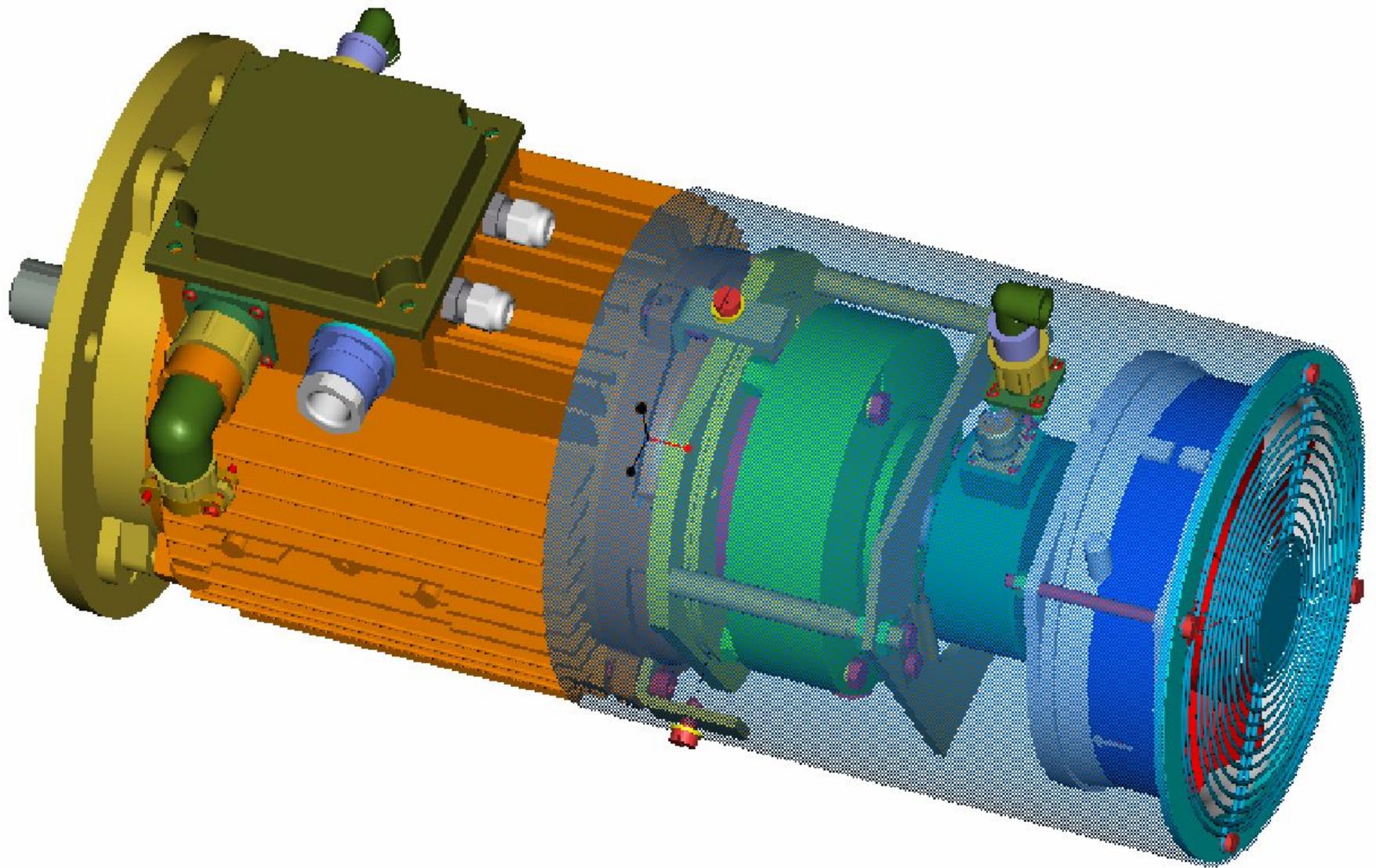
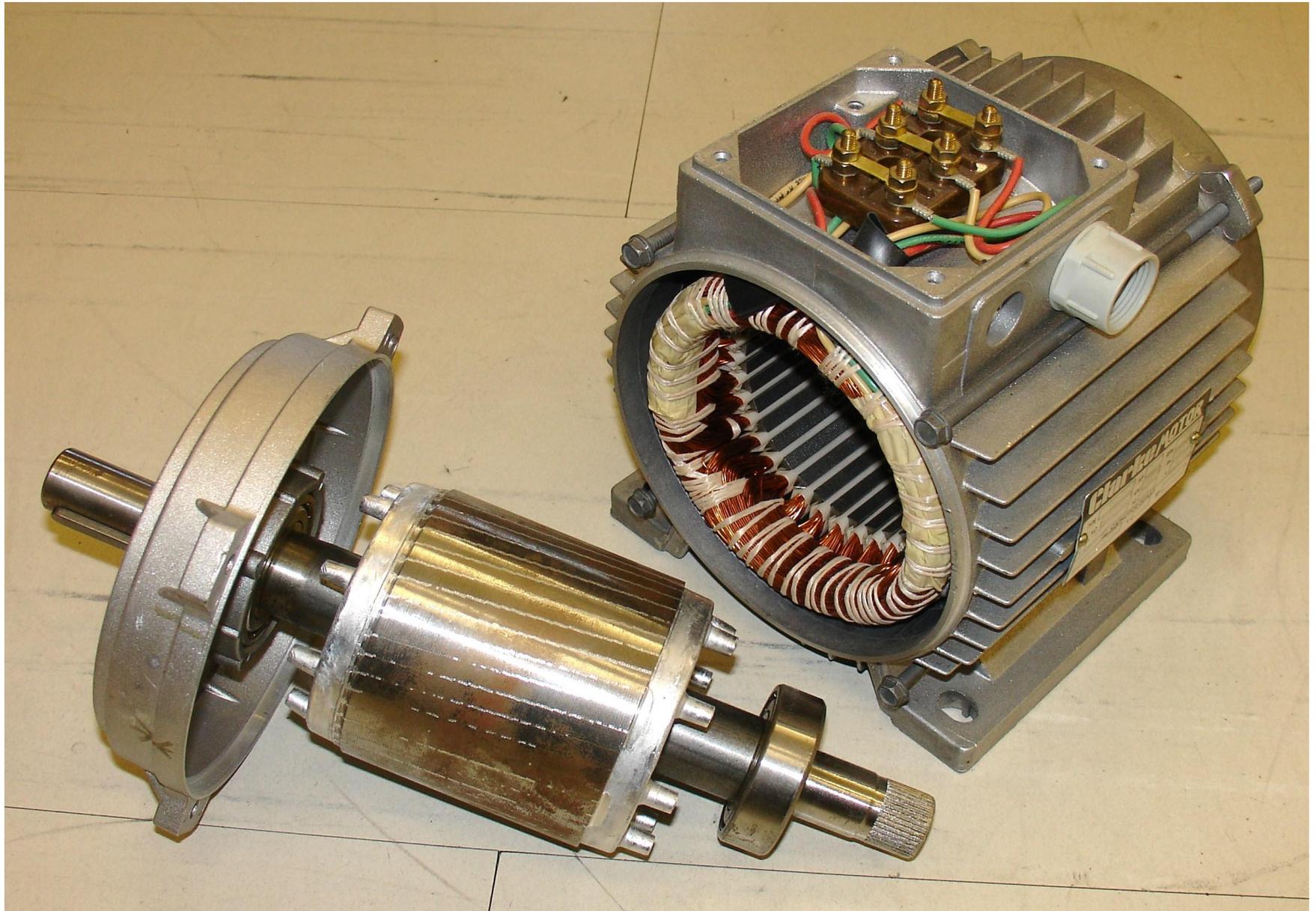




АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ



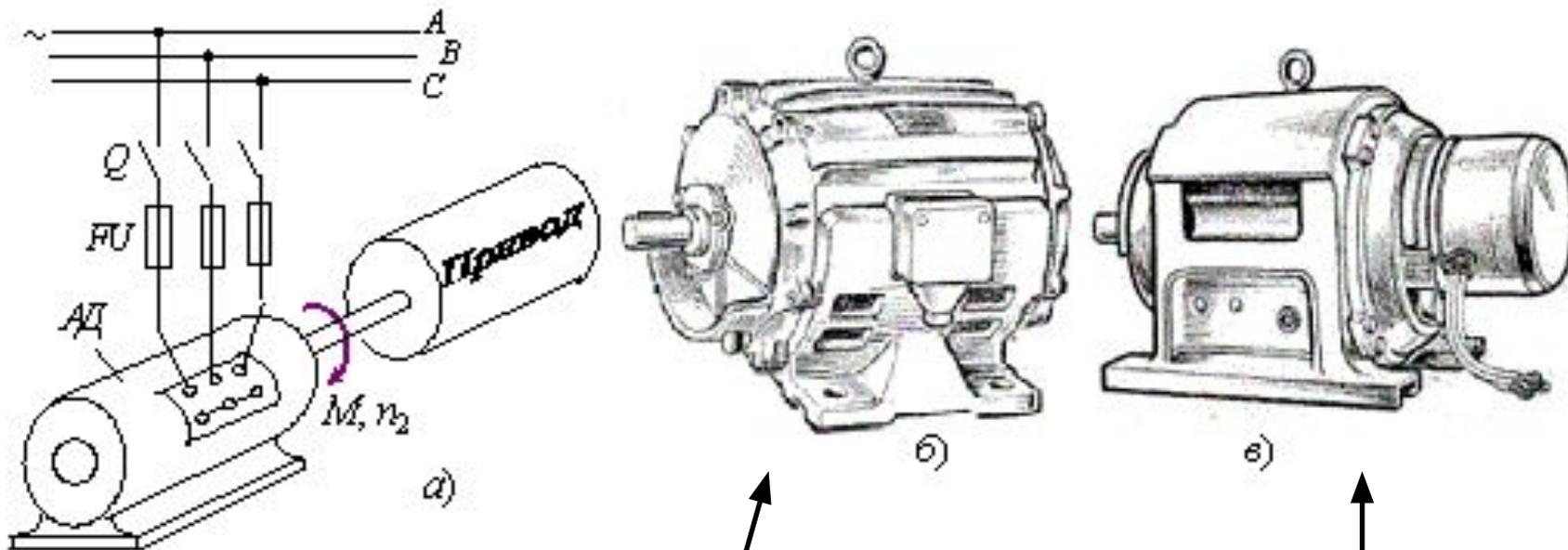


Назначение и области применения асинхронных двигателей

Основное применение асинхронные машины находят в качестве двигателей. Асинхронные двигатели (АД) преобразуют электрическую энергию в механическую и являются потребителями электрической энергии.

Первый асинхронный двигатель был сконструирован в 1889 г. русским инженером М. О. Доливо-Добровольским.

Наибольшее распространение в промышленности получили **трехфазные асинхронные двигатели** с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Это объясняется тем, что они просты по конструкции, дешевы, надежны в работе, имеют высокий КПД при номинальной нагрузке, выдерживают значительные перегрузки, не требуют сложных пусковых приспособлений.



