

## 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.

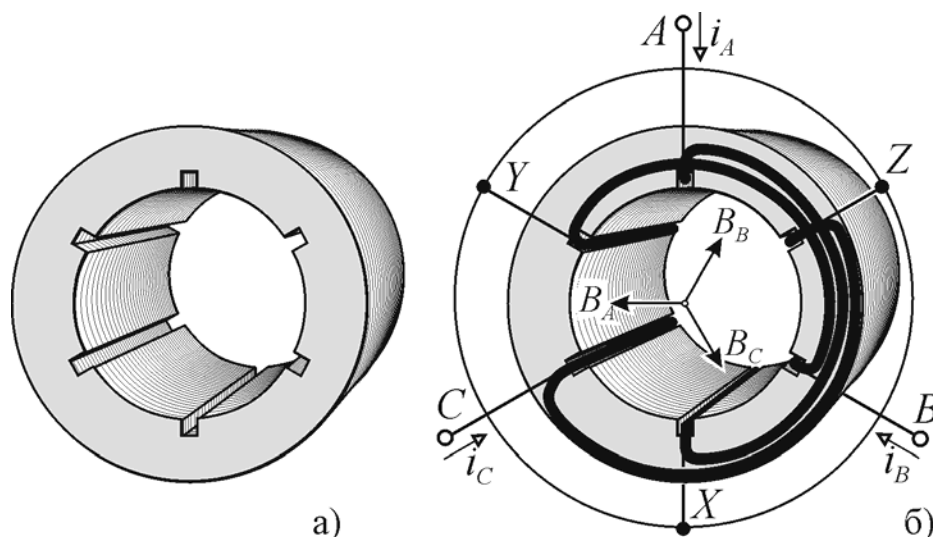


Рис. 10.1

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

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

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

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

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

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 1 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  $30^\circ$  к оси AX. Такими же построениями можно определить, что через 1/6 часть периода магнитное поле сместится на  $60^\circ$  в положительном направлении, а за один период частоты сети – на  $360^\circ$ .

Можно показать, что в любой точке внутренней окружности статора, смещённой на угол  $\alpha$  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

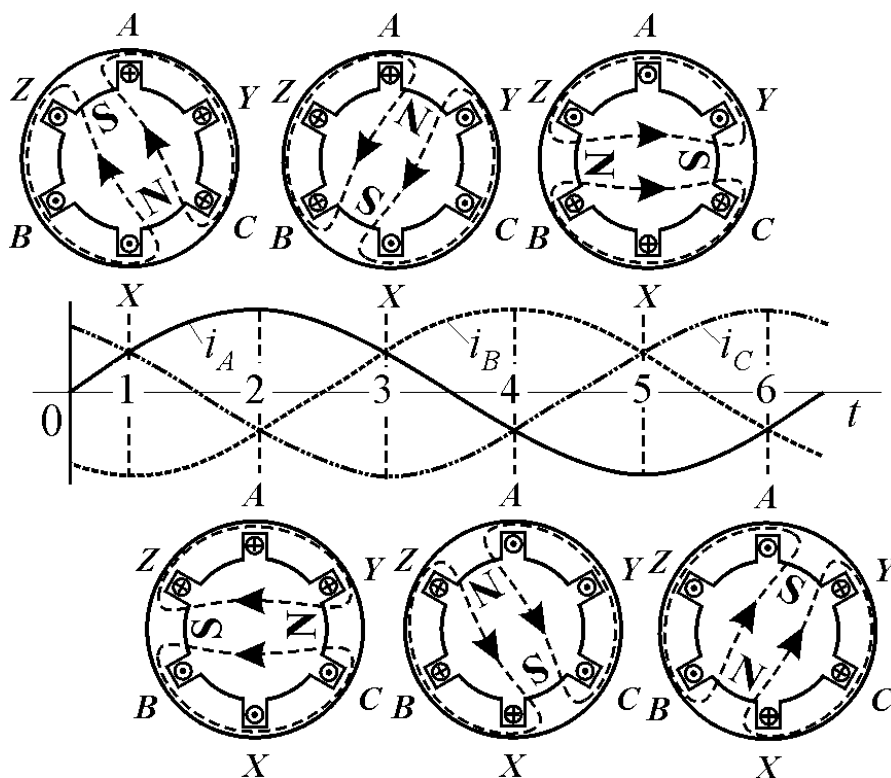


Рис. 10.2

оставаться постоянной и равной

$$B_{\max} = \frac{3}{2} B_m, \quad \text{где}$$

$B_m$  – максимальное значение индукции поля, возбуждаемого одной обмоткой. Следовательно, магнитное поле вращается внутри пакета статора с угловой частотой

$\Omega_1 = \omega_1 = 2\pi f_1$ , определяемой 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  $90^\circ$ , 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  $180^\circ$ , т.е. частота его вращения будет в два раза меньше. Проведя аналогичные построения картины магнитного поля для обмоток, разделённых на  $p$  частей, можно убедиться, 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.

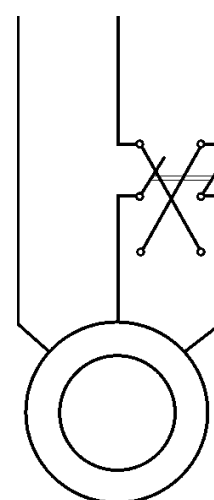


Рис. 10.3

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

где  $\omega_1$  – 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

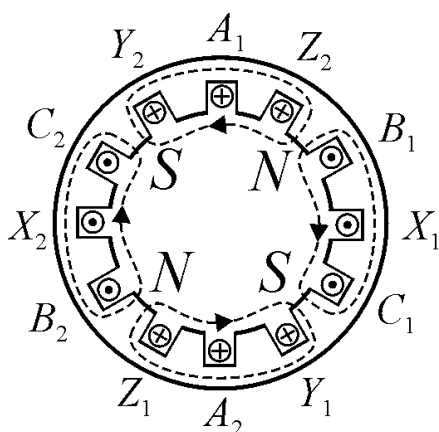


Рис. 10.4

*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 математически 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 соответствует повороту вектора  $\underline{B}_+$  на  $45^\circ$  от нулевой точки в положительном направлении, а вектора  $\underline{B}_-$  – на тот же угол в отрицательном направлении. За полный период  $T = 2\pi/\omega$  вектор  $\underline{B}$  вернется 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.

