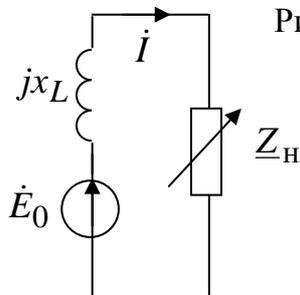


Рис. 10.9

Уравнению (10.3) соответствует упрощенная векторная диаграмма для активно-индуктивной нагрузки (рис. 10.8) и схема замещения фазы обмотки статора (рис. 10.9). При построении диаграммы считаем заданными векторы напряжения и тока, а также характер нагрузки. Из векторной диаграммы следует, что в режиме генератора вектор ЭДС \dot{E}_0

опережает вектор напряжения \dot{U} на угол θ .

10.5. Синхронизация и включение генератора на параллельную работу в мощной энергосистеме

Рассмотрим эксплуатационные свойства отдельного синхронного генератора, работающего параллельно с множеством других генераторов на общую сеть с разнообразными потребителями электроэнергии.

Энергосистема представляет множество электростанций и потребителей, объединенных общей электрической сетью. В энергосистеме

имеются специальные службы, которые заботятся о поддержании постоянства частоты и напряжения в сети. Диспетчер системы имеет суточно-почасовой график мощностей всех потребителей. Энергосистемы укрупняются, так как это делает их более экономичными и гибкими.

Для рассмотрения работы отдельного СГ в энергосистеме нужно заменить множество параллельно включенных генераторов системы одним эквивалентным генератором, внутреннее сопротивление которого очень мало, а мощность – велика. Эквивалентный потребитель изображается переменным активно–реактивным сопротивлением.

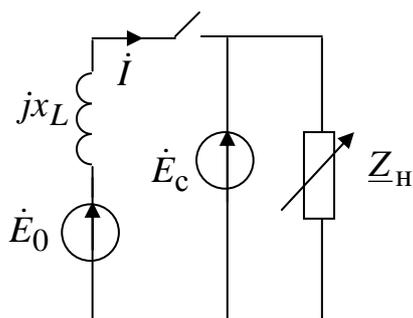


Рис. 10.10

Анализ работы отдельного генератора в мощной энергосистеме будем вести, используя схему замещения на рис. 10.10. При этом будем полагать, что изменение рабочих режимов синхронного генератора не может влиять на напряжение и частоту сети, так как они поддерживаются в сети постоянными.

При включении генератора на параллельную работу с другими генераторами необходимо избегать бросков тока в статорной цепи и возникновения ударных электромагнитных моментов на валу, способных вызвать повреждение генератора и другого оборудования, а также нарушить работу энергосистемы. Чтобы этого не происходило необходимо определенным образом отрегулировать режим работы генератора на холостом ходу и в определенный момент времени включить генератор в сеть. Совокупность этих действий называется **синхронизацией генератора**.

Чтобы синхронизировать генератор с сетью, необходимо обеспечить:

1. Равенство ЭДС E_0 генератора и напряжения сети U .
2. Равенство частот напряжений генератора $f_{Г}$ и сети $f_{с}$.
3. Совпадение по фазе напряжений генератора и сети.
4. Одинаковый порядок чередования фаз генератора и сети.

Выполнения этих условий на электрических станциях добиваются с помощью автоматических систем регулирования.

При точном выполнении условий синхронизации после включения генератора в сеть он остается в режиме холостого хода ($I = 0$). Векторная диаграмма для этого режима приведена на рис. 10.11.

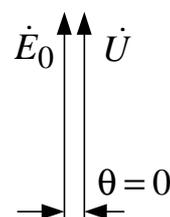


Рис.10.11

10.6. Угловые характеристики синхронного генератора

Рассмотрим особенности работы синхронного генератора параллельно с сетью бесконечной мощности ($U_c = const, f_c = const$).

Активная мощность синхронного генератора определяется соотношением

$$P = 3UI \cos \varphi. \quad (10.4)$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ больше полезной активной мощности на относительно малую мощность электрических потерь в обмотке статора. Пренебрегая этими потерями, получим

$$P \approx P_{эм} = 3E_0 I \cos \psi. \quad (10.5)$$

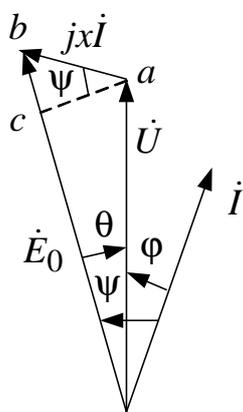


Рис. 10.12

Выразим активную мощность через угол рассогласования θ . Для этого обратимся к векторной диаграмме синхронного генератора, работающего с активно-индуктивной нагрузкой (рис. 10.12). Обозначим точками a и b концы векторов, а точкой c пересечение перпендикуляра, опущенного из точки a на вектор E_0 . Угол bac равен углу ψ , а

$$\cos \psi = \frac{ac}{ab} = \frac{U \sin \theta}{xI}.$$

Подставив в (10.5) это выражение, получим

$$P = \frac{3E_0 U}{x} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta, \quad (10.6)$$

$$\text{где } P_{\max} = \frac{3E_0 U}{x}.$$

Электромагнитный момент, создаваемый синхронной машиной

$$M_{эм} = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3E_0 U}{x\Omega_1} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta, \quad (10.7)$$

где $\Omega_1 = 2\pi n / 60$ — угловая скорость магнитного поля статора,

$$M_{\max} = \frac{3E_0 U}{x\Omega_1}.$$

Так как угловая частота постоянна, то момент пропорционален активной мощности. Зависимости (10.6) и (10.7) представляют собой аналитическое выражение **угловой характеристики** синхронной машины (рис. 10.13).

