

ется без пускового реостата ( $R_o = 0$ ), то начальный пусковой момент  $M_{н0}$  может быть очень большим. Эта точка выходит за рамки графика рис. 16.13, б. Поэтому пуск двигателя без нагрузки может привести к аварии из-за недопустимо большой частоты вращения якоря.

При пуске с реостатом, ограничивающим пусковой ток и момент до допустимых значений  $M = M_n$ , механическую характеристику представляет кривая 2.

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения может выполняться реостатами пуска и возбуждения, а также изменением подаваемого напряжения.

Схема смешанного возбуждения дает двигателю преимущества каждого из способов и устраняет их недостатки.

## **ЛЕКЦИЯ 17. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Из общего перечня электрических машин переменного тока (рис. 15.2) большее распространение нашли асинхронные и синхронные машины. Несмотря на различия в устройстве, эти машины имеют много общего в принципе работы. Их принцип действия основан на использовании двух явлений: на явлении искусственно созданного вращающегося магнитного поля и на воздействии этого поля на проводники с токами.

Асинхронные машины используют, в основном, как двигатели. Трехфазные асинхронные двигатели находят самое широкое применение в различных областях народного хозяйства. Их широкое распространение обусловлено простотой конструкции и надежностью в работе. Недостатком

асинхронных машин является относительная сложность регулирования их эксплуатационных характеристик.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов и двигателей. Синхронные генераторы служат основным источником электрической энергии. Мощность современных синхронных генераторов, применяемых на электростанциях, достигает  $1200\text{ МВт}$  и более.

Синхронные двигатели обычно применяют в приводах большой мощности, до нескольких десятков  $\text{МВт}$ . Двигатели малой мощности используют в устройствах, где требуется строгое постоянство скорости вращения.

## 1. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 1.1. Особенности конструкции двигателей.

По конструкции асинхронные двигатели разделяют на два типа: с фазным ротором и с короткозамкнутым ротором. Конструкция статора одинакова. Незначительные отличия обусловлены разными формами роторов.

Элементы конструкции *статора* показаны на рис. 17.1. Для двигателей малой мощности корпус отливается из алюминия. Для двигателей средней и большой мощности – из чугуна. Наружная поверхность корпуса может иметь ребра, которые необходимы для увеличения площади охлаждения. Для крепления двигателя используют лапы.

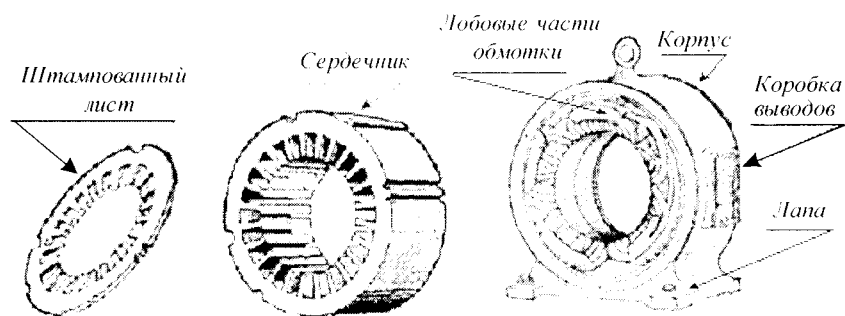


Рис. 17.1. Элементы конструкция статора асинхронного двигателя

Сердечник статора представляет собой полый цилиндр, собранный из отштампованных листов электротехнической стали. Листы изолированы друг от друга слоем лака, собраны в пакет и скреплены специальными скобами или продольными сварными швами снаружи. Такая конструкция обеспечивает уменьшение вихревых токов. После сборки сердечник запрессовывается в корпус.

Обмотка статора трехфазная, выполняется в виде одно или многовитковых катушек. Пример размещения катушек трехфазной обмотки приведен на рис. 17.2. В приведенном примере каждая фаза имеет три катушки, уложенные в соседних пазах. Катушки соседних фаз сдвинуты по окружности статора на угол  $120^\circ$ . Лобовые части катушек проходят вдоль торцевой части сердечника статора (см. рис. 17.1).

Концы обмоток каждой фазы статора присоединяются к зажимам коробки выводов. Расположение и обозначение выводов обмотки на клеммной панели приведено на рис. 17.3. Видно, что обмотку статора можно включить звездой или треугольником.