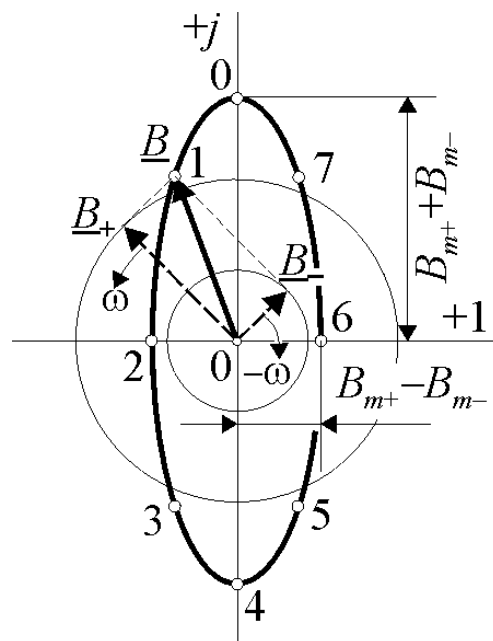


Рис. 10.5

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

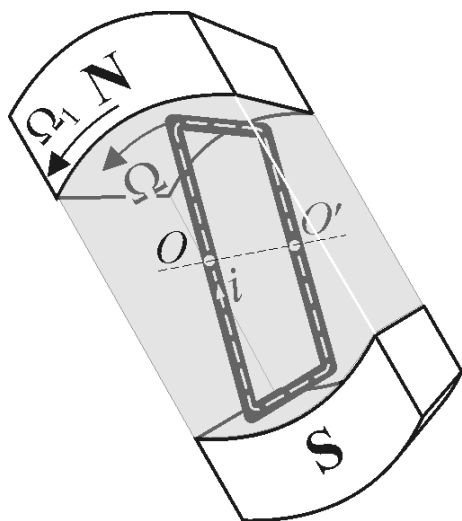


Рис. 10.6

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, а).

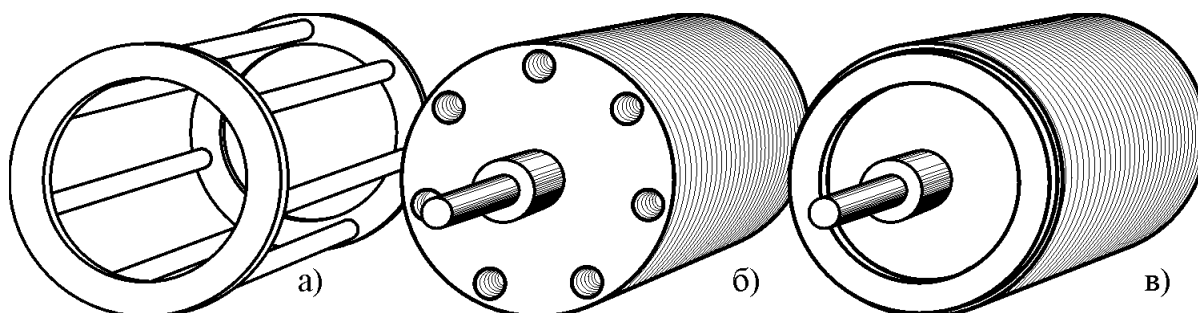


Рис. 10.7

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, б). 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, в) и используется в подавляющем большинстве асинхронных двигателей. Электрическая энергия в цепь ротора передаётся

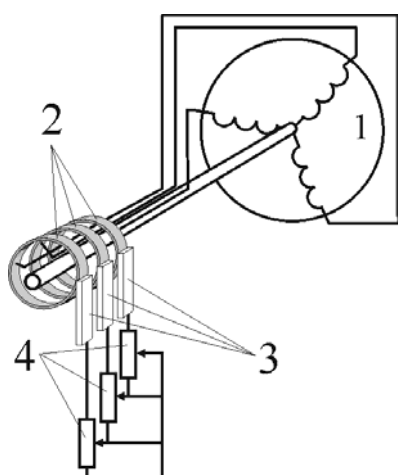


Рис. 10.8

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. *фазный 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 подъёмно-транспортных механизмов, но в последнее время их вытесняют из этой области двигатели с короткозамкнутым ротором с питанием от преобразователей частоты.

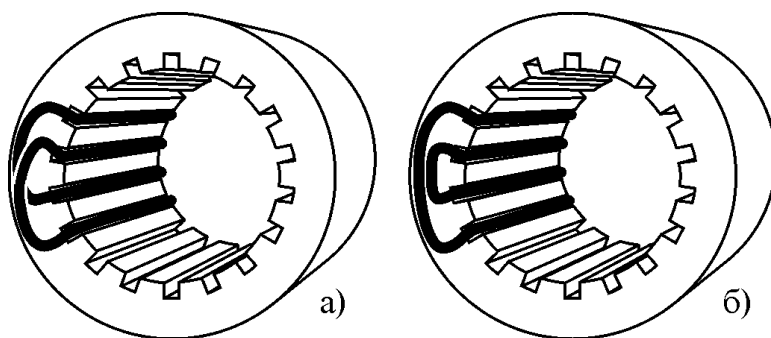


Рис. 10.9

*Сосредоточенные* фазные обмотки, т.е. обмотки представляющие собой одну катушку, стороны которой расположены в двух пазах статора (рис. 10.1, б), 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 внутри другой (рис. 10.9, б). В этом случае обмотки называются *концентрическими*.

