

## Асинхронные машины

Одним из наиболее распространенных типов электрических машин в мире является асинхронный электродвигатель. За счет высокой надежности и неприхотливости в работе такие агрегаты получили широкое распространение в самых различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, они помогают решать бытовые и общепроизводственные задачи любой сложности. Поэтому в данной статье мы детально рассмотрим особенности асинхронных двигателей.

Преимуществом асинхронного двигателя (АД), прежде всего является его простота. В отличие от двигателей постоянного тока, асинхронный, не имеет коллекторно-щеточного узла, из-за которого образуются дополнительные потери, и снижается надежность двигателя. Еще одним неоспоримым плюсом является низкая цена асинхронных двигателей, что является следствием из простоты его конструкции. Кроме того, для асинхронного двигателя не требуются специальные источники питания и выпрямления, он рассчитан так, чтобы питаться напрямую из сети переменного тока промышленной частоты.

### Достоинства:

1. Простота изготовления.
2. Относительная дешевизна.
3. Высокая надёжность в эксплуатации.
4. Невысокие эксплуатационные затраты.
5. Возможность включения в сеть без каких-либо преобразователей (для нагрузок, не нуждающихся в регулировке скорости).

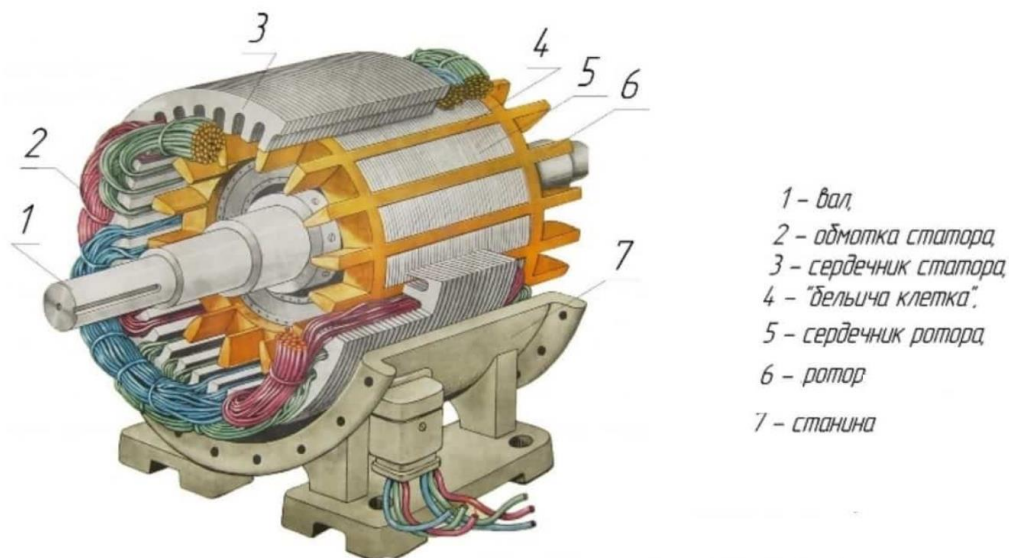
Все вышеперечисленные достоинства являются следствием отсутствия механических коммутаторов в цепи ротора и привели к тому, что большинство электродвигателей, используемых в промышленности — это асинхронные машины с КЗ ротором.

Недостатки асинхронного двигателя обусловлены жесткой характеристикой:

1. Небольшой пусковой момент.
2. Значительный пусковой ток (может достигать 6 номиналов и более).
3. Отсутствие возможности регулирования скорости при подключении непосредственно к сети и ограничение максимальной скорости частотой сети (для АДКЗ, питаемых непосредственно от трёхфазной сети 50 Гц — 3000 об/мин).
4. Сильная зависимость (квадратичная) электромагнитного момента от напряжения питающей сети (при изменении напряжения в 2 раза вращающий момент изменяется в 4 раза; у ДПТ вращающий момент зависит от напряжения питания якоря в первой степени, что более благоприятно).
5. Низкий коэффициент мощности.

Самый совершенный подход к устранению вышеуказанных недостатков — питание двигателя от статического частотного преобразователя.

## Устройство, принцип действия.



Весь двигатель располагается в корпусе *станины* 7, ее основная задача состоит в обеспечении достаточной механической прочности, способной выдерживать достаточные усилия. Поэтому чем выше мощность агрегата, тем большей прочностью должна обладать станина и корпус.

Внутри корпуса устанавливается сердечник *статора* 3, выступающий в роли магнитного проводника для силовых линий рабочего поля. С целью уменьшения потерь в стали магнитопровод выполняется наборным из шихтованных листов, однако в ряде моделей применяется и монолитный вариант.

В пазы сердечника статора укладывается *обмотка* 2, предназначенная для пропуска электрического тока и формирования ЭДС. Число обмоток будет зависеть от количества пар полюсов на каждую фазу. **Также в части уложенных обмоток электродвигатели подразделяются на:**

- трехфазные;
- двухфазные;
- однофазные.

Внутри статора располагается подвижный элемент – *ротор* 6. По конструкции ротор может быть короткозамкнутым или фазным, на рисунке приведен первый вариант. В состав ротора входит *сердечник* 5, также набранный из шихтованной стали и *белочья клетка* 4. Вся конструкция насажена на металлический *вал* 1, передающий вращение и механическое усилие.

