Тема 9. Электрические машины переменного тока

Вопросы темы.

1. Классификация машин переменного тока.
2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя.
3. Создание вращающегося магнитного поля.
4. Скорость вращения магнитного поля. Скольжение.
5. Асинхронный двигатель с фазным ротором.
6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.
7. Пуск и реверсирование асинхронных двигателей.
8. Однофазный асинхронный двигатель.
9. Устройство и принцип действия синхронного генератора
10. Реакция якоря
11. Характеристики синхронного генератора
12. Работа синхронной машины в режиме двигателя
13. Пуск и остановка синхронного двигателя
14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

1. Классификация машин переменного тока

Электрические машины делятся на две большие категории: **генераторы**, которые служат для преобразования механической энергии в электрическую, и **двигатели**, которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Машины переменного тока в свою очередь делятся на **асинхронные** и **синхронные**.

Статор *асинхронной машины* создает вращающееся магнитное поле, а ротор вращается с меньшей скоростью, т. е. асинхронно. Увеличение нагрузки двигателя вызывает уменьшение скорости вращения ротора. Асинхронная машина была изобретена М.О. Доливо-Добровольским еще в 1888 г., но до настоящего времени сохранила свои основные черты.

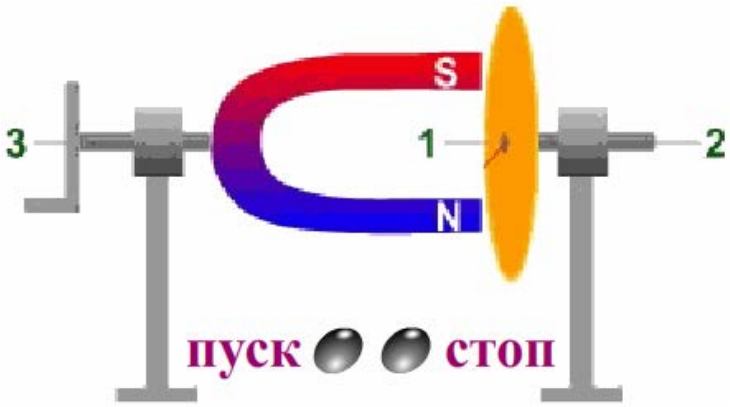
В *синхронной машине* скорость вращения ротора совпадает со скоростью вращения магнитного поля статора и не зависит от нагрузки двигателя.

Все электрические машины обратимы, т. е. могут служить как двигателями, так и генераторами. Асинхронные машины используются главным образом как двигатели, а синхронные — и как двигатели, и как генераторы. Практически все генераторы переменного тока — синхронные.

2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель, изобретенный в 1888 г., благодаря простоте своей конструкции и в настоящее время распространен настолько широко, что является основой электропривода.

Принцип работы асинхронных двигателей основан на опыте Араго. Если под горизонтально подвешенным на нити 2 диском 1 из проводящего немагнитного материала (например, из меди) поместить вращающийся подковообразный магнит 3, то диск начнет вращаться в ту же сторону, что и магнит.



Это явление объясняется следующим образом. Вращающееся магнитное поле, создаваемое магнитом, индуцирует в диске замкнутые вихревые токи ($I \sim E = Blv$), которые, в соответствии с законом Ампера ($F = BIl$), взаимодействуют с вращающимся магнитным полем, благодаря чему создается вращающий момент. Диск начинает вращаться в ту же сторону, что и поле, причем по мере увеличения скорости диска скорость относительно поля уменьшается, что приводит к уменьшению величины индукционных токов в диске и вращающего момента. Диск начинает приостанавливаться, и скорость диска относительно поля увеличивается, что приводит к повышению величины индукционных токов в диске и вращающего момента. В конце концов установится равновесие, при котором диск будет вращаться с некоторой постоянной скоростью, которая меньше скорости вращения магнитного поля, т. е. вращение диска будет асинхронным.

Вот это явление асинхронного вращения диска из проводящего немагнитного материала во вращающемся магнитном поле и положено в основу устройства асинхронных двигателей.

Причинами исключительно широкого распространения асинхронного двигателя являются простота его конструкции и невысокая стоимость.

Внешний вид асинхронного двигателя представлен на рис. 1, а основные части – на рис. 2.

Рис. 1. Внешний вид асинхронного двигателя АИР71В4

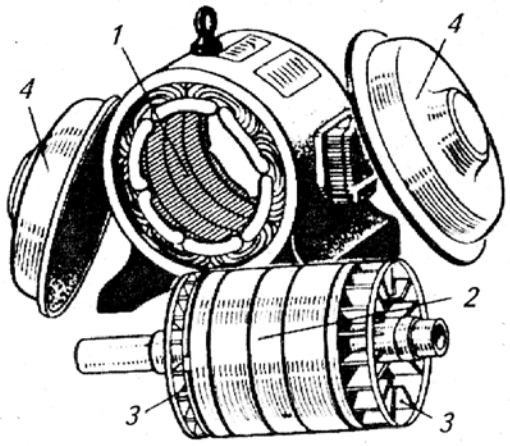


Рис.2. Основные части асинхронного двигателя: 1 – статор, 2 – ротор, 3 – вентилятор, 4 – щиты с подшипниками

Двигатель (рис. 2) состоит из статора 1 с рабочими обмотками, ротора 2 с лопастями, вентилятора 3 и двух щитов 4 с подшипниками для вала ротора и вентиляционными отверстиями.

Устройство статора представлено на рис. 3. В корпусе-станине 1 (рис. 3) расположен сердечник статора 3, представляющий собой цилиндр, собранный из пластин электротехнической стали. Пластины для уменьшения потерь от вихревых токов изолированы друг от друга слоями лака. На внутренней цилиндрической поверхности сердечника статора имеются пазы, расположенные параллельно оси двигателя. В эти пазы укладывается обмотка 2, к которой подводится трехфазное напряжение. В простейшем случае обмотка статора состоит из трех секций, сдвинутых в пространстве относительно друг друга на 120°. В этом случае создается двухполюсное вращающееся магнитное поле. Начала и концы обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя выводятся на щиток корпуса 4. Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями.

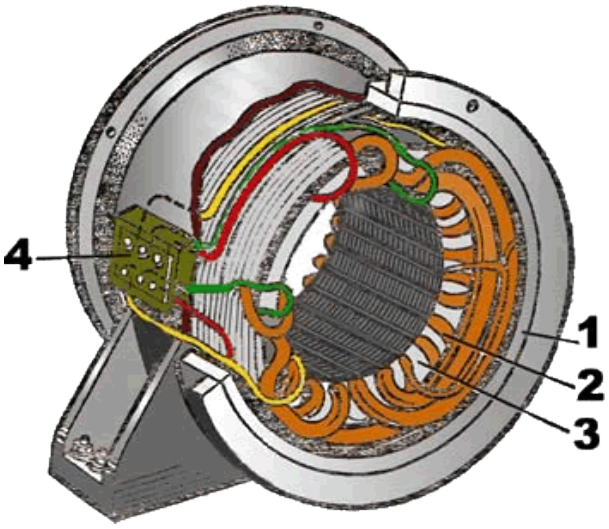


Рис. 3. Устройство статора: 1 – корпус-станина, 2 – трёхфазная обмотка, 3 – сердечник, 4 - щиток

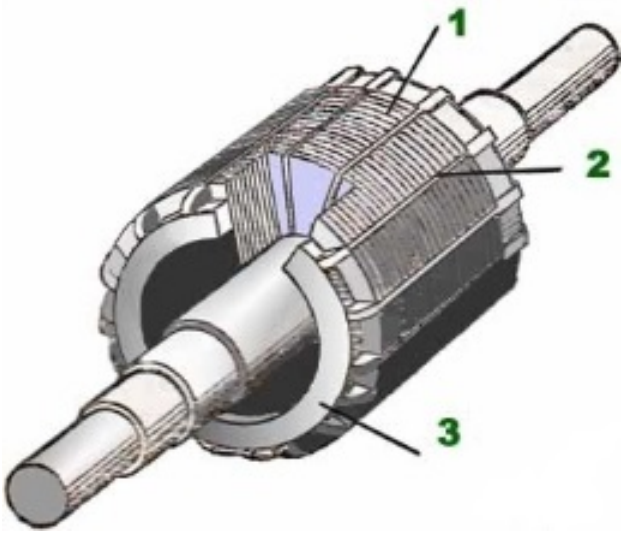


Рис. 4. Устройство ротора: 1 – сердечник, 2 – проводники (стержни), 3 – кольца

Устройство ротора представлено на рис. 4. Сердечник 1, предназначенный для увеличения вращающего момента, также набирают из изолированных для уменьшения потерь на вихревые токи стальных пластин толщиной 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которые укладывают проводники 2 обмотки ротора, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами 3. Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготавливают из алюминия. Алюминий в горячем состоянии заливают в пазы сердечника под давлением.