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

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (10.3)$$

как разности между скоростями вращения магнитного поля ( $\Omega_1, n_1$ ) и ротора ( $\Omega, n$ ), 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 ( $n_1 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500$  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 *идеальным холостым*

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 относительно 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

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

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 –  $w_{1\text{э}} = k_{\text{об1}} w_1$ , где  $k_{\text{об1}} < 1$  – обмоточный коэффициент, учитывающий особенности конструкции данной обмотки. Тогда потокосцепление фазной обмотки статора асинхронного двигателя будет равно



$\Psi_{1m} = k_{об1} w_1 \Phi_{0m}$  и действующее значение ЭДС, наводимой в ней вращающимся магнитным полем –

$$E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = 2\pi f_1 k_{об1} w_1 \Phi_{0m} / \sqrt{2} = 4,44 k_{об1} w_1 f_1 \Phi_{0m}. \quad (10.5)$$

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

$$E_2 = 4,44 k_{об2} w_2 f_1 \Phi_{0m}. \quad (10.6)$$

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

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

Следовательно, ЭДС вращающегося ротора с учётом (10.7) равна

$$E_{2s} = 4,44 k_{об2} w_2 f_2 \Phi_{0m} = 4,44 k_{об2} w_2 sf_1 \Phi_{0m} = sE_2. \quad (10.8)$$

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

$$X_{2s} = \omega_2 L_{\sigma 2} = s\omega_1 L_{\sigma 2} = sX_2, \quad (10.9)$$

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

$$\underline{F}_1 = \frac{m_1 k_{об1} w_1}{\pi p} I_1; \quad \underline{F}_2 = \frac{m_2 k_{об2} w_2}{\pi p} I_2. \quad (10.10)$$

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

$$\underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \underline{F}_0 \Rightarrow \underline{I}_1 + \frac{m_2 k_{\sigma 2} w_2}{m_1 k_{\sigma 1} w_1} \underline{I}_2 = \underline{I}_0; \Rightarrow \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0, \quad (10.11)$$

где  $\underline{I}_0$  – комплексный ток статора в режиме идеального холостого хода;  $k_i = \frac{m_1 k_{\sigma 1} w_1}{m_2 k_{\sigma 2} w_2} = \frac{m_1 w_{1\varphi}}{m_2 w_{2\varphi}}$  – коэффициент трансформации токов;  $\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / k_i$  – приведённый ток ротора.

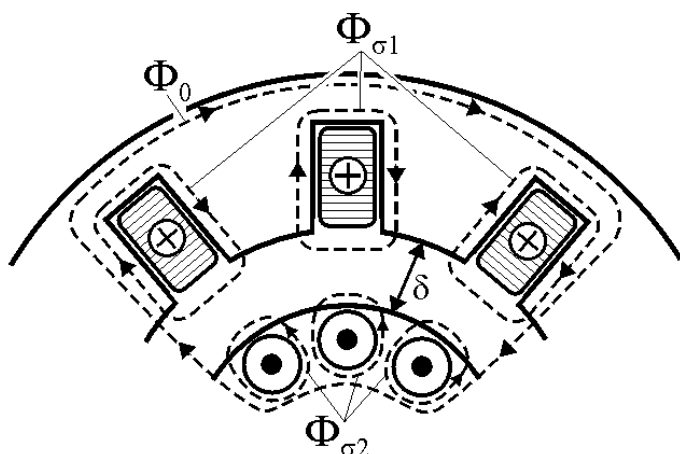


Рис. 10.10

Помимо основного магнитного потока  $\Phi_0$ , замыкающегося через воздушный зазор между статором и ротором ( $\delta$  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

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

или в комплексной форме

$$\begin{aligned} \underline{E}_{\sigma 1} &= -j\omega_1 L_{\sigma 1} \underline{I}_1 = -jX_{1\sigma} \underline{I}_1; \\ \underline{E}_{\sigma 2} &= -j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_2 = -jX_{2\sigma} \underline{I}_2 = -jsX_2 \underline{I}_2, \end{aligned} \quad (10.12)$$

где  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$  – индуктивности потокоцеплений 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

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} - e_1 \Leftrightarrow \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \quad (10.13)$$

и вращающегося ротора

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

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

$$s \underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jsX_2 \underline{I}_2 \Rightarrow \underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 / s + jX_2 \underline{I}_2. \quad (10.15)$$

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

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{o61} w_1}{k_{o62} w_2} = \frac{w_{1\Delta}}{w_{2\Delta}} \quad (10.16)$$

и приведённой ЭДС ротора

$$E'_2 = k_u E_2 = E_1. \quad (10.17)$$

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

$$\underline{E}'_2 = E_1 = R'_2 \underline{I}'_2 / s + jX'_2 \underline{I}'_2, \quad (10.18)$$

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, б.