Активная мощность и электромагнитный момент пропорциональны ЭДС и синусу угла рассогласования θ , так как остальные параметры, входящие в формулы практически постоянны.

Амплитуду электромагнитного момента M_{\max} можно регулировать, так как она пропорциональна ЭДС E_0 , зависящей от тока ротора.

Покажем на угловой характеристике (рис. 10.13) значение вращающего момента $M_{\text{вр}}$ приводного двигателя в виде горизонтальной пунктирной линии (момент турбины не зависит от θ). В точке пересечения этой прямой с угловой характеристикой (при угле θ_1) $M_{\text{вр}} = M_{\text{эм}}$ и механическая мощность турбины равна электромагнитной (активной) мощности генератора. При том же вращающем моменте турбины, но меньшем токе ротора угол рассогласования будет больше ($\theta_2 > \theta_1$). Чем больше момент турбины, тем больше активная мощность, отдаваемая генератором в сеть. Мощность максимальна при $\theta = 90^\circ$.

Таким образом, **активная мощность генератора на электростанции регулируется моментом турбины или другого первичного**

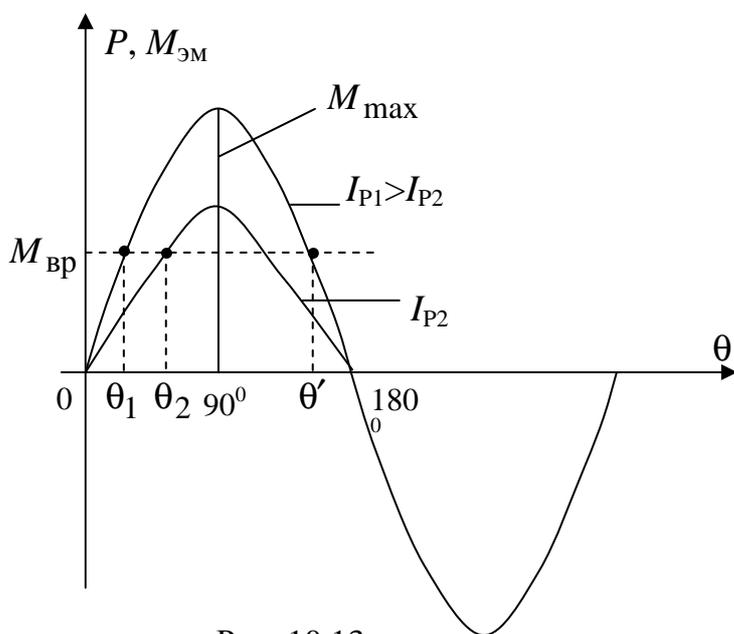


Рис. 10.13

двигателя и не зависит от сопротивления электрических приемников в сети. Диспетчер электростанции имеет суточно-почасовой график нагрузки всех потребителей, где указана требуемая активная и реактивная мощность. По указанию диспетчера синхронные генераторы включаются, нагружаются (или разгружаются и отключаются) так, чтобы в

любой момент времени обеспечивалась требуемая мощность электроэнергии.

Синхронизм генератора существует, пока вращающий момент турбины уравнивается электромагнитным моментом сопротивления генератора.

При $0 \leq \theta < 90^\circ$ (восходящий участок) генератор сохраняет синхронизм с сетью, т.е. имеет синхронную частоту вращения и работает устойчиво. Например, при увеличении вращающего момента турбины будет увеличиваться угол θ и, следовательно, электромагнитный момент сопротивления генератора $M_{эм}$ пока не наступит новое равновесие $M_{вр} = M_{эм}$. При этом увеличатся ток статора I , активная мощность P , но частота вращения ротора останется постоянной.

При $\theta = 90^\circ$ электромагнитный момент генератора максимален и при дальнейшем увеличении $M_{вр}$ генератор не может создать равного момента сопротивления ($M_{max} < M_{вр}$). Полюсы ротора «отрываются» от полюсов магнитного поля статора, частота вращения возрастает сверх синхронной и ротор «выпадает» из синхронизма. Это может возникнуть при постоянном вращающем моменте и уменьшении тока ротора (и ЭДС E_0) или снижении напряжения на зажимах генератора (при коротком замыкании в сети).

Амплитудное значение электромагнитного момента (или мощности) называют пределом статической устойчивости синхронной машины в синхронизме.

Для обеспечения динамической устойчивости допускается работа синхронной машины при угле рассогласования, не превышающем 30° при номинальной мощности.

При углах $90^\circ < \theta < 180^\circ$ работа синхронного генератора неустойчива. В этих условиях вращающий момент турбины $M_{вр}$ превышает максимальный тормозной электромагнитный момент генератора $M_{эм}$. Избыток вращающего момента ($M_{вр} > M_{эм}$) создает дальнейшее ускорение ротора, что обуславливает дальнейшее возрастание угла рассогласования и новое уменьшение тормозного момента и т.д., пока генератор не выпадает из синхронизма.