Каждая пара диаметрально противоположных стержней с соединительными кольцами представляет собой рамку, т. е. короткозамкнутый виток. Поэтому такой ротор называется короткозамкнутым.

Таким образом, если способное вращаться вокруг оси «беличье колесо» поместить во вращающееся магнитное поле, то по закону электромагнитной индукции в его стержнях возникнут ЭДС, а в короткозамкнутых витках — токи, которые, взаимодействуя согласно закону Ампера с вращающимся магнитным полем, создадут вращающий момент и приведут «беличье колесо» в асинхронное вращение в ту же сторону, что и поле.

3. Создание вращающегося магнитного поля

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

Рассмотрим подробнее механизм создания вращающегося магнитного поля. Зависимости токов в катушках от времени изображены на рис. 5. Выберем четыре момента времени t_1, t_2, t_3, t_4 через 1/6 часть периода.

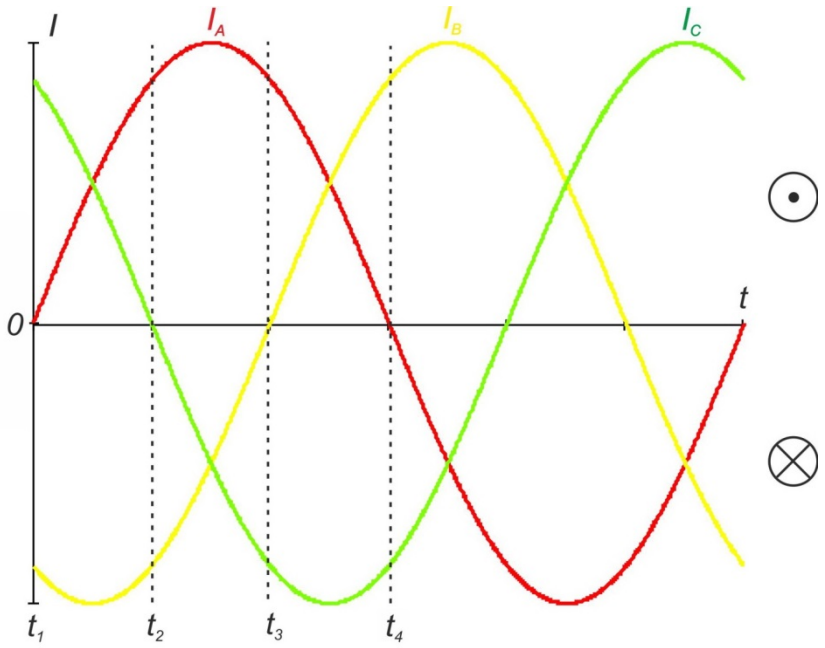


Рис. 5. Токи в фазных обмотках статора

Для каждого из этих моментов последовательно изобразим направления результирующего магнитного поля внутри статора трехфазной машины, которая имеет три обмотки по одному витку (рис. 6). Начала обмоток обозначены буквами A, B и C, а концы — X, Y и Z соответственно. Ток в начале обмотки будем считать направленным к нам (обозначается точкой), если его значение положительно. Крестиком обозначено направление от нас.

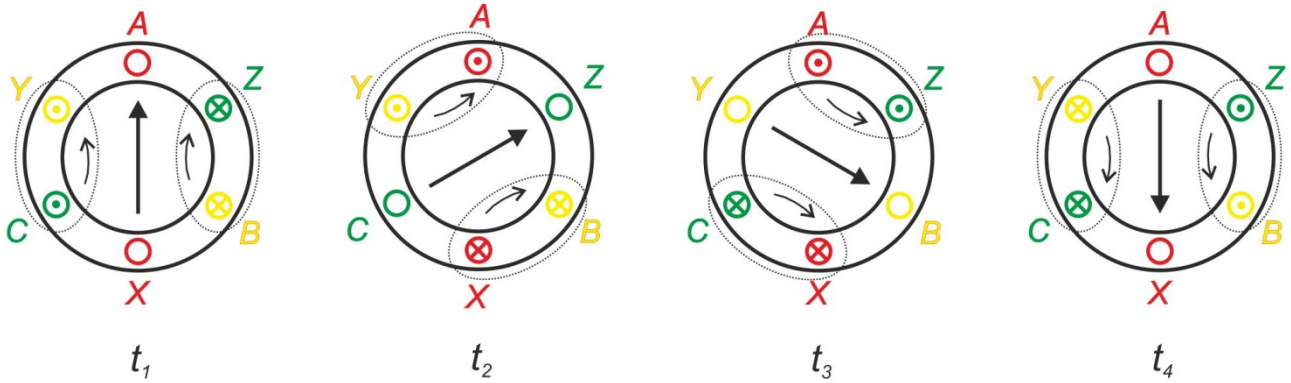


Рис. 6. Направление результирующего магнитного поля в статоре

В момент времени t_1 обмотка **A-X** потока не создает ($I_A = 0$); в начале обмотки **B** ток направлен от нас ($I_B < 0$), а в конце этой обмотки **Y** — к нам; в начале обмотки **C** ток направлен к нам ($I_C > 0$), а в конце этой обмотки **Z** — от нас. Таким образом, в двух расположенных рядом проводниках **C** и **Y**, перпендикулярных к плоскости чертежа, токи в момент t_1 направлены в одну сторону и создают магнитное поле, направленное по правилу буравчика против часовой стрелки, а токи в проводниках **B** и **Z** создают магнитное поле, направленное по часовой стрелке. Оба магнитных поля в центре статора имеют одинаковое направление (вверх) и складываются. Направление суммарного магнитного поля показано на рис. 6 стрелкой.

Определяя аналогичным образом направление суммарного магнитного поля в моменты времени t_2, t_3 и t_4, мы увидим, что направление магнитного поля за половину периода изменится на 180°. Легко убедиться, что за период направление суммарного магнитного поля сделает один оборот и, следовательно, скорость вращения магнитного поля в данном случае будет равна частоте переменного тока.

Таким образом, внутри статора существует постоянное по значению *равномерно вращающееся магнитное поле*.

Этот способ создания вращающегося магнитного поля положен в основу устройства трехфазных асинхронных двигателей. Если поменять две любые фазы местами (при этом изменится последовательность токов), то суммарный вектор магнитной индукции $\vec{B}$ будет вращаться против часовой стрелки. Изменением последовательности фаз пользуются для изменения направления вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя, т. е. для **реверсирования**.

4. Скорость вращения магнитного поля. Скольжение

В предыдущем разделе было показано, что скорость вращения магнитного поля определяется частотой переменного тока. В частности, если трехфазную обмотку двигателя разместить в шести пазах на внутренней поверхности статора (рис. 6), то за половину периода переменного тока вектор магнитной индукции сделает пол-оборота, а за полный период — один оборот. В этом случае обмотка статора создает магнитное поле с одной парой полюсов и называется *двухполюсной*.

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

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

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (об/мин)}, \qquad (1)$$

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

Поскольку число пар полюсов может быть только целым, то скорость вращения магнитного поля может принимать не произвольные, а только определенные значения (таб. 1):

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

Таб. 1. Зависимость скорости вращения от числа пар полюсов магнитного поля

Ротор асинхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле, со скоростью, несколько меньшей скорости вращения магнитного поля, так как только в этом случае в обмотке ротора будут индуцироваться ЭДС и токи и на ротор будет действовать вращающий момент. Обозначим скорость вращения ротора n_2. Тогда величина $n_1 - n_2$, которая называется ***скоростью скольжения***, представляет собой относительную скорость магнитного поля и ротора, а степень отставания ротора от магнитного поля, выраженная в %, называется ***скольжением*** s:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \qquad (2)$$

Скольжение асинхронного двигателя при номинальной нагрузке обычно составляет 3-7 %. При увеличении нагрузки скольжение увеличивается и двигатель может остановиться.

Вращающий момент M асинхронного двигателя создается благодаря взаимодействию магнитного потока поля статора Φ с индуцированным в обмотке ротора током I_2, поэтому величина его пропорциональна произведению $I_2\Phi$. Так как в механическую работу на валу двигателя может превращаться только активная мощность, то вращающий момент будет создаваться активной составляющей тока, равной $I_2 \cos\varphi_2$, где φ_2 - угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора. В окончательном виде выражение для вращающего момента имеет вид

$$M = c\Phi I_2 \cos\varphi_2, \qquad (3)$$

где c - коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя.

Двигатель будет работать устойчиво, с постоянной скоростью ротора при равновесии моментов, т. е. тогда, когда вращающий момент M_{BP} равен тормозному моменту на валу двигателя M_{TOP}:

$$M_{BP} = M_{TOP} \qquad (4)$$

Любой нагрузке машины соответствует определенное число оборотов ротора n_2 и скольжение s.