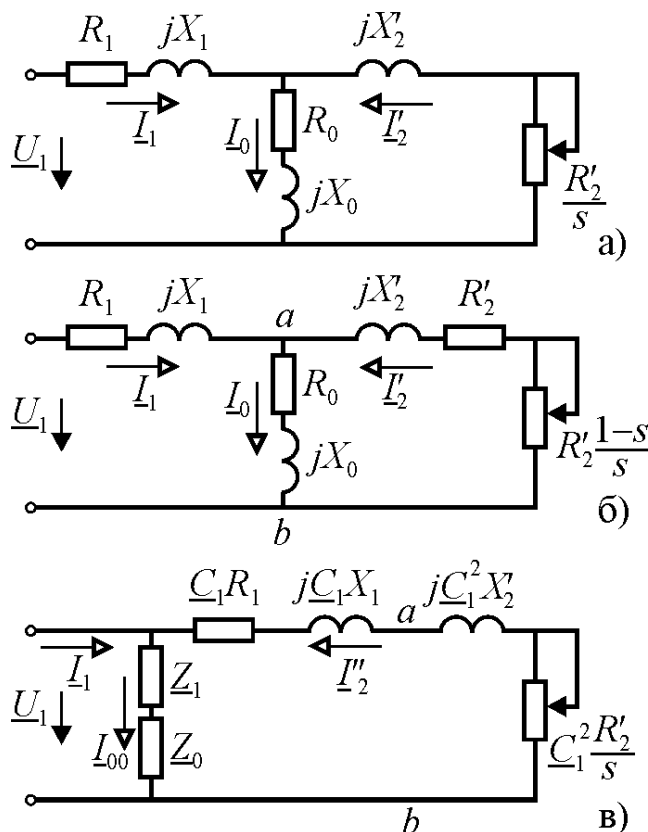


Рис. 10.11

Внешне схема рис. 10.11, б идентична схеме замещения трансформатора, работающего на переменную активную нагрузку. При изменении скольжения, будет меняться режим работы двигателя. В режиме *идеального холостого хода* ( $s=0$ ) сопротивление нагрузки становится бесконечно большим и ток ротора уменьшается до нуля, что полностью соответствует принципу работы асинхронного 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  $\approx 0,05$  частота ЭДС ротора составляет  $\approx 2,5$  Гц. При такой частоте потерями в сердечнике ротора можно пренебречь и принять  $R_0 = 0$ .

Схема замещения рис. 10.11, б 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, в). При этом параметры обмоток статора и ротора приобретают комплексный множитель

$$C_1 = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_0} = 1 + \frac{Z_1}{Z_0},$$

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, в при  $C_1 \approx 1$  величина приведённого тока ротора будет равна

$$I''_2 \approx I'_2 \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (10.19)$$

#### *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, б. 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  $\varphi_1 < \pi/2$ . Это означает, что ротор вращается в направлении вращения магнитного поля со скоростью ниже синхронной и двигатель отдаёт механическую энергию нагрузке, т.к.

$R'_2(1-s)/s > 0 \Rightarrow P_2 = I_2'^2 R'_2(1-s)/s > 0$ . Фазовый сдвиг меньше  $90^\circ$  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  $W_э$

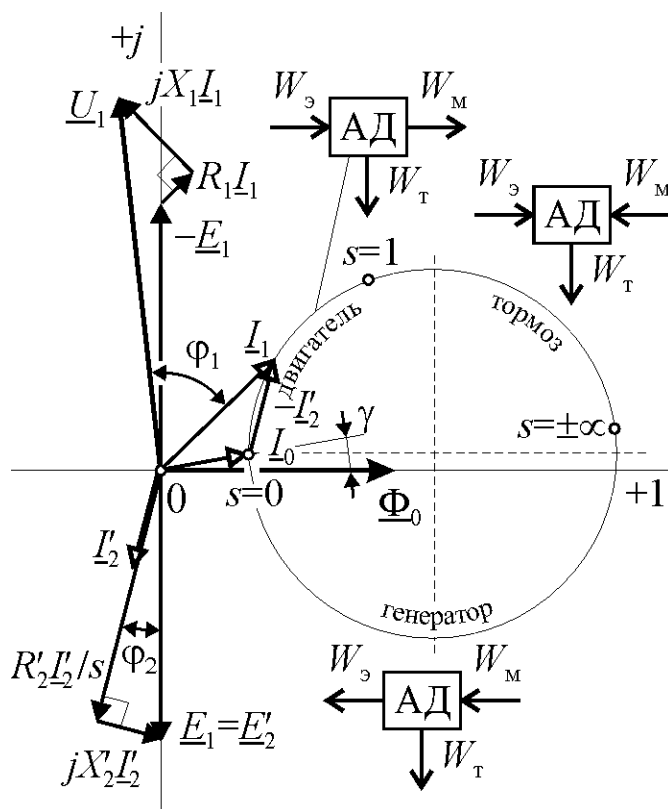


Рис. 10.12

преобразуется в механическую энергию  $W_м$ , отдаваемую нагрузке, и в тепловую энергию  $W_т = W_э - W_м$ , 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.  $\varphi_1 > \pi/2$ . Отрицательной становится также мощность, преобразуемая переменным резистивным элементом схемы замещения

$P_2 = I_2'^2 R'_2(1-s)/s < 0$ . 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  $W_м$  преобразуется в электрическую  $W_э$  и в тепловую  $W_т = W_м - W_э$ . 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  $P_2 = I_2'^2 R'_2(1-s)/s < 0$ , а электрическая – положительна  $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 > 0$ , т.к.  $\varphi_1 < \pi/2$  (рис. 10.12). Следовательно, двигатель по-

требляет электрическую энергию  $W_э$  от источника питания и механическую энергию  $W_м$  от нагрузки на валу, и оба вида энергии рассеиваются в виде тепла  $W_т = W_м + W_э$  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

