

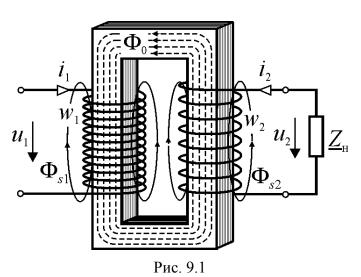
Часть вторая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

9. Трансформаторы

Трансформатором называется электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии в цепях переменного тока. С помощью трансформаторов можно изменить величину напряжения, тока, начальной фазы и частоты, т.е. любого из параметров, определяющих напряжение или ток в цепи. В данном курсе мы ограничимся рассмотрением наиболее распространённого вида трансформаторов — трансформатора напряжения, т.е. устройства, предназначенного для преобразования одного переменного синусоидального напряжение в другое той же частоты.

Вся электрическая энергия, вырабатываемая промышленным способом, проходит несколько стадий преобразования напряжения с помощью трансформаторов. Вырабатывать энергию с напряжениями безопасными для потребителя невыгодно, т.к. при таких напряжениях очень дорогой будет её передача и распределение. Передача энергии производится при напряжениях от 110 до 1150 кВ. Производство энергии при таких напряжениях невозможно, т.к. невозможно выполнить в этих условиях электрическую изоляцию генераторов. Напряжение генераторов обычно не превосходит 35 кВ, поэтому с помощью трансформаторов это напряжение повышается до уровня линии электропередачи, а у потребителя оно несколькими ступенями понижается до 380/220 В. Однако многие устройства не могут работать и при таком напряжении, в частности устройства автоматики, бытовой техники, компьютеры и т.п. Поэтому они содержат один или несколько трансформаторов, преобразующих сетевое напряжение к необходимому для них уровню питания.

9.1. Устройство и принцип действия



Простейший трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода и двух обмоток в виде цилиндрических катушек (рис. 9.1).

Одна из обмоток подключается к источнику переменного синусоидального тока с напряжением u_1 и называется первичной обмоткой. К другой обмотке подключается нагрузка трансформатора. Эта обмотка называется вторичной обмоткой.

Переменный синусоидаль-

ный ток i_1 , протекающий по первичной обмотке трансформатора, возбуждает



в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_0 , который пронизывает витки обеих обмоток и наводит в них ЭДС e_1 и e_2 с амплитудами пропорциональными числам витков w_1 и w_2 (см. выражение (8.2)). Величина ЭДС первичной обмотки E_1 практически равна напряжению питания U_1 и действует почти в противофазе. Поэтому величина тока в первичной обмотке определяется разностью U_1-E_1 . При подключении нагрузки ко вторичной обмотке в ней под действием ЭДС e_2 возникает переменный синусоидальный ток i_2 , который возбуждает в магнитопроводе магнитный поток, направленный встречно по отношению к магнитному потоку, создаваемому первичной обмоткой. В результате поток в магнитопроводе Φ_0 уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС E_1 и увеличению разности U_1-E_1 . Вследствие чего ток первичной обмотки I_1 увеличивается и восстанавливает величину магнитного потока Φ_0 . Таким образом, посредством ЭДС первичной обмотки в магнитопроводе трансформатора автоматически поддерживается постоянный магнитный поток.

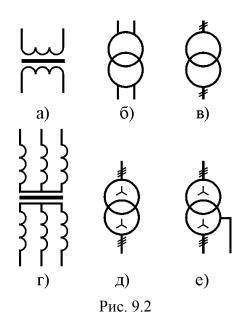
По отношению к нагрузке вторичная обмотка трансформатора является источником электрической энергии с ЭДС e_2 . Пренебрегая потерями во вторичной обмотке можно считать, что напряжение в нагрузке $U_2 \approx E_2$, а т.к. $U_1 \approx E_1$ и ЭДС обмоток пропорциональны числам витков, то соотношение напряжений питания трансформатора и нагрузки также определяется соотношением чисел витков обмоток, т.е.

$$U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = w_1/w_2 = k$$
. (9.1)

Величина k называется κo эффициентом трансформации. Следовательно, для получения требуемого напряжения в нагрузке нужно изготовить трансформатор с заданным соотношением чисел витков первичной и вторичной обмоток, т.е. с заданным коэффициентом трансформации. Если на одном магнитопроводе разместить несколько обмоток с разными числами витков, то каждая из них будет отдельным источником питания с напряжением, определяемым числом её витков. Если число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной $w_2 < w_1$, то k < 1 и напряжение в нагрузке будет меньше напряжения на входе трансформатора. Такой трансформатор называется понижающим. В противном случае, т.е. при k > 1, трансформатор называется повышающим.

Электрическая цепь вторичной обмотки трансформатора изолирована от цепи первичной обмотки. Энергия от источника питания передаётся в нагрузку посредством магнитного поля, возбуждаемого в магнитопроводе и единого для обеих обмоток. Таким образом, с помощью трансформатора можно не только создать любое напряжение в нагрузке, но и гальванически разделить электрические цепи переменного тока друг от друга.





Помимо потока в магнитопроводе, называемого *основным магнитным потоком*, протекающие по обмоткам токи создают потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} (рис. 9.1). Эти потоки незначительны по величине и не участвуют в процессе передачи энергии в нагрузку, т.к. сцепляются только с одной из обмоток трансформатора. Однако они вызывают дополнительное потребление трансформатором реактивной мощности, расходуемой на их формирование.

Трансформатор является очень эффективным техническим устройством. Правильно рассчитанный, изготовленный и эксплуатируемый трансформатор мощностью выше нескольких десятков киловатт имеет коэффициент полез-

ного действия более 95%

На рис. 9.2 показаны условные обозначения однофазных (a, δ, ϵ) и трёхфазных (z, δ, ϵ) трансформаторов.

Вопросы для самопроверки

- 1. Для чего предназначен трансформатор?
- 2. Как устроен трансформатор?
- 3. Что такое коэффициент трансформации?
- 4. Какие магнитные потоки различают в трансформаторе?
- 5. Чем отличается основной магнитный поток трансформатора от потоков рассеяния?
- 6. Каким образом стабилизируется основной магнитный поток в трансформаторе?

9.2. Математическая модель трансформатора

9.2.1. Уравнение магнитодвижущих сил и токов

В случае протекания токов в обеих обмотках МДС F, создающая основной магнитный поток, равна сумме МДС каждой из обмоток

$$F = F_1 + F_2 = i_1 w_1 + i_2 w_2 (9.2)$$

При постоянном напряжении и частоте питания магнитный поток остаётся практически постоянным. Поэтому постоянной будет и результирующая МДС F во всех режимах работы трансформатора. В том числе и в режиме холостого хода, когда нагрузка отключена и ток вторичной обмотки равен нулю, т.е.

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1 \approx \text{const},$$
 (9.3)

где i_0 — ток первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Разделив обе части уравнения (9.3) на w_1 , получим

$$i_1 + i_2 w_2 / w_1 = i_0$$
.



Обозначая $i_2w_2/w_1=i_2/k=i_2'$, получим уравнение токов трансформатоpa

$$i_0 = i_1 + i_2' \qquad \Leftrightarrow \qquad \underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2'$$
 (9.4)

9.2.2. Уравнения электрического состояния Уравнение Кирхгофа для контура первичной обмотки:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} - e_1$$
,

где R_1 и L_{s1} – активное сопротивление провода и индуктивность рассеяния первичной обмотки, e_1 – ЭДС, наводимая в первичной обмотке основным магнитным потоком. В комплексной форме это уравнение имеет вид

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j X_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \tag{9.5}$$

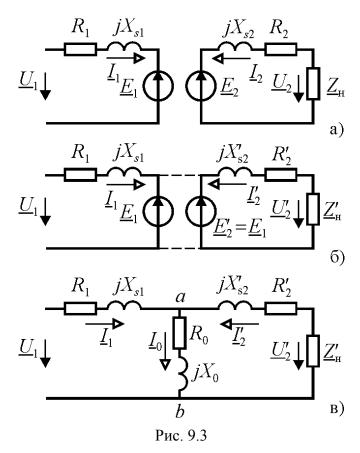
Для вторичной обмотки также можно составить уравнение Кирхгофа

$$e_2 = R_2 i_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

где R_2 и L_{s2} – активное сопротивление провода и индуктивность рассеяния вторичной обмотки; e_2 – ЭДС, наводимая во вторичной обмотке основным магнитным потоком; u_2 — падение напряжения в нагрузке трансформатора. Отсюда в комплексной форме:

$$\underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j X_{s2} \underline{I}_2 + \underline{U}_2, \tag{9.6}$$

9.3. Схема замещения



Уравнения (9.5) и (9.6) соответствуют двум электрически несвязанным цепям рис. 9.3, а. Связать эти цепи можно, если ЭДС источников E_1 и E_2 одинаковы. Тогда их можно заменить одним общим для обеих цепей источником. Величина ЭДС E_2 определяется числом витков вторичной обмотки $E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{0m}$. Умножив уравнение (9.6) на коэффициент трансформации, получим

$$k\underline{E}_2 = kR_2\underline{I}_2 + jkX_{s2}\underline{I}_2 + k\underline{U}_2,$$
The

$$kE_2 = E_2' = \frac{w_1}{w_2} 4,44 w_2 f \Phi_{0m} = E_1.$$

Таким образом, после умножения ЭДС источника вторичной



обмотки становится равной ЭДС источника первичной обмотки.

Математически операция умножения на k уравнения (9.6) вполне корректна, но после этого уравнение соответствует электрической цепи с другими значениями активной и реактивной мощности. Действительно, $kR_2I_2^2 \neq R_2I_2^2$; $kX_{s2}I_2^2 \neq X_{s2}I_2^2$ и для выполнения условия инвариантности мощности нужно умножить и разделить первые два слагаемых в правой части уравнения на k и отнести делитель к значению тока. Тогда $k^2R_2(I_2/k)^2 = R_2I_2^2$; $k^2X_{s2}(I_2/k)^2 = X_{s2}I_2^2$ и уравнение (9.6) примет вид

$$\underline{E'}_{2} = \underline{E}_{1} = R'_{2}\underline{I'}_{2} + jX'_{s2}\underline{I'}_{2} + \underline{U'}_{2}, \tag{9.7}$$

где $R_2' = k^2 R_2$; $X_{s2}' = k^2 X_{s2}$; $\underline{Z}_{\rm H}' = k^2 \underline{Z}_{\rm H}$; $\underline{I}_2' = I_2/k$; $\underline{U}_2' = k \underline{U}_2$ – приведённые параметры и величины электрической цепи вторичной обмотки. Это уравнение называется уравнением вторичной обмотки приведённого трансформатора.

Схема замещения, соответствующая уравнению (9.7), показана на рис. 9.3, б. Два одинаковых источника ЭДС можно заменить одним, если объединить точки их подключения. В результате образуется ветвь, в которой в соответствии с уравнением (9.4) должен протекать ток I_0 , равный току первичной обмотки в режиме холостого хода (рис. 9.3, в). Чтобы учесть в схеме тепловые потери в магнитопроводе и энергию магнитного поля в эту ветвь нужно включить активное и реактивное сопротивления R_0 и X_0 , аналогичные сопротивлениям катушки с ферромагнитным сердечником. При этом значесопротивлений удовлетворять должны $\underline{U}_{ab}=-\underline{E}_1=j\omega w_1\underline{\Phi}_0=\underline{I}_0ig(R_0+jX_0ig)$. Таким образом, ток I_0 определяет основной магнитный поток и называется поэтому намагничивающим током. Мощность $R_0 I_0^2$, рассеиваемая активным сопротивлением R_0 , будет равна мощности тепловых потерь в магнитопроводе, а реактивная мощность $X_0 I_0^2$ — мощности, расходуемой на возбуждение поля, образующего поток в магнитопроводе. Следует заметить, что намагничивающий ток не является реальным током, протекающим между узлами ав электрической цепи рис. 9.3, в. Этот ток, как и вся схема замещения, является расчётным эквивалентом электромагнитных процессов в трансформаторе. Он представляет собой часть тока первичной обмотки, расходуемую на возбуждение магнитного поля и компенсацию тепловых потерь в магнитопроводе. Намагничивающий ток выделяется из тока первичной обмотки аналогично разделению тока в электрической цепи на активную и реактивную составляющие.

Таким образом, схема замещения рис. 9.3, *в* соответствует уравнениям токов и состояния электрических цепей обмоток трансформатора и учитывает все электромагнитные процессы, связанные с его работой. При этом в результате приведения параметров, тока, напряжения и ЭДС вторичной обмот-



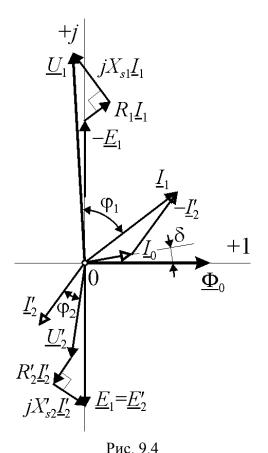
ки к числу витков первичной вместо магнитной связи между обмотками трансформатора в схеме замещения появилась эквивалентная электрическая связь.

Вопросы для самопроверки

- 1. При каком условии получают уравнение токов трансформатора?
- 2. При каком условии осуществляют приведение параметров вторичной обмотки?
- 3. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к числу витков первичной обмотки?
- 4. Что такое намагничивающий ток?
- 5. Как связаны между собой реальные и приведённые параметры цепи вторичной обмотки?

9.4. Векторная диаграмма

Векторная диаграмма даёт наглядное представление о соотношениях между различными величинами, характеризующими работу трансформатора. С её помощью можно проследить влияние величины и характера нагрузки в различных режимах.



Построение диаграммы лучше начинать с векторов независимых от режима работы трансформатора. Такими векторами являются векторы основного магнитного потока $\underline{\Phi}_0$, тока холостого хода \underline{I}_0 и ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 , наводимых основным магнитным потоком в первичной и вторичной обмотках.

Начальную фазу основного магнитного потока можно принять равной нулю и построить на вещественной оси вектор $\underline{\Phi}_0$, а затем вектор \underline{I}_0 , опережающий основной поток на угол магнитных потерь δ .

Вектор ЭДС основного потока первичной обмотки \underline{E}_1 и равный ему вектор приведённой ЭДС вторичной обмотки \underline{E}'_2 отстают по фазе от потока $\underline{\Phi}_0$ на 90° и располагаются на мнимой оси в отрицательном направлении.

Полагая нагрузку трансформатора активно-индуктивной, строим вектор тока вторичной обмотки \underline{I}_2 с отставанием по фа-

зе на некоторый угол от \underline{E}'_2 . Теперь, в соответствии с (9.4), можно построить



вектор тока в первичной обмотке \underline{I}_1 , как разность векторов тока холостого хода \underline{I}_0 и тока \underline{I}_2' .

Определив положение векторов ЭДС и токов, можно строить векторы, соответствующие уравнениям (9.5) и (9.7). Для построения вектора напряжения на входе трансформатора \underline{U}_1 суммируем вектор ЭДС $-\underline{E}_1$, вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки $R_1\underline{I}_1$, совпадающий по направлению с вектором тока \underline{I}_1 , и вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $jX_{s1}\underline{I}_1$, опережающий вектор тока на 90°.

Вектор напряжения в нагрузке получается вычитанием из вектора ЭДС $\underline{E'}_2$ вектора падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $jX'_{s2}\underline{I'}_2$, опережающего вектор тока $\underline{I'}_2$ на 90°, и вектора падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки $R'_2\underline{I'}_2$, совпадающего по направлению с вектором тока $\underline{I'}_2$.

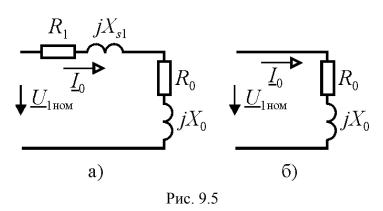
Следует заметить, что на рис. 9.4 векторы $R_1 \underline{I}_1$, $jX_{s1}\underline{I}_1$, $R'_2\underline{I'}_2$ и $jX'_{s2}\underline{I'}_2$ показаны в сильно увеличенном масштабе для того, чтобы проследить их положение относительно других векторов. На самом деле эти напряжения приблизительно на порядок меньше ЭДС основного магнитного потока.

9.5. Режим холостого хода

Режимом холостого хода трансформатора называется режим при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Полагая в уравнениях (9.4)-(9.6) $\underline{I}_2 = 0$, получим

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0$$
; $\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_0 + j X_{s1} \underline{I}_0 - \underline{E}_1$; $\underline{E}_2 = \underline{U}_2$.



В режиме холостого хода трансформатор по существу является катушкой с ферромагнитным сердечником. Поэтому процессы и явления, рассмотренные в разделе 8.1, полностью соответствуют этому режиму, включая векторную диаграмму и схему замещения (рис. 9.5, *a*).

При номинальном на-

пряжении питания ток первичной обмотки в режиме холостого хода составляет 3...10% от тока при номинальной нагрузке, причём меньшие значения соответствуют трансформаторам большей мощности. Поэтому падения на-



пряжения на активном сопротивлении обмотки R_1I_0 и на индуктивном сопротивлении потока рассеяния $X_{s1}I_0$ пренебрежимо малы и $U_1\approx E_1$. В то же время, при разомкнутой цепи вторичной обмотки напряжение на её выводах в точности равно ЭДС, наводимой основным магнитным потоком $U_2=E_2$. Следовательно, отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках в режиме холостого хода будет наилучшим приближением к значению коэффициента трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} \tag{9.8}$$

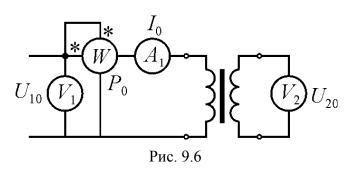
Активная мощность, потребляемая трансформатором из сети P_0 , расходуется на покрытие тепловых потерь в первичной обмотке P_1 и в магнитопроводе $P_{\rm cr}$ (мощность потерь в «стали»)

$$P_0 = P_1 + P_{\rm cr} = R_1 I_0^2 + P_{\rm cr}$$
,

но потери в обмотке от тока холостого хода пренебрежимо малы, т.к. этот ток очень мал по сравнению в номинальным током. Поэтому потребляемая мощность практически соответствует потерям энергии в магнитопроводе $P_0 \approx P_{\rm ct}$.

С учётом этого, а также соотношения магнитных потоков $\Phi_0 \gg \Phi_{s1} \Rightarrow X_0 \gg X_{s1}$, схема замещения трансформатора в режиме холостого хода может быть представлена двумя элементами рис. 9.5, δ .

Ток холостого хода трансформатора содержит активную и реактивную составляющие. Они соответствуют активной и реактивной мощности, потребляемой трансформатором. Обычно активная мощность не превышает 10% реактивной мощности и угол магнитных потерь составляет $\delta < 5^{\circ}$.



Опыт холостого хода. Для определения потерь в магнито-проводе и параметров схемы замещения проводится опыт холостого хода. Он выполняется по схеме рис. 9.6. На первичную обмотку подаётся номинальное напряжение $U_{10} = U_{\rm 1 hom}$, а ко вторичной обмотке подключается

вольтметр V_2 с возможно большим входным сопротивлением так, чтобы $I_2 \approx 0$.

По результатам измерений по выражению (9.8) определяют коэффициент трансформации, а также активное сопротивление цепи

$$R_{10} = R_1 + R_0 = P_0 / I_0^2 \approx R_0$$

и индуктивное сопротивление цепи



$$X_{10} = X_{s1} + X_0 = \sqrt{(U_{10}/I_{10})^2 - R_{10}^2} \approx X_0.$$

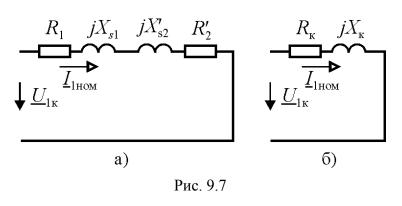
Напряжение на вторичной обмотке трансформатора в опыте холостого хода считается номинальным напряжением $U_{20} = U_{2\mathrm{hom}}$ и указывается в справочных данных.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какой режим трансформатора называют режимом холостого хода?
- 2. Почему отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора в режиме холостого хода является наилучшим приближением к значению коэффициента трансформации?
- 3. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода?
- 4. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме холостого хода?
- 5. Как соотносятся между собой величины активной и реактивной мощностей, потребляемых трансформатором в режиме холостого хода, и почему?
- 6. Как проводится опыт холостого хода? Нарисуйте схему опыта.
- 7. Как на основании опыта холостого хода определяются параметры ветви намагничивания схемы замещения трансформатора?

9.6. Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания это режим, при котором выводы вторичной обмотки замкнуты между собой. Такой режим при номинальном или близком к номинальному напряжении питания является аварийным и может привести к разрушению трансформатора, но при пониженном напряжении его используют для определения параметров обмоток. В этом случае он называется опытом короткого замыкания и является, наряду с опытом холостого хода, обязательным при испытаниях трансформатора.

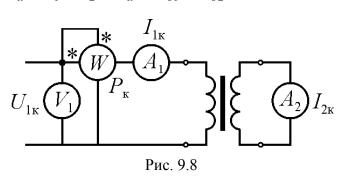


В опыте короткого замыкания на первичную обмотку трансформатора подают напряжение $U_{1\kappa}$, при котором ток в ней равен номинальному значению $I_{1\kappa} = I_{1\text{ном}}$. Это напряжение составляет 5...10% от номинального, поэтому примерно во столько же раз

снижается основной магнитный поток, а намагничивающий ток, вследствие выхода материала сердечника из режима насыщения снижается практически до нуля $I_0 = I_{0\kappa} \approx 0$. При этом уравнение токов (9.4) превращается в прибли-



жённое равенство $\underline{I}_{1\kappa} \approx -\underline{I}'_{2\kappa} = -\underline{I}_{2\kappa}/k$. Следовательно, в опыте короткого замыкания при номинальном токе в первичной обмотке ток вторичной обмотки будет также номинальным, а их отношение с хорошим приближением будет равно коэффициенту трансформации $k = I_{2\kappa}/I_{1\kappa}$. С учётом того, что $I_{0\kappa} \approx 0$ схема замещения опыта короткого замыкания приобретает вид рис. 9.7, где $R_{\kappa} = R_1 + R_2'; \ X_{\kappa} = X_{s1} + X_{s2}'.$



Опыт короткого замыкания проводится по схеме рис. 9.8. Во вторичную обмотку включают амперметр A_2 с возможно меньшим входным сопротивлением так, чтобы $U_2 \approx 0$. Напряжение на первичной обмотке постепенно увеличивают от нуля до тех пор,

пока ток первичной обмотки не станет равным номинальному. В этом режиме измеряют напряжение на первичной обмотке $U_{1\kappa}$, а также потребляемую мощность и токи в обмотках.

Отношение напряжение на первичной обмотке в опыте короткого замыкания к номинальному значению, выраженное в процентах,

$$u_{\kappa}^{0}/_{0} = (U_{1\kappa}/U_{1\text{HOM}}) \cdot 100$$
 (9.9)

называется напряжением короткого замыкания и указывается в справочных данных. В соответствии со схемой замещения рис. 9.7, б, это напряжение можно разделить на активную и реактивную составляющие

$$u_{\text{ak}}\% = (R_{\text{k}}I_{1\text{HOM}}/U_{1\text{HOM}}) \cdot 100; \ u_{\text{pk}}\% = (X_{\text{k}}I_{1\text{HOM}}/U_{1\text{HOM}}) \cdot 100.$$

Активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания, практически полностью расходуется на компенсацию тепловых потерь в обмотках, поэтому её называют также мощностью потерь в «меди»:

$$P_{1\kappa} = R_1 I_1^2 + R_2' {I_2'}^2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \, .$$

По данным опыта короткого замыкания можно определить также суммарное активное сопротивление обмоток

$$R_{\rm K} = R_1 + R_2' = P_{\rm K} / I_{1{\rm HOM}}^2$$

и суммарное реактивное сопротивление
$$X_{\kappa} = X_{s1} + X_{s2}' = \sqrt{\left(U_{1\kappa}/I_{1\text{hom}}\right)^2 - R_{\kappa}^2}$$

В опыте короткого замыкания можно также проверить значение коэффициента трансформации, полученное в опыте холостого хода

$$k \approx I_{2\kappa} / I_{1\text{HOM}}$$
.

Параметры схемы замещения и напряжение трансформатора в режиме короткого замыкания позволяют произвести оценку его работы под нагрузкой.

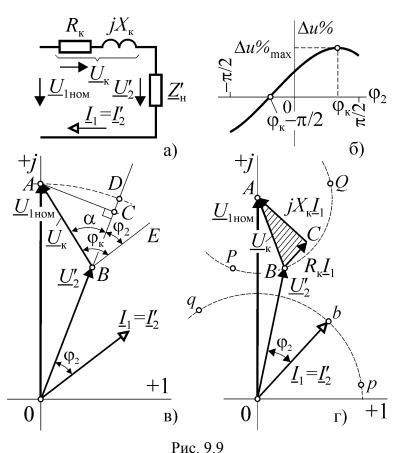


Вопросы для самопроверки

- 1. Какой режим трансформатора называют режимом короткого замыкания?
- 2. Чем отличается режим короткого замыкания от опыта короткого замыкания?
- 3. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания?
- 4. Как выглядит схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания?
- 5. Как соотносятся между собой активная и реактивная мощности, потребляемых трансформатором в опыте короткого замыкания, и почему?
- 6. Как проводится опыт короткого замыкания? Нарисуйте схему опыта
- 7. Что такое напряжение короткого замыкания?
- 8. Как на основании опыта короткого замыкания определяются параметры схемы замещения трансформатора?

9.7. Внешняя характеристика

Внешней характеристикой называется зависимость вторичного напря-



жения трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$. Эта характеристика имеет большое значение эксплуатации трансформатора, т.к. стандартом на электроэнергии качество определяется допустимое отклонение напряжения в сети от номинального значения. Обычно оно не должно превышать $\pm 5\%$. Отклонение напряжения опасно для многих видов нагрузки трансформатора, поэтому нужно уметь произвести его оценку.

Для этого используют упрощённую схему замещения трансформатора рис. 9.9, *a*, в которой исключена цепь намагничи-



вания. На практике это вполне допустимо, т.к. намагничивающий ток I_0 при номинальном напряжении на первичной обмотке составляет несколько процентов и существенно не влияет на результат вычисления. Изменение напряжения в нагрузке происходит за счёт падения напряжения $U_{\rm k}$ на активном и реактивном сопротивлениях обмоток трансформатора $R_{\rm k}$ и $X_{\rm k}$.

Для оценки отклонения напряжения от номинального значения используется величина, называемая *процентным изменением напряжения трансформатора*

$$\Delta u\% = \frac{U_{2\text{hom}} - U_2}{U_{2\text{hom}}} \cdot 100 = \frac{U_{1\text{hom}} - U_2'}{U_{1\text{hom}}} \cdot 100. \tag{9.10}$$

Расчётную формулу для $\Delta u\%$ можно получить из векторной диаграммы рис. 9.9, ϵ . На ней вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{1\text{ном}}$ совмещён с положительным направлением мнимой оси. Отклонение напряжения равно разности модулей векторов $\underline{U}_{1\text{ном}}$ и \underline{U}_2' , поэтому если от начала координат на линии продолжения вектора \underline{U}_2' построить отрезок $0D = 0A = m_u U_{1\text{ном}}$, то искомая величина в некотором масштабе m_u будет равна отрезку BD.

Напряжение U_{κ} обычно не превышает 10...15% от номинального, поэтому угол между векторами $\underline{U}_{\text{1ном}}$ и $\underline{U'}_{2}$ мал и отрезок BD приблизительно равен отрезку BC, осекаемому перпендикуляром, опущенным из точки A на линию 0D. Тогда

$$\Delta u\% = \frac{BD}{0D} \cdot 100 \approx \frac{BC}{0D} \cdot 100$$
. (9.11)

Проведём через точку B линию BE параллельно вектору тока \underline{I}_1 . Угол α прямоугольного треугольника ABC можно определить как $\alpha = \phi_{\kappa} - \phi_2$, где $\phi_{\kappa} = \operatorname{arctg}(X_{\kappa}/R_{\kappa})$. Отсюда.

$$BC = U_{\kappa} \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_2) \tag{9.12}$$

Падение напряжения $U_{\rm k}$ пропорционально величине тока нагрузки $U_{\rm k}=I_2'Z_{\rm k}=I_1Z_{\rm k}$. Введём понятие коэффициента нагрузки трансформатора как отношения тока вторичной обмотки к его номинальному значению $\beta=I_2/I_{\rm 2hom}=I_2'/I_{\rm 2hom}'$. Тогда $U_{\rm k}=\beta U_{\rm kh}$, где $U_{\rm kh}$ — напряжение $U_{\rm k}$ при номинальном токе, т.е. в опыте короткого замыкания. Отсюда с учётом выражений (9.9), (9.11) и (9.12) получим —

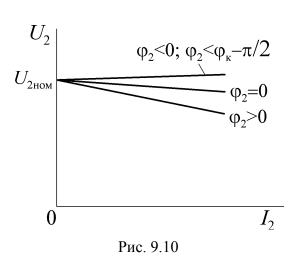
$$\Delta u\% = \beta \Delta u_{\kappa}\% \cos(\varphi_{\kappa} - \varphi_{2}). \tag{9.13}$$

Выражение (9.13) позволяет при известном относительном значении тока и характере нагрузки определить абсолютное значение напряжения на вторичной обмотке и построить внешнюю характеристику:



$$U_2 = U_{2\text{HOM}} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right). \tag{9.14}$$

Процентное изменение напряжения положительно, если $U_2 < U_{2\text{ном}}$. Из выражения (9.13) следует, что при активной и активно-индуктивной нагрузке с увеличением угла сдвига фаз ϕ_2 напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_2 уменьшается, и достигает минимума при $\phi_{\kappa} - \phi_2 = 0$, т.е. когда $\phi_2 = \phi_{\kappa}$ и $\Delta u\% = \Delta u\%_{\text{max}}$ (рис. 9.9, δ). В случае активно-ёмкостной нагрузки ($\phi_2 < 0$) при условии $\phi_2 = \phi_{\kappa} - \pi/2$ значение $\Delta u\%$ равно нулю (рис. 9.9, δ), поэтому напряжение U_2 равно номинальному и не зависит от величины нагрузки. Дальнейшее уменьшение ϕ_2 ($\phi_2 < \phi_{\kappa} - \pi/2$) приводит к изменению знака $\Delta u\%$, при этом напряжение U_2 будет больше напряжения холостого хода. Независимо от характера нагрузки, кроме случая $\phi_2 = \phi_{\kappa} - \pi/2$, отклонение напряжения линейно возрастает с увеличением тока I_2 (рис. 9.10).



Более наглядно зависимость выходного напряжения трансформатора от характера нагрузки можно проследить с помощью векторной диаграммы рис. 9.9, ε . Если, сохраняя полное сопротивление $Z'_{\rm H}={\rm const}$, изменять угол ϕ_2 , то конец вектора тока $\underline{I}_1=\underline{I'}_2$ будет перемещаться по дуге окружности pq радиусом $|\underline{I}_1|={\rm const}$. Напряжение первичной обмотки $\underline{U}_{\rm 1 hom}={\rm const}$, поэтому прямоугольный треугольник ABC, образован-

ный векторами $R_{\rm K}\underline{I}_1$, $jX_{\rm K}\underline{I}_1$ и $\underline{U}_{\rm K}=\underline{Z}_{\rm K}\underline{I}_1$, при повороте вектора \underline{I}_1 будет вращаться в противоположную сторону относительно вершины A, сохраняя размеры, а точка B, соответствующая положению конца вектора приведённого напряжения нагрузки $\underline{U'}_2$ — скользить по дуге PQ окружности радиусом $Z_{\rm K}I_1$. На рисунке отдельно показаны две пары точек p-P и q-Q, соответствующие активно-индуктивной и активно-ёмкостной нагрузкам, по ним хорошо видно, что в первом случае $U'_{2p} \ll U_1$, а во втором — $U'_{2q} \gg U_1$.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое внешняя характеристика?
- 2. Нарисуйте упрощённую схему замещения трансформатора.
- 3. Как определяется процентное изменение напряжения трансформатора?
- 4. Как влияет коэффициент мощности нагрузки на изменение напряжения трансформатора?



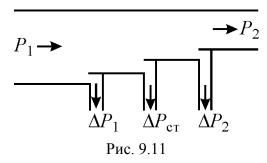
- 5. Как построить внешнюю характеристику трансформатора, используя процентное изменение напряжения?
- 6. Чем объясняется возрастание напряжения на выходе трансформатора при увеличении тока в случае активно-ёмкостной нагрузки?

9.8. Потери энергии в трансформаторе

Уравнение баланса активной мощности для трансформатора имеет вид

$$P_{1} = P_{2} + \Delta P = P_{2} + \Delta P_{\text{cT}} + \Delta P_{\text{M}}, \qquad (9.15)$$

где P_1 — активная мощность, получаемая от источника питания; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ — активная мощность нагрузки, подключённой к трансформатору; $\Delta P = \Delta P_{\rm ct} + \Delta P_{\rm m} = \Delta P_{\rm ct} + \Delta P_1 + \Delta P_2$ — суммарная мощность потерь в трансформаторе, складывающаяся из мощности потерь в «стали» $\Delta P_{\rm ct}$ и «меди» $\Delta P_{\rm m}$ первичной и вторичной обмоток (ΔP_1 и ΔP_2). На рис. 9.11 приведена энергетическая диаграмма трансформатора, соответствующая уравнению (9.15).



Тепловые потери энергии в магнитопроводе $\Delta P_{\rm cr} = P_0$ зависят от напряжения питания и частоты, а т.к. эти величины при нормальной эксплуатации трансформатора остаются постоянными, то потери в «стали» P_2 также сохраняют своё значение и называются постоянными потерями.

Потери в обмотках $\Delta P_{\scriptscriptstyle \rm M}$ зависят от про-

текающего по ним тока и изменяются при изменении нагрузки. Поэтому этот вид потерь называется *переменными потерями*. Зависимость потерь в «меди» от тока квадратичная. Пользуясь коэффициентом нагрузки β и полагая, что опыт короткого замыкания проводится при номинальном токе первичной обмотки, их можно представить как $\Delta P_{\rm M} = R_{\rm K} I_{\rm K}^2 = \beta^2 R_{\rm K} I_{\rm 1hom}^2 = \beta^2 P_{\rm K}$

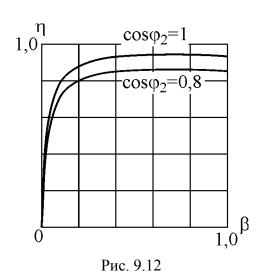
Активная мощность потребляемая нагрузкой также зависит от тока, поэтому, пренебрегая изменением напряжения, её можно представить в виде $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta U_2 I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2, \ \text{где} \ S_{\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} - \text{ номинальная полная мощность трансформатора, приводимая в справочных данных.}$

Раскрывая выражения для составляющих активной мощности в уравнении (9.15), можно определить КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{\text{HOM}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{HOM}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{K}}}.$$
 (9.16)

Из выражения (9.16) следует, что КПД трансформатора зависит от характера и коэффициента нагрузки. Функция $\eta = f(\beta)$ имеет максимум при некотором оптимальном значении $\beta_{\text{опт}}$ —





$$\beta_{\text{OHT}} = \sqrt{P_0 / P_{\text{K}}} . \tag{9.17}$$

Это означает, трансформатор будет работать с максимальным значением КПД при полной нагрузке ($\beta_{\text{опт}} = 1,0$) в том случае, если потери в «стали» равны потерям в «меди». Обычно значение $\beta_{\text{опт}}$ находится в пределах $\beta_{\text{опт}} = 0,5...0,7$, т.е. трансформатор работает с предельным КПД при нагрузке, составляющей 50...70% от номинальной. Типичная зависимость $\eta = f(\beta)$ для различных значений коэффициента мощности нагрузки приведена на рис. 9.12.

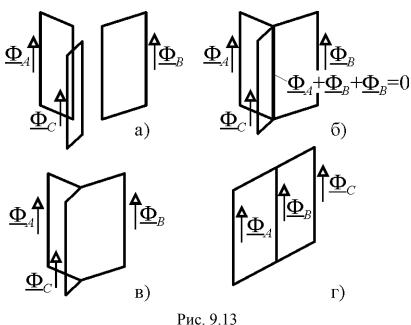
Трансформатор является высокоэффективным преобразователем. Коэффициент полезного действия мощных трансформаторов доходит до 99,5%.

Вопросы для самопроверки

- 1. Составьте уравнение баланса активной мощности трансформатора.
- 2. Почему потери в «стали» называют постоянными потерями, а потери в «меди» переменными?
- 3. Как зависят потери в «меди» от нагрузки трансформатора?
- 4. При каком условии КПД трансформатора будет максимальным при номинальной нагрузке?
- 5. Какому коэффициенту нагрузки соответствует максимум КПД реального трансформатора?

9.9. Трёхфазные трансформаторы

Вся электрическая энергия, производимая промышленным способом,



передаётся и распределяется трёхфазными сетями. Преобразование напряжения в трёхфазной сети ОНЖОМ осуществлять однофазными тремя трансформаторами специальным или трансформатором, котором магнитопроводы фаз объединены в общую магнитную систему. Такие трансформаторы на-



зываются трёхфазными.

На рис. 9.13, а схематично показаны три магнитопровода однофазных трансформаторов, работающих в трёхфазной сети. Симметричные фазные токи создают в магнитопроводах несвязанную симметричную систему магнитных потоков Φ_A, Φ_B, Φ_C . Если магнитопроводы объединить в один (рис. 9.13, б), то суммарный магнитный поток в центральном стержне по условию симметрии будет равен нулю и этот стержень можно удалить, не меняя режима работы магнитной цепи. В результате мы получим симметричный магнитопровод трёхфазного трансформатора (рис. 9.13, в), но изготавливать такую сложную пространственную конструкцию по многим причинам нецелесообразно. Поэтому стержни магнитопровода располагают в одной плоскости (рис. 9.13, г) и магнитные цепи отдельных фаз становятся несимметричными, т.к. длина средней линии магнитопровода фаз A и C больше, чем фазы В. Однако эта асимметрия существенно не влияет на работу трансформатора, и все трёхфазные трансформаторы изготавливаются с несимметричными магнитопроводами. Объединение магнитопроводов в трёхфазных трансформаторах создаёт помимо электрической связи магнитную связь между фазами, которая должна учитываться при анализе электромагнитных процессов.

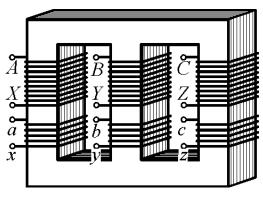


Рис. 9.14

Трёхфазные трансформаторы легче и дешевле группы из трёх однофазных, однако, в сетях большой мощности для преобразования напряжений используют и групповое решение. Это связано с тем, что изготовление и доставка крупного трёхфазного трансформатора может быть сложнее, чем трёх однофазных, или просто быть невозможной. Кроме того, выход из строя одной фазы в трансформаторной группе не требует замены или ре-

монта всего преобразователя. Это повышает надёжность системы, т.к. для устранения неисправности достаточно иметь резервный однофазный трансформатор, а повреждение нескольких фаз одновременно маловероятно.

Обмотки трёхфазного трансформатора маркируются следующим образом: начала фаз высшего напряжения обозначаются прописными латинскими буквами A, B и C, а концы -X, Y и Z (рис. 9.14). Обмотки фаз низшего напряжения обозначаются теми же буквами, но строчными, т.е. a,b,c и x,y,z. Обмотки фаз высшего и низшего напряжения могут объединяться в систему соединением звездой или треугольником. В первом случае соединение обозначается знаком Y, а во втором $-\Delta$. Наличие вывода нулевой точки соединения в обозначении указывается индексом $-Y_0$. Например, обозначение Y_0/Δ соответствует соединению обмоток высшего напряжения звездой с нулевым проводом, а обмоток низшего напряжения треугольником.



Кроме схемы соединения обмоток для трёхфазных трансформаторов

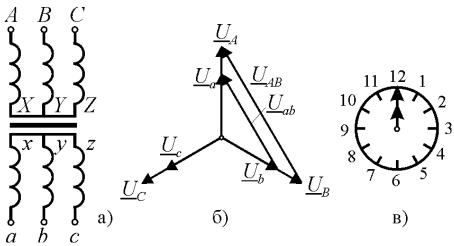


Рис. 9.15

указывается угол сдвига фаз между линейными напряжениями высшего и низшего на-По пряжения. величине этого угла соединения делят группы. При разных схемах угол сдвига фаз может быть раз-

личным, но кратным 30°, поэтому для обозначения группы соединения используют шкалу часов, совмещая вектор высшего линейного напряжения с двенадцатичасовым положением или нулём шкалы. Тогда вектор низшего линейного напряжения может занимать на шкале положения, соответствующие часам, которые и указывают в обозначении.

Например, при соединении обмоток Y/Y, т.е. «звезда-звезда», векторы линейных напряжений высшего и низшего напряжений имеют одинаковые направления (рис. 9.15, δ). Поэтому, если совместить вектор \underline{U}_{AB} с положением часовой стрелки в 12(0) часов, то такое же положение займёт вектор низшего напряжения \underline{U}_{ab} и это соединение будет отнесено к нулевой группе с обозначением Y/Y-0.

В случае соединения обмоток по схеме Y/ Δ (рис. 9.16). Вектор низшего напряжения $\underline{U}_{ab} = -\underline{U}_b$ будет смещён на 30° в сторону опережения по отношению к вектору \underline{U}_{AB} (рис. 9.16, δ), т.е. займёт на шкале положение соответ-

ствующее часам. Поэтому соединение будет отнесено к группе 11 и обозначено Y/Δ -11. Несмотря на то, что различными соединениями обмоток можно получить все группы, стандартом преду-

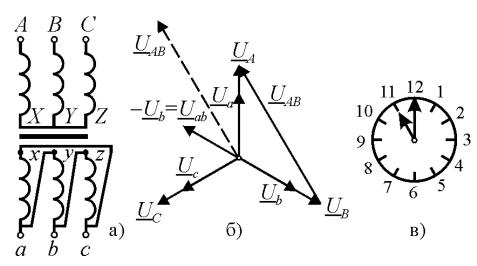


Рис. 9.16

165



смотрено только две из них — 0 и 11. На практике группе 0 соответствует один вид соединения Y/Y_0 -0, используемый в трансформаторах с высшим напряжением до 35 кВ и низшим 230 В или 400 В, а группе 11 — два соединения Y/Δ -11 и Y_0/Δ -11, используемых для мощных трансформаторов при более высоких напряжениях.