«Выпадению» из синхронизма предшествует неустойчивое состояние: неравномерное возрастание угла рассогласования θ до 90° , 180° , 360° и т.д., т.е. «проворачивание» ротора относительно магнитного поля токов статора и чередование режимов генератор-двигатель-генератор, броски тока статора достигают значений, соответствующих при $\theta = 180^\circ$ двойному току короткого замыкания: $I = \frac{2U}{x}$. Это состояние является аварийным.

Из него есть два выхода: отключить генератор от сети или стремиться удержать его в синхронизме, резко увеличивая ток возбуждения ротора. При этом усиливается магнитное поле и возрастает максимальный электромагнитный момент генератора.

Аварийное отключение мощного генератора может привести либо к отключению ряда потребителей соответствующей мощности, что связано с экономическим ущербом, либо перевода нагрузки на оставшиеся генераторы. В этом случае требуется определенное время для увеличения вращающих моментов турбин (увеличение расхода топлива, воды, пара).

10.7. Регулирование реактивной мощности синхронного генератора, U-образные характеристики

Рассмотрим влияние тока возбуждения на работу включенного в сеть синхронного генератора при постоянном вращающем моменте первичного двигателя. Построим три векторные диаграммы генератора для различных токов возбуждения, совместив их на одном рисунке (рис. 10.14). Первую диаграмму построим для случая, когда $E_{0(1)} > U$. Ток статора при этом $\dot{I}_{(1)}$ отстает от \dot{U} на угол φ_1 .

Вторую диаграмму построим для такого тока возбуждения, когда ток статора имеет только активную составляющую I_a . Так как по условию $M_{вр} = M_{эм} = const$ и $U = const$, то на основании формул (10.7) и (10.4) $E_0 \sin \theta = const$, $I \cos \varphi = I_a = const$.

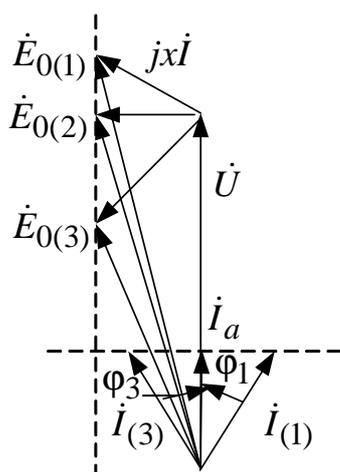


Рис. 10.14

Это означает, что векторы \dot{E}_0 и \dot{I} имеют годографы – прямые, показанные пунктирными линиями на рис. 10.14. Поэтому на второй диаграмме $E_{0(2)} < E_{0(1)}$, а ток статора \dot{I}_a – минимальный. Наконец, легко построить диаграмму для малого тока возбуждения, когда $E_{0(3)} < U$. Из диаграммы видно, что при малом токе возбуждения ток статора $\dot{I}_{(3)}$ генератора опережает напряжение \dot{U} на угол φ_3 .

На угловых характеристиках рис. 10.15 отмечены точки 1, 2, 3, соответствующие векторным диаграммам рис. 10.14.

Таким образом, *изменение тока возбуждения ротора синхронного генератора приводит к изменению характера реактивной мощности: при большом токе ротора (при перевозбуждении) реактивная мощность имеет индуктивный характер, при недо возбуждении – емкостной характер.*

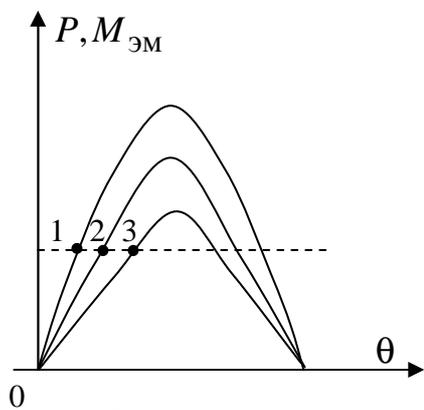


Рис. 10.15

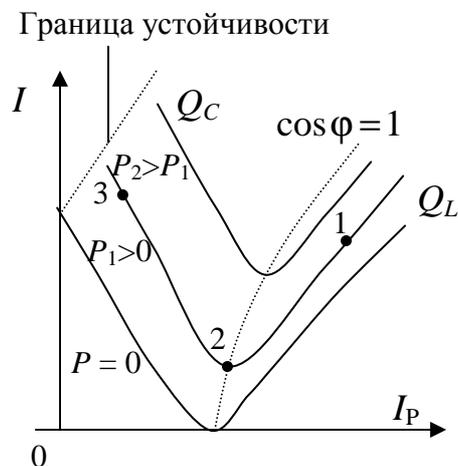


Рис. 10.16

Зависимость тока статора I от тока возбуждения ротора I_p при постоянной активной мощности P представляется U-образными характеристиками, показывающими возможность регулирования реактивной мощности (рис. 10.16). Минимумы кривых соответствуют чисто активным токам статора ($\cos \varphi = 1$).