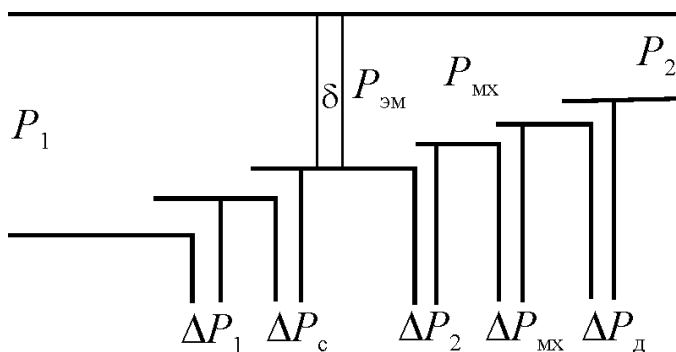


Рис. 10.13

Рассмотрим процесс преобразования энергии в режиме двигателя, перемещаясь по схеме замещения рис. 10.11, б 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

$$\Delta P_c = m_1 R_0 I_0^2.$$

Оставшаяся часть активной мощности передаётся из статора в ротор через зазор  $\delta$  посредством магнитного поля. Она называется *электромагнитной мощностью* и соответствует мощности, рассеиваемой на сопротивлении  $R'_2/s$ . Поэтому

$$P_{эм} = m_1 R'_2 I_2'^2 / s = m_2 R_2 I_2^2 / s \quad (10.20)$$

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  $P_{\text{мх}}$ , развиваемую на валу:

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

Часть механической мощности теряется внутри двигателя в виде механических потерь  $\Delta P_{\text{мх}}$ , вызванных трением в опорах и трением о воздух. Кроме того, в двигателе существуют другие потери  $\Delta P_{\text{д}}$ , 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

$$P_2 = P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{д}} \quad (10.22)$$

Отсюда КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}, \quad (10.23)$$

где  $P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_c + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{д}}$ .

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

$$\eta = \frac{\beta P_{\text{ном}}}{\beta P_{\text{ном}} + \Delta P_c + \beta^2 \Delta P_{\text{м}}},$$

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

Асинхронные двигатели обладают высоким КПД. Например, КПД двигателей серии 5А мощностью от 1,5 до 250 кВт составляет соответственно 0,8...0,96.

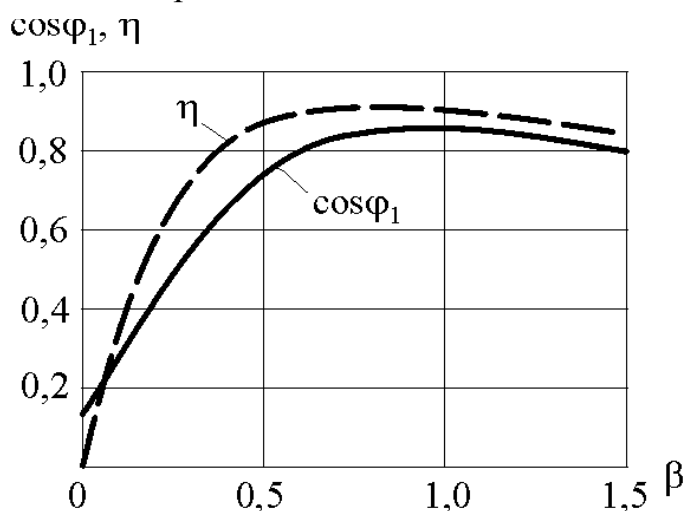


Рис. 10.14

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-

требуют 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  $0,7 \dots 0,9$ .

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  $P_{\text{мх}} = M\Omega$  и  $\Omega = (1-s)\omega_1 / p$

$$M = \frac{pm_1 R_2' I_2'^2}{\omega_1 s}. \quad (10.24)$$

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

$$M = \frac{pm_1 R_2' U_1^2}{\omega_1 s \left[ (R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (10.25)$$

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

$$M \approx \frac{pm_1 R_2' U_1^2}{\omega_1 s \left[ (R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (10.26)$$

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

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

при скольжении

$$s_{\text{кр}} \approx \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}, \quad (10.28)$$



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

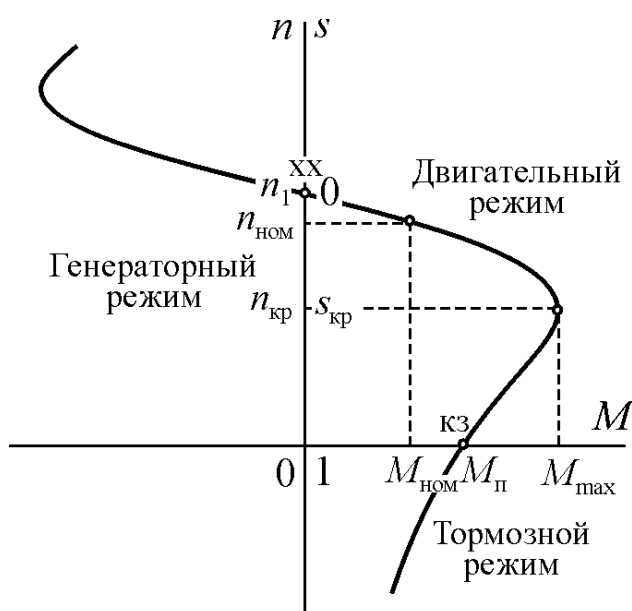


Рис. 10.16

пользуются понятием скольжения и строят механические характеристики в координатах  $nM$  или  $\Omega M$ . 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 *жесткость*. Она определяется как отношение приращения вращающего момента к приращению скорости вращения или как производная

$dM/dn$ . Чем жестче механическая характеристика, тем меньше изменения скорости вращения при изменении нагрузки на валу двигателя. Механическая характеристика асинхронных двигателей общего применения является жесткой, 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  $M_c$  будет уравновешен моментом, развиваемым двигателем  $M$ . Кроме момента сопротивления нагрузки двигатель при пуске преодолевает также динамический момент  $M_d = J \cdot d\Omega/dt$ , создаваемый моментом инерции масс всех приводимых в движение тел, включая ротор –  $J$ . Для обеспечения пуска необходимо, чтобы  $M > M_c + M_d$ .

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.

