

| | Тема 1.4. Электрические машины переменного тока | 24+26 |
|----|--|--------------|
| 55 | Общие вопросы теории бесколлекторных машин переменного тока. | 2 |
| 56 | Режимы работы, устройство и магнитная цепь асинхронных машин. | 2 |
| 57 | Рабочий процесс трехфазных асинхронных двигателей | 2 |
| 58 | Электромагнитный момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя | 2 |
| 59 | Пуск и регулирование скорости асинхронных двигателей | 2 |
| 60 | Однофазные, конденсаторные и специальные асинхронные машины. | 2 |
| 61 | Устройство и принцип действия синхронных машин. | 2 |
| 62 | Возбуждение синхронных машин. | 2 |
| 63 | Особенности конструктивного исполнения гидрогенераторов, турбогенераторов, дизельгенераторов | 2 |
| 64 | Характеристики синхронного генератора. | 2 |
| 65 | Параллельная работа синхронных генераторов. | 2 |
| 66 | Синхронные двигатели, компенсаторы | 2 |

**55. Общие вопросы
теории
бесколлекторных
машин переменного
тока.**

Электрические машины переменного тока составляют основу современной электроэнергетики, как в сфере производства, так и в сфере потребления электрической энергии.

За небольшим исключением все эти машины являются бесколлекторными. Существует два вида бесколлекторных машин переменного тока: асинхронные и синхронные машины.

Асинхронный электродвигатель — электродвигатель переменного тока, в котором частота вращения ротора отличается от частоты вращающего магнитного поля, создаваемого питающим напряжением. Эти двигатели наиболее распространены в настоящее время.

По количеству фаз двигатели переменного тока подразделяются на:

однофазные — запускаются вручную, или имеют пусковую обмотку, или имеют фазосдвигающую цепь;

двухфазные — в том числе конденсаторные;

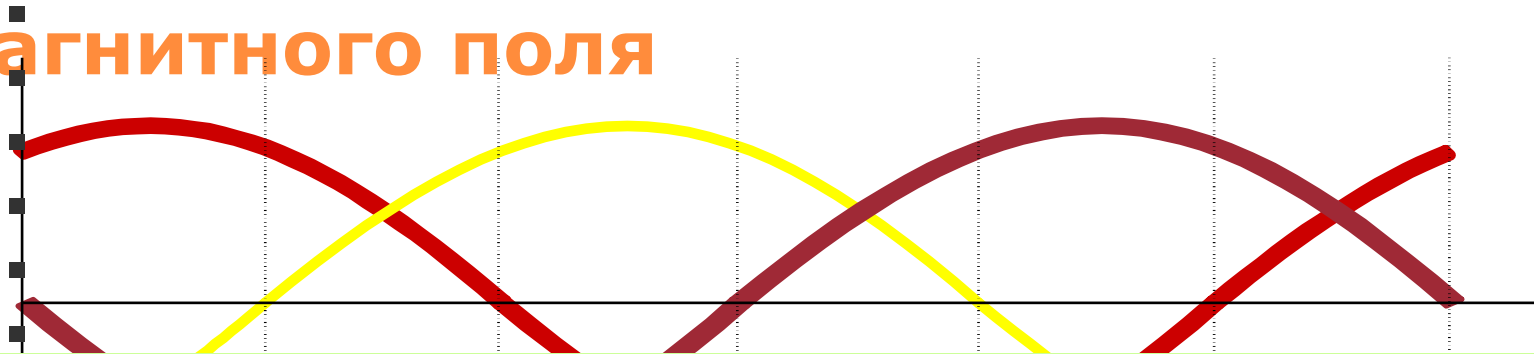
трёхфазные;

По конструктивному исполнению асинхронные двигатели разделяются на:

- короткозамкнутые;

- с фазным ротором

Образование вращающегося магнитного поля



При подключении обмотки статора к цепи переменного трёхфазного тока, протекающие в ней токи создают **вращающееся магнитное поле Φ** .

Магнитное поле машины вращается с частотой:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

где f_1 – частота тока в статоре

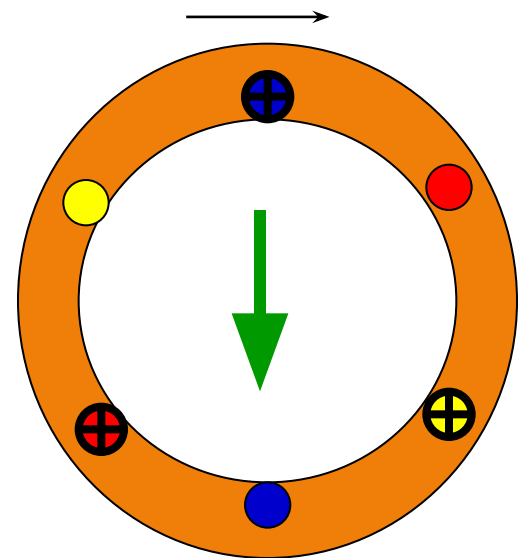
p – число пар полюсов машины

При $f_1 = 50$ Гц синхронная частота вращения равна:

$p=1$ $\omega_1 = 314$ рад/с (3000 об/мин)

$p=2$ $\omega_1 = 157$ рад/с (1500 об/мин)

$p=3$ $\omega_1 = 104$ рад/с (1000 об/мин) и т.д



Принцип действия АСМ (двигателя):

Магнитное поле машины вращается с частотой:

$$\omega_1 = \frac{2 \pi f_1}{p}$$

Вращающееся магнитное поле статора наводит в обмотке ротора ЭДС:

$$E_2 = 4.44 \Phi f_2 W_2 = 4,44 \Phi_s f_1 W_2$$

ЭДС вызывает появление тока в обмотке ротора:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$$

На проводники ротора (с током) действуют электромагнитные силы

$$M_{эм} = C \Phi I_2 \cos \varphi_2$$

и образуется электромагнитный вращающий момент:

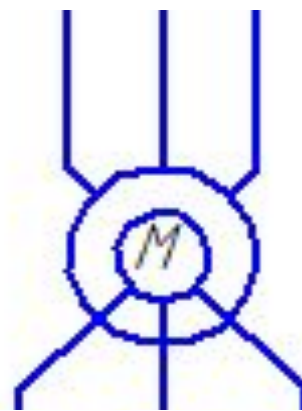
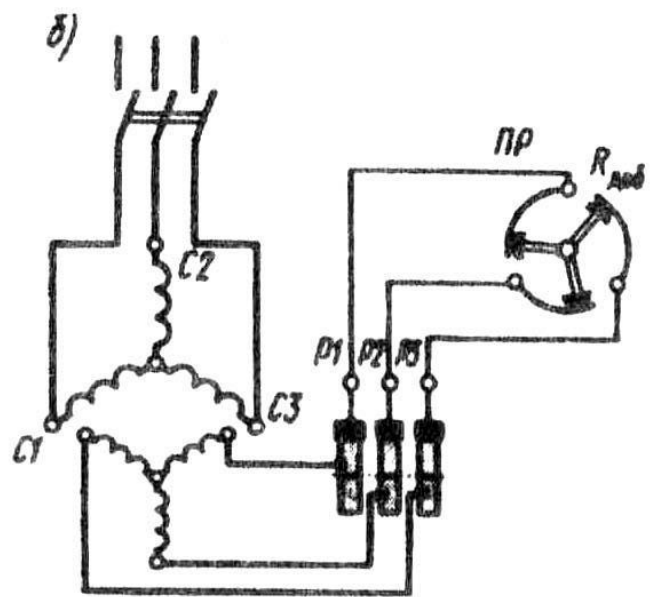
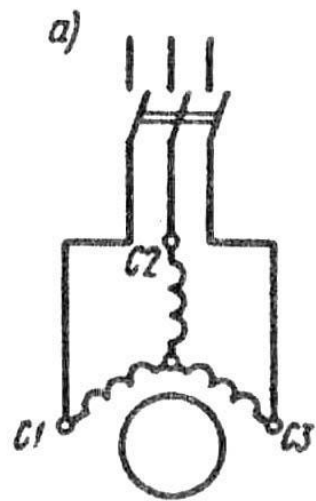
$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2}$$

Под действием электромагнитного момента ротор вращается с частотой вращения ω_2 , несколько меньшей, чем частота вращения магнитного поля статора. Отличие частот вращения ротора и магнитного поля называют скольжением:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}; \quad \text{либо} \quad \omega_2 = \omega_1 (1 - s)$$

При вращении ротора частота перемагничивания ротора (тока ротора)

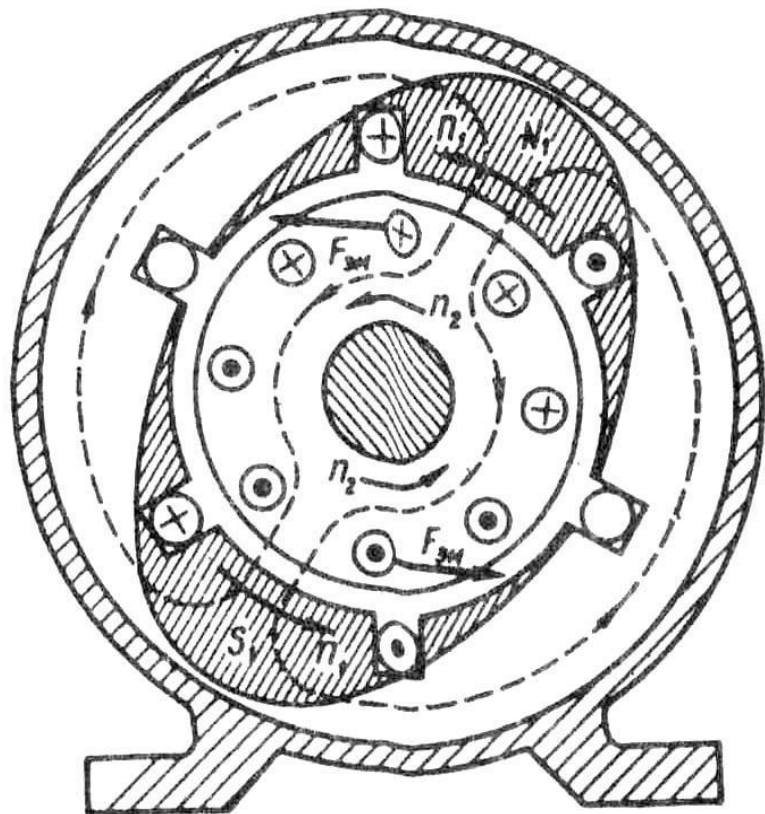
$$f_2 = f_1 s$$



При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле статора, частота

$$n_1 = 60f_1/p$$

Здесь p — число пар полюсов; f_1 — частота сети



Вращающееся поле статора (полюсы N_1 и S_1) сцепляется как с обмоткой статора, так и с обмоткой ротора и наводит в них ЭДС. При этом ЭДС обмотки статора, являясь ЭДС самоиндукции действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает значение тока в обмотке. Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС ротора создает в стержнях обмотки ротора токи.

Взаимодействие этих токов с полем статора создает на роторе электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяется по правилу «левой руки». Из рисунка видно, что силы $F_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнита момент M , приводящий его во вращение с частотой n_2 .

Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя.

Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора зависят от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора, вращения ротора n_2 , называемая асинхронной, всегда меньше частоты вращения поля n_1 , так как только в этом случае происходит наведение ЭДС в обмотке ротора асинхронного двигателя.