9.10. Автотрансформаторы

Автотрансформатор — это вид трансформатора, в котором между первичной и вторичной обмотками кроме магнитной существует также электрическая связь. Обычный трансформатор можно включить по схеме автотрансформатора, если к концу первичной обмотки подключить начало вторичной или если нагрузку подключить к имеющимся отводам первичной обмотки. Однако при этом не будут в полной мере использованы те преимущества, которые имеет автотрансформатор.

Электромагнитная схема понижающего и повышающего автотрансформаторов приведена на рис. 9.17~a и δ .

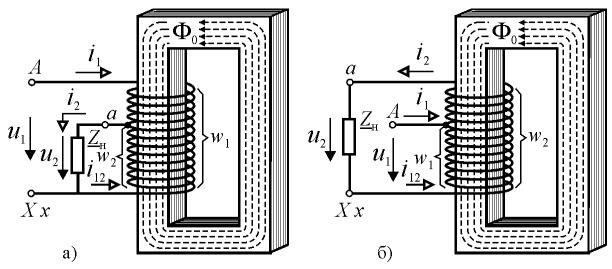


Рис. 9.17

Рассмотрим в качестве примера работу понижающего автотрансформатора рис. 9.17 a. Обмотка ax является вторичной и одновременно частью первичной обмотки AX. Пренебрегая током намагничивания, для точки a можно записать

$$I_{12} = I_2 - I_1, (9.18)$$

т.е. в витках вторичной обмотки протекает ток, равный разности токов первичной обмотки и нагрузки. Токи и ЭДС обмоток автотрансформатора связаны такими же соотношениями, как в трансформаторе

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$
.

Поэтому при небольших значениях k ток в обмотке $ax\ I_{12} = I_1(k-1)$ существенно меньше, чем ток I_1 , протекающий в части обмотки Aa, и её можно вы-



полнить проводом меньшего сечения, снизив тем самым стоимость и массу изделия.

Полная мощность автотрансформатора $S_{\rm np} = U_2 I_2$ называется *проходной мощностью*. Пользуясь выражением (9.18) её можно разделить на две составляющие

$$S_{\text{np}} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_p$$
 (9.19)

Здесь $S_{_3}=U_2I_1$ — мощность, передаваемая в нагрузку электрическим путём за счёт гальванической связи между обмотками; $S_{\rm p}=U_2I_{12}$ — расчётная мощность, называемая так потому, что она определяет расчётные параметры магнитопровода. Расчётная мощность представляет собой мощность, передаваемую в нагрузку посредством магнитного поля. В обычном трансформаторе проходная мощность является расчётной. В автотрансформаторе расчётная мощность составляет только часть проходной, поэтому сечение магнитопровода можно уменьшить, снизив за счёт этого массу, габариты и стоимость.

Уменьшение объёма магнитопровода и тока во вторичной обмотке снижает потери в «стали» и в «меди» автотрансформатора по сравнению с трансформатором той же мощности, поэтому КПД автотрансформатора выше и достигает 99,7%. Однако с увеличением коэффициента трансформации эти преимущества теряются. Поэтому автотрансформаторы используют для преобразования напряжений с $k \le 2$.

Главной причиной недостатков автотрансформаторов, как и его достоинств, является наличие электрической связи между обмотками. Она существенно ужесточает требования к изоляции обмотки и к подготовке обслуживающего персонала, т.к. на стороне низшего напряжения между проводами и землёй существует такое же напряжение как на стороне высшего напряжения. Кроме того, при коротком замыкании понижающего автотрансформатора ток существенно выше, т.к. он ограничивается только витками части первичной обмотки $w_1 - w_2$, что требует принятия особых мер защиты.

Автотрансформаторы применяются в линиях передачи и распределения энергии для связи сетей с близкими значениями напряжений. Они применяются также для снижения тока при пуске мощных двигателей. Широкое распространение имеют автотрансформаторы с плавным регулированием коэффициента трансформации, называемые *лабораторными автотрансформаторами* (ЛАТР). Регулирование напряжения в них осуществляется за счёт подключения нагрузки с помощью скользящего контакта, при перемещении которого число витков w_2 меняется в пределах $0 \le w_2 \le w_1$.

9.11. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы напряжения и тока применяются: 1) для отделения цепей измерительных приборов и защитной аппаратуры от цепей с высоким напряжением с целью обеспечения безопасности обслужива-



ния и снижения требований к изоляции приборов; 2) для преобразования напряжения и тока к величинам, доступным измерению стандартными приборами.

Трансформаторы напряжения включаются в цепь по схеме рис. 9.18, *а*. Поскольку сопротивление вольтметра очень велико, то они работают в ре-

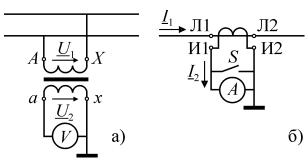


Рис. 9.18

жиме близком к холостому ходу. Погрешность, вносимая в измерение трансформатором, определяется величиной полных сопротивлений его обмоток. Чем меньше эти сопротивления, тем меньше погрешность, поэтому при проектировании измерительных трансформаторов стремятся уменьшить эти величины. Измерительные транс-

форматоры напряжения являются приборами с нормированной погрешностью и изготавливаются с классами точности 0,2; 0,5; 1,0 и 3,0. Вторичное напряжение большинства трансформаторов – 100 В.

Измеряемое напряжение U_1 определяется по показаниям вольтметра U_2 :

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = k_U U_2,$$

где $k_U = w_1 / w_2 -$ коэффициент трансформации.

Кроме погрешности измерения модуля напряжения измерительные трансформаторы создают фазовый сдвиг между напряжениями \underline{U}_1 и \underline{U}_2 – δ_U . Он измеряется в угловых минутах и считается положительным, если вторичное напряжение опережает по фазе первичное. Угловая погрешность трансформатора влияет на измерение мощности.

Ко вторичной обмотке измерительного трансформатора параллельно вольтметру могут подключаться обмотка напряжения ваттметра, обмотки защитных реле, входы различных приборов и др.

Трансформаторы тока включаются в разрыв цепи или линии аналогично включению амперметра (Л1-Л2 на рис. 9.18, б). В цепь вторичной обмотки (И1-И2) могут последовательно подключаться амперметр, токовая обмотка ваттметра, датчики тока, реле токовой защиты и др. Однако увеличение нагрузки вторичной цепи приводит к увеличению погрешности преобразования тока.

Входное сопротивление амперметра очень мало, поэтому трансформатор тока работает в режиме близком к режиму короткого замыкания. Для уменьшения погрешности трансформаторов тока стремятся проектировать их таким образом, чтобы ток намагничивания был минимально возможным. Тогда измеряемый ток I_1 можно определить выражением



$$I_1 = \frac{w_2}{w_1} I_2 = k_I I_2$$

где $k_I = w_2 \, / \, w_1 \, - \,$ коэффициент трансформации, $I_2 \, - \,$ значение тока по показаниям амперметра.

Трансформаторы тока изготавливаются с классами точности 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 и 10,0. Для первых трёх классов устанавливается также допустимая угловая погрешность δ_I : 10′, 40′ и 80′. Для остальных классов угловая погрешность не нормируется.

При размыкании вторичной обмотки размагничивающее действие её тока исчезает, и магнитный поток возрастает в десятки и сотни раз. На выводах вторичной обмотки возникает опасное для жизни напряжение, а сам трансформатор тока может выйти из строя вследствие разрушения изоляции или перегрева от увеличения потерь в магнитопроводе. Поэтому в цепь вторичной обмотки обязательно вводится шунтирующий ключ S, который должен замыкаться до того, как отключается амперметр.

Вопросы для самопроверки

- 1. В чём преимущество трёхфазных трансформаторов по сравнению с тремя однофазными?
- 2. В каких случаях вместо трёхфазных трансформаторов используют группу из трёх однофазных трансформаторов?
- 3. Как маркируются обмотки трёхфазных трансформаторов?
- 4. Какие группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов предусмотрены стандартом?
- 5. Что такое автотрансформатор?
- 6. Что такое проходная и расчётная мощность автотрансформатора?
- 7. За счёт чего автотрансформатор имеет меньшие массогабаритные показатели по сравнению с трансформатором той же мощности?
- 8. За счёт чего автотрансформатор имеет более высокий КПД по сравнению с трансформатором той же мощности?
- 9. Укажите достоинства, недостатки и область применения автотрансформаторов.
- 10. Для чего используют измерительные трансформаторы?
- 11. Как включают в цепь трансформаторы напряжения (тока)?
- 12. Как по показаниям вольтметра (амперметра), подключенного ко вторичной обмотке измерительного трансформатора, определяют значение напряжения (тока)?
- 13. Для чего параллельно вторичной обмотке трансформатора тока присоединяют ключ?
- 14. Что такое угловая погрешность измерительного трансформатора и на что она оказывает влияние?



10. Асинхронные двигатели

Асинхронные машины относятся к классу электромеханических преобразователей, т.е. преобразователей электрической энергии в механическую или механической в электрическую. В первом случае они называются двигателями, а во втором – генераторами. Все электрические машины обладают свойством обратимости и могут осуществлять преобразование энергии в обоих направлениях, поэтому при изучении процессов в машинах пользуются понятиями двигательного и генераторного режимов. Однако при разработке и изготовлении машины оптимизируются для условий работы в одном из режимов и используются в соответствии с назначением. Асинхронные машины не являются исключением из этого правила, но асинхронные генераторы значительно уступают синхронным по многим параметрам и редко используются на практике, в то время как асинхронные двигатели являются самыми распространёнными электромеханическими преобразователями. Суммарная мощность асинхронных двигателей составляет более 90% общей мощности всех существующих двигателей, поэтому в данном курсе мы ограничимся рассмотрением только этого типа машин.

Асинхронные двигатели относятся к бесколлекторным машинам переменного тока или машинам с вращающимся магнитным полем. Название асинхронные (несинхронные) объясняется тем, что в статическом режиме работы скорость вращения *ротора* (вращающейся части) двигателя отличается от скорости вращения магнитного поля, т.е. ротор и поле вращаются несинхронно.

Причиной широкого распространения асинхронных двигателей является их предельная простота, надёжность и экономичность. Конструкция асинхронных двигателей не претерпела существенных изменений с 1889 года, когда эти двигатели были изобретены М.О. Доливо-Добровольским. Можно сказать, что асинхронные двигатели совместно с синхронными генераторами и трёхфазными линиями передачи и распределения электрической энергии образуют систему передачи механической энергии на расстояние.

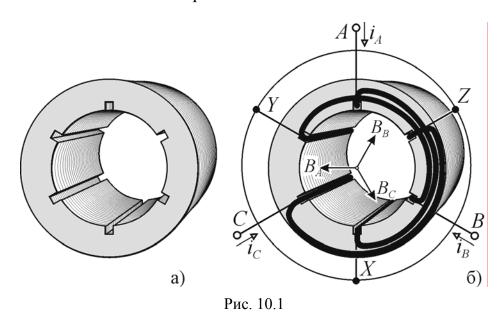
В последнее время в связи с появлением полупроводниковых преобразователей частоты для питания асинхронных двигателей область их применения существенно расширилась. Они стали широко применяться в высокоточных приборных приводах там, где ранее использовались в основном двигатели постоянного тока.

10.1. Вращающееся магнитное поле

Работа асинхронного двигателя основана на взаимодействии электрического тока, протекающего в обмотке ротора, с вращающимся магнитным полем, возбуждаемым обмотками статора. *Статор* (неподвижная часть машины) асинхронного двигателя состоит из корпуса, сердечника и обмоток. Корпус является конструктивным элементом машины и практически не участвует в электромагнитных процессах. Сердечник статора изготавливается из



листов электротехнической стали и представляет собой полый цилиндр, на внутренней поверхности которого имеются пазы для укладки обмоток. Конструктивная схема сердечника статора без обмоток и с сосредоточенными обмотками показана на рис. 10.1.



Оси трёх фазных обмоток статора смещены в пространстве по окружности пакета на 120° , а пазы с концами обмоток (X, Y, Z) отстоят от пазов, в которые уложены их начала (A, B, C) на 180° .

При подключении обмоток к трёхфазному источнику питания, протекающие в них токи

$$i_A = I_m \sin \omega_1 t$$
; $i_B = I_m \sin(\omega_1 t - 2\pi/3)$; $i_C = I_m \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)$

возбуждают магнитные поля, оси которых совпадают с осями обмоток, а максимальные значения индукции изменяются во времени по синусоидальным законам

$$B_A = B_m \sin \omega_1 t$$
; $B_B = B_m \sin(\omega_1 t - 2\pi/3)$; $B_C = B_m \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)$.

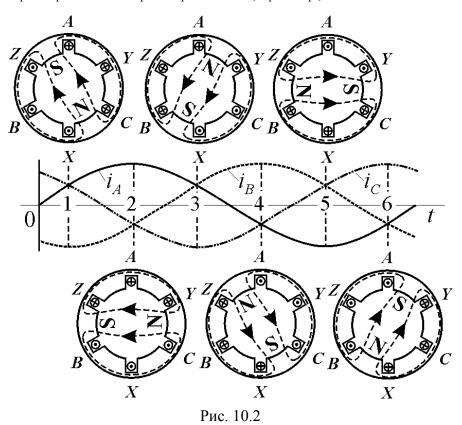
Поля отдельных обмоток суммируются в пространстве внутри сердечника и образуют единое магнитное поле статора. Картину этого поля схематично можно проследить по нескольким точкам на рис. 10.2. Обозначим положительное направление тока в обмотке знаком «+» в точке её начала и знаком «•» в точке конца. Тогда для состояния I в пазах сердечника A, Y и C будет одно направление тока в проводниках, а в пазах Z, B и X другое. Общая картина магнитного поля для текущего момента будет соответствовать двум магнитным потокам, охватывающим пазы с одинаковыми направлениями токов, поэтому ось поля для состояния «1» будет направлена под углом 30° к оси AX. Такими же построениями можно определить, что через 1/6 часть периода магнитное поле сместится на 60° в положительном направлении, а за один период частоты сети — на 360° .

Можно показать, что в любой точке внутренней окружности статора, смещённой на угол α относительно оси обмотки фазы A, магнитная индукция изменяется во времени по закону



$$B(\alpha) = \frac{3}{2} B_m \sin(\omega_1 t - \alpha).$$

Это означает, что для точки, движущейся по окружности с угловой частотой $\Omega_1 = \omega_1 \Rightarrow \alpha = \Omega_1 t = \omega_1 t \Rightarrow \sin(\omega_1 t - \omega_1 t) = 1$, т.е. магнитная индукция будет



оставаться посторавной янной $B_{\max} = \frac{3}{2} B_m,$ где B_m – максимальное значение индукции поля, возбуждаемого одной обмоткой. Следовательно, магнитное поле вращается внутри пакета статора с угловой частотой $\Omega_1 = \omega_1 = 2\pi f_1$, onределяемой частотой источника питания статорных обмоток f_1 . Годо-

граф вектора индукции представляет собой окружность, поэтому поле называется *круговым*.

Направление вращения поля определяется порядком чередования фаз. При переключении любой пары обмоток (рис. 10.3) направление вращения поля меняется на противоположное.

Если вдвое увеличить число пазов сердечника и, разделив каждую обмотку на две части, поместить её в пазы так, чтобы начала и концы половин обмоток находились в пазах, смещённых по окружности статора на 90° , то при подключении к сети образуется магнитное поле с двойным числом полюсов (рис. 10.4). За один период частоты питания оно будет перемещаться в пространстве на 180° , т.е. частота его вращения будет в два раза меньше. Проведя аналогичные построения картины магнитного поля для обмоток, разделённых на p частей, можно убедиться,

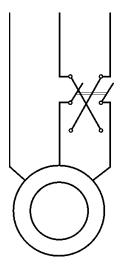


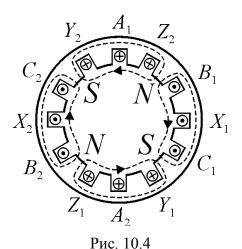
Рис. 10.3

что при этом будут возбуждаться поля с числом пар магнитных полюсов равным p и угловая частота вращения поля будет уменьшаться в p раз, т.е.



$$\Omega_1 = \omega_1 / p \,, \tag{10.1}$$

где ω_1 — частота питающей сети, а p — число пар полюсов магнитного поля. Традиционно частоту вращения называют скоростью вращения и измеряют во внесистемных единицах — оборотах в минуту. Тогда выражение (10.1) можно представить в виде



$$n_1 = 60 f_1 / p \,, \tag{10.2}$$

где n_1 – скорость вращения магнитного поля в об/мин, а f_1 – частота питающей сети в герцах.

При частоте промышленной сети 50 Гц возникает ряд возможных скоростей вращения магнитного поля: 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/мин

Эллиптическое магнитное поле. Любая асимметрия питающей сети, магнитных свойств сердечника или обмоток приводит к асимметрии магнитного поля, в результате которой годограф вектора индукции становится эллиптическим (рис. 10.5). Можно математиче-

ски строго показать, что эллиптический годограф соответствует сумме двух векторов с круговыми годографами, один из которых \underline{B}_+ , вращается в положительном направлении, а другой \underline{B}_- – в отрицательном направлении.

На рисунке 10.5 в качестве примера показаны два круговых годографа и построен результирующий вектор $\underline{B} = \underline{B}_+ + \underline{B}_-$ для точки 1. Эта точка соот-

ветствует повороту вектора \underline{B}_+ на 45° от нулевой точки в положительном направлении, а вектора B_{-} — на тот же угол в отрицательнаправлении. 3a полный $T = 2\pi/\omega$ вектор В вернётся в исходную точку, описав на плоскости эллиптическую траекторию с большой полуосью равной сумме модулей векторов прямого и обратного вращения $a = B_{m+} + B_{m-}$ и малой полуосью равной разности модулей $b = B_{m+} - B_{m-}$.

Если составляющие прямого и обратного вращения одинаковы (b=0), то годограф вектора индукции вырождается в прямую линию и это поле называется *пульсирующим*. Пульсирующее магнитное поле создаёт каждая фазная обмотка в отдельности.

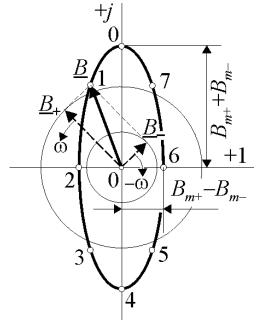


Рис. 10.5



Такое поле возникает также в аварийных режимах при обрыве одной из фаз. В случае отсутствия одной из составляющих эллиптический годограф вырождается в круговой, т.е. круговое магнитное поле можно рассматривать как частный случай эллиптического.

Вопросы для самопроверки

- 1. Сформулируйте свойство обратимости электрических машин
- 2. Что означает термин асинхронные машины?
- 3. Как устроен статор асинхронного двигателя?
- 4. Что такое круговое вращающееся магнитное поле?
- 5. Чем определяется скорость вращения магнитного поля?
- 6. Как формируется круговое вращающееся магнитное поле?
- 7. Как изменить направление вращения поля?
- 8. Что такое эллиптическое магнитное поле? При каких условиях оно образуется?
- 9. На какие составляющие можно разложить эллиптическое поле?
- 10. При каких условиях в машине формируется пульсирующее магнитное поле?

10.2. Устройство и принцип действия

Принцип действия асинхронного двигателя показан на рис. 10.6. На нём круговое вращающееся магнитное поле изображено в виде вращающихся полюсов постоянного магнита. Это представление является полной физической

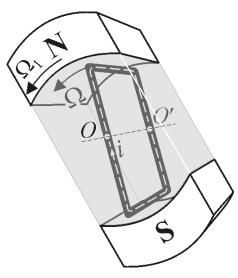


Рис. 10.6

аналогией магнитного поля возбуждаемого обмотками статора и может использоваться всегда для наглядного отображения электромеханического взаимодействия.

Поместим в пространство между полюсами замкнутый проводник в виде прямоугольной рамки, подвешенной на оси *OO'*, вокруг которой вращается магнитное поле. Движение поля относительно рамки вызывает появление в ней ЭДС, а т.к. рамка замкнута, то под действием ЭДС в ней возникает электрический ток. Рамка с протекающим по ней током испытывает механическое воздействие со стороны магнитного поля, приводящее её во вращение. Воздействие магнитного поля на рамку в виде

вращающего момента возможно только при наличии тока в рамке, который, в свою очередь, возникает в результате того, что магнитное поле движется относительно рамки. При равенстве скоростей вращения $\Omega_1 = \Omega$, т.е. при синхронном вращении, поле будет неподвижно относительно рамки и не будет создавать вращающего момента, т.к. в рамке не будет индуцироваться ток. Таким образом, устройство, показанное на рис. 10.6, работоспособно только



при асинхронном движении поля и рамки и является простейшим асинхронным двигателем.

Вращающий момент в модели на рис. 10.6 можно увеличить, если вместо одной установить на оси несколько рамок. В результате образуется конструкция, состоящая из продольных стержней и замыкающих их по краям колец, называемая «беличья клетка» (рис. 10.7, *a*).

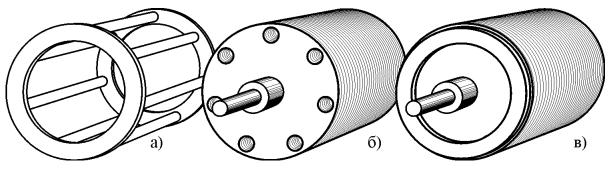
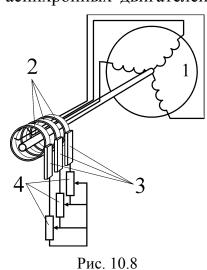


Рис. 10.7

Электромагнитная сила, создающая вращающий момент, пропорциональна величине магнитной индукции, зависящей, при прочих равных условиях, от магнитных сопротивлений цепи, по которой замыкается магнитный поток. Главной составляющей магнитного сопротивления на пути потока являются воздушные зазоры, поэтому их необходимо заполнить ферромагнетиком. Эту функцию выполняет сердечник ротора (рис. 10.7, δ) Он, также как сердечник статора, изготавливается из листов электротехнической стали, собирается в пакет и напрессовывается на вал. В листах сердечника вырублены отверстия, образующие при сборке пакета продольные каналы, которые заполняются расплавленным алюминием или медью. В результате создаётся обмотка ротора типа «беличья клетка». Ротор такой конструкции называется короткозамкнутым (рис. 10, ϵ) и используется в подавляющем большинстве асинхронных двигателей. Электрическая энергия в цепь ротора передаётся

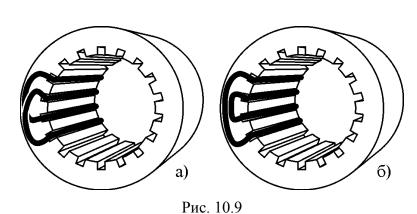


посредством магнитного поля, поэтому ротор не имеет контактов для подключения к внешним электрическим цепям, что существенно повышает надёжность двигателя и позволяет использовать его в условиях, в которых не могут эксплуатироваться другие типы машин, например, во взрывоопасных помещениях. Скорость вращения короткозамкнутого ротора ограничивается только условиями механической прочности его конструкции и опор, поэтому асинхронные короткозамкнутые двигатели используются в приводах со скоростями вращения до 300000 об/мин.

Более сложную конструкцию имеет т.н. *фаз*ный ротор. В пазы пакета сердечника этого ротора уложены три фазные об-



мотки аналогичные обмоткам статора (*1* рис. 10.8). Они соединены звездой, а начала обмоток выведены через контактные кольца *2* и щётки *3* и подключены к регулировочным реостатам *4*. Асинхронные двигатели с фазным ротором используются в основном в регулируемом приводе подъёмнотранспортных механизмов, но в последнее время их вытесняют из этой области двигатели с короткозамкнутым ротором с питанием от преобразователей частоты.



Сосредоточенные фазные обмотки, т.е. обмотки представляющие собой одну катушку, стороны которой расположены в двух пазах статора (рис. 10.1, δ), по ряду причин на практике не применяются. Обычно обмотка делится на несколько катушек, образующих ка-

тушечные группы, каждая из которых формирует полюс магнитного поля. Катушки распределяются по соседним пазам сердечника, и такая обмотка называется распределённой. При этом катушки в группе могут быть одинакового размера, изготавливаться по шаблону и укладываться в пазы с одинаковым шагом между сторонами катушек. Такие обмотки называются *шаблонными* (рис. 10.9, *а*). Катушки могут быть также разных размеров и укладываться одна внутрь другой (рис. 10.9, б). В этом случае обмотки называются концентрическими.

При анализе процессов в асинхронном двигателе и в справочных данных используют понятие скольжения

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{10.3}$$

как разности между скоростями вращения магнитного поля (Ω_1, n_1) и ротора (Ω, n) , отнесённой к скорости вращения поля. При известной частоте сети и числе пар полюсов по скольжению можно определить скорость вращения. Например, скорость вращения двигателя с двумя парами полюсов при питании от промышленной сети $(n_1 = 60 \cdot 50/2 = 1500 \text{ об/мин})$ и скольжении 0,05 составляет 1425 об/мин. Скольжение при неподвижном роторе (n=0) равно единице, а при синхронном вращении $(n=n_1)$ – нулю. Скорость или частота вращения магнитного поля называется также синхронной скоростью (частотой), т.к. ротор при этой скорости вращается синхронно с полем. Синхронный режим работы асинхронного двигателя называется u



ходом. Он возможен только в том случае, если ротор приводится во вращение другим двигателем или механизмом, присоединённым к валу.

Вопросы для самопроверки

- 1. Сформулируйте необходимое условие наведения ЭДС в рамке, находящейся во вращающемся магнитном поле.
- 2. Каким образом возникает вращающий момент, действующий на рамку, находящуюся во вращающемся магнитном поле?
- 3. Как устроен ротор асинхронного двигателя?
- 4. Опишите функции, выполняемые отдельными элементами конструкции ротора (сердечник, обмотка, вал).
- 5. Что такое сосредоточенная (распределённая) обмотка?
- 6. Какими бывают распределённые обмотки?
- 7. Что такое скольжение?
- 8. Чему равно скольжение в режимах холостого хода и короткого замыкания?

10.3. Электродвижущие силы обмоток

Электродвижущие силы наводятся в обмотке пронизывающим её магнитным потоком, если потокосцепление изменяется во времени. Причиной изменения потокосцепления может быть изменение величины потока при сохранении его положения и распределения по виткам обмотки, как это происходит в трансформаторе. Потокосцепление может изменяться также в результате изменения положения магнитного поля относительного обмотки при неизменной величине потока, как в асинхронном двигателе.

Потокосцепление неподвижной обмотки статора с вращающимся магнитным полем изменяется по синусоидальному закону с частотой вращения поля, т.е. с частотой питающей сети $\Psi_{10}=\Psi_{1m}\sin\omega_1 t$. Отсюда ЭДС фазной обмотки статора

$$e_1 = -\frac{d\Psi_{10}}{dt} = -\frac{d(\Psi_{1m}\sin\omega_1 t)}{dt} = -\omega_1 \Psi_{1m}\cos\omega_1 t \qquad (10.4)$$

Формально это выражение полностью идентично выражению для ЭДС первичной обмотки трансформатора, но в трансформаторе амплитуда потокосцепления определялась числом витков первичной обмотки $\Psi_{1m} = w_1 \Phi_{0m}$, т.к. весь магнитный поток сердечника одновременно пронизывал все витки обмотки. В асинхронном двигателе обмотка статора распределённая, и в разных катушках одной группы наводятся ЭДС, смещённые по фазе друг относительно друга. В результате общая ЭДС обмотки будет меньше суммы ЭДС катушек. Кроме того, ЭДС зависит от шага катушек обмотки. Поэтому в выражение для потокосцепления включается не реальное число витков w_1 , а эффективное — $w_{19} = k_{061} w_1$, где $k_{061} < 1$ — обмоточный коэффициент, учитывающий особенности конструкции данной обмотки. Тогда потокосцепление фазной обмотки статора асинхронного двигателя будет равно



 $\Psi_{1m} = k_{oб1} w_1 \Phi_{0m}$ и действующее значение ЭДС, наводимой в ней вращающимся магнитным полем –

$$E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = 2\pi f_1 k_{oo1} w_1 \Phi_{0m} / \sqrt{2} = 4,44 k_{oo1} w_1 f_1 \Phi_{0m}.$$
 (10.5)

При неподвижном роторе его фазная обмотка находится в совершенно аналогичных условиях, и в ней будет наводиться ЭДС

$$E_2 = 4,44k_{002}w_2f_1\Phi_{0m}. (10.6)$$

При вращении частота, с которой изменяется потокосцепление обмотки ротора, определяется скоростью её движения относительного магнитного поля, т.е. разностью скоростей вращения поля и ротора

$$f_2 = \frac{(n_1 - n)p}{60} = \frac{(n_1 - n)pn_1}{60n_1} = s\frac{pn_1}{60} = sf_1 \iff \omega_2 = s\omega_1.$$
 (10.7)

Следовательно, ЭДС вращающегося ротора с учётом (10.7) равна

$$E_{2s} = 4,44k_{062}w_2f_2\Phi_{0m} = 4,44k_{062}w_2sf_1\Phi_{0m} = sE_2.$$
 (10.8)

Таким образом, в электрических цепях фазных обмоток ротора действуют синусоидальные ЭДС переменной частоты, зависящей от величины скольжения. Поэтому индуктивные сопротивления рассеяния обмоток также будут зависеть от скольжения

$$X_{2s} = \omega_2 L_{\sigma 2} = s\omega_1 L_{\sigma 2} = sX_2, \tag{10.9}$$

где $X_2 = \omega_1 L_{\sigma 2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора, $L_{\sigma 2}$ — индуктивность потока рассеяния ротора.

10.4. Магнитодвижущие силы и магнитные потоки обмоток

Фазные обмотки ротора смещены относительно друг друга на угол $2\pi/m_2$, где — m_2 число фаз обмотки. Для фазного ротора число фаз равно $m_2=m_1=3$, а для короткозамкнутого ротора число фаз равно числу стержней «беличьей клетки» $m_2=N$. Симметричное смещение обмоток в пространстве вызывает симметричное фазовое смещение ЭДС и токов, наводимых вращающимся магнитным полем. Многофазная система токов возбуждает магнитное поле, которое вращается относительно обмоток ротора с угловой частотой $\Omega_2=\omega_2/p=s\omega_1/p$ и вместе с ротором вращается в пространстве с частотой $\Omega=(1-s)\Omega_1=(1-s)\omega_1/p$. Складывая эти движения, мы получим $\Omega+\Omega_2=(1-s)\omega_1/p+s\omega_1/p=\omega_1/p=\Omega_1$. Таким образом, магнитное поле ротора вращается в пространстве с той же угловой частотой, что и поле статора. Следовательно, поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга и образуют единое круговое вращающееся магнитное поле двигателя.

Магнитное поле двигателя возбуждается токами в обмотках статора и ротора, МДС которых равны

$$\underline{F}_{1} = \frac{m_{1}k_{\text{o}61}w_{1}}{\pi p}\underline{I}_{1}; \ \underline{F}_{2} = \frac{m_{2}k_{\text{o}62}w_{2}}{\pi p}\underline{I}_{2}. \tag{10.10}$$



Также как в трансформаторе, полагая магнитный поток неизменным, получим уравнение токов

$$\underline{F}_{1} + \underline{F}_{2} = \underline{F}_{0} \implies \underline{I}_{1} + \frac{m_{2}k_{062}w_{2}}{m_{1}k_{061}w_{1}}\underline{I}_{2} = \underline{I}_{0}; \implies \underline{I}_{1} + \underline{I}'_{2} = \underline{I}_{0}, \quad (10.11)$$

где \underline{I}_0 — комплексный ток статора в режиме идеального холостого хода; $k_i = \frac{m_1 k_{o61} w_1}{m_2 k_{o62} w_2} = \frac{m_1 w_{19}}{m_2 w_{29}}$ — коэффициент трансформации токов; $\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / k_i$ — приведённый ток ротора.

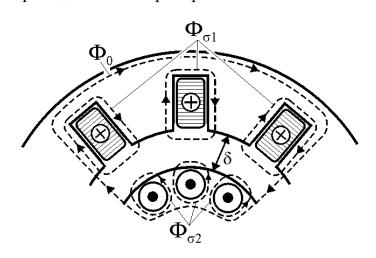


Рис. 10.10

Помимо основного магнитного потока Φ_0 , замыкающегося через воздушный зазор между статором и ротором (δ на рис. 10.10), в асинхронном двигателе можно выделить магнитные потоки, замыкающиеся по воздуху или по пазовым частям обмоток статора и ротора и сцепляющиеся только с одной из них. Это потоки рассеяния, индуцирующие в обмотках ЭДС рассеяния

$$e_{\sigma 1} = -\frac{d\Psi_{\sigma 1}}{dt} = -L_{\sigma 1}\frac{di_1}{dt}; \ e_{\sigma 2} = -\frac{d\Psi_{\sigma 2}}{dt} = -L_{\sigma 2}\frac{di_2}{dt}$$

или в комплексной форме

$$\underline{E}_{\sigma 1} = -j\omega_1 L_{\sigma 1} \underline{I}_1 = -jX_1 \underline{I}_1;$$

$$\underline{E}_{\sigma 2} = -j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_2 = -jX_{2s} \underline{I}_2 = -jsX_2 \underline{I}_2,$$
(10.12)

где $L_{\sigma 1},\ L_{\sigma 2}$ – индуктивности потокосцеплений рассеяния статора и ротора.

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем отличается эффективное число витков обмотки от реального?
- 2. Что такое обмоточный коэффициент?
- 3. Как связаны между собой частоты ЭДС, наводимых вращающимся магнитным полем в обмотках статора и ротора?
- 4. Как связаны между собой индуктивные сопротивления рассеяния вращающегося и неподвижного ротора?
- 5. Чему равно число фаз обмотки короткозамкнутого ротора?

10.5. Уравнения электрического состояния и схема замещения

По аналогии с трансформатором можно написать уравнения Кирхгофа для фазных обмоток статора



$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - e_1 \iff \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j X_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$
 (10.13)

и вращающегося ротора

$$e_{2s} = R_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \iff \underline{E}_{2s} = R_2 \underline{I}_2 + j X_{2s} \underline{I}_{21}.$$
 (10.14)

В отличие от трансформатора, в уравнении ротора (10.14) нет падения напряжения в нагрузке и частота ЭДС и тока в общем случае отличается от частоты ЭДС и тока в уравнении статора (10.13). Поэтому совместное решение уравнений (10.13) и (10.14) невозможно.

Представляя ЭДС и индуктивное сопротивление рассеяния вращающегося ротора через ЭДС и индуктивное сопротивление неподвижного ротора, получим

$$s\underline{E}_2 = R_2\underline{I}_2 + jsX_2\underline{I}_2 \implies \underline{E}_2 = R_2\underline{I}_2/s + jX_2\underline{I}_2. \tag{10.15}$$

В уравнении (10.15) частота ЭДС и тока ротора равна частоте статора и теперь эти величины, а также параметры цепи ротора можно привести к параметрам статора. Пользуясь выражениями (10.5) и (10.6), введем понятие коэффициента трансформации ЭДС и напряжений

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{001}w_1}{k_{002}w_2} = \frac{w_{19}}{w_{29}}$$
 (10.16)

и приведённой ЭДС ротора

$$E_2' = k_u E_2 = E_1. (10.17)$$

Умножив обе части уравнения (10.15) на k_u , а затем, умножив и разделив правую часть на k_i , получим уравнение приведённого ротора

$$\underline{E'}_{2} = E_{1} = R'_{2} \underline{I'}_{2} / s + j X'_{2} \underline{I'}_{2}, \qquad (10.18)$$

где $R_2' = k_u k_i R_2$; $X_2' = k_u k_i X_2$.

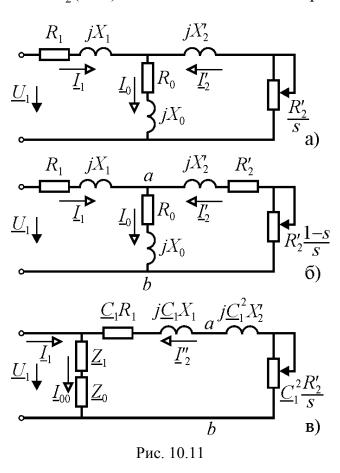
Уравнениям (10.11), (10.13) и (10.18) соответствует электрическая схема замещения рис. 10.11, а. Здесь, также как в трансформаторе, в результате приведения обмотки ротора к обмотке статора магнитная связь между ротором и статором заменена эквивалентной электрической. Отличие от трансформатора заключается в том, что обмотка ротора приводится не к реальному, а к эффективному числу витков обмотки статора. Кроме того, в уравнении токов (10.11) число фаз обмотки ротора приводится к числу фаз обмотки статора при условии сохранения МДС.

Мощность, рассеиваемая на переменном резистивном элементе в цепи ротора R_2'/s , соответствует мощности тепловых потерь в его обмотке и механической мощности двигателя, отдаваемой нагрузке. Эти величины можно разделить, если R_2'/s представить следующим образом:

$$\frac{R_2'}{s} = \frac{R_2'}{s} + R_2' - R_2' = R_2' + R_2' \frac{(1-s)}{s}.$$



Тогда тепловым потерям в обмотке ротора будет соответствовать резистивный элемент R'_2 , а механической нагрузке двигателя – резистивный элемент $R'_2(1-s)/s$ и схема замещения примет вид рис. 10.11, δ .



Внешне схема рис. 10.11, δ идентична схеме замещения трансформатора, работающего на переменную активную нагрузку. При изменении скольжения, будет меняться режим работы двигателя. В режиме идеального холостого хода сопротивление (s = 0)нагрузки становится бесконечно большим и ток ротора уменьшается до нуля, полностью соответствует что асинхронного принципу работы двигателя, т.к. при синхронном вращении в роторе не индуцируется ЭДС и не возникает ток. При неподвижном роторе (s=1) сопротивление нагрузки становится нулевым, создавая в цепи ротора режим короткого замыкания. Этот режим в асинхронном двигателе так же опасен как в трансформаторе, но он возникает при каждом

пуске и если ротор не приходит в движение, то двигатель может выйти из строя из-за перегрева.

Особенностью асинхронного двигателя по сравнению с трансформатором является наличие воздушного зазора. Поэтому при том же значении магнитного потока ток холостого хода двигателя существенно больше. Если в трансформаторе он не превышает 10% от номинального значения, то в двигателе может составлять до 50%. Кроме того, в номинальном режиме при скольжении ≈ 0.05 частота ЭДС ротора составляет ≈ 2.5 Гц. При такой частоте потерями в сердечнике ротора можно пренебречь и принять $R_0=0$.

Схема замещения рис. 10.11, δ и соответствующие ей уравнения электрического состояния позволяют исследовать все процессы в двигателе, но при этом выражения для токов получаются сложными, что затрудняет их анализ. Поэтому её преобразуют, вынося ветвь намагничивания на вход (рис. 10.11, ϵ). При этом параметры обмоток статора и ротора приобретают комплексный множитель

$$\underline{C}_1 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0},$$



где $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$, а приведённый ток ротора становится равным $\underline{I}''_2 = \underline{I}'_2 / \underline{C}_1$.

Анализ коэффициента \underline{C}_1 показывает, что при обычных значениях параметров двигателей его мнимая часть практически равна нулю и $\underline{C}_1 \approx C_1 \approx 1 + X_1/X_0$. Но для машин мощностью выше нескольких киловатт $X_1/X_0 < 0.05$, поэтому $C_1 < 1.05$ и этим коэффициентом при общем анализе можно пренебречь. Тогда по закону Ома для схемы рис. 10.11, ε при $C_1 \approx 1$ величина приведённого тока ротора будет равна

$$I_2'' \approx I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$
 (10.19)

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем отличаются друг от друга коэффициенты трансформации ЭДС и тока?
- 2. В чём заключается отличие приведения параметров обмотки ротора асинхронного двигателя от приведения параметров вторичной обмотки трансформатора?
- 3. Укажите сходства и отличия схемы замещения асинхронного двигателя и трансформатора.
- 4. Укажите параметры схемы замещения, связанные с магнитными потоками двигателя.
- 5. Укажите параметры схемы замещения, связанные с преобразованием электрической энергии в двигателе.

10.6. Режимы работы асинхронного двигателя

Для анализа режимов работы асинхронного двигателя построим векторную диаграмму, соответствующую схеме его замещения на рис. 10.11, δ . Она строится аналогично векторной диаграмме трансформатора.

При изменении скольжения s изменяется активная составляющая комплексного сопротивления цепи ротора. Если входное напряжение при этом остаётся постоянным, то геометрическим местом точек конца вектора тока статора будет окружность диаметром $U_1/(X_1+X_2')$ (рис. 10.12).

Точки холостого хода (s=0), короткого замыкания (s=1) и бесконечно большого скольжения ($s=\pm\infty$) делят круговую диаграмму тока статора на три сектора, соответствующие режимам двигателя, генератора и тормоза. Эти режимы отличаются направлениями потоков энергии преобразуемой в асинхронном двигателе.

В режиме *двигателя* скольжение находится в диапазоне 0 < s < 1, а сдвиг фаз между напряжением и током обмотки статора $\phi_1 < \pi/2$. Это означает, что ротор вращается в направлении вращения магнитного поля со скоростью ниже синхронной и двигатель отдаёт механическую энергию нагрузке, т.к.



 $R_2'(1-s)/s > 0 \implies P_2 = I_2'^2 R_2'(1-s)/s > 0$. Фазовый сдвиг меньше 90° соответствует положительной мощности цепи статора $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 > 0$. Таким образом, в режиме двигателя подводимая к статору электрическая энергия W_3

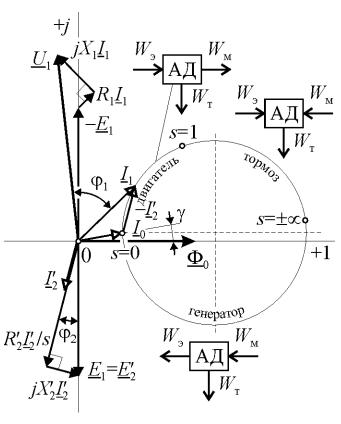


Рис. 10.12

преобразуется в механическую энергию $W_{\rm M}$, отдаваемую нагрузке, и в тепловую энергию $W_{\rm T}=W_{\rm 3}-W_{\rm M}$, рассеиваемую в сердечнике, обмотках и в опорах ротора.

