

Электрические машины

Асинхронные электрические машины

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.

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.

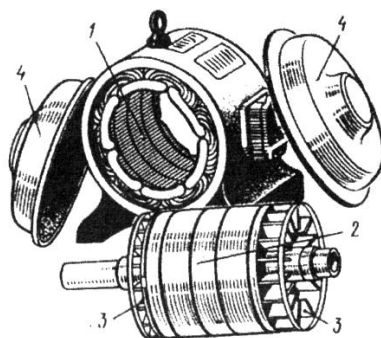
Принцип работы асинхронных двигателей основан на опыте Араго. Если под горизонтально подвешенным на нити диском из проводящего немагнитного материала (например, из меди) поместить вращающийся подковообразный магнит, то диск начнет вращаться в ту же сторону, что и магнит.

Это явление объясняется следующим образом. Вращающееся магнитное поле, создаваемое магнитом, индуцирует в диске замкнутые вихревые токи. Эти вихревые токи, в соответствии с законом Ампера, 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 диска 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*.

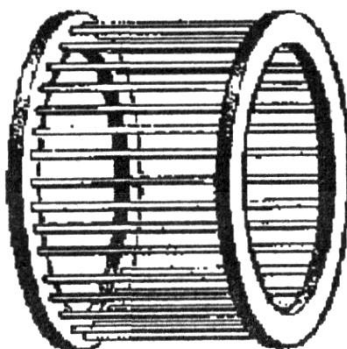
Вот это явление асинхронного вращения диска из проводящего немагнитного материала во вращающемся магнитном поле и положено в основу устройства асинхронных двигателей.

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

Основные части асинхронного двигателя изображены на рис. 1. Двигатель состоит из статора 1 с рабочими обмотками, ротора 2 с лопастями вентилятора 3 и двух щитов с подшипниками для вала ротора и вентиляционными отверстиями 4.



Сердечник статора представляет собой цилиндр, собранный из пластин электротехнической стали, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолированы друг от друга слоями лака. На его внутренней цилиндрической поверхности имеются пазы, расположенные параллельно оси двигателя. В эти пазы укладывается обмотка, к которой подводится трехфазное напряжение. В простейшем случае обмотка статора состоит из трех секций, сдвинутых в пространстве друг относительно друга на 120° . В этом случае создается двухполюсное вращающееся магнитное поле. Для создания четырехполюсного вращающегося магнитного поля необходимо число секций обмотки увеличить до 6 и т. д. Начала и концы обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя выводятся на щиток корпуса. Ротор асинхронного двигателя представляет собой стальной цилиндрический сердечник, собранный из пластин электротехнической стали, с пазами, в которые уложена обмотка в виде «беличьего колеса». Здесь каждая пара диаметрально противоположных стержней с соединительными кольцами представляет собой рамку, т.е. короткозамкнутый виток. Поэтому такой ротор называется короткозамкнутым.

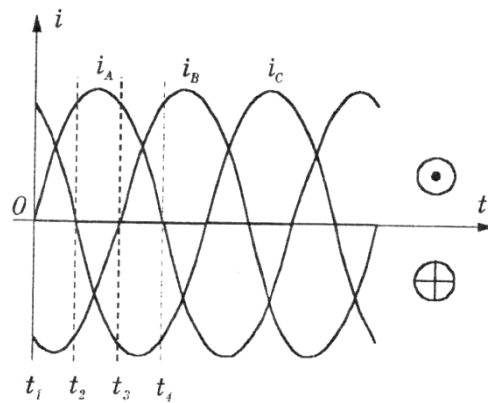


Таким образом, если способное вращаться вокруг оси «беличье колесо» поместить во вращающееся магнитное поле, то по закону электромагнитной индукции в его стержнях возникнут ЭДС и в короткозамкнутых витках возникнут токи. Эти токи, взаимодействуя согласно закону Ампера с вращающимся магнитным полем, создадут вращающий момент и приведут «беличье колесо» в асинхронное вращение в ту же сторону, что и поле. Для увеличения вращающего момента короткозамкнутый ротор помещен внутри стального сердечника.

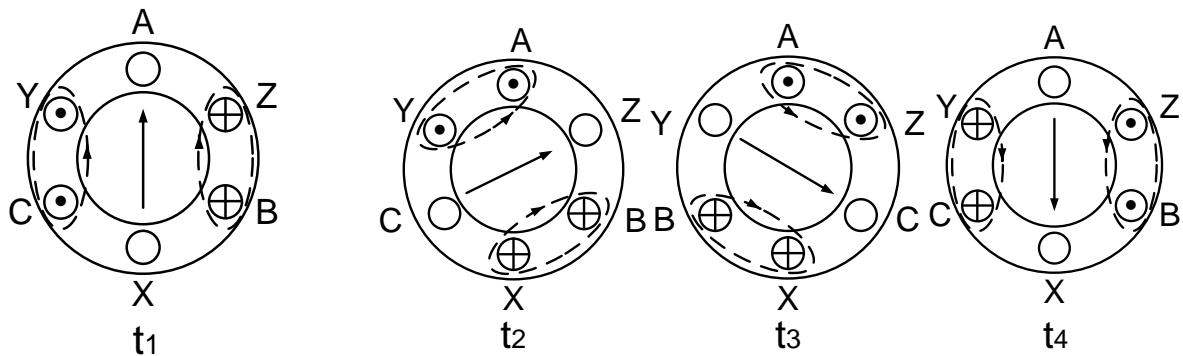
Создание вращающегося магнитного поля

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

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



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



В момент времени t_1 обмотка А-Х потока не создает ($i_A = 0$); в начале обмотки В ток направлен от нас ($i_B < 0$), а в конце этой обмотки Y - к нам; в начале обмотки С ток направлен к нам ($i_C > 0$), а в конце этой обмотки Z - от нас. Таким образом в двух расположенных рядом проводниках С 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 В 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. 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.

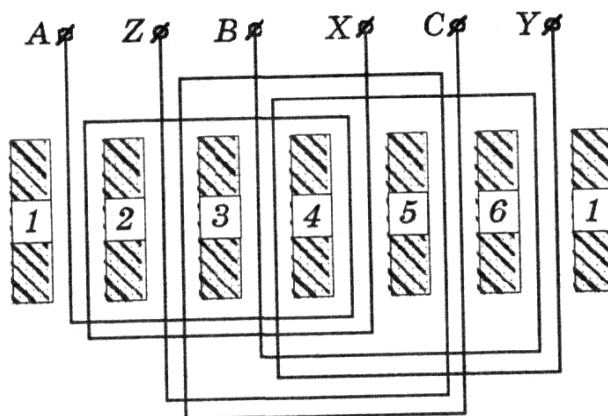
Таким образом, внутри статора существует постоянное по значению равномерно вращающееся магнитное поле.

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.

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. 5), 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 на 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:

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

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:

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

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 процентах, называется *скольжением* s :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%$$

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

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2$$

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 $M_{вр}$ равен тормозному моменту на валу двигателя $M_{тор}$:

$$M_{вр} = M_{тор}$$

Любой нагрузке машины соответствует определенное число оборотов ротора n_2 и определенное 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. Это 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.

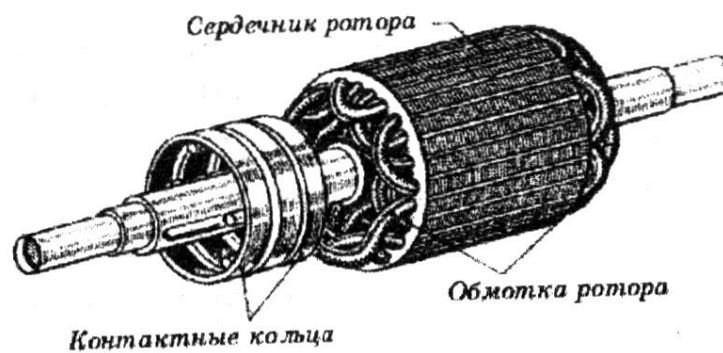
Асинхронный двигатель с фазным ротором

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

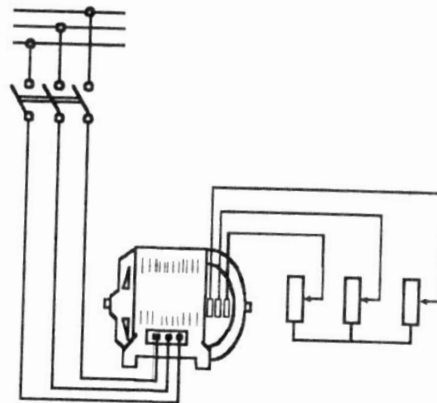
Желая улучшить пусковые характеристики асинхронного двигателя, М. О. Доливо-Добровольский разработал двигатель с фазным ротором.

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 их концы соединяются с тремя изолированными друг от друга контактными кольцами, укрепленными на валу машины и изолированными от него (рис. 6). Поэтому асинхронный двигатель с фазным ротором называют также асинхронным двигателем с контактными кольцами.