Левее пунктирной кривой, соответствующей $\cos \varphi = 1$ (см. рис. 10.16), ток имеет емкостную реактивную составляющую, правее – индуктивную реактивную составляющую. В левой части графика U-образные кривые не доходят до оси ординат, кроме нижней кривой при $P = 0$. Это означает, что при малом токе возбуждения мала амплитуда электромагнитного момента и, при увеличении активной мощности (или момента турбины), может произойти выпадение генератора из синхронизма. При больших значениях тока ротора начинается насыщение магнитной цепи машины, в результате чего нарушается линейная зависимость ЭДС E_0 от тока ротора (см. рис. 10.6). Поэтому правые ветви U-образных характеристик становятся более пологими. На рис. 10.16 отмечены точки 1, 2, 3 угловых характеристик, показанных на рис. 10.15.

Влияние тока возбуждения на реактивную мощность синхронного генератора, работающего в сети, можно пояснить еще и таким образом. При постоянном напряжении сети интенсивность результирующего магнитного поля и потокосцепления должны оставаться неизменными. Поэтому увеличение или уменьшение интенсивности магнитного поля

полюсов ротора вызывает такое изменение расположения оси магнитного поля статора относительно ротора, при котором сохраняется результирующее потокосцепление машины: магнитное поле токов статора размагничивает или подмагничивает ротор, что изменяет характер реактивной мощности генератора. Нормально синхронный генератор работает с перевозбуждением.

10.8. Работа синхронного генератора в автономном режиме

Для обеспечения электроэнергией различных потребителей в местах, удаленных от мощной электрической сети, используется автономно работающий синхронный генератор (обычно приводится во вращение двигателем внутреннего сгорания).

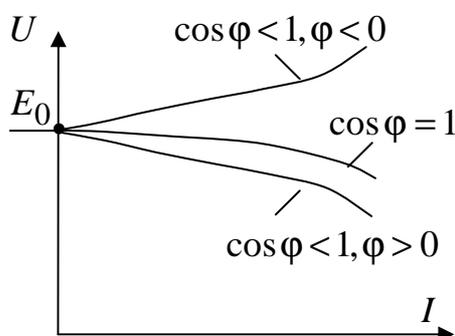


Рис. 10.17

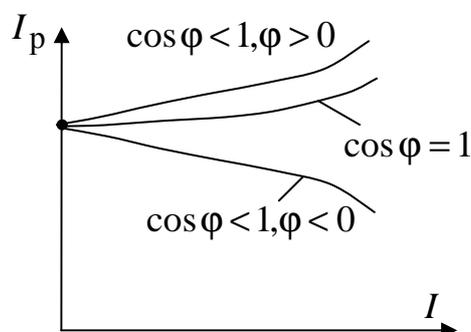


Рис. 10.18

Работа генератора в мощной энергосистеме характеризуется постоянством напряжения на зажимах машины и частоты этого напряжения. При работе генератора в автономном режиме напряжение на его зажимах зависит от тока и характера нагрузки. На рис. 10.17 построены внешние характеристики при различном коэффициенте мощности и $n = const$. Изменение напряжения, которое может достигать нескольких десятков процентов, объясняется большим внутренним индуктивным сопротивлением синхронной машины. Для стабилизации напряжения необходимо регулировать ЭДС E_0 и, следовательно, ток возбуждения (рис. 10.18). С этой целью генераторы снабжают автоматическими регуляторами возбуждения, реагирующими на значение U . Изменение тока возбуждения приводит к изменению напряжения и тока статора, но не коэффициента мощности. Следовательно, **автономный синхронный генератор не обладает свойством регулирования реактивной мощности**. Она целиком определяется характером приемника.

Изменение сопротивления нагрузки влияет не только на значение напряжения, но и на частоту вращения ротора. При внезапном увеличе-

нии активной составляющей тока статора после подключения дополнительной нагрузки возрастает электромагнитный момент сопротивления, и ротор начинает тормозиться. Если момент приводного двигателя остается неизменным, то частота вращения ротора снижается, что вызывает уменьшение ЭДС E_0 . При этом уменьшается ток статора, в частности его активная составляющая, до тех пор, пока электромагнитный момент не снизится до значения момента первичного двигателя. Генератор автоматически «сбрасывает» дополнительную активную нагрузку. В новом режиме значение напряжения на зажимах машины и его частота оказываются меньше, что неблагоприятно отражается на условиях работы нагрузочного устройства. Для поддержания частоты вращения ротора и частоты напряжения постоянными, приводной двигатель снабжается автоматическим регулятором момента.

10.9. Схема замещения и угловые характеристики синхронного двигателя

Схема замещения синхронного двигателя имеет те же элементы (рис. 10.19), что и схема замещения синхронного генератора. Но теперь

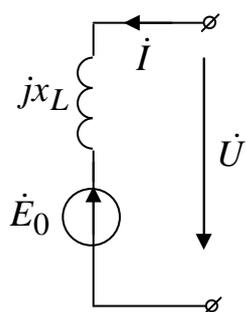


Рис. 10.19

она должна выражать иной смысл: синхронный двигатель – это активный приемник, имеющий противо-ЭДС E_0 и внутреннее индуктивное синхронное сопротивление x . На основании схемы замещения по второму закону Кирхгофа можно записать уравнение электрического состояния фазы статора двигателя

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + jx\dot{I} \quad (10.8)$$

Уравнению (10.8) соответствует векторная диаграмма синхронного двигателя, изображенная на рис.