**Статор** имеет цилиндрическую форму, и собирается из листов стали. В пазах сердечника статора уложены обмотки статора, которые выполнены из обмоточного провода. Оси обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . В зависимости от подаваемого напряжения концы обмоток соединяются треугольником или звездой.

**Короткозамкнутый ротор** представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий, в результате чего

образуются стержни, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется "беличьей клеткой". В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь. Беличья клетка представляет собой короткозамкнутую обмотку ротора, откуда собственно название.

**Фазный ротор** имеет трёхфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в звезду, а свободные концы подводятся к контактным кольцам. С помощью щёток, которые подключены к кольцам, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора, потому что это способствует уменьшению больших пусковых токов.

Наряду с простыми асинхронными электрическими машинами в промышленности также используются и синхронные агрегаты. **Основным отличием синхронного двигателя является наличие вспомогательной обмотки на роторе, предназначенной для создания постоянного магнитного потока.**

Эта обмотка создает магнитный поток, не зависящий от наличия электродвижущей силы в обмотках статора электродвигателя. Поэтому при возбуждении синхронного электродвигателя его вал начинает вращаться одновременно с полем статора.

В отличие от асинхронного типа, где существует разница в движении, которая физически выражается как скольжение и рассчитывается по формуле:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1$$

где  $s$  – это величина скольжения, измеряемая в процентах,  $n_1$  – частота, с которой вращается поле статора,  $n_2$  – частота, с которой вращается ротор.

Синхронные электродвигатели применяются в тех устройствах, где важно соблюдать высокую точность синхронизации подачи питания и начала движения. Также они обеспечивают сохранение рабочих характеристик в момент пуска.

## **Режимы работы асинхронных двигателей.**

### **1. Холостой ход.**

Если пренебречь трением и магнитными потерями в стали (идеализированная машина), то ротор асинхронного двигателя при холостом ходе вращался бы с синхронной частотой  $n=n_1$  в ту же сторону, что и поле статора; следовательно, скольжение было бы равно нулю.

Однако в реальной машине частота вращения ротора  $n$  при холостом ходе никогда не может стать равной частоте вращения  $n_1$ , так как в этом случае магнитное поле перестанет пересекать проводники обмотки ротора и в них не возникнет электрический ток.

Поэтому двигатель в этом режиме не может развить вращающего момента и ротор его под влиянием противодействующего момента сил трения начнет замедляться. Замедление ротора будет происходить до тех пор, пока вращающий момент, возникший при уменьшенной частоте вращения, не станет равным моменту, создаваемому силами трения. Обычно при холостом ходе двигатель работает со скольжением  $s = 0,2-0,5 \%$ .

При холостом ходе в асинхронном двигателе имеют место те же электромагнитные процессы, что и в трансформаторе (обмотка статора аналогична первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора—вторичной обмотке).

По обмотке статора проходит ток холостого хода  $I_0$ , однако его значение в асинхронном двигателе из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе (20—40 % номинального тока по сравнению с 3—10 % у трансформатора). Для уменьшения тока  $I_0$  в асинхронных двигателях стремятся выполнить минимально возможные по соображениям конструкции и технологии зазоры. Например, у двигателя мощностью 5 кВт зазор между статором и ротором обычно равен 0,2—0,3 мм.

Ток холостого хода, так же как и в трансформаторе, имеет реактивную и активную составляющие. Реактивная составляющая тока холостого хода (намагничивающий ток) обеспечивает создание в двигателе требуемого магнитного потока, а активная составляющая — передачу в обмотку статора из сети энергии, необходимой для компенсации потерь мощности в машине в этом режиме.

### **Нагрузочный режим.**

Чем больше нагрузочный момент на валу, тем больше скольжение и тем меньше частота вращения ротора. Увеличение скольжения при возрастании момента объясняется следующим образом. При увеличении нагрузки на валу ротора он начинает тормозиться и частота его вращения уменьшается.

Но одновременно увеличивается частота  $n_1 - n$  пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора, а следовательно, э. д. с.  $E_2$ , индуцированная в этой обмотке, ток в роторе  $I_2$  и образованный им электромагнитный вращающий момент  $M$ . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока электромагнитный момент двигателя  $M$  не сравняется с нагрузочным моментом  $M_{\text{вн}}$ .

При достижении равенства моментов  $M = M_{\text{вн}}$  торможение прекратится и двигатель будет снова вращаться с постоянной частотой вращения, но меньшей, чем до увеличения нагрузки. При уменьшении нагрузочного момента  $M_{\text{вн}}$  частота вращения ротора по той же причине будет увеличиваться. Обычно при номинальной нагрузке скольжение для двигателей средней и большой мощности составляет 2—4 %, а для двигателей малой мощности от 5 до 7,5 %.