Контактные кольца соприкасаются со 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.



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.



Одним из важнейших достоинств асинхронного двигателя с фазным ротором является то, что в момент пуска создается большой вращающий момент при значительно меньших, чем у короткозамкнутых двигателей, пусковых токах. Объясняется это тем, что асинхронный двигатель при пуске развивает максимальный вращающий момент тогда, когда активное сопротивление ротора будет равно индуктивному сопротивлению двигателя. А так как у двигателей с фазным ротором активное сопротивление ротора можно изменять с помощью пускового реостата, то и пусковые характеристики их значительно лучше, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором производится следующим образом. Пусковой реостат устанавливается на холостую клемму (цепь ротора разомкнута), а на статор подается сетевое напряжение. Затем включается пусковой реостат, и его сопротивление постепенно уменьшают и делают равным нулю, когда двигатель приобретет номинальную скорость. Пусковой ток двигателя с фазным ротором превышает номинальный всего в 1,5-2 раза. Кроме того, включение в цепь ротора пускового реостата значительно увеличивает вращающий момент.

Сущность процесса регулирования скорости асинхронного двигателя с фазным ротором при помощи регулировочного реостата сводится к следующему. Ротор двигателя обладает определенной инерцией, и поэтому сразу после введения реостата его скорость и индуцируемая в роторе ЭДС E_2 в начальный момент остаются неизменными. Увеличение сопротивления пускового реостата в цепи ротора вызывает уменьшение тока ротора I_2 , что приводит к уменьшению вращающего момента (см. формулу).

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2$$

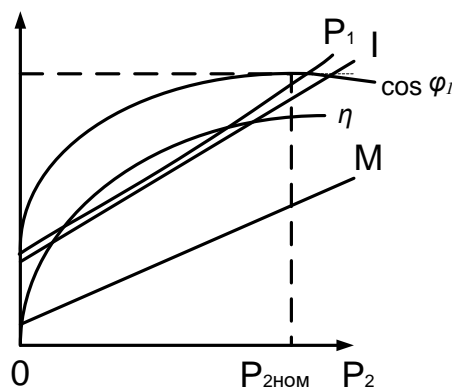
Вследствие этого скорость вращения ротора n_2 начнет уменьшаться. Уменьшение скорости n_2 аналогично увеличению скольжения s , вследствие чего индуцируемая в роторе ЭДС E_2 , пропорциональная s , также начнет расти, вызывая увеличение тока ротора I_2 . Рост тока I_2 и уменьшение скорости вращения ротора n_2 будет продолжаться до тех пор, пока ток I_2 не достигнет своего прежнего значения. В этом случае вращающий момент снова станет равным статическому, и двигатель начнет вращаться с постоянной скоростью, величина которой будет уже несколько меньше, чем до введения реостата. Регулировка скорости асинхронного двигателя с фазным ротором может осуществляться только в сторону уменьшения оборотов.

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 , к.п.д. $\eta = P_2 / P_1$ 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. 8. Их поведение объясняется следующим образом.

При малых нагрузках потребляемый двигателем ток I (ток холостого хода) может составлять от 20 до 70 % номинального тока. При увеличении нагрузки возрастает ток в цепи ротора, что приводит к почти пропорциональному увеличению тока I в цепи статора.



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 $\cos \varphi_1 \leq 0,2$. 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. Это объясняется увеличением скольжения s , что вызывает повышение реактивного сопротивления обмотки ротора, а следовательно, и фазового сдвига φ_2 . С увеличением φ_2 увеличивается и φ_1 т.е. $\cos \varphi_1$ будет уменьшаться.

Поведение рабочей характеристики $\eta = f(P_2)$ объясняется следующим образом. Величина к.п.д. 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_m , 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, с увеличением P_2 сначала резко возрастает. Когда постоянные потери $P_{ст} + P_{мех}$ станут равны потерям, зависящим от нагрузки P_m , к.п.д. достигает своего максимального значения. При дальнейшем увеличении нагрузки переменные потери мощности P_m значительно возрастают, в результате чего к.п.д. заметно уменьшается.

Характер зависимости $P_t = f(P_2)$ может быть объяснен из соотношения $P_1 = P_2 / \eta$. Если бы к.п.д. был постоянен, то между P_1 и P_2 была бы линейная зависимость. Но поскольку к.п.д. 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.

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.

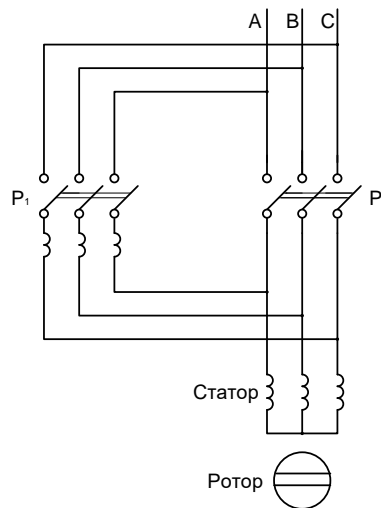
Запуск двигателей с фазным ротором.

Запуск двигателя с фазным ротором уже был кратко рассмотрен, а применяемая для этого схема включения изображена на рис. 7. 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 $\cos \varphi_2$, 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. 9).

При пуске замыкается рубильник P_1 и к обмоткам статора последовательно подключаются индуктивности. Это 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 пропорционального 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.

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

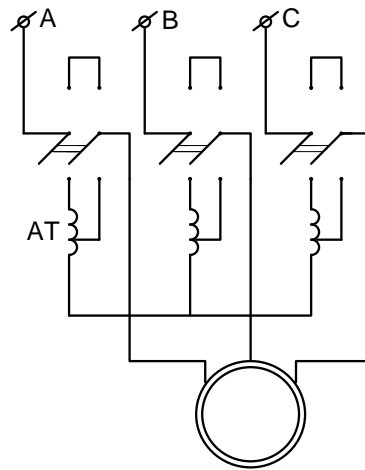
$$I_{н.дв} = \frac{U}{kz}$$

а ток в сети

$$I_n = \frac{I_{н.дв}}{k} = \frac{U}{k^2 z}$$

где z - сопротивление фазы двигателя, а 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 $\sqrt{2}$ раз 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:

$$I_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}z},$$

где z - полное сопротивление фазы двигателя, а U_n - линейное напряжение сети.

Так как линейный ток звезды равен фазному, то

$$I_{л.зв} = I_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}z}.$$

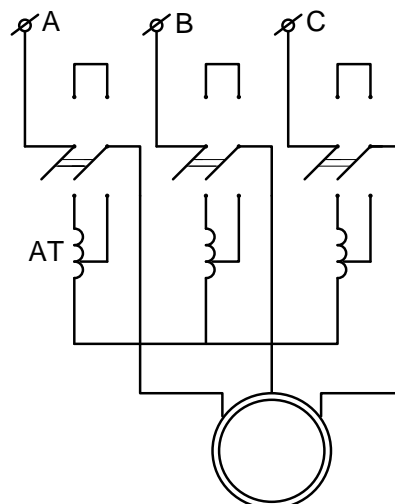
Если бы обмотки были соединены треугольником, то линейный ток был бы равен:

$$I_{л.тр} = \sqrt{3}I_n = \sqrt{3} \frac{U_n}{z}.$$

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

$$\frac{I_{л.тр}}{I_{л.зв}} = 3.$$

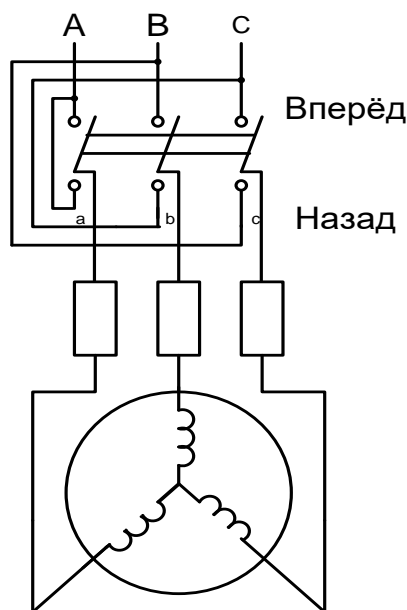
Практически такое переключение выполняется с помощью простого трехполюсного переключателя



Этот способ запуска может быть применен для двигателя, обмотки статора которого при питании от сети данного напряжения нормально 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 - это 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.



Однофазный асинхронный двигатель

В быту и в технике, там, где нужны двигатели небольшой мощности, часто используются так называемые однофазные асинхронные двигатели. Однофазный двигатель отличается от трехфазного тем, что его статор имеет одну обмотку (иногда две) и питается от однофазной сети. Ротор этих двигателей ввиду их малой мощности всегда выполняется короткозамкнутым в виде беличьего колеса и ничем не отличается от ротора трехфазного двигателя.