Магнитное поле статора вращается относительно ротора со скоростью $n_1 - n_2$ и индуцирует в его обмотке ЭДС E_2, под действием которой по замкнутой обмотке ротора протекает ток I_2.

Если нагрузка на валу двигателя увеличилась, т. е. увеличился тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено, что приведет к уменьшению числа оборотов ротора, т. е. к увеличению скольжения. С увеличением скольжения магнитное поле статора чаще пересекает проводники обмотки ротора и индуцированная в обмотке ротора ЭДС E_2 возрастает, а следовательно, увеличивается ток в роторе и развиваемый двигателем вращающий момент. Увеличение скольжения и тока в роторе будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент не станет равен тормозному.

Аналогично протекает процесс изменения числа оборотов ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя. При уменьшении нагрузки на валу двигателя тормозной момент станет меньше вращающего, что приведет к увеличению числа оборотов ротора, т. е. к уменьшению скольжения. С уменьшением скольжения уменьшаются ЭДС и ток в обмотке ротора и, следовательно, вращающий момент уменьшается до значения, равного тормозному.

5. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Недостатком асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является большой пусковой ток, который превышает номинальный ток в 5 - 7 раз.

Желая улучшить пусковые характеристики асинхронного двигателя, М. О. Доливо-Добровольский разработал двигатель с фазным ротором.

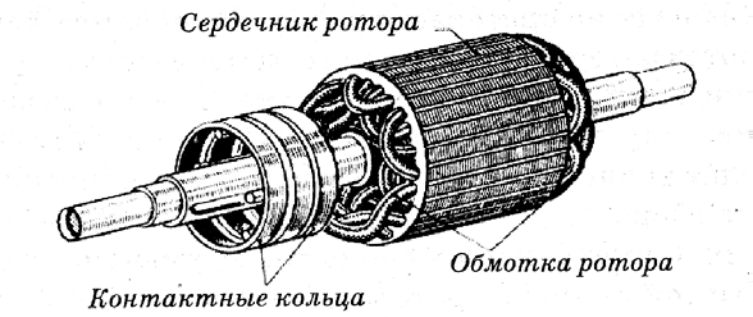


Рис. 7. Фазный ротор

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет обычный для асинхронных двигателей статор с трехфазной сетевой обмоткой, но на поверхности ротора также находится трехфазная обмотка. Три фазные обмотки ротора соединяются на самом роторе звездой, а свободные концы — с тремя изолированными друг от друга контактными кольцами, укрепленными на валу машины и изолированными от него (рис. 7). Поэтому асинхронный двигатель с фазным ротором называют также асинхронным двигателем с контактными кольцами.

Контактные кольца соприкасаются с щетками, установленными в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки обмотка ротора замыкается на пусковой трехфазный реостат, который изменяет активное сопротивление обмотки ротора в момент пуска. Обмотка статора такого двигателя включается непосредственно в трехфазную сеть (рис 8).

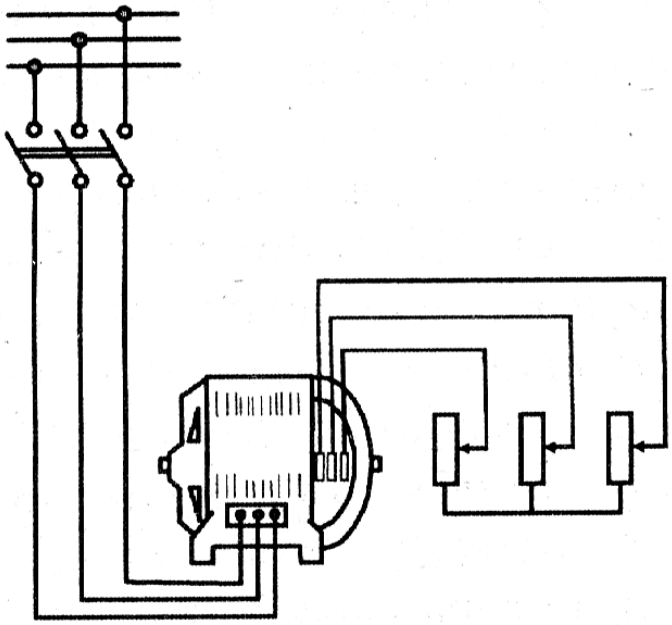


Рис. 8. Подключение асинхронного двигателя с фазным ротором

Эта система используется либо для пуска (для уменьшения пускового тока при одновременном сохранении вращающего момента), либо для регулирования скорости вращения ротора двигателя. После разгона ротора пусковой реостат выключается и обмотка закорачивается с помощью специального центробежного автоматического замыкателя. Для уменьшения потерь на трение в некоторых двигателях с фазным ротором имеются приспособления для отвода щеток от контактных колец после их замыкания.

Пусковой ток двигателя с фазным ротором превышает номинальный всего в 1,5-2 раза.

6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками называют зависимости мощности, потребляемой двигателем P_1, потребляемого тока I, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$, скорости вращения двигателя n_2, КПД $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ и вращающего момента M от полезной мощности двигателя, отдаваемой на валу P_2. Рабочие характеристики определяют основные эксплуатационные свойства асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя средней мощности показаны на рис. 9.

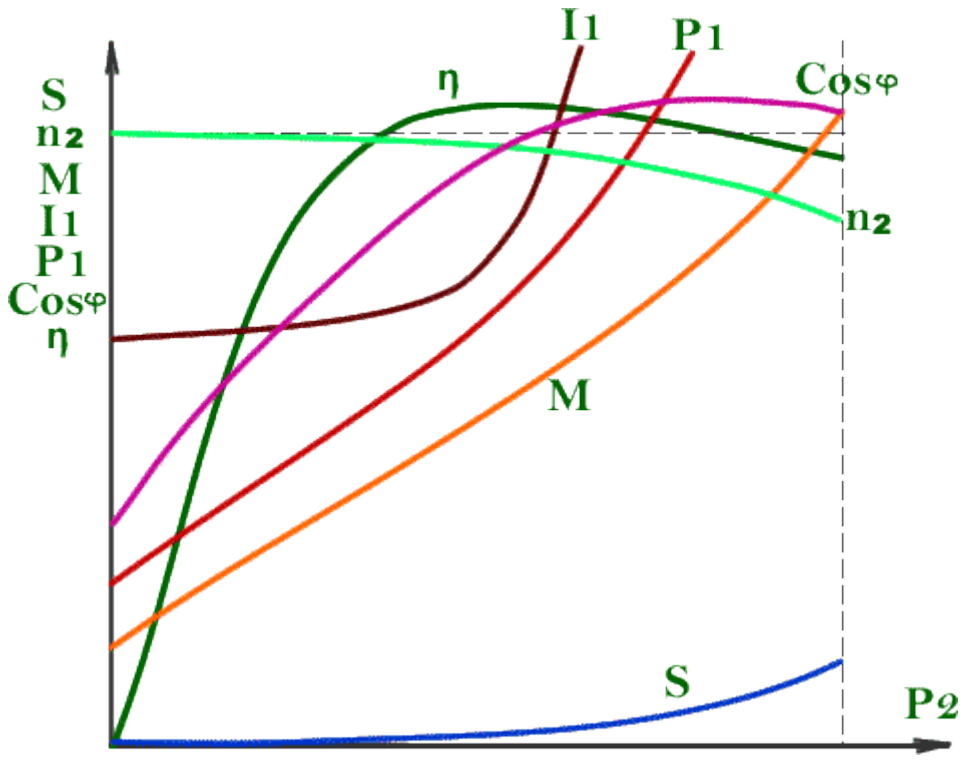


Рис. 9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Их поведение объясняется следующим образом.

Ток I_1, потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя. При холостом ходе $\cos\varphi_1$ мал и ток имеет большую реактивную составляющую. При малых нагрузках на валу двигателя активная составляющая статора меньше реактивной составляющей, поэтому активная составляющая тока незначительно влияет на ток I_1, определяющийся в основном реактивной составляющей. При больших нагрузках активная составляющая тока статора становится больше реактивной и изменение нагрузки вызывает большое изменение тока I_1.

Вращающий момент двигателя ($M = c\Phi I_2 \cos\varphi_2$) также почти пропорционален нагрузке, но при больших нагрузках линейность графика $M = f(P_2)$ несколько нарушается за счет уменьшения скорости вращения двигателя.

Рабочая характеристика $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ выражает зависимость между развиваемой двигателем мощностью и фазовым сдвигом между током и напряжением статора. Асинхронный двигатель, как и трансформатор, потребляет из сети ток I, значительно отстающий по фазе от приложенного напряжения. Например, в режиме холостого хода $\cos\varphi_1 < 0{,}2$. При увеличении нагрузки на валу двигателя растут активные составляющие токов ротора и статора, увеличивая $\cos\varphi_1$. Максимального значения $\cos\varphi_1$ достигает при $P_2 \approx P_{2НОМ}$. При дальнейшем увеличении P_2 величина $\cos\varphi_1$ будет несколько уменьшаться.