**56. Режимы
работы,
устройство и
магнитная цепь
асинхронных
машин**

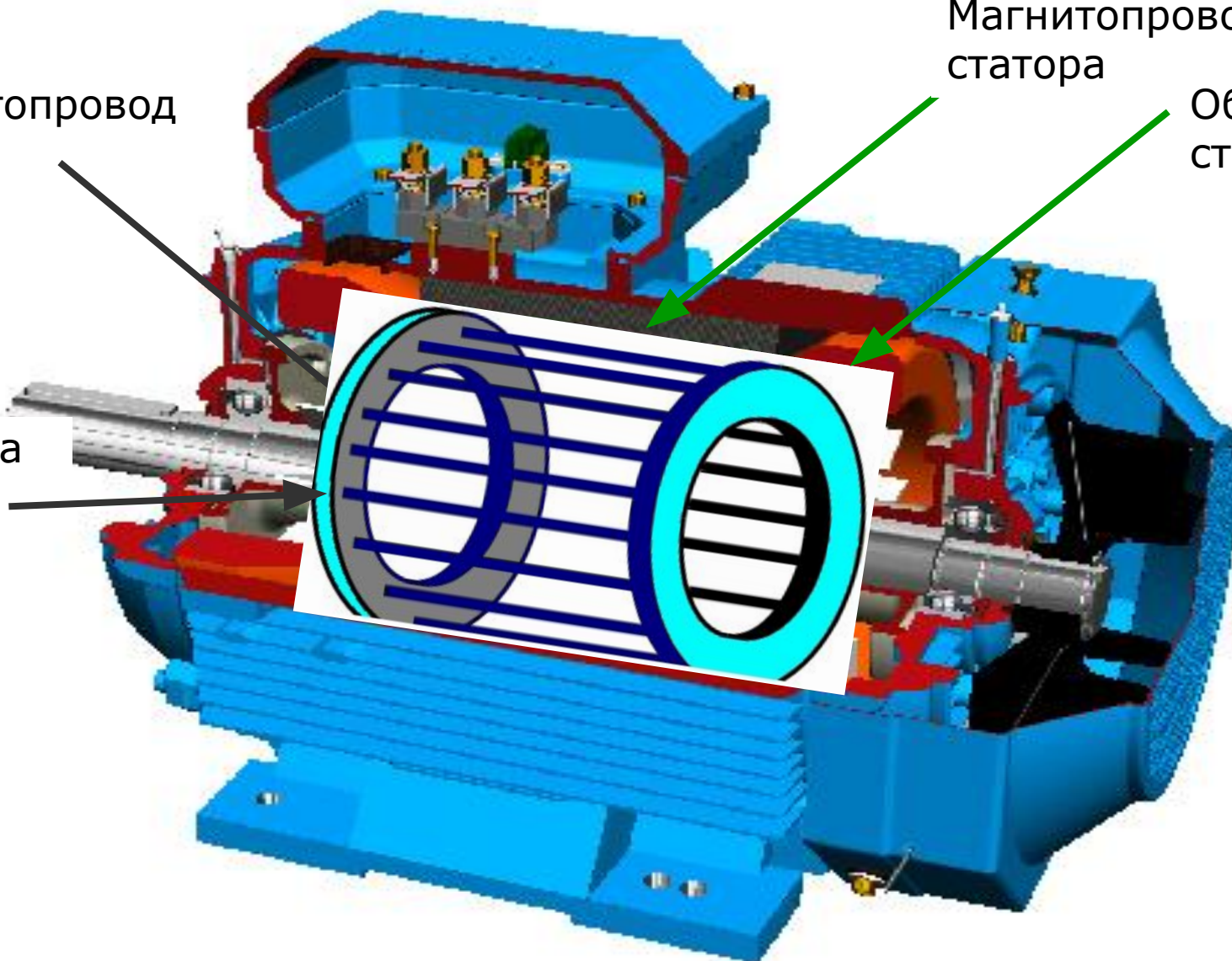
Конструкция АСМ

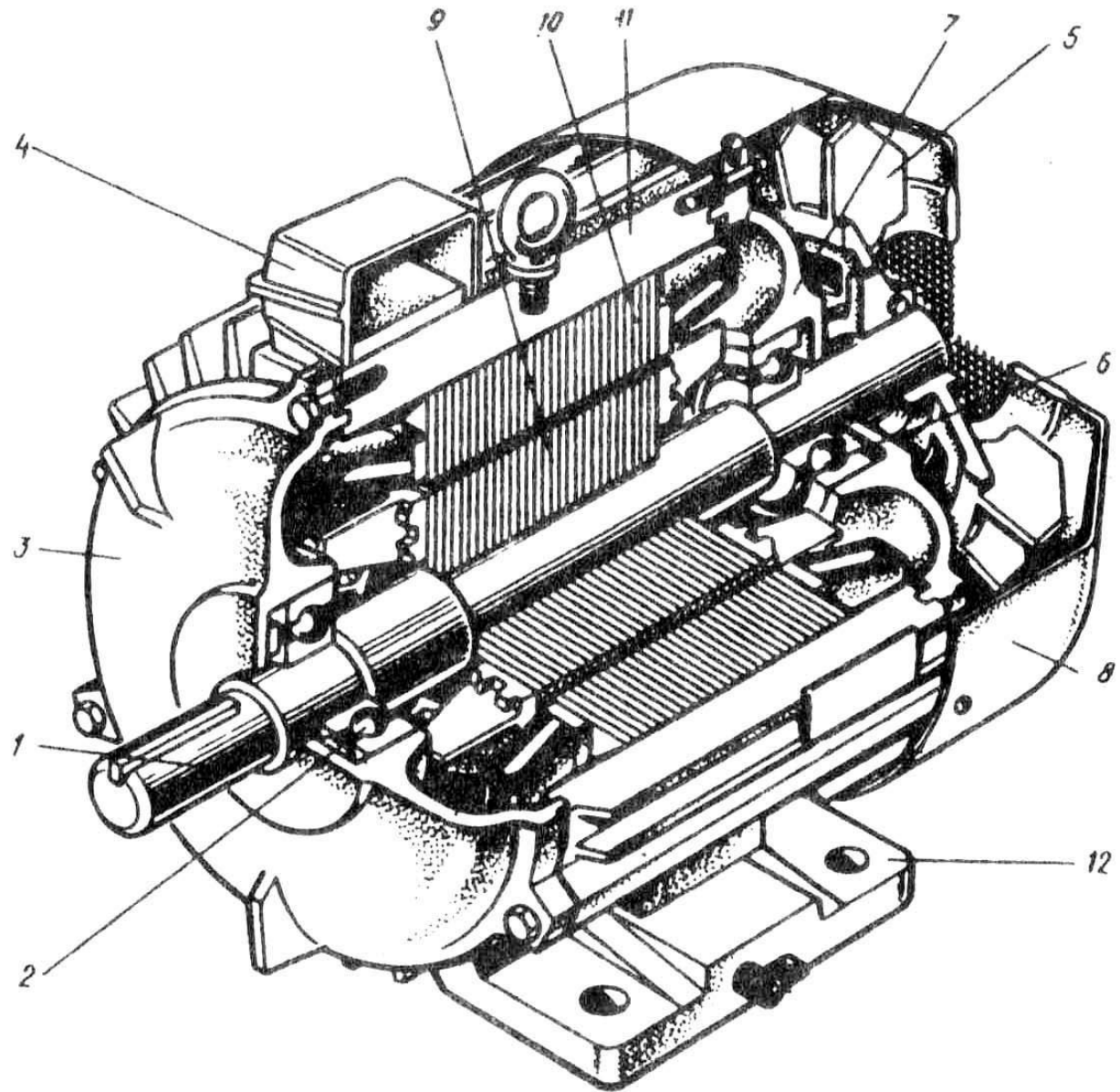
Магнитопровод ротора

Обмотка ротора

Магнитопровод статора

Обмотка статора





Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей, разделенных воздушным зазором:

- неподвижного статора;
- вращающегося ротора.

Каждая из этих частей имеет сердечник и обмотку. При этом обмотка статора включается в сеть и является как бы первичной, а обмотка ротора - вторичной, так как энергия в нее поступает из обмотки статора за счет магнитной связи между этими обмотками.

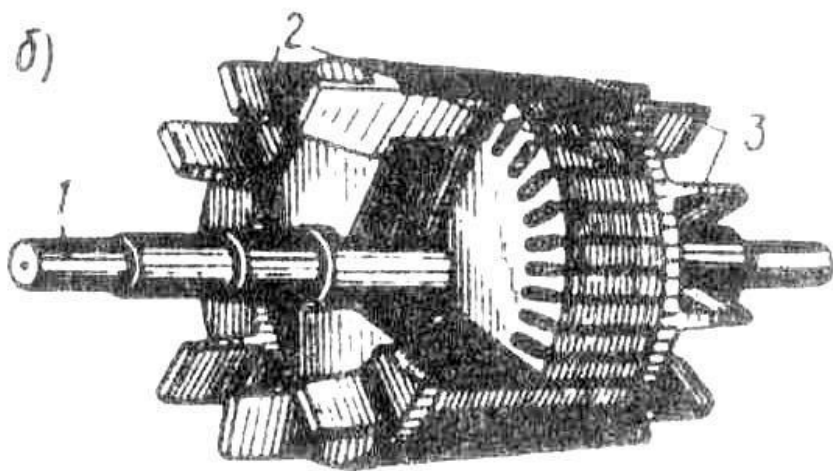
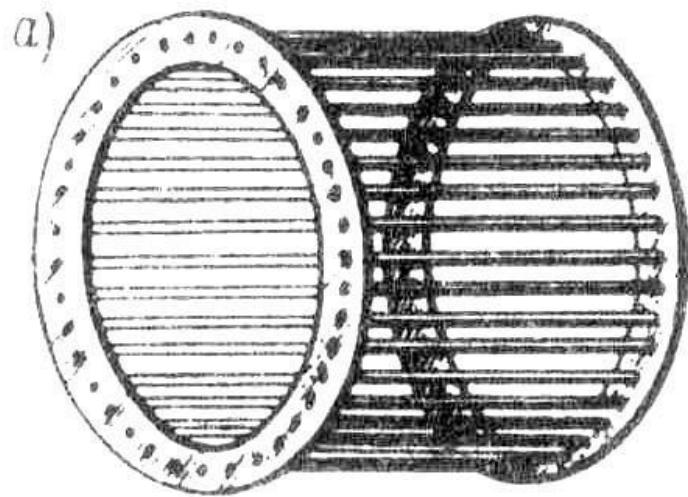
По своей конструкции асинхронные двигатели разделяются на два вида: двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором.

Неподвижная часть двигателя — статор — состоит из корпуса и сердечника с трехфазной обмоткой . Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава или из чугуна либо делают сварным.

Рассматриваемый двигатель имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому поверхность его корпуса имеет ряд продольных ребер, назначение которых состоит в том, чтобы увеличить поверхность охлаждения двигателя.

В корпусе расположен сердечник статора, имеющий шихтованную конструкцию: отштампованные листы из тонколистовой электротехнической стали толщиной обычно 0,5 мм покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет и скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора, соединенные в определенном порядке лобовыми частями, находящимися за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя ротор, состоящий из вала и сердечника с короткозамкнутой обмоткой. Такая обмотка, называемая «беличье колесо», представляет собой ряд металлических (алюминиевых или медных стержней, расположенных в пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон короткозамыкающими кольцами. Сердечник ротора также имеет шихтованную конструкцию, но листы ротора не покрыты изоляционным лаком, а имеют на своей поверхности тонкую пленку окисла. Это является достаточной изоляцией, ограничивающей вихревые токи, так как величина их невелика из-за малой частоты перемагничивания сердечника ротора



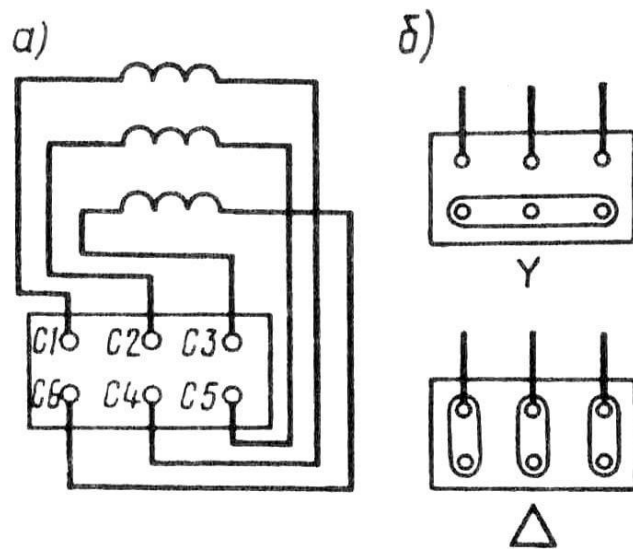
Концы обмоток фаз выводят на зажимы коробки выводов. Обычно асинхронные двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть на два разных напряжения, отличающиеся в $\sqrt{3}$ раз.

Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжения 380/660 В.

Если в сети линейное напряжение 660 В, то обмотку статора следует соединить звездой, а если 380 В, то треугольником. В обоих случаях напряжение на обмотке каждой фазы будет 380 В.

Выводы обмоток фаз располагают на панели таким образом, чтобы соединения обмоток фаз было удобно выполнять посредством перемычек, без перекрещивания последних. В некоторых двигателях небольшой мощности в коробке выводов имеется лишь три зажима.

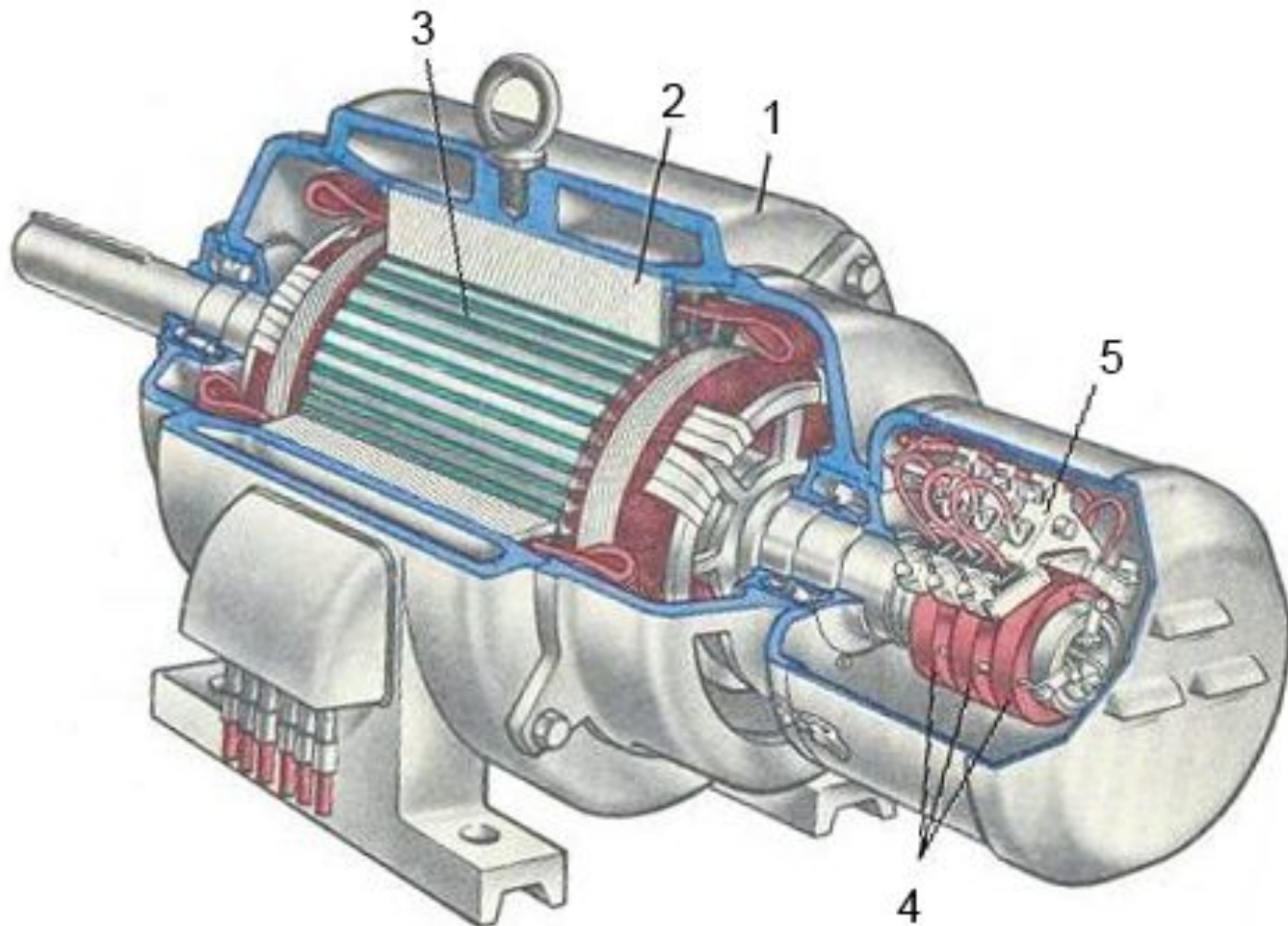
В этом случае двигатель может быть включен в сеть на одно напряжение (соединение обмотки статора такого двигателя звездой или треугольником выполнено внутри двигателя).

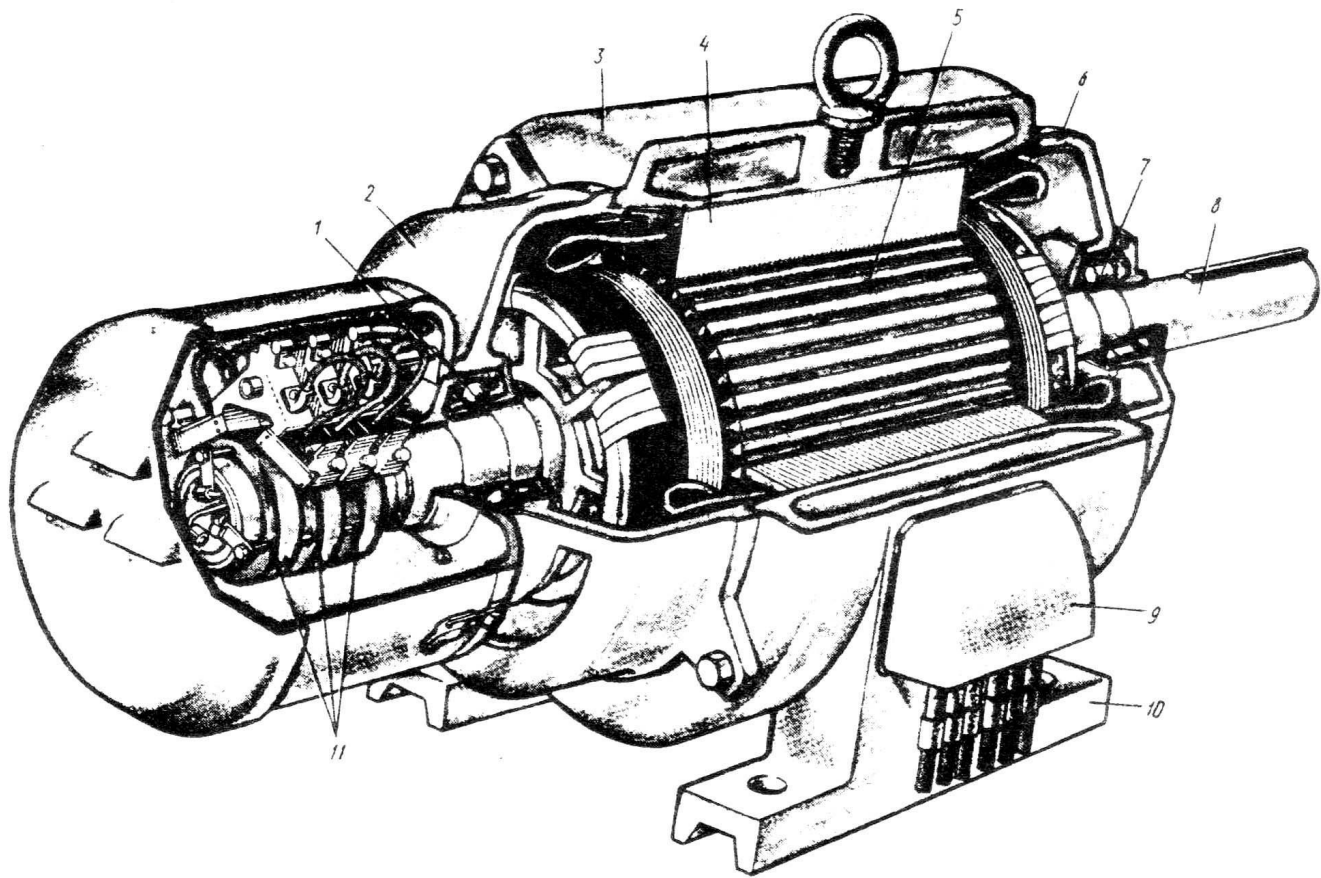


Другая разновидность трехфазных асинхронных двигателей - двигатели с фазным ротором — конструктивно отличается от рассмотренного двигателя главным образом устройством ротора. Статор этого двигателя также состоит из корпуса и сердечника с трехфазной обмоткой.