Если обмотку однофазного двигателя включить в сеть, то протекающий по ней переменный ток будет возбуждать в машине, пока ее ротор неподвижен, переменное магнитное поле, ось которого тоже неподвижна. Это поле будет индуцировать в обмотке ротора токи, взаимодействие которых с магнитным полем приведет к возникновению сил, противоположно направленных в правой и левой половинах ротора, вследствие чего результирующий момент, действующий на ротор, окажется равным нулю. Следовательно, при наличии одной обмотки начальный пусковой момент однофазного двигателя равен нулю, т.е. такой двигатель самостоятельно не сможет тронуться с места. Однако, если с помощью какой-либо внешней силы сообщить ротору некоторую скорость вращения, то он начнет вращаться.

Это явление можно объяснить на основе того, что переменное пульсирующее магнитное поле можно рассматривать как векторную сумму двух магнитных полей, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой угловой скоростью ω . Амплитуды магнитной

индукции обоих этих полей - B_{1m} и B_{2m} - одинаковы и равны половине амплитуды магнитной индукции пульсирующего переменного магнитного поля машины:

$$B_{1m} = B_{2m} = B_m / 2.$$

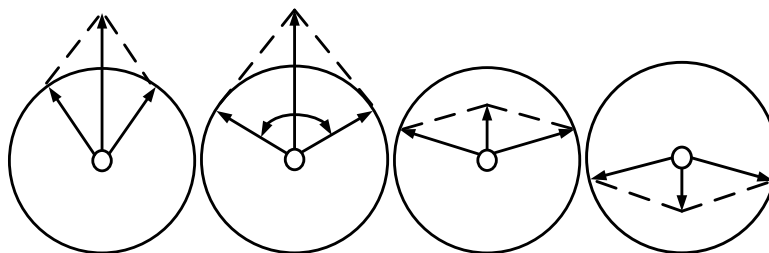
Предположим, что индукция пульсирующего переменного магнитного поля пропорциональна току и изменяется по закону:

$$B = B_m \sin \omega t$$

Простое графическое построение показывает, как в результате сложения двух одинаковых по длине векторов, вращающихся в противоположные стороны, получается синусоидально изменяющийся вектор.

Покажем это аналитически. Пусть в некоторой точке O имеются два вектора магнитной индукции

B_1 и B_2 ($B_1 = B_2 = B_m / 2$) вращающиеся в противоположных направлениях.



Из рисунка мы видим, что суммарное значение индукции B в точке O равно сумме проекций векторов B_1 и B_2 на ось Oy :

$$B = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin \omega t = B_m \sin \omega t$$

Таким образом, на ротор действуют два вращающихся магнитных потока: Φ_1 - вращающийся в сторону вращения ротора и называемый *прямым потоком* и Φ_2 - вращающийся навстречу ротору и называемый *обратным потоком*.

Прямой поток Φ_1 вращается относительно ротора с небольшой скоростью ($n_1 - n_2$) и индуцирует в обмотке ротора ЭДС и ток небольшой частоты (например, при $s = 0,02$ частота тока $f_1 = f_s = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ Гц}$). Вращающий момент, создаваемый этим потоком,

$$M_1 = c I_1 \Phi_1 \cos \psi_1.$$

Этот момент довольно велик, так как для тока небольшой частоты обмотка ротора является почти чисто активным сопротивлением, и поток Φ_1 и индуцируемый им ток I_1 почти совпадают по фазе, т.е. значение $\cos \psi_1$ близко к единице, а значение тока I_1 определяется активным сопротивлением обмотки.

Обратный поток Φ_2 вращается относительно ротора с большой скоростью ($n_1 + n_2$) и индуцирует в обмотке ротора ЭДС и ток I_2 с частотой, почти вдвое большей частоты питающего тока (например, при $s = 0,02$ частота индуцируемого тока

$$f_2 = (2 - s)f_1 = (2 - 0,02) \cdot 50 = 99 \text{ Гц}). \text{ Вращающий момент, создаваемый обратным потоком,}$$

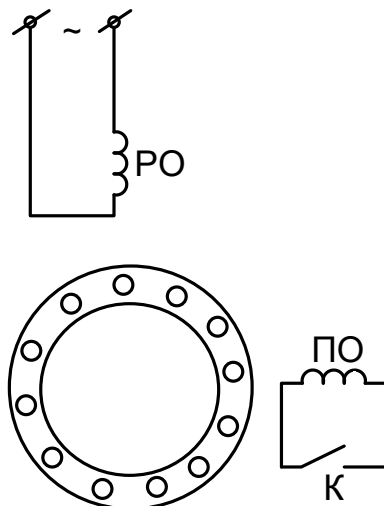
$$M_2 = c I_2 \Phi_2 \cos \psi_2.$$

Этот момент довольно мал, так как для тока большой частоты обмотка ротора обладает большим индуктивным сопротивлением ($x_L = \omega L$), поэтому между током I_2 и потоком Φ_2 будет большой сдвиг по фазе и $\cos \psi_2$ будет мал, как и величина тока I_2 который определяется активным и большим индуктивным сопротивлениями обмотки. Таким образом, вращение ротора может поддерживаться вращающим моментом прямого потока M_1 .

Пуск в ход однофазных двигателей осуществляется с помощью того или иного пускового устройства. Работа этих устройств основана на использовании свойства двух магнитных потоков, смещенных в пространстве на 90° и сдвинутых по фазе на $\pi/2$, создавать вращающее магнитное поле.

Однофазные двигатели с пусковой обмоткой

На статоре такого двигателя кроме *рабочей обмотки РО* находится так называемая *пусковая обмотка ПО*, повернутая в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° .

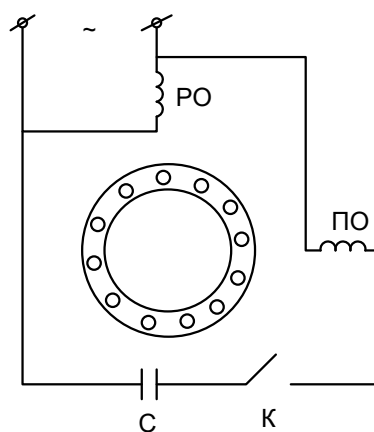


В момент пуска пусковая обмотка замыкается кнопкой *К*, и в результате трансформаторной связи в ней возникает ток, сдвинутый по фазе относительно питающего тока почти на $\pi/2$. Эти токи создают вращающее магнитное поле, которое и разгоняет ротор. После разгона пусковая обмотка размыкается и в дальнейшей работе двигателя не участвует. Двигатели с таким пуском встречаются иногда в бытовых стиральных машинах.

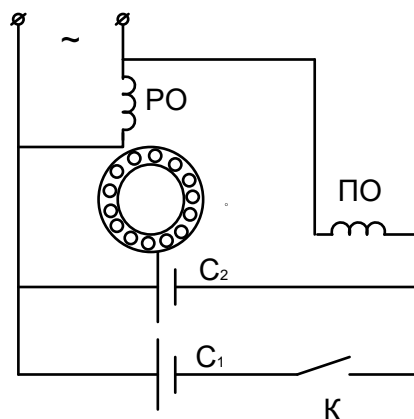
Конденсаторные двигатели

В этих двигателях рабочая и пусковая обмотки статора также смещены на статоре друг относительно друга на 90° . На время пуска пусковую обмотку

ПО подключают к сети с помощью кнопки *К* через конденсатор *С* благодаря которому то в пусковой обмотке отличается по фазе от тока рабочей обмотке на $\pi/2$, чем и обеспечивает разгон ротора.



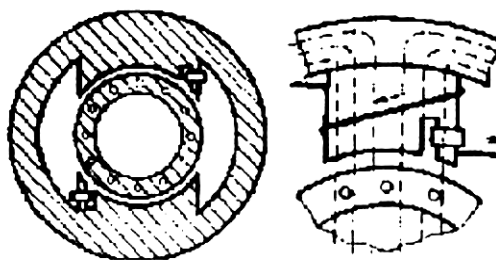
В некоторых двигателях используются два параллельно включенных конденсатора C_1 и C_2 - оба используются при запуске, а один из них (C_2) остается включенным и во время работы двигателя, благодаря чему обе обмотки являются рабочими.



Конденсаторные двигатели имеют лучшие пусковые и рабочие характеристики по сравнению с другими однофазными двигателями, поэтому они получили наиболее широкое распространение.

Однофазные двигатели с расщепленными полюсами

Статор двигателей очень малой мощности часто делают с явно выраженными полюсами, причем каждый полюс разрезан, а на одну его часть надето медное кольцо, играющее роль пусковой обмотки. Под действием переменного магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, в кольце индуцируется ЭДС, отстающая по фазе от потока на $\pi / 2$. Эта ЭДС создает в кольце ток. Поскольку сопротивление кольца практически чисто активное, этот ток совпадает по фазе с ЭДС и отстает от потока обмотки тоже на $\pi / 2$.