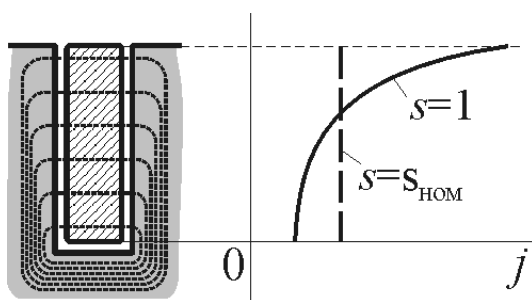
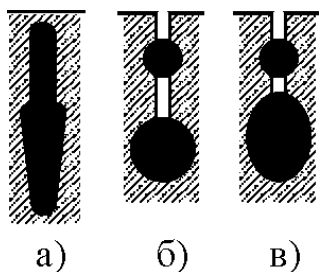


Рис. 10.17

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

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).



а) б) в)

Рис. 10.18

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 трапециевидальную или «бутылочную» (рис. 10.18, а). 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 дополнительное сопротивление  $R_d$ , разделённое на секции (рис. 10.19, а). Величина сопротивления цепи ротора асинхронного двигателя определяет значение критического скольжения. Чем больше сопротивление, тем больше критическое скольжение и пусковой момент. Пуск производится при разомкнутых

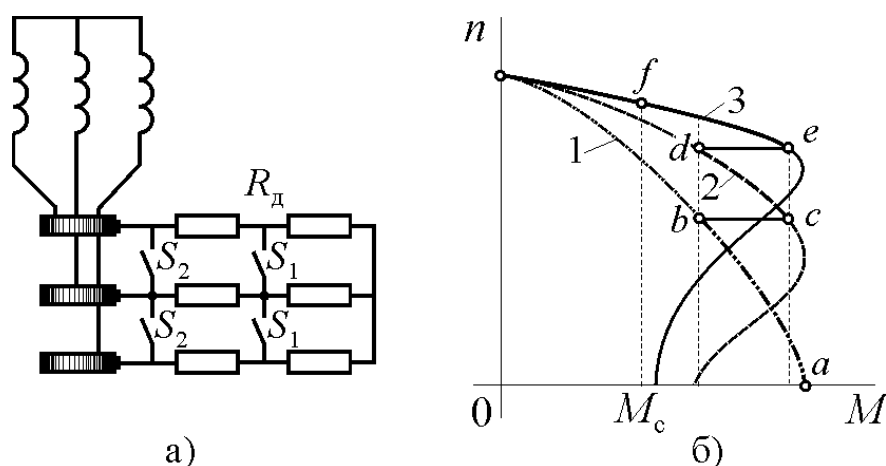


Рис. 10.19

контактах ключей  $S_1$  и  $S_2$ . Величина добавочного сопротивления при этом максимальна и двигатель развивает момент, соответствующий точке  $a$  на механической характеристике 1 рис. 10.19, б. По мере увеличения скорости

вращения рабочая точка перемещается по характеристике 1 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 произойдет замыкание контактов  $S_2$ . Контакты  $S_2$  полностью шунтируют добавочное сопротивление, замыкая обмотки ротора накоротко. Двигатель переходит в точку  $e$  на естественной механической характеристике 3 и разгоняется по ней до рабочей точки  $f$  соответствующей моменту нагрузки на валу  $M_c$ .

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  $\omega_1$  и, у двигателей с фазным ротором, изменением сопротивления цепи ротора  $R_2$ .

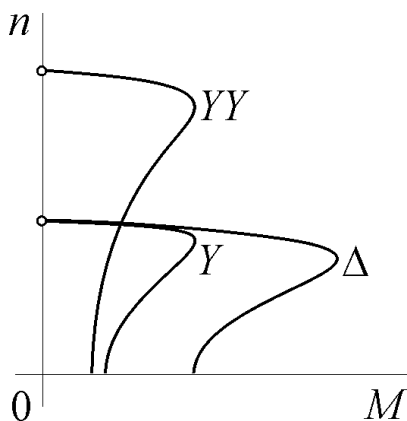
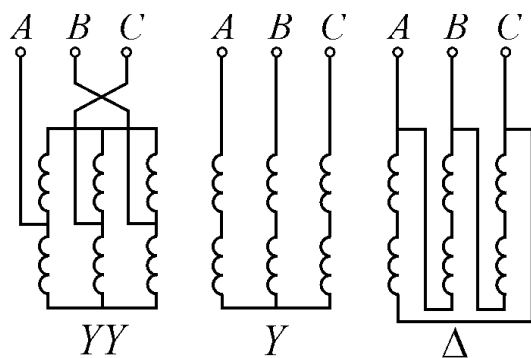


Рис. 10.20

#### 10.10.1. Регулирование изменением числа пар полюсов

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  $\Delta$ , то максимальный момент возрастает приблизительно вдвое и сохраняется постоянным произведение максимального момента на скорость вращения, т.е. мощность. Поэтому схема переключения  $YU/Y$  называется схемой переключения с постоянным моментом, а схема  $YU/\Delta$  – 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, а). При уменьшении напряжения уменьшается максимальный момент двигателя с сохранением значения критического скольжения (рис. 10.21, б). В случае постоянного момента нагрузки на валу двигателя  $M_c$  скорость при этом будет также уменьшаться