При работе двигателя под нагрузкой по обмоткам его статора и ротора проходят токи  $i_1$  и  $i_2$ . Частота тока в обмотках статора  $f_1$  и ротора  $f_2$  определяется частотой пересечения вращающимся магнитным полем проводников соответствующей обмотки. Обмотка статора пересекается магнитным полем с частотой  $n_1$ , а обмотка вращающегося ротора — с частотой  $n_1 - n$ . Следовательно,

$$f_2/f_1 = (n_1 - n)/n_1 = s \text{ или } f_2 = f_1 s \quad (83)$$

Передача электрической энергии из статора в ротор происходит так же, как и в трансформаторе. Двигатель потребляет из сети электрическую мощность  $P_{\text{эл}} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$  и отдает приводимому им во вращение механизму механическую мощность  $P_{\text{мх}}$  (рис. 260).

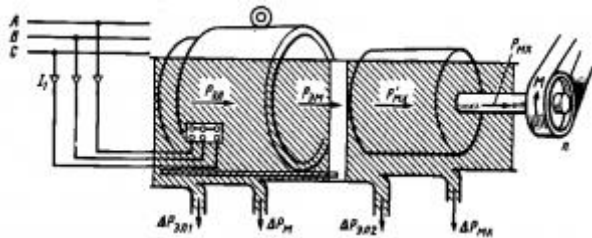


Рис. 260. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

В процессе преобразования энергии в машине имеют место потери мощности: электрические в обмотках статора  $\Delta P_{эл1}$  и ротора  $\Delta P_{эл2}$ , магнитные  $\Delta P_m$  от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных частях машины и механические  $\Delta P_{мх}$  от трения в подшипниках и вращающихся частей о воздух.

Из статора в ротор вращающимся электромагнитным полем передается электромагнитная мощность  $P_{эм}$  роторе она превращается в механическую мощность ротора  $P'_{мх}$ . Полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_{мх}$  меньше мощности  $P'_{мх}$  на значение потерь мощности на трение  $P_{мх}$ .

При возрастании механической нагрузки на валу двигателя увеличивается ток  $I_2$ . В соответствии с этим возрастает и ток  $I_1$  в обмотке статора.

Электромагнитный момент  $M$  создается в асинхронном двигателе в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с током  $I_2$ , индуцируемым им в проводниках обмотки статора. Однако в создании его участвует не весь ток  $I_2$ , а только его активная составляющая  $I_2 \cos \varphi_2$  (здесь  $\varphi_2$  — угол сдвига фаз между током  $I_2$  и э. д. с.  $E_2$  в обмотке ротора).

Поэтому

$$M = c_m \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (84)$$

где

$\Phi_m$  — амплитуда магнитного потока, созданного обмоткой статора;

$c_m$  — постоянная, определяемая конструктивными параметрами данной машины и не зависящая от режима ее работы.

Поясним физический смысл формулы (84). На рис. 261 изображен ротор двухполюсного асинхронного двигателя в развернутом виде, на котором кружками показаны поперечные сечения проводников.

Крестики и точки внутри проводников обозначают направление в них тока  $i_2$ , а под проводниками — направление индуцированных э. д. с.  $e_2$ , которые пропорциональны индукции  $B$  в данной точке воздушного зазора между статором и ротором. Кривая  $B$  показывает распределение вдоль окружности ротора индукции, создаваемой вращающимся магнитным полем, кривая  $i_2$  — распределение тока в проводниках, а кривая  $f$  — распределение электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия тока ( $a$  с вращающимся магнитным полем).

Электромагнитный вращающий момент  $M$ , создаваемый в результате совместного действия всех сил  $f$ , будет пропорционален среднему значению электромагнитной силы  $f_{ср}$ . Легко заметить, что к проводникам, лежащим на дуге, равной  $180^\circ$  —  $\varphi_2$ , приложены силы  $f$ , увлекающие ротор за вращающимся магнитным

полем, а на дуге  $\varphi_2$  — тормозящие силы. Поэтому при неизменном токе  $I_2$  среднее значение электромагнитной силы  $f_{cp}$ , а следовательно, и электромагнитный момент  $M$  будут тем больше, чем меньше угол  $\varphi_2$ . Электромагнитный момент  $M$  зависит от скольжения  $s$ .

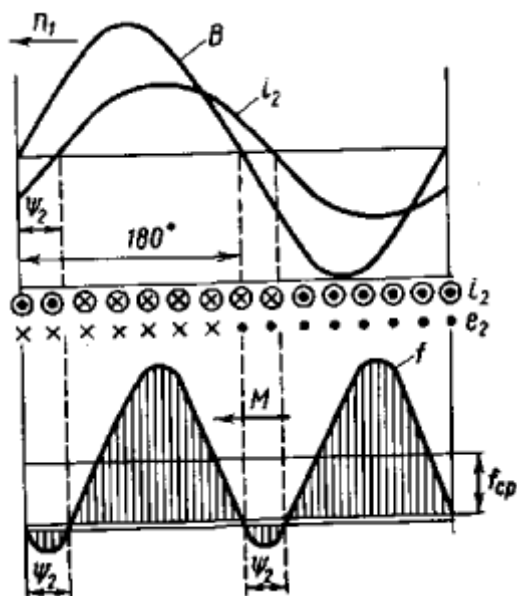


Рис. 261. Распределение индукции  $B$ , тока  $i_2$  и электромагнитных сил  $f$ , действующих на проводники асинхронного двигателя

Так, при увеличении скольжения возрастает э. д. с.  $E_2$  в обмотке ротора и ток  $I_2$ . Однако одновременно уменьшается  $\cos\varphi_2$ , так как активное сопротивление обмотки ротора  $R_2$  остается неизменным, а реактивное  $X_2$  увеличивается (возрастает частота тока  $f_2$  в обмотке ротора).