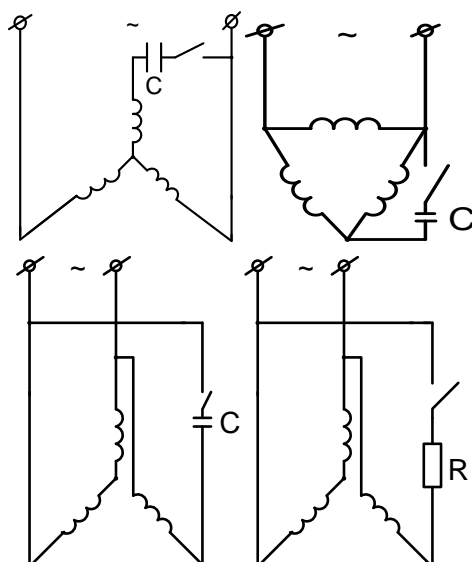


Этот ток в кольце создает свой магнитный поток, совпадающий с ним по фазе. Таким образом, под полюсом действуют два сдвинутых по фазе на $\pi / 2$ магнитных потока, образуя вращающееся магнитное поле. Это магнитное поле и увлекает за собой короткозамкнутый ротор.

Двигатели с расщепленными полюсами широко применяются для маломощного привода (кинопроекторы, вентиляторы и т.п.).

Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть

Во многих случаях трехфазные асинхронные двигатели можно включать в однофазную сеть переменного тока.



На а, б показаны схемы включения трехфазных двигателей, у которых выведены лишь по три конца обмоток. Конденсатор С создает дополнительный сдвиг по фазе между током и напряжением, обеспечивая начальный пусковой момент. Величина этого конденсатора рассчитывается или подбирается так, чтобы обеспечить примерное равенство всех трех фазных токов. На в, г показаны схемы включения трехфазных асинхронных двигателей, у которых выведены все шесть концов статорной обмотки. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть позволяет получать от них лишь 40-50 % от их номинальной мощности в трехфазном режиме.

Синхронные электрические машины переменного тока

Устройство и принцип работы 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 синхронные 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 практически 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 случае она потребляет из сети электрическую энергию, а отдает на валу механическую энергию.

Синхронная машина имеет две основные части - ротор и статор, причем статор не отличается от статора асинхронной машины. Ротор синхронной машины представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные кольца и щетки от внешнего источника. В обмотках статора под действием вращающегося магнитного поля ротора наводится ЭДС, которая подается на внешнюю цепь генератора (в режиме двигателя на обмотку статора подается напряжение сети). 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

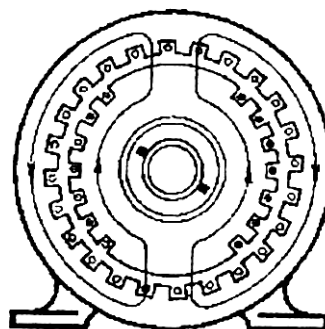
генератор постоянного тока небольшой мощности, установленный на общем валу с синхронным генератором. Постоянный ток от возбудителя подается на ротор через щетки и контактные кольца, установленные на валу ротора.

По своей конструкции роторы бывают *явнополюсные* (рис. 19,а) и *неявнополюсные* (рис. 19,б). Число пар полюсов ротора обусловлено скоростью его вращения.

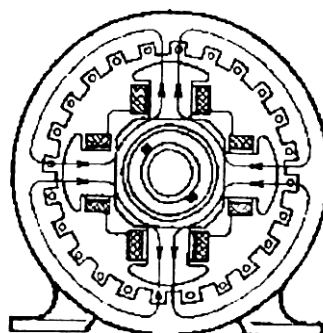
У многополюсной синхронной машины ротор имеет p пар полюсов, а токи в обмотке статора образуют также p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как у асинхронной машины). Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная скорость равна

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

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. Неявнополюсный ротор такого генератора



а



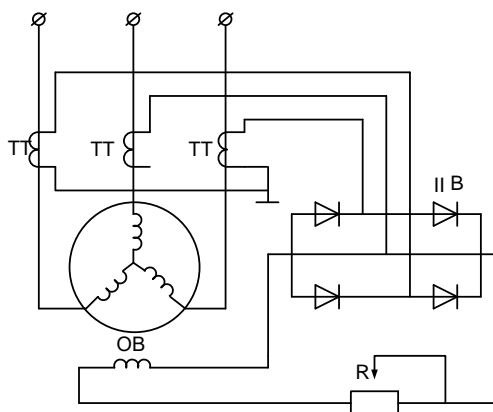
б

изготавливается из массивной стальной поковки. Обмотка постоянного тока расположена в пазах, выфрезерованных по всей его длине.

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 явно-полюсные машины небольшой мощности. В маломощных синхронных генераторах обычно используется

самовозбуждение: обмотка возбуждения питается выпрямленным током того же генератора.



Цепь возбуждения образуют трансформаторы тока $ТТ$, включенные в цепь нагрузки генератора, полупроводниковый выпрямитель, собранный по схеме трехфазного моста, и обмотка возбуждения генератора $ОВ$ с регулировочным реостатом R .

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 во вторичных обмотках трансформаторов $ТТ$ и небольшого тока в цепи возбуждения, усиливающего индукцию магнитного поля машины. ЭДС генератора возрастает до тех пор, пока магнитная система машины полностью не возбудится.

Среднее значение ЭДС, наводимое в каждой фазе обмотки статора,

$$E_{cp} = c n \Phi$$

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

Мы видим, что ЭДС генератора пропорциональна основному магнитному потоку машины, при этом напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину падения напряжения на обмотке:

$$\vec{U} = \vec{E} - \vec{I}z$$

где I - ток в обмотке статора (ток нагрузки); z - полное сопротивление обмотки (одной фазы).

Для точной подгонки амплитуды ЭДС величину магнитного потока регулируют путем изменения тока в цепи возбуждения регулировочным реостатом. Форма ЭДС синхронного генератора должна быть синусоидальной. Синусоидальность ЭДС зависит прежде всего от распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором. В явнополюсных машинах полюсным наконечникам ротора придают определенную форму (делают скосы по краям). При этом воздушный зазор постепенно увеличивается от середины полюса к его краям, а магнитная индукция распределяется по закону косинуса.

Однако такой способ получения синусоидальной ЭДС неприменим для машин с неявнополюсным ротором. В неявнополюсных машинах нужного распределения магнитной индукции добиваются путем особого размещения обмотки возбуждения на поверхности ротора. Эти и другие меры обеспечивают практически синусоидальную форму ЭДС.

Реакция якоря

Для частей синхронной машины применяются те же наименования, что и для частей машин постоянного тока: якорем принято называть ту часть, в обмотке которой индуцируется ЭДС. Следовательно, в синхронных машинах основного типа с неподвижной обмоткой переменного тока статор служит якорем. Индуктором, т.е. той частью, которая возбуждает основной магнитный поток, в синхронной машине основного типа является ротор.

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*.

Реакция якоря различна при различных нагрузках. В случае активной нагрузки (для получения такого режима нагрузка должна быть активно-емкостной, при этом емкость компенсирует индуктивность обмотки генератора) общий магнитный поток генератора несколько увеличивается и, следовательно, ЭДС генератора возрастает.

В случае чисто индуктивной нагрузки общий магнитный поток генератора уменьшается и, следовательно, уменьшается его ЭДС.

При емкостной нагрузке генератора общий магнитный поток генератора увеличивается, что приводит к увеличению ЭДС.

Отметим, что при увеличении тока нагрузки увеличивается магнитное поле якоря. Поэтому чем больше ток нагрузки, тем больше реакция якоря. Реакция якоря в синхронном генераторе приводит к изменению суммарного магнитного потока и ЭДС, что крайне нежелательно, поскольку изменение величины и характера нагрузки приведет к изменению напряжения на зажимах генератора.

Чтобы свести реакцию якоря к минимуму, увеличивают зазор между статором и ротором и одновременно увеличивают ток и число витков обмотки возбуждения. Это приводит к уменьшению потока якоря за счет увеличения магнитного сопротивления машины при неизменном общем магнитном потоке. Однако таким способом нельзя полностью устранить влияние реакции якоря. На практике при всяком изменении нагрузки с помощью автоматических устройств изменяют ток возбуждения, что существенно ослабляет влияние реакции якоря.

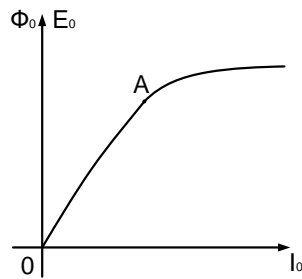
Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но поскольку в этих двигателях форма кривой ЭДС малосущественна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

Характеристики синхронного генератора

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

Характеристика холостого хода

Эта характеристика представляет собой зависимость ЭДС генератора E_0 на холостом ходу (т.е. без нагрузки) от тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Она связана с кривой намагничивания стали и напоминает ее по форме.