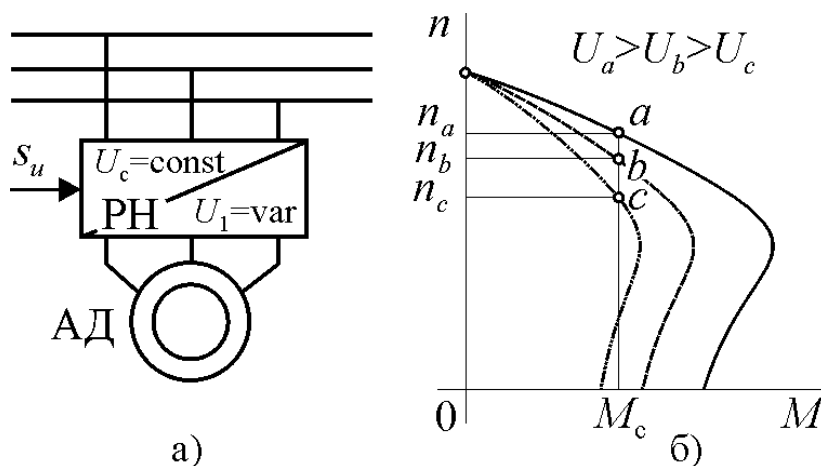


Рис. 10.21

Недостатками этого способа управления являются: 1) уменьшение перегрузочной способности двигателя при снижении напряжения вплоть до возможного «опрокидывания»; 2) сильно ограниченный диапазон регулирования  $0 < s < s_{кр}$ , вследствие чего его применяют с двигателями специального 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  $R_d$ , включённых в цепи фазных обмоток ротора (рис. 10.22, а), приводит к увеличению критического скольжения при сохранении макси-

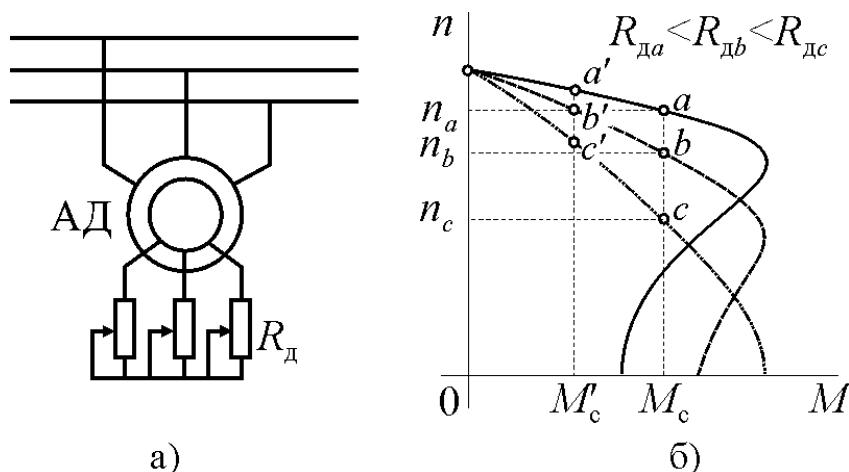


Рис. 10.22

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

Этот способ связан с большими тепловыми потерями в реостатах  $R_d$ , 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, б) так, что при режимах близких к холостому ходу регулирование скорости становится практически невозможным.

### 10.10.4. Регулирование изменением частоты питания (частотное регулирование)

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, а), 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  $U/f = \text{const}$  является наиболее распространённым. Однако по мере уменьшения частоты уменьшается также

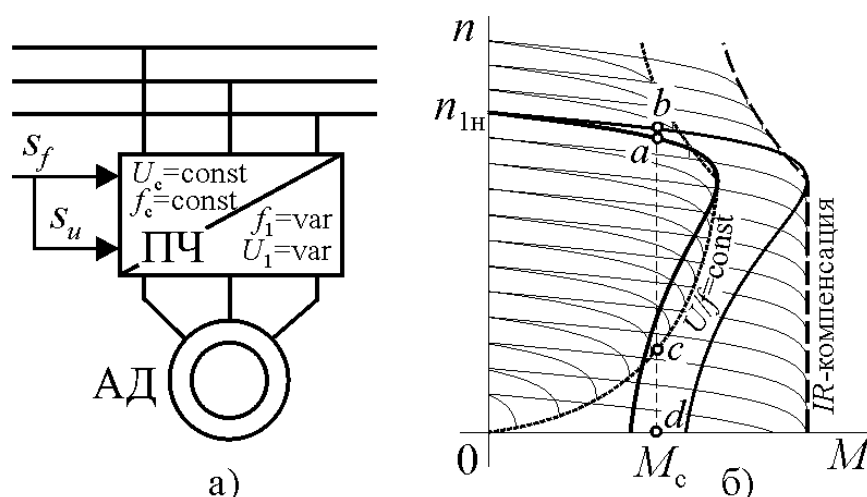


Рис. 10.23

максимальный момент двигателя (рис. 10.23, б). Это связано с 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  $R_1 I_1$ . 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, б).

Частотное регулирование позволяет плавно менять скорость вращения от нулевой до номинальной  $n_{1н}$ . 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, б), 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 соизмеримы 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  $U/f = \text{const}$  с 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 вращающихся 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, а).

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 (ПО на рис. 10.24, б). Пусковая обмотка расположена на статоре и смещена относительно рабо-

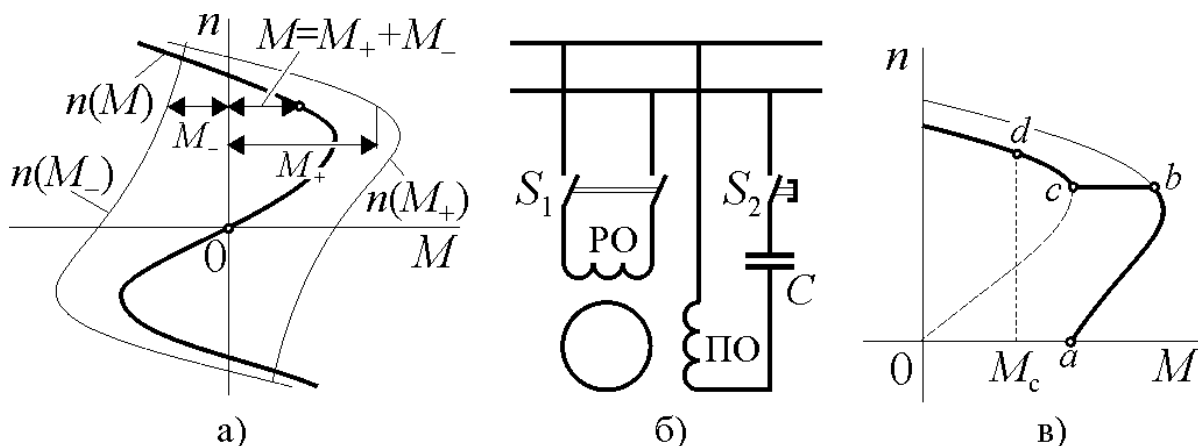


Рис. 10.24

чей  $PO$  на угол  $90^\circ$ . 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  $a$  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 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-