Однако ротор имеет более сложную конструкцию. На валу закреплен шихтованный сердечник с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактными кольцам, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала.

Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора на каждое контактное кольцо накладывают обычно две щетки, располагаемые в щеткодержателях. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу с определенным усилием.





Режимы работы асинхронной машины

В соответствии с принципом обратимости электрических машин асинхронные машины могут работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. Кроме того, возможен еще и режим электромагнитного торможения противовключением.

Двигательный режим. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с короткозамкнутой обмоткой ротора, наводит в ней ЭДС. При этом в стержнях обмотки ротора появляются токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем на роторе возникают электромагнитные силы. Совокупность этих сил создает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор асинхронного двигателя приходит во вращение с частотой $n_2 < n_1$ в сторону вращения поля статора.

Если вал асинхронного двигателя механически соединить с валом какого-либо исполнительного механизма ИМ (станка, подъемного крана и т. п.), то вращающий момент двигателя M , преодолев противодействующий (нагрузочный) момент $M_{\text{нагр}}$, исполнительного механизма, приведет механизм во вращение. Следовательно, электрическая мощность P_1 , поступающая в двигатель из сети, в основной своей части преобразуется в механическую мощность P_1 и передается исполнительному механизму ИМ.

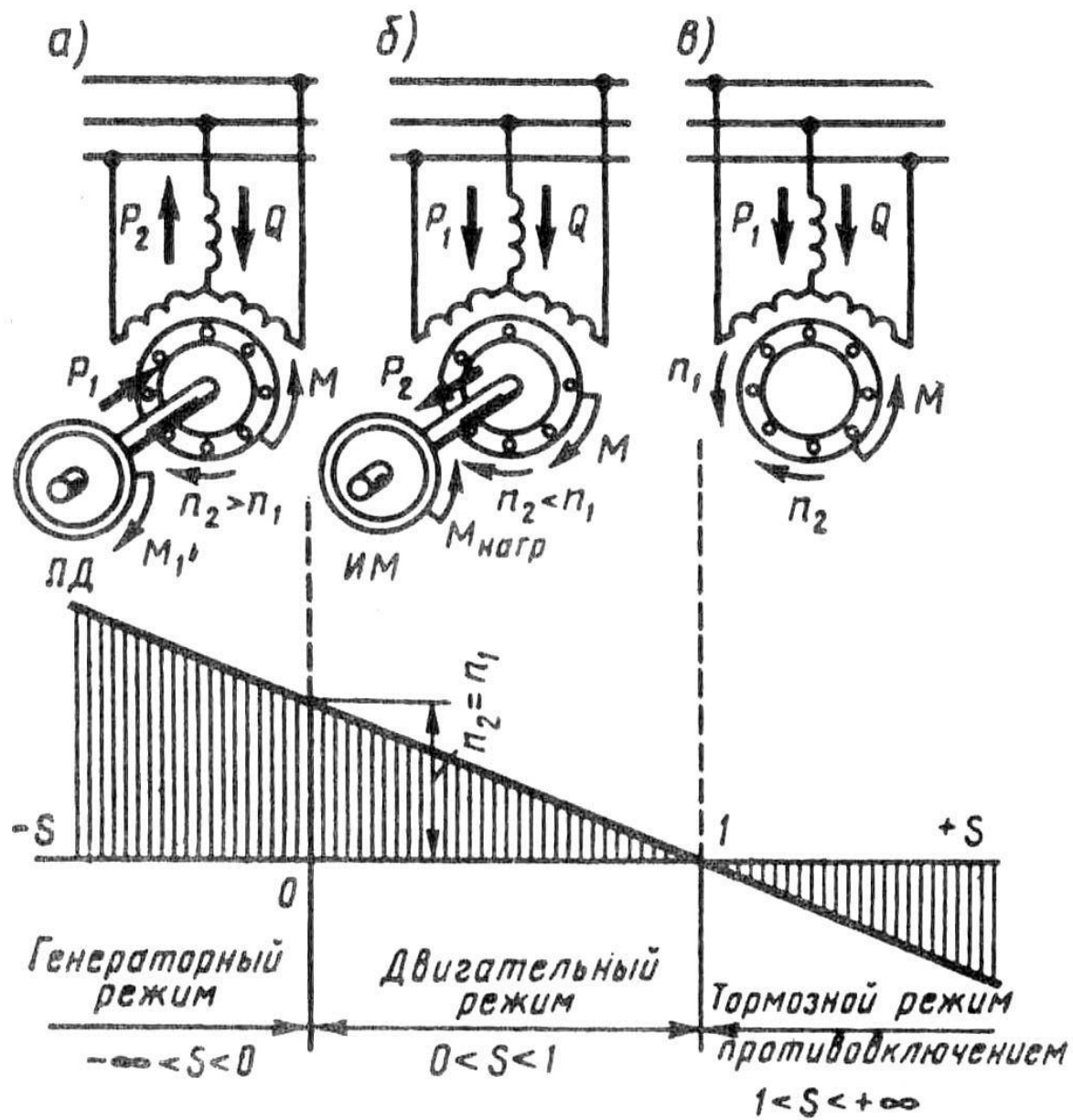
Весьма важным параметром асинхронной машины является скольжение — величина, характеризующая **разность частот вращения ротора и вращающегося поля статора:**

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

Скольжение выражают в долях единицы либо в процентах.

Вполне очевидно, что с увеличением нагрузочного момента на валу асинхронного двигателя частота вращения ротора n_2 уменьшается. Следовательно, скольжение асинхронного двигателя зависит от механической нагрузки на валу двигателя и может изменяться в диапазоне $0 < s \leq 1$.

При включении асинхронного двигателя в сеть в начальный момент времени ротор под влиянием сил инерции неподвижен ($n_2 = 0$). При этом скольжение s равно единице.



В режиме работы двигателя без нагрузки на валу (режим холостого хода) ротор вращается с частотой лишь немного меньшей синхронной частоты вращения n_1 и скольжение весьма мало отличается от нуля ($s \approx 0$).

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют номинальным скольжением $s_{\text{ном}}$. Для асинхронных двигателей общего назначения $s_{\text{ном}} = 1 - 8\%$, при этом для двигателей большой мощности $s_{\text{ном}} = 1\%$, а для двигателей малой мощности $s_{\text{ном}} = 8\%$.

Преобразовав выражение для скольжения, получим формулу для определения асинхронной частоты вращения (об/мин):

$$n_2 = n_1(1-s)$$

Генераторный режим. Если обмотку статора включить в сеть, а ротор асинхронной машины посредством приводного двигателя ПД (двигатель внутреннего сгорания, турбина и т. п.), являющегося источником механической энергии, вращать в направлении вращения магнитного поля статора с частотой $n_2 > n_1$, то направление движения ротора относительно поля статора изменится на обратное (по сравнению с двигательным режимом работы машины), так как ротор будет обгонять поле статора. При этом скольжение станет отрицательным, а ЭДС, наведенная в обмотке ротора, изменит свое направление. Электромагнитный момент на роторе M также изменит свое направление, т. е. будет направлен встречно вращающемуся магнитному полю статора и станет тормозящим по отношению к вращающемуся моменту приводного двигателя M_1 .

В этом случае механическая мощность приводного двигателя в основной своей части будет преобразована в электрическую активную мощность P_2 переменного тока.

Особенность работы асинхронного генератора состоит в том, что вращающееся магнитное поле в нем создается реактивной мощностью Q трехфазной сети, в которую включен генератор и он отдает вырабатываемую только активную мощность P_2 . Следовательно, для работы асинхронного генератора необходим источник переменного тока, при подключении к которому происходит возбуждение генератора, т. е. в нем возбуждается вращающееся магнитное поле.

Скольжение асинхронной машины в генераторном режиме может изменяться в диапазоне $-\infty < s < 0$

Режим торможения противовключением. Если у работающего трехфазного асинхронного двигателя поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов, то вращающееся поле статора изменит направление вращения на обратное.

При этом ротор асинхронной машины под действием сил инерции будет продолжать вращение в прежнем направлении. Другими словами, ротор и поле статора асинхронной машины будут вращаться в противоположных направлениях. В этих условиях электромагнитный момент машины, направленный в сторону вращения поля статора, будет оказывать на ротор тормозящее действие. Этот режим работы асинхронной машины называется электромагнитным торможением противовключением.

В режиме электромагнитного торможения частота вращения ротора является отрицательной, а поэтому скольжение приобретает положительные значения больше единицы:

$$s = [n_1 - (-n_2)] / n_1 = (n_1 + n_2) / n_1 > 1.$$

Скольжение асинхронной машины в режиме торможения противовключением может изменяться в диапазоне $1 < s < +\infty$

57.Рабочий процесс трехфазных асинхронных двигателей

Чтобы векторы ЭДС, напряжений и токов обмоток статора и ротора можно было изобразить на одной векторной диаграмме, следует параметры обмотки ротора привести к обмотке статора, т. е. обмотку ротора с числом фаз m_2 , обмоточным коэффициентом $k_{об2}$ и числом витков одной фазной обмотки ω_2 заменить обмоткой с m_1 , ω_1 и $k_{об1}$.

При этом мощности и фазовые сдвиги векторов ЭДС и токов ротора после приведения должны остаться такими же, что и до приведения. Пересчет реальных параметров обмотки ротора на приведенные выполняется по формулам, аналогичным формулам приведения параметров вторичной обмотки трансформатора.

При $s = 1$ приведенная ЭДС ротора $E'_2 = E_2 k_e$
где $k_e = E_1 / E_2 = k_{o61} \omega_1 / (k_{o62} \omega_2)$ - коэффициент
трансформации напряжения в асинхронной машине при
неподвижном роторе.

Приведенный ток ротора

$$I'_2 = I_2 / k_i$$

где $k_i = m_1 \omega_1 k_{o61} / (m_2 \omega_2 k_{o62}) = m_1 k_e / m_2$ - коэффициент
трансформации тока асинхронной машины.

В отличие от трансформаторов в асинхронных
двигателях коэффициенты трансформации напряжения и
тока не равны ($k_e \neq k_i$). Объясняется это тем, что число
фаз в обмотках статора и ротора в общем случае не
одинаково ($m_1 \neq m_2$). Лишь в двигателях с фазным
ротором, у которых $m_1 = m_2$, эти коэффициенты равны.

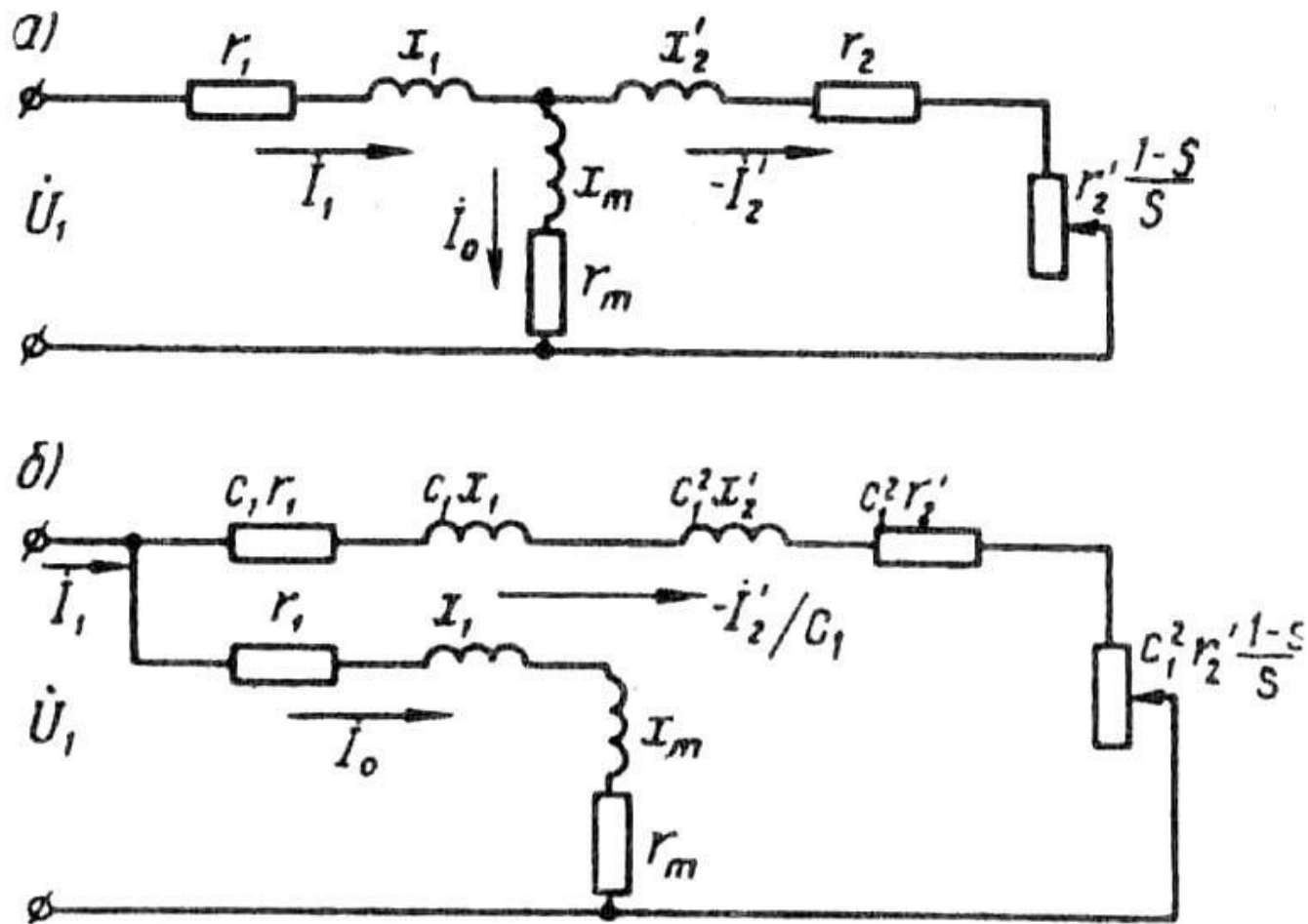
Активное и индуктивное приведенные сопротивления
обмотки ротора: $r'_2 = r_2 k_e k_i$; $x'_2 = x_2 k_e k_i$

Уравнение напряжений обмотки статора асинхронного двигателя

$$\dot{U}_1 = (-E_1) + J I_1 x_1 + I_1 r_1$$

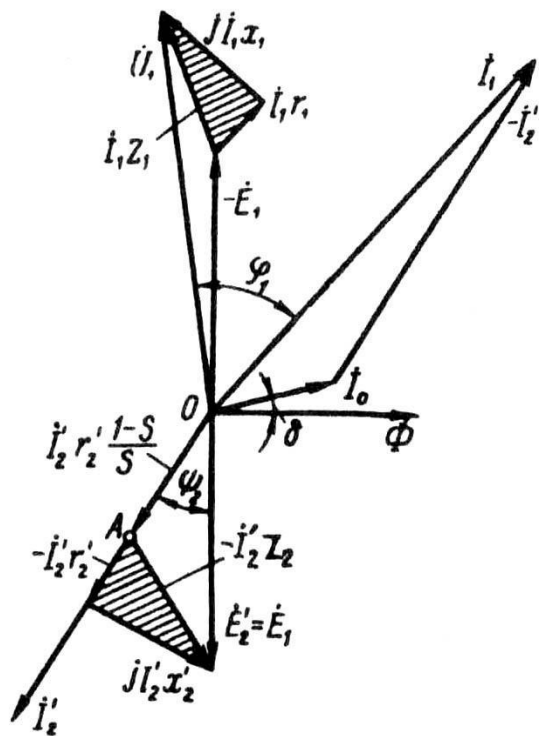
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$$

Уравнениям напряжений и токов, а также векторной диаграмме асинхронного двигателя соответствует электрическая схема замещения асинхронного двигателя.