При скольжениях $s < 0 \Rightarrow n > n_1$ ротор двигателя вращается со скоростью выше синхронной. Из векторной диаграммы рис. 10.12 видно, что после компенсации потерь в сердечнике вектор тока перемещается по круговой диаграмме в IV-й квадрант и мощность цепи статора $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ становится отрицательной, т.к. $\phi_1 > \pi/2$. Отрицательной становится такмощность, преобразуемая переменным резистивным элементом схемы замещения

 $P_2 = I_2^{\prime 2} R_2^\prime (1-s)/s < 0$. Это означает изменение направления потока механической энергии, т.е. механическая нагрузка отдаёт энергию двигателю. В результате направление преобразования энергии машиной меняется на противоположное, т.е. механическая энергия $W_{_{\rm M}}$ преобразуется в электрическую $W_{_{\rm 3}}$ и в тепловую $W_{_{\rm T}} = W_{_{\rm M}} - W_{_{\rm 3}}$. Двигатель при этом работает в *генераторном* режиме. В генераторный режим асинхронный двигатель может перейти либо за счёт вращающего момента нагрузки, разгоняющего ротор до скорости выше синхронной, либо при уменьшении частоты источника питания статора, т.е. при уменьшении синхронной скорости. Второй вариант перехода в генераторный режим является обычным для асинхронных приводов с частотным управлением.

В случае вращения ротора в направлении противоположном направлению вращения магнитного поля $n<0 \Rightarrow s>1$. Механическая мощность при этом отрицательна $P_2=I_2'^2R_2'(1-s)/s<0$, а электрическая — положительна $P_1=U_1I_1\cos\varphi_1>0$, т.к. $\varphi_1<\pi/2$ (рис. 10.12). Следовательно, двигатель по-

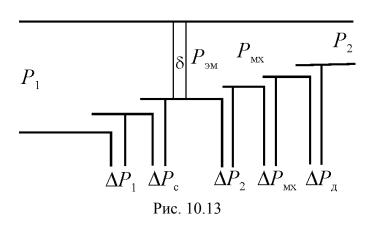


требляет электрическую энергию $W_{_{3}}$ от источника питания и механическую энергию $W_{_{\rm M}}$ от нагрузки на валу, и оба вида энергии рассеваются в виде тепла $W_{_{\rm T}} = W_{_{\rm M}} + W_{_{3}}$ в его обмотках. Этот режим называется режимом электромагнитного тормоза или противовключения и является самым тяжёлым. Двигатель переходит в режим тормоза при нагрузке на валу превышающей его вращающий момент, но чаще его используют для быстрой остановки путём изменения направления вращения магнитного поля (реверсом).

Вопросы для самопроверки

- 1. Что представляет собой геометрическое место точек вектора тока статора?
- 2. Как определить направление потоков электрической и механической энергии, пользуясь схемой замещения и векторной диаграммой?
- 3. Укажите секторы круговой диаграммы, соответствующие двигательному, генераторному и тормозному режимам работы.
- 4. Укажите направления потоков электрической, механической и тепловой энергии, соответствующие двигательному, генераторному и тормозному режимам работы.
- 5. Почему режим противовключения является наиболее тяжёлым режимом для двигателя?

10.7. Энергетический баланс



Рассмотрим процесс преобразования энергии в режиме двигателя, перемещаясь по схеме замещения рис. 10.11, δ слева направо. От источника питания асинхронный двигатель потребляет активную мощность

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Часть её в виде тепла рассеивается в обмотке статора

$$\Delta P_1 = m_1 R_1 I_1^2,$$

а другая часть – в виде потерь в сердечнике статора

$$\Delta P_{\rm c} = m_1 R_0 I_0^2 .$$

Оставшаяся часть активной мощности передаётся из статора в ротор через зазор δ посредством магнитного поля. Она называется электромагнитной мощностью и соответствует мощности, рассеиваемой на сопротивлении R_2'/s . Поэтому

$$P_{\rm PM} = m_1 R_2' I_2'^2 / s = m_2 R_2 I_2^2 / s \tag{10.20}$$



Часть электромагнитной мощности теряется в виде тепла в активном сопротивлении обмотки ротора

$$\Delta P_2 = m_1 R_2' I_1'^2 = m_2 R_2 I_2^2.$$

Остальная часть преобразуется в механическую мощность $P_{\rm mx}$, развиваемую на валу:

$$P_{\text{MX}} = m_1 R_2' I_2'^2 (1 - s) / s = m_2 R_2 I_2^2 (1 - s) / s$$
 (10.21)

Часть механической мощности теряется внутри двигателя в виде механических потерь $\Delta P_{\rm mx}$, вызванных трением в опорах и трением о воздух. Кроме того, в двигателе существуют другие потери $\Delta P_{\rm g}$, связанные, например, с наличием высших гармоник магнитных полей. Эти потери называются добавочными и учитываются как 0,5% от подводимой мощности при номинальной нагрузке. Для другой нагрузки они пересчитываются пропорционально квадрату тока статора.

Таким образом, полезная мощность на валу двигателя равна

$$P_2 = P_{\text{MX}} - \Delta P_{\text{MX}} - \Delta P_{\text{I}} \tag{10.22}$$

Отсюда КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1},\tag{10.23}$$

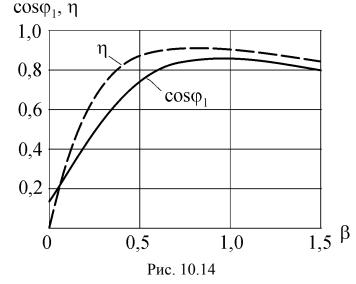
где $P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_{\rm c} + \Delta P_2 + \Delta P_{\rm mx} + \Delta P_{\rm m}$.

Если пренебречь механическими и добавочными потерями, то КПД асинхронного двигателя можно представить в виде функции коэффициента нагрузки $\beta = P_2 \, / \, P_{\text{ном}}$ аналогично выражению для КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta P_{\text{HOM}}}{\beta P_{\text{HOM}} + \Delta P_{\text{c}} + \beta^2 \Delta P_{\text{m}}},$$

где $\Delta P_{\rm M} = \Delta P_1 + \Delta P_2$. График зависимости $\eta(\beta)$ изображён на рис. 10.14.

Асинхронные двигатели обладают высоким КПД. Например, КПД дви-



гателей серии 5A мощностью от 1,5 до 250 кВт составляет соответственно 0,8...0,96.

Кроме активной мощности асинхронные двигатели потребляют реактивную мощность необходимую для возбуждения магнитного поля в машине. В режиме холостого хода коэффициент мощности двигателя очень низкий (около 0,1), т.к. активная мощность, расходуемая только на компенсацию по-



терь в сердечника статора и небольшие механические потери, незначительна, а реактивная мощность почти такая же, как в номинальном режиме. С увеличением нагрузки до номинальной активная мощность увеличивается, а реактивная остаётся практически постоянной и коэффициент мощности возрастает до значений 0,7...0,9.

При нагрузке менее половины от номинальной асинхронный двигатель работает с очень низким КПД и коэффициентом мощности. Поэтому при эксплуатации необходимо стремиться к тому, чтобы машина была полностью загружена.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое электромагнитная мощность?
- 2. Как связаны между собой электромагнитная мощность, мощность тепловых потерь в обмотке ротора и механическая мощность?
- 3. Что такое коэффициент нагрузки и как он используется при расчёте КПД?
- 4. Как зависят от нагрузки КПД и коэффициент мощности двигателя?
- 5. Почему нельзя допускать работу двигателя с малой нагрузкой?

10.8. Вращающий момент и механическая характеристика

Величину вращающего момента асинхронного двигателя можно получить из выражения (10.21) с учётом того, что $P_{_{\rm MX}}=M\Omega$ и $\Omega=(1-s)\omega_{_{\rm l}}/p$

$$M = \frac{pm_1R_2'I_2'^2}{\omega_1 s}. (10.24)$$

Подставляя в (10.24) значение приведённого тока ротора из (10.19), получим

$$M = \frac{pm_1R_2'U_1^2}{\omega_1 s \left[\left(R_1 + R_2' / s \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2 \right]}$$
(10.25)

У асинхронных двигателей общего применения $R_1 \ll X_1 + X_2'$, поэтому выражение (10.25) можно несколько упростить

$$M \approx \frac{pm_1R_2'U_1^2}{\omega_1 s \left[\left(R_2'/s \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2 \right]}$$
 (10.26)

Зависимость M(s) показана на рис. 10.15. Она имеет максимумы в области генераторного и двигательного режимов

$$M_{\text{max}} \approx \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X_2')}$$
 (10.27)

при скольжении

$$s_{\rm kp} \approx \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'},$$
 (10.28)



называемом *критическим*. Это название связано с тем, что при скольжениях больше критического работа асинхронного двигателя может быть неустойчивой. В случае $s < s_{\rm kp}$ увеличение скольжения или, что то же самое, уменьшение скорости вращения, приводит к увеличению вращающего момента и двигатель разгоняется, восстанавливая прежнюю скорость. Увеличение скольжения на участке характеристики, где $s > s_{\rm kp}$, приводит к уменьшению момента и ещё большему снижению скорости вплоть до полной остановки ротора. Это явление называется «опрокидыванием» двигателя и должно учитываться при эксплуатации, т.к. оно может привести к тяжёлым последствиям.

Отношение $M_{\rm max}/M_{\rm Hom}=k_{\rm M}$ называется кратностью максимального

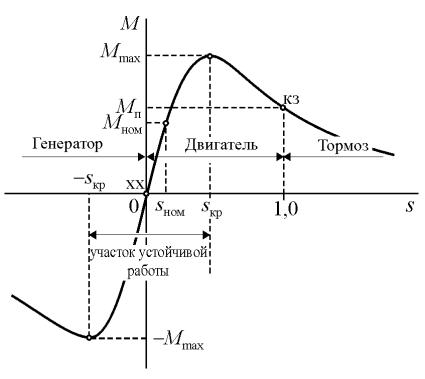


Рис. 10.15

метр имеет большое практическое значение, т.к. определяет перегрузочную способность двигателя, т.е. способность двигателя выдерживать кратковременное увеличение нагрузки без потери устойчивости и остановки. У двигателей общеприменения $k_{\rm M} = 1, 7...3, 4$.

момента. Этот пара-

Подставляя (10.27) в (10.26) и с учётом того, что из (10.28) $R_2' \approx s_{\rm kp} \left(X_1 + X_2' \right)$, получим ещё один вари-

ант характеристики M(s), т.н. формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{S}{S_{\text{KD}}} + \frac{S_{\text{Kp}}}{S}}.$$
 (10.29)

Из выражения (10.26) при s=1 получается значение вращающего момента, развиваемого двигателем при пуске, или *пускового момента*

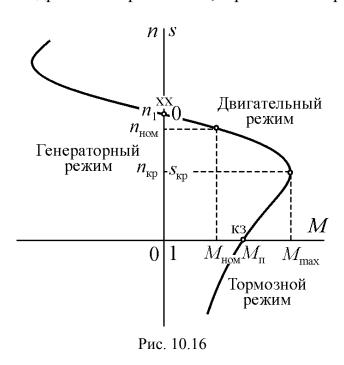
$$M_{\pi} = \frac{pm_1R_2'U_1^2}{\omega_1\left[\left(R_2'\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2\right]}.$$
 (10.30)

Отношение $M_{_\Pi}/M_{_{\rm HOM}}=k_{_\Pi}$ называется *кратностью пускового момента*. У двигателей общего применения $k_{_\Pi}=1,0\dots 2,0$.



Все значения вращающего момента двигателя пропорциональны U_1^2 . Это делает асинхронный двигатель очень чувствительным к снижению напряжения питания. Например, при снижении напряжения на 10% пусковой момент уменьшается на 19%, что значительно затрудняет пуск. При значительном понижении напряжения работающий двигатель может потерять устойчивость и остановиться.

Функция M(s) называется механической характеристикой. Характеристика, соответствующая номинальным значениям напряжения питания и частоты и отсутствию сопротивлений в цепях фазного ротора называется естественной механической характеристикой. Часто вместо характеристик M(s) пользуются механическими характеристиками вида n(M) или $\Omega(M)$ (рис. 10.16). Они удобнее, т.к. деление на режимы работы в них происходит по квадрантам. Кроме того, при анализе работы других типов двигателей не



пользуются понятием скольжения и строят механические характеристики в координатах nM или ΩM . На оси ординат рис. 10.16 показаны также значения скольжения в характерных точках.

Участок механической характеристики, соответствующий области устойчивой работы, называется рабочим участком. Важнейшим параметром этого участка, от которого зависят эксплуатационные свойства двигателя, является жёсткость. Она определяется как отношение приращения вращающего момента к приращению скорости вращения или как производ-

ная dM/dn. Чем жёстче механическая характеристика, тем меньше изменения скорости вращения при изменении нагрузки на валу двигателя. Механическая характеристика асинхронных двигателей общего применения является жёсткой, т.к. номинальные значения скольжения находятся в диапазоне 0,02...0,05. Это означает, что при изменении нагрузочного момента от нуля до номинального значения скорость меняется на 2...5%.

Вопросы для самопроверки

- 1. От чего зависит величина максимального момента двигателя?
- 2. Чем определяется величина критического скольжения?
- 3. Почему скольжение, соответствующее максимальному моменту двигателя, называется критическим?



- 4. Что такое перегрузочная способность двигателя?
- 5. Почему асинхронный двигатель очень чувствителен к изменениям напряжения питания?
- 6. Что такое механическая характеристика?
- 7. Какие квадранты плоскости механической характеристики соответствуют режимам двигателя, генератора и тормоза?
- 8. Какой участок механической характеристик является рабочим?
- 9. Как перевести асинхронную машину в генераторный режим (в режим противовключения)?
- 10. Что такое жёсткость механической характеристики?

10.9. Пуск двигателя

При пуске двигатель разгоняется от нулевой скорости вращения до скорости, при которой создаваемый нагрузкой момент сопротивления $M_{\rm c}$ будет уравновешен моментом, развиваемым двигателем $M_{\rm c}$. Кроме момента сопротивления нагрузки двигатель при пуске преодолевает также динамический момент $M_{\rm g} = J \cdot d\Omega/dt$, создаваемый моментом инерции масс всех приводимых в движение тел, включая ротор — $J_{\rm c}$ Для обеспечения пуска необходимо, чтобы $M > M_{\rm c} + M_{\rm g}$.

Особенностью асинхронных двигателей является относительно небольшая кратность пускового момента (1,2...2,0) при значительном токе, превосходящем номинальное значение в 5...7 раз. Поэтому при питании двигателя от сети соизмеримой мощности может возникать понижение напряжения, делающее пуск невозможным.

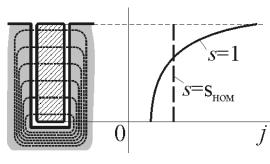


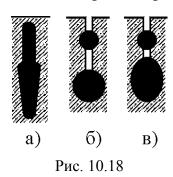
Рис. 10.17

Для улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей используют явление вытеснения тока из внутренних слоёв стержня «беличьей клетки» в наружные. Это связано с различным потокосцеплением рассеяния слоёв. У внутренних слоёв оно максимально и уменьшается по мере смещения к наружной части паза (рис. 10.17). Соот-

ветственно меняется и их индуктивное сопротивление, уменьшаясь от внутренних слоёв к наружным. При пуске частота тока в роторе максимальна и равна частоте сети. Максимальны также индуктивные сопротивления и их различие по слоям. В результате плотность тока j в стержне распределяется по кривой рис. 10.17 так, что ток в основном протекает по наружной части. Это эквивалентно уменьшению сечения и увеличению сопротивления стержня. В результате пусковой ток уменьшается, а пусковой момент возрастает.



По мере разгона двигателя частота тока в роторе снижается, величина индуктивного сопротивления становится близкой к нулю, и ток распределяется по стержню практически равномерно (рис. 10.17).



Для получения требуемого эффекта от вытеснения тока глубину паза делают приблизительно в 10 раз больше ширины. Поэтому двигатели такой конструкции называются *глубокопазными*. Глубину можно несколько уменьшить, если вместо прямой формы паза использовать трапецеидальную или «бутылочную» (рис. 10.18, *a*). В этом случае сопротивление верхней части стержня увеличивается также за счёт уменьшения сечения.

Максимальный эффект от вытеснения тока достигается в двигателях с двойной «беличьей клеткой». В верхней части паза таких двигателей располагают пусковую короткозамкнутую обмотку, а в нижней – рабочую. Пусковая обмотка изготавливается из латуни или бронзы - материалов, обладающих относительно высоким удельным сопротивлением, а рабочая – из меди. Кроме того, диаметр стержней пусковой обмотки делают меньше, чем рабочей (рис. 10.18, б и в). Таким образом, в двигателях с двойной «беличьей клеткой» используют не только эффект вытеснения тока, но и конструктивные решения, увеличивающие сопротивление пусковой обмотки. При пуске потокосцепление пусковой обмотки незначительно, а рабочая обмотка сцепляется с сильным магнитным полем. В результате практически весь ток вытесняется в пусковую обмотку. По мере разгона ток переходит в рабочую обмотку, а в пусковой - снижается. Помимо уменьшения индуктивного сопротивления рабочей обмотки после разгона, перераспределению тока способствует также то, что её сопротивление существенно меньше за счёт размера и материала стержней.

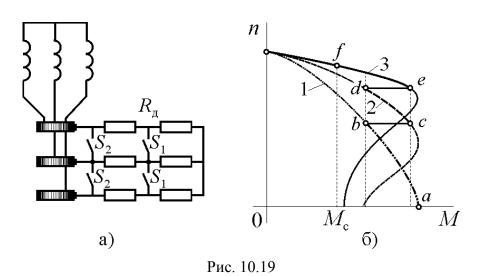
Пусковой момент двигателей с двойной «беличьей клеткой» значительно выше, чем у обычных двигателей, и несколько выше, чем у глубокопазных двигателей. Однако стоимость таких двигателей существенно больше.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели мощностью приблизительно до 50 кВт запускаются прямым включением в сеть. Для пуска более мощных двигателей используют различную пусковую аппаратуру.

Однако при частых пусках прямое включение становится невозможным из-за перегрева двигателя пусковыми токами. В этом случае используют двигатели с фазным ротором.

В цепь фазных обмоток ротора через контактные кольца включают добавочное сопротивление $R_{\rm д}$, разделённое на секции (рис. 10.19, a). Величина сопротивления цепи ротора асинхронного двигателя определяет значение критического скольжения. Чем больше сопротивление, тем больше критическое скольжение и пусковой момент. Пуск производится при разомкнутых





контактах ключей S_1 и S_2 . Величина добавочного coпротивления при этом максимальна и двигатель развивает момент, соответствующий точке а на механической характеристике *1* рис. 10.19, δ . По мере увеличения скорости

вращения рабочая точка перемещается по характеристике I и при моменте, соответствующем точке b, контакты S_1 замыкаются, шунтируя часть добавочного сопротивления. При новом значении добавочного сопротивления механическая характеристика двигателя соответствует кривой 2, поэтому рабочая точка скачком перемещается в точку c на этой характеристике и двигатель продолжает разгон до тех пор, пока в точке d не произойдёт замыкание контактов S_2 . Контакты S_2 полностью шунтируют добавочное сопротивление, замыкая обмотки ротора накоротко. Двигатель переходит в точку e на естественной механической характеристике S_2 и разгоняется по ней до рабочей точки S_2 0 соответствующей моменту нагрузки на валу S_2 0.

Двигатели с фазным ротором позволяют произвести пуск с ограничением тока и с максимальным пусковым моментом. Однако при этом происходят значительные потери энергии в добавочном сопротивлении. Кроме того, эти двигатели существенно дороже двигателей с короткозамкнутым ротором. Поэтому их используют только при наличии достаточных оснований. В последнее время область их применения значительно сократилась в связи широким распространением полупроводниковых устройств «мягкого» пуска, позволяющих реализовать оптимальные режимы в приводе с короткозамкнутым двигателем.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какие проблемы могут возникать при пуске асинхронного двигателя?
- 2. Что такое вытеснение тока в стержнях «беличьей клетки»?
- 3. Как используется явление вытеснения тока для улучшения пусковых свойств двигателей?
- 4. Чем отличаются глубокопазные двигатели от двигателей с двойной «беличьей клеткой»?

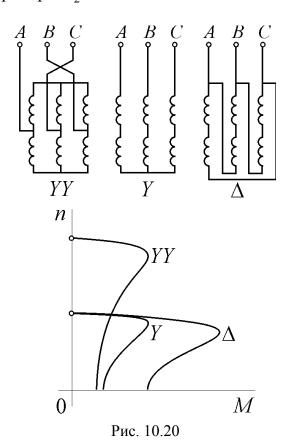


- 5. Почему пусковой момент двигателей с двойной «беличьей клеткой» выше пускового момента глубокопазных двигателей?
- 6. Какие двигатели можно запускать прямым включением в сеть?
- 7. Какой принцип используется при пуске двигателей с фазным ротором?
- 8. Как реализуется пуск двигателей с фазным ротором?

10.10. Регулирование скорости вращения

Возможность регулирования скорости вращения двигателей является важнейшим требованием современных технологических процессов. Это связано со снижением энергопотребления и с повышением качества продукции, которого часто невозможно достичь в процессах с нерегулируемыми параметрами движения (положением, скоростью вращения, угловым и/или линейным ускорением). Асинхронные двигатели в сочетании с современной аппаратурой управления удовлетворяют большинству требований, предъявляемых не только к приводам высокотехнологичного оборудования, но и к простым установкам, в которых достаточно сформировать один-два режима с постоянной скоростью вращения.

Из уравнения механической характеристики (10.25) следует, что при заданном моменте на валу скоростью вращения, т.е. скольжением s, можно управлять изменением числа пар магнитных полюсов p, напряжения U_1 , частоты ω_1 и, у двигателей с фазным ротором, изменением сопротивления цепи ротора R_2 .



<u>10.10.1. Регулирование изменением</u> <u>числа пар полюсов</u>

Этот способ является самым простым и эффективным способом получения нескольких фиксированных значений скорости вращения. Для этого начала и концы катушечных групп фазных обмоток выводятся на клеммы щитка двигателя и при переключении схемы их соединения изменяется число пар полюсов магнитного поля.

На рис. 10.20 показаны возможные схемы соединения обмоток двухскоростного двигателя и получаемые механические характеристики. При переключении обмоток с двойной звезды YY на одинарную Y скорость вращения уменьшается вдвое с сохранением величины максимального момента. Если

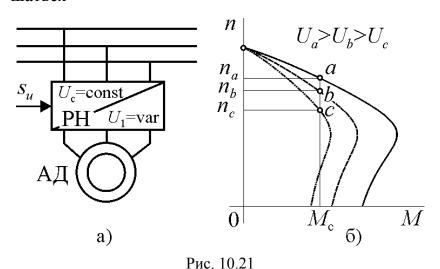


обмотки при переключении соединяются треугольником Δ , то максимальный момент возрастает приблизительно вдвое и сохраняется постоянным произведение максимального момента на скорость вращения, т.е. мощность. Поэтому схема переключения YY/Y называется схемой переключения с постоянным моментом, а схема YY/Δ — схемой переключения с постоянной мощностью.

Кроме двухскоростных двигателей изготавливаются также трёх и четырёхскоростные. Для получения трёх и четырёх ступеней требуется более сложная обмотка. Эти двигатели при той же мощности имеют худшие массогабаритные показатели и большую стоимость. Дискретность регулирования является недостатком этого способа, однако для целого ряда задач плавное регулирование не требуется и в этом случае он может быть оптимальным техническим решением. Например, переключение обмоток двигателя часто используется в приводе станков для уменьшения числа ступеней и упрощения механической передачи; в приводах вентиляторов и насосов для управления их производительностью; в подъёмно-транспортном оборудовании.

10.10.2. Регулирование понижением напряжения питания

Обычно этот способ реализуется с помощью полупроводниковых импульсных регуляторов напряжения (РН на рис. 10.21, a). При уменьшении напряжения уменьшается максимальный момент двигателя с сохранением значения критического скольжения (рис. 10.21, δ). В случае постоянного момента нагрузки на валу двигателя $M_{\rm c}$ скорость при этом будет также уменьшаться



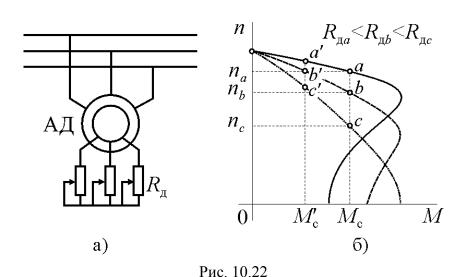
Недостатками этого способа управления являются: 1) уменьшение перегрузочной способности двигателя при снижении напряжения вплоть до возможного «опрокидывания»; 2) сильно ограниченный диапазон регулирования $0 < s < s_{\rm kp}$, вследствие чего его применяют с двигателями специ-

ального исполнения с повышенным критическим скольжением; 3) значительные тепловые потери в роторе вследствие больших значений скольжения. Всё это делает способ регулирования понижением напряжения малоэффективным при длительном режиме работы, но для кратковременного снижения скорости машин малой мощности он может применяться.



10.10.3. Регулирование изменением сопротивления цепи ротора

Иначе этот способ называется реостатным регулированием и применяется только для двигателей с фазным ротором. Увеличение добавочных сопротивлений $R_{\rm д}$, включённых в цепи фазных обмоток ротора (рис. 10.22, a), приводит к увеличению критического скольжения при сохранении макси-



мального момента развиваемого двигателем (рис. 10.22, δ). В результате скорость вращения двигателя уменьшается.

Этот способ связан с большими тепловыми потерями в реостатах $R_{\rm д}$, поэтому не может применяться при длительной работе. Кроме того, с

уменьшением скорости уменьшается жёсткость механических характеристик.

Недостатком реостатного регулирования является также зависимость диапазона регулирования от величины нагрузочного момента. С уменьшением нагрузки на валу диапазон уменьшается (рис. 10.22, δ) так, что при режимах близких к холостому ходу регулирование скорости становится практически невозможным.

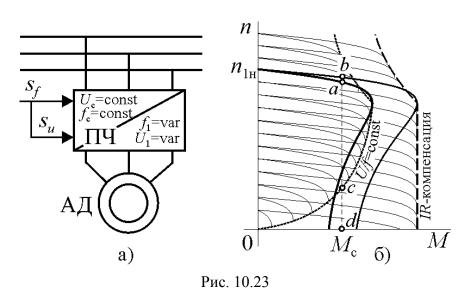
<u>10.10.4. Регулирование изменением частоты питания (частотное регулирование)</u>

В настоящее время этот способ является самым распространённым. Он обеспечивает выполнение требований предъявляемых к подавляющему большинству приводов высокого и среднего качества в диапазоне мощностей от десятков ватт до десятков мегаватт.

Частотное регулирование реализуется с помощью полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ на рис. 10.23, a), имеющих два канала управления частотой s_f и амплитудой выходного напряжения s_u . Это необходимо для того, чтобы обеспечить стабилизацию магнитного потока в двигателе, т.к. он прямо пропорционален величине напряжения питания и обратно пропорционален частоте. Поэтому при изменении частоты обязательно нужно пропорционально изменять также напряжение питания.

Закон частотного управления, при котором соблюдается постоянное соотношение между напряжением и частотой $U/f = \mathrm{const}$ является наиболее распространённым. Однако по мере уменьшения частоты уменьшается также





максимальный мент двигателя (рис. 10.23, б). Это связас увеличением падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора R_1 и, как следствие, с уменьшением магнитного потока. Уменьшение момента ограничивает диапазон регулирования скорости

вращения, т.к. при этом уменьшается перегрузочная способность двигателя и возникает опасность его «опрокидывания».

Для исключения этого явления нужно изменять напряжение несколько в иной пропорции так, чтобы компенсировать падение напряжения $R_1\underline{I}_1$. Это называется IR-компенсацией. Использование режима компенсации увеличивает максимальный момент на 15...20% и сохраняет его неизменным, обеспечивая значительное расширение диапазона регулирования скорости вращения (рис. 10.23, δ).

Частотное регулирование позволяет плавно менять скорость вращения от нулевой до номинальной $n_{\rm lh}$. Однако, если двигатель по условиям эксплуатации допускает увеличение скорости выше этого значения, то преобразователи частоты обеспечивают и такой режим работы. При этом напряжение поддерживается постоянным и равным номинальному значению, т.к. его увеличение невозможно из-за перегрузки изоляции. Вследствие этого в области скоростей вращения выше номинальной магнитный поток и максимальный момент уменьшаются обратно пропорционально увеличению частоты (рис. 10.23, δ), а располагаемая мощность двигателя сохраняется на уровне номинальной.

Современные преобразователи контролируют тепловой режим двигателя, не допуская его перегрева. Однако для длительной работы при низких скоростях вращения необходимо использовать двигатели с принудительной вентиляцией.

Массогабаритные показатели и стоимость преобразователей частоты со-измеримы с двигателями, поэтому асинхронный привод с частотным управлением в настоящее время получил широкое распространение.

Вопросы для самопроверки

1. Как реализуется изменение скорости вращения переключением схемы соединения обмоток?



- 2. Укажите достоинства и недостатки регулирования скорости вращения изменением напряжения питания.
- 3. Укажите достоинства и недостатки регулирования скорости вращения изменением сопротивления в цепи ротора.
- 4. Почему при частотном управлении ниже номинальной скорости вращения нужно одновременно регулировать частоту и напряжение питания?
- 5. Почему при частотном управлении выше номинальной скорости вращения нужно сохранять напряжение питания номинальным?
- 6. Почему при частотном управлении по закону U/f = const c уменьшением частоты уменьшается максимальный момент?
- 7. Как можно сохранить перегрузочную способность двигателя при частотном управлении?
- 8. Укажите достоинства и недостатки частотного регулирования скорости вращения.

10.11. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели 10.11.1. Однофазные двигатели.

В тех случаях, когда мощность механизма приводимого в движение невелика или когда у пользователя нет трёхфазного источника питания используют асинхронные однофазные двигатели. Обычно их мощность не превышает 3...5 кВт и основной областью применения является бытовая аппаратура и электроинструмент.

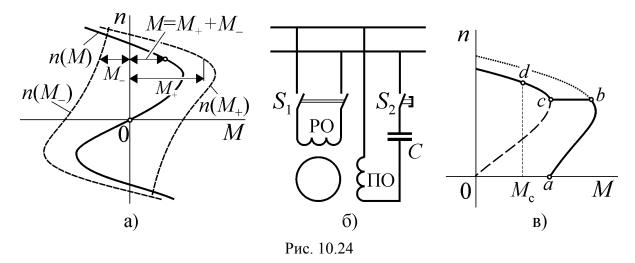
Статор двигателя имеет однофазную обмотку, а ротор короткозамкнутую обмотку типа «беличья клетка», аналогичную обмотке трёхфазных двигателей.

Однофазный ток статора создаёт пульсирующее магнитное поле, которое можно представить суммой двух круговых полей вращающихся в противоположные стороны. Для вращающих моментов M_+ и M_- , создаваемых каждым полем, можно построить механические характеристики $n(M_+)$, $n(M_-)$ и получить результирующую механическую характеристику n(M), суммируя абсциссы точек характеристик отдельных моментов (рис. 10.24, a).

При неподвижном роторе поля прямого и обратного вращения создают одинаковые вращающие моменты, действующие в противоположные стороны, поэтому пусковой момент однофазного двигателя равен нулю и самостоятельно такой двигатель запуститься не может. Механическая характеристика его симметрична относительно начала координат и, будучи приведённым во вращение в любом направлении, он работает одинаково.

Для создания пускового момента нужно усилить поле прямого вращения и ослабить поле обратного вращения. Это делается с помощью обмотки, подключаемой к сети во время пуска и называемой пусковой (ΠO на рис. 10.24, δ). Пусковая обмотка расположена на статоре и смещена относительно рабо-





чей PO на угол 90° . Фазовый сдвиг тока пусковой обмотки, необходимый для формирования кругового магнитного поля, получают включением последовательно с ней пускового конденсатора C.

После включения рабочей обмотки к сети подключают пусковую. При этом в двигателе создаётся магнитное поле близкое к круговому, и он начинает разгон с пусковым моментом, соответствующим точке а рис. 10.24, в. В точке b оператором или сигналом какого-либо автоматического устройства (реле времени, токового реле, центробежного выключателя и т.п.) пусковая отмотка отключается, и двигатель переходит в режим работы с пульсирующим полем, создаваемым рабочей обмоткой.

Более простая конструкция у однофазных двигателей с экранированными (расщеплёнными) полюсами (рис. 10.25). Они имеют на статоре явно выраженные полюсы 1, на которых расположена обмотка 2. Часть каждого полюсного наконечника охвачена (экранирована) короткозамкнутым витком 3, уложенным в паз. Ток статора создаёт в экранированной и неэкранированной частях полюсов переменные магнитные потоки. Поток, проходящий через

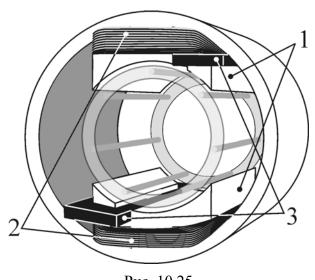


Рис. 10.25

экранированную часть, наводит в витке ЭДС и в нём возникает ток, возбуждающий собственный магнитный поток. Магнитный поток короткозамкнутого витка сдвигает фазу потока в экранированной части полюса. В результате под полюсом образуются два магнитных потока, смещённых по фазе друг относительно друга и сдвинутых в пространстве. Смещение этих потоков в пространстве и по фазе недостаточно для формирования кругового магнитного поля, тем не ме-



нее, в двигателе создаётся момент $M_{\rm II}=0,2...0,5M_{\rm HOM}$, достаточный для пуска двигателя вхолостую.

Коэффициент мощности и КПД двигателей с экранированными полюсами крайне низкие, поэтому они выпускаются на мощности до нескольких десятков ватт. Низкие энергетические показатели характерны вообще для всех однофазных двигателей. Кроме того, они в 1,5...2,0 раза больше по массе и габаритам, чем трёхфазные двигатели той же мощности.

10.11.2. Двухфазные двигатели.

Двухфазные асинхронные двигатели относятся к классу исполнительных двигателей, предназначенных для работы в системах автоматического управления. Поэтому к ним предъявляются особые требования: 1) устойчивая работа во всём диапазоне скоростей вращения; 2) широкий диапазон регулирования скорости; 3) близкие к линейным механические характеристики; 4) большое значение пускового момента; 5) малая мощность управления; 6) высокое быстродействие; 7) высокая надёжность; 8) малые габариты и вес. Энергетические характеристики для исполнительных двигателей не имеют столь существенного значения, как для двигателей общего применения, т.к. мощность их обычно не более 500 ватт.

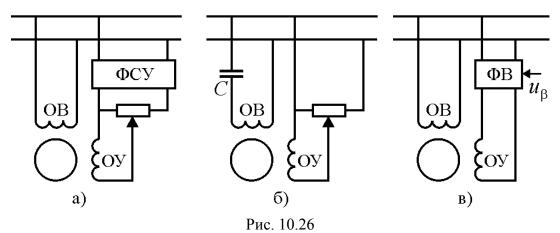
Двухфазные двигатели имеют на статоре две обмотки, оси которых смещены в пространстве на 90°. При питании обмоток токами одинаковой амплитуды и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 90° в двигателе возбуждается круговое магнитное поле. Любая асимметрия питания обмоток в виде разных амплитуд и/или фазового смещения на угол, отличающийся от 90°, приводит к искажению магнитного поля, и оно становится эллиптическим, т.е. появляется магнитное поле с обратным направлением вращения, изменяющее развиваемый двигателем вращающий момент. Таким образом, путём регулирования амплитуды и/или фазового сдвига тока одной из обмоток можно сформировать в двигателе магнитное поле от кругового до пульсирующего и получить вращающий момент от максимального до нулевого.

Ротор двигателя представляет собой полый цилиндр из алюминиевого сплава, имеющий очень малый момент инерции и большое активное сопротивление. Малый момент инерции позволяет получить высокое быстродействие, а за счёт большого активного сопротивления ротора обеспечивается высокая линейность механических характеристик, т.к. при этом критическое скольжение составляет величину порядка 4,0...5,0 и двигатель работает на участке механической характеристики близком к режиму холостого хода, где нелинейность её минимальна.

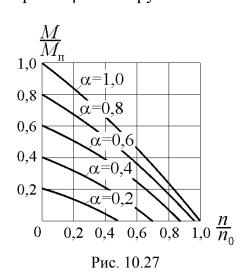
Двухфазные двигатели питаются, как правило, от однофазной сети (рис. 10.26). Одна из обмоток, называемая обмоткой возбуждения OB, подключается к сети непосредственно, а вторая, называемая обмоткой управления OV, через регулирующее устройство. На рис. 10.26, a показана схема включения двигателя при амплитудном управлении. Фазосдвигающее устройство ΦCV



создаёт на входе регулятора напряжения в виде потенциометра фазовый сдвиг в 90°. Изменением положения движка потенциометра напряжение обмотки управления можно изменять от нуля до напряжения питания обмотки возбуждения. Обычно для анализа процессов при амплитудном управлении используют понятие коэффициента сигнала $0 \le \alpha = U_{\rm oy}/U_{\rm os} \le 1,0$, где $U_{\rm oy},\ U_{\rm os}$ — напряжения обмотки управления и обмотки возбуждения. При $\alpha=0$ магнитное поле в двигателе будет пульсирующим, а при $\alpha=1$ — круговым.



На рис. 10.26, ε показана схема включения двигателя при фазовом управлении. Здесь обмотка управления подключена к сети через фазовращатель ΦB , управляемый сигналом u_{β} . Фазовое смещение напряжения на выходе фазовращателя может изменяться от нуля до 90°, изменяя характер магнитного поля от пульсирующего до кругового. При анализе процессов в двигателе с фазовым управлением в качестве коэффициента сигнала используют $\sin \beta$, где β — угол сдвига фаз между напряжениями обмоток возбуждения и управления. При $\sin \beta = 0$ магнитное поле в двигателе будет пульсирующим, а при $\sin \beta = 1$ — круговым.



Фазосдвигающее устройство и фазовращатель являются довольно сложными элементами системы управления двигателем. Часто задачу фазового смещения решают простым включением конденсатора в цепь обмотки возбуждения (рис. 10.26, δ). В этом случае при изменении напряжения обмотки управления и нагрузки двигателя меняется также фазовый сдвиг между напряжениями обмоток. Такое управление называется амплитудно-фазовым.

Из трёх рассмотренных способов наилучшие характеристики обеспечивает фазо-



вое управление. Однако из-за сложности реализации оно практически не применяется. Из двух других способов лучшим является амплитудное управление, реализуемое выпускаемыми промышленностью усилителями. Типичные механические характеристики в относительных единицах для амплитудного способа показаны на рис. 10.27. Они имеют хорошую линейность и двигатель при амплитудном управлении удовлетворяет большинству требований к подобным устройствам.

Вопросы для самопроверки

- 1. Как устроен однофазный асинхронный двигатель?
- 2. Какое магнитное поле формируется в однофазном двигателе?
- 3. Как создаётся вращающий момент в однофазном двигателе?
- 4. Как запускается однофазный двигатель?
- 5. Как устроен двигатель с экранированными (расщеплёнными) полюсами?
- 6. Укажите достоинства, недостатки и область применению однофазных двигателей.
- 7. Укажите требования, предъявляемые к исполнительным двигателям?
- 8. Как устроен двухфазный исполнительный двигатель?
- 9. Какие существуют способы управления двухфазными исполнительными двигателями?
- 10. Какой вид имеют механические характеристики двухфазного исполнительного двигателя при амплитудном управлении?

11. Синхронные машины

Синхронными называются бесколлекторные электрические машины переменного тока, у которых скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля, т.е. поле и ротор вращаются синхронно. Синхронные машины, в отличие от асинхронных, преимущественно представлены в классе генераторов. Практически вся электрическая энергия промышленным способом вырабатывается с помощью синхронных генераторов. Они также очень часто используются в автономных источниках питания переменного тока. Синхронные двигатели используются там, где требуется строго постоянная скорость вращения. Как правило, это мощные приводы в металлургической и горнодобывающей промышленности, приводы насосов и компрессоров магистральных нефте- и газопроводов. Однако в последнее время в сочетании с полупроводниковыми преобразователями частоты они успешно применяются в высококачественных приборных приводах малой и средней мощности с широким диапазоном регулирования скорости вращения.

Очень важным свойством синхронных машин является их способность работать при токе, опережающем по фазе напряжение, т.е. генерировать реактивную мощность, компенсируя её потребление другими машинами и установками, питающимися от той же сети.



11.1. Устройство и принцип действия

Статор синхронной машины аналогичен по устройству статору асинхронного двигателя. Ротор представляет собой электромагнит постоянного тока. Он может иметь явно выраженные полюсы (рис. 11.1, a) или неявно выраженные (рис. 11.1, b). Ротор с явно выраженными полюсами используют в тихоходных машинах, а с неявно выраженными — в быстроходных, т.к. при больших скоростях вращения трудно обеспечить достаточную прочность явнополюсной конструкции и, кроме того, она создаёт большие вентиляционные потери. На полюсы 1 устанавливают катушки обмотки 2, которая через

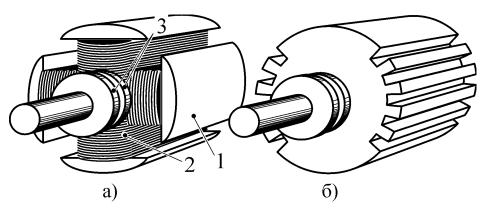


Рис. 11.1

3 кольца И скользящие ПО щётки ним подключается к источнику П0стоянного тока. Протекающий в обмотке ток возбуждает магнитное поле ротора, поэтому

контактные

эта обмотка называется *обмоткой возбуждения*. В неявнополюсных роторах обмотку возбуждения укладывают в пазы сердечника ** аналогично обмотке фазных роторов асинхронных двигателей.

При подключении обмотки возбуждения к источнику питания и вращении ротора с угловой частотой Ω его магнитный поток пересекает проводники обмотки статора и наводит в них синусоидальную ЭДС с действующим значением $E_0=4,44p\Omega k_{o6}w\Phi_{0m}$, где p — число пар полюсов магнитного поля; k_{o6} — обмоточный коэффициент; w — число витков фазной обмотки; Φ_{0m} — амплитуда магнитного потока ротора. Фазные обмотки смещены по отношению к друг другу на 120° , поэтому наводимые ЭДС образуют симметричную трёхфазную систему.