Поведение рабочей характеристики $\eta = f(P_2)$ объясняется следующим образом. Величина КПД определяется отношением полезной мощности P_2 к мощности P_1, потребляемой из сети. Величина $\Delta P = P_2 - P_1$ называется мощностью потерь. Кроме потерь в стали статора и ротора на перемагничивание и вихревые

токи $P_{СТ}$, которые вместе с механическими потерями $P_{МЕХ}$ можно считать постоянными, в асинхронном двигателе существуют потери в меди $P_М$, т. е. в обмотках статора и ротора, которые пропорциональны квадрату протекающего тока и, следовательно, зависят от нагрузки. При холостом ходе, как и в трансформаторе, преобладают потери в стали, поскольку $I_2 \approx 0$, а I_1 равен току холостого хода I_0, который невелик. При небольших нагрузках на валу потери в меди все же остаются небольшими, и поэтому КПД, определяемый формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{СТ} + P_М + P_{МЕХ}}, \qquad (5)$$

с увеличением P_2 сначала резко возрастает. Когда постоянные потери $P_{СТ} + P_{МЕХ}$ станут равны потерям, зависящим от нагрузки $P_М$, КПД достигает своего максимального значения. При дальнейшем увеличении нагрузки переменные потери мощности $P_М$ значительно возрастают, в результате чего КПД заметно уменьшается.

Характер зависимости $P_1 = f(P_2)$ может быть объяснен из соотношения $P_1 = \frac{P_2}{\eta}$. Если бы КПД был постоянен, то между P_1 и P_2 была бы линейная зависимость. Но поскольку КПД зависит от P_2 и эта зависимость вначале резко возрастает, а при дальнейшем увеличении нагрузки изменяется незначительно, то и кривая $P_1 = f(P_2)$ сначала растет медленно, а затем резко возрастает.

7. Пуск и реверсирование асинхронных двигателей

Самым простым способом пуска асинхронных двигателей является прямое включение их в сеть. Однако при этом в момент пуска в цепи двигателя возникает большой пусковой ток, который значительно превышает номинальный. В маломощной сети этот ток может вызвать кратковременное понижение напряжения, что отражается на работе других потребителей энергии, включенных в эту сеть. Поэтому непосредственным включением в сеть запускают только двигатели малой мощности. При запуске двигателя большой мощности необходимо уменьшить пусковой ток. Для уменьшения пускового тока используют ряд способов. Рассмотрим некоторые из них.

Запуск двигателей с фазным ротором

Запуск двигателя с фазным ротором уже был кратко рассмотрен, а применяемая для этого схема включения изображена на рис. 8. Двигатели данного типа обладают очень хорошими пусковыми характеристиками. Для уменьшения пускового тока обмотка ротора замыкается на пусковой реостат. При включении реостата в цепь обмотки ротора ток в этой обмотке уменьшается, а следовательно, уменьшается и ток в обмотке статора, а также ток, потребляемый двигателем от сети. Кроме того, при включении активного сопротивления в цепь обмотки ротора увеличивается $\cos\varphi$, а следовательно, и вращающий момент, развиваемый двигателем при запуске. Таким образом, при включении активного сопротивления в цепь ротора уменьшается пусковой ток и увеличивается пусковой момент. После

достижения ротором нормальной скорости реостат полностью выводится, т. е. обмотка ротора замыкается накоротко.

Запуск двигателей с короткозамкнутым ротором

Для уменьшения пускового тока можно на время понизить напряжение на зажимах статора, включив для этого последовательно с его обмоткой трехфазное индуктивное сопротивление (рис. 10).

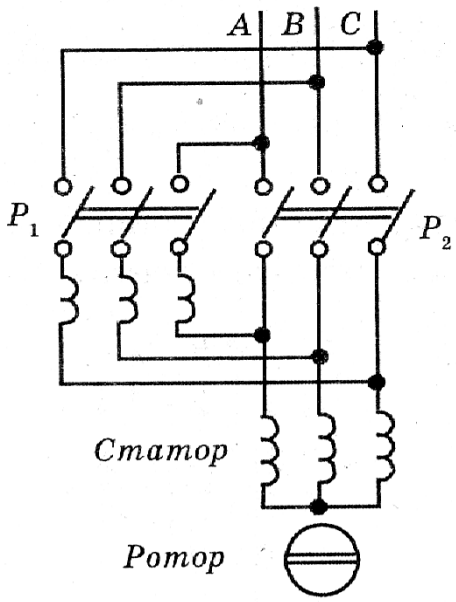


Рис. 10. Пуск асинхронного двигателя с помощью сопротивлений, последовательно включаемых с обмотками статора

При пуске замыкается рубильник P_1 и к обмоткам статора последовательно подключаются индуктивности, что значительно уменьшает пусковой ток.

Когда скорость двигателя приближается к номинальной, замыкается рубильник P_2 — он закорачивает катушки индуктивности, и статор включается на полное напряжение сети. Уменьшение пускового тока, вызванное понижением напряжения на статоре, вызывает уменьшение пускового момента пропорционально квадрату напряжения на статоре. Например, при таком пуске уменьшение пускового тока в 2 раза будет сопровождаться уменьшением пускового момента в 4 раза. Для понижения напряжения на статоре вместо индуктивных сопротивлений можно использовать активные сопротивления реостатов, но это менее выгодно, так как связано с дополнительными потерями энергии в реостатах.

Мощные двигатели часто запускают с помощью автотрансформатора (рис. 11).

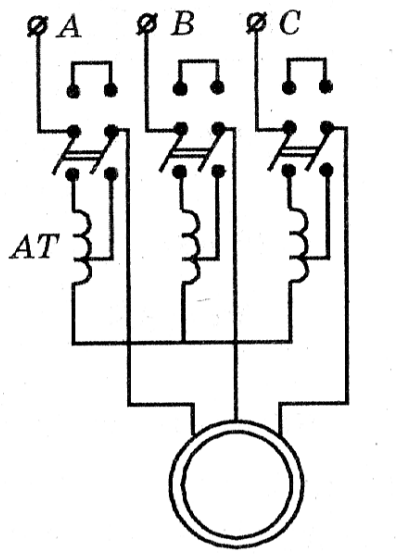


Рис. 11. Пуск асинхронного двигателя с помощью автотрансформатора

Благодаря автотрансформатору фазное напряжение двигателя U и пусковой ток $I_П$ при пуске уменьшаются пропорционально коэффициенту трансформации k, но пусковой ток в сети меньше пускового тока двигателя в k раз, т. е. ток двигателя

$$I_П = \frac{U}{kz},$$

а ток в сети

$$I_Л = \frac{I_П}{k} = \frac{U}{k^2 z},$$

где z — сопротивление фазы двигателя; U — фазное напряжение сети.

Следовательно, понижение напряжения автотрансформатором в k раз уменьшает пусковой ток в сети в k^2 раз. В то же время пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшается в k^2 раз. Таким образом, благодаря применению автотрансформатора начальный вращающий момент уменьшается пропорционально линейному пусковому току, тогда как при поглощении части напряжения сопротивлением момент уменьшается пропорционально квадрату пускового тока.

Например, при понижении напряжения автотрансформатором в $\sqrt{2}$ раза пусковой ток сети понизится в 2 раза и в 2 раза понизится пусковой момент.

Понижение напряжения на статоре на время пуска можно осуществить также посредством временного переключения обмоток статора, нормально работающих при соединении треугольником, на соединение звездой. При пуске обмотки статора соединяются звездой, благодаря чему фазное напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается и фазный пусковой ток:

$$I_{ф} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z}.$$

где z — полное сопротивление фазы двигателя; $U_{л}$ — линейное напряжение сети.

Так как линейный ток звезды равен фазному, то

$$I_{л.Зв} = I_{ф} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}z}.$$

Если бы обмотки были соединены треугольником, то линейный ток был бы равен:

$$I_{л.Тр} = \sqrt{3}I_{ф} = \sqrt{3}\frac{U_{л}}{z}.$$

Таким образом, переключение на звезду уменьшает пусковой линейный ток в 3 раза:

$$\frac{I_{л.Тр}}{I_{л.Зв}} = 3.$$

Практически такое переключение выполняется с помощью простого трехполюсного переключателя (рис. 12).