10.20. **Вектор ЭДС \dot{E}_0** , который связывают с положением полюсов ротора, **при наличии нагрузки на валу двигателя отстает на угол θ от вектора напряжения \dot{U} сети**, с которым связано положение полюсов результирующего поля машины.

Угловая характеристика синхронного двигателя, также как и для генератора – это зависимость электромагнитной мощности P или электромагнитного момента $M_{эм}$ от угла рассогласования θ (рис. 10.13), которая ана-

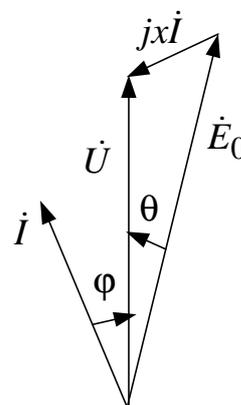


Рис. 10.20

литически описывается выражениями

$$P = \frac{3E_0U}{x} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta, \quad M_{\text{эм}} = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3E_0U}{x\Omega_1} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta.$$

Следует учитывать, что при переходе из генераторного в двигательный режим работы, изменяется знак угла θ , что приводит к изменению знака мощности и момента. Однако оперирование с отрицательными мощностями и моментами неудобно и поэтому они условно принимаются положительными.

Амплитуда угловой характеристики характеризует перегрузочную способность синхронного двигателя или *предел его статической устойчивости в синхронизме*

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} = \frac{1}{\sin \theta}.$$

Перегрузочная способность зависит от напряжения сети и ЭДС E_0 , т.е. от тока возбуждения ротора. Таким образом, перегрузочную способность легко регулировать током возбуждения. Номинальный момент двигателя соответствует углу рассогласования не более 30° . Поэтому перегрузочная способность двигателя всегда больше двух.

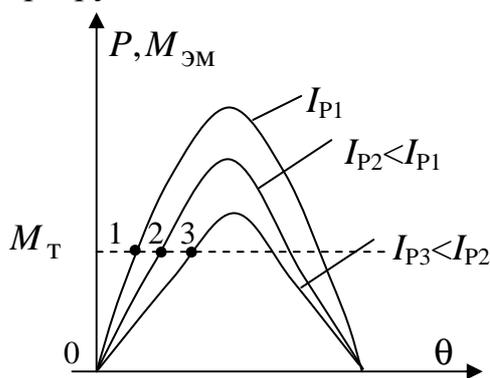


Рис. 10.21

Как и все двигатели, синхронный двигатель обладает свойством саморегулирования: *при изменении момента на валу изменяется угол рассогласования и электромагнитный вращающий момент становится равным моменту сопротивления*. При этом изменяются активная мощность и ток статора двигателя. Но частота вращения остается неизменной: механическая характеристика

синхронного двигателя – зависимость $n(M)$ – представляет собой горизонтальный отрезок прямой.

На угловых характеристиках (рис. 10.21) значение момента сопротивления на валу показано горизонтальной линией. Ее пересечение с восходящими ветвями характеристик, где возможна устойчивая работа синхронного двигателя, дают значения рабочих углов рассогласования θ . На нисходящих ветвях характеристик, так же как и для генератора, устойчивая работа двигателя невозможна.

При большом токе ротора его магнитное поле становится сильнее, угол рассогласования полюсов уменьшается. Если уменьшить ток рото-

ра, то момент сопротивления на валу может оказаться больше максимального электромагнитного момента двигателя и ротор остановится. При этом ЭДС $E_0 = 0$ и ток статора резко увеличивается, так как $\dot{I} = (\dot{U} - \dot{E}_0) / jx$.

10.10. Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя

Постоянство напряжения сети, от которой работает двигатель, обуславливает постоянство в нем результирующего потокосцепления. Поэтому регулирование тока возбуждения ротора при $M_{эм} = const$ приводит к изменению значения тока статора двигателя и его фазы. Таким образом, **коэффициент мощности синхронного двигателя можно регулировать**, что является его важной особенностью.

Изменение тока статора и его фазы при изменении тока возбуждения можно показать, построив векторные диаграммы (рис. 10.22). Зависимость тока статора от тока ротора при заданном моменте на валу синхронного двигателя представляют U-образными характеристиками (рис. 10.23).

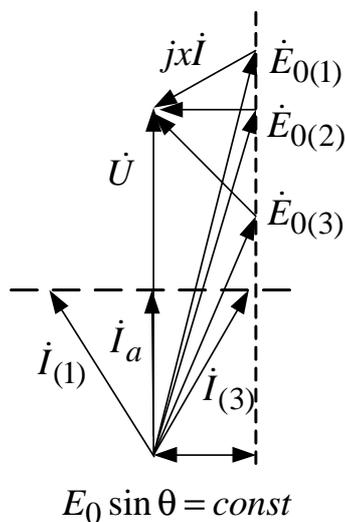


Рис. 10.22



Рис. 10.23

Перевозбужденный двигатель работает с опережающей реактивной составляющей тока (см. рис. 10.22), недозабужденный – с отстающей. На U-образных характеристиках рис. 10.23 отмечены точки 1, 2, 3, соответствующие тем же точкам на угловых характеристиках (рис. 10.21) и векторных диаграммах (рис. 10.22).