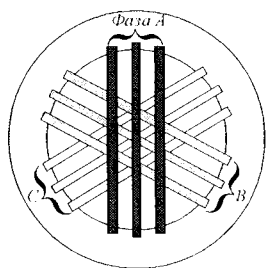


Рис. 17.2. Размещение трехфазной обмотки в сердечнике статора

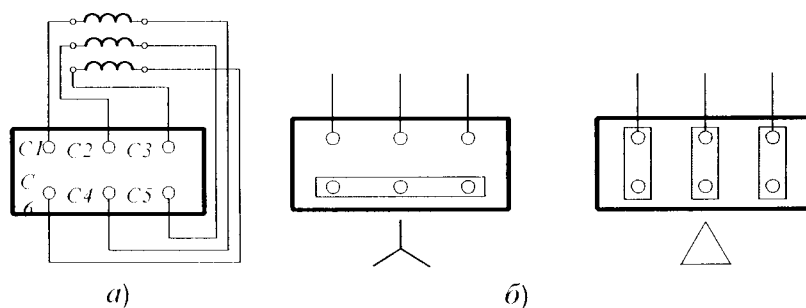


Рис. 17.3. Расположение выводов обмотки статора на клеммной панели (а) и способы соединения обмоток фаз статора (б)

Как и статор, *ротор* асинхронных двигателей собирают из штампованных листов электротехнической стали, которые запрессовывают на вал (рис. 17.4, а). Обмотку короткозамкнутого ротора типа «беличье колесо» изготавливают из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами (рис.17.4, б). Стержни вставляют в пазы ротора без

изоляции. Для маломощных двигателей короткозамкнутую обмотку отливают из алюминия вместе с кольцами и торцевыми лопастями для вентиляции машины (рис. 17.4, в). Схема включения в сеть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 17.4, г.

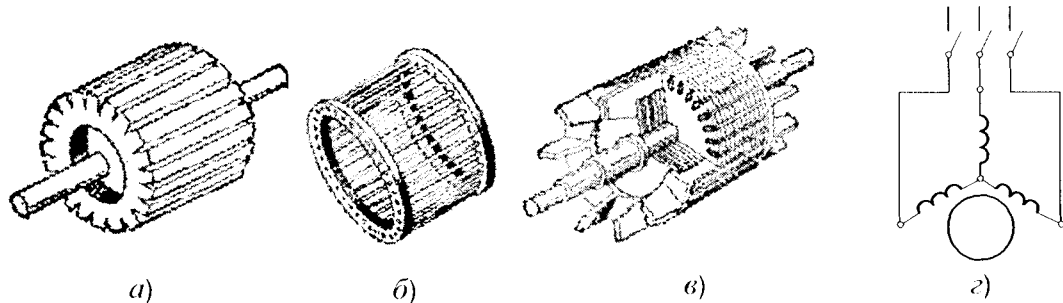


Рис. 17.4. Элементы конструкции ротора: (а) - пакет ротора с валом, (б) - обмотка беличье колесо, (в) - ротор в сборе, (г) - схема включения двигателя с короткозамкнутым ротором

Фазные роторы используют в асинхронных двигателях средней и большой мощности. Конструкция фазного ротора показана на рис. 17.5, а.

На сердечнике фазного ротора 1 укладывают трехфазную обмотку 2, аналогичную обмотке статора. Ее соединяют в звезду, а концы подключают к контактным кольцам 3. Посредством контактных колец и щеток обмотка ротора соединяется с пусковым регулировочным реостатом. Это позволяет регулировать пусковой ток. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 17.5, б.

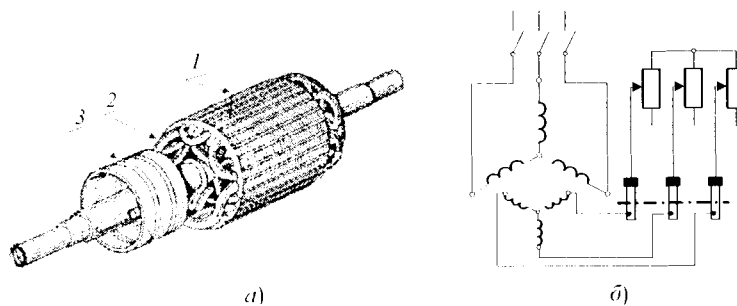


Рис. 17.5. Конструкция фазного ротора (а) и схема включения двигателя с фазным ротором (б)

### 1.2. Принцип действия асинхронного двигателя.

Как было показано в лекции 15, двух или трехфазной обмоткой статора можно создать вращающееся магнитное поле. Линейная скорость движе-

ния волны определена выражением (15.17). На практике чаще используют не линейную, а угловую скорость

$$\Omega = \frac{v}{\pi \cdot D_{cm}} \cdot 2\pi. \quad (17.1)$$

Подставляя в (17.1) значение  $v$  из (15.17), получим:

$$\Omega = \frac{\omega}{p}. \quad (17.2)$$

Частоту вращения поля в (об/мин) легко найти, учитывая соотношение между  $\Omega$  и  $f$ . Тогда:

$$n\left(\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right) = \frac{60 \cdot \Omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot \omega}{p \cdot 2\pi} = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (17.3)$$

Число пар полюсов  $p$  представляет натуральный ряд чисел. Следовательно, частоту вращения поля можно изменять дискретно, изменением  $p$ . Например,

$p$	1	2	3	4	5	6
$n(\text{об/мин})$	3000	1500	1000	750	600	500

В дальнейшем угловую скорость  $\Omega$  и частоту вращения магнитного поля  $n$  будем обозначать индексом  $l$ , т. е.  $\Omega_l$ ; и  $n_l$ .

