

## Тема 16. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Устройство и принцип работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором
2. Создание вращающегося магнитного поля.
3. Скорость вращения магнитного поля. Скольжение
4. Вращающий момент электродвигателя
5. Асинхронный двигатель с фазным ротором

### 8.1. 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.

### 8.2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель, изобретенный в 1888 г., благодаря простоте своей конструкции и в настоящее время распро-

странен 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. 8.1. Двигатель состоит из статора 1 с рабочими обмотками, ротора 3 с лопастями вентилятора 2 и двух щитов с подшипниками для вала ротора и вентиляционными отверстиями 4.

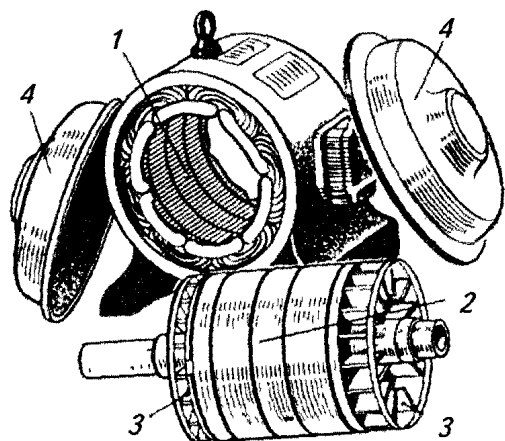


Рис. 8.1

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  $120^\circ$ . 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 (см. рис. 8.1), с пазами, в которые уложена обмотка в виде «белчьего колеса» (рис. 8.2). Здесь каждая пара диаметрально проти-

воположных стержней с соединительными кольцами представляет собой рамку, т. е. короткозамкнутый виток. Поэтому такой ротор называется короткозамкнутым.

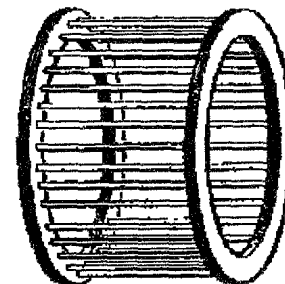


Рис. 8.2

Таким образом, если способное вращаться вокруг оси «белчьё 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 «белчьё колесо» в асинхронное вращение в ту же сторону, что и поле. Для увеличения вращающего момента короткозамкнутый ротор помещен внутри стального сердечника.

### 8.3. Создание вращающегося магнитного поля

Если три катушки, расположенные по окружности под углом  $120^\circ$  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. 8.3. Выберем четыре момента времени  $t_1, t_2, t_3$  и  $t_4$  через одну шестую часть периода.

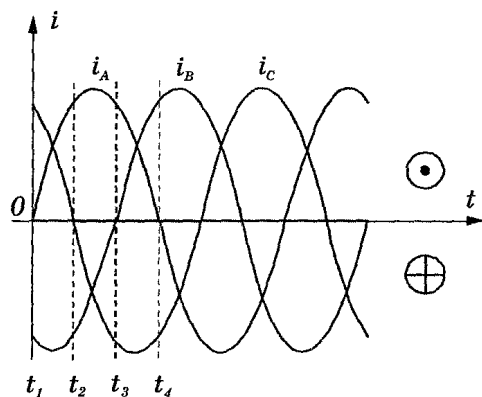


Рис. 8.3

Для каждого из этих моментов последовательно изобразим направления результирующего магнитного поля внутри статора трехфазной машины, которая имеет три обмотки по одному витку (рис. 8.4). 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.

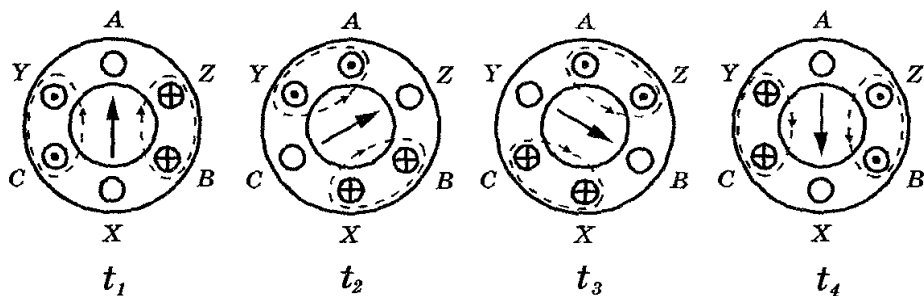


Рис. 8.4

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. 8.4 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  $180^\circ$ . 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.