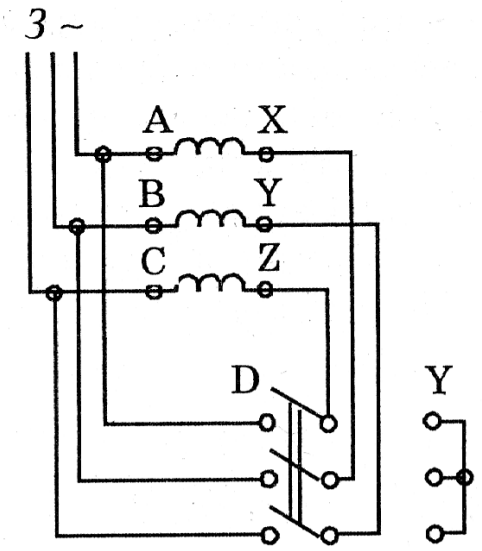


Рис. 12. Пуск асинхронного двигателя с помощью переключения обмоток

Этот способ запуска может быть применен для двигателя, обмотки статора которого при питании от сети данного напряжения должны быть соединены треугольником.

Общим недостатком способов запуска асинхронных двигателей понижением напряжения на статоре и переключением обмоток статора со звезды на треугольник является значительное снижение пускового момента, который пропорционален

квадрату фазного напряжения. Поэтому все эти способы запуска можно использовать только в тех случаях, когда двигатель запускается не под полной нагрузкой.

Реверсирование — изменение направления вращения ротора двигателя. Как известно, направление вращения ротора зависит от направления вращения магнитного поля статора, поэтому для изменения направления вращения ротора следует изменить последовательность фаз. На практике это осуществляется путем перемены мест любых двух фаз. Для этого часто используют трехполюсные переключатели (рис. 13):

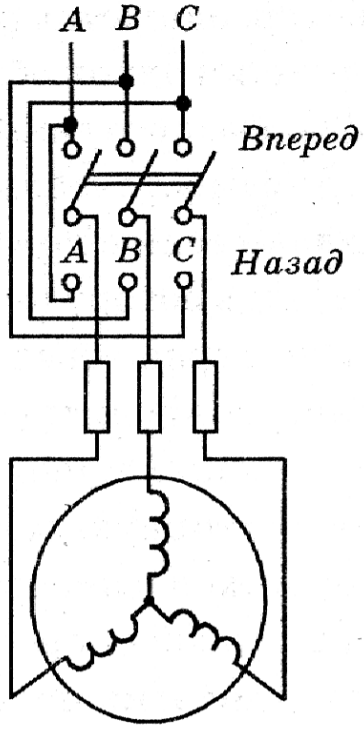


Рис. 13. Реверсирование асинхронного двигателя

8. Однофазный асинхронный двигатель

На статоре однофазного двигателя размещается одна обмотка, синусоидальный ток в которой создает пульсирующий магнитный поток.

На рис. 14 показано, что пульсирующий магнитный поток может быть разложен на два вращающихся в противоположные стороны потока Φ_1 и Φ_2. Частоты вращения этих потоков равны угловой частоте тока, а амплитуды — половине амплитуды пульсирующего потока Φ.

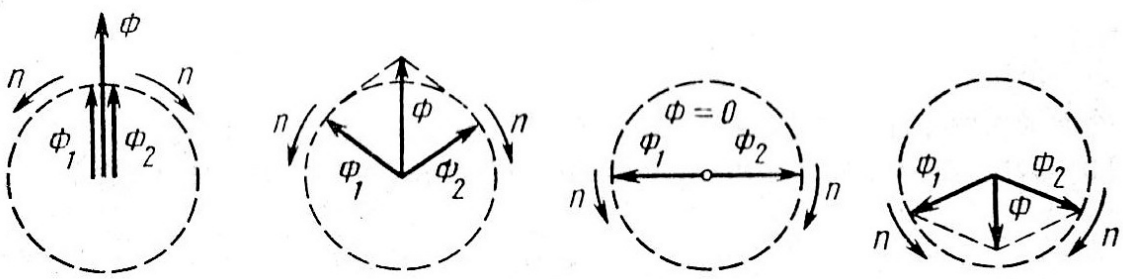


Рис. 14. Разложение пульсирующего магнитного потока на два

При неподвижном роторе возникают два равных по значению и противоположно направленных вращающих момента $M_{ПР}$ и $M_{ОБР}$, вследствие чего результирующий момент остается равным нулю. Таким образом, собственный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю.

Раскрутим принудительно ротор до частоты вращения n_2. Тогда скольжение ротора относительно прямого поля

$$s_{ПР} = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

относительно обратного поля

$$s_{ОБР} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (1 - s_{ПР})n_1}{n_1} = 2 - s_{ПР}.$$

Частота тока в роторе, создаваемого прямым полем, равна $s_{ПР} f$, а частота тока, создаваемого обратным полем, $(2 - s_{ПР}) f$. Так, если частота тока в сети f = 50 Гц, а скольжение $s_{ПР}$ = 0,02, то $f_{ПР} = s_{ПР} f = 50 \cdot 0,02 = 1$ Гц;
$f_{ОБР} = (2 - s_{ПР}) f = 1,98 \cdot 50 = 99$ Гц.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока и для прямого тока на два порядка меньше, чем для обратного тока. Вследствие этого прямой ток и прямой вращающий момент $M_{ПР}$ существенно больше обратного тока и обратного вращающего момента. Следовательно, раскрутив двигатель в любую сторону, можно нагрузить его и двигатель будет продолжать вращаться в ту же сторону. Вращающий момент раскрученного однофазного двигателя незначительно отличается от вращающего момента аналогичного трехфазного двигателя.

Для создания пускового момента на статоре однофазного двигателя размещают дополнительную пусковую обмотку, рассчитанную на кратковременную работу. Эту обмотку включают через конденсатор, вследствие чего ток в ней сдвинут по фазе относительно тока основной обмотки (рис. 15). Образующееся двухфазное вращающееся магнитное поле раскручивает ротор. По окончании пуска питание пусковой обмотки должно быть отключено.

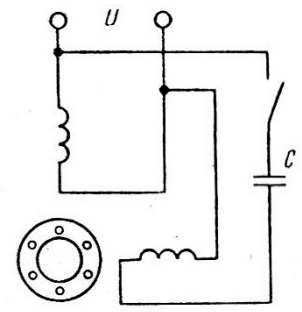


Рис. 15. Схема пуска однофазного асинхронного двигателя

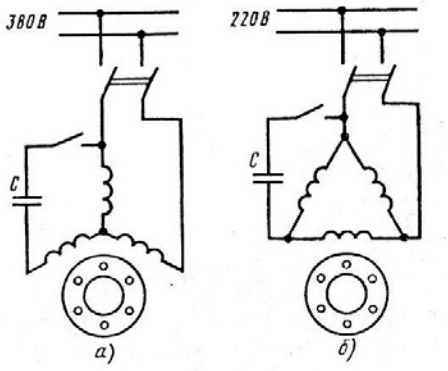


Рис. 16. Схемы включения трёхфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть при соединении обмоток: а – звездой; б - треугольником

Однофазные асинхронные двигатели получили наибольшее распространение в бытовых приборах. Их мощность обычно не превышает 500 Вт.

Иногда в качестве однофазного используют трёхфазный асинхронный двигатель, у которого в цепь одной из обмоток статора включен конденсатор (рис. 16).

При соединении обмоток звездой пусковую ёмкость подсчитывают по формуле

$$C = \frac{P \cdot 10^6}{314U^2},$$

где P - мощность двигателя, Вт; U - напряжение сети, В; C - ёмкость конденсатора, мкФ.

При соединении обмоток треугольником пусковая ёмкость в 3 раза больше, чем в предыдущем случае.

При работе в однофазном режиме трёхфазный двигатель без перегрева развивает 60 – 70% номинальной мощности.

9. Синхронные машины. Устройство и принцип действия синхронного генератора

Синхронными называются электрические машины, частота вращения которых связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена. Синхронные машины служат генераторами переменного тока на электрических станциях, а двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения. Синхронные машины обратимы, т. е. они могут работать и как генераторы, и как двигатели, хотя в конструкциях современных синхронных генераторов и двигателей имеются небольшие, но весьма существенные отличия. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающая или тормозящая механическая сила. В первом случае она получает на валу механическую, а отдает в сеть электрическую энергию, а во втором — она потребляет из сети электрическую энергию, а отдает на валу механическую.

Синхронная машина (рис. 17) имеет две основные части — статор 1 и ротор 2, причем ***статор*** (рис. 18) *не отличается от статора асинхронной машины*. В пазы статора укладывают трехфазную обмотку, концы которой выводят на клеммовую панель.

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (отсюда их название). Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока. Ротор синхронной машины представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные кольца и щетки от внешнего источника. Ротор в некоторых случаях изготовляют в виде постоянного магнита.