Пересекая обмотку ротора, магнитное поле индуцирует в его стержнях Э.Д.С.:

$$e_2 = l \cdot v_{\text{отн}} \cdot B_{\delta}. \quad (17.4)$$

Под действием этой Э.Д.С. по замкнутой обмотке ротора потечет ток. В результате взаимодействия токов ротора с магнитным полем статора на стержни ротора действуют электромагнитные силы  $F_{\text{эм}}$ . Это заставляет ротор вращаться по направлению поля с частотой  $n_2$ .

Отличительным признаком асинхронного двигателя является всегда существующая положительная разность,  $n_1 - n_2 > 0$ . Ротор никогда не может достигнуть частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , так как при равенстве  $n_1$

$= n_2$  исчезнут электромагнитные силы, приводящие его в движение.

Разность частот вращения магнитного поля и ротора

$$n_1 - n_2 = n_s \quad (17.5)$$

называют *частотой скольжения*. Аналогичная разность скоростей

$$\Omega_1 - \Omega_2 = \Omega_s$$

называется *скоростью скольжения*.

Отношение (17.5) к частоте вращения поля  $n_1$  обозначают  $s$  и называют *скольжением*:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (17.6)$$

Скольжение часто выражают через скорость вращения, в процентах:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} \cdot 100. \quad (17.7)$$

Очевидно, что в первый момент пуска двигателя  $s = 1$ . Асинхронные двигатели проектируют так, что на холостом ходу  $s_x = 0,001 \div 0,005$ , а при номинальной нагрузке  $s_{ном} = 0,05$ .

В установившемся режиме  $n_s$ ,  $\Omega_s$  и  $s$  – постоянные. Это означает, что вращающий момент двигателя  $M$  уравновешивает противодействующий момент  $M_{пр}$ . Если по каким – либо причинам противодействующий момент увеличится, то ротор начнет тормозиться, т. е. скорость вращения  $\Omega_2$  будет падать, а скорость его скольжения – увеличиваться. Но последнее вызовет изменение ряда взаимно связанных величин. Увеличатся Э.Д.С.  $e_2$  и токи  $I_2$  в проводниках обмотки ротора, электромагнитные силы  $F_{м2}$  и вращающий момент  $M$ . Когда вращающий момент  $M$  станет равным противодействующему  $M_{пр}$ , изменения прекратятся. Двигатель возвратится в установившейся режим. Но скорость вращения ротора  $\Omega_2$  теперь меньше.

В случае уменьшения противодействующего момента произойдут аналогичные, но противоположно направленные физические процессы. Это

означает, что асинхронный двигатель обладает свойством автоматического изменения вращающего момента, т. е. свойством *саморегулирования*.

### 1.3. Электромагнитный момент асинхронного двигателя.

Величина электромагнитного момента, действующего на ротор диаметром  $D$  с общим числом активных проводников  $N_2$ , определяется выражениями (15, 6) и (15, 7):

$$M = l \cdot B_{\delta} \cdot I_{2a} \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \frac{D}{2} = l \cdot B_{\delta} \cdot I_{2a} \cdot N_2 \cdot \frac{D}{2}, \quad (17.8)$$

где  $I_{2a}$  – активная составляющая тока в проводниках ротора,  $B_{\delta}$  – действующее значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Определим зависимость момента от величины магнитного потока полюсов  $\Phi_{II}$ . Для этого учтем, что связь между действующим  $B_{\delta}$  и средним  $B_{cp}$  значениями магнитной индукции имеет вид:

$$B_{\delta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot B_{cp}.$$

Известно (8.3), что значение  $B_{cp}$  пропорционально величине магнитного потока полюса и обратно пропорционально площади полюса  $\tau \cdot l$ . Поэтому

$$B_{\delta} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{\Phi_{II}}{l \cdot \tau}. \quad (17.9)$$

Выразим диаметр ротора  $D$  через число и ширину полюсов:

$$D = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{\pi}. \quad (17.10)$$

Подставляя (17.9) и (17.10) в (17.8), получим:

$$M = \frac{p \cdot N_2}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \Phi_{II} \cdot I_{2a}. \quad (17.11)$$

Видим, что электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален магнитным потокам полюсов и активной составляющей токов

ротора.