При  $s < 10-20\%$  увеличение скольжения приводит к незначительному уменьшению  $\cos\varphi_2$ , вследствие чего активная составляющая тока в обмотке ротора  $I_2\cos\varphi_2$  и электромагнитный момент  $M$  возрастают.

При некотором *критическом* скольжении  $s_{кр}$  двигатель развивает наибольший момент  $M_{max}$ , который определяет его перегрузочную способность. При дальнейшем увеличении скольжения (большем  $s_{кр}$ ) происходит резкое уменьшение  $\cos\varphi_2$ , поэтому активная составляющая тока  $I_2\cos\varphi_2$  и электромагнитный момент  $M$  уменьшаются.

Номинальный вращающий момент  $M_{ном}$  двигателя средней и большой мощности развивают при скольжении  $S_{ном} = 2-4\%$ .

Согласно государственным стандартам на асинхронные двигатели отношение  $M_{max}/M_{ном} = 1,8-2,5$ . Критическое скольжение  $s_{кр}$  для мощных двигателей составляет 5—10%, для двигателей средней и малой мощности — от 10 до 20 %.

Асинхронный двигатель, как и любая электрическая машина, может работать в генераторном режиме, создавая тормозной момент. Этот режим используется для электрического торможения приводов.

### Режим пуска.

В начальный момент пуска ротор двигателя неподвижен: скольжение  $s=1$ , магнитное поле пересекает ротор с максимальной частотой, индуцируя в нем наибольшую э. д. с.  $E_2$ . Так как ток в роторе  $I_2$  определяется значением э. д. с.  $E_2$ , то в начальный момент пуска он будет наибольшим. Наибольшим будет и ток в статоре.

Обычно пусковой ток двигателя в 5—7 раз больше номинального. Вращающий момент  $M_{п}$  при пуске называется *пусковым*. Он обычно меньше наибольшего момента, который может развить двигатель. Для двигателей различных типов и мощностей отношение  $M_{п}/M_{ном} = 0,7 - 1,8$ .

## Способы пуска АД

### Прямой пуск.

На судах самым распространенным способом пуска АД является прямой пуск. При малом моменте сопротивления и малой инерционности исполнительного механизма скорость АД при прямом пуске быстро возрастает, и ток падает до установившихся значений. В этих условиях большой пусковой ток не представляет опасности для АД, так как при малой длительности пуска (менее одной секунды) и редких пусках он не вызывает перегрева обмоток.

В то же время прямой пуск АД не применяется в электроприводах с частыми пусками и в установках с редкими, но тяжелыми условиями пуска. В этих случаях требуется применение специальных средств увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока.

### Пуск переключением со звезды на треугольник.

Улучшение условий пуска возможно либо изменением сопротивления в цепи обмотки ротора, либо уменьшением фазного напряжения. Одним из вариантов второго способа является пуск переключением со «звезды» на «треугольник», сущность которого заключается в следующем.

В момент пуска статорную обмотку двигателя, используемую в нормальном режиме работы по схеме «треугольник», включают с помощью переключателя на «звезду», а затем, когда ротор разгонится до некоторой скорости, переключают на «треугольник».

Сравнивая этот способ с прямым пуском по схеме «треугольник», можно видеть, что он дает меньшие броски тока. Действительно, если  $U_{л}$  – линейное напряжение сети, а  $Z_{к}$  – полное сопротивление фазы обмотки двигателя, то при пуске «звездой» напряжение на зажимах фазы и пусковой линейный ток равны

$$U_{фY} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{лY} = I_{фY} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_{ф}}$$

При пуске «треугольником» справедливы соотношения

$$U_{ф\Delta} = U_{л}$$

$$I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{ф\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_{л}}{Z_{ф}}$$

Отсюда видно, что

$$I_{лY} = \frac{I_{л\Delta}}{3}$$

т.е. пусковой ток при пуске по схеме «звезда» уменьшается в три раза.

С другой стороны, поскольку пусковой момент  $M_{п}$  пропорционален квадрату фазного напряжения, то для моментов можно записать

$$M_{нY} = kU_{фY}^2 = k\frac{U_{л}^2}{3}; \quad M_{н\Delta} = kU_{ф\Delta}^2 = kU_{л}^2,$$

Где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

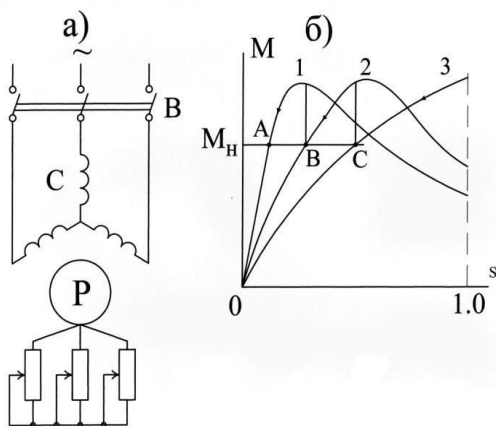
Отсюда очевидно соотношение

$$M_{нY} = \frac{M_{н\Delta}}{3}$$

т.е. вращающий момент при пуске по схеме «звезда» также уменьшается в три раза по сравнению с пусковым моментом по схеме «треугольник».