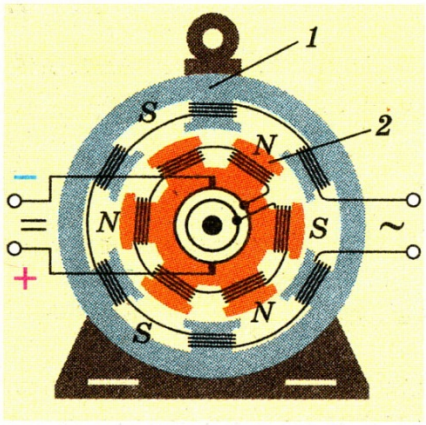


Рис. 17. Синхронная машина

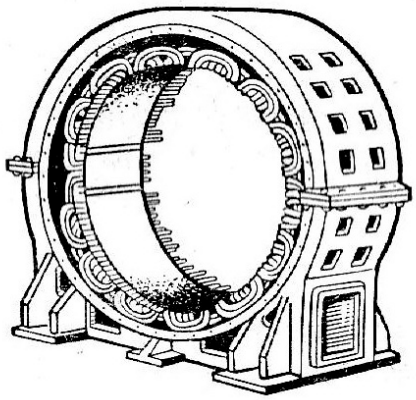
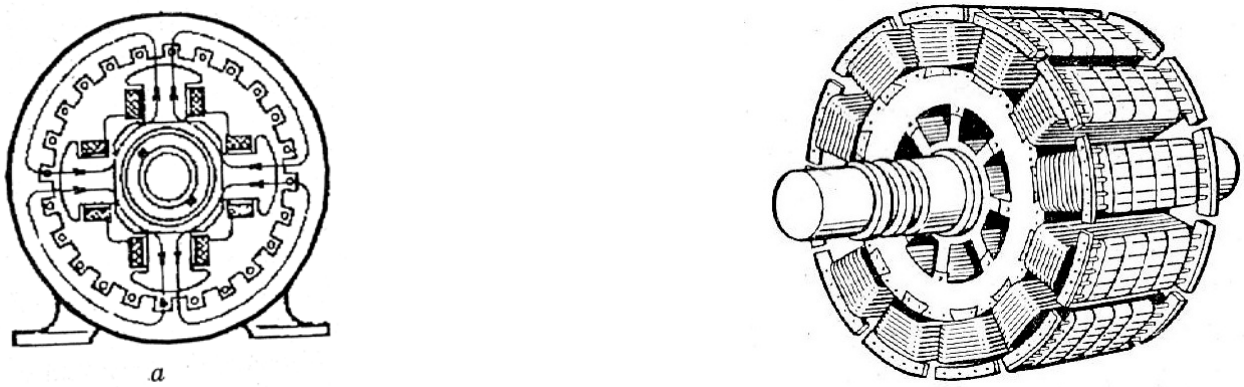


Рис. 18. Статор синхронной машины

В обмотках статора под действием вращающегося магнитного поля ротора наводится ЭДС, которая подается на внешнюю цепь генератора. Такая конструкция генератора позволяет устранить скользящие контакты в цепи нагрузки генератора (обмотки статора непосредственно соединяются с нагрузкой) и надежно изолировать обмотки статора от корпуса машины, что существенно для мощных генераторов, работающих при высоких напряжениях.

Основной магнитный поток синхронного генератора, создаваемый вращающимся ротором, возбуждается посторонним источником-возбудителем, которым обычно является генератор постоянного тока небольшой мощности, установленный на общем валу с синхронным генератором. Постоянный ток от возбудителя подается на ротор через щетки и контактные кольца, установленные на валу ротора.

По своей конструкции роторы бывают явнополюсными (рис. 19) и неявнополюсными (рис. 20). Число пар полюсов ротора обусловлено скоростью его вращения. В первом случае синхронные генераторы приводятся в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанций, во втором — паровыми или газовыми турбинами теплоэлектростанций.



а

Рис. 19. Явнополюсный ротор синхронной машины

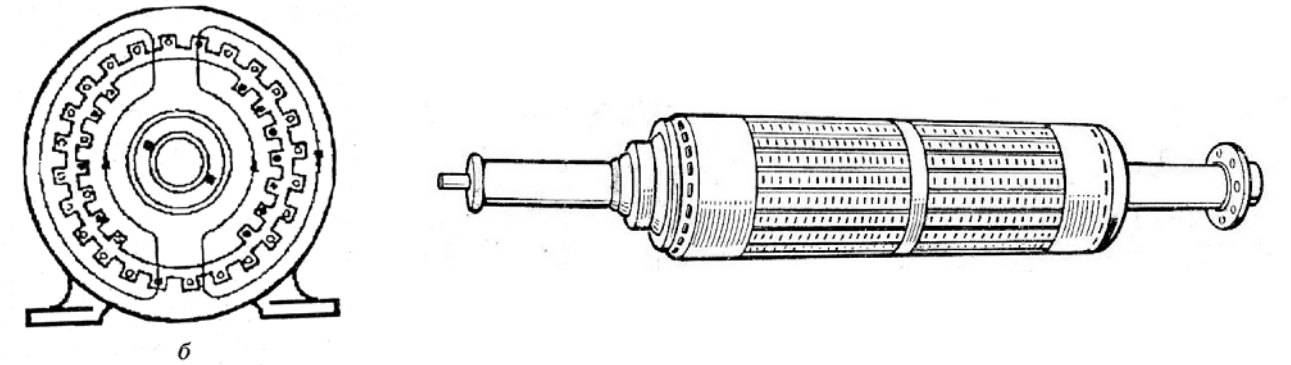


Рис. 20. Неявнополюсный ротор синхронной машины

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Чтобы получить синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором увеличивают от середины полюсного наконечника к его краям (рис. 21).

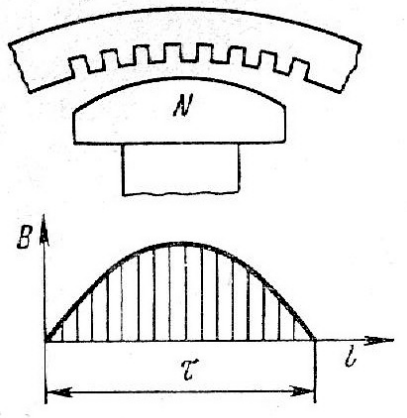


Рис. 21. Форма воздушного зазора и распределение магнитной индукции по поверхности ротора в синхронном генераторе

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора

$$f = \frac{pn}{60},$$

где p - число пар полюсов ротора генератора.

Отношение $\frac{n}{60}$ выражает число оборотов ротора в секунду; при $p = 1$ каждый оборот ротора соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении p соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

При стандартной частоте переменного тока 50 Гц частота вращения двухполюсной машины (p = 1) 3000 об/мин. С такой частотой вращаются современные турбогенераторы, состоящие из паровой турбины и синхронного генератора большой мощности с неявнополюсным ротором, который имеет одну пару полюсов.

У гидрогенераторов первичным двигателем служит гидравлическая турбина, скорость вращения которой невелика (от 50 до 750 об/мин) и определяется высотой напора воды. В этом случае используются синхронные генераторы с явнополюсным ротором, имеющим от 4 до 60 пар полюсов.

Частота вращения дизель-генераторов, соединенных с первичным двигателем — дизелем, находится в пределах от 500 до 1500 об/мин. Обычно это явнополюсные машины небольшой мощности.

Как и у любого генератора, работающего по закону электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и частоте вращения ротора. Среднее значение ЭДС, наводимое в каждой фазе обмотки статора,

$$E_{CP} = cn\Phi ,$$

где n — скорость вращения ротора;
Φ — максимальный магнитный поток, возбуждаемый в синхронной машине;
c — постоянный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности данной машины.

Используют различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

Находят также применение генераторы с самовозбуждением через полупроводниковые или механические выпрямители.

Самовозбуждение генератора происходит следующим образом. В момент пуска генератора благодаря остаточной индукции в магнитной системе появляются слабые ЭДС и токи в рабочей обмотке генератора. Это приводит к появлению ЭДС на выходе и небольшого тока в цепи возбуждения, усиливающего индукцию магнитного поля машины. ЭДС генератора возрастает до тех пор, пока магнитная система машины полностью не возбудится.

На рис. 22 приведен внешний вид автомобильного трёхфазного синхронного генератора, а на рис. 23 – схема его включения. Здесь 1, 2, 3 – обмотки статора; 4 – выпрямитель переменного тока в постоянный, используемый для подзарядки аккумуляторной батареи 5 и питания электрооборудования 6; 7 – полупроводниковый выпрямитель, питающий обмотку возбуждения ротора 8 через регулировочный реостат 9.