АД с короткозамкнутым ротором

АД с фазным ротором

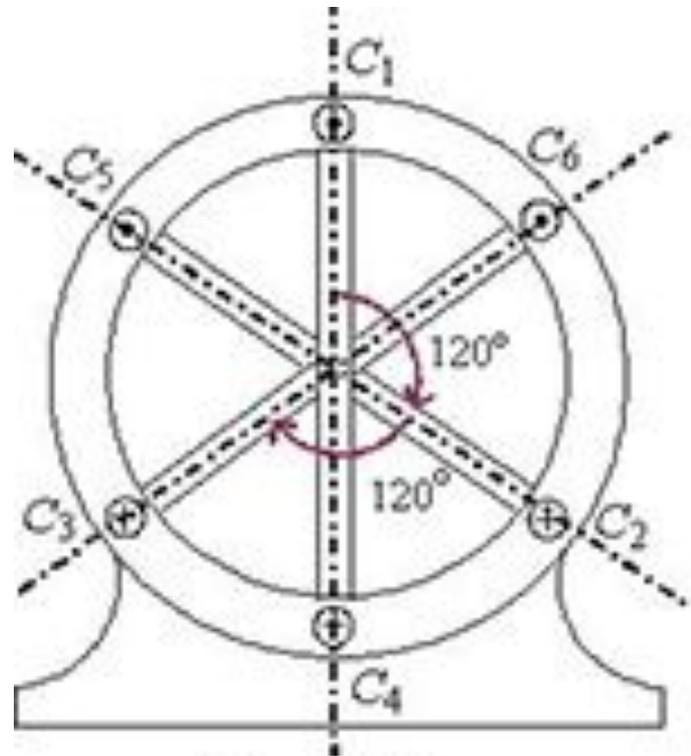
Наряду с преимуществами АД имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$) при неполной нагрузке (при холостом ходе $\cos\varphi = 0,2 \dots 0,3$);
- большой пусковой ток;
- низкий КПД при малых нагрузках;
- относительная сложность и неэкономичность регулирования их эксплуатационных характеристик, и в первую очередь механических характеристик.

Устройство статора асинхронных двигателей

Основными частями асинхронного двигателя являются статор и ротор, отделенные друг от друга воздушным зазором (0,3...0,5 мм). Их сердечники набраны из листов электротехнической стали. На внутренней части поверхности статора и на внешней ротора выштампованы пазы, в которые уложены обмотки. Сердечник статора помещен в корпус, который является внешней частью двигателя. Сердечник ротора укреплен непосредственно на валу двигателя или на ступице, надетой на вал.

Обмотка статора обычно выполняется **трёхфазной**, состоящей из трёх самостоятельных обмоток, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на 120° .



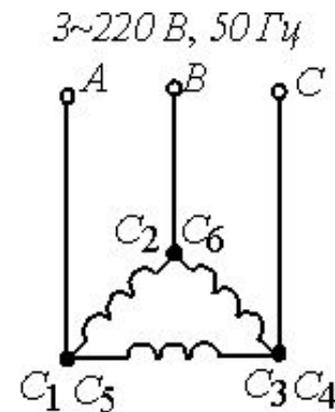
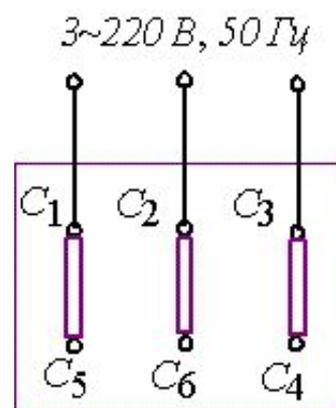
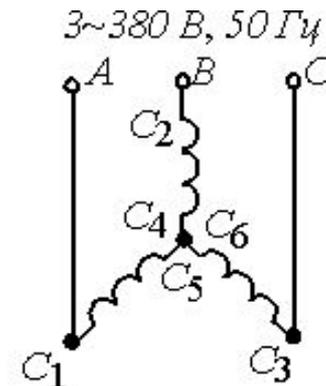
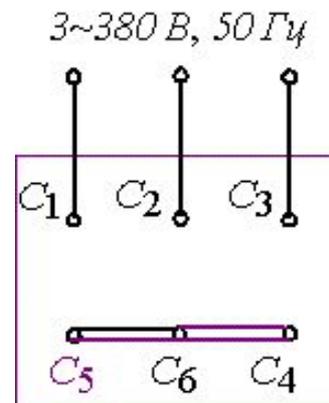
В двигателях **низкого напряжения** (до 1000 В) концы каждой фазы обмотки статора присоединены к клеммам, которые расположены на щитке, укрепленном на корпусе двигателя, и обозначены соответственно:

$C_1 - C_4$ (фаза A);

$C_2 - C_5$ (фаза B);