Таким образом, при пуске по схеме «звезда» – «треугольник» за счет снижения подводимого к фазе обмотки статора напряжения уменьшается не только пусковой ток, но и пусковой момент. Это является серьезным недостатком данного способа, который, как и другие способы с понижением подводимого напряжения, применяют лишь при пуске двигателей с небольшим моментом сопротивления на валу.

### Пуск АД с фазным ротором.



Двигатели с фазным ротором применяются в тех случаях, когда требуется высокий пусковой момент при малом пусковом токе. Этот эффект в двигателе с фазным ротором достигается путем включения в цепь ротора добавочного активного сопротивления (реостата).

Схема включения в цепь ротора пусковых реостатов показана на рисунке 6.15(а). Семейство механических характеристик АД при различных сопротивлениях ротора и при  $M_c = M_n = \text{const}$  представлены на рисунке 6.15(б).

### Регулирование скорости вращения судовых АД

В отношении регулировочных характеристик АД уступают двигателям постоянного тока в том большей степени, чем шире требуемые пределы и чем больше должна быть плавность регулирования скорости.

Скорость вращения ротора АД равна

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

Таким образом, чтобы изменить скорость АД необходимо изменить либо скольжение  $s$ , либо скорость вращения поля статора  $n_1$ .



Скольжение  $s$  можно изменить путем введения в цепь ротора добавочных сопротивлений или изменением подводимого напряжения.

Скорость вращения поля статора определяется частотой сети  $f_1$  и числом пар полюсов  $p$ ; изменение этих параметров приводит к изменению синхронной скорости поля  $n_1$ , а следовательно, и скорости  $n_2$ .

При выборе того или иного способа регулирования скорости принимают во внимание такие показатели как плавность, диапазон регулирования, простота и надежность регулирующей аппаратуры, экономичность регулирования и изменение перегрузочной способности.

Понятно, что во всех случаях наиболее предпочтительным способом регулирования АД будет более простой и экономичный, обеспечивающий необходимый диапазон регулирования.

Рассмотрим возможности регулирования скорости АД различными способами.

### **1. Регулирование изменением подводимого напряжения**

Изменение подводимого к двигателю напряжения может осуществляться различными способами: применением источника с регулируемым напряжением, включением в цепь статора дросселя насыщения, регулируемого автотрансформатора или тиристорных коммутаторов.

Данный способ регулирования не является экономичным, т.к. при увеличении скольжения  $s$  увеличиваются потери в роторе  $\Delta P_{эл2}$  и его нагрев, и в настоящее время применяется редко, в основном в случаях, когда вопрос экономичности является второстепенным.

### **2. Регулирование изменением активного сопротивления цепи ротора**

Этот способ регулирования возможен только в двигателях с фазным ротором.

Схема регулирования ничем не отличается от схемы пуска АД с фазным ротором, однако регулировочные реостаты должны быть рассчитаны на длительную работу.

Указанным способом можно регулировать скорость АД в широких пределах, а плавность регулирования скорости будет зависеть от числа ступеней регулировочного реостата.

В то же время этот способ регулирования является очень неэкономичным, так как связан с большими потерями энергии в регулировочном реостате. КПД двигателя при регулировании тем меньше, чем меньшая скорость вращения ротора достигается в результате регулирования.

Несмотря на неэкономичность данного способа регулирования, он находит применение на практике. Его положительным качеством является то, что потери скольжения выделяются в сопротивлении регулировочного реостата и не приводят к повышенному нагреву ротора.

### **3. Регулирование изменением частоты питающей сети**

Этот способ регулирования скорости возможен только при питании АД от специальных установок, как правило, статических преобразователей частоты.

К недостаткам частотного регулирования следует отнести большие габариты и высокую стоимость питающей установки, отрицательное влияние преобразователей частоты на судовую сеть, что выражается в искажении формы кривой напряжения сети, высокий уровень собственных шумов. К достоинствам относится плавное, в широких пределах регулирование скорости АД. В настоящее время в связи с совершенствованием статических преобразователей частоты на тиристорах этот способ регулирования скорости АД становится весьма перспективным.

#### **4. Регулирование изменением числа пар полюсов**

АД, в которых предусмотрена возможность изменять число пар полюсов  $p_1$  называются **полюсопереключаемыми** или **многоскоростными**.

Обычно они выпускаются на 2, 3 или на 4 скорости вращения.

Вес и стоимость многоскоростных АД несколько больше, чем односкоростных той же мощности и допускают они только ступенчатое изменение скорости. Тем не менее это широко применяемый способ регулирования скорости короткозамкнутых АД в том числе и в судовых условиях.

### **Проблемные режимы работы АД**

К проблемным режимам работы АД относятся пуск, обрыв фазы, реверс АД и работа с «вывернутой фазой».

#### **Проблемы пуска АД**

Пусковые свойства асинхронного двигателя определяются зависимостями вращающего момента и тока от частоты вращения.