Используя выражение (17.7), получим зависимость  $M(s)$

$$M = C \cdot \Phi_{II} \cdot \frac{s \cdot E_{2n} \cdot R_2^2}{R_2^2 + (s \cdot X_{2n})^2}, \quad (17.12)$$

где  $C = \frac{p \cdot N_2}{2 \cdot \sqrt{2}}$ ;  $E_{2n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \cdot \varpi_2 \cdot \Phi_{II}$  – Э.Д.С. проводников ротора в начальный момент пуска [см.(15.2а)];  $R_2$  и  $X_2$  – активное и реактивное сопротивления обмотки ротора, причем  $X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = s \cdot \omega_1 \cdot L_2$ ;  $X_{2n} = X_2/s$  – реактивное сопротивление в начальный момент пуска.

Из (17.12) следует, что при  $s = 0$  и  $s = \infty$   $M = 0$ . Значит существует максимальное (экстремальное) значение электромагнитного момента  $M_m$ . Исследование на экстремум позволило получить выражение для максимального значения вращающего момента:

$$M_m = \frac{C'}{2 \cdot X_{2n}} \cdot \Phi_{II}^2. \quad (17.13)$$

Выражение (17.13) показывает, что максимальный момент пропорционален квадрату магнитного потока полюсов. Но величина  $\Phi_{II}$  пропорциональна напряжению (8.15). Значит, снижение напряжения приводит к резкому уменьшению магнитного потока и вращающего момента двигателя  $M$ .

Знание  $M_m$  позволяет привести (17.12) к виду:

$$M = \frac{2 \cdot M_m}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}}}, \quad (17.14)$$

где  $s_{кр}$  – величина скольжения, при котором двигатель останавливается, т. е.  $\partial M / \partial s = 0$ .

График зависимости  $M(s)$  приведен на (рис.17.6). На участке от  $s = 0$  до  $s_{кр}$  зависимость близка к линейной. На этом участке с увеличением  $s$



вращающий момент увеличивается. Двигатель работает устойчиво. При  $s = s_{кр}$  вращающий момент достигает максимума  $M = M_m$ . Асинхронные двигатели проектируют так, чтобы  $M_m$  был больше номинального момента  $M_{ном}$  в  $2 \div 2,5$  раза. При  $s > s_{кр}$  зависимость  $M(s)$  переходит к гиперболической. На этом участке с увеличением  $s$  вращающий момент уменьшается. Двигатель теряет свойство саморегулирования и под действием  $M_{нр}$  останавливается.

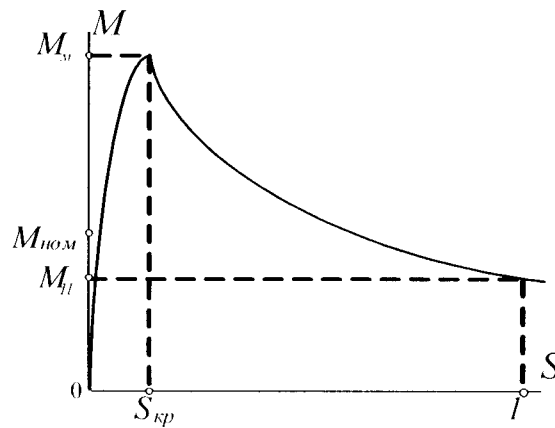


Рис. 17.6. Зависимость вращающего момента от скольжения

В начальный момент пуска  $s = 1$ . Вращающий момент называют пусковым, обозначают  $M_{н}$  и определяют выражением:

$$M_{н} = 2 \cdot M_m \cdot \frac{R_2}{X_{2н}}. \quad (17.15)$$

Выражение показывает, что величина пускового момента  $M_{н}$  пропорциональна активному сопротивлению обмотки ротора.

#### 1.4. Механическая и рабочие характеристики асинхронного двигателя

Механической характеристикой называют зависимость скорости  $\Omega_2$  или частоты вращения ротора  $n_2$  от электромагнитного момента  $M$  (рис.17.7). По своей форме она отличается от кривой  $M(s)$  только положением по отношению осей координат.

Механическая характеристика показывает, что при увеличении вра-

щающего момента от нуля до максимального значения скорость (или частота вращения) ротора снижается незначительно. На участке  $\Omega_{кр} \leq \Omega_2 \leq \Omega_1$  проявляется свойство саморегулирования двигателя, поэтому его работа устойчивая. Всякое отклонение  $M_{np}$  от точки равенства моментов (например, от точки  $p$  на графике) вызовет переходной процесс саморегулирования.