## 8.4. 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. 8.5), 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 за полный период — на пол-оборота. Вместо двух полюсов на трех обмотках теперь магнитное поле статора имеет четыре полюса (две пары полюсов).

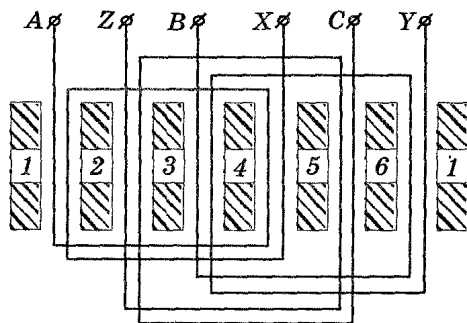


Рис. 8.5

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:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (об/мин)}, \quad (8.1)$$

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:

$p$	1	2	3	4	5	6	8	12	24
	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*  $s$ :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%. \quad (8.2)$$

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  $\Phi$  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  $\varphi_2$  — угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора. В окончательном виде выражение для вращающего момента имеет вид

$$M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (8.3)$$

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

$$M_{ep} = M_{тор}. \quad (8.4)$$

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.

### 8.5. 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.

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. 8.6). Поэтому асинхронный двигатель с фазным ротором называют также асинхронным двигателем с контактными кольцами.



Рис. 8.6

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 (рис. 8.7).

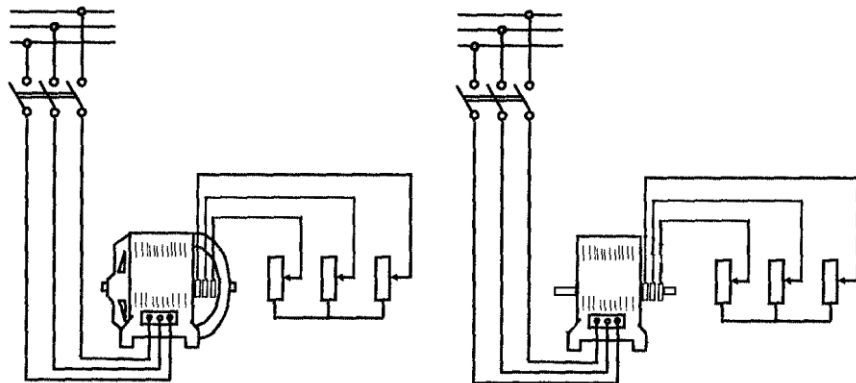


Рис. 8.7

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 фаз-

ным 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 (8.3)). Вследствие этого скорость вращения ротора  $n_2$  начнет уменьшаться. Уменьше-

ние 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.

### 8.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками называют зависимости мощности, потребляемой двигателем  $P_1$ , потребляемого тока  $I$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$ , скорости вращения двигателя  $n_2$ , 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. 8.8.

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.

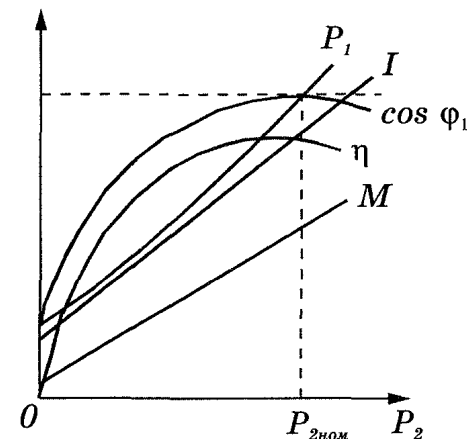


Рис. 8.8

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  $\varphi_2$ . С увеличением  $\varphi_2$  увеличивается и  $\varphi_1$ , 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  $P_{cm}$ , 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, и поэтому к.п.д., определяемый формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cm} + P_m + P_{мех}}, \quad (8.5)$$

с увеличением  $P_2$  сначала резко возрастает. Когда постоянные потери  $P_{cm} + P_{мех}$  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  $P_1 = f(P_2)$  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.

## 8.7. 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 мало-мощной 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 в разд. 8.5, а применяемая для этого схема включения изображена на рис. 8.7. 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. 8.9).

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

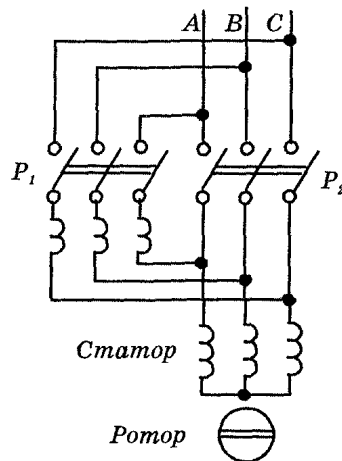


Рис. 8.9

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. 8.10).