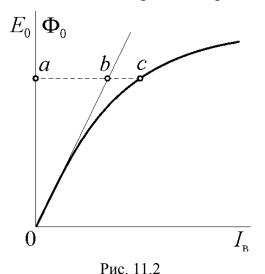
Изменением тока обмотки возбуждения можно регулировать амплитуду магнитного потока ротора Φ_{0m} и индуцируемую им ЭДС. Зависимость ЭДС от величины тока возбуждения при номинальной частоте вращения ротора $E_0 = f(I_{\rm B})$ называется характеристикой холостого хода (рис. 11.2). При постоянной скорости вращения ЭДС E_0 линейно зависит от величины магнитного потока Φ_0 , поэтому характеристика холостого хода подобна кривой намагничивания машины $\Phi_0 = f(I_{\rm B})$. Касательная к кривой $\Phi_0 = f(I_{\rm B})$ в

 ** На рисунке 11.1, δ обмотка не показана

^{*} Н а рисунке 11.1 щётки не показаны



точке начала координат представляет собой зависимость величины потока



 Φ_0 от тока I_δ , необходимого для проведения этого потока через зазор — $\Phi_0 = f(I_\delta)$. Отрезок bc, равный разности абсцисс кривой намагничивания $\Phi_0 = f(I_{\rm B})$ и касательной $\Phi_0 = f(I_\delta)$, соответствует току (МДС), необходимому для проведения потока Φ_0 по ферромагнитным участкам магнитной цепи машины. На начальном участке кривой намагничивания магнитопровод ненасыщен и весь ток (МДС) расходуется на проведение потока через зазор. По мере насыщения всё большая часть тока требуется для проведения потока через

магнитопровод. Степень насыщения машины характеризуется отношением $k_{_{\mathrm{H}}} = ac \, / \, ab \, ,$

называемым коэффициентом насыщения. Обычно этот коэффициент находится в пределах $k_{_{
m H}}$ = 1,2...1,4 .

В современных машинах малой и средней мощности магнитное поле ротора часто возбуждается постоянными магнитами. Такой способ возбуждения, в отличие от электромагнитного, называют магнитоэлектрическим возбуждением.

При подключении статора синхронной машины к сети в нём возбуждается круговое магнитное поле, вращающееся с угловой частотой $\Omega_1 = \omega_1 \, / \, p$. Предположим, что ротор каким-либо способом разогнан до этой частоты вращения. Тогда магнитные полюсы полей статора и ротора совместятся и

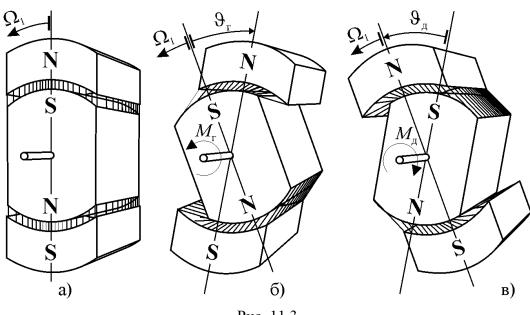


Рис. 11.3



будут вращаться синхронно (рис. 11.3, a). Если к ротору приложить вращающий момент M_{Γ} , действующий в направлении вращения, то между осями магнитных полей возникнет рассогласование ϑ_{Γ} (рис. 11.3, δ). Изменится фаза ЭДС, наводимой полем ротора в обмотках статора, что приведёт к изменению фазных токов и к появлению вращающего момента, препятствующего рассогласованию, т.е. тормозного момента. Если действующий на ротор внешний вращающий момент сохраняет свою величину, то он будет уравновешен тормозным моментом и ротор будет вращаться с постоянным опережающим смещением ϑ_{Γ} . При этом механическая энергия внешнего двигателя, вращающего ротор, будет преобразовываться в электрическую и передаваться в сеть, питающую фазные обмотки.

В случае действия на ротор тормозного момента $M_{\rm д}$ картина изменится на противоположную. Поле ротора сместится на угол $\vartheta_{\rm д}$ в сторону запаздывания (рис. 11.3, ϵ) и фазные токи будут создавать момент, разгоняющий ротор. При этом статор будет потреблять из питающей сети мощность, необходимую для уравновешивания тормозного момента, действующего на ротор, т.е. синхронная машина будет работать в режиме двигателя.

Таким образом, переход от режима генератора к режиму двигателя в синхронной машине происходит при неизменной скорости вращения в зависимости от характера воздействия на её вал. При этом вращающий момент, создаваемый токами статора, можно рассматривать как результат действия сил притяжения между полюсами магнитных полей, образующих упругую связь между ротором и полем статора (рис. 11.3).

Если ротор вращается с угловой частотой $\Omega_1=\omega_1/p$, где $\omega_1=2\pi f_1-$ угловая частота сети, то магнитный поток ротора наводит в фазах статора синусоидальную ЭДС

$$e_0 = -d\Psi_0 / dt \iff \underline{E}_0 = -j\omega_1 \underline{\Psi}_0 \tag{11.1}$$

В установившемся режиме эта ЭДС почти полностью уравновешивает напряжение питания $\underline{E}_0 \approx \underline{U}_1$, поэтому её называют *противо-ЭДС*.

Фазные токи обмотки статора также создают магнитное поле, вращающееся синхронно с полем ротора. Оба поля образуют единое поле машины, но при анализе электромагнитных процессов удобнее рассматривать их как отдельные поля. Поле статора называется полем реакции якоря, а его влияние на общее поле машины — реакцией якоря. Пренебрегая насыщением магнитопровода машины, можно выразить потокосцепление реакции якоря как $\Psi_a = L_a i_1$, где $L_a \approx \mathrm{const}$ — индуктивность потока реакции якоря. Тогда ЭДС, наводимая этим потоком в обмотке статора будет равна

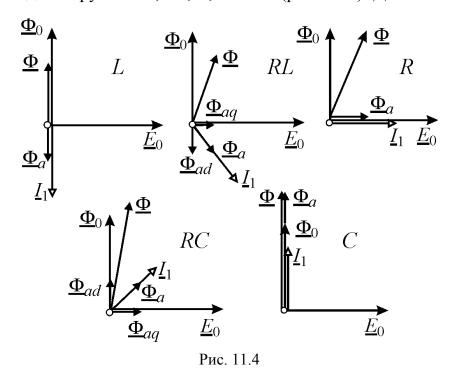
$$e_a = -d\Psi_a / dt = -L_a di_1 / dt \Leftrightarrow \underline{E}_a = -j\omega_1 L_a \underline{I}_1 = -jX_a \underline{I}_1.$$
 (11.2)

Помимо поля реакции якоря фазные токи создают потоки рассеяния, сцепляющиеся с каждой из обмоток и наводящие в них ЭДС



$$e_{\sigma} = -d\Psi_{\sigma}/dt = -L_{\sigma}di_{1}/dt \Leftrightarrow \underline{E}_{\sigma} = -j\omega_{1}L_{\sigma}\underline{I}_{1} = -jX_{\sigma}\underline{I}_{1}. \tag{11.3}$$

Рассмотрим влияние реакции якоря на магнитный поток машины на примере автономного синхронного генератора, работающего на различные виды нагрузки – L, RL, R, RC и C (рис. 11.4). Для этого используем представ-



ление магнитных потоков, тока статора i_1 и ЭДС потока ротора e_0 в комплексной форме. Чтобы излишне не усложнять анализ пренебрежём потерями энергии в обмотке статора и потоком рассеяния.

При индуктивной нагрузке ток статора \underline{I}_1 отстаёт по фазе от ЭДС \underline{E}_0 на 90° и поток реакции якоря $\underline{\Phi}_a = L_a \underline{I}_1$

направлен встречно по отношению к потоку ротора $\underline{\Phi}_0$. Поэтому он уменьшает общий поток $\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a$, размагничивая машину.

В случае активно-индуктивной нагрузки поток реакции якоря можно представить проекциями на ось потока ротора $\underline{\Phi}_0$ и на ось перпендикулярную ему. Первая составляющая потока реакции $\underline{\Phi}_{ad}$ называется продольной, а вторая $\underline{\Phi}_{aq}$ – поперечной. Продольная составляющая направлена встречно потоку ротора и размагничивает машину, а поперечная смещает результирующий поток, искажая поле. Оно ослабляется под одним краем полюса и усиливается под другим, однако усиление поля вследствие насыщения магнитопровода не компенсирует его ослабления и в целом за счёт искажения поток также уменьшается.

При чисто активной нагрузки магнитное поле машины смещается и, в конечном счете, ослабляется за счёт искажения.

При активно-ёмкостной нагрузке магнитное поле усиливается продольной составляющей потока реакции якоря Φ_{ad} , совпадающей по направлению с потоком ротора, и ослабляется за счёт смещения, вызванного действием поперечной составляющей Φ_{aq} . Конечный результат влияния реакции якоря на магнитное поле в данном случае зависит от конкретных значений величин.



Чисто ёмкостная нагрузка вызывает усиление магнитного поля машины, но оно не пропорционально значению тока, т.к. этому препятствует насыщение магнитопровода.

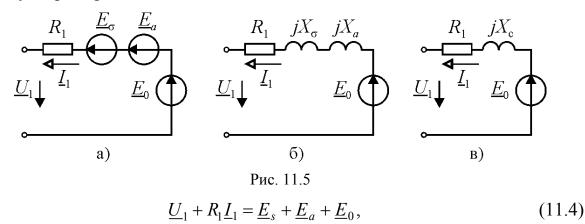
В целом реакция якоря неблагоприятно влияет на работу синхронной машины и для уменьшения этого влияния увеличивают воздушный зазор между статором и ротором.

Вопросы для самопроверки

- 7. Дайте определение синхронной машины?
- 8. Укажите области применения синхронных машин.
- 9. Что представляет собой ротор синхронной машины?
- 10. Какое магнитное возбуждается обмоткой расположенной на роторе?
- 11. Что такое характеристика холостого хода синхронной машины?
- 12. Как по характеристике холостого хода определить коэффициент насышения?
- 13. Как смещены полюсы ротора синхронной машины по отношению к полюсам магнитного поля статора в режиме генератора (двигателя)?
- 14. Что такое противо-ЭДС?
- 15. Как влияет характер нагрузки автономного синхронного генератора на магнитное поле машины?
- 16. Как уменьшают влияние реакции якоря в синхронной машине?

11.2. Уравнение напряжений обмотки статора и векторная диаграмма

Схему замещения фазы статора синхронной машины с учётом всех рассмотренных явлений можно представить в виде рис. 11.5, *а.* Положительное направление тока в схеме указано для режима генератора. Тогда по второму закону Кирхгофа



где R_1 – активное сопротивление фазной обмотки.

Для режима двигателя направление тока будет противоположным

$$\underline{U}_1 - R_1 \underline{I}_1 = \underline{E}_s + \underline{E}_a + \underline{E}_0, \tag{11.5}$$



С учётом (11.2) и (11.3) схему замещения и уравнения (11.4) и (11.5) можно преобразовать

$$\underline{U}_{1} = \underline{E}_{0} \pm \left(R_{1}\underline{I}_{1} + jX_{\sigma}\underline{I}_{1} + jX_{a}\underline{I}_{1} \right) = \underline{E}_{0} \pm \underline{I}_{1} \left[R_{1} + j\left(X_{\sigma} + X_{a} \right) \right], \quad (11.6)$$

где положительный знак соответствует двигательному режиму работы.

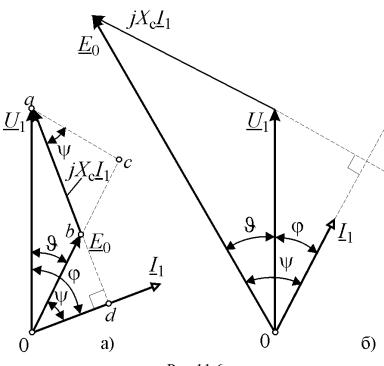


Рис.11.6

Индуктивные сопротивления рассеяния X_{σ} и реакции якоря X_a можно объединить $X_c = X_{\sigma} + X_a$. Это сопротивление называется синхронным сопротивлением. Обычно $R_1 \ll X_c$, поэтому уравнение (11.6) и схему замещения можно упростить

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 \pm jX_c\underline{I}_1. \tag{11.7}$$

Векторные диаграммы, соответствующие уравнениям (11.7), показаны на рис. 11.6.

Векторная диаграмма генераторного режима

(рис. 11.6, δ) построена для активно-индуктивной нагрузки. Ток \underline{I}_1 отстаёт по фазе от напряжения сети \underline{U}_1 на угол ϕ , а вектор напряжения на синхронном сопротивлении $jX_c\underline{I}_1$ опережает вектор тока на 90°. Сумма векторов \underline{U}_1 и $jX_c\underline{I}_1$ равна вектору ЭДС потока ротора \underline{E}_0 . Угол 9 между векторами \underline{U}_1 и \underline{E}_0 называется *углом нагрузки*. В генераторном режиме ЭДС \underline{E}_0 всегда опережает \underline{U}_1 .

При изменении знака вращающего момента, действующего на вал синхронной машины, она переходит в двигательный режим работы. При этом меняется знак угла нагрузки. Если отсчёт угла производить от вектора ЭДС \underline{E}_0 , то он становится положительным. Векторная диаграмма, соответствующая двигательному режиму, строится совершенно аналогично диаграмме генераторного режима (рис. 11.6, a.).

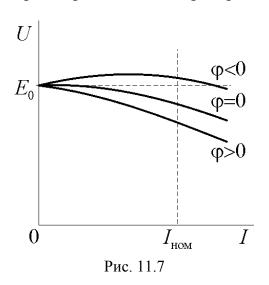
11.3. Работа синхронного генератора на автономную нагрузку

Синхронные генераторы часто используются как альтернативные источники питания в системах бесперебойного электроснабжения, либо как основные источники там, где отсутствует промышленная электрическая сеть.



Напряжение на выходе автономного синхронного генератора сильно зависит от величины и характера подключённой нагрузки.

Зависимость U(I) при постоянной скорости вращения ротора, токе обмотки возбуждения и коэффициенте мощности нагрузки называется внешней характеристикой генератора.



При активной (ϕ = 0) и активноиндуктивной нагрузке (ϕ > 0) напряжение генератора с увеличением тока быстро уменьшается. Это связано с размагничивающим действием реакции якоря. При активно-ёмкостной нагрузке (ϕ < 0) напряжение может даже возрастать, что объясняется намагничивающим действием реакции якоря.

Выходное напряжение автономного генератора можно регулировать или стабилизировать путём управления током возбуждения. На практике это часто делают с по-

мощью импульсного релейного регулятора, подключающего обмотку возбуждения к источнику питания при снижении напряжения ниже заданного уровня и отключающего её при превышении этого уровня.

Вопросы для самопроверки

- 1. Почему в уравнении электрического состояния статора синхронной машины индуктивные сопротивления рассеяния и реакции якоря можно объединить в суммарное синхронное индуктивное сопротивление?
- 2. Что такое внешняя характеристика синхронного генератора?
- 3. Чем объясняется увеличение (уменьшение) напряжения при увеличении тока на выходе генератора при активно-ёмкостной (активно-индуктивной) нагрузке?
- 4. Как можно стабилизировать выходное напряжение автономного синхронного генератора?

11.4. Мощность и вращающий момент синхронной машины

Активная мощность, потребляемая синхронной машиной из сети равна $P_1 = mU_1I_1\cos\varphi$, где m — число фаз статора. Из векторной диаграммы рис. 11.6, a следует, что $U_1\cos\varphi=E_0\cos\psi=m_u\cdot ad$, где m_u — масштабный коэффициент. Отсюда $P_1 = mE_0I_1\cos\psi$. В то же время, из прямоугольных треугольников θac и θ

Подставляя это выражение в формулу мощности, получим



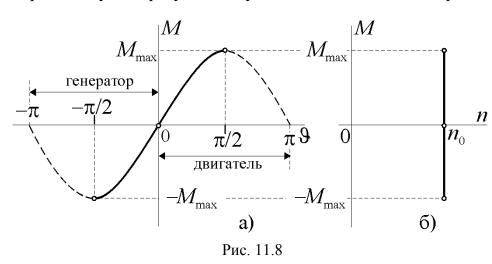
$$P_1 = \frac{mE_0U_1}{X_c}\sin\vartheta. ag{11.8}$$

Если пренебречь относительно малыми потерями энергии в обмотке и сердечнике статора, то вся потребляемая активная мощность будет передаваться магнитным полем из статора в ротор и преобразовываться в механическую энергию $P_{\rm l} \approx P_{\rm m} = M\Omega_{\rm l} = M\omega_{\rm l} / p$. Отсюда вращающий момент, создаваемый синхронной машиной

$$M = \frac{mpE_0U_1}{\omega_1 X_c} \sin \vartheta = M_{\text{max}} \sin \vartheta.$$
 (11.9)

Зависимость M(9) называется угловой характеристикой (рис. 11.8, a), а угол 9 — углом нагрузки. Угловая характеристика представляет собой синусоиду, положительные значения которой соответствуют двигательному режиму работы машины, а отрицательные — генераторному, при условии, что угол отсчитывается от вектора ЭДС \underline{E}_0 .

Участок синусоиды в пределах $-\pi/2 < 9 < \pi/2$ соответствует устойчивой работе машины. При работе на устойчивом участке увеличение тормозного момента $M_{\rm c}$, действующего на вал машины, приводит к увеличению угла 9 и возрастанию вращающего момента M до тех пор, пока он не станет равным тормозному. В результате устанавливается новое равновесное состояние



 $M = M_{\rm c}$ c Hoвым значением нагрузки. угла неустойчи-Ha вом участке при возрастании угнагрузки ла вращающий момент машины уменьшается, что приводит к большему ещё увеличению уг-

ла до тех пор, пока рабочая точка на угловой характеристике не сместится на устойчивый участок или, в худшем случае, ротор выйдет из синхронизма и остановится. Выход («выпадение») из синхронизма является аварийным режимом, поэтому приводы с синхронными двигателями проектируются таким образом, чтобы номинальный момент нагрузки не превышал половины от максимального, т.е. чтобы угол нагрузки был в пределах $-30^{\circ} < 9 < 30^{\circ}$.



Максимальный момент, развиваемый синхронной машиной $M_{\max} = \frac{mpE_0U_1}{\omega_1X_{\mathrm{c}}}$, определяет её перегрузочную способность или запас устой-

чивости. В отличие от асинхронного двигателя, максимальный момент которого пропорционален квадрату напряжения питания, здесь эта зависимость только в первой степени, поэтому синхронная машина гораздо более устойчива к колебаниям напряжения сети. Кроме того, максимальный момент можно несколько увеличить за счёт ЭДС E_0 , если увеличить ток обмотки возбуждения.

Скорость вращения синхронной машины $n_0 = 60 f_1/p$ не зависит от нагрузки и режима работы и определяется только частотой сети f_1 . Поэтому механическая характеристика представляет собой отрезок прямой линии, параллельный оси момента (рис. $11.8, \delta$). Он ограничен в двигательном и генераторном режимах максимальным моментом $M_{\rm max}$. Механическая характеристика синхронной машины не имеет точки пересечения с осью вращающего момента. Это означает, что при неподвижном роторе синхронный двигатель не развивает пускового момента и поэтому самостоятельно прийти во вращение не может.

Вопросы для самопроверки

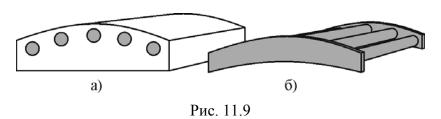
- 1. Что такое угловая характеристика синхронной машины?
- 2. Укажите диапазон углов нагрузки соответствующий устойчивой работе синхронной машины с возбуждённым ротором.
- 3. Как можно воздействовать на величину максимального момента синхронной машины?
- 4. Что представляет собой механическая характеристика синхронной машины и как она связана с угловой характеристикой?
- 5. Каким должен быть нагрузочный момент синхронного двигателя, чтобы исключить выход из синхронизма?
- 6. Почему синхронный двигатель менее чувствителен к колебаниям напряжения сети?

11.5. Пуск синхронного двигателя

Невозможность запуска синхронного двигателя собственным вращающим моментом объясняется тем, что в асинхронном режиме, т.е. когда ротор и магнитное поле статора вращаются с разными скоростями, вращающий момент двигателя является синусоидальной функцией времени $\vartheta = s\omega_1 t \Rightarrow M = M_{\max} \sin(s\omega_1 t)$. За время положительной полуволны двигатель создаёт момент, разгоняющий ротор, а за время отрицательной — равный ему тормозной момент. Поэтому, если момент инерции ротора и присоединённых к нему вращающихся масс не позволяет разогнать ротор до синхронной скорости в течение положительной полуволны вращающего момента, то пуск не произойдёт. Для создания условий синхронизации необходимо уве-



личить длительность положительной полуволны момента, чтобы ротор успел разогнаться и войти в синхронизм. Это можно сделать либо понизив частоту вращения магнитного поля ω_1 , либо разогнав ротор до скорости близкой к синхронной $(s \to 0)$. Первый вариант соответствует запуску двигателя при питании от преобразователя частоты, а второй — наиболее часто встречающемуся т.н. *асинхронному пуску*



Для асинхронного пуска в полюсные наконечники ротора (рис. 11.9, a) устанавливают короткозамкнутую обмотку (рис. 11.9, δ), аналогичную обмотке

асинхронного двигателя. При подключении статорной обмотки к сети двигатель разгоняется как асинхронный до скорости, отличающейся от синхронной на несколько процентов. После этого включается обмотка возбуждения и ротор входит в синхронизм. При синхронном вращении ток в короткозамкнутой обмотке равен нулю и она не оказывает никакого влияния на работу двигателя в статическом режиме. При изменении нагрузки двигателя короткозамкнутая обмотка создаёт момент, способствующий подавлению возникающих колебаний ротора.

Успешный асинхронный пуск возможен при выполнении определённых условий. Наличие тормозного момента на валу двигателя затрудняет пуск, т.к. при этом сокращается интервал времени, в течение которого двигатель разгоняет ротор, а также снижается амплитуда импульса момента, создающего ускорение. На рис. 11.10, а заштрихованная часть соответствует этому импульсу. Здесь хорошо видно, что увеличение момента нагрузки уменьшает энергию, сообщаемую ротору при разгоне.

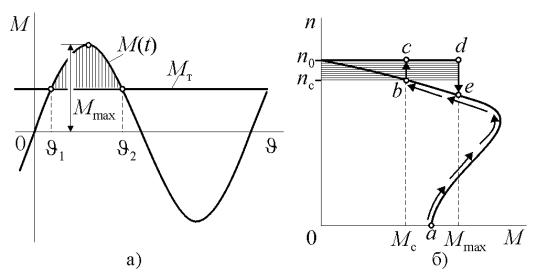


Рис. 11.10



Определить условие пуска можно из уравнения движения ротора

$$J\frac{d\Omega}{dt} = M_{\text{max}} \sin \vartheta - M_{\text{T}},$$

которое умножением на $d\vartheta$ преобразуется к виду

$$-J\frac{\omega_1^2}{2p}d(s^2) = (M_{\text{max}}\sin\vartheta - M_{\text{\tiny T}})d\vartheta.$$

Левая часть представляет собой энергию, передаваемую ротору при элементарном изменении скольжения ds, а правая — энергию передаваемую ротору синхронизирующим моментом $(M(t)-M_{_{\rm T}})$ при элементарном изменении угла нагрузки $d\vartheta$. Полагая, что энергия, переданная ротору в интервале изменения угла нагрузки от ϑ_1 до ϑ_2 в точности равна энергии, необходимой для его разгона от скольжения $s_{\rm c}$ до вхождения в синхронизм, проинтегрируем правую часть уравнения в пределах этих углов, а левую от $s_{\rm c}$ до нуля.

В результате интегрирования и преобразований решения получим условие вхождения двигателя в синхронизм

$$s_{c} \le 2\mu \frac{\omega_{0}}{\omega_{1}} \tag{11.10}$$

где $\mu = 1 - \frac{\pi m_{_{\rm T}} - m_{_{\rm T}}^2}{2}$; $m_{_{\rm T}} = M_{_{\rm T}}/M_{\rm max} < 1,0$ — относительное значение тормозного момента; $\omega_0 = \sqrt{p M_{_{\rm max}}/J}$ — угловая частота собственных колебаний ротора, т.е. частота свободных колебаний ротора при выводе его из положения равновесия; ω_1 — угловая частота питающей сети.

Из выражения (11.10) следует, что синхронный двигатель может самостоятельно войти в синхронизм, если $s_{\rm c} \ge 1,0 \implies \omega_1 < 2\mu\omega_0$. При пуске на холостом ходу (μ = 1) условие самозапуска принимает вид $\omega_1 < 2\omega_0$.

В процессе пуска рабочая точка на кривой асинхронного момента пусковой короткозамкнутой обмотки по мере разгона перемещается от a к b (рис. 11.10, δ). Точка b находится на границе области синхронизации $n_{\rm c}=(1-s_{\rm c})n_0$ и здесь происходит быстрый, менее чем за $t_{\rm c} \leq (\pi-2\arcsin m_{_{\rm T}})/(2\mu\omega_0)$, переход в синхронный режим (точка c рис. 11.10, δ). Если тормозной момент $M_{_{\rm T}}$ будет больше асинхронного момента на границе области синхронизации $M_{_{\rm C}}$, то вхождение в синхронизм не произойдет, и двигатель будет вращаться на подсинхронной скорости. В асинхронный режим двигатель перейдёт также при увеличении тормозного момента до значения $M_{_{\rm T}} \geq M_{_{\rm max}}$ (точка d рис. 11.10, δ).

Вопросы для самопроверки

1. Почему синхронный двигатель не может самостоятельно прийти в движение?



- 2. Что такое асинхронный пуск синхронного двигателя?
- 3. От чего зависит условие вхождения двигателя в синхронизм?
- 4. Как влияет нагрузка на валу двигателя на условие синхронизации?
- 5. С помощью чего реализуется асинхронный пуск двигателя?

11.6. Регулирование коэффициента мощности

Синхронные машины с электромагнитным возбуждением обладают очень важным для электроэнергетики свойством — они позволяют регулировать реактивную мощность.

Из выражения (11.8) и последующих рассуждений следует, что при постоянной механической нагрузке на валу ($P_{\scriptscriptstyle \rm M}={\rm const}$) потребляемая машиной активная мощность остаётся постоянной

$$P_1 = mU_1I_1\cos\varphi = \frac{mE_0U_1}{X_c}\sin\vartheta \approx P_{\rm M} = \text{const}.$$

Это означает, что при постоянном напряжении питания U_1 независимо от величины E_0 постоянной будет активная составляющая тока статора $I_{1a}=I_1\cos\phi=\mathrm{const}$, а также проекция вектора противо-ЭДС \underline{E}_0 на ось ортогональную вектору напряжения $E_0\sin\vartheta=\mathrm{const}$.

Построим векторную диаграмму для режима двигателя, совместив вектор напряжения статора \underline{U}_1 с мнимой осью (рис. 11.11, a). При изменении тока возбуждения изменяется модуль вектора \underline{E}_0 , а т.к. величина $E_0 \sin \vartheta = \mathrm{const}$ является проекцией вектора \underline{E}_0 на вещественную ось, то при изменении модуля конец этого вектора скользит по прямой ab, параллельной мнимой оси и отстоящей от неё на величину $E_0 \sin \vartheta$. Сумма векторов \underline{E}_0 и $jX_c\underline{I}_1$ должна быть равна неизменному вектору \underline{U}_1 . Поэтому при изменении положения вектора \underline{E}_0 изменяется также положение вектора падения напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении $jX_c\underline{I}_1$, а значит, и положение ортогонального ему вектора тока статора \underline{I}_1 . Но при этом активная составляющая тока \underline{I}_1 остаётся постоянной. В результате, при изменении ЭДС \underline{E}_0 конец вектора тока скользит по прямой cd, параллельной вещественной оси и отстоящей от неё на величину $I_1 \cos \varphi$.

При малой величине тока возбуждения (недовозбуждение) угол нагрузки 9' большой и ток статора отстаёт по фазе от напряжения ($\phi' > 0$), а двигатель потребляет из сети индуктивный ток. В режиме перевозбуждения величина ЭДС E_0'' большая, что вызывает смещение вектора тока статора \underline{I}_1'' во второй квадрант ($\phi'' < 0$). При этом двигатель потребляет ёмкостный ток или, что то же самое, отдаёт в сеть индуктивный ток, т.е. является источником индуктивного тока и может компенсировать его потребление другими двигателями и установками, подключёнными к той же сети. Тем самым улучшается коэф-



фициент мощности сети и снижается нагрузка на линии передачи электроэнергии, т.к. необходимую реактивную мощность её потребители получают от локального источника.

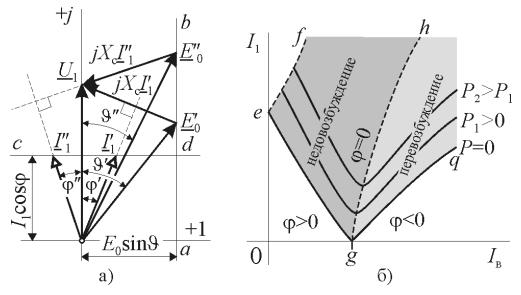


Рис. 11.11

Взаимосвязь токов возбуждения и статора физически объясняется тем, что результирующий магнитный поток в машине, создаваемый МДС обмоток возбуждения и статора, при постоянном напряжении и частоте питания остаётся практически постоянным. Постоянной должна быть и результирующая МДС, создающая этот поток. Поэтому, если МДС обмотки возбуждения недостаточна, то это компенсируется МДС обмотки статора, т.е. потреблением индуктивного тока. При перевозбуждении МДС статора должна снизить магнитный поток, т.е. размагнитить машину, что достигается потреблением из сети ёмкостного тока. В том случае, когда весь магнитный поток машины возбуждается обмоткой ротора реактивная составляющая тока статора равна нулю и машина работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 1$.

Зависимость величины тока статора от тока возбуждения $I_1 = f(I_{\rm B})$ при номинальном напряжении питания и постоянной мощности по внешнему сходству называется U—образной характеристикой. Её минимум определяется мощностью нагрузки на валу двигателя, при которой построена характеристика, и соответствует чисто активному току статора (рис. 11.11, δ). Левые части кривых соответствуют недовозбуждённому состоянию и потреблению из сети индуктивного тока, а правые — перевозбуждённому состоянию и отдаче в сеть индуктивного тока. Границей между областями недовозбуждения и перевозбуждения является линия геометрического места точек минимумов тока статора gh.

Линия ef ограничивает область, в которой двигатель не развивает достаточного вращающего момента, теряет устойчивость и выходит из синхронизма.



Обычно синхронные двигатели работают с небольшим перевозбуждением, однако их нельзя сильно загружать реактивным током, т.к. при этом должна быть уменьшена активная составляющая, т.е. нагрузка на валу. Для регулирования реактивной мощности используют специальные двигатели, которые работают на холостом ходу и загружены практически только реактивным током. Они называются синхронными компенсаторами и имеют облегчённую конструкцию, поскольку эксплуатируются без механической нагрузки. Как правило, синхронные компенсаторы работают в режиме перевозбуждения, но в ночные часы при недогрузке сети и повышении в ней напряжения их переводят в режим недовозбуждения для загрузки сети индуктивным током и снижения напряжения.

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем объясняется взаимосвязь токов возбуждения и статора синхронной машины?
- 2. Почему при номинальном токе возбуждения ток статора минимален?
- 3. Каков характер реактивного тока, потребляемого синхронный двигатель из сети при недовозбуждении (перевозбуждении)?
- 4. Почему изменяется ток статора при изменении нагрузки синхронного двигателя при номинальном токе возбуждения?
- 5. Почему синхронный компенсатор работает на холостом ходу?
- 6. Чем определяется минимальное значение тока статора синхронного двигателя?
- 7. За счёт чего снижается нагрузка линии передачи электроэнергии при использовании синхронных компенсаторов?

11.7. Синхронные двигатели автоматических устройств

Синхронные двигатели, предназначенные для работы в системах автоматики и приборного привода, обычно имеют небольшую мощность и их называют микродвигатели. Поэтому вопросы энергетики для них не столь существенны, как управляемость, быстродействие, надёжность и т.п. Главной особенностью синхронных микродвигателей является постоянство скорости вращения. Она не зависит от колебаний напряжения питания и нагрузки, поэтому с их помощью можно создавать очень простые системы с нулевой ошибкой поддержания скорости вращения в статическом режиме.

В зависимости от конструкции ротора синхронные микродвигатели можно разделить на двигатели: 1) с электромагнитным возбуждением; 2) с магнитоэлектрическим возбуждением или с постоянными магнитами; 3) реактивные и 4) гистерезисные.

Двигатели с электромагнитным возбуждением из-за сложности конструкции ротора, необходимости источника питания постоянного тока и проблемы пуска применяются крайне редко.



Кроме двигателей непрерывного вращения в системах автоматики применяются также импульсные или шаговые двигатели.

11.7.1. Реактивные двигатели

Отличительной особенностью реактивных двигателей является отсутствие у ротора собственного магнитного поля. Основной магнитный поток возбуждается в них за счёт МДС статора и представляет собой поток реакции якоря. Отсюда название двигателя — реактивный.

Ротор реактивного двигателя представляет собой цилиндр, в котором тем или иным способом создаётся магнитная асимметрия. На рис. 11.12, a показан пакет сердечника ротора, у которого асимметрия создана за счёт двух граней на наружной поверхности. При установке в статор воздушный зазор в направлении оси q, называемой поперечной осью, будет существенно больше, чем в направлении продольной оси d. Соответственно, индуктивное

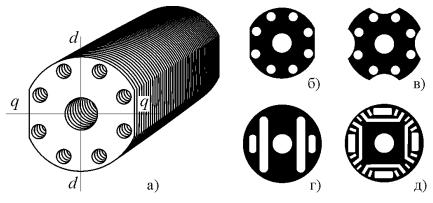


Рис. 11.12

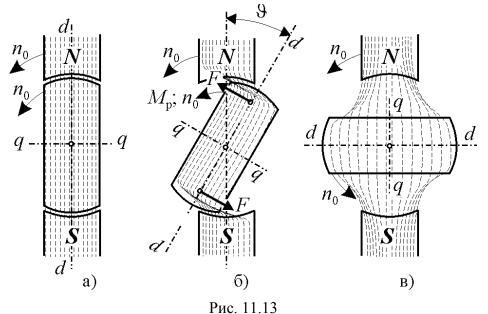
сопротивление по поперечной оси X_q будет существенно меньше, чем по продольной — X_d .

На рис. 11.12, в показан лист пакета ротора для двигателя с двумя парами полюсов магнитного поля. Кроме роторов

явнополюсной конструкции в реактивных двигателях используют неявнополюсные роторы (рис. 11.12, ε и ∂). В них магнитная асимметрия пакета ротора создаётся каналами пусковой короткозамкнутой обмотки, которые после сборки ротора заливаются алюминием.

Вращающий момент в реактивных двигателях возникает вследствие того, что ротор стремится занять в магнитном поле положение, при котором сопротивление магнитному потоку и энергия магнитного поля минимальны. Такое положение соответствует совпадению продольной оси ротора d с осью магнитного поля (рис. 11.13, a). При появлении тормозного момента ротор смещается на угол θ и магнитное сопротивление воздушного зазора увеличивается, в результате возникает сила F, стремящаяся привести его в исходное положение (рис. 11.13, θ). В случае поворота ротора на θ 0° (рис. 11.13, θ) все силы, действующие на ротор, уравновешены, но зазор и его сопротивление максимальны, поэтому при малейшем отклонении ротор разворачивается в ту или другую сторону, занимая энергетически более выгодное положение. При цилиндрическом изотропном роторе его смещение в магнитном поле не изменяет величины магнитного сопротивления и не вызывает появления силы противодействующей смещению. Таким образом, наличие магнитной асимпротиводействующей смещению. Таким образом, наличие магнитной асимпротиводействующей смещению.





метрии ротора является необходимым условием возникновения реактивного вращающего момента. Причём реактивный MOмент возникает всегда и во всех электрических машинах вне зависимости от их типа, если ротор имеет магнитную

асимметрию.

Величина реактивного вращающего момента определяется выражением

$$M_{\rm p} = \frac{m_{\rm l}U_{\rm l}^2}{2\omega_{\rm l}} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \sin 2\vartheta = M_{\rm pmax} \sin 2\vartheta.$$
 (11.11)

Из (11.11) следует, что максимальный момент реактивного двигателя также сильно зависит от величины напряжения питания, как момент асинхронного двигателя. Кроме того, максимальный момент зависит от соотношения индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной оси. Теоретически максимальный момент можно увеличить, уменьшая индуктивное сопротивление по поперечной оси X_q , т.е. уменьшая размер пакета ротора в этом направлении. На самом деле при этом будет увеличиваться средняя величина зазора и, соответственно, реактивный ток статора, ухудшая и без того невысокие энергетические параметры двигателя. Поэтому существует некоторое оптимальное соотношение параметров $X_d/X_q=2...5$.

Мощность на валу и максимальный момент реактивного двигателя существенно меньше, чем у двигателя с возбуждёнными полюсами ротора при тех же габаритах и потребляемой мощности.

Угловая и механическая характеристики реактивного двигателя ничем в принципе не отличаются от характеристик синхронного двигателя с возбуждённым ротором, за исключением того, что его угловая характеристика является синусоидальной функцией двойного угла, т.е. максимальные значения вращающего момента соответствуют углам $\pm 45^{\circ}$.

Ротор реактивного двигателя также прост и надёжен как ротор асинхронного двигателя. Поэтому реактивные двигатели широко применяются в приборном приводе, в аппаратуре звуко- и видеозаписи и в других устройствах, где требуется высокая стабильность скорости вращения.

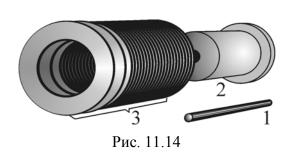


Вопросы для самопроверки

- 1. В чем преимущество синхронных исполнительных двигателей перед двигателями других типов?
- 2. Как работает реактивный двигатель?
- 3. Какое условие необходимо для возникновения реактивного момента?
- 4. Какие конструкции ротора бывают у реактивных двигателей?
- 5. Чем отличаются угловые характеристики реактивного двигателя и двигателя с возбуждённым ротором?
- 6. Укажите достоинства, недостатки и область применения реактивных двигателей.

11.7.2. Гистерезисные двигатели

Название этого типа синхронных двигателей происходит от принципа создания в них вращающего момента в асинхронном режиме, связанного с явлением гистерезиса при перемагничивании ферромагнетиков.



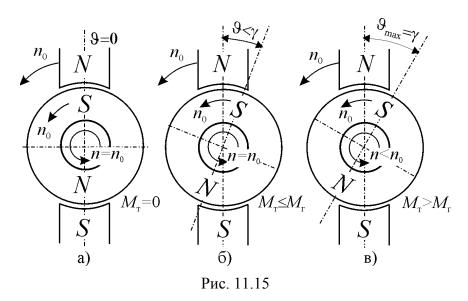
Детали конструкции ротора гистерезисного двигателя показаны на рис. 11.14. На вал ротора *I* напрессовывается втулка из магнитного или немагнитного материала 2, на которой закрепляется пакет колец из магнитотвёрдого материала 3. Кольца ротора образуют т.н. *активный* слой, в котором происходят основные

процессы, обеспечивающие работу двигателя.

В отличие от синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе, которые намагничиваются в специальных установках и при работе сохраняют положение оси магнитных полюсов, активный слой ротора гистерезисного двигателя намагничивается обмоткой статора и может изменять положение полюсов, т.е. перемагничиваться в процессе работы.

Пусть активный слой намагничен и ротор вращается синхронного с магнитным полем статора $n=n_0$ (рис. 11.15). Если на валу двигателя нет нагрузки, то оси магнитных полей статора и ротора совмещены и угол нагрузки $\vartheta=0$ (рис. 11.15, a). При возникновении тормозного момента $M_{_{\rm T}}$ угол нагрузки ϑ увеличивается, и двигатель развивает вращающий момент совершенного аналогично тому, как это происходит в машине с возбуждёнными полюсами ротора. При этом полюсы магнитного поля ротора остаются по отношению к активному слою в том же положении, в котором они находились при отсутствии нагрузки (рис. 11.15, δ). Если и дальше увеличивать тормозной момент, то полюсы полей статора и ротора разойдутся на некоторый угол $\vartheta_{\rm max} = \gamma$, при котором начнётся перемагничивание материала активного слоя, т.е. перемещение полюсов его магнитного поля. Ротор выйдет из





синхронизма и будет вращаться с некоторой скоростью $n < n_0$, а полюсы магнитного поля ротора будут скользить относительно активного слоя со скоростью

 $n_{\rm m} = n_0 - n$. Поля статора и ротора при этом будут оставаться неподвижными относительно

друг друга и смещёнными на угол нагрузки $\vartheta=\vartheta_{\max}=\gamma={\rm const}$. Поэтому двигатель будет развивать постоянный вращающий момент $M_{_\Gamma}={\rm const}$. В случае снижения тормозного момента до уровня $M_{_{\rm T}}< M_{_{\rm \Gamma}}$ ротор под действием разности моментов $M_{_{\rm \Gamma}}-M_{_{\rm T}}$ начнёт разгоняться. Скольжение полюсов относительно активного слоя будет уменьшаться и когда скорость вращения достигнет синхронной перемагничивание прекратится и полюсы останутся в том положении, в котором они находились в момент вхождения ротора в синхронизм.

Таким образом, работа гистерезисного двигателя в синхронном и в асинхронном режимах отличается принципиально. В синхронном режиме активный слой не перемагничивается и можно считать, что двигатель работает аналогично двигателю с постоянными магнитами, хотя это допустимо только с оговорками, т.к. его индуктивные сопротивления зависят от угла нагрузки 9. Соответственно выглядят угловая и механическая характеристики двига-

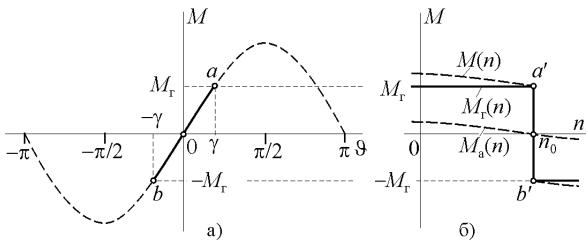


Рис. 11.16



теля в пределах $|\vartheta| < \gamma$ (участки ab и a'b' на рис. 11.16)

При переходе в асинхронный режим начинается перемагничивание активного слоя. На угловой характеристике это состояние соответствует постоянному значению угла нагрузки $\vartheta=\vartheta_{\max}=\gamma={\rm const}$, а на механической — независимому от скорости вращения значению моменту $M_{_{\Gamma}}(n)=M_{_{\Gamma}}\cdot{\rm sign}(n_0-n)=\pm{\rm const}$. Следовательно, в отличие от всех остальных синхронных двигателей, гистерезисный двигатель обладает свойством самозапуска.

Величина гистерезисного момента $M_{_\Gamma}$ определяется величиной угла γ , который, в свою очередь, зависит от свойств материала активного слоя ротора. Чем шире петля гистерезиса материала, тем больше значение угла γ и тем больше момент, который способен развивать двигатель. Чаще всего в современных гистерезисных двигателях для активного слоя ротора используют викаллой — сплав железа, кобальта и ванадия. Для него угол γ составляет $30...40^\circ$

Кроме гистерезисного момента в асинхронном режиме возникает также вращающий момент, вызванный вихревыми токами в активном слое и во втулке, если она выполнена из материала проводящего электрический ток. Удельное электрическое сопротивление материала активного слоя ротора велико, поэтому механическая характеристика момента вихревых токов ($M_a(n)$) на рис. 11.16, δ) совершенно идентична характеристике асинхронного двигателя с большим значением сопротивления ротора, когда критическое скольжение существенно больше единицы. Складываясь с гистерезисным моментом $M_{\Gamma}(n)$, момент вихревых токов несколько увеличивает пусковой момент двигателя.