Эти зависимости определяют и другие показатели - длительность пуска, потери энергии в обмотках и их нагрев. Для уменьшения времени пуска, потерь энергии в обмотках двигателя и их нагрева стремятся к увеличению пускового момента и снижению пускового тока.

Величина пускового тока не должна быть выше определённых для данной сети значений, большой ток при пуске мощных асинхронных двигателей может вызвать значительные провалы напряжения судовой сети, а это отрицательно сказывается как на условиях пуска самого двигателя, так и на устойчивости работы других потребителей, подключённых к судовой сети. В некоторых неблагоприятных условиях, особенно при пуске от стояночного генератора соизмеримой мощности, из-за значительного снижения напряжения запуск двигателя может оказаться вообще невозможным.

Большие пусковые токи могут создавать опасные электродинамические усилия в лобовых частях обмотки статора и стержнях беличьей клетки; электромагнитные переходные моменты, возникающие при переходных процессах, достигают при пуске 10...15-ти кратного значения статического начального пускового момента, что наряду с большими температурными напряжениями ограничивает срок службы асинхронных двигателей и может привести к перегоранию обмоток статора или выплавлению клетки ротора.

В первый момент пуска, когда  $n = 0$  и  $s = 1$ , в обмотке ротора вследствие большой частоты ( $f_2 = f_1$ ) индуцируется ЭДС такой величины, что пусковой ток в 5...7 раз

больше номинального значения. Однако коэффициент мощности цепи ротора при пуске мал и поэтому пусковой вращающий момент АД не превышает, как правило,  $0,9 \dots 1,2$  от номинального.

Статический вращающий момент АД, принимаемый в расчетах, во всех случаях пропорционален квадрату напряжения, что приводит к закономерному существенному снижению момента и затрудняет пуск АД отдельных судовых электроприводов со значительным маховым моментом, или большим моментом сопротивления исполнительного механизма.

Реальный вращающий момент АД в переходных режимах имеет знакопеременный характер, что приводит к дополнительным потерям энергии, повышает нагрев и затрудняет пусковую операцию. В практике эксплуатации судовых ЭП имели место случаи массового выхода из строя АД грузоподъемных и якорно-швартовых механизмов, пожарных насосов, компрессоров и др.

### **Обрыв фазы**

В процессе эксплуатации асинхронных двигателей довольно часто возникают аварийные ситуации, связанные с обрывом цепи одной из фаз обмотки статора.

Когда такой обрыв происходит у работающего двигателя, то он будет продолжать работать, но уже в режиме однофазного асинхронного двигателя. В действии вместо трех фаз останется только две, поэтому сохранение развиваемой мощности двигателя возможно лишь за счет увеличения скольжения и тока в оставшихся двух фазах. Если до обрыва цепи одной фазы нагрузка была номинальной, то после обрыва оставшиеся фазы окажутся перегруженными по току и двигатель может выйти из строя из-за перегрева обмотки статора.

Если обрыв цепи фазы или обрыв линейного провода произошел до того, как двигатель был включен в работу, то пуск его в большинстве случаев невозможен, поскольку оставшиеся фазы создают не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле и пусковой момент равен нулю.

Исключение составляет случай, когда обрыв происходит в цепи одной из фаз обмотки статора, соединенной в «треугольник». Двигатель при этом становится не однофазным, а двухфазным со сдвигом фаз обмотки статора и их м.д.с. под углом  $120^{\circ}$ . В таком двигателе обмотка статора создает не пульсирующее, а вращающееся эллиптическое магнитное поле. Если момент сопротивления на валу не велик, то двигатель можно запустить, но он будет работать с повышенным шумом, при большом скольжении с вероятностью быстрого перегрева и опасностью выхода из строя.

### **Реверс двигателя и работа при «вывернутой» фазе**

Реверс асинхронного двигателя осуществляется изменением направления вращения поля статора.

Это достигается изменением порядка чередования фаз обмотки статора, для чего необходимо поменять местами любые две фазы из трех, подводящих питание к статорной обмотке.

Однако следует иметь в виду, что реверс при номинальной скорости является тяжелым переходным режимом, который сопровождается большими бросками тока и резкими механическими колебаниями. Поэтому при изменении направления вращения

двигателя необходимо сначала его остановить, затем изменить чередование фаз, после чего осуществить пуск.

На практике при сборке схемы двигателя может быть допущена ошибка в определении начала и конца одной из фаз обмотки статора, и она будет присоединена к остальным фазам неправильно, то есть окажется «вывернутой» по отношению к двум другим фазам. Наличие такой «вывернутой» фазы представляет собой одну из серьезных неисправностей в работе машины. М.д.с. фаз при этом окажутся под углом  $60^\circ$  друг к другу, а не  $120^\circ$ , как должно быть, и будут создавать не круговое, а резко выраженное эллиптическое поле, в котором преобладают высшие гармонические составляющие. Вследствие этого механическая характеристика двигателя будет искажена, при пуске двигатель не сможет достигнуть номинальной скорости, а его работа будет сопровождаться сильным гудением, вибрацией и быстрым нагревом всех частей даже при малой нагрузке

### **Тормозные режимы АД**

Асинхронный двигатель может работать в следующих тормозных режимах:

- 1) генераторное торможение;
- 2) торможение противовключением;
- 3) динамическое торможение;
- 4) конденсаторное торможение

Все перечисленные способы применимы принципиально как к двигателю с фазным ротором, так и короткозамкнутым ротором.