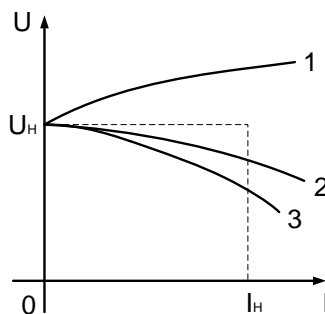
На холостом ходу синхронного генератора его ЭДС создается только главным магнитным потоком, поэтому ЭДС E_0 пропорциональна главному магнитному потоку Φ_0 , который в свою очередь пропорционален магнитной индукции B_0 в статоре. Поэтому зависимость $E_0 = f(I_e)$ подобна зависимости $B_0 - f(I_e)$, т.е. первоначальной кривой намагничивания стали. При достижении области магнитного насыщения магнитной системы генератора скорость роста ЭДС уменьшается, а спрямление кривой при малых значениях индукции происходит за счет воздушного зазора в магнитной цепи машины, обладающего большим магнитным сопротивлением. Опытным путем эту характеристику получают, изменяя ток возбуждения при номинальной скорости вращения ротора.

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

Внешняя характеристика синхронного генератора 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_b .

Чтобы экспериментально получить внешнюю характеристику, нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока I_n при номинальном напряжении U_n 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

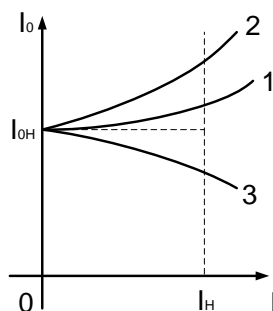
Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения генератора I_b от тока нагрузки I при $U = U_n = \text{const}$, $n = n_n = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

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_n при холостом ходе, а потом путем изменения тока возбуждения добиться получения номинального напряжения U_n .

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

На рис. 23 изображены регулировочные характеристики для различных значений $\cos \varphi$. Мы видим, что при активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi > 0$ (кривая 2), ток возбуждения необходимо увеличивать, а при активно-емкостной нагрузке, когда $\varphi < 0$ (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.

Работа синхронной машины в режиме двигателя

Как и все электрические машины, синхронные машины обратимы. Синхронный двигатель по своей конструкции принципиально не отличается от синхронного генератора. В случае идеальной синхронизации ($U_c = E_c$ и $f_c = f_s$) подключенная к сети синхронная машина не отдает энергию в сеть и не потребляет ее от сети. Покрытие потерь в машине осуществляется за счет первичного двигателя. Изменение момента, приложенного к валу машины, приведет к изменению угла θ между полем ротора и суммарным магнитным полем машины, не нарушая при этом синхронную частоту вращения.

При идеальной синхронизации угол θ равен нулю. Для того чтобы заставить машину (генератор) отдавать энергию в сеть, надо увеличить вращающий момент со стороны первичного двигателя. Это приведет к увеличению угла θ между полем ротора и суммарным магнитным полем машины и к нарушению взаимной компенсации E_c и U_c . В результате появится уравнивающий ток, магнитный поток которого по правилу Ленца будет препятствовать вращению ротора. Другими словами, магнитный поток уравнивающего тока будет создавать противодействующий момент, на преодоление которого потребуется дополнительное увеличение вращательного момента первичного двигателя. В этом случае вращающееся магнитное поле ротора будет вести за собой поле статора, а электромагнитные силы играют роль упругой связи между двумя полями. Генератор начнет отдавать энергию в сеть. Максимум отдаваемой генератором мощности будет при значении угла θ , равном 90° .

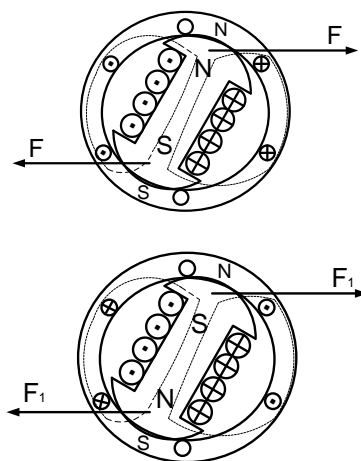
Если же величину вращающего момента со стороны первичного двигателя уменьшать, то угол θ начнет уменьшаться, и при полном отключении первичного двигателя ротор вместе со своим магнитным полем несколько отстанет от вращающегося поля статора (угол θ станет отрицательным). Вращающееся поле статора поведет за собой ротор, являющийся электромагнитом. Синхронная машина превращается в синхронный двигатель, в котором и поле статора и поле ротора (ротор) будут вращаться с одинаковой скоростью, т.е. синхронно. По мере увеличения нагрузки на валу такого двигателя угол θ

будет увеличиваться по модулю, оставаясь отрицательным. Это также приведет 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 θ 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.

Пуск и остановка синхронного двигателя

Синхронный двигатель не может быть запущен простым включением в сеть, поскольку его вращающий момент при пуске равен нулю. Это можно объяснить следующим образом. В этот момент на неподвижный ротор будет действовать пара сил F , стремящихся повернуть его по часовой стрелке. Через полпериода направление тока в обмотках статора изменится на противоположное. Так как ротор в силу своей инерции за это очень короткое время практически остается на месте, то на него теперь будет действовать такая же пара сил F_1 , стремящаяся повернуть ротор в обратную сторону. Таким образом, при непосредственном включении синхронного двигателя в сеть его ротор не сдвинется с места. Как уже говорилось в предыдущем разделе, за полпериода переменного тока ротор должен повернуться к следующему полюсу у статора (при одной паре полюсов обмотки статора - на пол-оборота), и, следовательно, для этого его надо тем или иным способом разогнать до скорости вращения, близкой к синхронной. Таким образом, характерной особенностью синхронного двигателя является необходимость предварительного разгона ротора.



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 и синхронный двигатель синхронизировался с сетью как генератор при включении на параллельную работу.

В настоящее время синхронные двигатели запускают с помощью асинхронного пуска. Для этого применяется специальная конструкция ротора. В полюсных наконечниках ротора укладываются металлические стержни, соединенные с боковыми кольцами. Получается

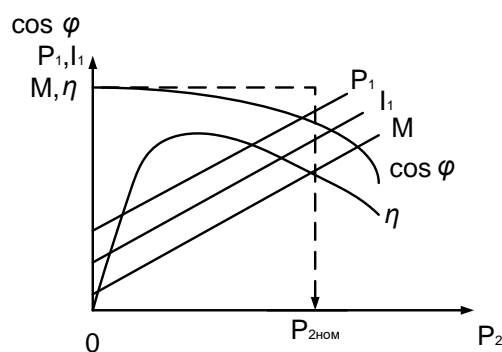
дополнительная (пусковая) обмотка, подобная «беличьему колесу» асинхронного двигателя. При пуске такого двигателя обмотку возбуждения закорачивают через активное сопротивление, превышающее активное сопротивление обмотки возбуждения в 10-15 раз, а обмотку статора включают в сеть (в случае двигателей большой мощности через пусковой автотрансформатор или через индуктивные сопротивления). При этом ротор начинает разгоняться так же, как и ротор асинхронного двигателя. После того, как он достигнет наибольшей возможной скорости вращения (примерно 95 % синхронной), обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. Двигатель автоматически входит в синхронизм, а дополнительная обмотка в полюсных наконечниках как бы автоматически отключается, поскольку при синхронной скорости вращения поля и ротора ЭДС в ней равна нулю. Для получения большого пускового момента пусковую обмотку (стержни в полюсных наконечниках) изготавливают с большим активным сопротивлением. Закорачивание обмотки возбуждения при асинхронном пуске синхронного двигателя необходимо потому, что вращающееся поле может индуцировать в разомкнутой обмотке возбуждения значительную ЭДС, которая может пробить ее изоляцию. Нельзя также замыкать обмотку возбуждения накоротко, так как в ней возникает значительный однофазный ток, который будет тормозить ротор по достижении им половины синхронной скорости вращения.

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 к опасным для целостности изоляции перенапряжениям в разомкнутой обмотке возбуждения.

Достоинством синхронного двигателя является строго постоянная скорость вращения, а недостатком - необходимость применения вспомогательных автоматических устройств для пуска и остановки двигателя.

Характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя являются зависимости потребляемой мощности P_1 , потребляемого тока I_1 , вращающего момента M , $\cos \varphi$ и к.п.д. η от полезной мощности нагрузки P_2 .



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 к.п.д. Потребляемый статором ток I_X на холостом ходу мал и при $\cos \varphi = 1$. 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 P_1 растет быстрее, чем полезная P_2 , так как при увеличении нагрузки сказывается увеличение электрических потерь в двигателе, которые пропорциональны квадрату тока.