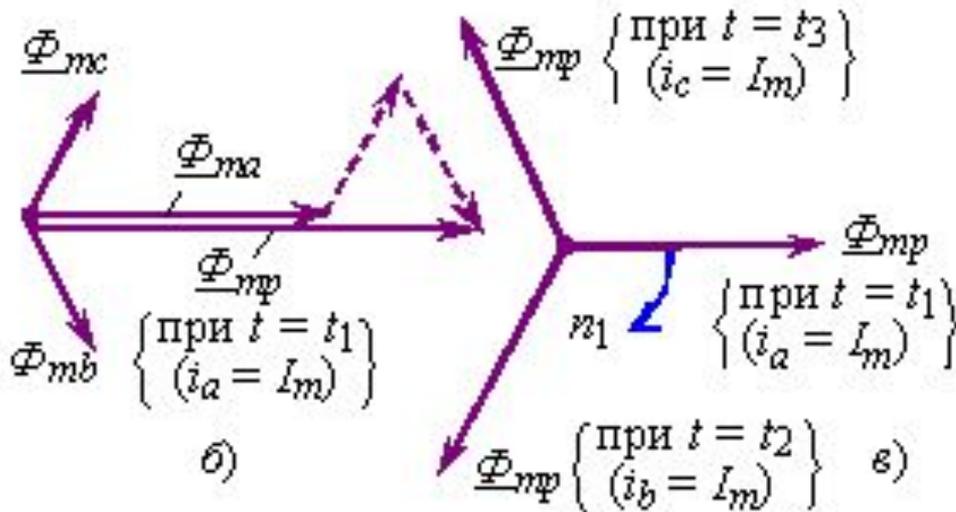
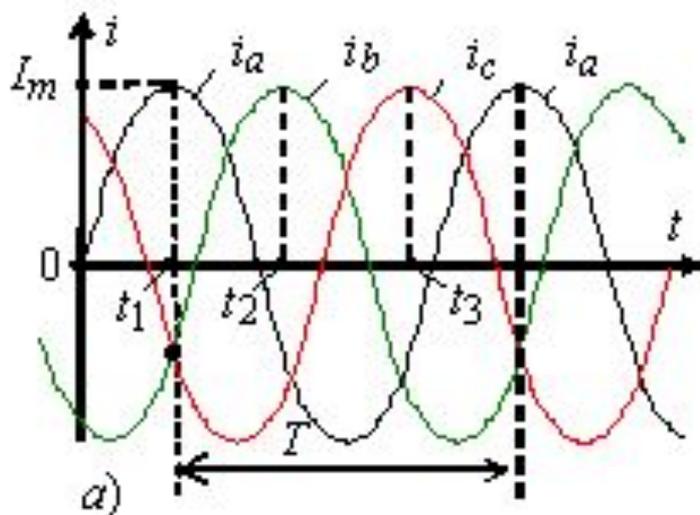
$C_3 - C_6$ (фаза C).

Это даёт возможность в зависимости от величины напряжения сети (например, 380 В или 220 В) соединять обмотку статора звездой или треугольником для того, чтобы в обоих случаях фазное напряжение обмотки было номинальным.



Вращающееся магнитное поле статора

При подключении двигателя к трехфазной сети в обмотках статора протекают токи i_a , i_b и i_c (рис. а). МДС каждой обмотки создаёт магнитный поток, вектор которого совпадает с осью соответствующей катушки. Если ток $i_a = I_m$, то ток $i_b = i_c = -I_m/2$ (при $t = t_1$, рис. а). При этом вектор результирующего магнитного потока $\underline{\Phi}_{mp} = \underline{\Phi}_{ma} + \underline{\Phi}_{mb} + \underline{\Phi}_{mc}$ совпадает с осью катушки C1 - C4 (фаза А), т. к. в ней ток максимальный (рис. б). В моменты времени $t = t_2$ и $t = t_3$ (рис. а) результирующий вектор будет совпадать с осями катушек соответственно C2 - C5 (фаза В) и C3 - C6 (фаза С) (рис. в). Очевидно, что за один период T изменения напряжения сети вектор результирующего магнитного поля сделает один оборот.



Таким образом, МДС **трёх обмоток статора**, расположенных в пространстве под углом 120° друг к другу, при подключении их к трёхфазной сети синусоидального тока, создают **вращающееся магнитное поле**, аналогичное по форме магнитному полю вращающегося двухполюсного магнита (с одной парой p полюсов) с подобным распределением магнитной индукции на полюсах.

В общем случае частота вращения вращающегося магнитного поля (называемая **синхронной частотой вращения**) зависит от частоты напряжения сети f_1 и числа пар p полюсов, определяемого числом обмоток статора, т. е.

$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p.$$

Так как число пар полюсов p определяется целым числом натурального ряда ($p = 1, 2, 3, 4$ и т. д.), то при $f_1 = 50$ Гц возможны следующие значения синхронной частоты вращения: 3000; 1500; 1000; 750 об/мин...,

т.е. для двухполюсной машины (при трёх статорных катушках)

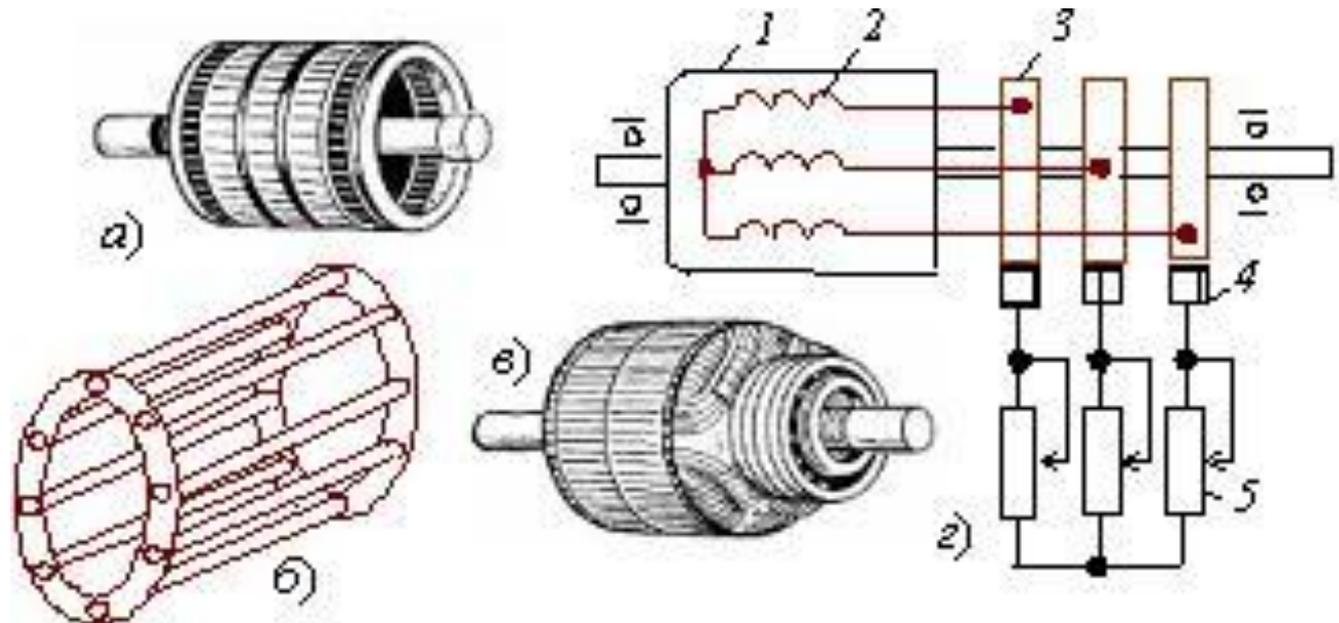
$$n_1 = 60 \cdot f_1 = 3000 \text{ об/мин};$$