При перегрузке двигателя, когда  $M_{np} > M_v$  двигатель входит в область неустойчивого режима. Скорость (или частота вращения) ротора уменьшается до полной остановки двигателя. Следовательно, мощность двигателя нужно выбирать так, чтобы при максимальных перегрузках сохранялось условие  $M_{np} < M_v$ .

Рабочие характеристики (рис.17.8) показывают зависимость эксплуатационных параметров от мощности на валу асинхронного двигателя  $P_2$ .

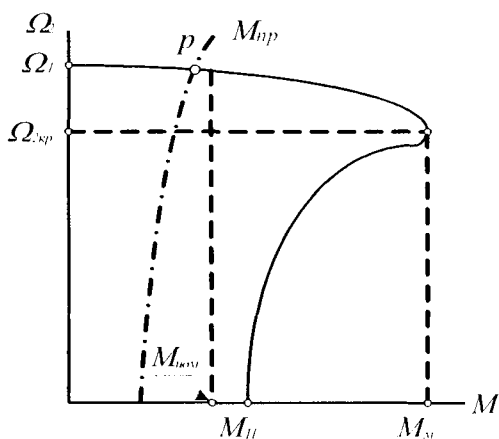


Рис. 17.7. Механическая характеристика асинхронного двигателя

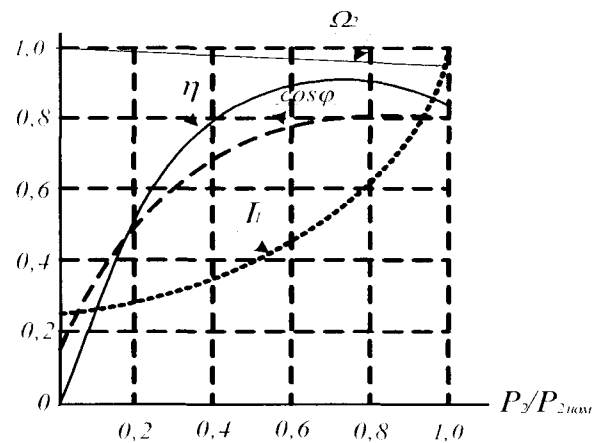


Рис.17.8. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

К эксплуатационным параметрам относят ток обмотки статора, активную мощность, К.П.Д., скорость ротора и коэффициент мощности двигателя. Графики рис. 17.8 построены в относительных величинах.

Графики рис. 17. 8 показывают, что в режиме холостого хода, когда  $M \approx 0$ , ток обмотки статора  $I_{1X} = (0,2 \div 0,5) \cdot I_{ном}$ . Значение  $I_{1X}$  достаточно велико, а диапазон изменений определяется диапазоном мощностей двигателей. По мере роста нагрузки на валу ток увеличивается, в основном, его активная

составляющая. За счет увеличения активной составляющей тока происходит рост коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от  $0,2 \div 0,3$  в режиме холостого хода до  $0,7 \div 0,85$  при номинальной нагрузке.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  в режиме холостого хода равен нулю. Это объясняется тем, что полезная работа не выполняется, а потери в магнитопроводе и механизме двигателя номинальные. По мере увеличения мощности  $P_2$  К.П.Д. увеличивается. Рост  $\eta$  замедляется при больших нагрузках, так как потери в обмотках пропорциональны квадрату токов. Скорость ротора  $\Omega_2$  уменьшается незначительно, от  $0,998 \cdot \Omega_1$  в режиме холостого хода до  $0,95 \cdot \Omega_1$  при номинальной нагрузке.

## 2. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронный двигатель – это машина переменного тока. Его принцип действия основан на электромеханическом воздействии вращающегося магнитного поля статора на проводники ротора с током. Однако, если в асинхронном двигателе значение токов ротора определяется скольжением  $s$ , то в синхронном двигателе ток ротора определяется величиной стороннего источника напряжения постоянного тока. Это и обеспечивает синхронное вращение ротора и магнитного поля статора.

### *2.1 Конструкция и принцип работы синхронного двигателя.*

Конструкция статора синхронного двигателя такая же, как и у асинхронного двигателя. Его обмотка подключается к промышленной сети частотой  $50 \text{ Гц}$  и создает вращающееся магнитное поле.

Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит. Его обмотка подключается через контактные кольца и щетки к независимому источнику напряжения постоянного тока (рис. 17.9). Токи обмотки ротора

составляющая. За счет увеличения активной составляющей тока происходит рост коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от  $0,2 \div 0,3$  в режиме холостого хода до  $0,7 \div 0,85$  при номинальной нагрузке.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  в режиме холостого хода равен нулю. Это объясняется тем, что полезная работа не выполняется, а потери в магнитопроводе и механизме двигателя номинальные. По мере увеличения мощности  $P_2$  К.П.Д. увеличивается. Рост  $\eta$  замедляется при больших нагрузках, так как потери в обмотках пропорциональны квадрату токов. Скорость ротора  $\Omega_2$  уменьшается незначительно, от  $0,998 \cdot \Omega_1$  в режиме холостого хода до  $0,95 \cdot \Omega_1$  при номинальной нагрузке.