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

$$I_{n.дв} = \frac{U}{kz},$$

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

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.

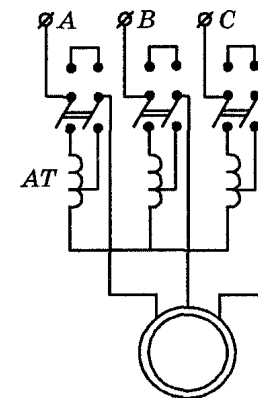


Рис. 8.10

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:

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

где  $z$  — полное сопротивление фазы двигателя, а  $U_{\lambda}$  — линейное напряжение сети.

Так как линейный ток звезды равен фазному, то

$$I_{\lambda.зв} = I_{\phi} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}z}.$$

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

$$I_{\lambda.тр} = \sqrt{3}I_n = \sqrt{3} \frac{U_{\lambda}}{z}.$$

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

$$\frac{I_{\lambda.тр}}{I_{\lambda.зв}} = 3.$$

Практически такое переключение выполняется с помощью простого трехполюсного переключателя (рис. 8.11).

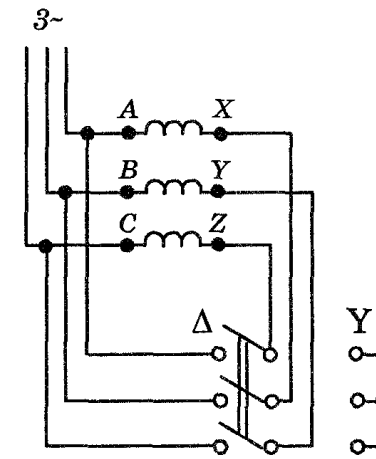


Рис. 8.11

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 (см. разд. 8.3). На практике это осуществляется путем перемены мест любых двух фаз. Для этого часто используют трехполюсные переключатели (рис. 8.12):

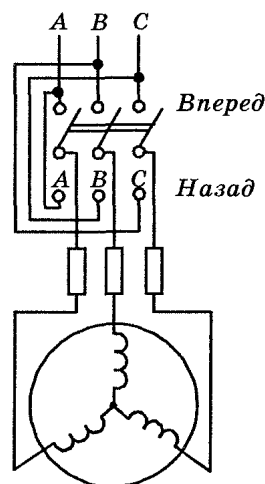


Рис. 8.12

### 8.8. 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  $\omega$ . 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 (рис. 8.13) 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  $B_2$  ( $B_1 = B_2 = \frac{B_m}{2}$ ), вращающиеся в противоположных направлениях.

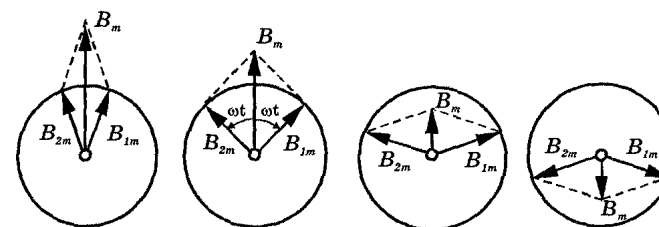


Рис. 8.13

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

$$B = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin \omega t = B_m \sin \omega t. \quad (8.6)$$

Таким образом, на ротор действуют два вращающихся магнитных потока:  $\Phi_1$  — вращающийся в сторону вращения ротора и называемый *прямым потоком* и  $\Phi_2$  — вращающийся навстречу ротору и называемый *обратным потоком*.

Прямой поток  $\Phi_1$  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  $f_1 = fs = 50 \cdot 0,02 = 1$  Гц). Вращающийся момент, создаваемый этим потоком,

$$M_1 = cI_1\Phi_1 \cos \psi_1. \quad (8.7)$$

Этот момент довольно велик, так как для тока небольшой частоты обмотка ротора является почти чисто активным сопротивлением, и поток  $\Phi_1$  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  $\Phi_2$  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  $f_2 = (2 - s)f_1 = (2 - 0,02) \cdot 50 = 99$  Гц). Вращающийся момент, создаваемый обратным потоком,

$$M_2 = cI_2\Phi_2 \cos \psi_2. \quad (8.8)$$

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  $\Phi_2$  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  $90^\circ$  и сдвинутых по фазе на  $\pi/2$ , создавать вращающее магнитное поле.