Обычно синхронные двигатели работают с перевозбуждением при $\cos \varphi = 0.8$. При этом емкостные составляющие токов статора компенсируют в линии индуктивные составляющие токов асинхронных двигателей, трансформаторов и других индуктивных приемников, уменьшая токи и потери энергии в линиях.

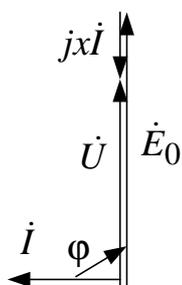


Рис. 10.24

Перевозбужденный синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу, называется синхронным компенсатором – потребителем емкостного тока. Векторная диаграмма компенсатора дана на рис. 10.24. Синхронные компенсаторы используют для улучшения коэффициента мощности и стабилизации напряжения промышленных сетей. Мощности синхронных компенсаторов достигают $100 \div 160$ Мвар.

10.11. Пуск синхронных двигателей

Пуск синхронного двигателя имеет некоторые особенности. При подключении статора к сети быстровращающееся магнитное поле токов статора действует на неподвижный, возбужденный постоянным током ротор со знакопеременной силой, не создающей среднего момента, и ротор остается неподвижным.

Электромагнитный момент может заставить ротор преодолеть инерцию и следовать за магнитным полем статора – втянуться в синхронизм, если полюсы магнитного поля токов статора будут достаточно медленно перемещаться относительно полюсов ротора. Это состояние возникнет, если предварительно разогнать ротор до частоты вращения, близкой к синхронной. Для разгона современных синхронных двигателей их роторы снабжают специальной пусковой короткозамкнутой обмоткой, подобной «беличьему колесу» асинхронных двигателей. Стержни этой обмотки укладывают в специальные пазы полюсов и соединяют по торцам ротора.

При пуске обмотку возбуждения отключают от источника питания и замыкают на резистор, сопротивление которого в 10-15 раз превышает сопротивление самой обмотки. Если обмотку оставить разомкнутой, то в начале пуска в ней будет индуцироваться большая ЭДС, опасная для изоляции. Под действием асинхронного момента ротор разгоняется до частоты вращения, близкой к синхронной ($n_2 = 0.95n$), а затем обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного напряжения. Возникает синхронный электромагнитный момент и двигатель втягивается в синхронизм.

Для мощных двигателей, асинхронный пуск которых потребовал бы мер по ограничению пусковых токов, иногда применяют небольшой асинхронный разгонный двигатель.

Обычно пуск синхронных двигателей автоматизирован, что удорожает их, однако при мощностях свыше 100 кВт синхронные двигатели оказываются экономически выгоднее асинхронных в основном благодаря способности работать с емкостной мощностью при перевозбуждении.

11. Элементы электропривода

11.1. Общие сведения

Электропривод – это электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов и состоящее из преобразовательного, электродвигательного, передаточного и управляющего устройств.

Таким образом, возникает задача выбора мощности и типа электродвигателя и алгоритма управления им для обеспечения заданного технологического процесса.

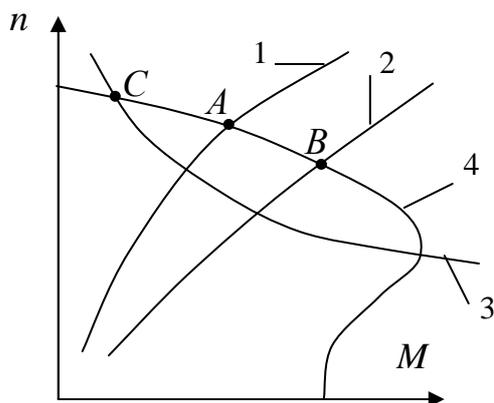


Рис. 11.1

- 1 – вентиляторная характеристика;
- 2 – ГПТ с независимым возбуждением;
- 3 – характеристика прокатных станов;
- 4 – механическая характеристика АД

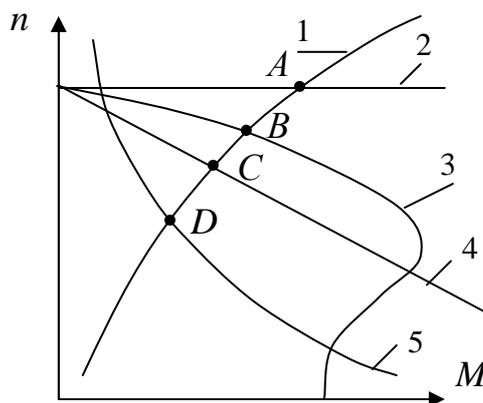


Рис. 11.2

- 1 – характеристика нагрузки;
- 2 – характеристика СД;
- 3 – характеристика АД;
- 4 – ДПТ параллельного возбуждения;
- 5 – ДПТ последовательного возбуждения

Рабочая точка электропривода в установившемся режиме определяется как видом механических характеристик нагрузки (рис. 11.1, где ГПТ – генератор постоянного тока; АД – асинхронный двигатель), так и видом механических характеристик двигателей различных типов (рис.

11.2, где СД – синхронный двигатель; ДПТ – двигатель постоянного тока).