### **Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть**

Как все электрические машины, асинхронная машина, обратима.

Если к валу асинхронной машины приложен тормозной статический момент, то она, преодолевая внешний момент, работает как двигатель и потребляет мощность из сети.

Рассмотрим работу двигателя при скорости выше синхронной. В этом случае ротор будет вращаться со скоростью большей, чем скорость магнитного поля. Это приводит к изменению направления пересечения обмоток ротора магнитными силовыми линиями поля статора (в двигательном режиме ротор отставал от поля статора). Следовательно, изменится направление ЭДС, наводимой в статоре, и направление статорного тока, т.е. теперь энергия будет отдаваться в сеть.

Торможение с рекуперацией энергии в сеть используется в подъемно-транспортных устройствах при спуске тяжелых грузов, в приводах металлорежущих станков при переключении скоростей двигателя, в электромобилях и электропоездах.

### **Торможение противовключением асинхронного двигателя**

Этот способ применим только для машин с фазным ротором.

Торможение противовключением – это такой режим работы электродвигателя, при котором происходит вращения электродвигателя рабочим органом в сторону, противоположную направлению момента асинхронной машины (ротор вращается в направлении обратном вращению поля магнитного статора).

При остановке ротора машины ток в нем будет достигать 5-6 кратных значений. В режиме противовключения, когда  $s > 1$ , роторный ток будет еще больше, а момент машины, в следствии большого роторного тока и, как следствие увеличения его реактивной составляющей, будет мал.

Для повышения момента в цепь ротора включают активное сопротивление большого значения. Таким образом, осуществляют торможение на прямолинейном участке характеристики, крутизну которого будет определять активное роторное сопротивление.

Огромным недостатком таких характеристик есть их довольно большая крутизна, трудность получения малых скоростей при опускании груза, а также возможны довольно значительные колебания скорости при опускании груза даже при незначительном изменении его веса. Но, несмотря на эти недостатки в практике все еще довольно часто можно встретить торможение противовключением в электроприводах подъемно-транспортных механизмов.

Также необходимо учесть и то, что для устранения возможного самопроизвольного реверса рабочей машины при достижении малой скорости (близкой к нулю), электродвигатель необходимо отключить от сети.

### **Динамическое торможение**

Еще одним видом торможения асинхронного электродвигателя, применимого как для машин с короткозамкнутым ротором, так и с фазным, является динамическое торможение.

Динамическое торможение довольно распространено в системах электроприводов, так как не требует большой сложности схемы, имеет устойчивые характеристики в отличии от конденсаторного торможения и торможения противовключением.

Принцип работы динамического торможения довольно прост – двигатель отключается от сети с помощью контактора КМ1 и с помощью контактора КМ2 подключают к двум фазам электродвигателя постоянный ток, в нашем случае полученный с выпрямителя. Постоянный ток, который начнет протекать по двум обмоткам статора, создаст постоянное магнитное поле. При вращении ротора асинхронной машины в этом постоянном магнитном поле в обмотках роторных индуктируется ЭДС, которая в свою очередь приведет к появлению в роторе тока. При взаимодействии тока ротора с магнитным полем статора возникает тормозной момент.

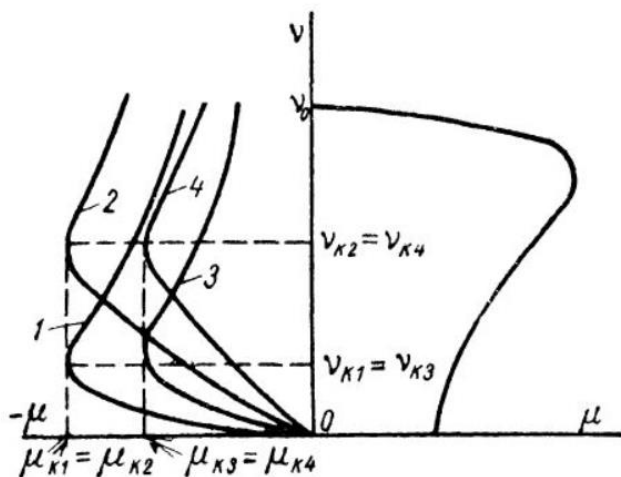
В таком режиме работы асинхронный электродвигатель будет представлять собой обычный синхронный генератор с неявно выраженными полюсами и работающим с переменной частотой. Нагрузкой этого генератора будет сопротивление включенное в роторную цепь, или же при использовании асинхронной машины с короткозамкнутым ротором – его обмотка. При торможении будет снижаться скорость асинхронного электродвигателя, и соответственно начнет снижаться ЭДС ротора, его ток и тормозной момент.

При выборе источника постоянного напряжения для выполнения динамического замедления асинхронной машины необходимо учитывать то, что при подаче на статорные обмотки постоянного напряжения изменится сопротивление обмоток, а именно, исчезнет индуктивное сопротивление. Именно поэтому, при выборе

устройства динамического торможения необходим перерасчет напряжения (постоянное будет значительно меньше переменного), чтобы не «спалить» обмотку двигателя.