### 8.8.1. 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  $90^\circ$  (рис. 8.14).

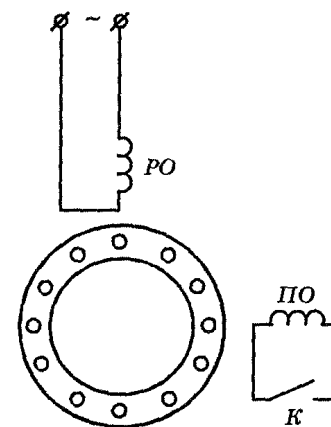


Рис. 8.14

В момент пуска пусковая обмотка замыкается кнопкой  $K$ , 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.

### 8.8.2. Конденсаторные двигатели

В этих двигателях рабочая и пусковая обмотки статора также смещены на статоре друг относительно друга на  $90^\circ$ . На время пуска пусковую обмотку  $ПО$  подключают к сети с помощью кнопки  $K$  через конденсатор  $C$  (рис. 8.15), благодаря которому ток в пусковой обмотке отличается по фазе от тока в рабочей обмотке на  $\pi/2$ , чем и обеспечивается разгон ротора.

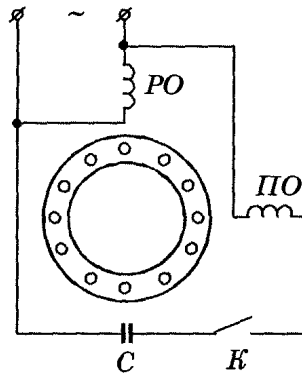


Рис. 8.15

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 (рис. 8.16).

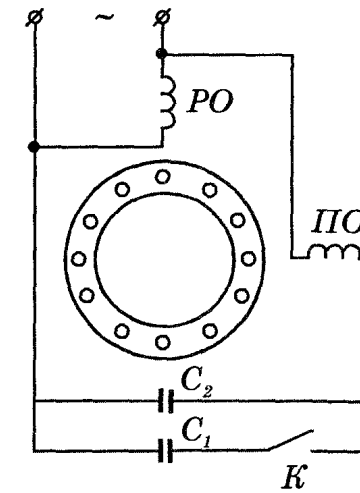


Рис. 8.16

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

### 8.8.3. 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 (рис. 8.17). 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

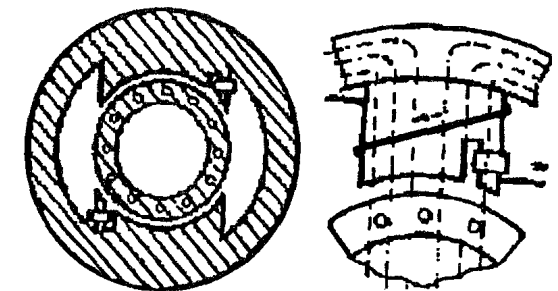


Рис. 8.17

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.).