Электрические машины постоянного тока

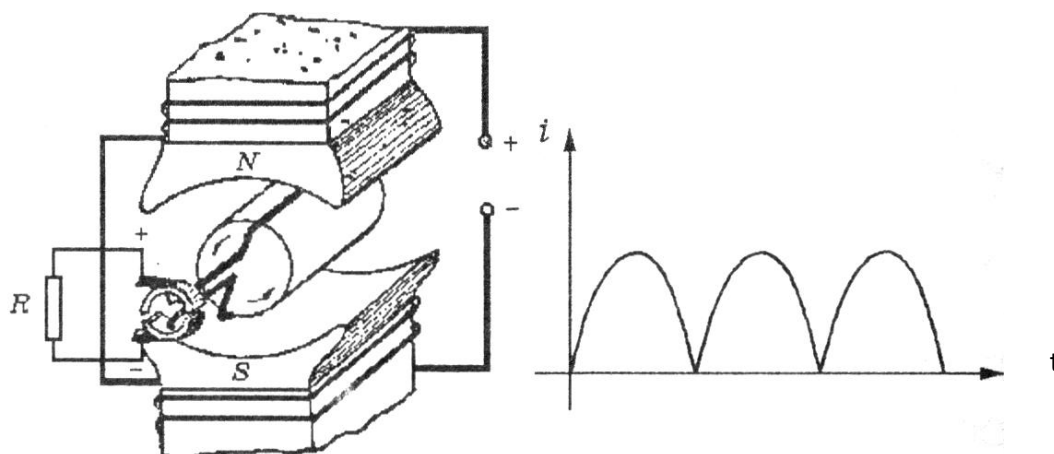
Общие сведения

Электрическим машинам постоянного тока присущи многие полезные качества. Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование скорости вращения в широких пределах, создавая при этом большой пусковой момент. Поэтому эти двигатели незаменимы в качестве тяговых двигателей трамваев, троллейбусов, метро и электровозов. Двигатели постоянного тока также широко используются в промышленности.

Генераторы постоянного тока используются для питания электролитических ванн, электромагнитов различного назначения и т.п. Генераторы постоянного тока, как правило, приводятся в действие асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

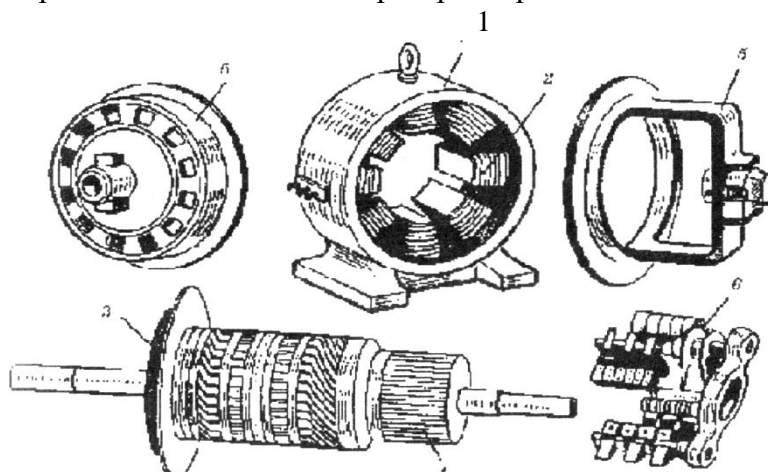
Устройство и принцип работы генератора постоянного тока

Принцип работы генератора постоянного тока основан на возникновении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле.



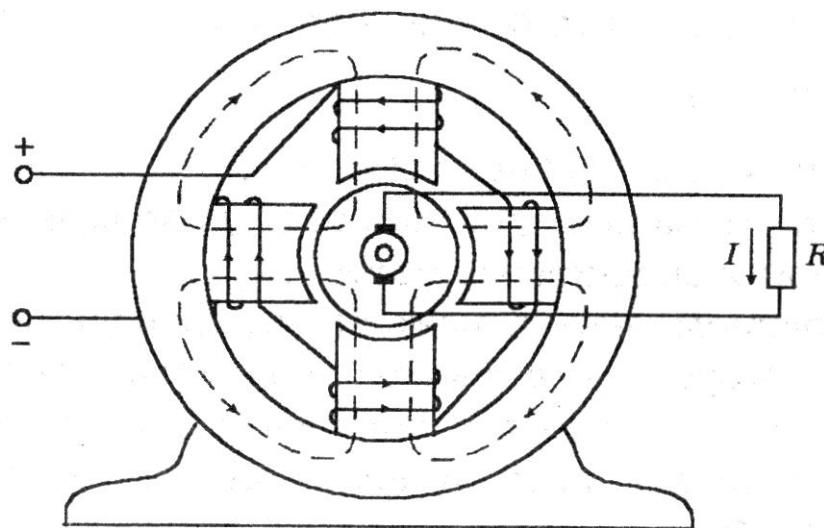
Как известно, при вращении рамки индуцируемая в ней ЭДС будет изменяться по синусоиде, т.е. за один оборот дважды поменяет знак. Чтобы ток во внешней цепи имел одно направление (постоянное), применяют коллектор - два полукольца, соединенных с концами рамки, которые через щетки соединяются с внешней цепью. Как только рамка повернется на 180° и ЭДС начнет менять знак, полукольца коллектора поменяются местами. Благодаря этому направление тока во внешней цепи останется неизменным, хотя его величина будет изменяться.

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части, служащей для возбуждения главного магнитного поля, и вращающейся части, в которой индуцируются ЭДС и токи, создающие тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.



Неподвижная часть генератора состоит из станины 1, на которой находятся главные полюсы 2 с обмотками возбуждения и дополнительные полюсы с обмотками для компенсации ЭДС самоиндукции и реакции якоря. В большинстве случаев электромагниты питаются от самого генератора. Внутри станины помещается якорь 3, представляющий собой металлический цилиндр, набранный из штампованных, изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. В продольных пазах на поверхности якоря размещена обмотка, состоящая из соединенных между собой секций. Для сглаживания пульсаций ЭДС и тока обмотка якоря равномерно распределена по всей поверхности. Выводы секций присоединены к изолированным друг от друга и от корпуса машины медным пластинам коллектора 4, причем конец одной секции и начало следующей присоединяют к одной и той же пластине. Коллектор жестко укреплен на валу якоря; на этом же валу крепится и вентилятор. Вал якоря помещается в подшипники подшипниковых щитов 5, укрепляемых на боковых сторонах станины. Между якорем и полюсами имеется небольшой воздушный зазор, благодаря которому якорь может свободно вращаться. На цилиндрическую поверхность коллектора накладываются угольные щетки, вставленные в щеткодержатели 6.

Машины постоянного тока часто делают многополюсными, при этом количество изменений значений и знака ЭДС в каждой секции обмотки якоря за один оборот равно количеству полюсов. В таких машинах число пар щеток равно числу пар полюсов, а щетки одинаковой полярности соединяются вместе.



Как и все электрические машины, машины постоянного тока обратимы. Машина работает в режиме генератора, если ее вращает тот или иной первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В этом случае в обмотке якоря индуцируется ЭДС, которая через коллектор и щетки подает ток в нагрузку. В самой машине взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Машина преобразует механическую энергию в электрическую. Если цепь якоря и цепь возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии, то в них возникают токи, взаимодействие которых создает вращающий момент. Под действием этого момента якорь начинает вращаться и машина работает в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую. Таким образом, одна и та же машина может быть использована и в качестве генератора, и в качестве двигателя.

ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока

Выясним, как зависит ЭДС генератора постоянного тока от параметров машины, скорости вращения якоря и магнитного потока.

При равномерном перемещении проводника длиной l со скоростью v в магнитном поле с индукцией B (скорость перпендикулярна вектору индукции), в нем по закону электромагнитной индукции возникнет ЭДС e :

$$e = \left| - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| = \frac{Bl \Delta x}{\Delta t} = Blv$$

Рассмотрим движение проводника обмотки якоря в магнитном поле под полюсом. Чтобы определить среднее значение ЭДС в этом проводнике, введем понятие средней индукции.

Пусть Φ - магнитный поток, создаваемый главным полюсом, тогда при $2p$ полюсах общий магнитный поток равен $2p\Phi$. Допустим, что индукция равномерно распределена по всему воздушному зазору. Тогда ее среднее значение

$$B_{cp} = \frac{2p\Phi}{S} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}$$

где S - площадь поверхности якоря, d - диаметр якоря, l - длина образующей цилиндра якоря. Предполагая, что вектор средней магнитной индукции везде направлен по радиусу якоря, т.е. перпендикулярно скорости, мы получим для средней ЭДС в одном проводнике обмотки якоря

$$e_{cp} = B_{cp}lv$$

где v - линейная скорость вращения проводника обмотки якоря.