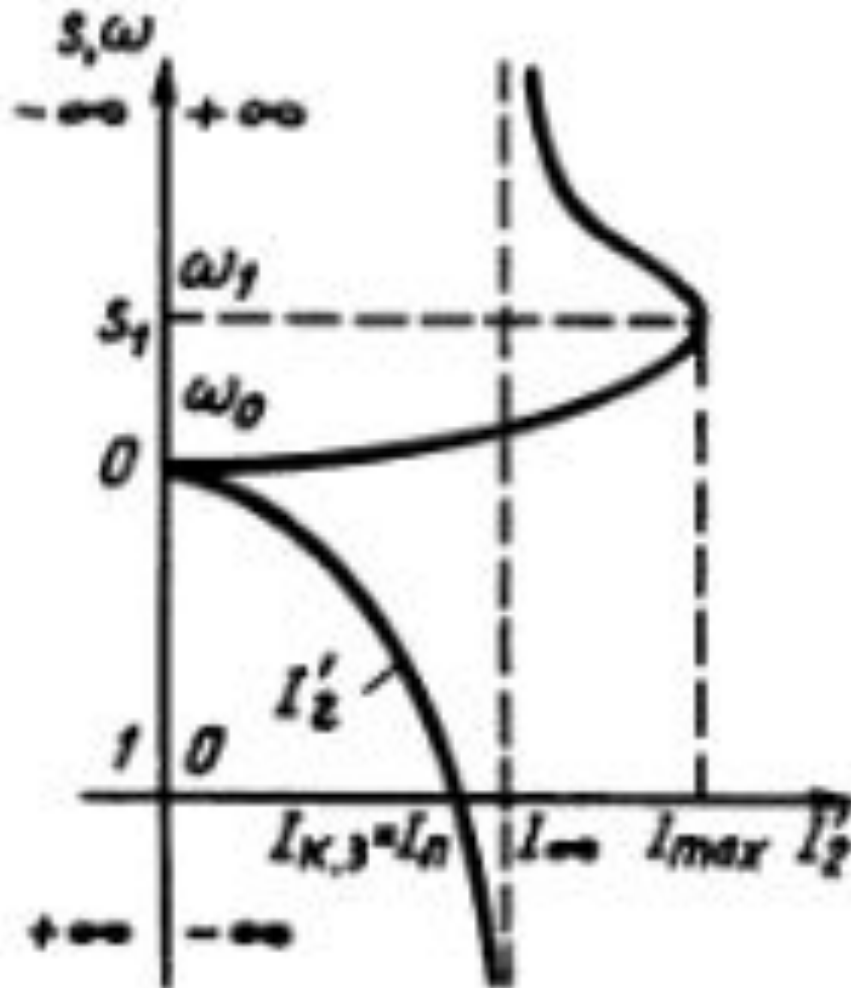


Воспользовавшись Г-образной схемой замещения и приняв $c_1 = U_1 / E_1 = 1$, запишем выражение тока в рабочем контуре:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{[r_1 + r'_2 + r'_2(1-s)/s]^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$



Электромеханическая характеристика АД



Механическая
характеристика
асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем.

Электромагнитный момент M пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = P_{эм} / \omega_1$$

где

$$\omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = 2\pi f_1 / p$$

- угловая синхронная скорость вращения.

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f s [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

Рассмотрим зависимость момента от скольжения $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и постоянных параметрах схемы замещения.

Эту зависимость принято называть **механической характеристикой асинхронной машины**.

Анализ выражения , представляющего собой аналитическое выражение механической характеристики $M = f(s)$, показывает, что при значениях скольжения $s = 0$ и $s = \infty$ электромагнитный момент $M = 0$.

Из этого следует, что механическая характеристика $M = f(s)$ имеет максимум.

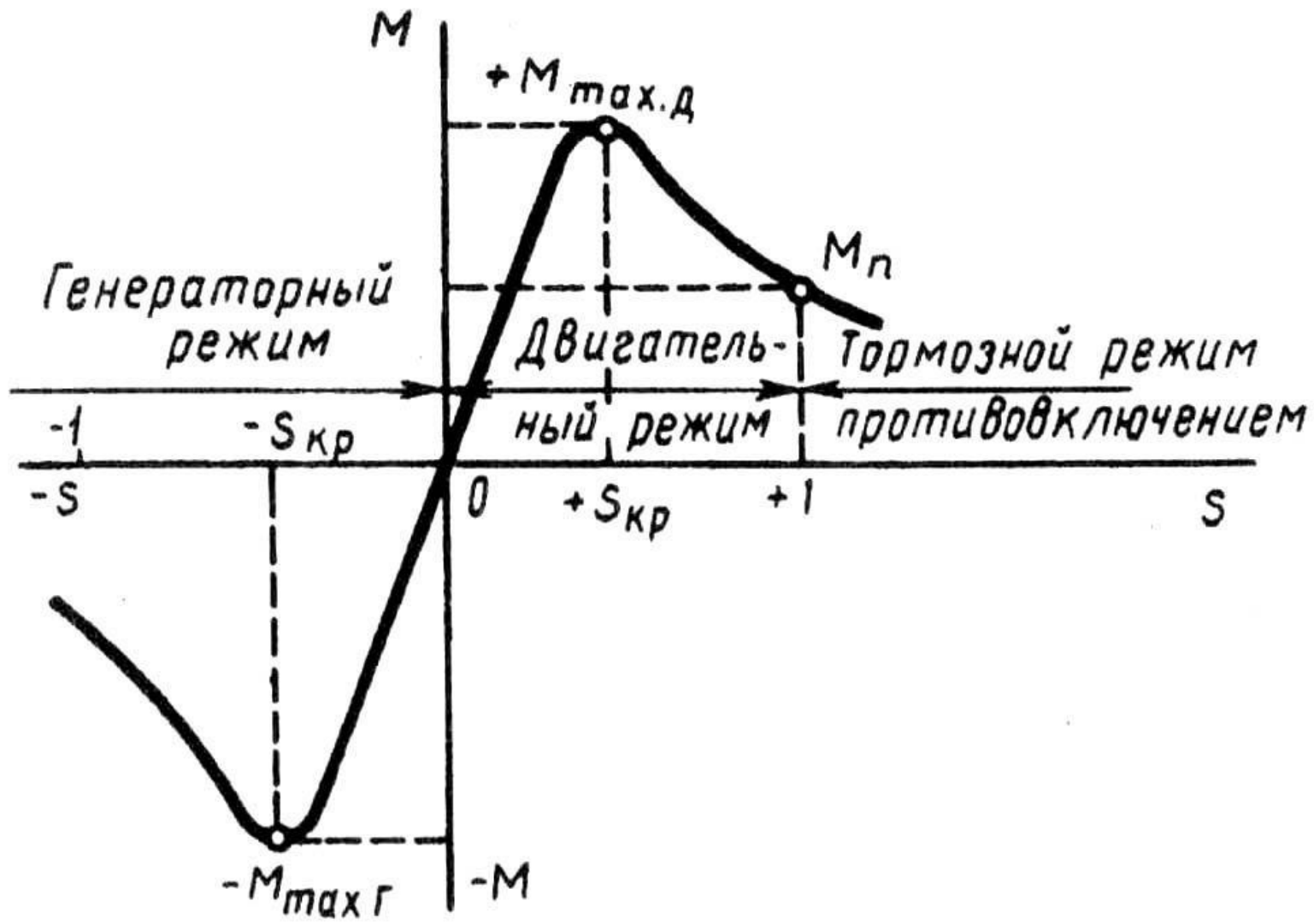
Для определения величины критического скольжения $s_{кр}$, соответствующего максимальному моменту, необходимо взять первую производную от механической характеристики и приравнять ее нулю: $dM / ds = 0$. В результате

$$s_{кр} = \pm r_2' \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

Выражение максимального момента

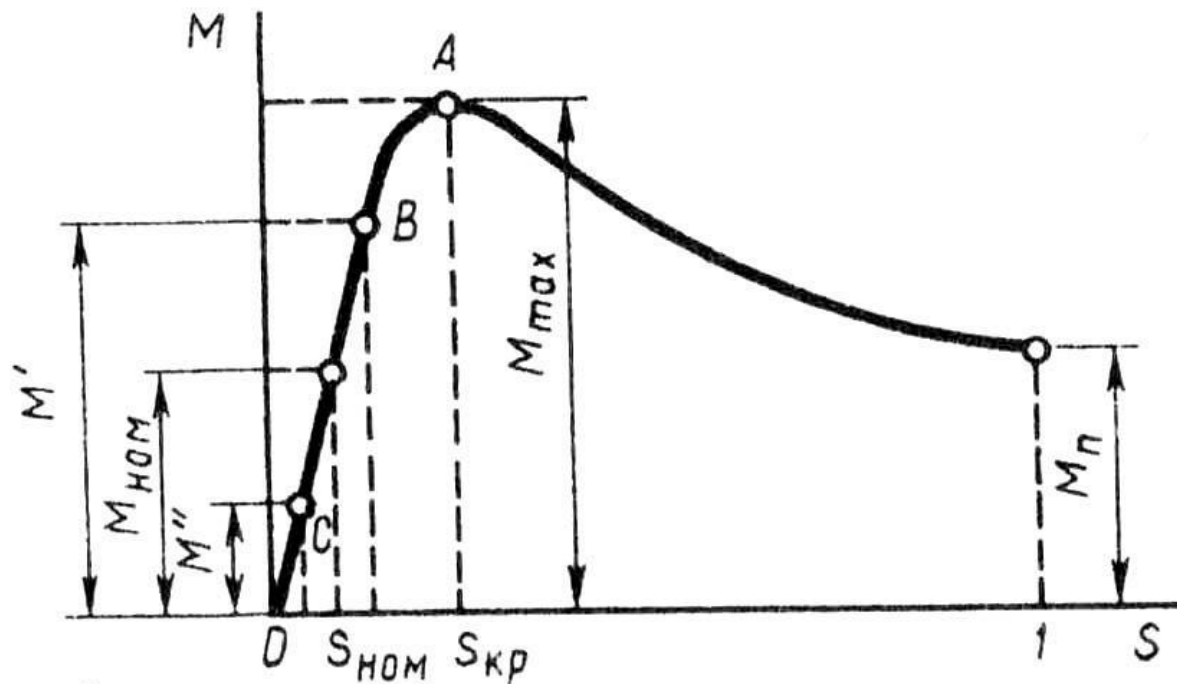
$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

Знак плюс соответствует двигательному, а знак минус — генераторному режиму работы асинхронной машины.



При скольжении $s = 1$, получим выражение пускового момента асинхронного двигателя

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{4\pi f_1 [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2')^2]}$$



58. Электромагнитный момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше мощности на входе (потребляемой мощности) P_1 на величину потерь ΣP

$$P_2 = P_1 - \Sigma P$$

Потери преобразуются в теплоту, что в конечном итоге ведет к нагреву машины.

Потери в электрических машинах разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери P_M в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, происходящими в сердечнике при его перемагничивании.

Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания $P_M = f^\beta$,
где $\beta = 1,3 \div 1,5$.

Частота перемагничивания сердечника статора равна частоте тока в сети ($f = f_1$), а частота перемагничивания сердечника ротора $f = f_2 = f_{1s}$.

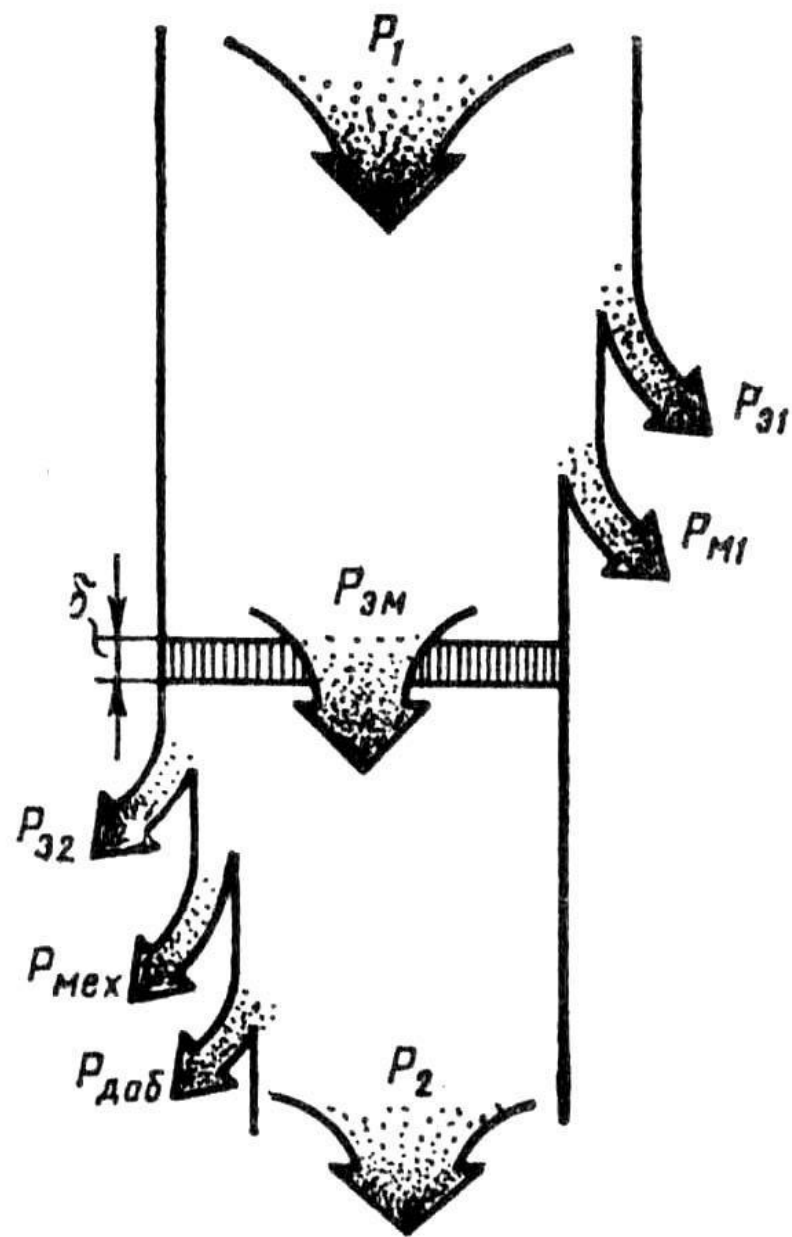
При частоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц при номинальном скольжении $s_{\text{НОМ}} = 1 \div 8$ % частота перемагничивания ротора $f = f_2 = 2 \div 4$ Гц, поэтому магнитные потери в сердечнике ротора настолько малы, что их в практических расчетах не учитывают.