## 2. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронный двигатель – это машина переменного тока. Его принцип действия основан на электромеханическом воздействии вращающегося магнитного поля статора на проводники ротора с током. Однако, если в асинхронном двигателе значение токов ротора определяется скольжением  $s$ , то в синхронном двигателе ток ротора определяется величиной стороннего источника напряжения постоянного тока. Это и обеспечивает синхронное вращение ротора и магнитного поля статора.

### *2.1 Конструкция и принцип работы синхронного двигателя.*

Конструкция статора синхронного двигателя такая же, как и у асинхронного двигателя. Его обмотка подключается к промышленной сети частотой  $50 \text{ Гц}$  и создает вращающееся магнитное поле.

Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит. Его обмотка подключается через контактные кольца и щетки к независимому источнику напряжения постоянного тока (рис. 17.9). Токи обмотки ротора

создают независимое магнитное поле. Взаимодействие двух магнитных полей заставляет вращаться ротор. Направление и скорость вращения ротора совпадают с направлением и скоростью вращения поля статора.

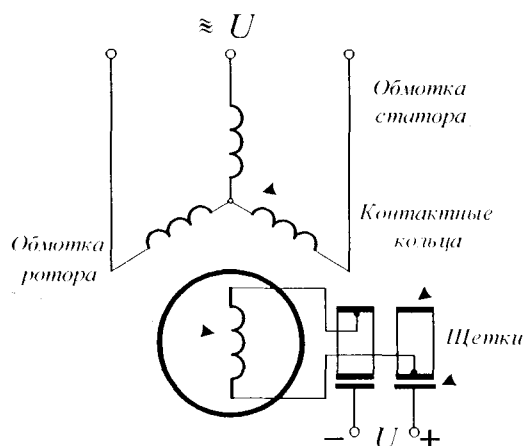


Рис. 17.9. Электрическая схема синхронного двигателя

Рассмотрим принцип работы синхронного двигателя с помощью простейшей модели, показанной на рис. 17.10. На модели представлены две разделенные воздушным зазором магнитные системы. Внешняя система имитирует вращающееся магнитное поле статора. Будем полагать, что эта система может вращаться относительно своего центра. Внутренняя система модели имитирует ротор и его магнитное поле.

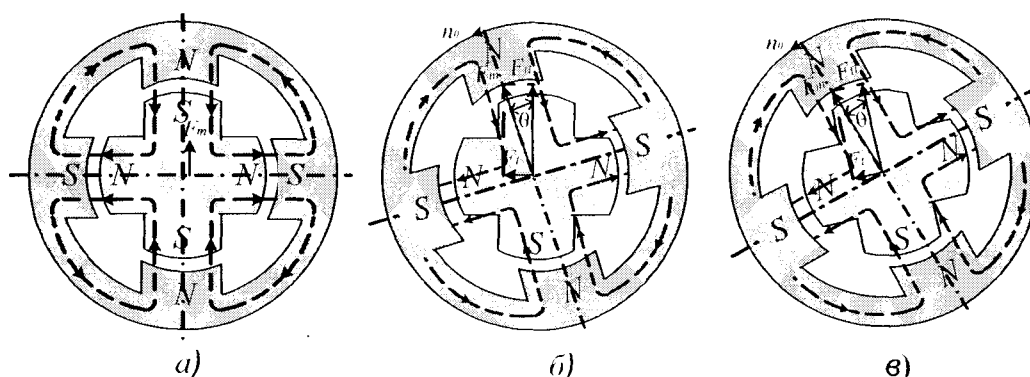


Рис. 17.10. Упрощенная модель синхронного двигателя (а), возникновение электромагнитного момента на роторе (б). (в)

Предположим, что внешняя система полюсов (магнитное поле статора) неподвижна. Благодаря силам магнитного притяжения ротор распо-

жится так, что его полюсы будут находиться под противоположными полюсами внешней системы (рис. 17.10, а). При таком расположении силы магнитного притяжения  $F_m$  направлены по оси полюсов и не создают электромагнитного момента.

Допустим, что внешняя система полюсов начала вращение с частотой  $n_1$ . В начальный момент эта система сместится относительно ротора на некоторый угол  $\theta$  (рис. 17.10, б). При этом вектор силы магнитного притяжения  $F_m$  также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь эта сила состоит из двух составляющих:  $F_m = F_{II} + F_I$ . Сила  $F_I$  называется тангенциальной. Она направлена перпендикулярно оси полюса. Совокупность составляющих  $F_I$ , действующих на все полюсы ротора, создает вращающий момент  $M$ .