В качестве такого источника могут использовать обычные диодные выпрямители неуправляемые подключенные через трансформатор, тиристорные преобразователи или же для машин больших мощностей специальные генераторы постоянного тока с пониженным выходным напряжением.

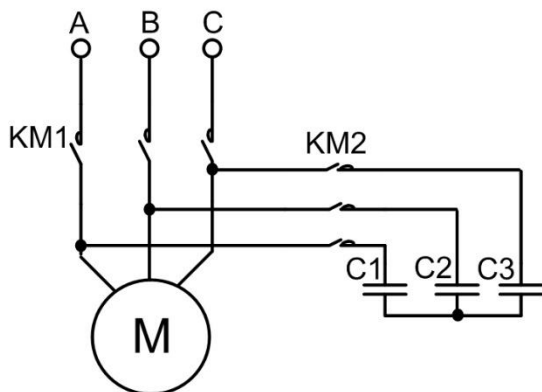
Характеристика динамического торможения при различных роторных сопротивлениях и разных значениях статорных токов:



На графике кривые 1 и 3 сняты при постоянном сопротивлении роторной цепи и изменении постоянного напряжения статора, а 2 и 4 – при неизменном напряжении статора и меняющемся сопротивлении ротора.

### Конденсаторное торможение или торможение самовозбуждением асинхронного электродвигателя

Еще одним вариантом торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором является торможение самовозбуждением или, как его еще называют, конденсаторное торможение. Для выполнения такого режима торможения параллельно к обмоткам асинхронной машины подключают конденсаторы.



Где: C1, C2, C3 – тормозные конденсаторы соединенные в звезду;

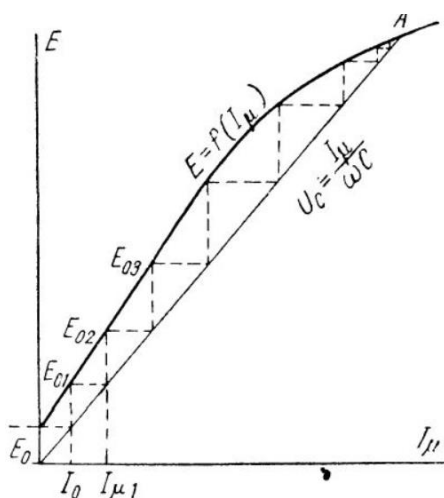
КМ1 – контактор, подключающий двигатель к сети;

КМ2 – контактор для подключения тормозных конденсаторов..

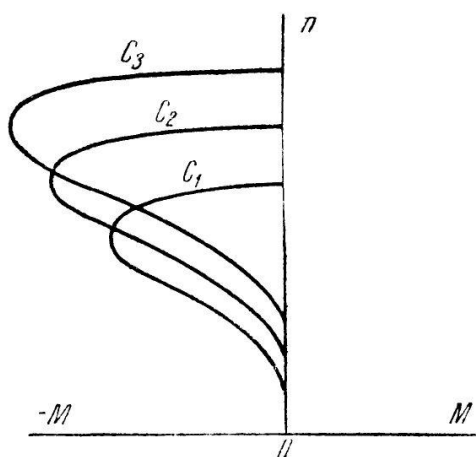
Как работает данная схема.

При замкнутом контакторе КМ1 и разомкнутом КМ2 асинхронная машина работает в двигательном режиме. При необходимости осуществить торможения контактор КМ1 отключается от сети, а контактор КМ2 замыкается, подключая таким образом тормозные конденсаторы. Машина начинает работать как самовозбужденный асинхронный генератор.

Толчком к самовозбуждению будет ЭДС, индуцируемая в статорной обмотке вращающимся ротором за счет остаточного намагничивания. ЭДС, возникшее от остаточного намагничивания  $E_0$ , приложится к конденсаторам, что вызовет протекание емкостного тока через обмотки статора  $I_0$ . Ток  $I_0$ , возникший в обмотках статора, создаст в генераторе вращающееся магнитное поле, которое, в свою очередь, увеличит ЭДС и напряжение на зажимах статора. Напряжение на конденсаторах увеличится до  $E_{01}$ . Следствием чего станет увеличение тока конденсатора до величины  $I_{01}$ , а дальнейшее увеличение напряжения генератора до величины  $E_{02}$  вызовет очередное увеличение тока и так далее.



Механические характеристики асинхронного электродвигателя при торможении самовозбуждением при различных значениях тормозных емкостей  $C_1 > C_2 > C_3$  будут иметь вид:



При уменьшении тормозной емкости максимум тормозного момента переместится в область более высоких скоростей вращения ротора.

Главным недостатком такого способа торможения, пожалуй, будет то, что тормозной момент может возникнуть только при скорости выше  $(1/3 - 1/2)n_0$  (скорости холостого хода). Также возникает срыв тормозного момента при скоростях

превышающих  $n_{кр}$ , а также необходимость большой емкости для торможения на малых скоростях.

К преимуществам можно отнести то, что для реализации данного вида торможения не нужен внешний источник питания для электродвигателя.