Электрические потери в асинхронном двигателе вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами. Величина этих потерь пропорциональна квадрату тока в обмотке :
электрические потери в обмотке статора

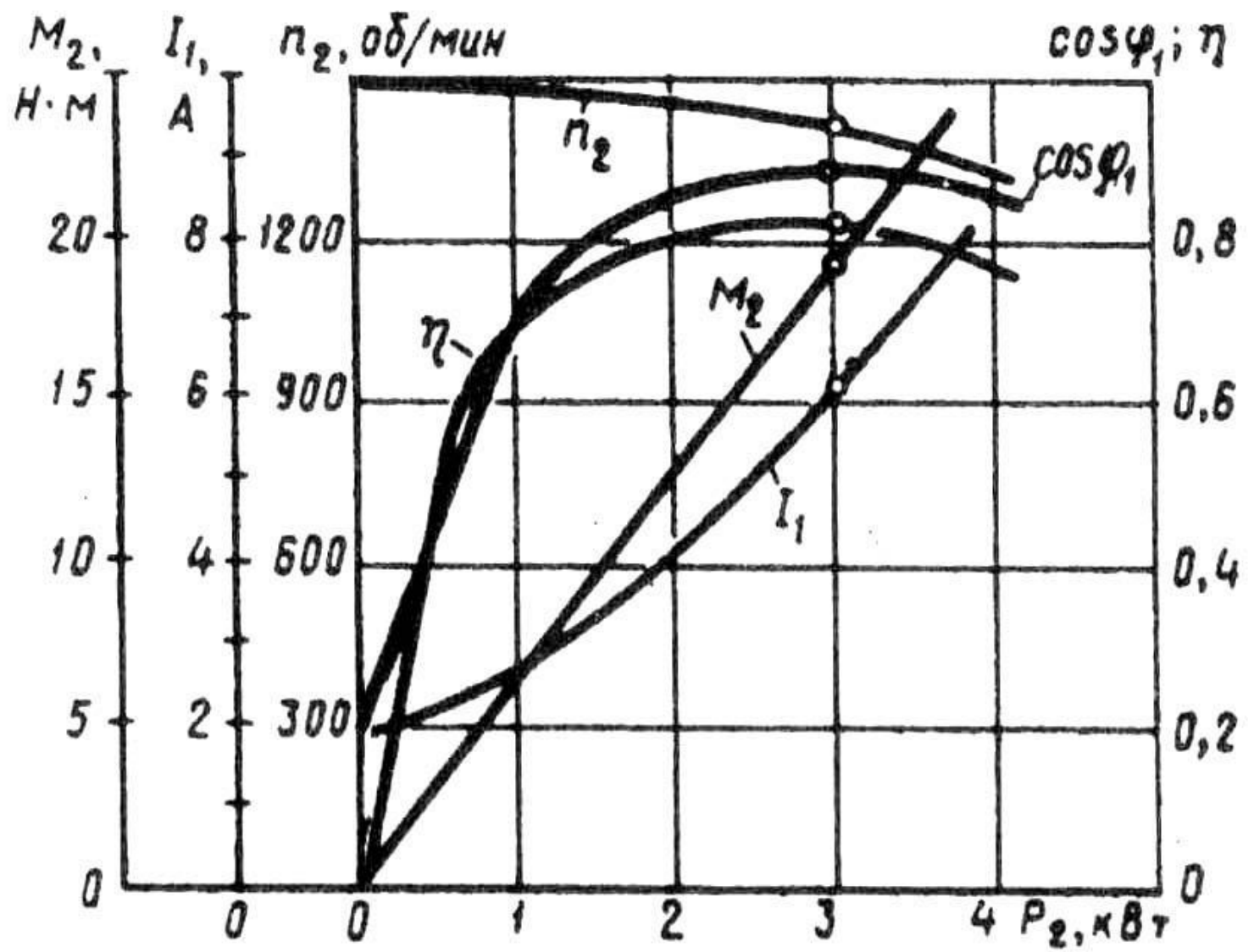
$$P_{\text{э1}} = m_1 I_1^2 r_1 ;$$

электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\text{э2}} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1'^2 r_1'$$



Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ $f_1 = \text{const}$.



59. Пуск и регулирование скорости асинхронных двигателей

Пуск асинхронного двигателя сопровождается переходным процессом, обусловленным переходом ротора и механически связанных с ним частей исполнительного механизма из состояния покоя в состояние равномерного вращения, когда вращающий момент двигателя уравнивается суммой противодействующих моментов, действующих на ротор двигателя.

.

Пусковые свойства двигателя определяются в первую очередь значением **пускового тока** $I_{\text{п}}$ или его кратностью $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$ и значением **пускового момента** $M_{\text{п}}$ или его кратностью $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$.
Двигатель, обладающий хорошими пусковыми свойствами, развивает значительный пусковой момент при сравнительно небольшом пусковом токе.

Однако получение такого сочетания пусковых параметров в асинхронном двигателе сопряжено с определенными трудностями, а иногда оказывается невозможным

В начальный момент пуска скольжение $s = 1$, поэтому, пренебрегая током х.х., пусковой ток равен:

$$I_n = U_1 / \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

Пусковой момент

$$M_n = \frac{U_1^2 r_2' p}{4\pi f_1 [(x_1 + x_2')^2 + (r_1 + r_2')^2]}$$

Улучшить пусковые свойства двигателя можно увеличением активного сопротивления цепи ротора r_2' , так как в этом случае уменьшение пускового тока сопровождается увеличением пускового момента.

В то же время напряжение U_1 по разному влияет на пусковые параметры двигателя: с уменьшением U_1 пусковой ток уменьшается, что благоприятно влияет на пусковые свойства двигателя, но одновременно уменьшается пусковой момент.

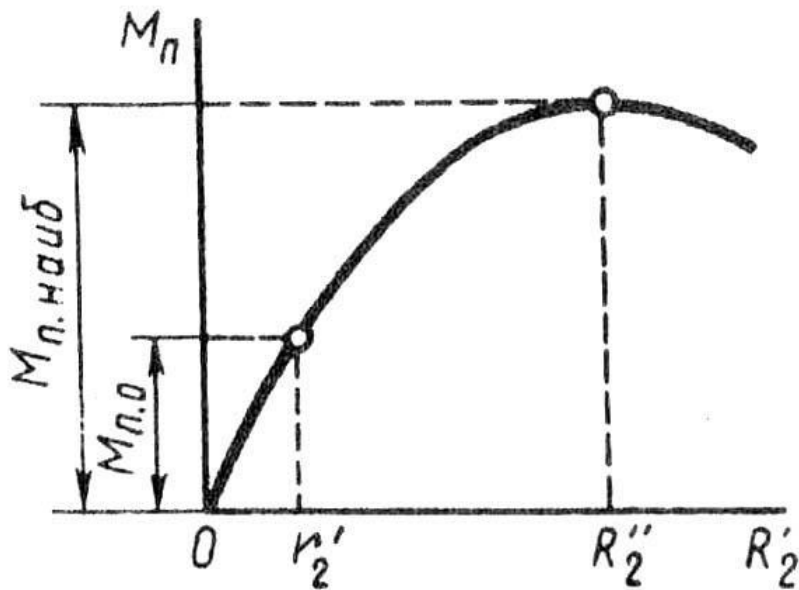
Целесообразность применения того или иного способа улучшения пусковых свойств двигателя определяется конкретными условиями эксплуатации двигателя и требованиями, которые предъявляются к его пусковым свойствам.

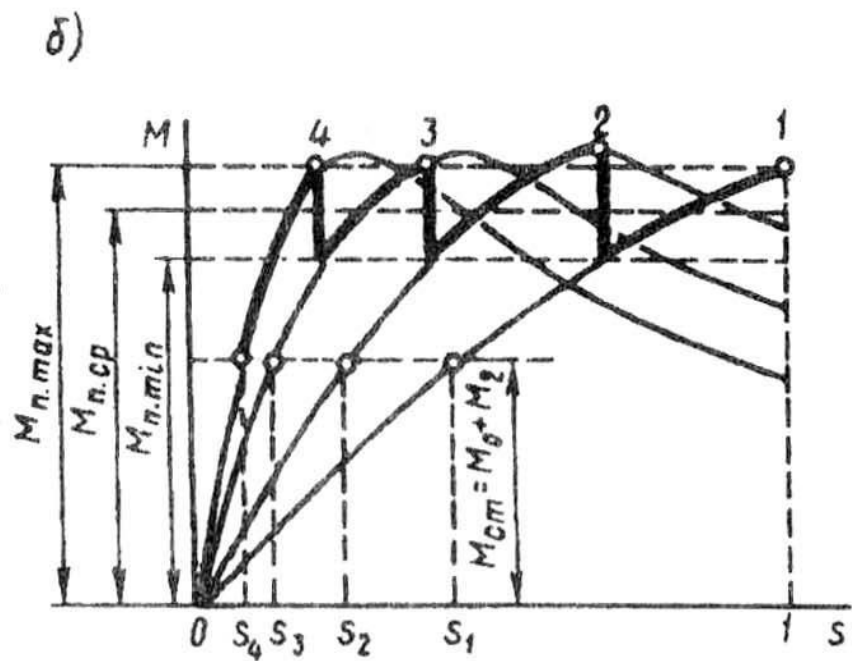
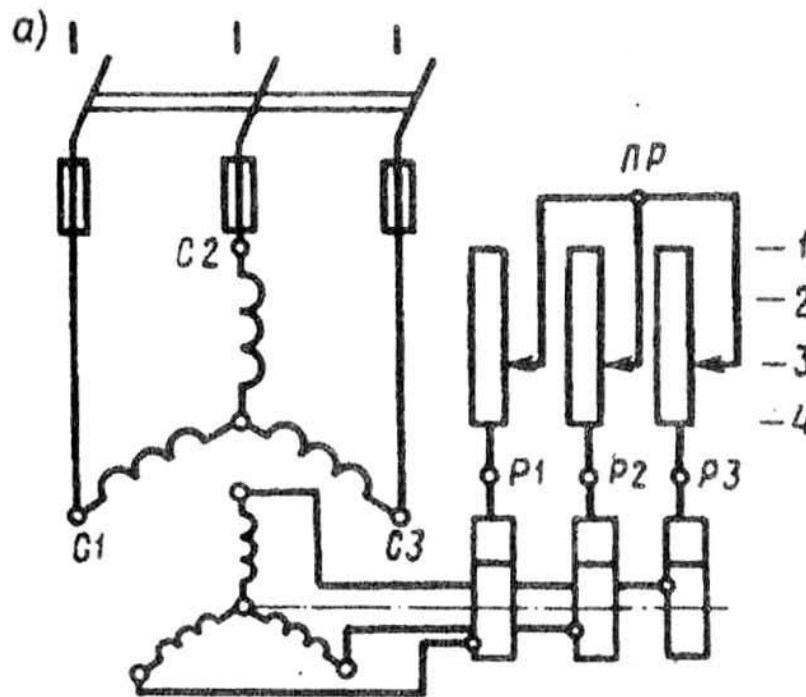
Помимо пусковых значений тока $I_{\text{п}}$ и момента $M_{\text{п}}$ пусковые свойства двигателей оцениваются еще и такими показателями:

1. продолжительность и плавность пуска,
2. сложность пусковой операции,
3. экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потерь энергии в ней).

Пуск двигателей с фазным ротором.

Наличие контактных колец у двигателей с фазным ротором позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат (ПР). При этом активное сопротивление цепи ротора увеличивается до значения $R_2 = r_2' + r_д'$, где $r_д'$ — электрическое сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора.





У асинхронных двигателей с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током: большой пусковой момент при небольшом пусковом токе (в 2—3 раза больше номинального).

Недостатками пусковых свойств двигателей с фазным ротором являются некоторая сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции. Последнее вызывается необходимостью применения в схеме двигателя пускового реостата и непроизводительным расходом электроэнергии при его нагреве.

Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором

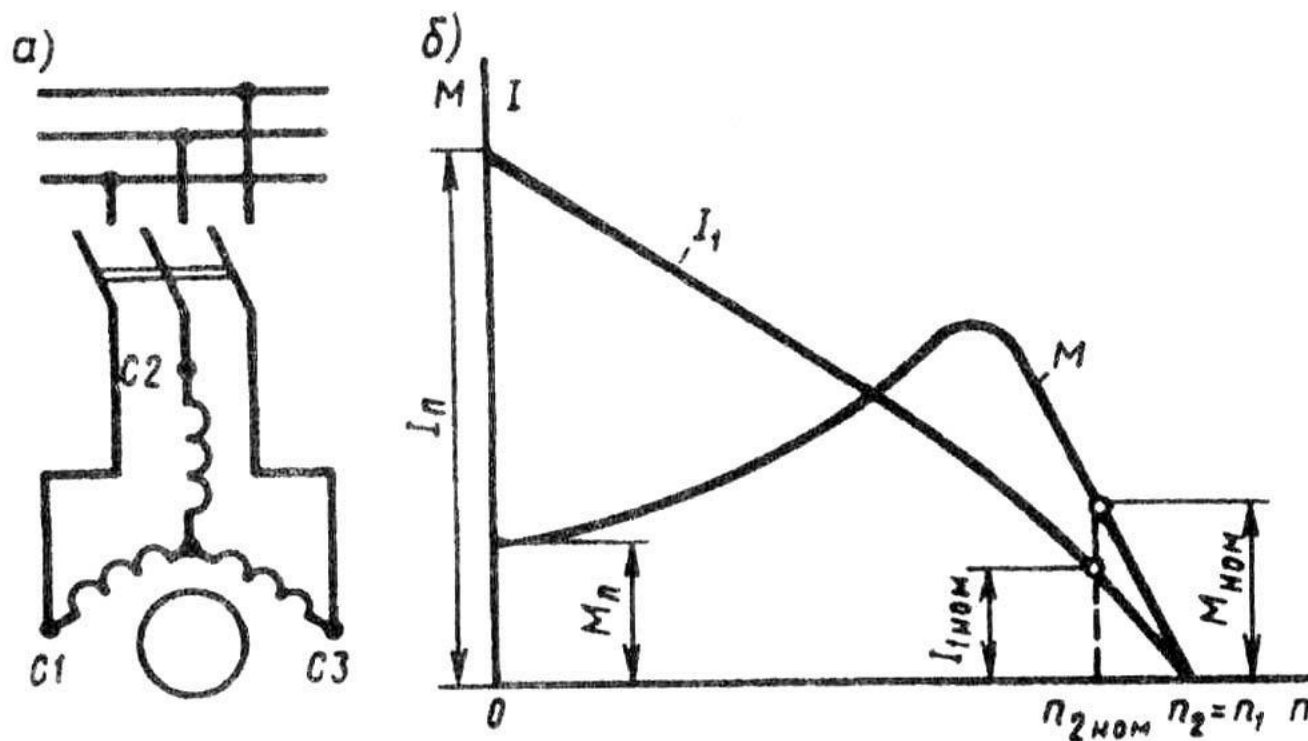
1. Пуск непосредственным включением в сеть.