На выбор мощности и типа электродвигателя влияет характер нагрузок производственного цикла. С этой целью строятся нагрузочные диаграммы электропривода (рис. 11.3, где $t_{ц}$ – время цикла работы)). Рассчитывать электропривод необходимо с учетом его динамических свойств. Для этого составляется уравнение движения

$$M_{вр} - M_{Т} = M_{дин},$$

где $M_{вр}$ – момент, развиваемый двигателем; $M_{Т}$ – момент сопротивления; $M_{дин}$ – динамический момент, который определяется по формуле

$$M_{дин} = J \frac{d\Omega}{dt},$$

где J – момент инерции вращающихся частей электропривода, приведенный к механической частоте вращения двигателя. Если $M_{вр} = M_{Т}$, то $M_{дин} = 0$ и при-

вод работает в установившемся ре-

жиме. При $M_{вр} > M_{Т}$ динамический момент положителен и направлен на увеличение частоты вращения, а при $M_{вр} < M_{Т}$ электропривод тормозится под действием динамического момента.

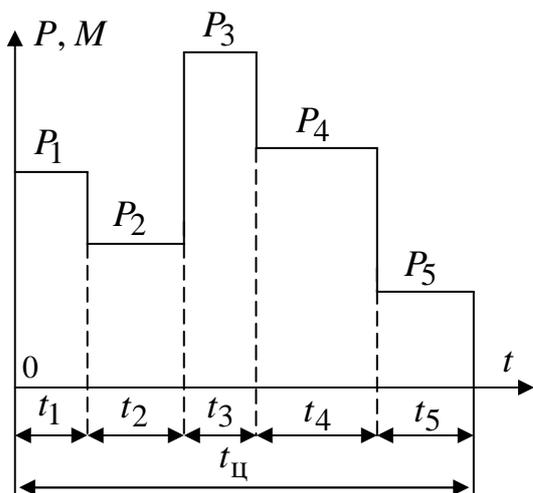


Рис. 11.3

11.2. Нагрев и охлаждение двигателя

Условие максимальной производительности, надежности и экономичности электропривода может быть выполнено только в случае правильного расчета мощности двигателя.

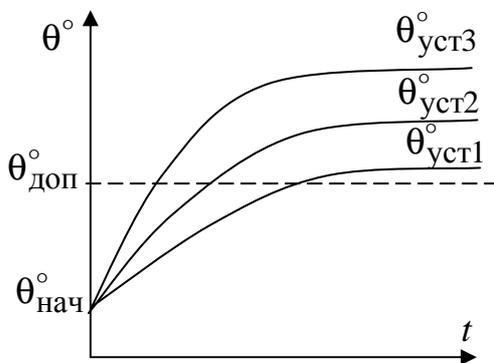


Рис. 11.4

Одним из условий правильности выбора электродвигателя является его нагрев. При инженерных расчетах нагрев и охлаждение электродвигателя рассматривается как для однородного тела.

Изменение температуры перегрева θ° в зависимости от начальной $\theta_{нач}^\circ$ и установившейся температуры $\theta_{уст}^\circ$ описывается уравнением

$$\theta^{\circ}(t) = \theta_{\text{уст}}^{\circ} (1 - e^{-t/T}) + \theta_{\text{нач}}^{\circ},$$

где T – температурная постоянная времени двигателя.

На рис. 11.4 приведены кривые нагрева двигателя при различных мощностях нагрузки. Электропривод будет надежно работать при условии, что температура двигателя не будет превышать допустимой $\theta^{\circ} \leq \theta_{\text{доп}}^{\circ}$.

11.3. Классификация режимов работы электропривода

В зависимости от режимов нагрева и охлаждения двигателя различают три режима работы электропривода: длительный режим; повторно-кратковременный режим; кратковременный режим.

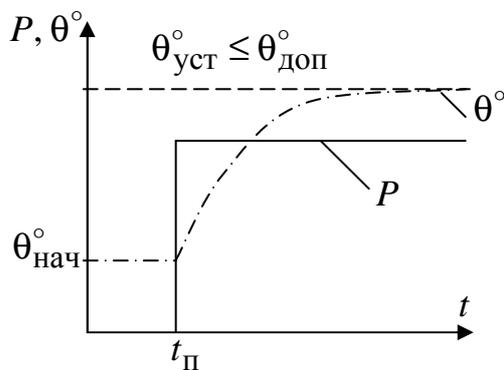


Рис. 11.5

Под **длительным режимом работы** понимают такой режим, при котором за время работы все узлы двигателя достигают установившейся температуры. При этом установившаяся температура не должна превышать допустимой (рис. 11.5).

Под **повторно-кратковременным режимом**

понимают такой режим работы, при котором ни за время работы t_p , ни за время паузы $t_{\text{п}}$ температура двигателя не достигает установившегося значения (рис. 11.6).

Под **кратковременным режимом** понимают такой режим, при котором за время работы температура двигателя не достигает установившегося значения, а за время паузы достигает температуры окружающей среды (рис. 11.7).