Под действием момента  $M$  ротор приходит в движение и в дальнейшем вращается синхронно с внешней системой, с частотой  $n_1$  (рис. 17.10, в). Видим, что обязательным условием возникновения вращающего момента в синхронном двигателе является отставание магнитного поля ротора от вращающегося магнитного поля статора на угол  $\theta$ .

Перейдем от модели рис 17.10 к реальному синхронному двигателю. При включении обмотки статора в трехфазную сеть создается вращающееся со скоростью  $\Omega = \omega/p$  магнитное поле. Будем считать, что скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля, а на вал действует нагрузка –  $M_{np}$ .

Магнитный поток вращающегося магнитного поля индуцирует в обмотке статора Э.Д.С. самоиндукции. Согласно (15.2а), ее значение определяется выражением

$$\dot{E}_{cm1} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Omega \cdot \varpi_{1cm} \cdot \dot{\Phi}_m. \quad (17.16)$$

Поле ротора вращается с такой же частотой и его поток также пересекает витки обмотки статора, индуцируя Э.Д.С.  $E_{cm2}$

$$\dot{E}_{cm2} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Omega \cdot \varpi_{1cm} \cdot \dot{\Phi}_{II}, \quad (17.17)$$

где  $\Phi_{II}$  – поток одного полюса ротора,  $\varpi_{1cm}$  число витков одной фазы статора.

Фазовые соотношения между  $E_{cm1}$  и  $E_{cm2}$  обусловлены техническими параметрами машины и противодействующим моментом  $M_{np}$ , на валу. Складываясь они образуют результирующую Э.Д.С.,  $E_0$ , которая уравнивает приложенное к обмотке статора напряжение

$$\dot{U} = \dot{E}_0 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot \Omega \cdot \varpi_{1cm} \cdot \dot{\Phi}_0, \quad (17.18)$$

где  $\Phi_0$  – результирующий магнитный поток.

Выражение (17.18) позволяет выразить магнитный поток  $\Phi_0$  как функцию Э.Д.С.  $E_0$  и упрощает определение электромагнитного момента машины.

Электромагнитный момент определим по силам, действующим на ротор. Силы  $F_{cp}$  определяются выражением (15.6), которое имеет вид:

$$F_{cp} = l \cdot B_{\delta} \cdot I_a,$$

где  $I_a$  – активная составляющая тока статора.

Воспользовавшись соотношением, связывающим  $B_{\delta}$  и  $\Phi_0$ , определим выражение для электромагнитного момента двигателя:

$$M = \frac{p \cdot N_1}{2 \cdot \sqrt{2}} \Phi_{II} \cdot I_a. \quad (17.19)$$

Выражение (17.19) показывает, что электромагнитный момент пропорционален магнитным потокам полюсов ротора и активным составляющим токов в обмотке статора. Но активная составляющая тока статора  $I_a$  синхронной машины является функцией угла рассогласования  $\theta$  (см. рис. 17.10, б), причем

$$I_a = (U_1/X_1) \cdot \sin\theta, \quad (17.20)$$

где  $U_1$  – действующее значение напряжения обмотки статора,  $X_1$  – синхронное сопротивление.

Подставляя (17.20) в (17.19), получаем

$$M = \frac{p \cdot N_1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot X_1} \Phi_{II} \cdot U_1 \cdot \sin\theta. \quad (17.21)$$

Выражение (17.21) определяет зависимость электромагнитного момента  $M$  от угла рассогласования  $\theta$  и называется *угловой характеристикой*.

Выражая  $\Phi_{II}$  как функцию Э.Д.С.  $E_{cm2}$  по (17.17) и подставляя это значение в (17.21), получим

$$M = \frac{N_1}{2\varpi_{1cm} \cdot \Omega \cdot X_1} \cdot E_{cm2} \cdot U_1 \cdot \sin\theta.$$

Учтем, что отношение  $N_1/2$  к  $\varpi_{1cm}$  равно числу фаз ( $\kappa = 3$ ). Поэтому выражение для угловой характеристики принимает вид:

$$M = \frac{3}{\Omega \cdot X_1} \cdot E_{cm2} \cdot U_1 \cdot \sin\theta.$$

Произведение

$$M_m = \frac{3 \cdot U_1}{\Omega \cdot X_1} \cdot E_{cm2} \quad (17.22)$$

определяет амплитудное значение угловой характеристики. Амплитудное значение  $M_m$  пропорционально приложенному к обмотке статора напряжению  $U_1$  и  $E_{cm2}$ . Величина  $U_1$  постоянна. Э.Д.С.  $E_{cm2}$  создается магнитным полем ротора. Ее значение является функцией тока ротора  $I_a$  (тока возбуждения). Зависимость  $E_{cm2}(I_a)$  называют характеристикой холостого хода (рис. 17.11).