Достоинствами гистерезисных двигателей являются: 1) способность самозапуска с большим пусковым моментом; 2) бесшумность и надёжность в работе; 3) плавность входа в синхронизм; 4) малая кратность пускового тока ($I_{\Pi}/I_{\text{ном}}=1,2...1,3$); 5) сравнительно высокий КПД.

Основными недостатками двигателя являются склонность к колебаниям ротора при изменении нагрузки и высокая стоимость, связанная со сложностью изготовления ротора.

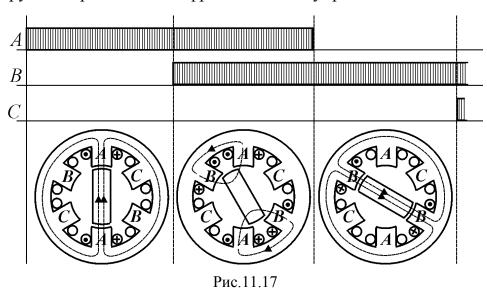
Вопросы для самопроверки

- 1. Как устроен ротор гистерезисного двигателя?
- 2. Как работает активный слой ротора в синхронном (асинхронном) режиме?
- 3. Чем объясняется независимость гистерезисного момента от скольжения?
- 4. Чем определяется величина гистерезисного момента?
- 5. Укажите достоинства, недостатки и область применения гистерезисных двигателей.



11.7.3. Шаговые двигатели

Шаговые или импульсные синхронные двигатели в последние десятилетия получили очень широкое распространение в связи с развитием средств вычислительной техники. Это связано с тем, что для управления шаговым двигателем требуется определенная последовательность импульсов или комбинаций сигналов постоянного тока, легко формируемых компьютерами и другими средствами цифровых систем управления.



В принлюбой ципе многофазный синхронный двигатель может работать в шаговом жиме, если его подключить к источнику постоянного тока через полупроводниковый коммута-

тор. На рис. 11.17 показан принцип формирования движения в трёхфазном реактивном шаговом двигателе. Заштрихованная область на временных диаграммах соответствует подключению соответствующей обмотки к источнику питания. На первом интервале работы подключена обмотка фазы A и ротор занимает положение, соответствующее оси этой обмотки. На следующем интервале включается обмотка фазы B и сохраняется подключение обмотки A. В результате ось магнитного поля двигателя располагается между осями обмоток, и ротор поворачивается на 30° . Затем отключается фаза A и ротор смещается в положение оси обмотки B. Таким образом, при переключении обмоток по алгоритму $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \rightarrow ...$ ротор при каждой новой комбинации будет смещаться на 30° . Если исключить состояния одновременного включения двух обмоток, то шаг двигателя будет составлять 60° .

Ротор шагового двигателя может быть активным, и в этом случае он чаще всего возбуждается постоянными магнитами. Такие двигатели обладают большим вращающим моментом и могут обеспечить фиксацию положения ротора при отключении питания обмоток.

Изменяя частоту коммутации можно менять среднее значение скорости вращения шагового двигателя. Если же прервать алгоритм, то ротор будет остановлен в соответствующем положении.



Одним из важнейших достоинств шагового двигателя является то, что в нём угловое положение ротора определяется кодовой комбинацией, соответствующей включённым обмоткам. Однако при коммутации шаг может быть

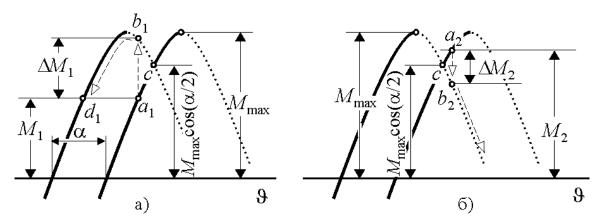


Рис. 11.18

неправильно отработан и произойдёт потеря информации. На рис. 11.18, а показана рабочая точка a_1 на угловой характеристике шагового двигателя, соответствующая моменту нагрузки M_1 . При следующей коммутации магнитное поле статора очень быстро сместится на величину шага α. Ротор двигателя вследствие инерции в первый момент после коммутации останется в прежнем положении, поэтому смещение магнитного поля будет эквивалентно смещению угловой характеристики на угол а. Рабочая точка при этом окажется на новой характеристике в положении b_1 и возникнет положительное приращение вращающего момента действующего на ротор двигателя $\Delta M_1 = M(9) - M_1 > 0$. Под действием этого момента ротор придёт в движение в сторону смещения магнитного поля и переместится в точку d_1 , отстоящую от исходной точки a_1 на величину шага α . При моменте нагрузки M_2 (рис. 11.18, δ) рабочей точкой до коммутации будет точка a_2 , а после коммутации произойдёт переход на новую угловую характеристику в точку b_2 . Приращение момента действующего на вал двигателя при этом будет отрицательным $\Delta M_2 = M(\vartheta) - M_2 < 0$. Поэтому ротор будет двигаться в направлении противоположном смещению магнитного поля и развернётся на угол $2\pi - \alpha$, т.е. произойдёт потеря шага. Из рисунка видно, что знак приращения момента после коммутации, т.е. направление движения ротора, определяется ординатой точки c, в которой пересекаются угловые характеристики соседних шагов. Для работы двигателя без потери шага нужно, чтобы нагрузочный момент на валу не превышал ординаты этой точки, т.е.

$$M < M_{\text{max}} \cos(\alpha/2)$$
.

Достоинствами шаговых двигателей являются: 1) возможность регулирования скорости вращения в широком диапазоне вплоть до полной остановки и фиксации ротора в этом положении; 2) возможность перемещения в уг-



ловое положение, задаваемое кодовой комбинацией, что позволяет управлять движением с помощью устройств с цифровой обработкой информации; 3) возможность отработки малых шагов, составляющих угол в несколько десятков угловых секунд.

Вопросы для самопроверки

- 1. Как работает шаговый двигатель?
- 2. Чем определяется величина шага?
- 3. Какие конструкции ротора бывают у шаговых двигателей?
- 4. Каково условие работы двигателя без потери шага?
- 5. Укажите достоинства, недостатки и область применения шаговых двигателей.

12. Двигатели постоянного тока

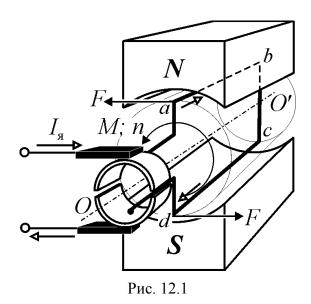
Двигатели постоянного тока исторически были первыми устройствами, преобразующими электрическую энергию в механическую. Сто семьдесят лет тому назад по Неве уже плавала лодка, приводимая в движение таким двигателем. Позднее они уступили свои позиции бесколлекторным двигателям, но в регулируемом приборном приводе и в системах автоматики до настоящего времени часто не существует альтернативы их применению. Это объясняется широким диапазоном и плавностью регулирования скорости вращения, а также более простыми методами и устройствами управления.

Кроме двигателей широко распространены также генераторы постоянного тока. Однако область их применения сокращается в связи с развитием преобразовательной техники и выбор генератора постоянного тока в качестве источника питания производится обычно с учётом множества факторов, исключающих иное решение. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать в основном двигательный режим работы машин постоянного тока.

12.1. Устройство и принцип действия

Машина постоянного тока функционально является обращённой синхронной машиной, т.е. синхронной машиной у которой функции статора и ротора поменялись местами. Статор возбуждает постоянное магнитное поле, а ротор вращается в этом поле и осуществляет преобразование энергии. Для создания машиной постоянного вращающего момента требуется, чтобы электромагнитная сила, создающая этот момент, была постоянной, что, в свою очередь, требует сохранения направления протекания тока по отношению к полюсам магнитного поля. Во вращающемся роторе функцию изменения направления тока при перемещении проводников обмотки к противоположному полюсу выполняет *щёточно-коллекторный узел*. На рис. 12.1 показан простейший двигатель постоянного тока. Он представляет собой проводник, изогнутый в виде рамки и подвешенный на оси OO'. Концы рамки abcd через полукольца и скользящие по ним щётки подключены к внешнему источнику постоянного тока. Взаимодействие протекающего в рамке тока $I_{\rm g}$ с магнит-





ным полем создаёт электромагнитную силу F, действующую на рамку и вызывающую её вращение. Для сохранения направления действия этой силы ток в части рамки находящейся под северным полюсом должен протекать в направлении O-O', а в находящейся под южным полюсом части рамки – в направлении O'-O. Поэтому через каждые оборота ротора ток в сторонах *ab* и *cd* рамки должен менять направление на противоположное. Это происходит при переходе полуколец с одной щётки на другую. Полукольца рамки являются

простейшим коллектором машины постоянного тока и вместе со щётками выполняют функцию преобразования постоянного тока в переменный с частотой вращения ротора.

Ротор машины постоянного тока называется *якорем*. Его конструкция является развитием рамки и полуколец. Чтобы увеличить вращающий момент нужно увеличить количество «рамок» и заполнить

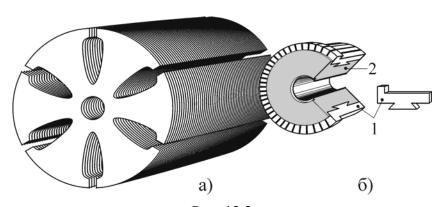


Рис. 12.2

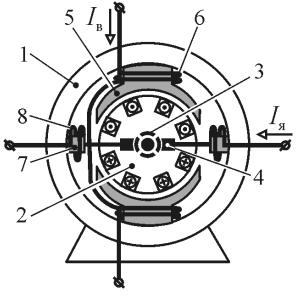
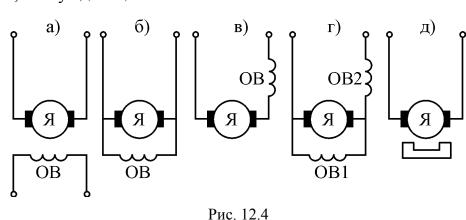


Рис. 12.3

ферромагнетиком воздушный промежуток между полюсами статора. Для этого из штампованных листов электротехнической стали собирается пакет якоря (рис. 12.2, а). Полукольца примитивного коллектора преобразуются в набор изолированных друг от друга медных пластин 1 залитых в пластмассовую втулку 2 (рис. 12.2, б). Пакет ротора и коллектор напрессовываются на вал якоря и в открытые пазы пакета укладывается обмотка (на рисунке не показана), концы секций (катушек) которой припаиваются к пластинам коллектора.



Общая конструктивная схема машины постоянного тока показана на рис. 12.3. Она состоит из корпуса 1, объединяющего все элементы конструкции и являющегося также магнитопроводом. В подшипниках корпуса установлен якорь машины 2 и щёточно-коллекторный узел 3, 4. В корпусе также установлены главные полюсы 5, распределяющие основной магнитный поток машины, возбуждаемый установленной на полюсах обмоткой 6. На геометрической оси щёток машины установлены дополнительные полюсы 7 с обмоткой 8, возбуждающей их магнитное поле.



Обмотка возбуждения машины 6 и обмотка якоря с последовательно включённой моткой дополнительных полюсов образуют две электрические

которые цепи,

могут питаться от одного или от разных источников постоянного тока. По схеме питания этих цепей машины постоянного тока разделяют на машины с независимым (раздельным), параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 12.4, a, δ , θ и ε). К машинам с независимым возбуждениям относятся также машины с магнитоэлектрическим возбуждением, т.е. с возбуждением основного магнитного потока с помощью постоянных магнитов (рис. 12.4, ∂).

Вопросы для самопроверки

- Какую функцию выполняет коллектор двигателя? 1.
- Какую функцию выполняет корпус двигателя? 2.
- Для чего нужно изменять направление протекания тока в секциях 3. обмотки якоря?
- Как разделяют двигатели постоянного тока по схеме питания об-4. мотки возбуждения?
- 5. Перечислите основные элементы конструкции двигателя.

12.2. Магнитная и электрическая цепи машины

Магнитная цепь главных полюсов машины предназначена для возбуждения и распределения основного магнитного потока. Она состоит из главных полюсов 1, воздушного зазора между полюсами и якорем 2, сердечника якоря 3 и корпуса машины или ярма 4 (рис. 12.5, a).

Ось симметрии ра между главными полюсами машины называется геометрической нейтралью, а дуга окружности воздушного зазора между точками её пересечения с нейтралью – полюсным делением τ (рис. 12.5). Полюсное



деление в зависимости от решаемой задачи может измеряться в угловых или линейных единицах, а также числом пазов пакета статора или ротора.

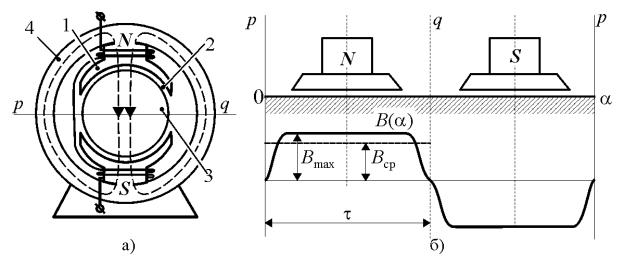


Рис. 12.5

На рис. 12.5, б показана линейная развёртка воздушного зазора и зависимость распределения индукции в нём. В машинах постоянного тока стремятся получить практически постоянное значение индукции под полюсами, что достигается специальной формой полюсных наконечников. Это необходимо для того, чтобы во всех секциях обмотки якоря при вращении наводились одинаковые ЭДС.

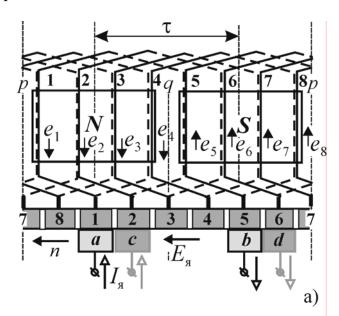
При рассмотрении принципа работы машины постоянного тока отмечалось, что обмотка якоря состоит из секций. Каждая секция укладывается в пазы пакета якоря так, чтобы её стороны находились под соседними полюсами. В качестве примера на рис. 12.6, a показана схема обмотки. Номерами с l по δ на рисунке обозначены пазы якоря и пластины коллектора. Шаг секций обмотки по пазам равен полюсному делению $\tau = 4$. В каждом пазу уложено начало одной секции (сплошная линия) и конец другой (штриховая линия) и к каждой пластине коллектора присоединены начала и концы следующих по схеме секций обмотки. Так в первом пазу под северным полюсом находится начало первой секции, а конец её расположен в пятом пазу под южным полюсом. Начало первой секции присоединено к первой пластине коллектора, а конец — ко второй. К этой же пластине присоединено начало следующей по схеме второй секции и т.д. В результате образуется замкнутая в кольцо последовательная электрическая цепь, состоящая из одинаковых элементов (секций).

Щётки машины в норме расположены на геометрической нейтрали. Они создают узлы соединения и делят последовательную кольцевую цепь обмотки на две *параллельные ветви* (рис. 12.6, δ), по каждой из которых протекает половина тока якоря $I_{\rm g}$.

При вращении якоря проводники секций обмотки пересекают линии магнитного поля и в них наводятся ЭДС, по форме повторяющие кривую ин-



дукции $B(\alpha)$ рис. 12.5, δ . Начала секций I-4 находятся под северным полюсом поля, а секций 5-8 — под южным, поэтому в этих группах секций наводятся ЭДС противоположных знаков. Но группы секций I-4 и 5-8 находятся в разных ветвях, поэтому по отношению к щёткам или, что то же самое, по отношению к внешней цепи их ЭДС имеют одинаковое направление и в сумме одинаковые значения. В результате образуется ЭДС якоря $E_{\rm g}$, направленная встречно по отношению к напряжению источника питания цепи якоря и ограничивающая его ток.



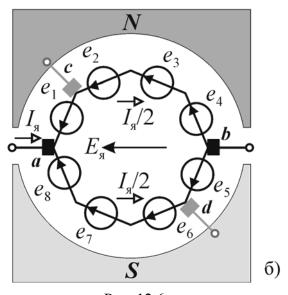


Рис. 12.6

Смещение щёток с геометрической нейтрали приводит к тому, что расположенные под разноимёнными полюсами секции оказываются в одной параллельной ветви. Например, смещение щёток из положения ав на рис. 12.6 в положение са приведёт к тому, что первая и пятая секции окажутся в ветвях с противоположным направлением ЭДС. В результате суммарная ЭДС якоря уменьшится вдвое, т.к. ЭДС секций приблизительно одинаковы и до смещения противо-ЭДС была

равна
$$E_{\mathfrak{g}} = \sum_{k=1}^{4} e_k = \sum_{k=5}^{8} e_k \approx 4e$$
, тогда

как после смещения

$$E_{\mathfrak{g}} = \sum_{k=2}^{4} e_k - e_5 = \sum_{k=6}^{8} e_k - e_1 \approx 2e$$
. Ta-

ким образом, расположение щёток на геометрической нейтрали обеспечивает получение максимально возможной противо-ЭДС якоря.

Вращение якоря не меняет общую картину распределения ЭДС в обмотке, т.к. секции просто переходят из одной ветви в

другую с сохранением суммарного значения.

Определим значение противо-ЭДС якоря. По закону электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в проводнике длиной l, движущемся со скоростью v в однородном магнитном поле, равна e = Blv. Пусть число проводников в



обмотке якоря равно N. Тогда с учётом деления их на a параллельных ветвей $E_{\rm я}=e\frac{N}{2a}=Blv\frac{N}{2a}$. Полагая величину индукции в воздушном зазоре машины

B равной среднему значению $B_{\rm cp}=\frac{\Phi}{\tau l}$ (рис. 12.4, δ) и с учётом того, что $v=\pi Dn/60$ и $\tau=\pi D/(2p)$, где D — диаметр якоря; n — скорость вращения в об/мин, получим

$$E_{\rm g} = C_E n\Phi \,, \tag{12.1}$$

где $C_E = \frac{pN}{60a}$ — конструктивная постоянная ЭДС; Ф — магнитный поток в зазоре машины.

При использовании системы единиц СИ частота вращения якоря равна $\Omega = n \frac{2\pi}{60} \, , \, \text{тогда противо-ЭДС}$

$$E_{\rm g} = C\Omega\Phi = \Omega\Psi, \qquad (12.2)$$

где $C = \frac{pN}{2\pi a}$ — конструктивная постоянная; $\Psi = C\Phi$ — потокосцепление якоря.

Для электрической цепи якоря, подключённого к источнику питания постоянного тока с напряжением $U_{\rm s}$, можно составить уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U_{\mathfrak{g}} = RI_{\mathfrak{g}} + E_{\mathfrak{g}}, \tag{12.3}$$

Отсюда ток якоря

$$I_{g} = (U_{g} - E_{g})/R$$
. (12.4)

Из выражений (12.2) и (12.4) следует, что при изменении скорости вращения ток якоря изменяется по величине и по направлению, т.к. от скорости линейно зависит противо-ЭДС $E_{\rm g}$. Изменение направления протекания тока в якоре соответствует изменению знака мощности, потребляемой им от источника питания, т.е. изменению режима работы машины. При положительном значении тока ($U_{\rm g} > E_{\rm g}$) машина работает в режиме двигателя или тормоза и потребляет электрическую энергию от источника, а при отрицательном ($U_{\rm g} < E_{\rm g}$) — отдаёт её в источник.

Условие $I_{\rm g}=0 \Rightarrow U_{\rm g}=E_{\rm g}=C_E n_0 \Phi$ соответствует режиму идеального холостого хода машины. Отсюда скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U_{\text{g}}}{C_{\text{p}}\Phi}; \quad \Omega_0 = \frac{U_{\text{g}}}{\Psi}. \tag{12.5}$$

12.3. Электромагнитный момент машины

Вращающий момент, развиваемый машиной, можно получить из выражения для электромагнитной силы f, действующей на находящийся в одно-



родном магнитном поле проводник длиной l, по которому протекает ток i-f=Bli. Пользуясь рассуждениями и выражениями, использованными выше при определении противо-ЭДС, получим

$$M = CI_{\mathfrak{g}}\Phi = I_{\mathfrak{g}}\Psi. \tag{12.6}$$

Вопросы для самопроверки

- 1. Перечислите основные участки магнитной цепи
- 2. Что такое геометрическая нейтраль?
- 3. Что такое полюсное деление?
- 4. Как распределяется индукция в зазоре и почему?
- 5. Какую электрическую цепь образуют секции обмотки якоря?
- 6. Как образуются параллельные ветви обмотки якоря?
- 7. Как влияет смещение щёток с геометрической нейтрали на ЭДС, наводимую в якоре магнитным полем главных полюсов?
- 8. Как влияет скорость вращения на величину тока якоря и почему?
- 9. Почему ЭДС, наводимая в якоре магнитным полем главных полюсов, называется противо-ЭДС?
- 10. Какие величины определяют величину скорости идеального холостого хода?
- 11. Какие величины определяют величину электромагнитного момента?

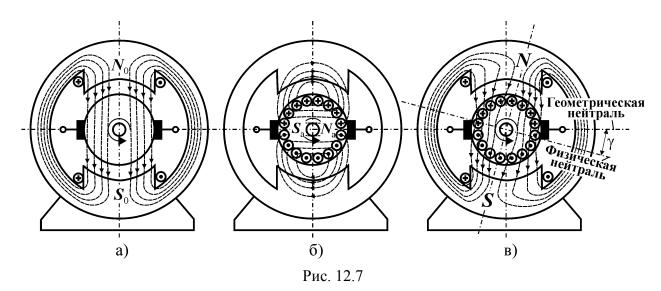
12.4. Реакция якоря

Под реакцией якоря в машинах постоянного тока понимают воздействие магнитного поля, возбуждаемого током якоря, на поле главных полюсов. При разомкнутой цепи якоря в машине существует только симметричное однородное поле главных полюсов (рис. 12.7, a). При протекании тока в обмотке якоря возникает неподвижное в пространстве магнитное поле, ось которого совпадает с осью щёток (рис. 12.7, δ). Складываясь, эти два поля образуют результирующее магнитное поле машины. Нейтральная линия или физическая нейтраль результирующего поля, т.е. линия, проходящая через точки с нулевым значением индукции в зазоре машины, оказывается развёрнутой на некоторый угол γ относительно геометрической нейтрали (рис. 12.7, ϵ).

При изменении режима работы машины изменяется направление протекания тока в якоре и, соответственно, меняются местами полюсы его магнитного поля. Поэтому смещение нейтрали в режиме генератора и в режиме двигателя имеет противоположное направление. В генераторном режиме нейтраль смещена в направлении вращения якоря, а в режиме двигателя — против направления вращения.

Вращение якоря не влияет на положение оси полюсов его магнитного поля. Однако при изменении нагрузки машины изменяется ток якоря и, соответственно, изменяется индукция магнитного поля реакции. Это, в свою очередь, приводит к изменению угла смещения γ .





Смещение нейтрали вызывает целый ряд отрицательных эффектов. В генераторном режиме работы машины это уменьшает ЭДС и, соответственно, выходное напряжение. В двигательном режиме часть проводников параллельной ветви оказывается под другим полюсом и создаёт тормозной момент. Смещение нейтрали создаёт также неравномерность распределения индукции на главных полюсах машины (рис. 12.7, в). Она увеличивается на одном краю полюса и уменьшается на другом, но вследствие насыщения возрастание потока на одном краю не компенсирует снижения на другом и в целом магнитный поток в машине уменьшается. Кроме того, смещение нейтрали существенно ухудшает условия протекания электромагнитных процессов, связанных с переключением секций из одной параллельной ветви в другую, которые мы будем рассматривать далее.

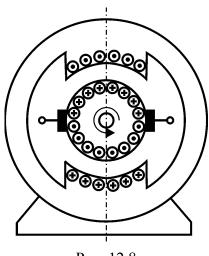


Рис. 12.8

Для уменьшения искажения кривой распределения индукции в зазоре в машинах средней и большой мощности используют компенсационную обмотку (рис. 12.8). Её устанавливают в пазы главных полюсов и включают последовательно в цепь якоря. Возбуждаемое обмоткой магнитное поле направлено встречно по отношению к полю реакции якоря и компенсирует его в зоне главных полюсов.

В зоне геометрической нейтрали поле реакции якоря компенсируют с помощью добавочных полюсов (рис. 12.3). Обмотку добавочных полюсов также как компенсационную обмотку включают последовательно в цепь якоря. Это обеспечивает

автоматическую коррекцию режима компенсации при изменении нагрузки машины, т.к. МДС всех трёх обмоток изменяются пропорционально.

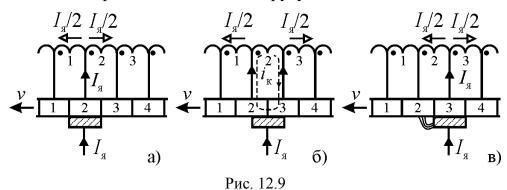


Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое реакция якоря?
- 2. Что такое физическая нейтраль?
- 3. Как влияет реакция якоря на магнитное поле машины?
- 4. Что происходит с физической нейтралью машины при изменении нагрузки?
- 5. Почему в генераторном и в двигательном режимах нейтраль смещается в противоположные стороны?
- 6. Перечислите явления, возникающие в машине в результате смещения нейтрали.
- 7. Что такое компенсационная обмотка? Её конструкция, схема включения и функции.
- 8. Что такое добавочные полюсы? Их конструкция, схема включения и функции.

12.5. Коммутация

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.



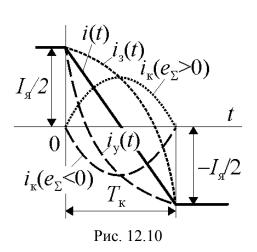
На рис. 12.9 показаны три стадии процесса коммутации в секции 2 обмотки якоря. В начале секция 2 находится в правой

ветви обмотки и по ней от начала к концу протекает ток $I_{\rm g}/2$. Затем щётка перемещается, замыкая 2-ю и 3-ю пластины коллектора (рис. 12.9, δ), и секция 2 оказывается замкнутой накоротко. Если щётки расположены на геометрической нейтрали, то проводники коммутируемой секции при движении пересекают линии магнитного поля реакции якоря и в них наводится ЭДС $e_v = B_a l v$, называемая ЭДС вращения. Здесь B_a — индукция поля реакции. Кроме того, в секции наводится ЭДС самоиндукции $e_L = -Ldi/dt$. Обе ЭДС создают в контуре секции ток коммутации $i_{\rm k}$, величина которого зависит от ЭДС и сопротивлений элементов контура.

Если ЭДС e_L и e_v направлены встречно, то возможно состояние, когда $e_\Sigma = e_L + e_v = 0 \Rightarrow i_\kappa = 0$. В этом случае ток в секции изменяется по линейному закону $i(t) = I_{\rm g} (1-2t/T_{\rm g})/2$, определяемому изменением сопротивления площади контакта щётки с пластинами коллектора 2 и 3. Такая коммутация



называется линейной или коммутацией сопротивлением. Она является оптимальной, т.к. при этом не возникает искрения (рис. 12.10).



В случае $e_{\Sigma} = e_L + e_{\nu} \neq 0$ ток i_{κ} накладывается на ток линейной коммутации i(t) и происходит замедленная $i_{3}(t) = i(t) + i_{\kappa}(e_{\Sigma} > 0)$ или ускоренная $i_{y}(t) = i(t) + i_{\kappa}(e_{\Sigma} < 0)$ коммутация. При замедленной коммутации $e_{L} > e_{\nu}$ и переход щётки на соседнюю пластину коллектора соответствует процессу размыкания цепи с активно-индуктивной нагрузкой. Поэтому под сбегающим краем щётки возникает искрение (рис. 12.9, e), которое приводит к

быстрому износу щёток и возникновению нагара на пластинах коллектора, увеличивающего переходное сопротивление скользящего контакта и вызывающего дополнительные потери.

Основным способом улучшения коммутации является установка дополнительных полюсов. Все машины постоянного тока мощностью более 1000 Вт снабжаются дополнительными полюсами. Параметрами обмотки и геометрическими размерами дополнительных полюсов можно компенсировать или даже несколько перекомпенсировать МДС реакции якоря, обеспечивая линейную или слабо ускоренную коммутацию. Это позволяет существенно увеличить нагрузку машины, т.е. снизить её удельную массу и габариты.

В машинах малой мощности дополнительные полюсы не устанавливают, а коммутацию оптимизируют смещением щёток за положение физической нейтрали. Настройку обычно производят в режиме номинальной нагрузки машины по минимуму наблюдаемого искрения. При этом в других режимах работы настройка нарушается, т.к. при изменении тока якоря положение физической нейтрали изменяется. Очевидно, что этот способ недопустим в машинах, работающих в режиме реверса, т.к. для одного из направлений вращения смещение щёток будет только ухудшать ситуацию

Щёточно-коллекторный узел машин постоянного тока является главным элементом конструкции, определяющим предельную мощность и скорость вращения. От его работы существенно зависят также надёжность и срок службы. Поэтому коллектор и щётки требуют тщательного контроля за их состоянием, а также проведения периодических профилактических мероприятий для исключения отказов в работе. Это усложняет и удорожает эксплуатацию и является одной из главных причин, по которым машины постоянного тока заменяют бесколлекторными машинами.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое коммутация?



- 2. Какие ЭДС наводятся в коммутируемой секции?
- 3. Какие стадии проходит коммутируемая секция?
- 4. Какой вид коммутации является оптимальным и почему?
- 5. При каких условиях коммутация происходит замедленно (ускоренно)?
- 6. Почему при замедленной коммутации возникает искрение под сбегающим краем щётки?
- 7. Как оптимизируют коммутацию в машинах малой мощности?
- 8. Почему невозможно оптимизировать коммутацию во всём диапазоне нагрузок машины путём смещения щёток?
- 9. Как оптимизируют коммутацию в машинах большой и средней мощности?
- 10. Почему с помощью дополнительных полюсов можно оптимизировать коммутацию практически во всём диапазоне нагрузок машины?

12.6. Энергетические соотношения машин постоянного тока

Характер потребляемой машиной мощности зависит от режима её работы. Для генератора — это механическая мощность $P_1 = M\Omega$; для двигателя — электрическая мощность $P_1 = UI$.

В машинах постоянного тока, также как и в других машинах, процесс преобразования энергии сопровождается её потерями. Обычно их разделяют на основные и дополнительные, включая в первую группу магнитные, электрические и механические потери, а во вторую – все остальные потери, трудно поддающиеся учёту.

Магнитные потери в машинах постоянного тока $\Delta P_{\rm c}$ связаны с перемагничиванием сердечника якоря и протеканием в нём вихревых токов. Их величина определяется скоростью вращения якоря. В конструктивных элементах статора машины, образующих магнитопровод, эти потери практически отсутствуют, т.к. магнитный поток в них постоянен.

Электрические потери происходят в цепях обмотки возбуждения и якоря машины. Потери в цепи возбуждения происходят в обмотке и в регуляторе (реостате), если он используется для управления, и выражаются через напряжение $U_{\rm B}$ и ток $I_{\rm B}$ источника питания этой цепи как $\Delta P_{\rm B} = U_{\rm B} I_{\rm B}$.

Потери в цепи якоря происходят в его обмотке и в щёточных контактах и определяются соответственно как $\Delta P_{\rm g} = R_{\Sigma} I_{\rm g}^2$; $\Delta P_{\rm iii} = \Delta U_{\rm iii} I_{\rm g}$, где R_{Σ} – суммарное сопротивление обмотки якоря и регулировочного сопротивления; $\Delta U_{\rm iii}$ – падение напряжения на щётках, определяемое по справочным данным.

Механические потери $\Delta P_{\rm mx}$ связаны с трением в подшипниках опор якоря и в щёточном узле, а также с трением якоря о воздух и с перемещением воздушных масс через корпус машины.



К добавочным потерям $\Delta P_{\rm д}$ относят потери от вихревых токов в обмотках, в стали полюсных наконечников, вызванные пульсацией магнитного потока вследствие зубчатого строения пакета якоря и др. Они не поддаются точному учёту и, в зависимости от наличия или отсутствия компенсационной обмотки, принимаются равными 0.5% или 1% от подводимой или полезной мощности.

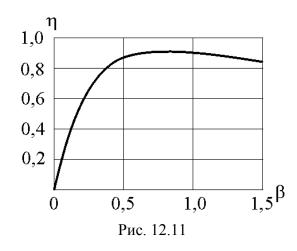
Таким образом, полные потери в машине составляют $\Delta P = \Delta P_{\rm c} + \Delta P_{\rm B} + \Delta P_{\rm H} + \Delta P_{\rm MX} + \Delta P_{\rm H}$. Отсюда можно определить КПД машины в режиме генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

где $P_2 = U_2 I_2$ — электрическая мощность на выходе генератора, и двигателя

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

В этих выражениях используется только легко измеряемая электрическая мощность и расчётные значения мощности потерь.



Коэффициент полезного действия машин постоянного тока мощностью более 10 кВт составляет 0,85...0,96, причём большие значения соответствуют машинам большей мощности. У машин мощностью до 50 Вт он существенно меньше и составляет всего 0,15...0,5

Зависимость КПД от коэффициента нагрузки $\beta = P_2 / P_{2\text{ном}}$ у машин постоянного тока имеет такой же характер как у всех остальных машин (рис. 12.11). Он

быстро снижается при малой нагрузке, поэтому недогруженную машину очень невыгодно эксплуатировать.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что включают в основные потери?
- 2. Почему не учитываются магнитные потери в статоре?
- 3. Что включают в электрические потери в машине?
- 4. Что включают в механические потери в машине?
- 5. Что включают в добавочные потери в машине и как их учитывают?
- 6. Почему нельзя эксплуатировать недогруженную машину?



12.7. Характеристики двигателей постоянного тока

Для разработчиков и пользователей электрических приводов важнейшими характеристиками двигателей являются механические и регулировочные характеристики. Первые определяют реакцию двигателя на нагрузку, а вторые — на управляющее воздействие. У двигателей постоянного тока эти характеристики обладают целым рядом особенностей, определивших преимущественное использование этих двигателей в регулируемых высококачественных приводах.

Уравнение механической и регулировочной характеристики можно получить подстановкой выражений для противо-ЭДС (12.2) и вращающего момента (12.6) в уравнение (12.3)

$$n = \frac{U_{\text{g}}}{C_{F}\Phi} - \frac{R_{\text{g}} + R_{\text{g}}}{C_{F}C\Phi^{2}}M; \quad \Omega = \frac{U_{\text{g}}}{\Psi} - \frac{R_{\text{g}} + R_{\text{g}}}{\Psi^{2}}M.$$
 (12.7)

В уравнениях (12.7) три величины могут быть регулируемыми переменными: напряжение на якоре двигателя $U_{\rm g}$, магнитный поток Φ или потокосцепление Ψ и добавочное сопротивление $R_{\rm g}$, включённое последовательно в цепь якоря. При постоянных значениях этих величин уравнение (12.7) соответствует механическим характеристикам двигателя, т.е. зависимости n(M). При постоянной нагрузке двигателя $M=M_{\rm c}={\rm const}$ и вариации одной из трёх переменных мы получим соответствующие регулировочные характеристики – $n(U_{\rm g})$, $n(\Phi)$ или $n(R_{\rm g})$.

Механическая характеристика двигателя, полученная при номинальных значениях напряжения на якоре и тока обмотки возбуждения и отсутствии добавочного сопротивления $R_{_{\rm I}}=0$, называется естественной. Все остальные механические характеристики называются искусственными.

12.7.1. Характеристики двигателей параллельного возбуждения

Электрическая цепь обмотки возбуждения двигателей параллельного возбуждения подключается параллельно цепи якоря (рис. 12.4, δ). Если при этом управление двигателем производится таким образом, что напряжение в цепи обмотки возбуждения не зависит от напряжения якоря, то его характеристики будут идентичны двигателю с независимым (рис. 12.4, а) и с магнитоэлектрическим (рис. 12.4, а) возбуждением.

Уравнения механических и регулировочных характеристик двигателя соответствуют выражениям (12.7). Естественная и искусственные механические характеристики представляют собой прямые линии

$$n = n_0 - bM (12.8)$$

где: $n_0 = \frac{U_{\rm g}}{C_E \Phi}$ — скорость идеального холостого хода; $b = \frac{R_{\rm g} + R_{\rm g}}{C_E C \Phi^2}$. Линей-

ность и отрицательный наклон механических характеристик обеспечивают



двигателю хорошую управляемость и устойчивость при работе с различными видами нагрузки.

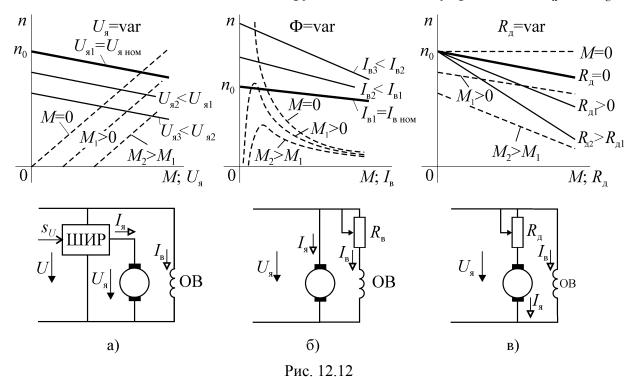
Скорость холостого хода двигателя не зависит от параметров цепи якоря и определяется только напряжением на якоре $U_{\rm я}$ и величиной магнитного потока Ф. Коэффициент b определяет наклон или жёсткость механической характеристики. Чем меньше величина сопротивления в числителе выражения, тем жёстче механическая характеристика и тем меньше изменения скорости вращения при изменении нагрузки. Следовательно, максимальной жёсткостью обладает естественная механическая характеристика.

Полагая n=0, из уравнения (12.8) можно определить пусковой момент двигателя $M_{_\Pi} = C\Phi U_{_{\rm F}}/(R_{_{\rm F}}+R_{_{\rm H}})$.

Направление вращения двигателя определяется знаком скорости холостого хода и может изменяться путём изменения полярности напряжения питания якоря или обмотки возбуждения. В последнем случае изменится знак (полярность) магнитного потока Ф. Очевидно, что одновременное изменение полярности источников питания обеих цепей не приведёт к изменению направления вращения.

На рис. 12.12 показаны характеристики двигателя параллельного возбуждения при различных способах управления и схемы их реализации.

Управление двигателем путём изменения напряжения на его якоре, называемое также *якорным управлением*, является наиболее сложным и совершенным (рис. 12.12, a). При питании двигателя от источника постоянного тока U его обычно реализуют с помощью широтно-импульсного регулятора (ШИР) (см. разделы 5.3.3 и 5.4.3). Среднее значение выходного напряжения ШИР является близкой к линейной функцией сигнала управления $U_{\rm g} \approx k \cdot s_U$.





Механические и регулировочные характеристики двигателя при якорном управлении линейны, что очень важно для реализации высококачественных приводов. Регулирование производится вниз от номинальной скорости вращения при постоянной жёсткости механических характеристик, равной жёсткости естественной характеристики. Диапазон регулирования при этом максимален вплоть до нулевой скорости вращения. В случае использования реверсивного широтно-импульсного регулятора скорость вращения можно регулировать в пределах $+n_{\text{ном}}\dots-n_{\text{ном}}$.

Основным недостатком якорного управления является относительно большая мощность регулятора, т.к. он работает в цепи якоря, мощность которой в 3...4 раза больше мощности цепи обмотки возбуждения.

Регулирование скорости вращения выше номинальной в двигателях с электромагнитным возбуждением, если это возможно по условиям эксплуатации двигателя, осуществляется изменением величины магнитного потока главных полюсов и называется полюсным управлением.

Оно реализуется путём изменения тока обмотки возбуждения. В простейшем варианте это осуществляется с помощью включённого последовательно с обмоткой реостата (рис. 12.12, δ). При необходимости автоматического или дистанционного управления для регулирования используют широтно-импульсный регулятор, аналогично схеме якорного управления рис. 12.12, a. В случае питания цепи возбуждения от источника переменного тока для регулирования используют управляемый выпрямитель.

Механические характеристики при полюсном управлении линейны, но сильная (квадратичная) зависимость жёсткости 1/b от величины магнитного потока приводит к тому, что она заметно уменьшается с ростом скорости вращения (рис. 12.12, δ) и двигатель сильнее реагирует на изменения момента нагрузки.

Регулировочные характеристики двигателя при полюсном управлении принципиально нелинейны. При нулевом моменте нагрузки регулировочная характеристика представляет собой гиперболу, а при нагрузке отличной от нуля — кривую второго порядка, имеющую максимум в области малых токов возбуждения. Нелинейность и неоднозначность регулировочных характеристик являются большими недостатками полюсного управления, которые нужно учитывать при разработке и эксплуатации. Достоинствами этого способа являются возможность получения при номинальном напряжении питания скоростей вращения, превышающих номинальную скорость, а также относительно малая мощность, расходуемая при регулировании.

Третий способ регулирования скорости вращения реализуется включением реостата в цепь якоря двигателя (рис. 12.12, θ).

Оба вида характеристик при этом линейны, но регулирование возможно только в области скоростей вращения ниже номинальной. С увеличением сопротивления R_{π} жёсткость механических характеристик быстро уменьшает-



ся, а потери растут, т.к. через реостат протекает весь ток якоря двигателя. Диапазон регулирования зависит от нагрузки и при малом моменте регулирование становится вообще невозможным. Единственным достоинством этого способа является простота реализации, но в современных приводах он находит применение только в устройствах ограничения пусковых токов.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое механические характеристики?
- 2. Какие способы регулирования скорости вращения возможны для двигателей постоянного тока?
- 3. Что такое естественная (искусственная) механическая характеристика?
- 4. Что такое жёсткость механической характеристики?
- 5. Какие параметры определяют жёсткость механической характеристики двигателя независимого возбуждения?
- 6. Какая механическая характеристика двигателя независимого возбуждения обладает максимальной жёсткостью?
- 7. Какие параметры определяют пусковой момент двигателя независимого возбуждения?
- 8. Как изменить направление вращения двигателя независимого возбуждения?
- 9. Какой вид имеют регулировочные характеристики двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
- 10. В каком диапазоне можно регулировать скорость вращения двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
- 11. Какими средствами реализуется регулирование скорости вращения двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
- 12. Какими средствами реализуется регулирование скорости вращения двигателя независимого возбуждения при полюсном управлении?
- 13. В каком диапазоне можно регулировать скорость вращения двигателя независимого возбуждения при полюсном управлении?
- 14. Укажите достоинства и недостатки якорного управления двигателем независимого возбуждения?
- 15. Укажите достоинства и недостатки полюсного управления двигателем независимого возбуждения?
- 16. Укажите достоинства и недостатки управления двигателем независимого возбуждения с помощью реостата в цепи якоря?