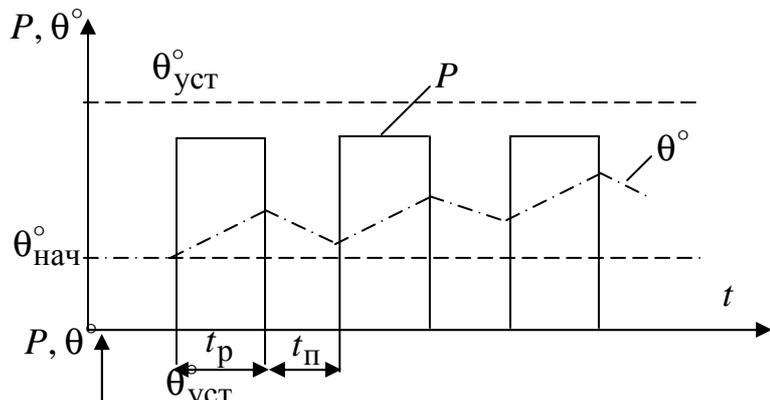


Рис. 11.6

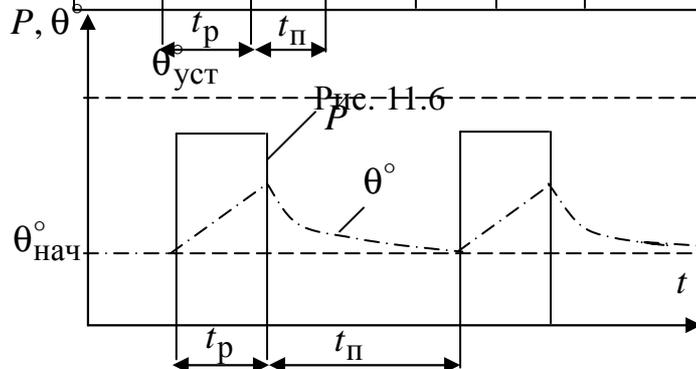


Рис. 11.7

11.4. Расчет мощности и выбор двигателя

Длительный режим. При длительном режиме должно соблюдаться условие $\theta_{\text{уст}}^{\circ} \leq \theta_{\text{доп}}^{\circ}$. Однако определение температуры слишком громоздко. Более удобным является метод средних потерь. Мощность потерь $\Delta P_{\text{ср}}$ за цикл работы не должна превышать номинального значения, т.е. $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}$ или

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_k t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k} \leq \Delta P_{\text{н}}.$$

Определение расчетной мощности двигателя можно выполнять методом эквивалентных величин. По графику нагрузочной диаграммы $M(t)$ или $P(t)$ (рис. 11.3) рассчитывается эквивалентный момент или мощность:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности и пусковому моменту.

Повторно-кратковременный режим. Этот режим характеризуется продолжительностью включения ПВ. По нагрузочной диаграмме определяется действительное значение ПВ:

$$\text{ПВ} = \frac{\sum t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%,$$

где $\sum t_{\text{р}}$ – время работы, $t_{\text{ц}}$ – время цикла, которое не должно превышать 10 минут, в противном случае двигатель должен выбираться как для продолжительного режима. Выбор мощности двигателя выполняется по методу эквивалентных величин. Рассчитанные значения эквивалентных величин момента $M_{\text{экв}}$ и мощности $P_{\text{экв}}$ приводят к мощности при стандартной продолжительности включения $\text{ПВ}_{\text{н}}$:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{н}}}} \quad \text{или} \quad P_{\text{расч}} = M_{\text{экв}} \Omega \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{н}}}}.$$

При этом $P_{\text{экв}}$ и $M_{\text{экв}}$ рассчитываются только для времени работы

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum P_n^2 t_{\text{р}n}}{\sum t_{\text{р}}}}; \quad M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_n^2 t_{\text{р}n}}{\sum t_{\text{р}}}},$$

где $t_{\text{р}n}$ – время работы в n -ом режиме;

P_n, M_n – мощность и момент в n -ом режиме.

Если для привода производственного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, устанавливается двигатель, предназначенный для продолжительной работы, то при расчете $M_{\text{ЭКВ}}$ и $P_{\text{ЭКВ}}$ надо учитывать и время пауз $t_{\text{П}}$:

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum P_n^2 t_{\text{pn}}}{\sum t_{\text{p}} + \sum t_{\text{п}}}}, \quad M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum M_n^2 t_{\text{pn}}}{\sum t_{\text{p}} + \sum t_{\text{п}}}}.$$

Помимо мощности двигателя, необходимо выбрать род его тока и конструктивную форму исполнения.

Асинхронные двигатели нашли широкое применение во всех отраслях народного хозяйства для привода различного рода механизмов и машин, не требующих регулирования частоты вращения в процессе работы.

Для нерегулируемых электроприводов средней и большой мощности, работающих в продолжительном режиме с редкими пусками, целесообразно использовать синхронный двигатель.

Двигатели постоянного тока применяются там, где по условиям работы требуется глубокое и плавное регулирование частоты вращения.

Кроме того, выбор типа двигателя и его конструктивного исполнения определяется условиями его эксплуатации.

11.5. Управление электроприводами

Управление электроприводами заключается в осуществлении пуска, реверса, остановки, регулирования частоты вращения, обеспечении заданного алгоритма работы технологического процесса. Оно реализуется релейно-контакторными, полупроводниковыми устройствами, микропроцессорными системами и встроенными ЭВМ.

Различают разомкнутые и замкнутые системы управления. В разомкнутых системах наличие возмущающих воздействий приводит к изменению режима работы электропривода. В замкнутых системах режим работы поддерживается за счет обратных связей.