Этот способ пуска, отличаясь простотой, имеет существенный недостаток: в момент подключения двигателя к сети в обмотке статора возникает большой пусковой ток, в 5—7 раз превышающий номинальный ток двигателя.

При небольшой инерционности исполнительного механизма частота вращения двигателя быстро достигает установившегося значения и пусковой ток также быстро спадает, не вызывая перегрева обмотки статора.

Но такой значительный бросок тока в питающей сети может вызвать в ней заметное падение напряжения.

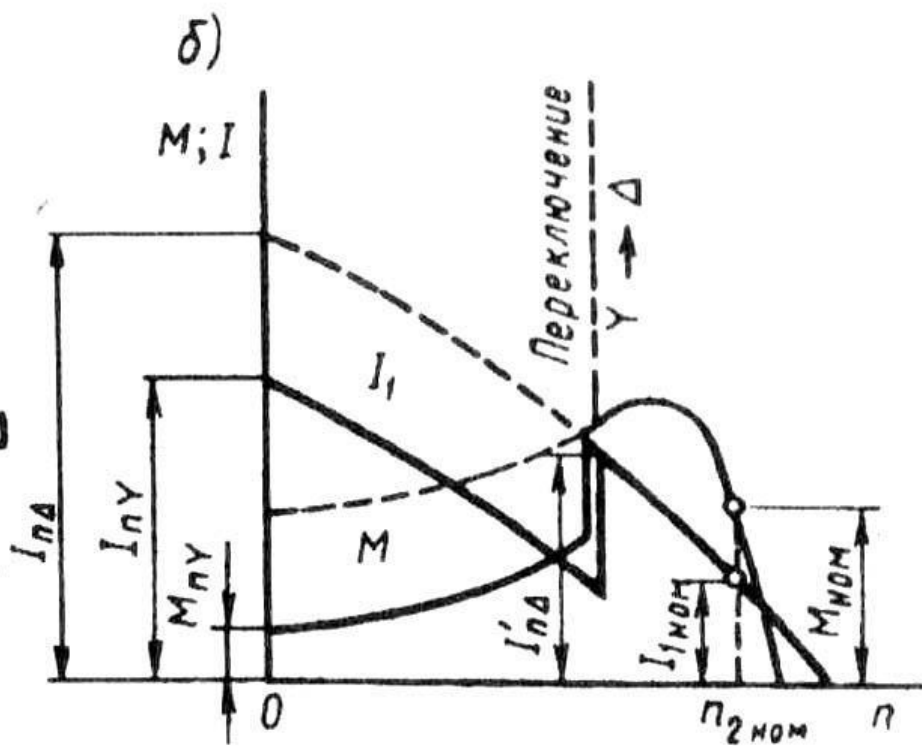
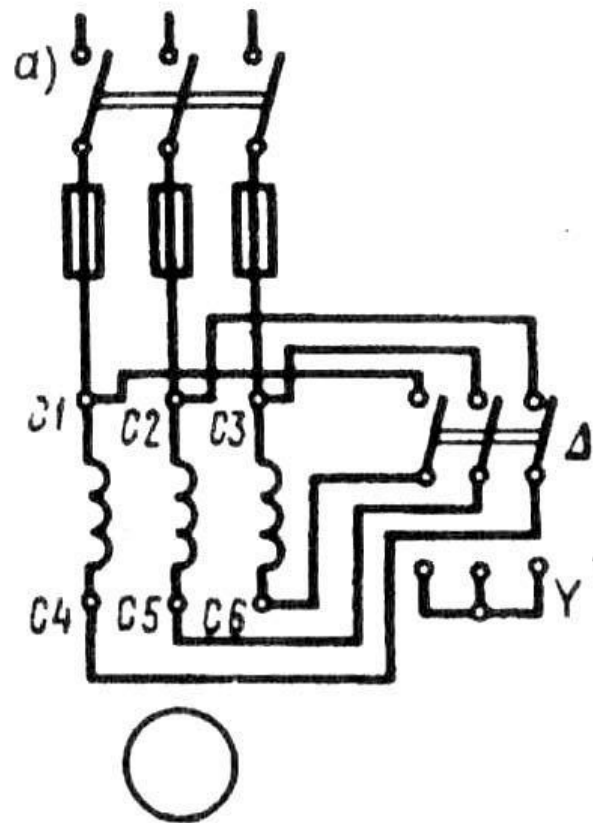
Однако этот способ пуска благодаря своей простоте получил наибольшее применение для двигателей мощностью до 30 кВт



2. Пуск при пониженном напряжении.

Пусковой ток двигателя пропорционален подведенному напряжению U_1 , уменьшение которого вызывает соответствующее уменьшение пускового тока. Существует несколько способов понижения подводимого к двигателю напряжения.

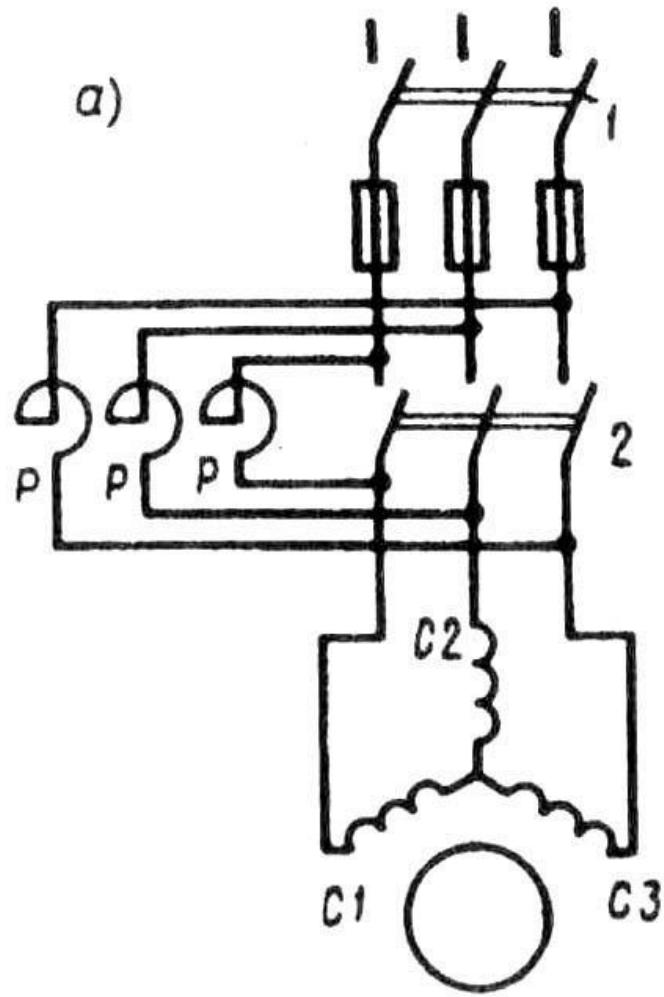
2а. Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмоток статора треугольником, можно применить пуск переключением обмотки статора со звезды на треугольник . В момент подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение «звезда», при котором обмотка статора оказывается соединенной в звезду. При этом фазное напряжение на статоре понижается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается и ток в фазных обмотках двигателя . Кроме того, при соединении обмоток звездой линейный ток равен фазному, в то время как при соединении этих же обмоток треугольником линейный ток больше фазного в раз. Следовательно, переключив обмотки статора звездой, мы добиваемся уменьшения линейного тока в 3 раза.



26.Способ с понижением подводимого к двигателю напряжения посредством реакторов (реактивных катушек — дросселей).

Порядок включения двигателя в этом случае следующий . При разомкнутом рубильнике 2 включают рубильник 7. При этом ток из сети поступает в обмотку статора через реакторы R , на которых происходит падение напряжения . В результате на обмотку статора подается пониженное напряжение.

После разгона ротора двигателя включают рубильник 2 и подводимое к обмотке статора напряжение оказывается номинальным.

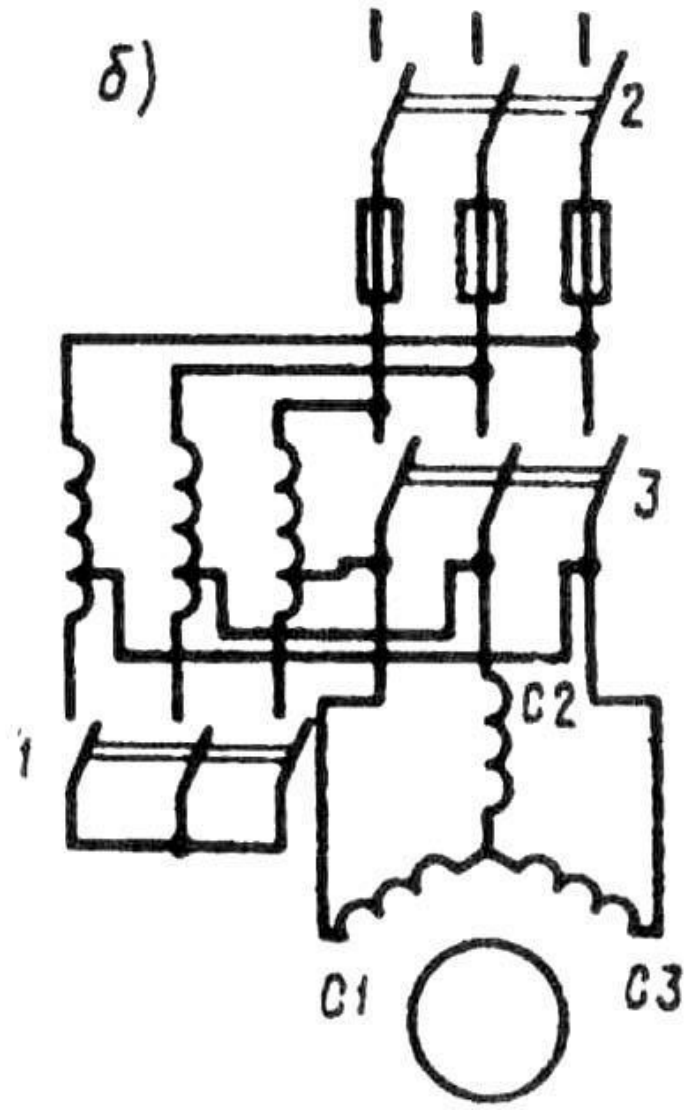


2в. При пуске двигателя через понижающий автотрансформатор вначале замыкают рубильник 1, соединяющий обмотки автотрансформатора звездой, а затем включают рубильник 2 и двигатель оказывается подключенным на пониженное напряжение U'_1 .

При этом пусковой ток двигателя, измеренный на выходе автотрансформатора, уменьшается в K_A раз, где K_A — коэффициент трансформации автотрансформатора.

Что же касается тока в питающей двигатель сети, т. е. тока на входе автотрансформатора, то он уменьшается в K_A^2 раз по сравнению с пусковым током при непосредственном включении двигателя в сеть. Дело в том, что в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в K_A раз и поэтому уменьшение пускового тока при автотрансформаторном пуске составляет $K_A K_A = K_A^2$ раз

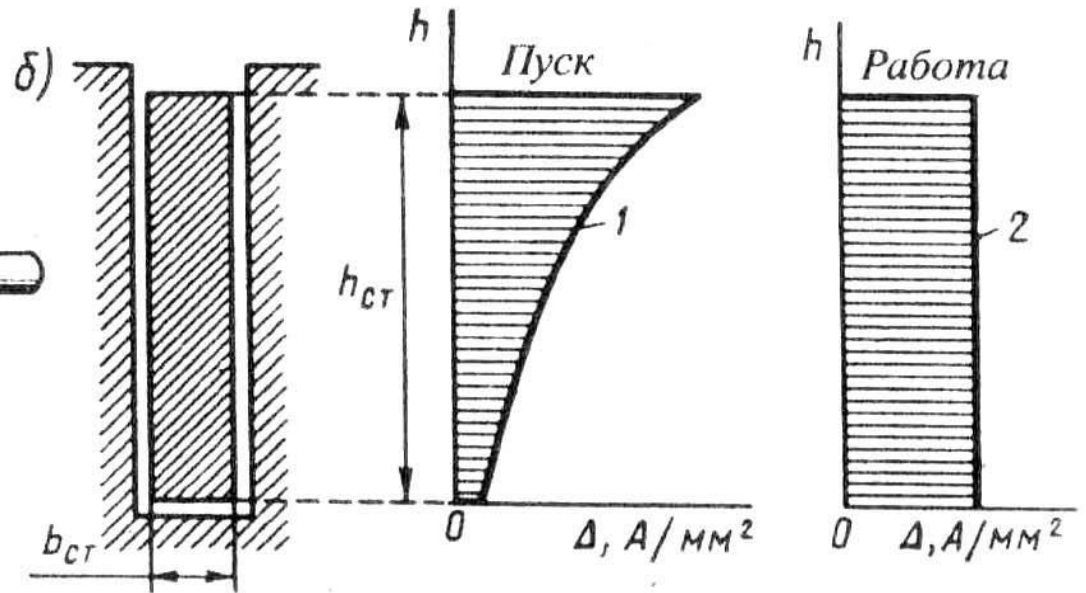
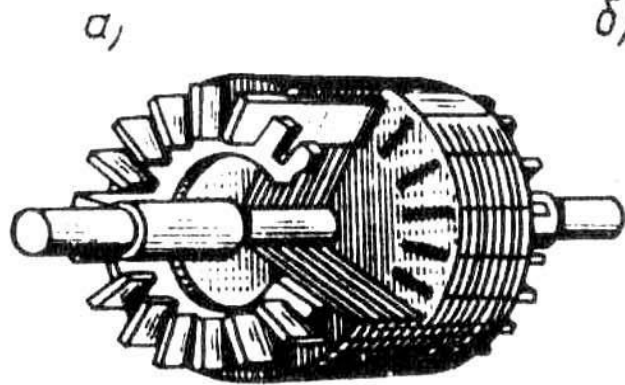
8)



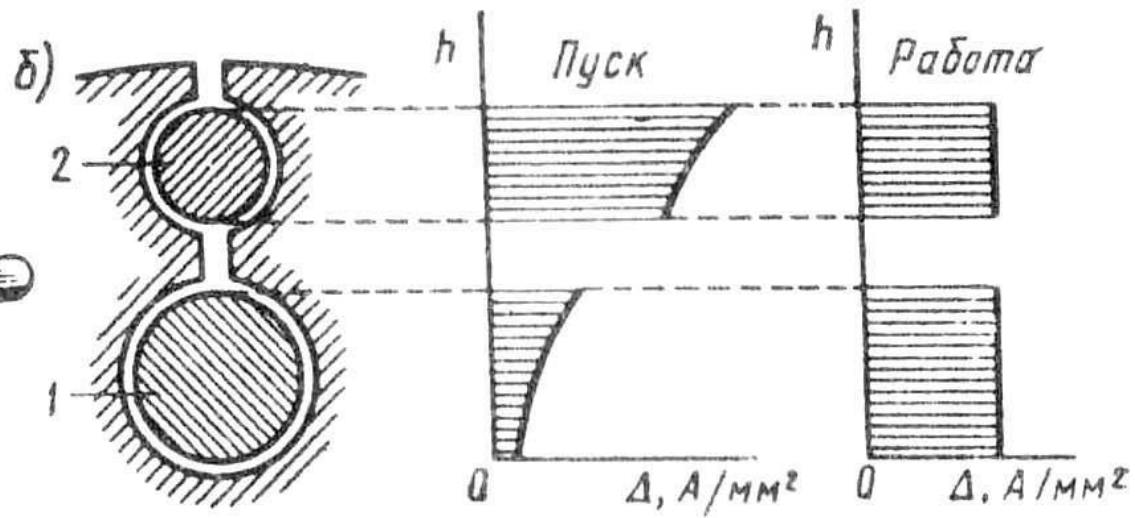
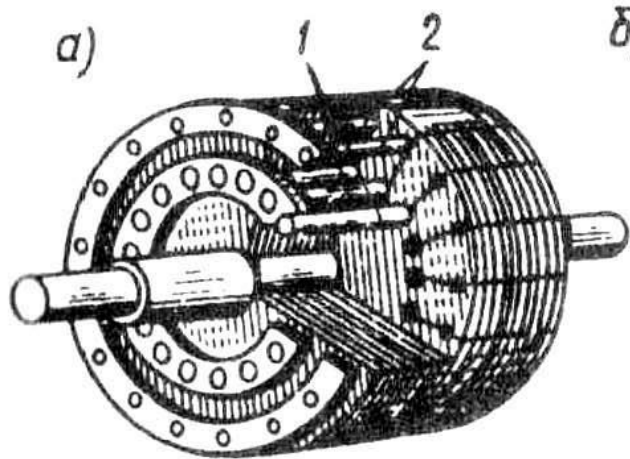
Стремление улучшить пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором привело к созданию асинхронных двигателей с особой конструкцией ротора: двигателей с глубокими пазами на роторе и двигателей с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе.