для четырёхполюсной машины (при шести статорных катушках)

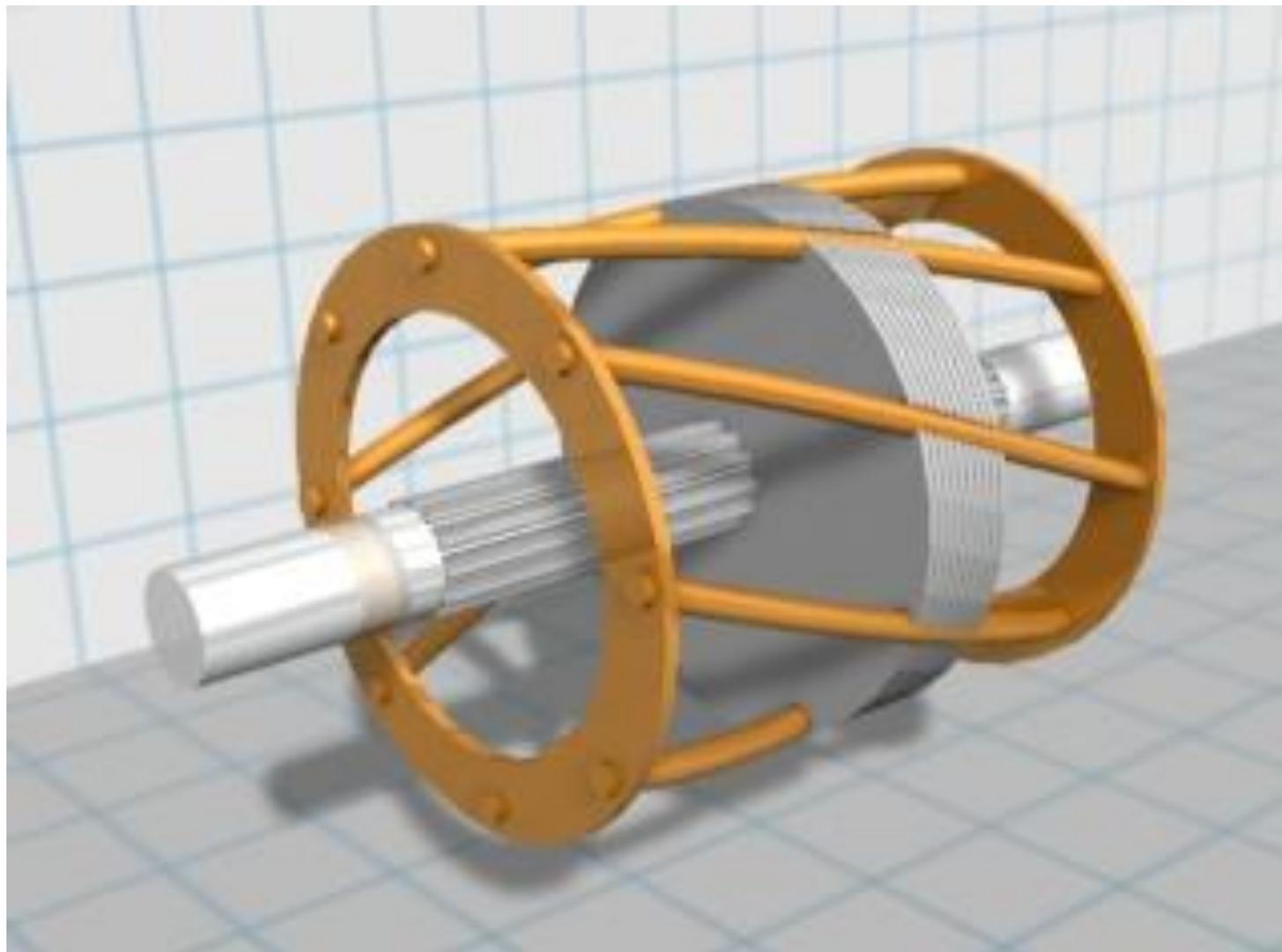
$$n_1 = 60 \cdot f_1 / p = 1500 \text{ об/мин и т. д.}$$

Устройство обмоток роторов АД

Обмотка ротора может быть выполнена короткозамкнутой или фазной. **Короткозамкнутая обмотка** ротора выполняется в виде **беличьей клетки**, состоящей из алюминиевых или медных (латунных) стержней и замыкающих их на торцах колец (рис. а, б). У асинхронных двигателей с фазным ротором (рис. в, г) одни концы **обмоток** 2 ротора соединяются с **контактными кольцами** 3, расположенными на валу двигателя, а другие - соединены в звезду. Контактные латунные кольца соединяются с клеммами **пускового реостата** 5 с помощью угольных или медно-графитовых **щёток** 4 и щеткодержателей.