Учитывая, что скорость вращения проводника обмотки якоря $v = \omega \frac{d}{2} = 2\pi n \frac{d}{2} = \pi nd$
или в об/мин $v = \frac{\pi nd}{60}$

(ω и n - угловая скорость и частота вращения якоря, соответственно)

Получим:

$$e_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l \frac{\pi nd}{60} = \frac{2p}{60} n \Phi$$

Обмотка якоря состоит из N активных проводников. Щетки делят эту обмотку на $2a$ параллельных ветвей. Таким образом, в пределах каждой параллельной ветви последовательно соединяются $N/2a$ активных проводников. Поскольку ЭДС генератора e равна ЭДС параллельной ветви, то для неё можно записать следующее выражение:

$$e = e_{cp} \frac{N}{2a}$$

Получим выражение для средней ЭДС:

$$e = \frac{pN}{60a} n \Phi = cn \Phi,$$

где $c = \frac{pN}{60a}$ - постоянная, зависящая только от параметров машины.

Таким образом, мы видим, что ЭДС генератора постоянного тока пропорциональна значению магнитного потока машины Φ и скорости вращения якоря n . Следовательно, для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора можно изменять ЭДС, либо изменяя магнитный поток, либо скорость вращения якоря (либо и то и другое). Обычно

якорь генератора приводят во вращение двигателем, работающим при определенной скорости вращения, а магнитный поток изменяют путем изменения тока в обмотке возбуждения.

Вычислим мощность генератора постоянного тока:

$$P = \frac{A}{t}$$

причем работой A следует считать механическую работу, затрачиваемую на преодоление тормозного момента, развиваемого якорем. В формуле мощность можно выразить через линейную скорость вращения якоря:

$$P = \frac{Fs}{t} = Fv$$

где F - сила, действующая на якорь, а v - линейная скорость точки на поверхности якоря.

Как мы уже видели, линейная скорость проводника на поверхности якоря $v = \pi d n$, где n - частота вращения якоря, d - диаметр якоря. Подставляя выражение для скорости и переходя к оборотам в минуту, получим

$$P = F \pi d \frac{n}{60}$$

На каждый проводник обмотки якоря с током I действует по закону Ампера сила

$$F_l = IB_{cp}l, \text{ а на } N \text{ проводников обмотки с учетом формулы } B_{cp} = \frac{2p\Phi}{S} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} \text{ будет}$$

действовать сила:

$$F_{cp} = NIB_{cp}l = NI \frac{2p\Phi}{\pi dl} l = \frac{pN}{\pi da} \Phi I_a$$

Мощность генератора определим:

$$P = F_{cp} \frac{\pi d n}{60} = \frac{pN}{60a} n \Phi I_a = e I_a$$

Вращающий момент машины можно записать в виде:

$$M = F_{cp} \frac{d}{2} = \frac{pN}{\pi da} \Phi I_a \frac{d}{2} = c \Phi I_a$$

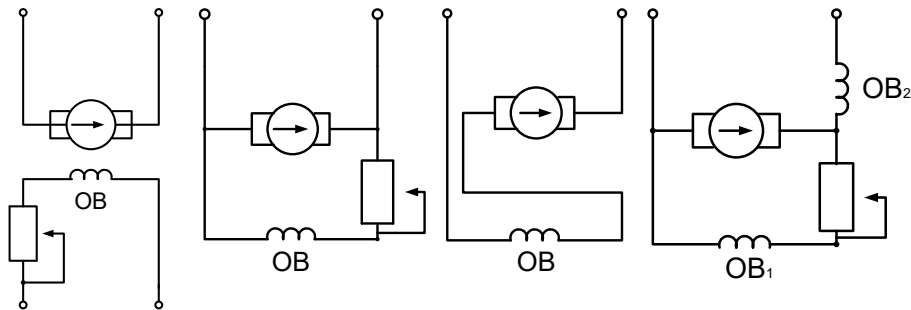
где $c = \frac{pN}{2\pi a}$ - постоянный коэффициент, учитывающий особенности конструкции машины.

Способы возбуждения генераторов постоянного тока

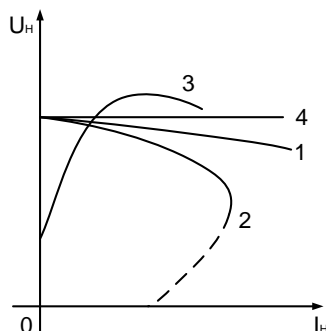
Возбуждением генератора называется создание главного магнитного потока, благодаря которому во вращающемся якоре создается ЭДС. Важнейшим отличительным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля. Практически во всех современных машинах главное магнитное поле возбуждается электромагнитным путем, для чего по обмотке возбуждения, размещенной на сердечниках полюсов машины, пропускается ток. Все рабочие характеристики машины постоянного тока при работе как в режиме генератора, так и в режиме двигателя зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, цепи эти могут быть независимы друг от друга. При любом способе включения мощность, потребляемая цепью возбуждения, невелика и составляет несколько процентов от номинальной мощности машины.

Генератор с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения OB такого генератора подключена к постороннему источнику тока через регулировочный реостат (рис. 29, а).

При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах этого генератора несколько уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря и в результате действия реакции якоря, которая уменьшает



магнитный поток машины. Для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора изменяют ток возбуждения с помощью регулировочного реостата. Внешняя характеристика этого генератора (зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки) показана на рис. (кривая 1).



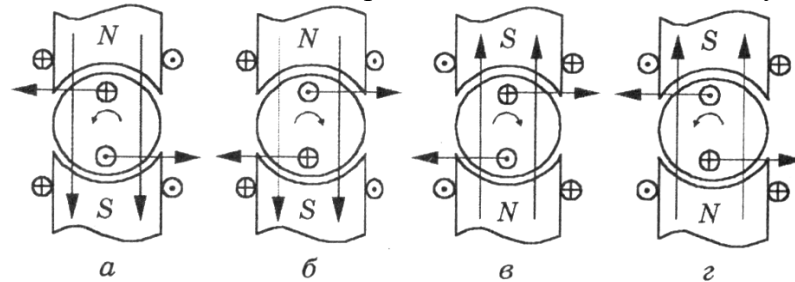
Генератор с параллельным возбуждением. Это генератор с самовозбуждением: обмотку возбуждения $ОВ$ такого генератора подключают через регулировочный реостат параллельно обмотке якоря. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря. Это в свою очередь вызывает уменьшение тока возбуждения и ЭДС в якоре. Поэтому при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к такому сильному уменьшению тока возбуждения, что при коротком замыкании цепи нагрузки напряжение генератора падает до нуля. Поэтому короткое замыкание генератора с параллельным возбуждением件опасно. Внешняя характеристика этого генератора показана на рис. (кривая 2).

Генератор с последовательным возбуждением. Это также генератор с самовозбуждением, но его обмотка возбуждения $ОВ$ включена последовательно с якорем и по обеим обмоткам протекает одинаковый ток. При отсутствии нагрузки (внешняя цепь разомкнута) в якоре все же возбуждается небольшая ЭДС вследствие остаточной индукции стального сердечника статора. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала растет до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы машины, после чего оно начинает быстро уменьшаться из-за падения напряжения на сопротивлении якоря и вследствие размагничивающего действия реакции якоря. Ввиду сильной зависимости напряжения на зажимах генератора от нагрузки генераторы с последовательным возбуждением применяются очень редко.

Генератор со смешанным возбуждением. Этот генератор также относится к генераторам с самовозбуждением, но имеет две обмотки возбуждения: $ОВ_1$ которая включается параллельно якорю, и $ОВ_2$, которая включается последовательно с якорем (рис. 29, г). Обмотки включают так, чтобы они создавали магнитные потоки одного направления, а число витков в обмотках выбирают таким, чтобы падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и ЭДС реакции якоря были бы скомпенсированы ЭДС от потока параллельной обмотки. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора со смешанным возбуждением остается практически постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах.

Двигатели постоянного тока

Принцип работы двигателя постоянного тока основан на взаимодействии проводника с током с постоянным магнитным полем электромагнитов. Если генератор включить в сеть постоянного тока, то в обмотках якоря и электромагнитов установится ток и на каждый проводник обмотки якоря, находящийся в магнитном поле электромагнитов, начнет действовать сила, стремящаяся повернуть якорь. Из рис. видно, что при изменении направления тока только в якоря или только в обмотке возбуждения направление вращения якоря изменяется на противоположное, а одновременное изменение направления тока в обеих обмотках не изменяет направление вращения якоря. Отсюда следует, что для изменения направления вращения двигателя постоянного тока нужно поменять местами либо концы обмотки якоря, либо концы обмотки возбуждения.



Если двигатель постоянного тока с сопротивлением обмотки якоря $R_{\text{я}}$ включить в сеть с напряжением U , то в момент пуска в якоря установится ток

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$$

Поскольку сопротивление якоря мало, то пусковой ток в нем будет очень большим, превышая номинальный в десятки раз. От такого тока могут пострадать обмотка якоря, а также коллектор и щетки. Пусковой ток можно ограничить путем включения последовательно с обмоткой якоря пускового реостата. В этом случае пусковой ток

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$$

Сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$ выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 1,2-1,5 раза.