#### 8.8.4. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть

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

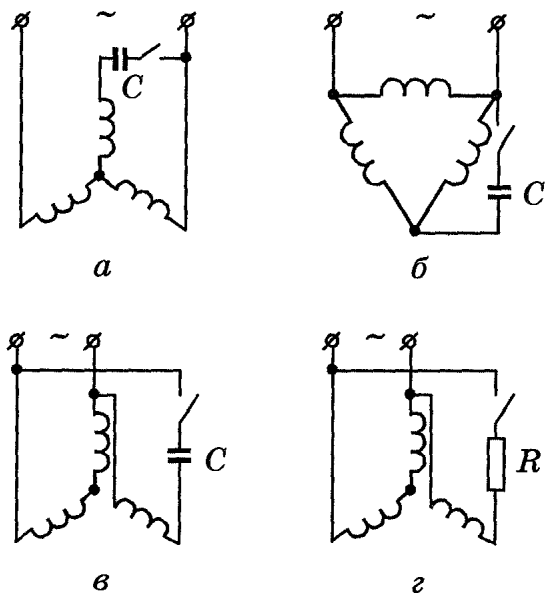


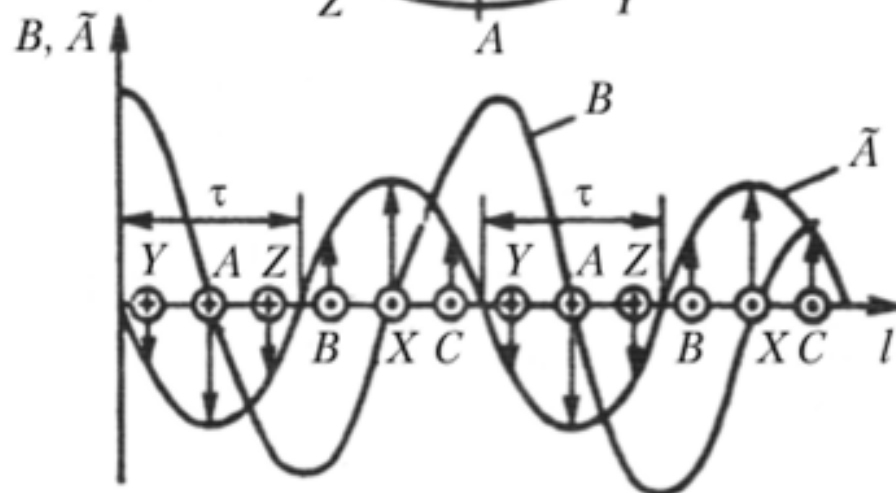
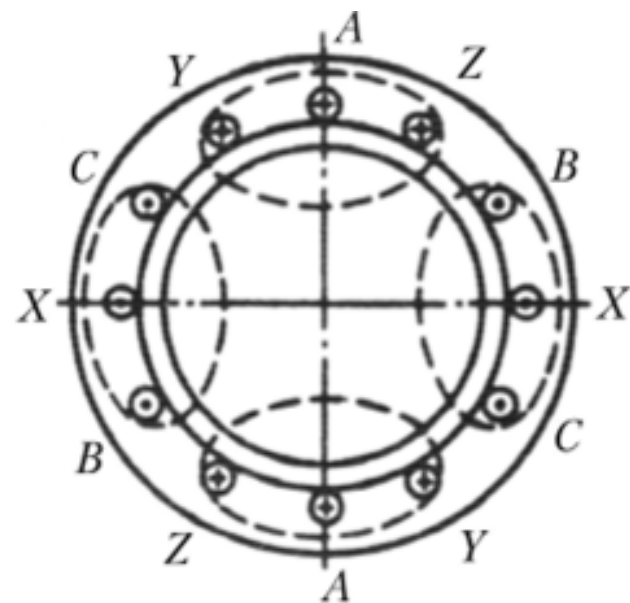
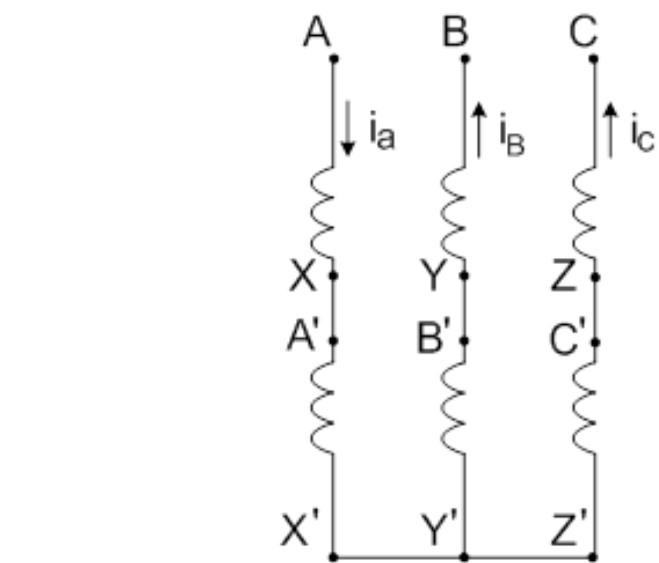
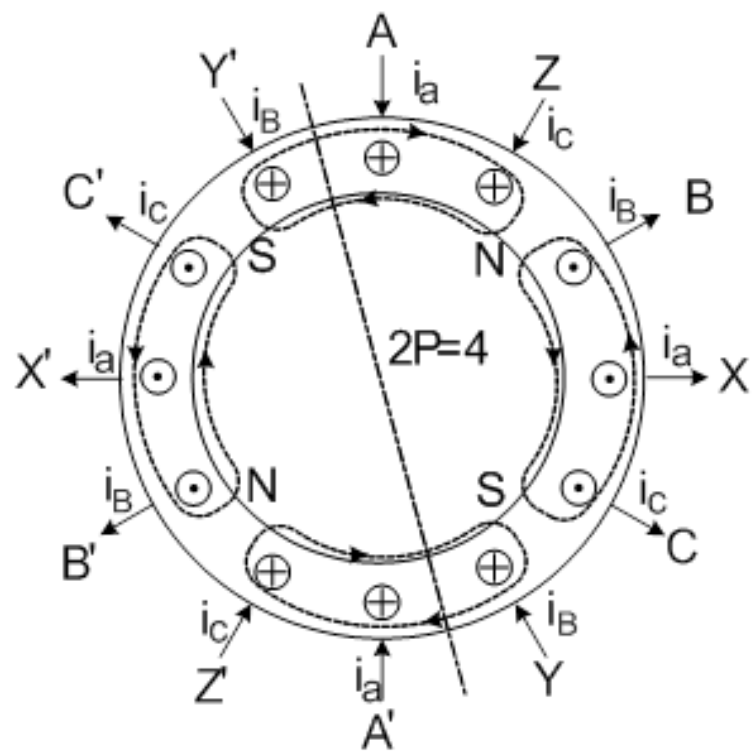
Рис. 8.18