Устройство обмоток роторов АД



Скольжение и частота вращения ротора

Степень отставания частоты вращения ротора n_2 от частоты вращения магнитного поля n_1 статора оценивается **скольжением** S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Диапазон изменения скольжения в АД $1 \geq S \geq 0$. При пуске $n_2 = 0$, $S = 1$; при холостом ходе $S = 0,001 \dots 0,005$; при номинальной нагрузке $S = 0,03 \dots 0,07$.

Частота вращения ротора выражается через скольжение, т. е.

$$n_2 = n_1 (1 - S) = 60 f_1 (1 - S) / p$$

Отсюда следует, что регулировать частоту вращения ротора можно изменением частоты f_1 , числа пар полюсов p и скольжения S .

Фазные ЭДС, которые индуцируются в обмотках статора

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 w_1 \Phi_{mp} k_{01}$$

где $k_{01} \approx 0.93...0.97$ - обмоточный коэффициент катушки статора.

Фазные ЭДС вращающегося ротора

$$E_{2s} = E_{m2} / \sqrt{2} = 4.44 f_2 w_2 \Phi_{mp} k_{02}$$

где $k_{02} \approx 0.93...0.97$ - обмоточный коэффициент роторной обмотки.

Относительная частота (частота пересечения вращающегося магнитного поля статора вращающегося ротора) $n_1 - n_2 = n_1 \cdot S$, где $n_1 = 60 \cdot f_1 / p$ и $f_1 = n_1 \cdot p / 60$ - частота ЭДС статорной обмотки.

Диапазон изменения частоты f_2 в АД - $(0...1)f_1$; номинальная частота ЭДС и тока роторной обмотки

$$f_{2н} \approx (0,01...0,07)f_1 = 0,5...3,5 \text{ Гц.}$$

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора прямо пропорциональна скольжению и равна частоте ЭДС статора только при неподвижном роторе.

Схемы замещения фаз статора и ротора АД

Для анализа работы АД часто пользуются **схемой замещения двигателя**, аналогичной схеме замещения трансформатора. При её построении необходимо учесть ряд **особенностей**, прежде всего то обстоятельство, что частота ЭДС и тока ротора не равна частоте ЭДС и тока статора.

На рис. изображена схема замещения одной фазы АД, на которой элементы R_0 и X_0 - соответственно активное и реактивное сопротивления ветви намагничивания. Схема замещения позволяет проанализировать работу АД в различных режимах по известным его параметрам. Для этой цели составляют систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа, решив которую, можно аналитически определить неизвестные величины.

Итак, для схемы замещения можно записать:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2$$

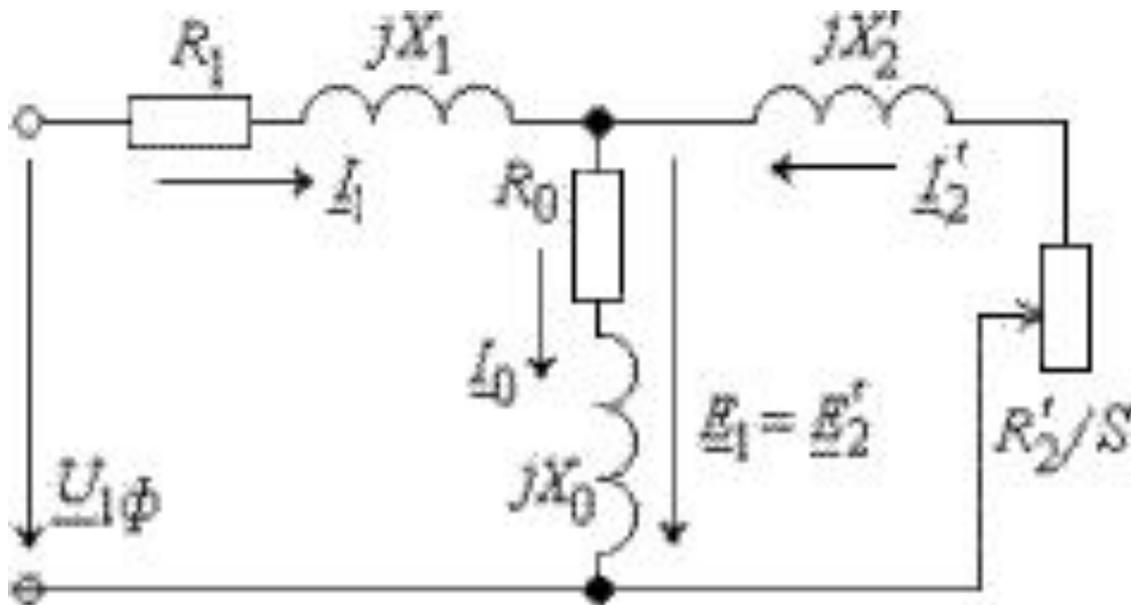
- уравнение токов, причём ток \underline{I}_0 холостого хода в АД составляет (20...40)% от номинального тока статора;

$$\underline{U}_{1\phi} = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1$$