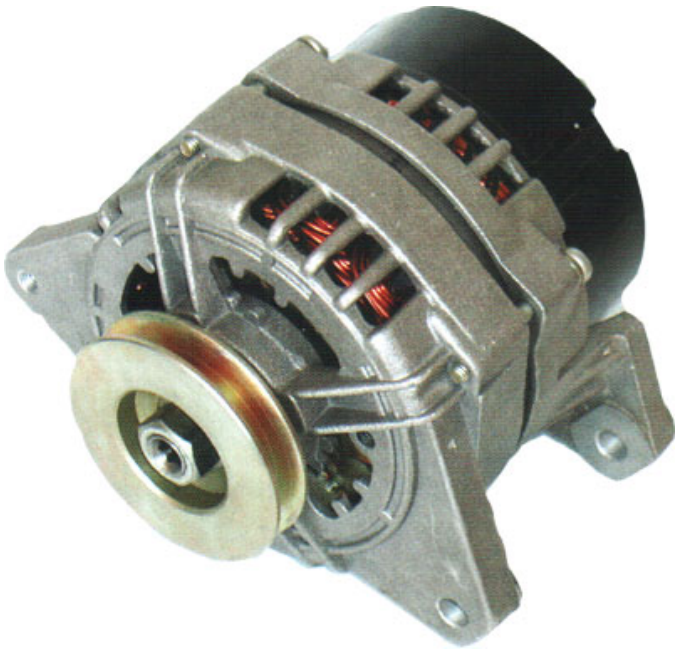


Рис. 22. Автомобильный генератор

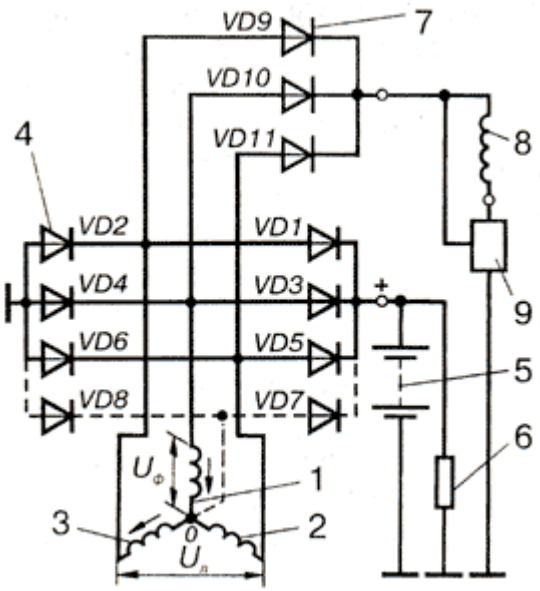


Рис. 23. Схема включения генератора

10. Реакция якоря

Магнитная система синхронного генератора в режиме холостого хода (без нагрузки) состоит из магнитного потока полюсов, который индуцирует ЭДС в обмотке статора. После включения нагрузки в трехфазной обмотке статора возникает ток, который, как известно, создает свое вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля равна скорости вращения магнитного поля полюсов. Следовательно, полный магнитный поток синхронной машины при нагрузке складывается из магнитных потоков ротора и статора. Магнитное поле статора, накладываясь на магнитное поле ротора, может либо ослаблять, либо усиливать его. Результат взаимодействия этих полей определяется величиной и характером нагрузки. Влияние магнитного поля статора на магнитное поле, создаваемое вращающимися полюсами ротора, называется ***реакцией якоря***.

Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но поскольку в этих двигателях форма кривой ЭДС малосущественна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

11. Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора являются *характеристики холостого хода*, а также *внешняя* и *регулировочная*.

Характеристика холостого хода $E_0(I_0)$ представляет с собой зависимость ЭДС генератора E_0 на холостом ходу (т. е. без нагрузки) от тока возбуждения I_0. Она связана с кривой намагничивания стали и напоминает ее по форме (рис. 24).

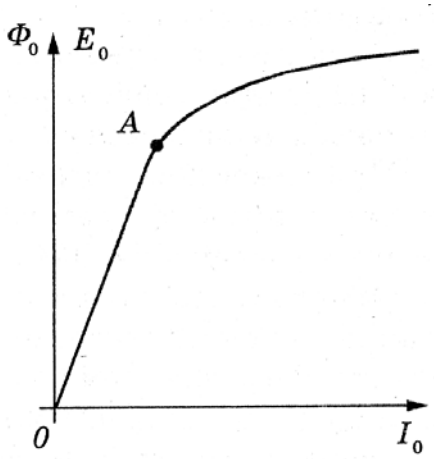


Рис. 24. Характеристика холостого хода синхронного генератора

На холостом ходу синхронного генератора его ЭДС создается только главным магнитным потоком, поэтому ЭДС E_0 пропорциональна главному магнитному потоку Φ_0, который, в свою очередь, пропорционален магнитной индукции B_0 в статоре. Поэтому зависимость $E_0 = f(I_B)$ подобна зависимости $B_0 = f(I_B)$, т. е. первоначальной кривой намагничивания стали. При достижении области магнитного насыщения магнитной системы генератора скорость роста ЭДС уменьшается.

Номинальный режим возбуждения генератора выбирают в области изгиба кривой (точка А). Использование области магнитного насыщения для увеличения ЭДС генератора приводит к неоправданному увеличению тока и размеров обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика синхронного генератора $U(I)$ характеризует его электрические свойства и представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от его тока нагрузки I при постоянных значениях коэффициента мощности $\cos\varphi$, скорости вращения ротора n и тока возбуждения I_0 (рис. 25)

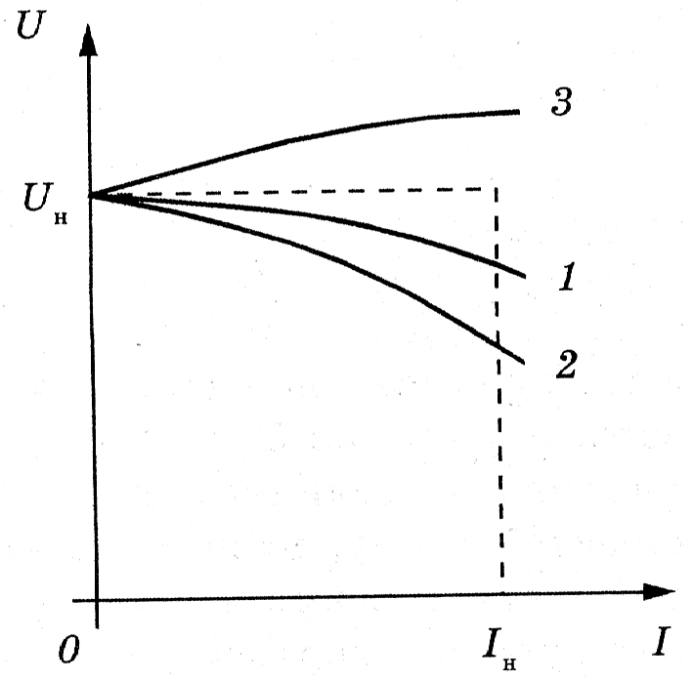


Рис. 25. Внешняя характеристика синхронного генератора

Чтобы экспериментально получить внешнюю характеристику, нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока $I_н$ при номинальном напряжении $U_н$ на зажимах генератора, которое устанавливается путем регулировки тока возбуждения. Затем, поддерживая ток возбуждения и частоту вращения постоянными, постепенно уменьшают ток нагрузки до нуля. Внешние характеристики могут иметь спад (кривая 2) или подъем (кривая 3) в зависимости от характера нагрузки и действия реакции якоря. Номинальный режим нагрузки выбирают таким, чтобы при $\cos\varphi = 0,8$ изменения напряжения ΔU не превышали 35-45 % от номинального (кривая 1).

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения генератора $I_в$ от тока нагрузки I ($I_в = f(I_н)$) при $U = U_н = const$, $n = n_н = const$ и $\cos\varphi = const$.

Эта характеристика показывает, как выбрать ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора оставалось бы постоянным при изменениях нагрузки.

Чтобы экспериментально получить регулировочную характеристику, нужно сначала включить генератор и сообщить его ротору номинальную скорость вращения $n_н$ при холостом ходе, а затем путем изменения тока возбуждения добиться получения номинального напряжения $U_н$.

Далее постепенно увеличивают ток нагрузки и снимают характеристику, добиваясь в каждой точке постоянства напряжения на зажимах машины ($U = U_н = const$) путем регулирования тока возбуждения.

На рис. 26 изображены регулировочные характеристики для различных значений $\cos\varphi$. Мы видим, что при активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi \geq 0$ (кривая 2), ток возбуждения необходимо увеличивать, а при активно-емкостной нагрузке, когда $\varphi \leq 0$ (кривая 3) — уменьшать. Кривая 1 соответствует оптимальному режиму. Все эти явления обусловлены реакцией якоря.

Регулировочные характеристики имеют важное практическое значение, так как они определяют пределы изменения тока возбуждения для поддержания номинального напряжения при изменении нагрузки.