На рис. 8.18, а, б показаны схемы включения трехфазных двигателей, у которых выведены лишь по три конца обмоток. Конденсатор  $C$  создает дополнительный сдвиг по фазе

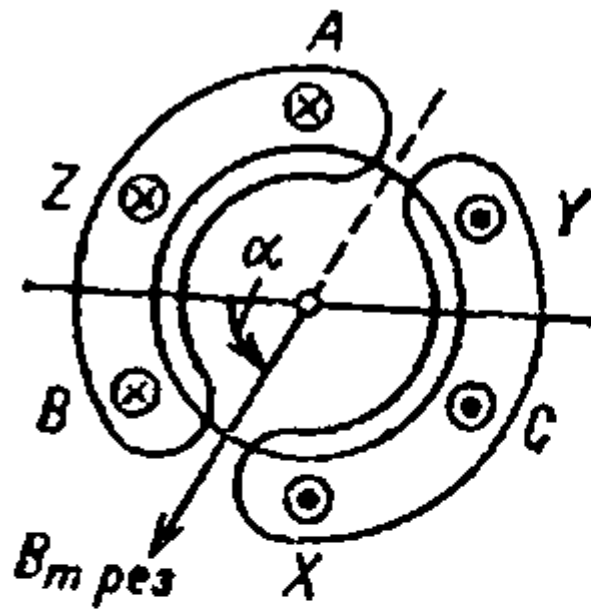
между током и напряжением, обеспечивая начальный пусковой момент. Величина этого конденсатора рассчитывается или подбирается так, чтобы обеспечить примерное равенство всех трех фазных токов. На рис. 8.18 в, г показаны схемы включения трехфазных асинхронных двигателей, у которых выведены все шесть концов статорной обмотки. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть позволяет получать от них лишь 40–50 % от их номинальной мощности в трехфазном режиме.

#### Вопросы для повторения

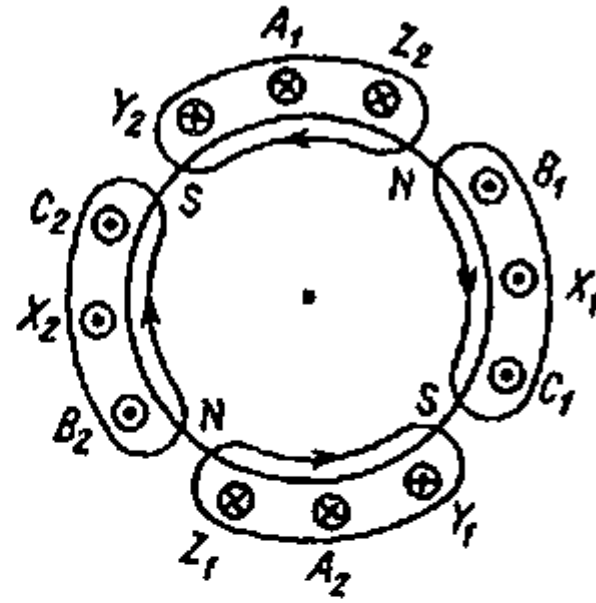
1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каков принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объясните создание вращающегося магнитного поля трехфазной обмоткой машины переменного тока.
4. От чего зависит скорость вращения  $n_1$  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.



2-х полюсное



4-х полюсное



6-ти полюсное