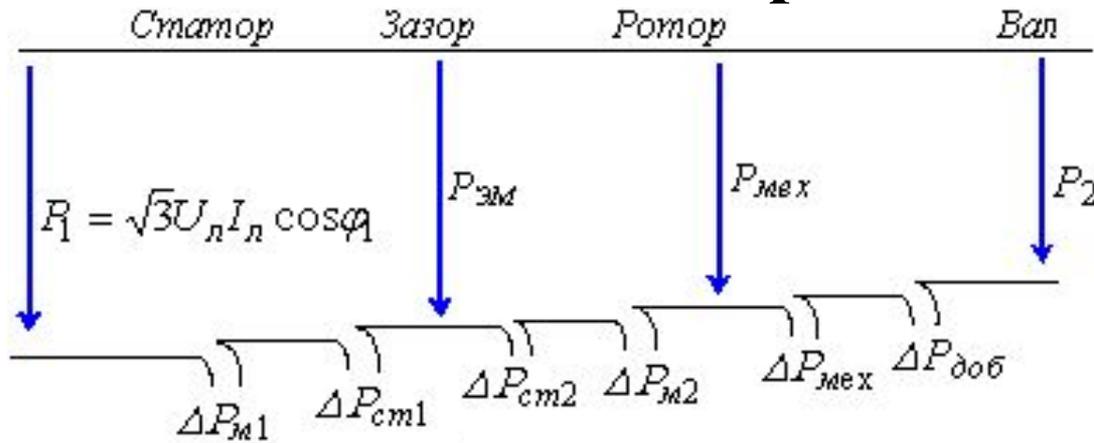
- уравнение электрического состояния для фазы статора;

$$\underline{E}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 / S + jX'_2 \underline{I}'_2; \text{ или } \underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 / S + jX_2 \underline{I}_2$$

- уравнение электрического состояния для фазы ротора.



Потери в двигателе



Для анализа потерь энергии (активной мощности) в АД при преобразовании отбираемой из сети электрической энергии в полезную механическую на валу, строят энергетическую диаграмму.

Электрическая мощность, потребляемая АД из сети, частично расходуется на потери в стали $\Delta P_{\text{ст1}}$ статора (от вихревых токов и явления гистерезиса) и на тепловые потери в меди $\Delta P_{\text{м1}}$ (в обмотках статора), оставшаяся часть мощности передаётся ротору электромагнитным путём.

В свою очередь, электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ частично расходуется на потери в меди ротора (потери в стали $\Delta P_{\text{ст2}}$ ротора незначительны вследствие низкой частоты тока I_2), оставшаяся часть мощности преобразуется в механическую мощность $P_{\text{мех}}$ двигателя.

Полезную мощность на валу двигателя P_2 получим, если из механической мощности вычтем механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ (потери в подшипниках, вентиляционные) и добавочные потери $\Delta P_{\text{пул}}$ (пульсационные).

Режимы работы двигателя

Двигательный режим

Если ротор неподвижен или частота его вращения меньше синхронной, то вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС, под действием которой в обмотке ротора возникает ток. На проводники с током этой обмотки (а точнее, на зубцы сердечника ротора), действуют электромагнитные силы; их суммарное усилие образует электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор вслед за магнитным полем. Если этот момент достаточен для преодоления сил трения, ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения [об/мин] соответствует равенству электромагнитного момента тормозному, создаваемого нагрузкой на валу, силами трения в подшипниках, вентиляцией и т. д. Частота вращения ротора не может достигнуть частоты вращения магнитного поля, так как в этом случае угловая скорость вращения магнитного поля относительно обмотки ротора станет равной нулю, магнитное поле перестанет индуцировать в обмотке ротора ЭДС и, в свою очередь, создавать вращающий момент; таким образом, для двигательного режима работы асинхронной машины справедливо неравенство:

$$0 \leq n_2 < n_1$$

Относительная разность частот вращения магнитного поля и ротора называется *скольжением*:

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

Режимы работы двигателя

Генераторный режим

Если ротор разогнать с помощью внешнего момента (например, каким-либо двигателем) до частоты, большей частоты вращения магнитного поля, то изменится направление ЭДС в обмотке ротора и активной составляющей тока ротора, то есть асинхронная машина перейдёт в *генераторный режим*. При этом изменит направление и электромагнитный момент, который станет тормозным. В генераторном режиме работы скольжение .

Для работы асинхронной машины в генераторном режиме требуется источник реактивной мощности, создающий магнитное поле. При отсутствии первоначального магнитного поля в обмотке статора поток создают с помощью постоянных магнитов, либо при активной нагрузке за счёт остаточной индукции машины и конденсаторов, параллельно подключенных к фазам обмотки статора.

Асинхронный генератор потребляет реактивный ток и требует наличия в сети генераторов реактивной мощности в виде синхронных машин, синхронных компенсаторов, батарей статических конденсаторов (БСК). Несмотря на простоту обслуживания, асинхронный генератор применяют сравнительно редко, в основном в качестве ветрогенераторов малой мощности, вспомогательных источников небольшой мощности и тормозных устройств (например, двигатель лифта или эскалатора метрополитена, идущего вниз, работает в генераторном режиме, отдавая энергию в сеть).

Режимы работы двигателя

Режим холостого хода

Режим холостого хода асинхронного двигателя возникает при отсутствии на валу нагрузки в виде редуктора и рабочего органа. Из опыта холостого хода могут быть определены значения намагничивающего тока и мощности потерь в магнитопроводе, в подшипниках, в вентиляторе. В режиме реального холостого хода $s=0,01-0,08$. В режиме идеального холостого хода $n_2=n_1$, следовательно $s=0$.