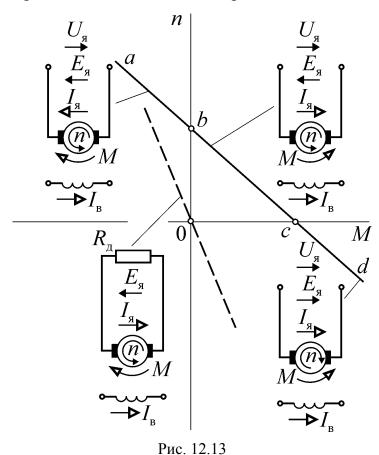
12.7.2.Тормозные режимы двигателей параллельного возбуждения

Тормозные режимы в электрических машинах возникают при изменении знака вращающего момента или скорости вращения. Механическая мощность машины при этом становится отрицательной, т.е. вращение ротора происходит за счёт энергии нагрузки на валу машины. Следовательно, тор-



мозные режимы соответствуют участкам механических характеристик, расположенным во втором и в четвёртом квадрантах (рис. 12.13).

Торможение с отдачей энергии в сеть или рекуперативное торможение двигателя соответствует встречному направлению протекания тока в якоре по отношению к напряжению (участок ab на рис. 12.13). Из выражения (12.4) это соответствует условию $E_{\rm q}>U_{\rm g}\Leftrightarrow C_E n\Phi>U_{\rm g} \Rightarrow n>U_{\rm g}/(C_E\Phi)=n_0$, которое можно выполнить либо повышением скорости вращения, либо понижением значения скорости холостого хода n_0 . В первом случае двигатель разгоняется за счёт вращающего момента, действующего на вал двигателя со стороны нагрузки и может находиться в этом режиме длительное время, например, при движении транспортного средства под уклон. Во втором — скорость холостого хода понижается путём понижения напряжение на якоре $U_{\rm g}$ или увеличения тока возбуждения, т.е. увеличения магнитного потока главных полюсов Φ . Это может происходить при якорном или полюсном регулировании скорости вращения. Переход в генераторный режим в этом случае носит кратковременный характер, и после снижения скорости машина возвращается в двигательный режим.



Режим электромагнитного тормоза или торможения противовключением (участок cd на рис. 12.13) соответствует согласному направлению действия ЭДС и напряжения якоря, т.е. переход в этот режим возможен при изменении полярности одной из величин. В соответствии с (12.2), направление действия ЭДС якоря зависит от направления вращения и направления магнитного потока главных полюсов машины. Направление вращения двигателя может измениться при увеличении момента нагрузки до значения, превышающего пусковой момент $M_c > M_{\pi}$. Тогда двигатель вначале остановится, а затем изменит направление вращения и

перейдёт в тормозной режим. Длительная работа в этом режиме опасна, т.к. при этом вся энергия, получаемая двигателем от источника питания и от нагрузки, рассеивается в нём в виде тепла. Кратковременно режим торможения



формируют при остановке и при реверсе. Для этого изменяют полярность питания якоря или обмотки возбуждения. После чего двигатель останавливается и, если при этом питание не отключается, а $M_{\rm c} < M_{\rm n}$, то разгоняется в противоположном направлении. Согласное действие ЭДС и напряжения питания при торможении и реверсировании создаёт в цепи якоря ток, многократно превышающий номинальное значение. Поэтому при переходе в тормозной режим для ограничения тока в цепь якоря включают добавочное сопротивление.

Очень эффективным и часто используемым на практике является режим динамического торможения. Он формируется путём отключения цепи якоря от источника питания и замыкания её на добавочное сопротивление (рис. 12.13). Уравнение механической характеристики для этого режима работы получается из (12.7) при условии $U_{\rm g}=0$

$$n = -\frac{R_{\rm g} + R_{\rm g}}{C_E C \Phi^2} M \ . \tag{12.9}$$

Выражение (12.9) является уравнением прямой линии, проходящей через начало координат и расположенной во втором и четвёртом квадрантах (штриховая линия на рис. 12.13). Название этого вида торможения связано с тем, что тормозной момент возникает только в динамике, т.е. при вращении якоря.

Режим динамического торможения является генераторным режимом, в котором механическая энергия, подведённая к ротору со стороны нагрузки, преобразуется в электрическую энергию, а затем рассеивается в виде тепла в активных сопротивлениях цепи якоря.

Эффективность торможения при прочих равных условиях зависит от величины добавочного сопротивления $R_{\rm д}$. Оно уменьшает жёсткость тормозной характеристики и ограничивает тем самым тормозной момент и ток в цепи якоря. Кроме того, на добавочном сопротивлении рассеивается часть энергии, которая в противном случае рассеивалась бы в обмотке якоря.

Вопросы для самопроверки

- 1. Перечислите возможные режимы торможения двигателей независимого возбуждения.
- 2. По какому признаку можно определить тормозной режим на механической характеристике?
- 3. Как перевести двигатель независимого возбуждения в режим рекуперативного (динамического) торможения?
- 4. Как перевести двигатель независимого возбуждения в режим торможения противовключением?
- 5. Почему в режиме противовключения ток двигателя превосходит пусковой ток?



- 6. Во что преобразуется кинетическая энергия вращающихся масс при динамическом (рекуперативном) торможении?
- 7. Какой режим торможения является оптимальным с точки зрения преобразования энергии?

12.7.3. Характеристики двигателей последовательного возбуждения

Двигатель последовательного возбуждения отличается от двигателя параллельного возбуждения наличием электрической связи между цепями якоря и возбуждения $I_{\rm B}=I_{\rm g}$. Поэтому уравнение механической характеристики можно получить из уравнения (12.7), если ввести в него эту зависимость. Полагая магнитную цепь двигателя ненасыщенной, определим магнитный поток главных полюсов машины как $\Phi=kI_{\rm B}=kI_{\rm g}$, где k — некоторый постоянный коэффициент. Тогда электромагнитный момент и поток двигателя из (12.6) будут равны

$$M = C\Phi I_{g} = CkI_{g}^{2} \implies \Phi = \sqrt{Mk/C} . \tag{12.10}$$

Подставляя выражение для Ф в уравнение (12.7), получим

$$n = q \left(\frac{U}{\sqrt{M}\sqrt{Ck}} - \frac{R_{\text{g}} + R_{\text{g}}}{Ck} \right); \quad \Omega = \frac{U}{\sqrt{M}\sqrt{Ck}} - \frac{R_{\text{g}} + R_{\text{g}}}{Ck}, \quad (12.11)$$

где $q = C/C_E = 60/(2\pi)$.

Из уравнения (12.11) следует, что механические характеристики двигателя последовательного возбуждения нелинейны. Причём, при уменьшении момента нагрузки $M \to 0$ скорость вращения стремится к бесконечности, что создаёт опасность разрушения двигателя при малых нагрузках и принципиальную невозможность создания режима холостого хода, а также режима рекуперативного торможения.

При увеличении нагрузки $M \to \infty$ и скорость вращения стремится к асимптоте с ординатой $n_\infty = -q \, \frac{R_{_{\rm S}} + R_{_{\rm Z}}}{C k}$.

При пуске ЭДС вращения равна нулю и ток в цепи ограничивается только сопротивлениями последовательно соединённых обмоток и добавочным сопротивлением $I_{\rm g}=U/(R_{\rm g}+R_{\rm g}+R_{\rm g})$. Тогда из (12.10) пусковой момент дви-

гателя —
$$M_{\text{II}} = Ck \left(\frac{U}{R_{\text{II}} + R_{\text{II}} + R_{\text{II}}} \right)^2$$
.

Механические характеристики двигателей последовательного возбуждения имеют гиперболический характер (рис. 12.14) и обеспечивают устойчивую работу практически при любом характере нагрузки.

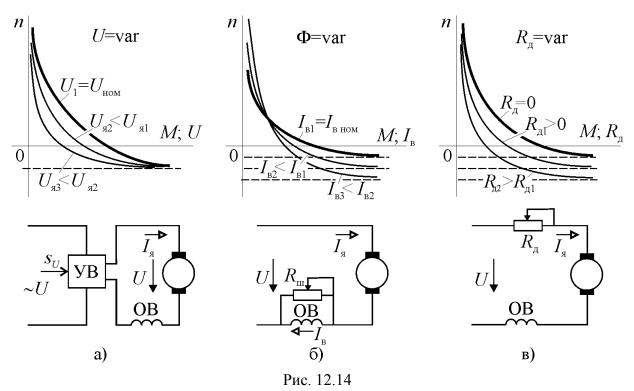
Поскольку у двигателей последовательного возбуждения вращающий момент $M\equiv I_{\rm g}^2$, а у двигателей параллельного возбуждения $M\equiv I_{\rm g}$, то при той же кратности пускового тока двигатель последовательного возбуждения будет развивать значительно больший момент. Кроме того, у двигателей па-



раллельного возбуждения естественная механическая характеристика жёсткая ($\Omega \approx {\rm const}$) и можно считать, что мощность на валу приблизительно пропорциональна моменту $P_2 = \Omega M \equiv M$. В то время как у двигателей последовательного возбуждения $n \approx U/\sqrt{M} \implies P_2 \equiv \sqrt{M}$ и при изменении нагрузочного момента в широких пределах мощность меняется существенно меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения. Поэтому для двигателей последовательного возбуждения перегрузки по моменту менее опасны и эти двигатели имеют существенные преимущества при эксплуатации в приводах с тяжёлыми условиями пуска и изменений нагрузки. До недавнего времени они широко применялись в электротранспорте и в подъемнотранспортных механизмах, но с развитием преобразовательной техники их всё чаще заменяют более надёжными и дешёвыми асинхронными двигателями.

Регулирование скорости вращения двигателей последовательного возбуждения возможно теми же способами, что и двигателей параллельного возбуждения.

На рис. 12.14, *а* показаны характеристики и схема регулирования скорости двигателя с помощью управляемого выпрямителя (УВ), питающегося от сети переменного тока. При уменьшении напряжения характеристики становятся «мягче», пусковой момент уменьшается, но положение асимптоты, к которой стремится скорость вращения при увеличении нагрузки, сохраняется.



Управление магнитным потоком в двигателях последовательного возбуждения обычно осуществляют с помощью реостата $R_{\rm m}$, шунтирующего об-



мотку возбуждения. При уменьшении сопротивления шунта ток в обмотке возбуждения уменьшается. Механические характеристики становятся мягче, и асимптота скорости вращения смещается вниз.

Похожая картина наблюдается при увеличении добавочного сопротивления $R_{\rm д}$, с той лишь разницей, что искусственные характеристики не пересекают естественную характеристику.

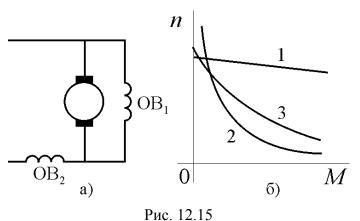
12.7.4. Тормозные режимы двигателей последовательного возбуждения

Перевод двигателя последовательного возбуждения в генераторный режим вращающим моментом нагрузки невозможен, т.к. скорость холостого хода у него равна бесконечности, что выражается в отсутствии участка механической характеристики во втором квадранте. Поэтому рекуперативное торможение осуществляют переключением обмотки возбуждения на параллельное соединение.

Режимы торможения противовключением и динамического торможения можно получить также как в двигателях параллельного возбуждения.

12.7.5.Характеристики двигателей смешанного возбуждения

Двигатели последовательного возбуждения имеют ряд преимуществ перед двигателями с параллельным возбуждением, но опасность разрушения двигателя при малых нагрузках, а также некоторая сложность режима реку-



перации энергии заставляют принимать меры, исключающие эти недостатки.

Для этого на полюсах двигателя наматывают две обмотки. Одну из них включают параллельно обмотке якоря OB_1 , а другую — последовательно OB_2 (рис. 12.15, a). В зависимости от числа витков и величины тока в обмотках соотношение MDC

обмоток может быть разным. Обычно МДС одной из обмоток в номинальном режиме составляет около 70% общей МДС, и эта обмотка считается основной. Кроме того, обмотки могут быть включены согласно или встречно. При всех этих комбинациях получаются различные характеристики и свойства двигателя. Наиболее часто встречаются двигатели, у которых обмотки соединены согласно и основной является параллельная обмотка.

Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения 3 представляет собой нечто среднее между характеристиками двигателей параллельного 1 и последовательного 2 возбуждения (рис. 12.15, δ). Она позволяет получить значительный пусковой момент и обеспечивает устойчивую работу при любом характере нагрузки двигателя. При этом исключается возможность чрезмерного повышения скорости вращения при холостом ходе.



Используя шунтирующие и добавочные сопротивления в цепях обмоток возбуждения можно получить практические любую промежуточную механическую характеристику.

Вопросы для самопроверки

- 1. Чем объясняется увеличение скорости вращения двигателя последовательного возбуждения при уменьшении нагрузки на валу?
- 2. Почему в двигателях последовательного возбуждения невозможно создать режим рекуперативного торможения повышением скорости вращения?
- 3. Укажите достоинства, недостатки и область применения двигателей последовательного возбуждения.
- 4. Как реализуют рекуперативное (динамическое) торможение в двигателях последовательного возбуждения?
- 5. Как реализуют реверсирование в двигателях последовательного возбуждения?
- 6. Какое включение обмоток чаще всего используется в двигателях смешанного возбуждения?

12.8. Исполнительные двигатели постоянного тока

В системах автоматики и телемеханики находят широкое применение исполнительные двигатели постоянного тока. Это связано с тем, что двигатели постоянного тока позволяют просто, плавно и экономично регулировать скорость вращения в очень широком диапазоне. При этом они устойчиво работают при любых скоростях вращения и любом характере нагрузки. По массе и габаритам они в два-три раза меньше асинхронных двигателей.

Основным недостатком двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щёток. Искрение при работе коллектора приводит к подгоранию контактов, изменению их переходного сопротивления и, как следствие, к нестабильности характеристик двигателя. Это требует систематического ухода за коллектором и щётками в процессе эксплуатации и снижает надёжность узлов и агрегатов, в которых используются двигатели.

Кроме того, из-за искрения коллекторные двигатели нормального исполнения не могут работать во взрывоопасных средах и требуют установки устройств подавления радиопомех, возникающих при их работе.

По конструкции исполнительные двигатели делятся на двигатели обычного исполнения, двигатели с беспазовым якорем и малоинерционные двигатели.

Двигатели обычного исполнения отличаются от силовых двигателей постоянного тока только тем, что имеют шихтованный магнитопровод статора. Это связано с необходимостью минимизации потерь в стали, т.к. эти двигатели значительную часть времени работают в переходных режимах с изменяющимся основным магнитным потоком.



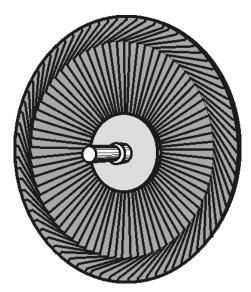


Рис. 12.16

Двигатели с беспазовым якорем отличаются от обычных двигателей тем, что обмотка якоря располагается на цилиндрической поверхности якоря. Это увеличивает воздушный зазор двигатели и требует увеличения тока возбуждения, но позволяет существенно снизить индуктивность обмотки якоря и за счёт этого улучшить условия коммутации. Кроме того, беспазовая конструкция позволяет уменьшить момент инерции якоря и увеличить быстродействие двигателя.

Одним из недостатков двигателей постоянного тока обычного исполнения является относительно большой момент инерции якоря, снижающий их быстродействие. Для уменьшения момента инерции якоря применяются раз-

личные конструктивные решения, одним из которых является использование обмотки якоря изготовленной печатным способом на немагнитном диске или цилиндре. Такая конструкция значительно повышает технологичность изготовления якоря и существенно снижается его момент инерции, т.к. якорь представляет собой лёгкий тонкий немагнитный диск или цилиндр, на который нанесена обмотка в виде тонких полос медной фольги (рис. 12.16). Малая индуктивность обмотки улучшает условия коммутации, а отсутствие ферромагнитного сердечника якоря исключает потери в стали. Однако якорь с печатной обмоткой имеет малую механическую и термическую прочность, что может вызывать его коробление и отказ двигателя в работе. Другим существенным недостатком является большой немагнитный промежуток, состоящий из двух воздушных зазоров и толщины якоря. Поэтому двигатели с печатным якорем возбуждаются постоянными магнитами, т.к. использование обмотки возбуждения привело бы к значительным потерям в ней, из-за необходимости создания больших МДС (токов) для проведения потока через большой немагнитный участок магнитной цепи. Кроме того, это существенно увеличило бы массу и габариты двигателя.

Обмотку якоря малоинерционных двигателей выполняют также на немагнитных дисках или цилиндрах, но делают это обычным проводом с последующей заливкой полимерным составом. В результате образуется монолитный цилиндр или диск с проводниками обмотки, расположенными внутри. Такая технология более сложная и трудоёмкая, чем печатная, но позволяет увеличить механическую прочность конструкции якоря.

Вопросы для самопроверки

1. Чем объясняется широкое применение двигателей постоянного тока в устройствах автоматики?



- 2. Что ограничивает применение исполнительных двигателей постоянного тока?
- 3. Чем отличаются исполнительные двигатели постоянного тока от двигателей общего применения?
- 4. Какие конструкции ротора используются в исполнительных двигателях постоянного тока?

12.9. Коллекторные двигатели переменного тока

Вращающий момент двигателя создаётся в результате взаимодействия тока, протекающего в обмотке якоря, с магнитным полем главных полюсов. При изменении направления тока якоря или полярности магнитного поля направление действия вращающего момента меняется на противоположное, что и используется для изменения направления вращения. В случае одновременного изменения направлений тока в обмотке якоря $i_{\rm g}$ и в обмотке возбуждения $i_{\rm g}$ вращающий момент будут действовать в прежнем направлении. Поэтому, если двигатель постоянного тока подключить к сети переменного тока, то он будет работать, создавая вращающий момент m, изменяющийся во времени по синусоидальному закону с двойной частотой по отношению к частоте сети и с некоторым постоянным средним значением M (рис. 12.17).

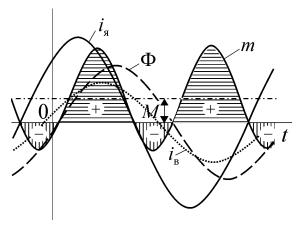


Рис. 12.17

Момент инерции ротора сглаживает пульсации скорости вращения, вызванные пульсациями момента, и двигатель вращается с практически постоянной скоростью, развивая момент равный среднему значению.

В отличие от двигателя постоянного тока магнитный поток коллекторного двигателя переменный, поэтому сердечник статора должен быть шихтованным.

Пренебрегая потерями в магнитопроводе и вихревыми токами в короткозамкнутых витках обмотки якоря, можно считать, что величина среднего значения момента зависит от сдвига фаз между токами обмотки якоря и обмотки возбуждения. При нулевом сдвиге фаз вращающий момент будет всегда положительным с максимально возможным средним значением. Величина фазового сдвига зависит от многих факторов, но, при прочих равных условиях, у двигателей с параллельным возбуждением она существенно больше, чем у двигателей с последовательным возбуждением. Поэтому коллекторные двигатели переменного тока с параллельным возбуждением практически не применяются.

Переменный магнитный поток наводит в коммутируемых секциях коллекторного двигателя трансформаторную ЭДС, компенсировать которую с



помощью дополнительных полюсов можно только для какой-либо одной скорости вращения. Поэтому условия коммутации в этих двигателях значительно хуже, чем в двигателях постоянного тока.

Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением. Маломощные двигатели находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, где требуется получить высокие скорости вращения (до 30000 об/мин) и возможность плавного регулирования скорости в большом диапазоне.

Вопросы для самопроверки

- 1. Будет ли двигатель постоянного тока создавать вращающий момент, если его подключить к источнику питания переменного тока?
- 2. Чем отличается конструкция статора коллекторного двигателя переменного тока от конструкции статора двигателя постоянного тока?
- 3. Почему в коллекторных двигателях переменного тока в основном используется схема с последовательным включением обмотки возбуждения?
- 4. Почему условия коммутации в двигателе переменного тока хуже, чем в двигателе постоянного тока?
- 5. Укажите достоинства, недостатки и область применения коллекторных двигателей переменного тока.

13. Основы электропривода

Большинство современных машин, механизмов, агрегатов приводится в движение электрическими двигателями, т.е. имеет электрический привод. В каждом таком устройстве требуется обеспечить линейное, вращательное или более сложное движение рабочего органа с заданными координатами: положением, скоростью и/или ускорением. Это создаёт бесконечное разнообразие задач, решение которых осуществляется очень ограниченным набором серийно изготавливаемых двигателей. В общем случае получение требуемых характеристик возможно путём регулирования параметров электрической энергии источника питания двигателя и регулирования параметров механической энергии, передаваемой рабочему органу. Управление потоком электрической энергии осуществляется различными преобразователями: трансформаторами, выпрямителями, инверторами, преобразователями частоты и т.п. Преобразование параметров движения ротора двигателя осуществляется системой механической передачи: редукторами, кулисными, кулачковыми, кривошипно-шатунными и др. механизмами, различными фиксирующими и тормозными устройствами. Для управления требуется также информация о регулируемых координатах и параметрах, а также устройство её обработки, формирующее воздействия на регулируемые объекты. Таким образом, со-



временный электрический привод является сложной электромеханической системой, состоящей из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение рабочего органа машины и управления этим движением.

В последнее время в связи с развитием полупроводниковых преобразователей электрической энергии наметилась тенденция к отказу от использования механических передач для формирования и управления движением. Во многих случаях такой безредукторный привод позволяет получить характеристики, которые сложно или невозможно получить в приводах с механическими передачами. Кроме того, отказ от сложной механики позволяет существенно уменьшить стоимость, массу и габариты привода, повысить надёжность и срок службы.

Теория электропривода является самостоятельной инженерной дисциплиной и специальностью, поэтому в данном курсе мы ограничимся только ознакомлением с основными вопросами.

13.1. Уравнение движения электропривода

При работе двигателя на его вал действуют электромагнитный момент M, момент нагрузки $M_{\rm c}$ и динамический момент $M_{\rm d} = Jd\Omega/dt$

$$M - M_{\rm c} = Jd\Omega/dt \tag{13.1}$$

где: J – момент инерции движущихся тел, присоединённых к валу двигателя; Ω – угловая скорость вращения.

Выражение (13.1) называется уравнением движения привода. Если момент, развиваемый двигателем, больше момента нагрузки $M>M_{\rm c}$, то $d\Omega/dt>0$ и привод ускоряется. В случае $M< M_{\rm c} \Rightarrow d\Omega/dt<0$ и происходит замедление привода. При равенстве моментов $M=M_{\rm c}$ ускорение привода равно нулю и он работает в установившемся режиме.

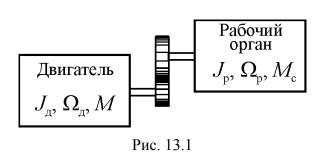
В общем случае вращающие моменты двигателя и нагрузки могут иметь любые знаки, и их выбор зависит от условий работы привода. Момент считается положительным, если он действует в направлении вращения. Поэтому при переходе двигателя в режим рекуперативного торможения знак момента M в (13.1) будет отрицательным. В то же время, момент нагрузки может быть положительным, например, при спуске груза, подвешенного на валу двигателя, т.к. в этом случае он действует в направлении вращения.

Динамический или инерционный момент проявляется в переходных режимах работы и всегда действует встречно, препятствуя ускорению или замедлению привода.

Уравнение (13.1) позволяет определить скорость вращения Ω , а также угловое ускорение $d\Omega/dt$ и угловое положение $\vartheta = \int \Omega dt$ вала двигателя, если известен момент инерции движущихся тел и вращающие моменты двигателя и нагрузки. Если рабочий орган присоединён непосредственно к валу двигателя, то момент инерции в (13.1) будет равен сумме моментов инерции



ротора двигателя и рабочего органа, а момент нагрузки – моменту, создаваемому рабочим органом. Сложнее дело обстоит, если рабочий орган при-



соединён к двигателю через механическую передачу, например, через одноступенчатый редуктор (рис. 13.1). В этом случае момент инерции и вращающий момент рабочего органа нужно привести к валу двигателя.

Пренебрегая потерями энергии в редукторе, из условия сохранения

мощности получим значение приведённого или расчётного момента нагрузки

$$M_{\rm c}'\Omega_{\rm g} = M_{\rm c}\Omega_{\rm p} \implies M_{\rm c}' = M_{\rm c}\Omega_{\rm p}/\Omega_{\rm g} = M_{\rm c}/k,$$
 (13.2 a)

где $k = \Omega_{_{\rm I\! I}}/\Omega_{_{
m p}}$ — передаточное число редуктора.

Если рабочий орган перемещается поступательно со скоростью $v_{\rm p}$ и создаёт при этом нагрузку на передачу в виде силы $F_{\rm c}$, то таким же образом можно определить величину создаваемого им момента на валу двигателя

$$M_{\rm c}'\Omega_{\rm m} = F_{\rm c}v_{\rm p} \implies M_{\rm c}' = F_{\rm c}v_{\rm p}/\Omega,$$
 (13.2 б)

Момент инерции рабочего органа приводится к валу двигателя при условии сохранения кинетической энергии

$$J_{\rm p}'\Omega_{\rm g}^2/2 = J_{\rm p}\Omega_{\rm p}^2/2 \implies J_{\rm p}' = J_{\rm p}(\Omega_{\rm p}/\Omega_{\rm g})^2 = J_{\rm p}/k^2$$
. (13.3 a)

При поступательном движении к валу двигателя приводится движущаяся масса рабочего органа

$$J_{\rm p}'\Omega_{\rm g}^2/2 = m_{\rm p}v_{\rm p}^2/2 \implies J_{\rm p}' = m_{\rm p}(v_{\rm p}/\Omega_{\rm g})^2.$$
 (13.3 б)

Полный момент инерции привода равен $J=J_{_{\mathrm{I\! I}}}+J_{_{\mathrm{I\! P}}}'$.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что такое уравнение движения привода?
- 2. Что такое динамический вращающий момент?
- 3. Что такое передаточное число редуктора?
- 4. Как приводится к валу двигателя вращающий момент, действующий на рабочий орган механизма, приводимого во вращение?
- 5. Как приводится к валу двигателя сила, действующая на поступательно движущийся рабочий орган?
- 6. Как приводится к валу двигателя момент инерции (масса) рабочего органа?

13.2. Ускорение и замедление привода

Длительность переходных режимов привода имеет большое значение для практики. Она может быть определена интегрированием уравнения (13.1). Разделяя переменные, получим



$$dt = Jd\Omega/(M - M_c). (13.4)$$

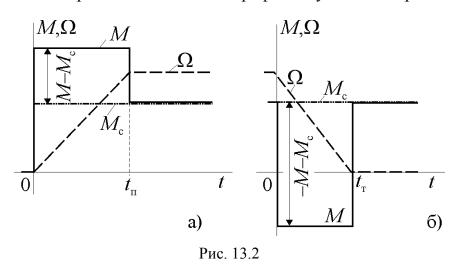
Отсюда время изменения скорости вращения от $\,\Omega_{1}\,$ до $\,\Omega_{2}\,$

$$t = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} Jd\Omega / (M - M_c). \tag{13.5}$$

В общем случае вращающие моменты и момент инерции в (13.5) являются функциями скорости вращения, и интегрирование может быть сложной задачей. В простейшем же случае при $M \approx \text{const}$, $M_c \approx \text{const}$, J = const

$$t = J(\Omega_2 - \Omega_1)/(M - M_c). \tag{13.6}$$

На рис. 13.2 показаны графики пуска a и торможения δ привода при по-

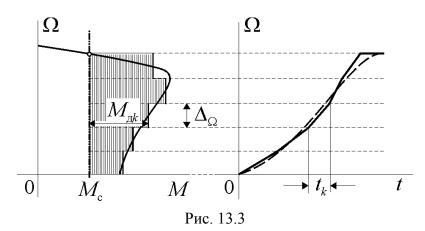


стоянных значениях моментов двигателя и нагрузки. При торможении момент двигателя действует встречно по отношению к направлению вращения и поэтому имеет отрицательный знак.

Выражением (13.6) можно воспользоваться и в более

сложных случаях. Например, при расчёте времени пуска асинхронного двигателя. Для этого нужно разделить механическую характеристику на участки Δ_{Ω} , в пределах которых можно считать динамический момент постоянным $M_{\pi k} = M - M_{\rm c}$ (рис. 13.3), а затем, рассчитав для каждого участка время $t_k = J \Delta_{\Omega} / M_{\pi k}$, постро-

ить ломаную линию разгона. Для сравнения на рис. 13.3 штриховой линией показана также кривая, полученная интегрированием (13.5). Погрешность дискретизации здесь меньше погрешности представления механической характеристики двигателя по справочным данным.





Вопросы для самопроверки

- 1. От чего зависит время разгона (торможения) привода?
- 2. Как определяются знаки вращающих моментов в уравнении движения привода?
- 3. Как построить линию разгона двигателя графоаналитическим методом?

13.3. Нагрев и охлаждение двигателей

В процессе работы двигателя происходит нагрев различных элементов его конструкции, связанный с потерями энергии при преобразовании. Нагревается магнитопровод в результате перемагничивания и протекания вихревых токов, нагреваются обмотки протекающим по ним током, нагреваются от трения подшипники и вал. Увеличение нагрузки двигателя приводит к увеличению потерь в его обмотках и к увеличению их нагрева.

Способность материалов выдерживать нагревание без существенного изменения свойств называется термостойкостью. Она определяется допустимой температурой нагрева или допустимым превышением температуры над температурой окружающей среды. Наихудшей термостойкостью из всех элементов конструкции двигателя обладает электрическая изоляции, поэтому именно она определяет допустимую нагрузку машины. Чем выше термостойкость изоляции, тем больше удельная мощность двигателя, т.е. тем большую нагрузку допускает двигатель при тех же габаритах. С другой стороны, температура двигателя определяется выделяющимся в нём теплом и условиями теплоотвода. Поэтому нагрузку двигателя можно увеличить, если улучшить теплоотвод, например, за счёт принудительной вентиляции.

По термостойкости изоляция электрических машин делится на семь классов. В настоящее время в двигателях применяется изоляция классов E, B и F с предельно допустимыми температурами 120 C, 130 °C и 155 °C соответственно.

Теплообмен в машине является сложнейшим часто неформализуемым физическим процессом и может рассматриваться в общем виде только при определённых упрощениях, главным из которых является представление двигателя однородным телом с бесконечной теплопроводностью. В этом случае уравнение теплового баланса имеет вид

$$Qdt = A\theta dt + Cd\theta, \qquad (13.7)$$

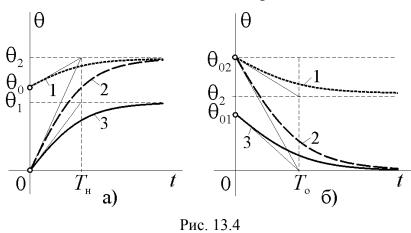
где $Q = \Delta P$ — количество теплоты, выделяемое двигателем в единицу времени (мощность потерь в двигателе); A — теплоотдача, т.е. количество теплоты, отдаваемой двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур двигателя и среды в 1 °C; C — теплоёмкость двигателя, т.е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °C; $\theta = \theta_{\rm A} - \theta_{\rm C}$ — превышение температуры двигателя $\theta_{\rm A}$ над температурой окружающей среды $\theta_{\rm C}$.



Решением уравнения (13.7) является функция

$$\theta = \theta_{y} \left(1 - e^{-t/T} \right) + \theta_{0} e^{-t/T},$$
(13.8)

где: θ_0 , $\theta_y = Q/A$ — начальное и установившееся (конечное) значения превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды; T = C/A — тепловая постоянная времени двигателя.



Выражение (13.8) соответствует как процессу нагревания, так и охлаждения двигателя. Необходимо только подставлять в него соответствующие значения. В случае нагревания от температуры окружающей среды ($\theta_0 = 0$) и охлаждения до этой тем-

пературы ($\theta_v = 0$) выражение (13.8) упрощается и принимает вид

$$\theta = \theta_{y} \left(1 - e^{-t/T_{H}} \right), \tag{13.9 a}$$

$$\theta = \theta_0 e^{-t/T_0} \,. \tag{13.9 6}$$

Длительность нагревания или охлаждения не зависит от начальных и конечных значений температуры и определяется только постоянной времени, т.е. соотношением теплоёмкости двигателя и теплоотдачи. На рис. 13.4 показаны кривые нагрева a и охлаждения b двигателя при разных начальных условиях и мощности потерь. При изменении нагрузки (кривые b), а также при включении и отключении двигателя с различной нагрузкой (кривые b0 и b1) нагрев и охлаждение происходит за время b2 и b3 машин малой и средней мощности постоянная времени составляет несколько минут или десятков минут, а у машин большой мощности — несколько часов.

Основной теплоотвод у двигателей происходит с помощью естественной и искусственной вентиляции. Естественная вентиляция создаётся перемещением воздуха за счёт изменения его плотности при нагревании. Возникающий таким образом воздушный поток не может обеспечить эффективный теплоотвод и во всех машинах используют те или иные устройства, создающие движение воздуха механическим способом. Чаще всего для этого используется крыльчатка, установленная на валу машины и создающая воздушный поток при вращении ротора. Такие двигатели относятся к классу самовентилируемых машин. При значительном снижении скорости вращения или остановке вентиляция в них прекращается и условия теплоотвода существенно



ухудшаются $A_{\rm o} \ll A_{\rm h}$. Это явление оценивают коэффициентом ухудшения теплоотдачи

$$\beta_{o} = A_{o} / A_{H} = T_{o} / T_{H} \le 1,0 \tag{13.10}$$

У самовентилируемых машин коэффициент ухудшения теплоотдачи составляет около 0,25...0,35. У машин с принудительной вентиляцией, осуществляемой системой вентиляции независимой от режима работы двигателя, например, отдельным двигателем-вентилятором, условия нагрева и охлаждения одинаковы и $\beta_0 = 1$.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какой элемент электрической машины обладает наименьшей термостойкостью?
- 2. Как можно увеличить нагрузку машины?
- 3. Чем определяется рабочая температура машины?
- 4. Чем определяется время нагрева машины до установившейся температуры?
- 5. Чем определяется установившееся значение температуры при нагреве машины?
- 6. Как изменяются кривые нагрева и охлаждения машины при изменении нагрузки?
- 7. Какие машины называются самовентилируемыми?
- 8. Как учитывается при расчётах ухудшение теплоотвода при снижении скорости вращения?

13.4. Номинальные режимы работы двигателей

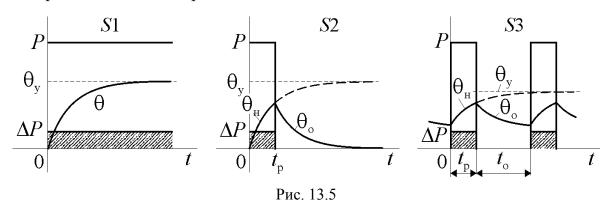
Процесс теплообмена зависит не только от величины нагрузки и тепловых параметров двигателя, но также и от характера нагрузки, т.е. от её распределения во времени. Характер нагрузки имеет столь существенное значение, что двигатели изготавливаются с расчётом на работу в определённых условиях. Стандартом предусмотрено восемь номинальных режимов работы S1...S8, но мы остановимся на первых трёх, т.к. остальные, по сути, являются развитием и уточнением режима S3 и до недавнего времени они не входили в нормативные документы.

Продолжительный режим (S1) соответствует работе двигателя с постоянной нагрузкой $P = {\rm const}$ и мощностью потерь $\Delta P = {\rm const}$. При этом двигатель нагревается до установившейся температуры $\theta_{\rm y}$. В таком режиме обычно работают приводы насосов, вентиляторов, компрессоры, бумагоделательные машины и др.

При *кратковременном режиме* (S2) время работы $t_{\rm p}$ двигателя меньше $3T_{\rm h}$, поэтому он не успевает нагреться до установившейся температуры. Длительность паузы в работе при кратковременном режиме такова, что двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. Этот режим характерен для



приводов различных механизмов: шлюзов, разводных мостов, серводвигателей бортовых систем и др.



Повторно-кратковременный режим (S3) соответствует циклической работе двигателя, при которой за время работы $t_{\rm p}$ он не достигает установившейся температуры $\theta_{\rm y}$, а за время паузы $t_{\rm o}$ — не охлаждается до температуры окружающей среды. Главной характеристикой повторно-кратковременного режима является продолжительность включения двигателя

$$\Pi B\% = \frac{t_{\rm p}}{t_{\rm p} + t_{\rm o}} 100. \tag{13.11}$$

Номинальными продолжительностями включения являются 15%, 25%, 40% и 60%. Мощность, ток и скорость вращения, указанные в справочных данных двигателей, рассчитанных на работу в повторно-кратковременном режиме, соответствуют определённой продолжительности включения. Типичными механизмами с повторно-кратковременным режимом работы являются краны, различные металло- и деревообрабатывающие станки и т.п.

Вопросы для самопроверки

- 1. По какому признаку определяют режим работы двигателя?
- 2. До какой температуры нагревается двигатель в длительном режиме работы?
- 3. До какой температуры охлаждается двигатель в кратковременном режиме работы?
- 4. До какой температуры нагревается и охлаждается двигатель в повторно-кратковременном режиме работы?
- 5. Что такое продолжительность включения двигателя?
- 6. Какие продолжительности включения установлены стандартом?

13.5. Выбор мощности двигателей

Выбор мощности двигателя для привода является важнейшей задачей, т.к. завышение мощности приводит не только к лишним затратам при его приобретении, но также к дополнительным эксплуатационным расходам, связанным с работой двигателя при низком КПД. С другой стороны, занижение мощности уменьшает производительность оборудования и может при-



вести к отказу двигателя в работе. Кроме того, даже небольшое занижение мощности приводит к повышению рабочей температуры, что существенно уменьшает надёжность привода и сокращает время наработки на отказ. Например, повышение рабочей температуры изоляции на 8...10 °C вызывает её ускоренное старение и вдвое сокращает срок службы.

При длительном режиме работы мощность двигателя $P_{\scriptscriptstyle \Pi}$ выбирают по

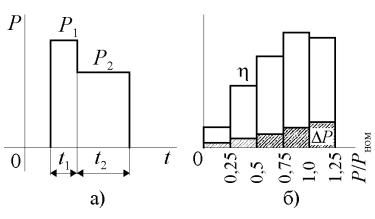


Рис. 13.6

мощности приводимого в движение механизма P из условия $P_{\rm д} \ge P$. При этом мощность $P_{\rm д}$ должна быть ближайшей из серии двигателей данного типа.

В случае длительного режима работы с переменной нагрузкой мощность двигателя рассчитывают методом средних потерь по нагрузочной диаграмме (рис. 13.6, *a*).

Для этого сначала по среднему значению мощности нагрузки

$$P_{\rm cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$
 (13.12)

выбирают двигатель $P_{_{\rm I}} \approx (1,1...1,3)P_{\rm cp}$.

Затем по справочным данным зависимости КПД двигателя от нагрузки $\eta(P/P_{\text{ном}})$ (рис. 13.6, δ) определяют потери в двигателе для каждого интервала работы с постоянной мощностью нагрузки

$$\Delta P_k = P_{\text{HOM}} \frac{1 - \eta_k}{\eta_k} \tag{13.13}$$

где η_k — КПД двигателя на k-м интервале, и рассчитывают среднее значение потерь

$$\Delta P_{\rm cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$
 (13.14)

В случае существенного ухудшения теплоотдачи на всех или на некоторых интервалах это учитывается введением в (13.14) коэффициента β_k

$$\Delta P_{\rm cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n}.$$
 (13.15)

Коэффициент ухудшения теплоотдачи для самовентилируемых двигателей можно считать линейно зависящим от скорости вращения n, т.е. $\beta_k = \beta_0 + (1-\beta_0)n/n_{\text{ном}}$, где β_0 — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.



Если $\Delta P_{\rm cp} \approx \Delta P_{\rm ном}$, то выбор сделан правильно. В противном случае выбирают следующий двигатель из серии и повторяют расчёт.

Метод средних потерь точен, но трудоёмок. Его можно заменить приближёнными методами, если выполняются какие-либо дополнительные условия работы привода.

Если потери в стали, механические потери и сопротивления обмоток несущественно изменяются при изменении нагрузки, что эквивалентно условиям $\Phi \approx \text{const}$, $n \approx \text{const}$ и $R \approx \text{const}$, то средние потери будут пропорциональны квадрату тока, потребляемого двигателем. Тогда двигатель можно выбрать методом эквивалентного тока

$$I_{_{9}} = \sqrt{\frac{I_{1}^{2}t_{1} + I_{2}^{2}t_{2} + \ldots + I_{n}^{2}t_{n}}{t_{1} + t_{2} + \ldots + t_{n}}} \leq I_{_{\mathrm{HOM}}} \,.$$

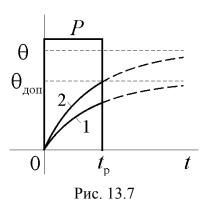
В случае, если момент двигателя пропорционален току, например, в двигателе постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением и нагрузка задана вращающим моментом, то выбор удобнее производить по эквивалентному моменту нагрузки

$$M_{9} = \sqrt{\frac{M_{1}^{2}t_{1} + M_{2}^{2}t_{2} + \ldots + M_{n}^{2}t_{n}}{t_{1} + t_{2} + \ldots + t_{n}}} \leq M_{\text{HOM}}.$$

Методы эквивалентного тока и момента используются в основном для предварительного выбора двигателя. Для этой цели, если $n \approx \text{const}$, можно использовать также метод эквивалентной мощности

$$P_{9} = \sqrt{\frac{P_{1}^{2}t_{1} + P_{2}^{2}t_{2} + \dots + P_{n}^{2}t_{n}}{t_{1} + t_{2} + \dots + t_{n}}} \le P_{\text{HOM}}.$$
(13.16)

При кратковременном режиме работы двигатель в течение времени $t_{\rm p}$ работает с нагрузкой мощностью P (рис. 13.7), а затем отключается и охлаж-



дается до температуры окружающей среды. При выборе двигателя по условию $P_{\rm д}=P$ он не успеет за время работы $t_{\rm p}$ достичь допустимого превышения температуры $\theta_{\rm доп}=\Delta P_{\rm ном}/A$ (кривая I на рис. 13.7), т.е. двигатель будет недоиспользован по нагреву. Поэтому нужно выбрать двигатель меньшей мощности $P_{\rm d} < P$ так, чтобы за время работы он достиг допустимой температуры $\theta(t_{\rm p})=\Delta P(1-e^{-t_{\rm p}/T_{\rm h}})/A=\theta_{\rm доп}$ (кривая 2 на рис.