На начальном участке характеристики холостого хода  $E_{cm2}$  увеличивается пропорционально  $I_a$ . Следовательно, увеличивается и амплитудное значение угловой характеристики (17.22). По мере насыщения магнитопровода машины рост  $E_{cm2}$  сначала замедляется, а затем прекращается. Поэтому син-



хронный двигатель целесообразно эксплуатировать при  $I_c = I_{crit}$ , а (17.22) не может быть сколь угодно большим.

## 2.2. Пуск синхронного двигателя.

Пуск синхронного двигателя существенно отличается от пуска двигателей других типов. Отличие обусловлено принципом создания вращающего момента и достаточно большой массой ротора. Магнитное поле статора вращается со скоростью  $\Omega$  с момента подачи напряжения  $U_1$ . Ротор, как всякое массивное тело, может увеличить скорость вращения от нуля до  $\Omega$  за некоторый интервал времени.

При включении обмотки статора в трехфазную сеть магнитное поле статора вращается со скоростью  $\Omega$  относительно неподвижного ротора. Магнитная индукция поля статора в каждой точке поверхности ротора изменяется по синусоидальному закону. При этом средние значения сил  $F_{cp}$  воздействия поля статора на постоянные токи обмотки ротора равны нулю. Ротор остается неподвижным.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение со скоростью  $\Omega_1$ , близкой к скорости  $\Omega$ . Когда разность скоростей  $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_1$  станет достаточно малой, между полюсами ротора и вращающегося поля статора устанавливается магнитная связь. Эта связь обеспечивает возникновение синхронного электромагнитного момента. Под действием момента ротор втягивается в синхронизм.

Существует несколько способов пуска синхронного двигателя. Больше распространение получил асинхронный способ (рис 17.12). Для реализации способа в пазах полюсных наконечников ротора размещают стержни пусковой короткозамкнутой обмотки «беличье колесо».

Для пуска двигателя обмотку возбуждения ротора замыкают на резистор  $R_{II}$ , а обмотку статора подключают к трехфазной сети. В короткозамк-

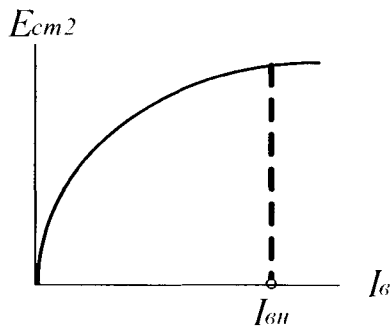


Рис. 17.11. Характеристика холостого хода

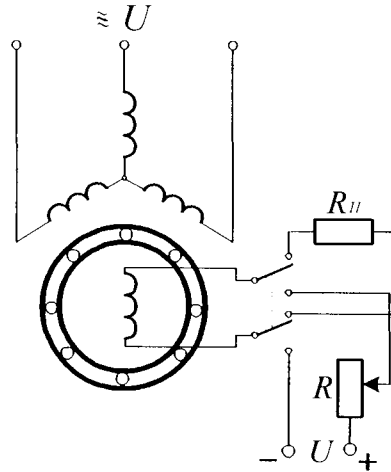


Рис. 17.12. Схема асинхронного пуска

нутой обмотке ротора возникает асинхронный вращающий момент. Под действием асинхронного момента скорость ротора  $\Omega_1$  удается довести до  $0,95 \cdot \Omega$ . Затем обмотку возбуждения ротора подключают к источнику постоянного тока. Возникает синхронный электромагнитный момент. Когда  $\Delta\Omega > 0$ , угол  $\theta$  непрерывно изменяется. Согласно (17.21) изменяется и синхронный момент по синусоидальному закону. Только когда скорость ротора возрастет до  $\Omega$ , значения  $\theta$  и  $M$  станут неизменными. Двигатель вошел в синхронизм. Ротор и магнитное поле статора вращаются синхронно.

Отметим, что синхронные двигатели могут иметь конструктивные отличия. В основном, отличия проявляются в конструкции ротора. Существуют двигатели явнополюсные с электромагнитным возбуждением, явнополюсные с возбуждением постоянными магнитами, явнополюсные реактивные, неявнополюсные гистерезисные, реактивно - гистерезисные и др. В лекции изложен принцип устройства и работы только синхронного явнополюсного с электромагнитным возбуждением двигателя. Знание этого материала позволит при необходимости самостоятельно освоить особенности работы других синхронных машин.