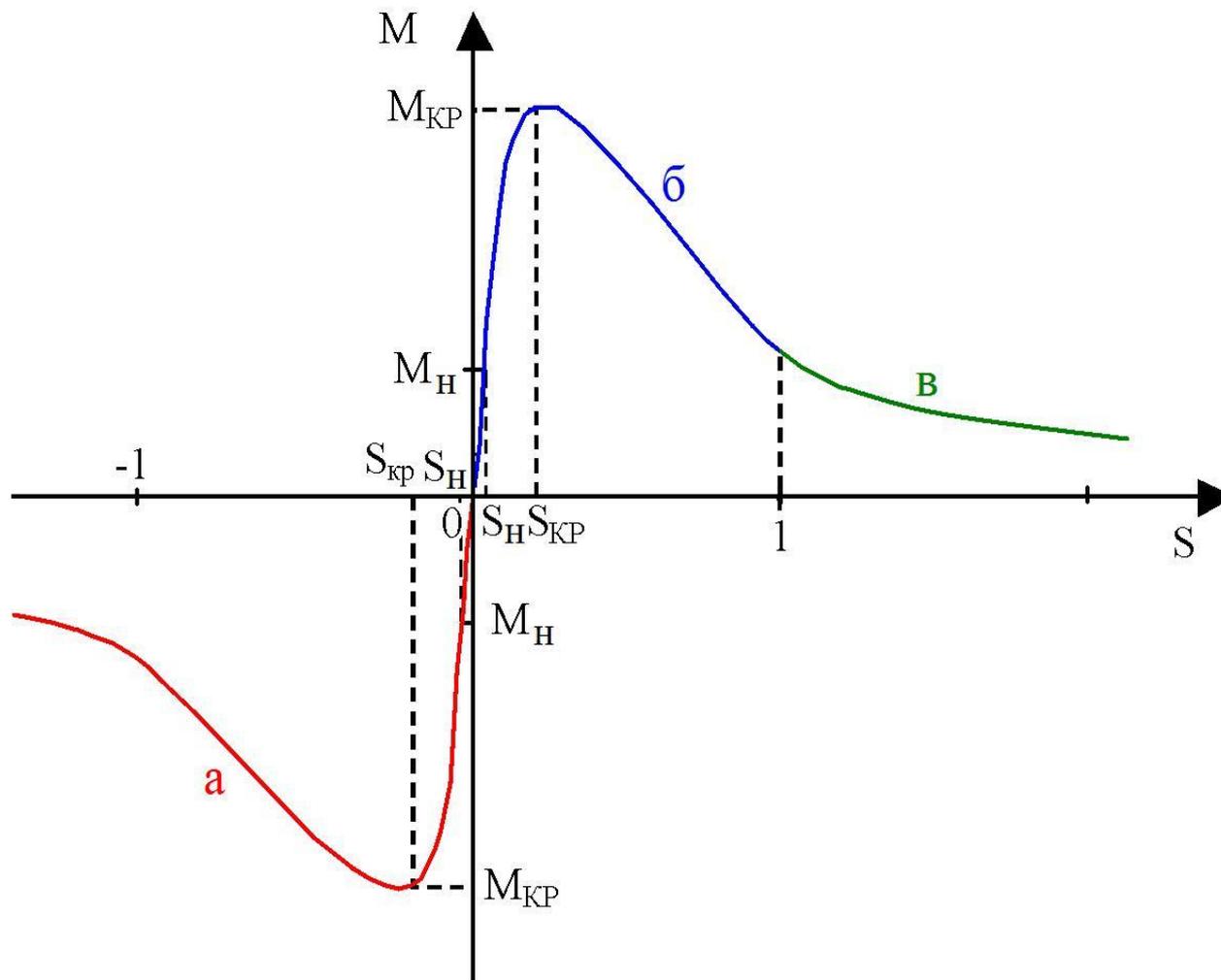
Режим электромагнитного тормоза (противовключение)

Если изменить направление вращения ротора или магнитного поля так, чтобы они вращались в противоположных направлениях, то ЭДС и активная составляющая тока в обмотке ротора будут направлены так же, как в двигательном режиме, и машина будет потреблять из сети активную мощность. Однако электромагнитный момент будет направлен встречно моменту нагрузки, являясь тормозящим. Для режима справедливы неравенства:

$$n_2 < 0, s > 1$$

Этот режим применяют кратковременно, так как при нём выделяется много тепла, которое двигатель не способен рассеять, что может вывести его из строя.

Режимы работы двигателя



Механическая характеристика асинхронной машины:

- а — режим рекуперации энергии в сеть (генераторный режим),
- б — двигательный режим,
- в — режим противовключения (режим электромагнитного тормоза)

Способы управления двигателем

Под управлением асинхронным двигателем переменного тока понимается изменение частоты вращения ротора и/или его момента. Существуют следующие способы управления асинхронным двигателем:

реостатный — изменение частоты вращения АД с фазным ротором путём изменения сопротивления реостата в цепи ротора, кроме того это увеличивает пусковой момент;

частотный — изменение частоты вращения АД путём изменения частоты тока в питающей сети, что влечёт за собой изменение частоты вращения поля статора. Применяется включение двигателя через частотный преобразователь;

переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» в процессе пуска двигателя, что даёт снижение пусковых токов в обмотках примерно в три раза, но в то же время снижается и момент;

импульсный — подачей напряжения питания специального вида (например, пилообразного);

введение добавочной э.д.с с согласно или противоположно с частотой скольжения во вторичную цепь.

изменением числа пар полюсов, если такое переключение предусмотрено конструктивно (только для к.з. роторов);

изменением амплитуды питающего напряжения, когда изменяется только амплитуда (или действующее значение) управляющего напряжения. Тогда векторы напряжений управления и возбуждения остаются перпендикулярны (автотрансформаторный пуск);

фазовое управление характерно тем, что изменение частоты вращения ротора достигается путём изменения сдвига фаз между векторами напряжений возбуждения и управления;

амплитудно-фазовый способ включает в себя два описанных способа;

включение в цепь питания статора реакторов;

индуктивное сопротивление для двигателя с фазным ротором.