13.7). Отсюда коэффициент тепловой перегрузки двигателя

$$\alpha_{\rm T} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\rm HOM}} = \frac{1}{1 - e^{-t_{\rm p}/T_{\rm H}}} > 1.$$
 (13.17)



Таким образом, коэффициент тепловой перегрузки определяется соотношением времени работы $t_{\rm p}$ и постоянной времени нагрева $T_{\rm H}$.

Из выражения (13.17) несложно найти время работы, в течение которого допускается перегрузка

$$t_{\rm p} = T_{\rm H} \ln \frac{\alpha_{\rm T}}{\alpha_{\rm T} - 1} \,.$$

Двигатели, предназначенные для кратковременной работы, выпускаются с нормированным значением продолжительности работы $t_{\rm p}=10,30,60,90$ мин. Следовательно, выбранный по каталогу двигатель может быть загружен номинальной мощностью в течение указанного времени и будет полностью использован по нагреву.

При повторно-кратковременном режиме работы выбор мощности двигателя производится в соответствии с продолжительностью включения. Если продолжительность включения меньше минимального стандартного значения 15%, то выбор двигателя производится так же, как для кратковременного режима. В случае продолжительности включения больше, чем 60%, двигатель выбирают как для продолжительного режима работы. При соответствии нагрузочной диаграммы режиму S3 и стандартном значении продолжительности включения выбор двигателя производится просто по каталогу.

На практике часто встречаются режимы работы, когда за время включения меняется мощность нагрузки (рис. 13.8, a). Тогда нагрузочная диаграмма вначале приводится к стандартному виду S3. Для этого по выражению (13.16) подсчитывают эквивалентную мощность P_9 , а также суммарное время включённого Σt_p и отключённого Σt_o состояний. Затем определяется расчётная продолжительность включения

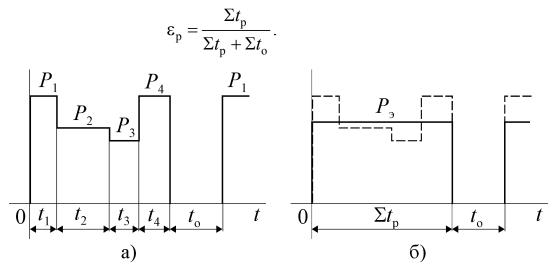


Рис. 13.8

Если двигатель самовентилируемый и в переходных режимах теплоотвод ухудшается, то продолжительность включения рассчитывают по уточнённой формуле



$$\varepsilon_{\mathrm{p}} = \frac{\Sigma t_{\mathrm{p}} + \Sigma t_{\mathrm{n}} + \Sigma t_{\mathrm{r}}}{\Sigma t_{\mathrm{p}} + \beta_{\mathrm{n}} \Sigma t_{\mathrm{n}} + \beta_{\mathrm{r}} \Sigma t_{\mathrm{r}} + \beta_{0} \Sigma t_{\mathrm{o}}},$$

где: $\Sigma t_{\rm p}$, $\Sigma t_{\rm n}$, $\Sigma t_{\rm r}$ — суммарное время работы, пусков и торможений за цикл; $\beta_{\rm n}$, $\beta_{\rm r}$, β_0 — коэффициенты ухудшения охлаждения при пуске, торможении и остановке.

Пересчёт мощности на стандартное значение производится по формуле

$$P_{\rm ct} = P_{\rm 9} \sqrt{\varepsilon_{\rm p}/\varepsilon_{\rm ct}} ,$$

где $\varepsilon_{\rm cr}=0.15;\ 0.25;\ 0.4;\ 0.6$. Например, при $\varepsilon_{\rm p}=0.3$ значения мощности двигателя для ближайших стандартных продолжительностей включения будут равны $P_{0.25}=P_{\rm 9}\sqrt{0.3/0.25}=1.1P_{\rm 3};\ P_{0.4}=P_{\rm 9}\sqrt{0.3/0.4}=0.86P_{\rm 9}$. По этим величинам по каталогу выбирают двигатель с ближайшим большим или равным значением мощности.

Вопросы для самопроверки

- 1. Почему нельзя использовать в приводе двигатели с завышенной и заниженной мощностью?
- 2. Как выбирается мощность двигателя при длительном режиме работы с постоянной нагрузкой?
- 3. Как выбирается мощность двигателя при длительном режиме работы с переменной нагрузкой?
- 4. Как учитывается ухудшение теплоотдачи при выборе мощности двигателя?
- 5. Как выбирается мощность двигателя методом средних потерь?
- 6. При каких условиях при выборе мощности двигателя можно пользоваться методами эквивалентного тока, момента и мощности?
- 7. Как производится выбор мощности двигателя для кратковременного режима работы?
- 8. Укажите стандартные значения продолжительности работы двигателей, используемых в кратковременном режиме.
- 9. Как учитываются условия охлаждения двигателя при выборе мощности для повторно-кратковременного режима работы?
- 10. Как производится пересчёт мощности на стандартное значение продолжительности включения?

13.6. Выбор типа двигателя

При разработке приводов помимо мощности приходится решать задачу выбора типа и конструктивного исполнения двигателя. В случае необходимости длительной работы двигателя с постоянной нагрузкой и скоростью вращения выбор типа двигателя обычно не вызывает затруднений. Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуется в этих случаях использовать синхронные двигатели, т.к. они экономичнее в эксплуатации, чем



асинхронные, и обладают лучшими массогабаритными показателями. Однако для приводов малой и средней мощности часто применяют асинхронные короткозамкнутые двигатели, т.к. они дешевле и проще в эксплуатации.

Для приводов механизмов с частыми и тяжёлыми пусками или требующих регулирования скорости вращения применяют все типы двигателей, но двигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда бесколлекторные двигатели не могут обеспечить требуемые технические параметры или неэкономичны. Это требование связано с тем, что двигатели постоянного тока существенно дороже, менее надёжны и требуют обязательного ухода при эксплуатации. В то время как бесколлекторные двигатели свободны от этих недостатков, а в сочетании с полупроводниковыми преобразователями они позволяют получить практически те же или лучшие технические показатели.

По конструкции двигатели условно делятся на двигатели открытого, защищённого и закрытого исполнения. Степень защиты двигателей обозначается в документации латинскими буквами IP и следующими за ними двумя цифрами.

Первая цифра 0...6 обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с движущимися или находящимися под напряжением частями двигателя, а также самого двигателя от попадания в него посторонних предметов. Нулевое значение обозначает отсутствие защиты. Увеличение значения соответствует увеличению степени защиты вплоть до цифры 6, означающей пыленепроницаемое исполнение.

Вторая цифра 0...8 обозначает защиту двигателя от воздействия влаги и соответствует диапазону от полного отсутствия защиты (0) до способности двигателя длительно работать при погружении в воду (8).

Двигатели с высокой степенью защиты, изготавливаются в защитных оболочках, исключающих попадание внутрь пыли и влаги. Для теплоотвода они снабжаются герметичными воздуховодами, присоединяемыми к системе вентиляции.

Двигатели, работающие в закрытых помещениях с нормальной средой, могут иметь степень защиты от *IP*00 до *IP*20; работающие на открытом воздухе – должны иметь степень защиты не менее *IP*44. В общем случае степень защиты двигателей, используемых в приводах различных установок, определяется соответствующей нормативно-технической документацией.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какими принципами следует руководствоваться при выборе типа лвигателя?
- 2. Как обозначается степень защиты двигателя?
- 3. Что означает первая (вторая) цифра в обозначении степени защиты двигателя?



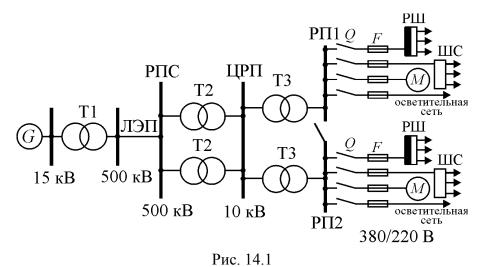
14. Общие вопросы электроснабжения и электробезопасности

Подавляющее большинство электрической энергии, используемой на производстве и в быту, производится промышленным способом, а затем распределяется по потребителям. При этом часто вопросы экономики вступают в противоречие с вопросами безопасности эксплуатации электроустановок и требуют от потребителя знания принципов и основных норм использования электроэнергии.

14.1. Общие вопросы электроснабжения

<u>14.1.1. Электрические сети</u>

Системой электроснабжения называется совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией. Она включает в себя электрические станции, трансформаторы, воздушные и кабельные линии электропередачи и низковольтные электрические сети.



Одна из типовых схем электроснабжения
показана на рис.
14.1. Генератор
электростанции *G*, приводимый в
движение водой,
паром или газовой турбиной,
вырабатывает
электроэнергию
при напряжении

6...35 кВ. Трансформатор Т1 повышает напряжение до уровня 35...1150 кВ, при котором передача энергии по воздушной или кабельной линии (ЛЭП) экономически наиболее выгодна. Далее электроэнергия поступает на районные распределительные подстанции (РПС), которые с помощью специальных ЛЭП (на схеме не показаны) объединяются в единую энергосистему, управляемую из одного центрального пункта. От районной РПС энергия поступает на центральную распределительный пункт (ЦРП) крупного предприятия или группы мелких предприятий, где трансформаторами Т2 напряжение понижается до 6...10 кВ, а затем распределяется по цеховым распределительным пунктам (РП1, РП2, ...) и снова понижается (Т3) до стандартного значения 380/220 В. На распределительных пунктах помимо трансформаторов устанавливаются разъединители Q и предохранители F. К шинам РП подключаются мощные потребители, например, двигатели M, а также шинные сборки ШС и распределительные шкафы РШ, питающие более мелких потребителей



и реализующие схемы резервного электроснабжения. Отдельные линии выделяются для питания осветительной сети.

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) предусмотрено питание потребителей от сетей с глухозаземлённой и с изолированной нейтралью. Глухозаземлённой нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединённая непосредственно к заземляющему устройству, а изолированной нейтралью — нейтраль не присоединённая к заземляющему устройству.

Для основной массы потребителей используются четырёхпроводные сети с глухозаземлённой нейтралью. Это позволяет потребителям использовать линейное и фазное напряжения, а также организовать эффективную защиту сети от перегрузок. Трёхпроводные сети с изолированной нейтралью применяются для питания установок с повышенной опасностью поражения людей электрическим током (шахты, судовые электрические сети, помещения с повышенной влажностью и т.п.).

14.1.2. Защита электрических сетей

Защита электрических сетей от аварийных режимов является одной из главных задач проектирования и эксплуатации, т.к. выход из строя электрооборудования может привести к тяжёлым последствиям для людей и к значительным материальным потерям.

К аварийным режимам в первую очередь относятся короткие замыкания. При замыкании ток в цепи ограничивается только малыми сопротивлениями проводов и может достигать значений, в десятки раз превосходящих нормальный ток нагрузки, а также допустимый ток проводников. В соответствии с ПУЭ электрические сети должны защищаться от одно-, двух- и трёхфазных коротких замыканий и перегрузок. Динамические и термические нагрузки на проводники, возникающие при коротких замыканиях, могут вызывать их разрушение и вторичные эффекты в виде пожаров, взрывов и т.п. с ещё более тяжёлыми последствиями.

Другим видом аварии, требующим контроля и защиты, является перегрузка сетей, т.е. работа при токах, превышающих расчётные значения. Это вызывает повышенное нагревание проводников, приводящее к ускоренному старению и/или разрушению изоляции, что, в свою очередь, может вызвать короткое замыкание. От перегрузки должны быть защищены все сети внутренних помещений, выполненные открыто проложенными изолированными проводами с горючей оболочкой, а также сети, к которым подключены осветительные и бытовые приборы. От перегрузки должны быть защищены также сети, относящиеся к первой категории электроснабжения, перерыв в электроснабжении которых может повлечь за собой тяжёлые последствия. В отличие от короткого замыкания, перегрузки не приводят к быстрому выходу из строя оборудования и при квалифицированном обслуживающем персонале могут быть своевременно устранены без тяжёлых последствий.



Защита от коротких замыканий в электрических сетях должна обладать минимальным временем срабатывания и по возможности обеспечивать селективность отключения. Под *селективностью* понимают способность отключения аварийного участка в конце защищаемой линии. Это необходимо для сохранения энегоснабжения оборудования, подключённого к исправным шинам ближе к источнику питания.

Согласно ПУЭ в сетях с глухозаземлённой нейтралью должна быть обеспечена защита от однофазных и многофазных замыканий, а в сетях с изолированной нейтралью – от двух- и трёхфазных замыканий.

Для защиты от коротких замыканий применяются предохранители с плавкими вставками и автоматические выключатели. Оба вида устройств характеризуются временем срабатывания, номинальным током, который они выдерживают неограниченное время без отключения, а также времятоковой или защитной характеристикой.

Автоматические выключатели являются более совершенными устройствами, чем предохранители. Они могут отключать сразу три фазы защищаемого участка, имеют более точные защитные характеристики и исключают возможность применения некалиброванных элементов. Кроме того, сразу после срабатывания автоматические выключатели готовы к повторному подключению сети.

Обычно автоматические выключатели имеют комбинированные расцепители, размыкающие защищаемую цепь при различном характере перегруз-

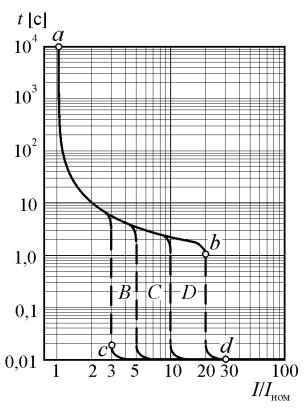


Рис. 14.2

ки. На рис. 14.2 показаны защитные характеристики автоматических выключателей различных типов с комбинированным тепловым и электромагнитным расцепителем.

Участок *ab* защитной характеристики соответствует работе теплового расцепителя, т.е. механизма размыкающего контакты выключателя за счёт нагревания металлической пластины протекающим электрическим током. Он срабатывает при длительном протекании тока небольшой кратности по отношению к номинальному и защищает электрическую цепь от перегрузки. Например, на рис. 14.2 показана защитная характеристика выключателя, в котором двукратный ток вызовет отключение цепи, если он будет протекать в течение 10 с.



Трёх- и более кратные токи, обычно возникающие при коротких замыканиях, вызывают срабатывание электромагнитного расцепителя, отключающего цепь почти мгновенно (участок cd характеристики). Действие электромагнитного расцепителя основано на втягивании ферромагнитного сердечника в магнитное поле катушки, в обмотке которой протекает ток защищаемой цепи.

По настройке электромагнитного расцепителя автоматические выключатели делятся на три типа -B, C и D. Они срабатывают при различных кратностях тока, что позволяет исключить ложные срабатывания защиты при кратковременных перегрузках сети, связанных с переходными режимами различных установок. Тип B с нормальной защитной характеристикой, допускающей 3...5-кратную перегрузку, используется в осветительных и бытовых сетях, в которых практически отсутствуют пусковые режимы оборудования. Выключатели типа C с более медленной характеристикой, соответствующей 5...10-кратному току, используют в сетях, питающих, например, электроприводы с нормальными условиями пуска прямым включением в сеть. Защиту сетей, питающих установки с тяжёлыми условиями переходных режимов, например, сварочное оборудование или мощный электропривод, осуществляют выключателями со сверхмедленной характеристикой типа D, допускающей 10...20-кратную перегрузку в течение приблизительно одной секунды.

Ток срабатывания автоматического выключателя или плавкой вставки выбирают таким образом, чтобы он был возможно ближе к расчётному или номинальному току защищаемого участка сети, но при этом не происходило отключение при кратковременных перегрузках.

<u>14.1.3. Потери энергии в электрических сетях и способы повышения</u> экономических показателей

Передача электрической энергии от источника к потребителям сопровождается потерями в электросетях, составляющими в среднем 5...7%. Величина потерь зависит от нагрузки, состояния и протяжённости сетей, режимов работы электрооборудования и проявляется в виде уменьшения напряжения питания у потребителей.

Потери напряжения происходят в трансформаторе, питающем нагрузку, и в линии электропередачи. Потери в трансформаторе в процентах от номинального значения можно оценить как

$$\Delta u_{\scriptscriptstyle T}\% = \beta(u_{\scriptscriptstyle a}\%\cos\varphi + u_{\scriptscriptstyle p}\%\sin\varphi), \qquad (14.1)$$

где $\beta = I/I_{\text{ном}}$ — коэффициент нагрузки трансформатора; $u_{\text{а}}$ %, u_{p} % — относительные значения активного и реактивного напряжения короткого замыкания в процентах; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки.

Аналогично оценивается потери напряжения в линии

$$\Delta u_{_{\rm II}}\% = 100 IL(r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)/U_{_{\rm HOM}},$$
 (14.2)



где I — действующее значение тока; $U_{\text{ном}}$ — номинальное значение напряжения; r_0, x_0 — удельные значения активного и реактивного сопротивления линии длиной L.

Общие потери равны сумме потерь в трансформаторе и в линии
$$\Delta u\% = \Delta u_{_{\rm T}}\% + \Delta u_{_{\rm I}}\% \tag{14.3}$$

Из выражений (14.1)-(14.3) следует, что уменьшить потери электроэнергии в данной сети можно увеличением КПД нагрузки, т.к. при этом уменьшается активная составляющая потребляемого ею тока, а также увеличением коэффициента мощности нагрузки, т.е. уменьшением реактивной составляющей потребляемого тока.

Основными потребителя электроэнергии в промышленности являются асинхронные двигатели, обладающие хорошими энергетическими показателями при нагрузке близкой к номинальной. Однако при снижении нагрузки КПД и коэффициент мощности двигателя резко уменьшаются, что вызывает увеличение потерь в трансформаторе и линии передачи энергии. Поэтому необходимо обеспечить правильный выбор мощности двигателей и в случае работы привода с нагрузкой двигателя менее 70% номинальной мощности целесообразно произвести его замену.

Наихудшими энергетическими показателями обладают асинхронные двигатели в режиме холостого хода. Поэтому в оборудовании, где двигатель по условиям технологического процесса длительное время работает вхолостую целесообразно отключать его от сети.

По этой же причине при проектировании технологических процессов следует создавать непрерывные циклы, обеспечивающие постоянную полную загрузку оборудования.

Эффективным средством повышения КПД технологического оборудования является также переход к регулируемым электроприводам вместо нерегулируемых. В этом случае, например, в приводах насосных агрегатов расход электроэнергии снижается примерно на 30%.

Если выбором двигателей и приводов, а также организацией технологического процесса не удаётся поднять коэффициент мощности до требуемого уровня, то для компенсации потребляемой реактивной мощности устанавливают конденсаторные батареи или синхронные компенсаторы.

Потери энергии в сетях являются серьёзной экономической проблемой, поэтому для крупных потребителей нормируется средневзвешенный коэффициент мощности оборудования, рассчитываемый по показаниям счётчиков активной $W_{\rm a}$ и реактивной $W_{\rm p}$ энергий

$$tg\varphi_c = W_p/W_a$$
,

откуда

$$\cos\phi_c = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\phi_c}} \,.$$



При работе потребителя с коэффициентом мощности, превышающим нормированное значение, производится скидка с тарифа оплаты электроэнергии, а за понижение $\cos \phi_c$ тариф повышают или применяют штрафные санкции. Таким образом, экономическими методами потребителей вынуждают к применению мер по повышению качественных показателей расходуемой электроэнергии.

Вопросы для самопроверки

- 1. Что включает в себя система электроснабжения?
- 2. Для чего повышают выходное напряжение генератора?
- 3. Сколько ступеней используют при понижении напряжения?
- 4. Что такое сеть с глухозаземлённой (изолированной) нейтралью?
- 5. Где и почему используют сети с глухозаземлённой и с изолированной нейтралью?
- 6. Какие виды защиты используют в электрических сетях?
- 7. Какие требования предъявляются к устройствам защиты?
- 8. Какие средства используют для защиты сетей от коротких замыканий?
- 9. Что такое времятоковая характеристика?
- 10. От чего защищает цепь комбинированный автоматический выключатель?
- 11. Чем отличаются друг от друга автоматические выключатели типов B, C и D?
- 12. Как выбирают ток срабатывания средств защиты?
- 13. В каких элементах электрической сети возникают потери энергии?
- 14. Чем определяется величина потерь энергии в электрических сетях?
- 15. Какой энергетический показатель нормируется для крупных потребителей энергии и почему?
- 16. Перечислите меры, применяемые для повышения качества потребляемой электроэнергии.

14.2. Основы электробезопасности

14.2.1. Условия поражения электрическим током

Электрический ток является источником повышенной опасности для человека, что вызывает необходимость строго соблюдения правил эксплуатации электроустановок и соответствующей подготовки обслуживающего персонала.

Поражение электрическим током возможно при прикосновении к токоведущим частям электроустановок или к металлическим частям оборудования, оказавшимся под напряжением вследствие нарушения изоляции. Возможно также поражение током в результате приближения человека к установкам с неисправной защитой и замкнутыми на землю токоведущими частями.

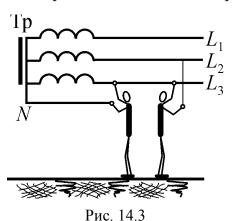


Тело человека обладает определённым электрическим сопротивлением, изменяющимся в широких пределах (от 500 до 100000 Ом) и зависящим от многих причин: состояния здоровья, состояния и влажности кожного покрова, условий окружающей среды и т.п. В расчётах по технике безопасности сопротивление тела принимается равным 1000 Ом.

Электрический ток вызывает ожоги, механические повреждения тканей, поражение нервной системы. Действие тока ощущается, начиная с 0,5...1,5 мА. При токе 10...15 мА человек не может самостоятельно разорвать цепь поражающего его тока, возникает т.н. «приковывание». Ток 50...60 мА поражает органы дыхания и сердечную мышцу. Считается, что ток в 100 мА представляет смертельную опасность.

Степень воздействия на человека зависит также от характера тока. До напряжения в 300 В более опасен переменный ток. В диапазоне напряжений от 300 до 600 В постоянный и переменный ток представляют одинаковую опасность, а выше 600 В более опасным является постоянный ток.

По степени опасности поражения током ПУЭ разделяют помещения, в которых находится электрооборудование, на три категории. К первой относятся помещения без повышенной опасности — сухие помещения с непроводящими полами, без металлоконструкций, токопроводящей пыли и влажности. К двум другим категориям относятся помещения с повышенной опасностью и особо опасные. Это влажные помещения с повышенной температурой, с токопроводящими полами, где существует возможность одновременного прикосновения к электрооборудованию и металлоконструкциям.

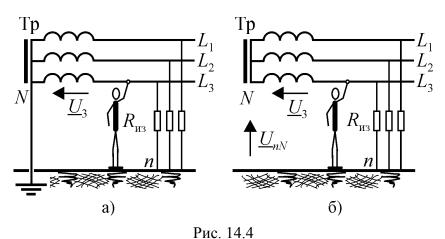


Тяжесть поражения электрическим током определяется также контуром, по которому он замыкается в теле человека. Наибольшую опасность представляет прикосновение к токоведущим частям двумя руками, когда ток замыкается через органы грудной клетки (рис. 14.3). В сети с напряжениями 380/220 В при прикосновении к фазному и нулевому проводу ток может достигать значения $I = U_{\phi}/R \approx 220$ мА, а при прикосновении к линейным проводам — $I = U_{\pi}/R \approx 380$ мА, где: U_{ϕ} , U_{π} — фазное

и линейное напряжение, а $R \approx 1000~{\rm Om-conpotub}$ ление тела. Что, безусловно, смертельно опасно для человека.

Прикосновение к неизолированному линейному проводу одной рукой или какой-либо частью тела также опасно, т.к. при этом тело человека и сопротивления изоляции проводов по отношению к земле $R_{\rm us}$ образуют несимметричную нагрузку с нейтральной точкой n (рис. 14.4). При этом к человеку прикладывается напряжение $\underline{U} = \underline{U}_3 - \underline{U}_{nN}$. В сети с глухозаземлённой





нейтралью (рис. 14.4, a) $U_{nN} = 0$ и напряжение, приложенное к человеку, оказывается равным фазному. В случае изолированной нейтрали (рис. 14.4, δ) к человеку прикладывается разность фазного напряжения и напряжения между нейтральными точка-

ми, значение которой стремится к нулю при $R_{\rm u3} \to \infty$, т.к. $\underline{U}_{nN} \xrightarrow{R_{\rm u3} \to \infty} \underline{U}_3$. Поэтому сети с изолированной нейтралью более безопасны и применяются там, где велика вероятность поражения электрическим током.

В случае пробоя изоляции и замыкании провода на землю в сети с глухозаземлённой нейтралью возникает короткое замыкание (рис. 14.5, a). После чего срабатывает защита и опасная ситуация ликвидируется. В сети с изолированной нейтралью короткого замыкания не возникает и аварийная ситуация может существовать длительно (рис. 14.5, δ). При этом напряжения на двух других проводах относительно земли становятся равными линейному напряжению ($\underline{U}_{nN} = \underline{U}_2 \Rightarrow \underline{U} = \underline{U}_3 - \underline{U}_2 = \underline{U}_{23}$), т.е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз,

что существенно увеличивает опасность поражения электрическим током в случае прикосновения.

Кроме прикосновения к токоведущим проводам сети опасность для здоровья и жизни человека возникает при прикосновении к корпусам элек-

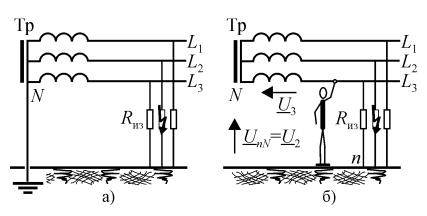
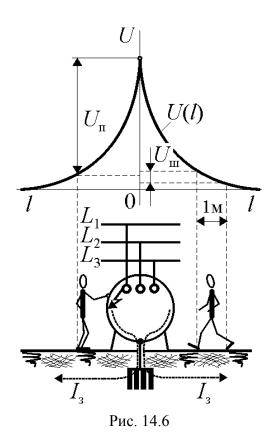


Рис. 14.5

троустановок, находящихся под напряжением в результате пробоя изоляции, а также в случае приближения к ним (рис. 14.6). В соответствии с ПУЭ металлические корпуса электроустановок должны быть заземлены, т.е. электрически соединены землёй, и в случае пробоя изоляции по земле от точки заземления растекается ток замыкания на землю I_3 . Он создаёт на поверхности земли распределённую разность потенциалов U(l), называемую напряжением на заземляющем устройстве, где l – расстояние от точки заземле-





ния. В результате находящийся в этом поле человек подвергается действию напряжения равного разности потенциалов между точками его касания земли. Различают два воздействующих на человека значения напряжения: напряжение прикосновения $U_{\rm m}$ и напряжение шага $U_{\rm m}$ (рис. 14.6). Первое является разностью потенциалов между двумя точками цепи тока замыкания на землю при одновременном прикосновении к ним человека, а второе — разностью потенциалов при одновременном касании этих точек ногами человека. Нормативной шириной шага при этом считают один метр.

<u>14.2.2. Защита от поражения элек-</u> трическим током

Для защиты людей от поражения электрическим током ПУЭ требуют применения, по крайней мере, одной из сле-

дующих защитных мер: заземление, зануление, защитное отключение, разделение электрических цепей, понижение напряжения и применение двойной изоляции.

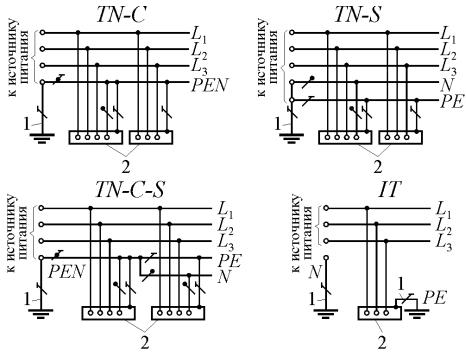
Заземление и зануление являются главными средствами защиты от поражения. Под заземлением понимают преднамеренное электрическое соединение открытых токопроводящих частей электроустановок, не находящихся под напряжением, с заземляющими устройствами. В качестве заземляющих устройств используют естественные и искусственные металлические конструкции, находящиеся в земле и имеющие с ней электрический контакт, по возможности, большей площади. В качестве естественных заземляющих устройств используют проложенные в земле водопроводные трубы, трубы скважин, металлические и железобетонные конструкции зданий, находящиеся в контакте с землёй, свинцовые оболочки кабелей, рельсовые пути неэлектрифицированных железных дорог и т.п. Искусственные заземлители представляют собой стальные сварные конструкции с большой площадью поверхности, закопанные в плотный грунт.

Занулением называется преднамеренное соединение открытых токопроводящих частей электроустановок, не находящихся под напряжением, с глухозаземлённой нейтралью генератора или трансформатора.

Заземлению и/или занулению подлежат все доступные прикосновению металлические корпуса и конструкции электрооборудования, которые при нарушении целостности изоляции могут оказаться под напряжением.



Электрические сети переменного тока согласно ПУЭ выполняются либо с глухозаземлённой нейтралью, либо с изолированной нейтралью (рис. 14.7). Системы питания с глухозаземлённой нейтралью обозначают буквами TN, а с изолированной нейтралью буквами IT. В зависимости от режима использования нулевого (нейтрального) провода реализация системы TN возможна в трёх вариантах: с нулевым (нейтральным) проводом, используемым на всём



- 1 заземлитель;
- 2 открытые проводящие части электроустановки;
- Z нулевой защитный проводник(PE);
- совмещённый нулевой рабочий и защитный проводник (PEN)

Рис. 14.7

протяжении как рабочий и как защитный проводник (PEN)— система TN-C; с раздельными рабочим (N) и защитным (PE) проводниками на всём протяжении — система TN-S; с совмещённым нулевым проводником (PEN) на начальном участке сети и последующим разделением его на рабочий и защитный проводники. — система TN-C-S. Под рабочим нулевым проводом понимают проводник, используемый для питания приёмников и соединённый с глухозаземлённой нейтралью, а под защитным — проводник, соединяющий с нейтралью зануляемые части электроустановок.

В системах TN основным средством защиты является зануление. Использование заземления в таких сетях допускается только в сочетании с занулением. Это связано с тем, что при отсутствии зануления в случае пробоя изоляции корпус электроустановки окажется под напряжением, примерно равным половине фазного напряжения. При этом защита от короткого замыкания может не сработать, если её уставка больше тока короткого замыкания



на землю $I_3 = U_{\phi} / (R_N + R_e)$, где R_N , R_e — сопротивления заземляющих устройств трансформатора и заземлённой электроустановки. При нормативном значении сопротивлений $R_N = R_e = 4$ Ом и фазном напряжении 220 В ток замыкания на землю составит 27,5 А, что соответствует нагрузке 6 кВт. Следовательно, при пробое изоляции в сетях с защитой, рассчитанной на большую мощность, отключение не произойдет.

В системах IT основным средством защиты является заземление, которое должно сочетаться с контролем сопротивления изоляции или защитным отключением.

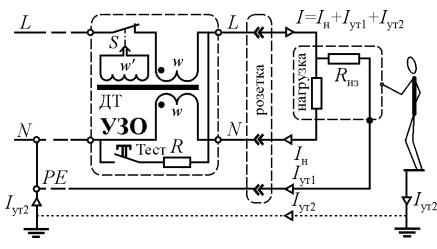


Рис. 14.8

Зашитное omключение является современным эффективным средством защиты для любой системы питания. Оно реализуется с помощью устройств защитного отключения (y30),основным элементом которых являетдифференциальный трансформатор

(ДТ) (рис. 14.8). Он представляет собой трансформатор с двумя одинаковыми обмотками w, включёнными последовательно встречно в линейный и нулевой провод цепи питания нагрузки. При одинаковых токах в обеих обмотках магнитный поток в сердечнике трансформатора равен нулю. Соответственно равна нулю и ЭДС, наводимая этим потоком в третьей обмотке (w'). Если через изоляцию нагрузки (R_{μ_3}) происходит утечка, то токи в линейном проводе L и в нулевом рабочем проводе N будут отличаться и в обмотке управления трансформатора w' появится ЭДС, величина которой будет пропорциональна разности токов, т.е. току утечки $I_{\rm yr1}$ + $I_{\rm yr2}$. Причём, путь, по которому происходит утечка тока не имеет значения, и устройство одинаково реагирует как на старение или пробой изоляции (I_{vr1}), так и на прямое или косвенное прикосновение человека к токоведущим частям установки (I_{vr2}) . При превышении током утечки заданного порогового значения сигнал с обмотки управления воздействует на ключ S и отсоединяет нагрузку от линейного провода. Ток срабатывания УЗО составляет величину не более 30 мА, а время срабатывания не превышает 10 мс, что практически полностью обеспечивает безопасность людей. Однако для повышения надёжности в УЗО



предусмотрен режим тестирования исправности, когда с помощью кнопки «Тест» имитируется утечка с номинальным пороговым значением.

Понижение напряжения до безопасного уровня (менее 42 В) широко используется на производстве для питания ручного электроинструмента и местного освещения. Однако при этом не исключается опасность пробоя изоляции между обмотками высшего и низшего напряжений понижающего трансформатора, имеющего обычное исполнение, и поражение электрическим током, т.к. вторичная обмотка понижающего трансформатора и корпус должны быть заземлены или занулены. В ответственных случаях используют разделительные трансформаторы. Они имеют специальную конструкцию с усиленной изоляцией и заземлённым экраном между обмотками, исключающим возможность перехода напряжения первичной обмотки на вторичную при пробое изоляции. Напряжение вторичной обмотки разделительного трансформатора ограничено 380 В, и к нему можно подключать только один приёмник с мощностью соответствующей току первичной обмотки не превышающему 15 А. При этом не допускается заземление вторичной обмотки.

В некоторых случаях, например, для переносных приёмников защиту от поражения током осуществляют с помощью двойной или усиленной изоляции. При использовании двойной, т.е. рабочей и защитной изоляция проводников, предполагается, что повреждение одной из её составляющих не приводит к появлению опасных напряжений в местах доступных прикосновению. Усиленная изоляция в соответствии с требованиями ПУЭ должна обеспечивать степень защиты эквивалентную двойной изоляции.

Вопросы для самопроверки

- 1. Какая величина тока смертельно опасна для человека?
- 2. Какой вид тока более опасен постоянный или переменный?
- 3. Почему прикосновение двумя руками к токоведущим элементам оборудования наиболее опасно?
- 4. Почему сеть с изолированной нейтралью считается более безопасной?
- 5. Почему для электроснабжения жилых зданий и освещения используют сети с глухозаземлёной нейтралью?
- 6. Какую опасность для человека создаёт пробой изоляции электрооборудования?
- 7. Что такое напряжение прикосновения и напряжение шага?
- 8. Какие меры предусмотрены правилами устройства электроустановок для защиты людей от поражения электрическим током?
- 9. Что такое заземление (зануление)?
- 10. Что такое рабочий, защитный и совмещённый нулевой провод?
- 11. Что такое защитное отключение?
- 12. Как работает устройство защитного отключения?



- 13. От каких опасных ситуаций в сети защищает устройство защитного отключения?
- 14. Какой уровень напряжения считается безопасным для человека?
- 15. Чем отличаются трансформаторы, используемые для понижения напряжения и для разделения электрических цепей?

Литература

- 1. Электротехника: учебник для вузов/А.С. Касаткин, М.В. Немцов. 10-е (9-е) изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2007 (2005). 544 с.
- 2. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 400 с.
- 3. Электротехника/Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В.Е. Шатерников: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 528 с.
- 4. Общая электротехника: Учеб. пособие для вузов/Под ред. А.Т. Блажкина. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 592 с.
- 5. Прянишников В.А. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: Практическое пособие / В.А. Прянишников, Е.А. Петров, Ю.М.. Осипов СПб.: Корона принт, 2001. 336 с., ил.



<u>Глоссарий</u>

A

Автотрансформатор — вид трансформатора, в котором между первичной и вторичной обмотками кроме магнитной существует также электрическая связь.

Активная мощность – мощность, соответствующая электрической энергии, преобразуемой двухполюсником в неэлектрические виды при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

Активная проводимость – вещественная часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

Активное напряжение — составляющая входного напряжения двухполюсника, совпадающая по фазе с током и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном токе.

Активное сопротивление — вещественная часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность преобразования двухполюсником электрической энергии в неэлектрические виды.

Активный слой ротора гистерезисного двигателя — часть ротора в виде сплошного или состоящего из колец полого цилиндра, который в асинхронном режиме перемагничивается за счёт МДС статорной обмотки.

Активный ток — составляющая входного тока двухполюсника, совпадающая по фазе с напряжением и соответствующая активной мощности, преобразуемой двухполюсником при данном входном напряжении.

Асинхронный двигатель с двойной «беличьей клеткой» — двигатель с двумя «беличьими клетками» в пазах ротора, в результате чего пусковой момент увеличивается не только за счёт изменение сопротивления ротора, вызванного вытеснением тока в наружную клетку при пуске, но также за счёт различия сопротивлений клеток.

Асинхронный двигатель с экранированными (расщеплёнными) полюсами — явнополюсный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, у которого часть полюса охвачена (экранирована) короткозамкнутым витком, создающим фазовый сдвиг магнитного потока в экранированной части, в результате чего потоки экранированной и неэкранированной частей формируют вращающееся магнитное поле.

Асинхронный пуск — ввод синхронного двигателя в синхронизм путём разгона ротора до скорости близкой к синхронной с помощью асинхронного вращающего момента, создаваемого пусковой короткозамкнутой обмоткой,



расположенной на роторе, или присоединённым к валу пусковым асинхронным двигателем.

Б

Безредукторный электропривод — электропривод, не имеющий механических преобразователей координат движения, в котором управление движением осуществляется электрическим регулятором.

«Беличья клетка» — название конструкции обмотки ротора асинхронного двигателя, состоящей из нескольких стержней и двух колец, замыкающих их по краям, и внешне напоминающая прототип, от которого произошло название.

Беспазовый якорь — конструкция якоря исполнительного двигателя постоянного тока, в которой проводники обмотки якоря расположены на гладкой цилиндрической поверхности якоря, чем достигается уменьшение индуктивности обмотки и улучшение условий коммутации.

B

Вебер-амперная характеристика — зависимость потокосцепления участка электрической цепи от протекающего по нему тока.

Векторная диаграмма – совокупность векторов, изображающая синусоидальные токи, напряжения и ЭДС, действующие в электрической цепи.

Ветвь электрической цепи — связная совокупность элементов электрической цепи, образующих путь для протекания тока между двумя узлами.

Вихревые токи (токи Фуко) — электрический ток, возникающий под действием ЭДС индукции в проводящей среде, находящейся в изменяющемся магнитном потоке, и замыкающийся по концентрическим контурам, охватывающим магнитные линии.

Внешняя характеристика автономного синхронного генератора — зависимость напряжения на выходе генератора от величины тока нагрузки при неизменном коэффициенте мощности нагрузки, номинальном токе возбуждения и скорости вращения.

Внешняя характеристика источника электрической энергии — зависимость напряжения на выходе источника от тока в нагрузке.

Внешняя характеристика трансформатора — зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от величины тока нагрузки.

Вольт-амперная характеристика — зависимость напряжения на участке электрической цепи от протекающего по нему тока.

Вольт-кулонова характеристика — зависимость напряжения на участке электрической цепи от величины заряда на его концах.



Вращающееся магнитное поле — магнитное поле, ось которого проходящая через центры полюсов вращается в пространстве.

Времятоковая (защитная) характеристика — зависимость времени срабатывания защиты от величины протекающего тока.

Вторичная обмотка трансформатора – обмотка, к которой подключается нагрузка трансформатора.

Входной ток (напряжение) двухполюсника — ток (напряжение) в точках подключения двухполюсника к внешней цепи.

Выход («выпадение») из синхронизма — переход синхронной машины в асинхронный режим при превышении моментом нагрузки величины максимального момента, развиваемого машиной.

Г

Гистерезисный двигатель — синхронный двигатель, у которого в асинхронном режиме происходит перемагничивание материала ротора (изменение положения оси магнитного поля) и за счёт этого создаётся вращающий момент, величина которого зависит от формы гистерезисной петли.

Главные полюсы машины постоянного тока — конструкция из ферромагнитного материала, предназначенная для создания и распределения основного магнитного потока в машине.

Глубокопазный асинхронный двигатель — двигатель, у которого глубина пазов сердечника ротора значительно больше ширины, за счет чего усиливается эффект вытеснения тока в наружные слои стержней обмотки при пуске и увеличивается пусковой момент.

Д

Двигатель с принудительной вентиляцией — двигатель, в котором вентиляция осуществляется внешним двигателем и теплоотвод не зависит от скорости вращения.

Двойная изоляция — совокупность рабочей и защитной изоляции, при которой исключается прикосновение к частям электроустановки с опасным напряжением при повреждении только рабочей или только защитной изоляции.

Двухполюсник — часть электрической цепи, подключённая к ней двумя проводами (в двух точках).

Двухфазный асинхронный двигатель – двигатель с короткозамкнутым ротором, имеющий две фазные обмотки, смещённые в пространстве на 90°, управление которым осуществляется путём изменения амплитуды и/или фазового сдвига напряжения питания одной из обмоток.



Действующее (эффективное, среднеквадратичное) значение синусоидальной величины — значение эквивалентное по количеству тепла, выделяющемуся в цепи постоянного тока при тех же условиях.

Динамическое торможение — торможение двигателя путём преобразования механической энергии в электрическую и рассеянием её в обмотке якоря или во внешнем сопротивлении.

Дифференциальное (динамическое) сопротивление — отношение приращения падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к приращению протекающего по нему току вблизи некоторой точки вольт-амперной характеристики.

Длительный режим работы электропривода – режим работы привода с постоянной нагрузкой, при котором температура двигателя достигает установившегося значения.

Добротность катушки индуктивности — отношение индуктивного сопротивления катушки к её активному сопротивлению.

Добротность конденсатора — отношение ёмкостного сопротивления конденсатора к его активному сопротивлению.

Дополнительные полюсы машины постоянного тока — конструкция из ферромагнитного материала, расположенная между главными полюсами и предназначенная для компенсации магнитного потока реакции якоря в межполюсном пространстве.

Ë, E

Ёмкостное сопротивление — параметр ёмкостного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

Ёмкостный элемент — идеальный элемент электрической цепи (идеальный конденсатор), обладающий только электрической ёмкостью.

Ёмкость (электрическая ёмкость) — параметр, характеризующий способность конденсатора формировать электрическое поле с определённым запасом энергии и численно равный отношению величины заряда, накапливаемого конденсатором к величине напряжения на его электродах.