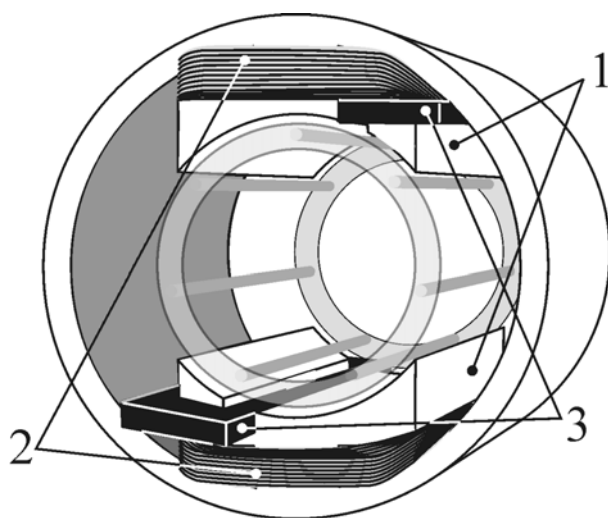


Рис. 10.25

этого недостатка достаточно для формирования кругового магнитного поля, тем не ме-

нее, в двигателе создаётся момент  $M_{\text{п}} = 0,2 \dots 0,5 M_{\text{ном}}$ , 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  $90^\circ$ . При питании обмоток токами одинаковой амплитуды и сдвинутыми по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$  в двигателе возбуждается круговое магнитное поле. Любая асимметрия питания обмоток в виде разных амплитуд и/или фазового смещения на угол, отличающийся от  $90^\circ$ , 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 *ОВ*, подключается к сети непосредственно, а вторая, называемая обмоткой управления *ОУ*, через регулирующее устройство. На рис. 10.26, *а* показана схема включения двигателя при амплитудном управлении. Фазосдвигающее устройство *ФСУ*

создаёт на входе регулятора напряжения в виде потенциометра фазовый сдвиг в  $90^\circ$ . 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  $0 \leq \alpha = U_{oy} / U_{ов} \leq 1,0$ , где  $U_{oy}$ ,  $U_{ов}$  – напряжения обмотки управления и обмотки возбуждения. При  $\alpha = 0$  магнитное поле в двигателе будет пульсирующим, а при  $\alpha = 1$  – круговым.

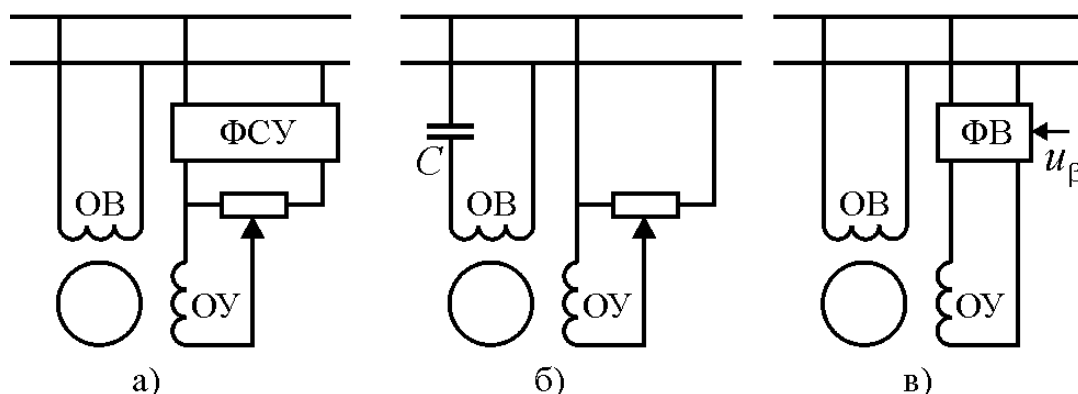


Рис. 10.26

На рис. 10.26, в показана схема включения двигателя при фазовом управлении. Здесь обмотка управления подключена к сети через фазовращатель  $\Phi В$ , управляемый сигналом  $u_\beta$ . Фазовое смещение напряжения на выходе фазовращателя может изменяться от нуля до  $90^\circ$ , изменяя характер магнитного поля от пульсирующего до кругового. При анализе процессов в двигателе с фазовым управлением в качестве коэффициента сигнала используют  $\sin \beta$ , где  $\beta$  – 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.

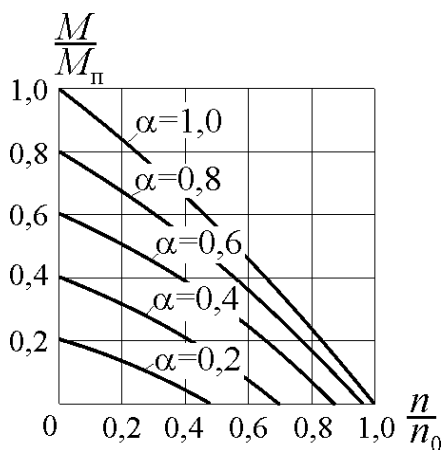


Рис. 10.27

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, б). 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 применения 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?