В результате взаимодействия якоря с магнитным полем полюсов якорь начнет вращаться. Так как его обмотка начнет вращаться в магнитном поле, то в ней будет индуцироваться ЭДС, которая будет направлена против приложенного к двигателю напряжения. Величина этой ЭДС прямо пропорциональна числу оборотов двигателя и величине магнитного потока. Однако в отличие от генератора в двигателе эта ЭДС будет меньше приложенного от сети напряжения на величину падения напряжения в якоря машины:

$$U = e + I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (1)$$

отсюда ток в якоря при выведенном пусковом реостате

$$I_{\text{я}} = \frac{U - e}{R_{\text{я}}} \quad (2)$$

Умножив обе части уравнения (1) на $I_{\text{я}}$, получим:

$$I_{\text{я}} U = I_{\text{я}} e + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$$

Левая часть уравнения представляет собой электрическую мощность, потребляемую двигателем из сети, а второй член правой части $I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ - мощность, поглощаемую сопротивлением якоря. Очевидно, что $I_{\text{я}} e$ - это полезная электрическая мощность, которая может быть преобразована в другие виды энергии. Следовательно, это та часть потребляемой из сети электрической мощности, которая преобразуется двигателем в механическую (включая механические потери). Таким образом, ЭДС самоиндукции в

двигателе постоянного тока влияет на преобразование потребляемой из сети электрической энергии в механическую.

Подставим выражение для ЭДС генератора (ЭДС, индуцируемая в якоре двигателя, выражается той же формулой) в (2) и выразим отсюда скорость вращения двигателя:

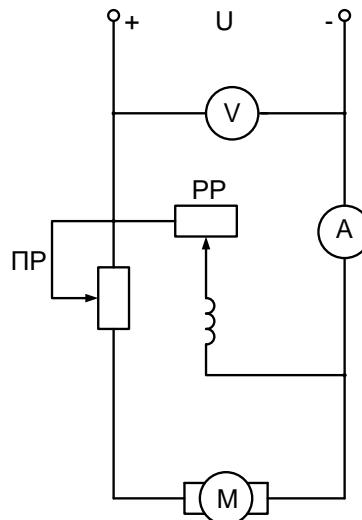
$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c\Phi}$$

Мы видим, что скорость вращения двигателя прямо пропорциональна подводимому напряжению и обратно пропорциональна величине магнитного потока. Отсюда следует, что регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока можно осуществлять, либо изменяя сопротивление цепи якоря (при постоянном напряжении сети), либо путем изменения магнитного потока.

Способы возбуждения двигателей постоянного тока

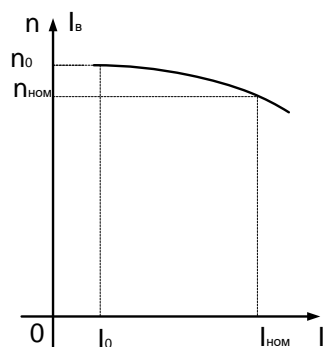
Все рабочие характеристики двигателя постоянного тока, как и генератора, зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, они могут быть независимы друг от друга.

Двигатели с параллельным и независимым возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением показана на рис., где *ПР* - пусковой реостат, а *РР* - регулировочный реостат.



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

Скоростная характеристика таких двигателей $n = f(I_{\text{я}})$ при $U = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$ приведена на рис. 33.

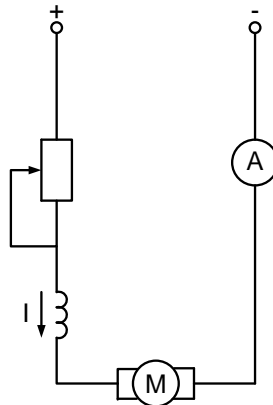


Изменение скорости вращения может происходить за счет изменения нагрузки и магнитного потока. Увеличение тока нагрузки незначительно изменяет внутреннее падение напряжения из-за малости сопротивления цепи якоря и поэтому лишь незначительно уменьшает скорость вращения двигателя. Что же касается магнитного

потока, то вследствие реакции якоря при увеличении тока нагрузки он несколько уменьшается, что приводит к незначительному увеличению скорости вращения двигателя. Таким образом, скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением изменяется очень мало.

Скорость вращения двигателя с независимым возбуждением можно регулировать изменением либо сопротивления цепи якоря, либо магнитного потока. Следует отметить, что чрезмерное уменьшение тока возбуждения и особенно случайный обрыв этой цепи очень опасны для двигателей с параллельным и независимым возбуждением, так как ток в якоре может возрасти до недопустимо больших значений. При небольшой нагрузке (или на холостом ходу) скорость может настолько возрасти, что это станет опасным для целостности двигателя.

Двигатель с последовательным возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением показана на рис. 34.



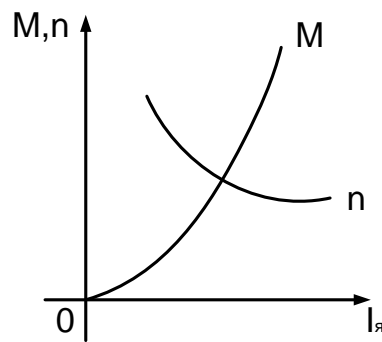
У такого двигателя ток якоря является одновременно и током возбуждения, так как обмотка возбуждения включена последовательно с якорем. Поэтому магнитный поток двигателя изменяется с изменением нагрузки. Выражение для скорости вращения двигателя последовательного возбуждения можно получить из формулы заменив сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ на $(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})$, где $R_{\text{в}}$ - сопротивление обмотки возбуждения:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{c\Phi}$$

Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 35.

Из этой характеристики видно, что скорость двигателя сильно зависит от нагрузки. При увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмоток при одновременном увеличении магнитного потока, что приводит к значительному уменьшению скорости вращения двигателя. Это характерная особенность двигателя с последовательным возбуждением. Значительное уменьшение нагрузки приводит к опасному для двигателя увеличению скорости вращения. Поэтому такие двигатели не следует пускать вхолостую или с малой нагрузкой.

Регулирование скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением может осуществляться путем изменения либо магнитного потока, либо напряжения питания.

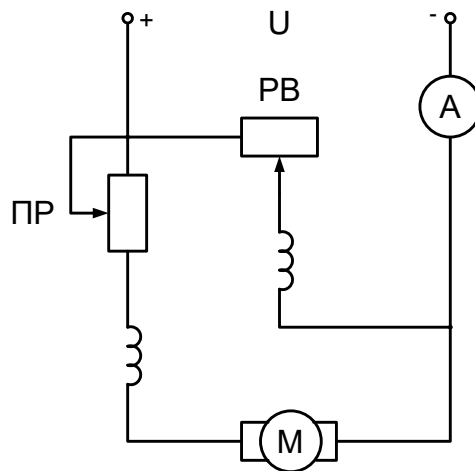


Согласно формуле вращающий момент двигателя пропорционален току якоря и магнитному потоку. В свою очередь магнитный поток в отсутствие насыщения пропорционален току возбуждения, который для данного двигателя является и током якоря:

$$M = c\Phi I_{\text{я}} = c_1 I_{\text{я}}^2$$

Мы видим, что вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря. Квадратичная зависимость вращающего момента от тока нагрузки является еще одной характерной особенностью таких двигателей, благодаря которой эти двигатели легко переносят большие кратковременные перегрузки и развивают большой пусковой момент.

Двигатели с последовательным возбуждением применяют в тех случаях, когда необходим большой пусковой момент или способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также исключена возможность их полной разгрузки. Они оказались незаменимыми в качестве тяговых двигателей на электрическом транспорте (трамваи, троллейбусы, метро и электровозы), а также на подъемных кранах и для пуска двигателей внутреннего сгорания (стартеры) на автомобилях и авиационных двигателях.



На каждом полюсе такого двигателя имеются две обмотки - параллельная и последовательная. Их можно включить так, чтобы магнитные потоки складывались (согласное включение) или вычитались (встречное включение). Формулы для скорости вращения и для вращающего момента двигателя со смешанным возбуждением выглядят следующим образом:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c(\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{посл}})}$$

$$M = c I_{\text{я}} (\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{посл}})$$

В этих формулах знак плюс относится к согласному включению обмоток возбуждения, а минус - к встречному. В зависимости от соотношения магнитных потоков обеих обмоток двигатель со смешанным возбуждением по своим свойствам приближается либо к двигателю с параллельным возбуждением, либо к двигателю с последовательным воз-

буждением. Как правило, у двигателей со смешанным возбуждением последовательная обмотка является главной (рабочей), а параллельная вспомогательной. Благодаря наличию магнитного потока параллельной обмотки скорость вращения такого двигателя не может сильно возрасть при малых нагрузках.

Двигатели с согласным включением широко применяются в тех случаях, когда необходим большой пусковой момент и регулировка скорости при переменных нагрузках (включая малые нагрузки и холостой ход). Двигатели со встречным включением обмоток применяются в тех случаях, когда необходима постоянная скорость при изменяющейся нагрузке.