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя — механическая характеристика, соответствующая номинальному напряжению и частоте питания и отсутствию сопротивлений в цепи фазного ротора.

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока — механическая характеристика, соответствующая номинальным значениям напряжения на якоре и тока возбуждения и отсутствию добавочного сопротивления.



Естественный заземлитель — используемые для заземления металлические конструкции и коммуникации зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй.

Ж

Жёсткость механической характеристики — отношение приращения вращающего момента двигателя к приращению скорости или производная dM/dn, характеризующее реакцию двигателя на изменение нагрузки.

3

Заземление — преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством.

Заземляющее устройство (заземлитель) — совокупность соединённых между собой металлических проводников, находящихся в соприкосновении с землёй.

Закон полного тока — линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, равен полному электрическому току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

Законы коммутации — следствия закона сохранения энергии, отражающие непрерывность тока в индуктивном элементе и напряжения на ёмкостном элементе при коммутации.

Замедленная (ускоренная) коммутация – коммутация, при которой ток в коммутируемой секции достигает нулевого значения после (до) середины периода коммутации.

Зануление — преднамеренное электрическое соединение токопроводящих частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземлённой нейтралью генератора или трансформатора.

Защитное заземление — заземление токопроводящих частей электроустановок для обеспечения электробезопасности.

Защитное отключение – автоматическое отключение всех фаз участка цепи, обеспечивающее безопасное сочетание величины тока и времени его протекания при замыкании на корпус или уменьшения сопротивления изоляции ниже определённого уровня.

И

Идеальный ключ — элемент электрической цепи, имеющий два состояния, в которых он обладает нулевым и бесконечно большим активным сопротивлением, и мгновенно меняющий состояние в заданный момент времени.



Измерительные трансформаторы – трансформаторы напряжения и тока, включаемые между прибором и измерительной цепью для обеспечения безопасности измерений и приведения измеряемых величин к уровню доступному измерению стандартными приборами.

Индуктивное сопротивление — параметр индуктивного элемента электрической цепи, определяющий соотношение между величиной тока и напряжения на нём.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки – индуктивное сопротивление, соответствующее индуктивности рассеяния.

Индуктивность — параметр, определяющий энергию магнитного поля участка электрической цепи и численно равный отношению величины потокосцепления этого участка к величине протекающего по нему тока

Индуктивность (индуктивное сопротивление) реакции якоря синхронной машины — индуктивность (индуктивное сопротивление), соответствующая потокосцеплению потока реакции якоря с фазной обмоткой статора.

Индуктивность рассеяния обмотки — индуктивность, определяющая взаимосвязь между величиной магнитного потока рассеяния и тока в обмотке электромагнитного устройства, возбуждающего этот поток.

Индуктивный элемент – идеальный элемент электрической цепи (идеальная катушка), обладающий только индуктивностью.

Искусственный заземлитель — используемая для заземления специальная металлическая конструкция, находящаяся в соприкосновении с землёй.

Исполнительный двигатель – двигатель, предназначенный для работы в системах автоматического управления, вследствие чего к нему предъявляются особые требования по быстродействию, устойчивости, плавности и диапазону регулирования скорости вращения, а также по надёжности работы и массогабаритным показателям.

Источник тока — источник электрической энергии, формирующий в подключённой к нему электрической цепи ток, не зависящий от величины и направления падения напряжения.

Источник ЭДС (источник напряжения) – источник электрической энергии, формирующий в точках подключения к нему электрической цепи разность потенциалов, не зависящую от величины и направления протекания тока.

Источник электрической энергии — преобразователь неэлектрических видов энергии (механической, химической, тепловой и др.) в электрическую.



К

Катушечная группа – группа последовательно соединённых катушек, принадлежащих одной фазе и уложенных в соседние пазы.

Катушка – группа последовательно соединённых витков, уложенных в одни и те же пазы, и имеющая помимо изоляции отдельных витков общую изоляцию от стенок паза.

Катушка индуктивности — элемент электрической цепи (физический объект), предназначенный для формирования магнитного поля с заданными свойствами.

Коллектор – набор изолированных медных пластин, образующих цилиндрическую поверхность для скользящего контакта, к которым присоединены выводы секций обмотки якоря.

Коммутация — мгновенное изменение схемы соединения или параметров элементов электрической цепи.

Коммутация — процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением направления протекания тока.

Коммутируемая секция – секция, находящаяся в процессе коммутации.

Компенсационная обмотка машины постоянного тока — обмотка, расположенная в пазах главных полюсов и предназначенная для компенсации искажения магнитного поля под полюсами полем реакции якоря.

Комплексная амплитуда – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным амплитуде синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

Комплексная проводимость — параметр электрической цепи, обратный комплексному сопротивлению и определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двухполюсника.

Комплексное действующее значение (комплексное значение) – комплексное число, соответствующее вектору с модулем, равным действующему значению синусоидальной величины и составляющему с вещественной осью угол, равный её начальной фазе.

Комплексное сопротивление — параметр электрической цепи, определяющий амплитудное и фазовое соотношения между напряжением и током двух-полюсника.

Комплексный (символический) метод расчёта — основной метод расчёта электрических цепей переменного тока, заключающийся в замене синусоидальных величин и параметров цепи комплексными числами (символами ве-



личин), в результате чего расчёт сводится к решению алгебраических уравнений.

Конденсатор – элемент электрической цепи (физический объект), в электрическом поле которого происходит накопление энергии.

Контур электрической цепи — замкнутый путь вдоль ветвей электрической цепи.

Концентрическая обмотка – распределённая обмотка, состоящая из катушек разной формы, укладываемых одна внутрь другой.

Короткозамкнутый ротор – ротор асинхронного двигателя с обмоткой типа «беличья клетка».

Коэрцитивная сила — напряжённость магнитного поля, необходимая для снижения до нуля остаточной индукции.

Коэффициент нагрузки трансформатора — отношение величины тока вторичной обмотки трансформатора к номинальному значению.

Коэффициент насыщения — отношение величины МДС создающей основной магнитный поток в машине, к МДС, затрачиваемой на проведение этого потока через воздушный зазор.

Коэффициент тепловой перегрузки двигателя — отношение потерь энергии в двигателе с завышенной мощностью нагрузки, работающем в кратковременном режиме, к потерям при номинальной нагрузке.

Коэффициент трансформации (приведения) — отношение числа витков первичной обмотки трансформатора к числу витков вторичной обмотки, определяющее отношение номинальных напряжений первичной и вторичной обмоток.

Коэффициент ухудшения теплоотдачи — отношение теплоотдачи двигателя при вращении ротора со скоростью ниже номинальной к теплоотдаче при номинальной скорости вращения.

Кратковременный режим работы электропривода — режим пуска и остановки привода, при котором за время работы температура двигателя не успевает достичь установившегося значения, а за время остановки понижается до температуры окружающей среды.

Кратность максимального момента асинхронного двигателя — отношение максимального вращающего момента, развиваемого двигателем, к номинальному моменту, характеризующая способность двигателя противостоять перегрузкам без потери устойчивости.

Кратность пускового момента асинхронного двигателя — отношение вращающего момента, развиваемого двигателем при пуске (при неподвижном роторе), к номинальному моменту.



Кривая размагничивания — часть предельной петли гистерезиса, расположенная во втором квадранте и используемая для расчёта постоянных магнитов.

Критическое скольжение асинхронного двигателя — скольжение, отделяющее участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя.

Круговая диаграмма — окружность, представляющая собой геометрическое место точек концов векторов активного и реактивного напряжения (тока) двухполюсника при всех возможных вариациях его параметров и постоянном входном напряжении (токе).

Круговая диаграмма асинхронного двигателя — окружность геометрического места точек конца вектора тока статора при изменении скольжения от положительной до отрицательной бесконечности.

Круговое вращающееся магнитное поле – вращающееся магнитное поле, индукция которого в любой точке оси проходящей через центры полюсов остаётся постоянной, т.е. магнитное поле, годограф вектора индукции которого является окружностью.

Л

Лабораторный автотрансформатор (**ЛАТР**) – вид автотрансформатора с плавным регулированием выходного напряжения.

Линейная катушка индуктивности — катушка, обладающая линейной вебер-амперной характеристикой

Линейная катушка индуктивности — катушка, обладающая линейной вебер-амперной характеристикой

Линейная коммутация (коммутация сопротивлением) — оптимальная коммутация без искрообразования, при которой ток в коммутируемой секции изменяется по линейному закону.

Линейные напряжения — напряжения между линейными проводами трёхфазной цепи.

Линейные токи – токи в линейных проводах трёхфазной цепи.

Линейный источник электрической энергии — источник, обладающий линейной внешней характеристикой

Линейный провод — проводник, соединяющий источник с нагрузкой в трёхфазной цепи.

Линейный резистор – резистор, обладающий линейной вольт-амперной характеристикой



M

Магнитная индукция — векторная величина, определяющая силу, действующую на движущуюся заряжённую частицу со стороны магнитного поля.

Магнитная цепь — совокупность технических устройств и объектов, возбуждающих магнитные поля и формирующих пути для их распространения, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

Магнитное поле реакции якоря синхронной машины — магнитное поле, возбуждаемое статором (якорем) синхронной машины.

Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) — скалярная величина, определяющая магнитную индукцию в области пространства ограниченной замкнутым контуром и равная потоку вектора магнитной индукции через поверхность этого контура.

Магнитный поток рассеяния обмотки — магнитный поток, ответвляющийся из магнитопровода в воздушную среду и пронизывающий только одну обмотку.

Магнитодвижущая сила — линейный интеграл вектора напряжённости магнитного поля, взятый по замкнутому контуру, охватывающему полный электрический ток, создающий это поле.

Магнитомягкие (магнитотвёрдые) материалы – ферромагнитные материалы с малой (большой) коэрцитивной силой.

Магнитопровод — конструкция из ферромагнитного материала, предназначенная для усиления и формирования магнитного потока.

Малоинерционный якорь — конструкция якоря исполнительного двигателя постоянного тока, в которой для уменьшения момента инерции проводники обмотки якоря отделены от магнитопровода и расположены на диске или цилиндре из немагнитного материала.

Машины постоянного тока с независимым (последовательным, парал- лельным) возбуждением — машины постоянного тока, обмотка возбуждения которых питается от отдельного (независимого) источника или подключена последовательно (параллельно) обмотке якоря.

Машины постоянного тока со смешанным возбуждением — машины постоянного тока с двумя обмотками возбуждения, одна из которых подключается параллельно обмотке якоря, а другая — последовательно.

Метод нагрузочной характеристики — основной графо-аналитический метод определения режима в цепи с одним нелинейным элементом, вольтамперная характеристика которого задана графически, заключающийся в оп-



ределении тока и напряжения в нелинейном резистивном элементе по координатам точки пересечения вольт-амперной характеристики с прямой линией, проведённой через координаты точек режима холостого хода и короткого замыкания двухполюсника, эквивалентного линейной части цепи.

Метод средних потерь – способ оценки нагрева двигателя, основанный на расчёте среднего значения потерь энергии в пределах цикла изменения нагрузки и сопоставлении результата с потерями в номинальном режиме.

Метод эквивалентного момента — способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения момента нагрузки в пределах цикла его изменения с номинальным значением.

Метод эквивалентного тока — способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения тока в пределах цикла его изменения с номинальным значением.

Метод эквивалентной мощности – способ оценки нагрева двигателя, основанный на сопоставлении среднеквадратичного значения мощности нагрузки в пределах цикла её изменения с номинальным значением.

Механическая характеристика асинхронного двигателя — зависимость вращающего момента развиваемого двигателем от скольжения или зависимость скорости вращения от развиваемого момента.

Многоскоростные асинхронные двигатели – двух, трёх и четырёхскоростные двигатели, скорость вращения которых можно изменять ступенями путём изменения схемы соединения обмоток.

H

Намагничивающий ток — часть тока первичной обмотки, расходуемая на возбуждение магнитного потока и на компенсацию тепловых потерь в магнитопроводе.

Напряжение на заземляющем устройстве — напряжение, вызванное током замыкания на землю и распределённое вокруг точки ввода тока в заземляющее устройство.

Напряжение прикосновения — напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю при одновременном прикосновении к ним человека.

Напряжение шага — напряжение между двумя точками на земле, находящимися на расстоянии одного метра, вызванное растеканием тока замыкания на землю.

Напряжённость магнитного поля — векторная величина, определяющая свойства системы возбуждения магнитного поля и численно равная разности векторов индукции и намагниченности среды.



Начальные условия переходного процесса — токи в индуктивных элементах и напряжения на ёмкостных элементах цепи непосредственно перед коммутацией.

Нейтральная (нулевая) точка (нейтраль) – узел в соединении звездой источников или приёмников трёхфазной цепи.

Нейтральная линия (геометрическая нейтраль) — геометрическая ось симметрии между главными полюсами машины постоянного тока.

Нейтральный (нулевой) провод — проводник, соединяющий нейтральные (нулевые) точки источников и приемников в трёхфазной цепи.

Нелинейная электрическая цепь — электрическая цепь, содержащая, по крайней мере, один нелинейный элемент.

Нелинейные элементы электрической цепи — элементы электрической цепи, параметры которых зависят от протекающего по ним тока или от приложенного к ним напряжения, т.е. элементы с нелинейной вольт-амперной, вебер-амперной или кулон-вольтной характеристикой.

Несвязанная трёхфазная система – трёхфазная цепь, не имеющая электрической (гальванической) связи между фазами.

Номинальное напряжение вторичной обмотки — напряжение на вторичной обмотке при отключённой нагрузке трансформатора.

Номинальное напряжение первичной обмотки — расчётное напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Номинальные режимы работы электропривода — три основных и пять дополнительных стандартных режимов распределения нагрузки привода во времени.

Номинальный режим работы электрической цепи – режим, при котором элементы электрической цепи работают в условиях соответствующих данным их проектирования

0

Обмотка возбуждения двухфазного асинхронного двигателя — обмотка, подключаемая к нерегулируемому источнику питания.

Обмотка возбуждения машины постоянного тока — обмотка, расположенная на главных полюсах и предназначенная создания основного магнитного потока машины.

Обмотка возбуждения синхронной машины — обмотка ротора, создающая постоянное магнитное поле.



Обмотка управления двухфазного асинхронного двигателя — обмотка, подключаемая к источнику питания с регулируемой амплитудой или начальной фазой напряжения.

Обратная задача расчёта магнитной цепи — определение магнитных потоков в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитодвижущих силах.

Однофазный асинхронный двигатель – двигатель с короткозамкнутым ротором, питание которого осуществляется от двухпроводной однофазной сети переменного тока.

«Опрокидывание» асинхронного двигателя — остановка двигателя вследствие потери устойчивости.

Опыт короткого замыкания — искусственно созданный режим короткого замыкания при напряжении питания пониженном до значения, при котором ток первичной обмотки равен номинальному, проводимый с целью определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

Опыт холостого хода — искусственно созданный режим холостого хода для определения параметров схемы замещения и качества изготовления трансформатора.

Основной магнитный поток трансформатора — магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, пронизывающий обе обмотки.

Остаточная индукция — индукция в ферромагнитном материале после уменьшения до нуля напряжённости магнитного поля.

П

Параллельная схема замещения двухполюсника — схема замещения, состоящая из параллельного соединения двух элементов, соответствующих активной и реактивной проводимости двухполюсника.

Параллельные ветви обмотки якоря машины постоянного тока — разделение щётками кольцевой схемы соединения секций обмотки якоря на параллельные ветви.

Пассивные элементы электрической цепи – элементы, не производящие электрическую энергию (резистор, катушка индуктивности, конденсатор).

Пассивный двухполюсник – двухполюсник, не содержащий источников электрической энергии.

Первичная обмотка трансформатора – обмотка, подключаемая к источнику электрической энергии.



Переменные потери в трансформаторе — тепловые потери энергии в трансформаторе зависящие от его нагрузки и равные потерям в обмотках.

Переходные процессы — электромагнитные процессы в электрической цепи, возникающие при изменении её состояния и обусловленные перераспределением и преобразованием энергии.

Повторно-кратковременный режим работы электропривода — циклический режим пуска и остановки привода, при котором за время работы температура двигателя не успевает достичь установившегося значения, а за время остановки не успевает понизиться до температуры окружающей среды.

Повышающий (понижающий) трансформатор – трансформатор, у которого номинальное напряжение вторичной обмотки больше (меньше) номинального напряжения первичной обмотки.

Полная (кажущаяся) мощность — условная величина, вводимая для удобства в систему оценок мощности и численно равная предельно возможной активной мощности при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.

Полная проводимость – модуль комплексной проводимости, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

Полное сопротивление — модуль комплексного сопротивления, определяющий соотношение действующих (амплитудных) значений тока и напряжения.

Полный шаг обмотки (витка, катушки) — шаг равный полюсному делению.

Полюсное деление – расстояние между полюсами магнитного поля машины, выраженное в линейных или угловых единицах измерения, а также числом пазов пакета статора или ротора.

Полюсное управление — регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока путём изменения напряжения питания (тока) обмотки возбуждения.

Порядок чередования фаз — последовательность, в которой фазные ЭДС проходят через одинаковые состояния, например, через нулевые значения.

Последовательная схема замещения двухполюсника — схема замещения, состоящая из последовательного соединения двух элементов, соответствующих активному и реактивному сопротивлению двухполюсника.

Постоянная времени нагрева (охлаждения) двигателя — отношение теплоёмкости двигателя к теплоотдаче, определяющее длительность процессов теплообмена с окружающей средой.

Постоянные потери в трансформаторе — тепловые потери энергии в трансформаторе не зависящие от его нагрузки и равные потерям в магнитопроводе.



Потери в «меди» —тепловые потери в проводе обмотки электромагнитного устройства, вызванные протеканием электрического тока.

Потери в «стали» – сумма тепловых потерь электрической энергии в материале магнитопровода от гистерезиса и вихревых токов.

Потери от вихревых токов – тепловые потери электрической энергии, вызванные протеканием вихревых токов в материале магнитопровода.

Потери от гистерезиса — тепловые потери электрической энергии, связанные с перемагничиванием материала магнитопровода и пропорциональные площади петли гистерезиса.

Потокосцепление — сумма магнитных потоков, сцеплённых с витками катушки.

Приведение параметров обмотки — математическая операция замены реальных значений параметров элементов схемы замещения, тока, напряжений и ЭДС одной из обмоток расчётными эквивалентами, соответствующими числу витков другой обмотки, при условии сохранения мощности элементов схемы. Приведение параметров производится для замены магнитной связи обмоток эквивалентной электрической связью.

Приведённые параметры элементов привода — вращающие моменты, силы и моменты инерции кинематической цепи привода приведённые (пересчитанные) к скорости вращения двигателя при условии сохранения энергии движущихся масс.

Приёмник электрической энергии — преобразователь электрической энергии в другие виды энергии (механическую, химическую, тепловую и др.).

Принцип суперпозиции – реакция электрической цепи на суммарное воздействие равно сумме реакций на элементарные воздействия.

Принципиальная электрическая схема — изображение электротехнических устройств, образующих электрическую цепь, и их связей с помощью условных обозначений.

Проводимость – величина обратная сопротивлению.

Продолжительность включения — основной параметр повторнократковременного режима работы электропривода, равный отношению длительности работы двигателя к длительности цикла работы и паузы.

Продольная (поперечная) ось ротора реактивного двигателя – геометрическая ось, соответствующая направлению, в котором магнитная проводимость (индуктивность, индуктивное сопротивление) ротора максимальна (минимальна).



Противо-ЭДС – ЭДС, наводимая в обмотке якоря электрической машины основным (рабочим) магнитным потоком и действующая встречно по отношению к ЭДС источника питания якоря.

Проходная мощность автотрансформатора — полная мощность автотрансформатора, определяемая как произведение номинальных значений напряжения и тока вторичной обмотки.

Процентное изменение напряжения трансформатора — относительное отклонения напряжения на вторичной обмотке трансформатора от номинального значения, выраженное в процентах.

Прямая задача расчёта магнитной цепи — определение магнитодвижущих сил в магнитной цепи при заданных геометрических и магнитных параметрах элементов и магнитных потоков.

Пульсирующее магнитное поле — магнитное поле, возбуждаемое обмоткой, питающейся от источника синусоидального переменного тока, и являющееся предельным случаем эллиптического магнитного поля.

Пусковая обмотка однофазного асинхронного двигателя — обмотка статора, подключаемая к сети во время пуска двигателя для создания вращающегося магнитного поля.

P

Рабочая обмотка однофазного асинхронного двигателя — обмотка статора, постоянно подключённая к сети во время работы двигателя.

Рабочий участок механической характеристики асинхронного двигателя – участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя.

Разделительный трансформатор — трансформатор, предназначенный для отделения сети, питающей приёмник от первичной электрической сети, а также от цепей заземления и зануления.

Распределённая обмотка — обмотка, состоящая из одной или нескольких катушечных групп.

Расчётная мощность автотрансформатора — часть проходной мощности автотрансформатора, определяющая расчётные параметры магнитопровода и соответствующая мощности передаваемой в цепь вторичной обмотки посредством магнитного поля.

Реактивная мощность — мощность, соответствующая электрической энергии, участвующей в периодическом обмене между двухполюсником и внешней цепью при данном напряжении и токе на входе двухполюсника.



Реактивная проводимость – мнимая часть комплексной проводимости, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

Реактивное напряжение — составляющая входного напряжения двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного тока на 90° и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном токе.

Реактивное сопротивление — мнимая часть комплексного сопротивления, определяющая интенсивность обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью.

Реактивный момент — вращающий момент, развиваемый двигателем за счёт магнитной асимметрии ротора.

Реактивный синхронный двигатель – двигатель с невозбуждённым ротором, магнитное поле которого является полем реакции якоря.

Реактивный ток — составляющая входного тока двухполюсника, смещённая по фазе относительно входного напряжения на 90° и соответствующая мощности периодического обмена энергией между двухполюсником и внешней цепью при данном входном напряжении.

Реакция якоря машины постоянного тока — воздействие магнитного поля якоря на поле главных полюсов машины.

Реакция якоря синхронной машины — воздействие магнитного поля, возбуждаемого статором (якорем) синхронной машины, на магнитное поле ротора.

Реальный источник – источник электрической энергии, обладающий внутренними потерями.

Режим идеального холостого хода асинхронного двигателя — режим работы двигателя с нулевым скольжением, т.е. с синхронным вращением магнитного поля и ротора, реализуемый за счёт вращающего момента другого двигателя или механизма.

Режим короткого замыкания — аварийный режим работы трансформатора при замкнутых между собой выводах вторичной обмотки.

Режим короткого замыкания асинхронного двигателя — режим работы двигателя с неподвижным ротором (пуск), при котором эквивалентное сопротивление нагрузки в схеме замещения обращается в нуль.

Режим короткого замыкания электрической цепи – режим работы источника электрической энергии с замкнутыми между собой точками подключения внешней цепи.



Режим недовозбуждения (перевозбуждения) синхронной машины — режим работы с малым (большим) током обмотки возбуждения, при котором машина потребляет из сети (отдаёт в сеть) индуктивный ток.

Режим холостого хода — режим работы трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Режим холостого хода асинхронного двигателя – режим работы двигателя с отсоединённой нагрузкой.

Режим холостого хода электрической цепи – режим работы источника электрической энергии с отключённой нагрузкой.

Резистивный элемент – идеальный элемент электрической цепи (идеальный резистор), обладающий только сопротивлением.

Резистор — элемент электрической цепи (физический объект), в котором происходит необратимое преобразование электрической энергии в тепловую и основным параметром которого является электрическое сопротивление.

Резонанс – режим пассивного двухполюсника, содержащего индуктивные и ёмкостные элементы, при котором его входное реактивное сопротивление равно нулю.

Резонанс напряжений – явление резонанса в последовательном контуре, при котором напряжения на реактивных элементах компенсируют друг друга.

Резонанс токов – явление резонанса в параллельном контуре, при котором реактивные токи в ветвях компенсируют друг друга.

Рекуперативное торможение — торможение двигателя с отдачей электрической энергии в питающую сеть.

Ротор – вращающаяся часть электрической машины.

 \mathbf{C}

Самовентилируемый двигатель – двигатель, в котором вентиляция осуществляется за счёт вращения ротора и поэтому при изменении скорости вращения изменяются условия теплоотвода.

Сверхток — максимальное значение тока в переходном процессе подключения цепи с индуктивным элементом к сети переменного тока, обусловленное наличием свободной составляющей тока и превышающее амплитудное значение в установившемся режиме.

Свойство обратимости электромеханических преобразователей энергии – любой электромеханический преобразователь может осуществлять преобразование энергии в двух направлениях. Преобразование электрической энергии в механическую называется режимом двигателя, а механической в электрическую – режимом генератора.



Связанная трёхфазная система — трёхфазная цепь, в которой источники электрической энергии электрически соединены между собой и приёмники (нагрузка) соединены между собой.

Селективность защиты – способность отключения аварийного участка сети в конце защищаемой линии.

Симметричная нагрузка – приёмник (нагрузка) с одинаковыми комплексными фазными сопротивлениями.

Синусоидальный ток — электрический ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону.

Синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением – машина, в которой магнитное поле ротора возбуждается постоянными магнитами.

Синхронная машина с электромагнитным возбуждением — машина, в которой магнитное поле ротора возбуждается электромагнитом, т.е. расположенной на роторе обмоткой возбуждения.

Синхронное индуктивное сопротивление — сумма индуктивных сопротивлений рассеяния и реакции якоря фазной обмотки статора.

Синхронные машины — бесколлекторные электрические машины, в которых движение магнитного поля и ротора в статическом режиме происходит синхронно.

Синхронный компенсатор — облегчённый синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу в режиме перевозбуждения и предназначенный для компенсации потребности в индуктивном токе другими потребителями, подключёнными к той же сети.

Скольжение – разность скоростей вращения магнитного поля и ротора асинхронного двигателя, отнесённая к скорости вращения поля.

Согласованный режим работы электрической цепи – режим, при котором источник электрической энергии отдаёт в нагрузку максимально возможную мощность.

Сопротивление — параметр, характеризующий способность резистора осуществлять преобразование энергии и численно равный отношению величины напряжения на резисторе к величине протекающего по нему тока.

Сосредоточенная обмотка – обмотка, состоящая из одной катушки.

Среднее значение синусоидальной величины — среднее значение синусоидальной величины за положительный полупериод.

Статическое сопротивление – отношение падения напряжения на нелинейном резистивном элементе к протекающему по нему току.

Статор – неподвижная часть электрической машины.



Схема замещения магнитной цепи — схема, в которой с помощью условных обозначений, принятых в электрических цепях, изображена взаимосвязь магнитодвижущих сил и магнитных потоков в магнитной цепи.

Схема замещения электрической цепи — условное изображение параметров устройств и объектов электрической цепи, принимаемых в расчёт при анализе электромагнитных процессов.

\mathbf{T}

Ток замыкания на землю – ток, стекающий в землю через место замыкания.

Топология – раздел математики, изучающий топологические свойства фигур, т.е. свойства фигур, не изменяющиеся при взаимно однозначных непрерывных отображениях.

Трансформатор напряжения — статическое (не имеющее движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одного переменного синусоидального напряжения в другое той же частоты.

Трёхпроводная трёхфазная система — трёхфазная цепь без нейтрального (нулевого) провода.

Трёхфазная цепь – совокупность трёх пар источников электрической энергии и приёмников, причём амплитуды и частоты ЭДС источников одинаковы, а начальные фазы смещены относительно друг друга на 120°.

Трёхфазный трансформатор – трансформатор с фазными обмотками, расположенными на общем магнитопроводе, в результате чего между фазами сети кроме электрической существует также магнитная связь.

\mathbf{y}

Угловая характеристика синхронной машины — зависимость вращающего момента синхронной машины от угла нагрузки.

Угол магнитных потерь (угол магнитного запаздывания) — угол, дополняющий до 90° угол фазового смещения тока относительно напряжения в идеальной катушке с ферромагнитным сердечником. Потери энергии в материале сердечника пропорциональны синусу этого угла.

Угол нагрузки — угол между осями магнитных полей статора и ротора или, что то же самое, между векторами противо-ЭДС и напряжения питания фазной обмотки статора, величина которого определяется моментом, действующим на вал синхронной машины.

Угол потерь – угол, дополняющий угол фазового сдвига между током и напряжением катушки индуктивности (конденсатора) до 90°.

Узел электрической цепи – соединение трёх и более элементов.



Укороченный (удлиненный) шаг обмотки (витка, катушки) — шаг меньше (больше) полюсного деления.

Уравнение движения привода — уравнение баланса статических и динамических моментов, действующих на вал электродвигателя.

Усиленная изоляция — изоляция электрических цепей эквивалентная по свойствам двойной изоляции.

Φ

Фаза трёхфазной цепи — часть трёхфазной цепи, включающая источник электрической энергии и подключённый к нему приёмник (нагрузку).

Фазное сопротивление – сопротивление фазы приёмника (нагрузки).

Фазные ЭДС, **напряжения и токи** – ЭДС, напряжения и токи в фазах трёхфазной цепи.

Фазный ротор – ротор асинхронного двигателя с тремя фазными обмотками, соединёнными звездой, начала которых через контактные кольца и щетки выведены на клеммную колодку для подключения к внешним электрическим цепям.

Феррорезонанс – резонанс в электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения (тока) – устройство для поддержания постоянным значения напряжения (тока) в электрической цепи, использующее для этого вольт-амперную характеристику феррорезонансного контура.

Физическая нейтраль – линия, проходящая через точки воздушного зазора с нулевым значением индукции.

X

Характеристика холостого хода синхронные машины — зависимость величины ЭДС, наводимой магнитным полем ротора в обмотке статора при отключённом питании и номинальной скорости вращения, от величины тока обмотки возбуждения.

Характеристика *U***-образная синхронной машины** — зависимость величины тока статора синхронной машины от величины тока возбуждения, полученная при постоянной нагрузке на валу и имеющая вид кривой с сильно выраженным минимумом, соответствующим режиму работы с чисто активным током.



Ц, Ч

Цикл (петля) гистерезиса — зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля при её симметричном циклическом изменении, имеющая форму замкнутой кривой (петли).

Четырёхпроводная трёхфазная система — трёхфазная цепь с нейтральным (нулевым) проводом.

Ш, Щ

Шаблонная обмотка – распределённая обмотка, состоящая из катушек одинаковой формы с одинаковым шагом.

Шаг обмотки (витка, катушки) – расстояние между пазами, в которые уложена обмотка (виток, катушка), выраженное в единицах измерения полюсного деления.

Шаговый (импульсный) двигатель — синхронный двигатель, у которого движение магнитного поля и ротора происходит дискретно (шагами) за счёт поочерёдного переключения питания статорных обмоток.

Шихтование (от нем. *Schichte* - слой) — разделение материала магнитопровода на отдельные изолированные пластины вдоль направления магнитных линий для уменьшения потерь от вихревых токов.

Щётка — проводник, изготовленный из материала с малым коэффициентом трения (графит, бронзо-графит) и образующий скользящий электрический контакт с кольцами или коллектором ротора электрической машины.

Щёточно-коллекторный узел — механический преобразователь постоянного тока в переменный.

Э

Эквивалентные синусоиды — синусоидальные величины тока и напряжения, действующие значения и активная мощность которых равны действующим значениям и активной мощности несинусоидальных периодических величин на входе двухполюсника.

Электрическая машина — электромеханический преобразователь энергии, основанный на принципе электромагнитного взаимодействия.

Электрическая сеть с глухозаземлённой нейтралью – сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора непосредственно присоединена к заземляющему устройству.

Электрическая сеть с изолированной нейтралью — сеть, в которой нейтральная точка (нейтраль) генератора или трансформатора не присоединена к заземляющему устройству.



Электрическая цепь – совокупность технических устройств и объектов, по которым протекает электрический ток, и электромагнитные процессы в которых могут быть описаны понятиями электродвижущей силы, тока и напряжения.

Электрический привод (электропривод) — электромеханическая система, состоящая из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение рабочего органа машины и управления этим движением.

Электрический ток – направленное движение электрических зарядов.

Электрический фильтр — устройство, предназначенное для усиления или подавления в электрической цепи токов или напряжений определённой частоты или диапазона частот.

Электрическое напряжение (падение напряжения, напряжение) – работа, необходимая для перемещения зарядов на некотором участке электрической цепи и численно равная энергии, отдаваемой единичным зарядом на этом участке.

Электродвижущая сила — сила, действующая на электрические заряды и вызывающая их движение и численно равная энергии, получаемой единичным зарядом на участке действия этой силы.

Электромагнитное рассеяние – явление неполной электромагнитной связи двух индуктивно связанных цепей, вызванное с ответвлением части магнитного потока из магнитопровода в воздушную среду.

Эллиптическое магнитное поле — вращающееся магнитное поле, годограф вектора индукции которого является эллипсом.

Эффективное число витков обмотки — расчётное число витков распределенной обмотки эквивалентное числу витков сосредоточенной обмотки с полным шагом.

Я

Явление гистерезиса — зависимость значения магнитной индукции при данной напряжённости магнитного поля от её предшествующих значений.

Якорное управление — регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока путём изменения напряжения питания якоря.

Якорь – ротор машины постоянного тока.

Якорь с печатной обмоткой – малоинерционный якорь, у которого проводники обмотки выполнены печатным способом.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ и МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ	
1. Электрические цепи постоянного тока	4
1.1. Электрическая цепь	
1.2 Основные величины, характеризующие электрическую цепь	
1.3 Пассивные элементы электрической цепи	
1.4 Активные элементы электрической цепи	
1.5 Основные законы электрических цепей постоянного тока	
1.6 Эквивалентные преобразования электрических цепей	
1.7 Методы расчёта электрических цепей	25
1.7.1. Метод непосредственного применения закона Ома	26
1.7.2. Метод непосредственного применения законов Кирхгофа	.27
1.7.3.Метод контурных токов	29
1.7.4.Метод узловых потенциалов	30
1.7.5.Метод наложения	
1.7.6.Метод эквивалентного генератора	33
2. Электрические цепи синусоидального переменного тока	35
2.1. Основные понятия теории и законы электрических цепей	
2.1.1. Синусоидальные ЭДС, токи и напряжения	
2.1.2. Получение синусоидальной ЭДС	
2.1.3. Изображение синусоидальных функций векторами	
2.1.4. Основные элементы и параметры электрических цепей	
2.1.5. Закон Ома. Пассивный двухполюсник	
2.1.6. Законы Кирхгофа	
2.2. Анализ электрических цепей синусоидального тока	
2.2.1. Неразветвлённая цепь синусоидального тока	
2.2.2. Параллельное соединение ветвей	
2.2.3. Схемы замещения катушки индуктивности и конденсатор	
2.2.4. Смешанное соединение элементов	
2.2.5. Комплексный метод расчёта цепей переменного тока	
2.2.6. Резонанс в электрических цепях	
2.2.7. Цепи с индуктивно связанными элементами	
3. Трёхфазные цепи	
3.1. Получение трёхфазной системы ЭДС	
3.2. Связывание трёхфазной системы	
3.3. Расчёт цепи при соединении нагрузки звездой	
3.3.1. Соединение нагрузки звездой с нейтральным проводом	
3.3.2. Соединение нагрузки звездой без нейтрального провода	
3.4. Расчёт цепи при соединении нагрузки треугольником	
3.5. Мощность трёхфазной цепи	
3.5.1. Мощность при несимметричной нагрузке	91

3.5.2. Мощность при симметричной нагрузке	91
4. Электрические цепи несинусоидального тока	92
4.1. Разложение периодической функции в тригонометрический	
	92
4.2. Основные характеристики периодических несинусоидальных	
величин	94
4.3. Мощность цепи несинусоидального тока	
4.4. Расчёт цепи несинусоидального тока	
5. Переходные процессы в электрических цепях	
5.1. Коммутация. Законы коммутации. Начальные условия	
5.2. Классический метод расчёта переходных процессов	
5.3. Переходные процессы в цепи с индуктивным и резистивным	
элементами	103
5.3.1. Подключение цепи к источнику постоянной ЭДС	
5.3.2. Отключение цепи от источника постоянной ЭДС	
5.3.3. Переходные процессы при периодической коммутации	
5.3.4. Подключение цепи к источнику синусоидальной ЭДС	
5.4. Переходные процессы в цепи с ёмкостным и резистивным	
элементами	110
5.4.1. Подключение цепи к источнику постоянной ЭДС	
5.4.2. Разрядка конденсатора через резистор	
5.4.3. Переходные процессы при периодической коммутации	
5.5. Разрядка конденсатора через катушку индуктивности	
5.5.1. Апериодический переходный процесс	
5.5.2. Колебательный переходный процесс	
6. Нелинейные электрические цепи	
6.1. Нелинейные резистивные элементы	
6.2. Анализ цепи с нелинейными двухполюсниками	
6.2.1. Цепь с источником постоянного тока	
6.2.2. Цепь с источником переменного тока	
6.3. Анализ цепи с нелинейными трёхполюсниками	
7. Магнитные цепи с постоянной магнитодвижущей силой	
7.1. Основные понятия и законы магнитных цепей	129
7.2. Свойства ферромагнитных материалов	132
7.3. Расчёт неразветвлённой магнитной цепи	133
7.3.1. Прямая задача	133
7.3.2. Обратная задача	
7.3.3. Цепь с постоянным магнитом	135
7.3.4. Сила притяжения магнита	
8. Катушка с магнитопроводом в цепи переменного тока	
8.1. Электромагнитные процессы при переменном токе	
8.1.1. Потери от гистерезиса	
8.1.2. Потери от вихревых токов	

8.1.3. Векторная диаграмма и схема замещения	141
8.2. Упрощённый анализ электромагнитных процессов	
8.3. Явление феррорезонанса	
Часть 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	
9. Трансформаторы	140
9.1. Устройство и принцип действия	
9.2. Математическая модель трансформатора	
9.2.1. Уравнение магнитодвижущих сил и токов	
9.2.2. Уравнения электрического состояния	
9.3. Схема замещения	
9.4. Векторная диаграмма	
9.5. Режим холостого хода	
9.6. Режим короткого замыкания	
9.7. Внешняя характеристика	
9.8. Потери энергии в трансформаторе	
9.9. Трёхфазные трансформаторы	
9.10. Автотрансформаторы	
9.11. Измерительные трансформаторы	
10. Асинхронные двигатели	
10.1. Вращающееся магнитное поле	
10.2. Устройство и принцип действия	
10.3. Электродвижущие силы обмоток	
10.4. Магнитодвижущие силы и магнитные потоки обмоток	
10.5. Уравнения электрического состояния и схема замещения	
10.6. Режимы работы асинхронного двигателя	
10.7. Энергетический баланс	
10.8. Вращающий момент и механическая характеристика	
10.9. Пуск двигателя	
10.10. Регулирование скорости вращения	
10.10.1. Регулирование изменением числа пар полюсов	
10.10.2. Регулирование понижением напряжения питания	193
10.10.3. Регулирование изменением сопротивления цепи рото	opa.194
10.10.4. Регулирование изменением частоты питания (частот	ное
регулирование)	194
10.11. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели	196
10.11.1. Однофазные двигатели	
10.11.2. Двухфазные двигатели	198
11. Синхронные машины	200
11.1. Устройство и принцип действия	201
11.2. Уравнение напряжений обмотки статора и векторная	
диаграмма	
11.3. Работа синхронного генератора на автономную нагрузку	206

11.4. Мощность и вращающий момент синхронной машины	207
11.5. Пуск синхронного двигателя	
11.6. Регулирование коэффициента мощности	
11.7. Синхронные двигатели автоматических устройств	214
11.7.1. Реактивные двигатели	
11.7.2. Гистерезисные двигатели	217
11.7.3. Шаговые двигатели	220
12. Двигатели постоянного тока	222
12.1. Устройство и принцип действия	222
12.2. Магнитная и электрическая цепи машины	224
12.3. Электромагнитный момент машины	227
12.4. Реакция якоря	228
12.5. Коммутация	230
12.6. Энергетические соотношения машин постоянного тока	232
12.7. Характеристики двигателей постоянного тока	234
12.7.1. Характеристики двигателей параллельного возбуждения	.234
12.7.2. Тормозные режимы двигателей параллельного	
возбуждения	237
12.7.3. Характеристики двигателей последовательного	
возбуждения	240
12.7.4. Тормозные режимы двигателей последовательного	
возбуждения	242
12.7.5. Характеристики двигателей смешанного возбуждения	
12.8. Исполнительные двигатели постоянного тока	
12.9. Коллекторные двигатели переменного тока	
13. Основы электропривода	
13.1. Уравнение движения привода	
13.2. Ускорение и замедление привода	
13.3. Нагрев и охлаждение двигателей	
13.4. Номинальные режимы работы двигателей	
13.5. Выбор мощности двигателей	
13.6. Выбор типа двигателя	
14. Общие вопросы электроснабжения и электробезопасности	
14.1. Общие вопросы электроснабжения	
14.1.1. Электрические сети	
14.1.2. Защита электрических сетей	260
14.1.3.Потери энергии в электрических сетях и способы	
повышения экономических показателей	
14.2. Основы электробезопасности	
14.2.1. Условия поражения электрическим током	
14.2.2. Защита от поражения электрическим током	
Литература	271 272
LITOGOODIII	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,





В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ и ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишелов Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н, а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы и руководство институтом пригласило в качестве заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано Пиотровским Л.М. лично или в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф. доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф. проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета,

В 1956 году на радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц. Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством Т.А. Глазенко.

Татьяна Анатольевна Глазенко в 1948 году с отличием закончила энергетический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1953 году она защитила кандидатскую диссертацию и в 1966 году докторскую диссертацию. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный член Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А. двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 опубликованных научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается профессор, д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент, кандидат технических наук, Томасов Валентин Сергеевич.

С 1992 по 2005годы на кафедре работал заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н., Сабинин Ю.А..

Сегодня на кафедре работают: профессор, д.т.н. Овчинников И.Е.; доценты, к.т.н.: Губанов Н.Н., Борисов П.В., Денисова А.В., Кротенко В.В., Лукичев Д.А., Никитина М.В., Осипов Ю.М., Петров Е.А., Синицын В.А., Соловьев В.И., Толмачев В.А., Усольцев А.А.; доцент Гурьянов В.А.; ст. преподаватели: к.т.н. Махин И.Е., Денисов К.М.; ассистенты: Серебряков С. А., Жданов И.Н.

Усольцев Александр Анатольевич

Общая электротехника

Учебное пособие

В авторской редакции Компьютерная вёрстка и дизайн

А.А. Усольцев

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Лицензия ИД №00408 от 05.11.1999 Зав. редакционно-издательским отделом Подписано к печати 12.02.2009

Н.Ф.Гусарова

Тираж 500 экз. Заказ №2035. Отпечатано на ризографе.

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