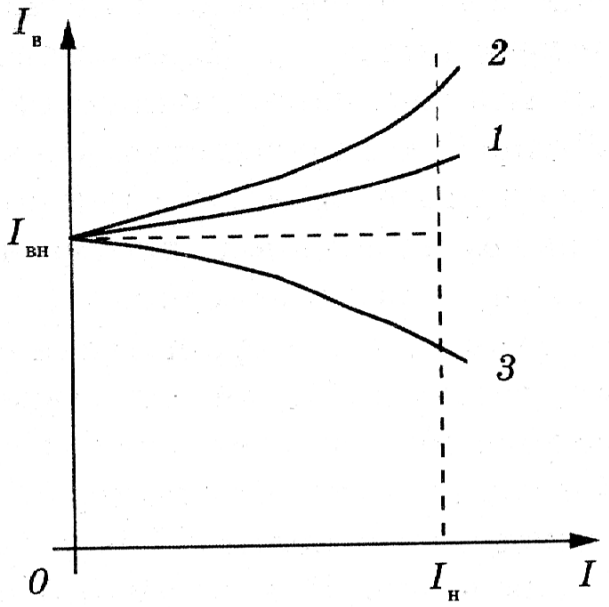


Рис. 26. Регулировочная характеристика синхронного генератора

12. Работа синхронной машины в режиме двигателя

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 27).

Принцип работы синхронного двигателя поясняется рис. 28. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS. Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS. В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы.

К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1. При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол α, либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора:

$$n_2 = n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Увеличение нагрузки приводит к увеличению тока в цепи двигателя и, следовательно, к увеличению потребляемой из сети электрической мощности. В отличие от асинхронного двигателя, в котором увеличение нагрузки на валу приводит к уменьшению скорости вращения ротора, в синхронном двигателе увеличение механической нагрузки приводит к увеличению угла α между полюсами вращающихся полей статора и ротора при сохранении скорости вращения ротора.

Ротор синхронного двигателя будет продолжать синхронное вращение до тех пор, пока он будет за полпериода переменного тока успевать поворачиваться своими полюсами к следующим проводникам обмотки статора с таким же направлением тока, как и в тех проводниках, против которых он находится в данный момент. Другими словами, ротор двигателя должен вращаться с такой же скоростью, что и поле статора, проходя полюс за полпериода переменного тока (разность скоростей поля и ротора может составлять не более 2-5 %), при этом на него будет действовать вращающий момент одного и того же направления. При слишком большой механической нагрузке ротор двигателя выпадает из синхронизма и двигатель останавливается.

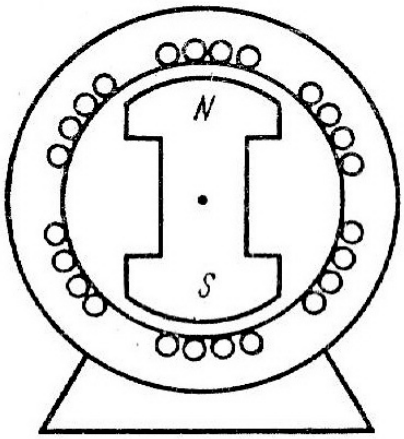


Рис. 27. Схематическое изображение синхронного двигателя

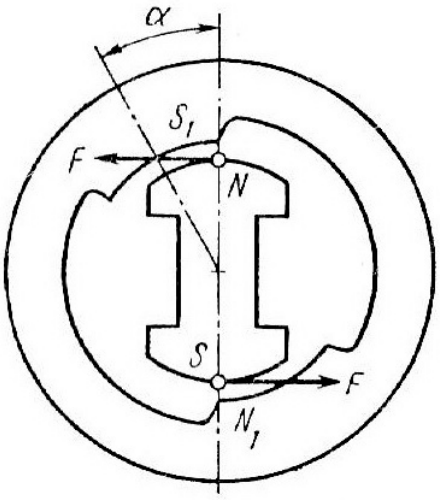


Рис. 28. К пояснению принципа работы синхронного двигателя

Постоянство частоты вращения — важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука.

13. Пуск и остановка синхронного двигателя

Недостаток синхронного двигателя - трудность пуска: для пуска нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора.

В прошлом для раскручивания ненагруженного синхронного двигателя применялся специальный разгонный асинхронный двигатель небольшой мощности. Сначала ротор разгонялся до скорости, близкой к синхронной, потом включалась обмотка возбуждения, а затем обмотки статора включались в сеть.

В настоящее время синхронные двигатели запускают с помощью асинхронного пуска. Для этого применяют специальную короткозамкнутую обмотку, вделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

Для остановки синхронного двигателя сначала уменьшают ток возбуждения до значения, соответствующего минимальному току обмоток статора, затем отключают статор и лишь после этого размыкают цепь возбуждения. Несоблюдение такого порядка (например, отключение обмотки возбуждения раньше отключения обмоток статора) приведет к чрезмерному увеличению тока в обмотке статора и опасным для целости изоляции перенапряжениям в разомкнутой обмотке возбуждения.

14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя являются зависимости потребляемой мощности P_1, потребляемого тока I_1, вращающего момента M, $\cos\varphi$ и КПД η) от полезной мощности нагрузки P_2. Они изображены на рис. 29 и соответствуют случаю, когда на холостом ходу $\cos\varphi = 1$.

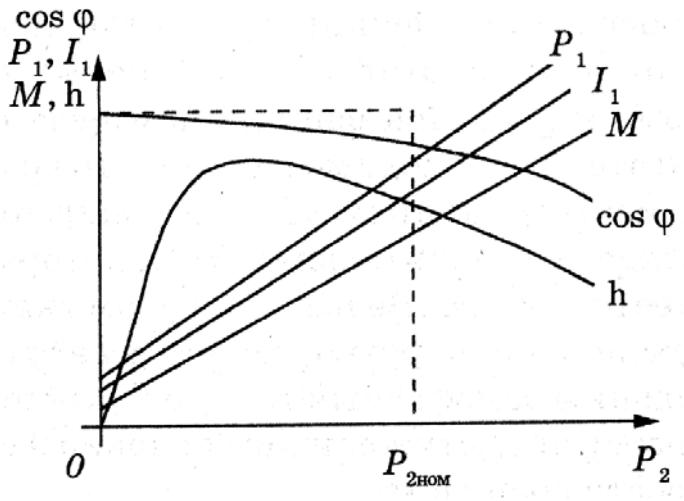


Рис. 29. Характеристики синхронного двигателя

При постоянном токе возбуждения увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение $\cos\varphi$, что объясняется увеличением реактивного падения напряжения при возрастании потребляемого от сети тока I_1. Коэффициент полезного действия η с увеличением нагрузки быстро увеличивается и достигает максимума, когда не зависящие от нагрузки механические потери и потери в стали становятся равными зависящим от нагрузки потерям в меди обмоток. Дальнейшее увеличение нагрузки снижает КПД. Потребляемый статором ток I_1 на холостом ходу мал, при увеличении нагрузки ток I_1 возрастает практически пропорционально нагрузке. Вращающий момент M, развиваемый двигателем, на холостом ходу мал, поскольку механические потери невелики. При увеличении нагрузки, благодаря постоянству скорости вращения синхронного двигателя, вращающий момент возрастает почти линейно. Потребляемая двигателем мощность растет быстрее, чем полезная P_2, так как при увеличении нагрузки сказывается увеличение электрических потерь в двигателе, которые пропорциональны квадрату тока.

Контрольные вопросы

1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каков принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объясните создание вращающегося магнитного поля трехфазной обмоткой машины переменного тока.
4. От чего зависит скорость вращения n_1 вращающегося магнитного поля?
5. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
6. Как производится реверсирование асинхронного двигателя?
7. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором?
8. Как производится пуск трехфазных асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором?
9. Как устроен однофазный асинхронный двигатель?
10. Каков принцип работы однофазного асинхронного двигателя?
11. Опишите способы пуска однофазных асинхронных двигателей.
12. Нарисуйте схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.
13. Как устроен трехфазный синхронный генератор?
14. Каков принцип работы трехфазного синхронного генератора?
15. Какие конструкции роторов используются в трехфазных синхронных генераторах?
16. Как осуществляется самовозбуждение трехфазного синхронного генератора?
17. Какое явление называют реакцией якоря?
18. Что такое характеристика холостого хода синхронного генератора, её вид.
19. Что такое внешняя характеристика синхронного генератора, её вид.
20. Что такое регулировочная характеристика синхронного генератора, её вид.
21. Опишите работу синхронной машины в режиме двигателя.
22. Как осуществляются асинхронный пуск и остановка синхронного двигателя?
23. Изобразите рабочие характеристики синхронного двигателя.