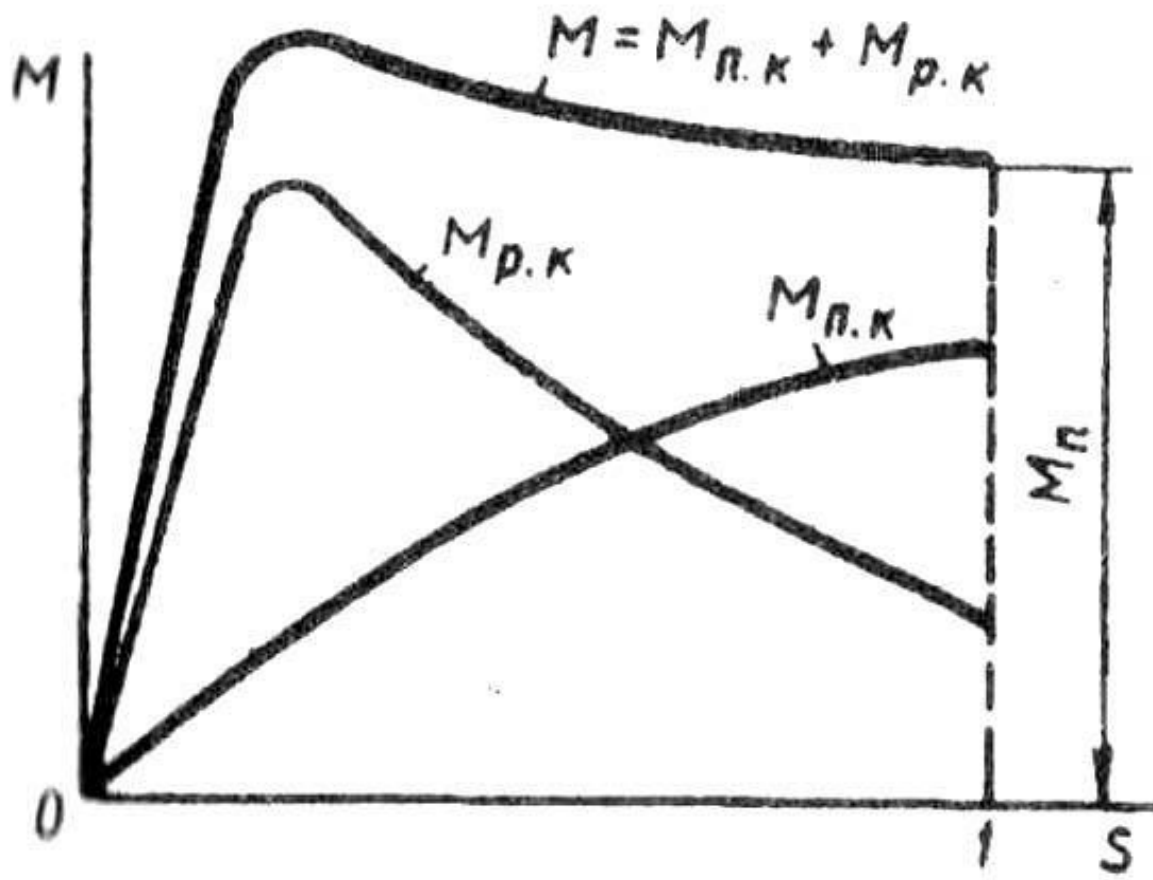
Двигатель с глубокими пазами на роторе. От обычного асинхронного двигателя этот двигатель отличается тем, что у него пазы ротора сделаны в виде узких глубоких щелей, в которые уложены стержни обмотки ротора, представляющие собой узкие полосы. С обеих сторон эти стержни приварены к замыкающим кольцам. Обычно глубокий паз имеет соотношение размеров $h_p / b_p = 9 \div 10$, где h_p , b_p — высота и ширина паза.

В момент включения двигателя, когда частота тока в роторе имеет наибольшее значение ($f_2 = f_1$), индуктивное сопротивление нижней части каждого стержня значительно больше верхней. Объясняется это тем, что нижняя часть стержня сцеплена с большим числом магнитных силовых линий поля рассеяния



Еще более лучшими пусковыми свойствами обладают асинхронные двигатели с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе : рабочей клеткой 1, стержни которой расположены в нижнем слое, и пусковой клеткой 2, стержни которой расположены в верхнем слое, ближе к воздушному зазору.





Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

Частота вращения ротора асинхронного двигателя

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

Из этого выражения следует, что частоту вращения ротора асинхронного двигателя можно регулировать изменением какой - либо из трех величин:

- 1.скольжения s ,
- 2.частоты тока в обмотке статора f_1 ,
- 3.числа полюсов в обмотке статора $2p$.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения s возможно тремя способами:

- 1.изменением подводимого к обмотке статора напряжения,
- 2.нарушением симметрии этого напряжения,
- 3.изменением активного сопротивления обмотки ротора.

Регулировка частоты вращения изменением скольжения происходит только в нагруженном двигателе.

В режиме холостого хода скольжение, а следовательно, и частота вращения остаются практически неизменными.

Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, а также его максимальное и пусковое значения пропорциональны квадрату напряжения, подводимого к обмотке статора: $M \propto U_1^2$.

В то же время значение критического скольжения не зависит от напряжения U_1 .

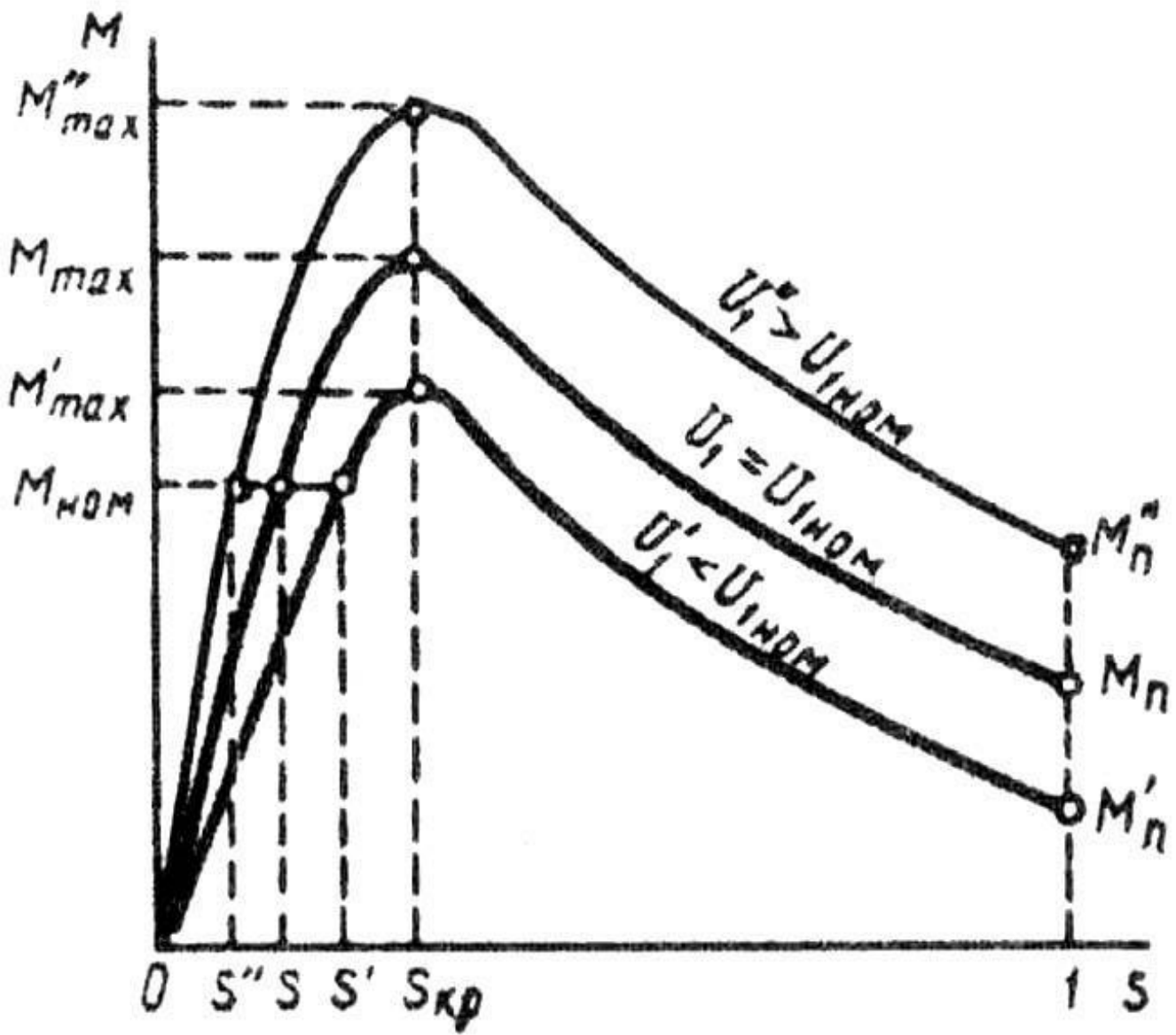
С уменьшением напряжения сети частота вращения ротора снижается (скольжение увеличивается). Двигатель не может нести даже номинальную нагрузку.

Напряжение U_1 влияет на значение максимального момента $M_{1\max}$, а также на перегрузочную способность двигателя $\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}}$.

Так, если напряжение U_1 понизилось на 30%, т. е. $U_1 = 0,7 U_{1\text{ном}}$, то максимальный момент асинхронного двигателя уменьшится более чем вдвое:

$$M'_{\max} = 0,7^2 M_{\max} = 0,49 M_{\max}.$$

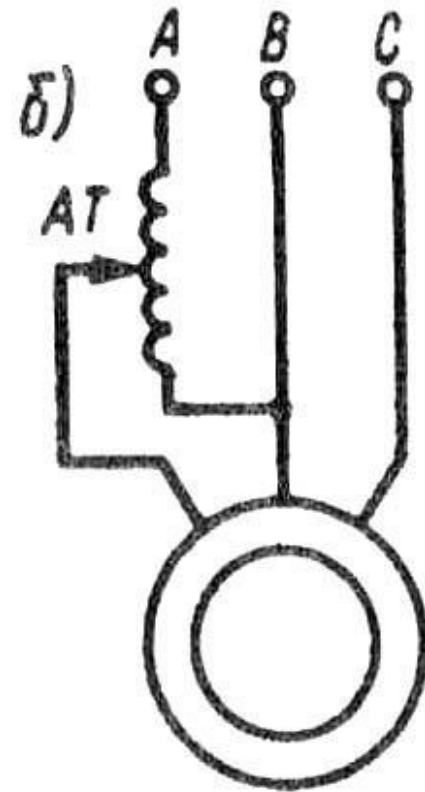
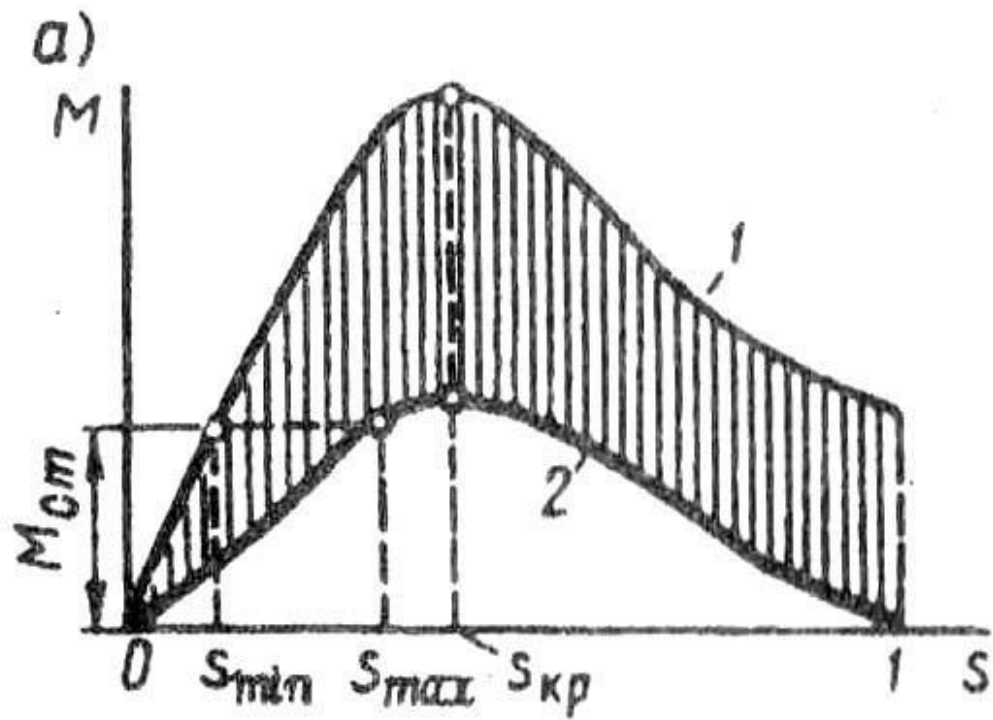
На сколько же уменьшится перегрузочная способность двигателя. Если, например, при номинальном напряжении сети перегрузочная способность $\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2$, то при понижении напряжения на 30% перегрузочная способность двигателя $\lambda' = M'_{\max} / M_{\text{ном}} = 0,49 M_{\max} / M_{\text{ном}} = 0,49 \cdot 2 = 0,98$, т.е. двигатель не в состоянии нести даже номинальную нагрузку.



Регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения.

При нарушении симметрии подводимой к двигателю трехфазной системы напряжения вращающееся поле статора становится эллиптическим. При этом поле приобретает обратную составляющую (встречное поле), которая создает момент $M_{\text{обр}}$, направленный встречно вращающему моменту $M_{\text{пр}}$. В итоге результирующий электромагнитный момент двигателя уменьшается ($M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$).

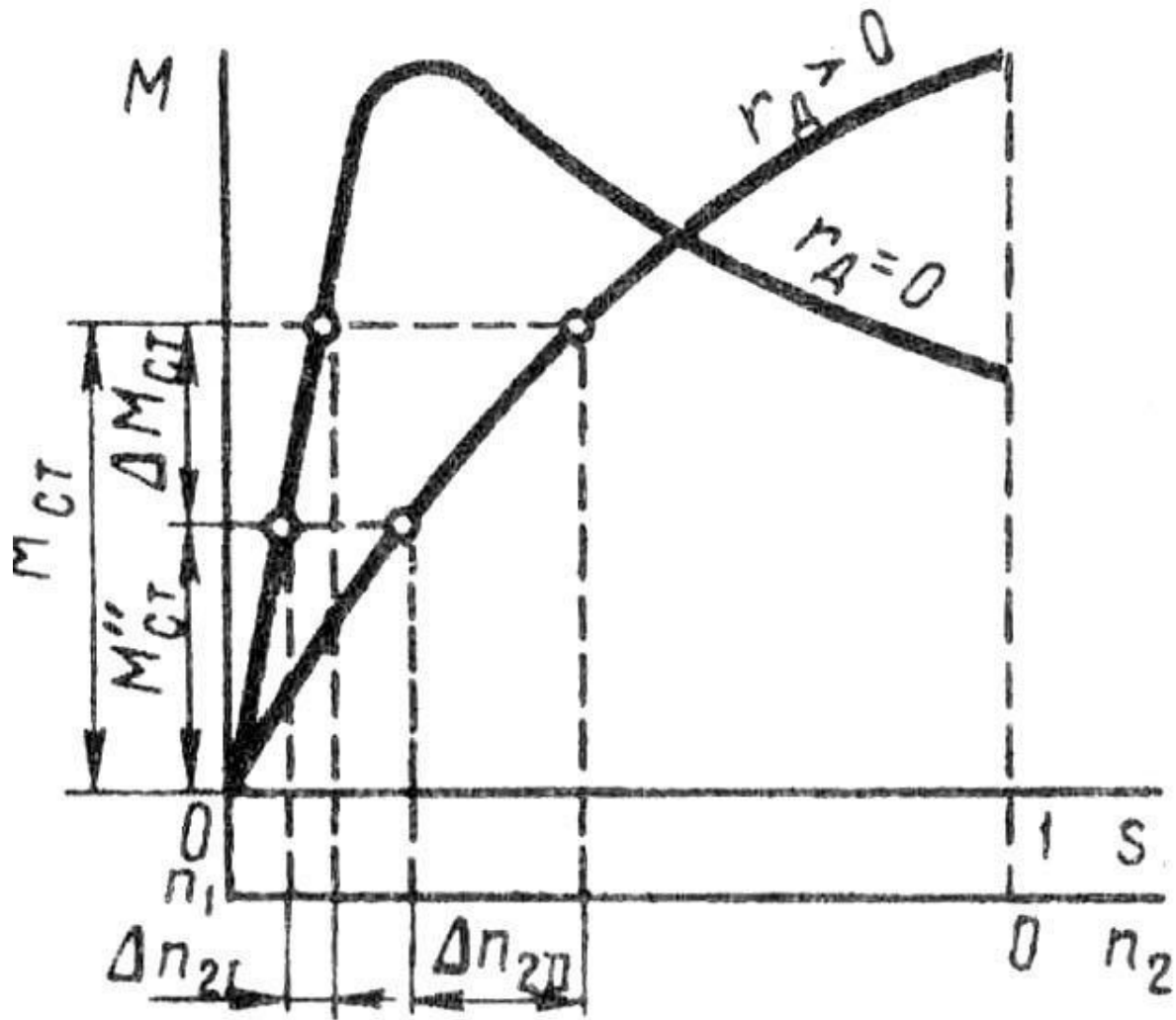
Механические характеристики двигателя при этом способе регулирования располагаются в зоне между характеристикой при симметричном напряжении и характеристикой при однофазном питании двигателя—пределом несимметрии трехфазного напряжения.

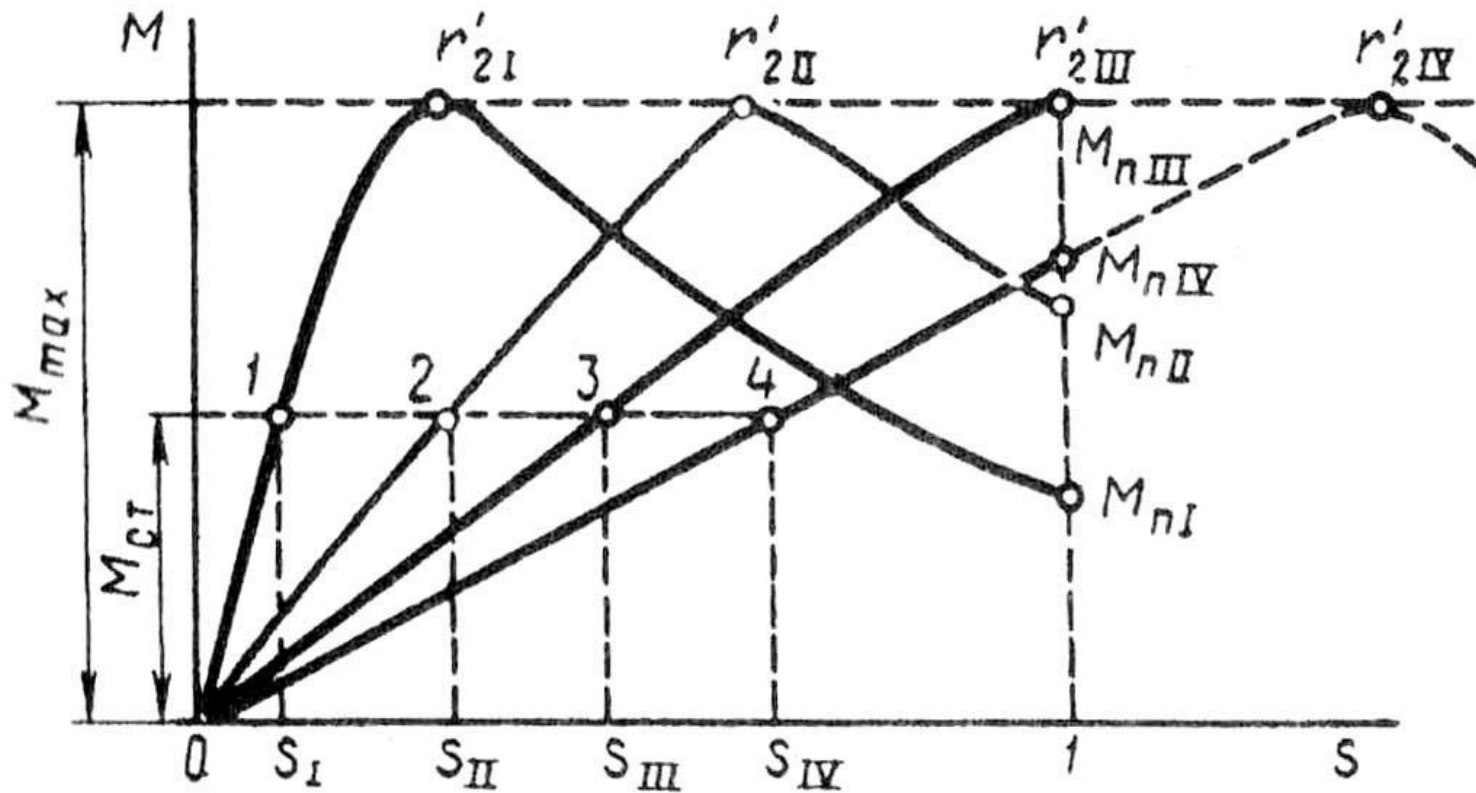


Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора.

Этот способ регулирования частоты вращения возможен лишь в двигателях с фазным ротором. Механические характеристики асинхронного двигателя, построенные для различных значений активного сопротивления цепи ротора, показывают, что с увеличением активного сопротивления ротора возрастает скольжение, соответствующее заданному нагрузочному моменту.

Частота вращения двигателя при этом уменьшается.



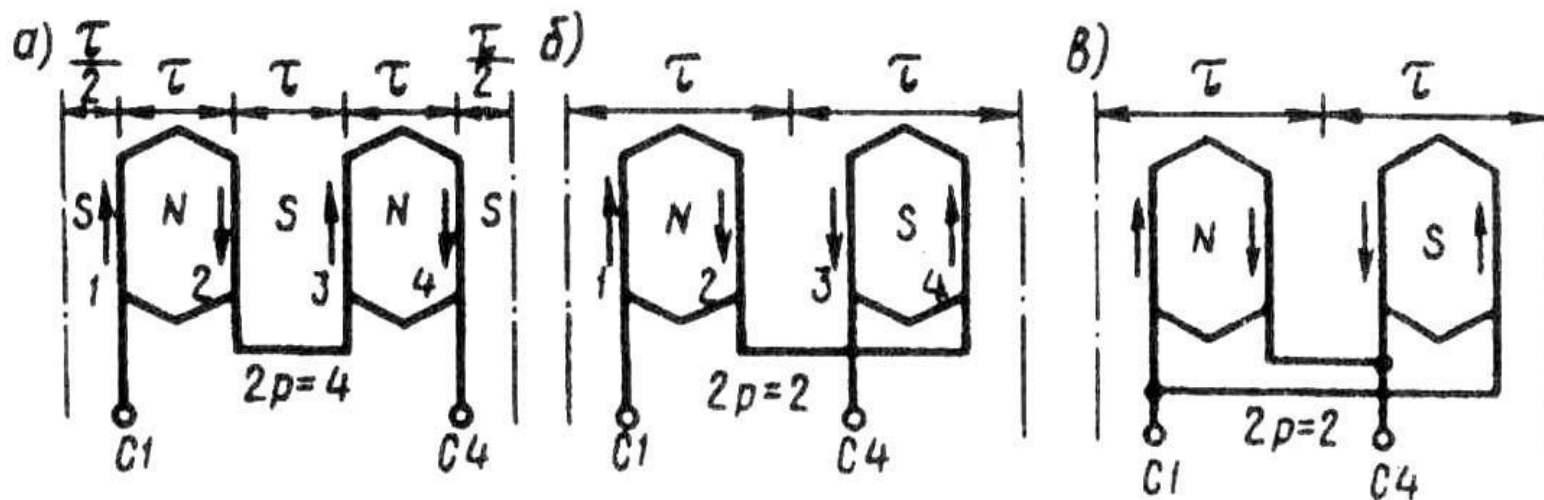


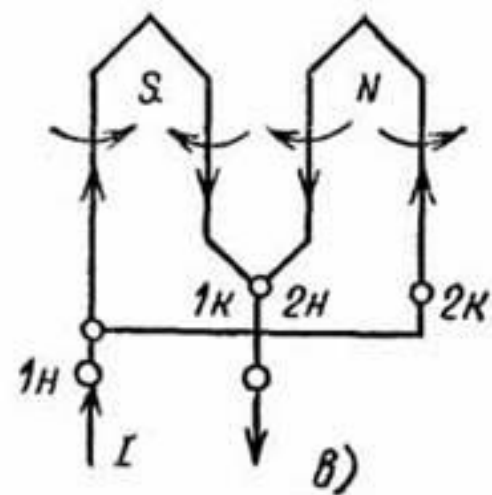
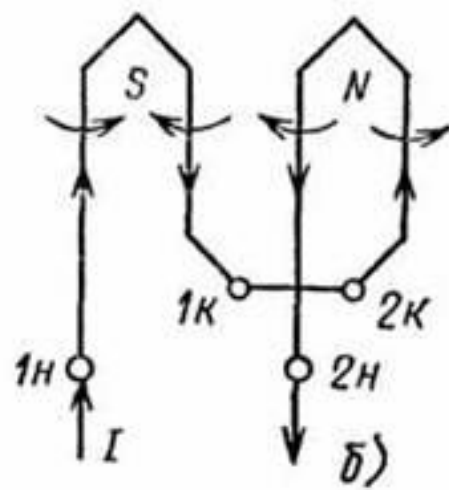
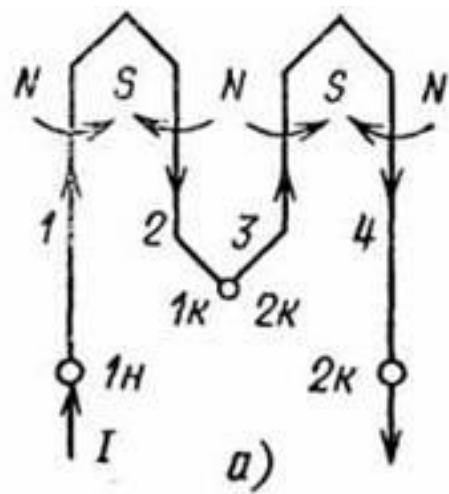
Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора.

Этот способ регулирования частоты вращения дает ступенчатую регулировку. Так, при $f_1 = 50$ Гц и $p = 1 \div 5$ пар полюсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин.

Изменять число полюсов в обмотке статора можно либо укладкой на статоре двух обмоток с разным числом полюсов, либо укладкой на статоре одной обмотки, конструкция которой позволяет путем переключения катушечных групп получать различное число полюсов. Последний способ получил наибольшее применение.

Принцип преобразования четырехполюсной обмотки в двухполюсную (для одной фазы) : при последовательном согласном соединении двух катушек возбуждаемое ими магнитное поле образует четыре полюса; при последовательном встречном или параллельном соединениях - два полюса.





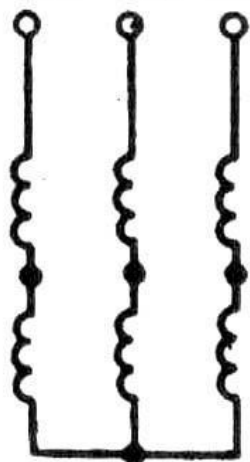
Возможны два режима работы асинхронных двигателей с полюсно переключаемыми обмотками:

1. режим постоянного момента - при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую вращающий момент на валу двигателя M_2 остается неизменным, а мощность P_2 изменяется пропорционально частоте вращения n_2

2. режим постоянной мощности - при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую мощность P_2 остается примерно одинаковой, а момент на валу M_2 изменяется соответственно изменению частоты вращения n_2

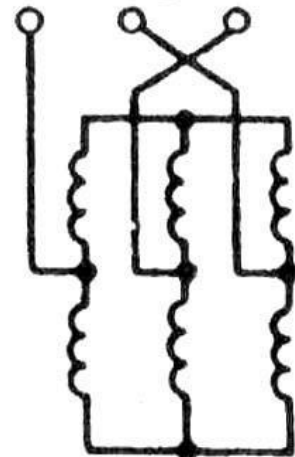
a)

8C1 8C2 8C3

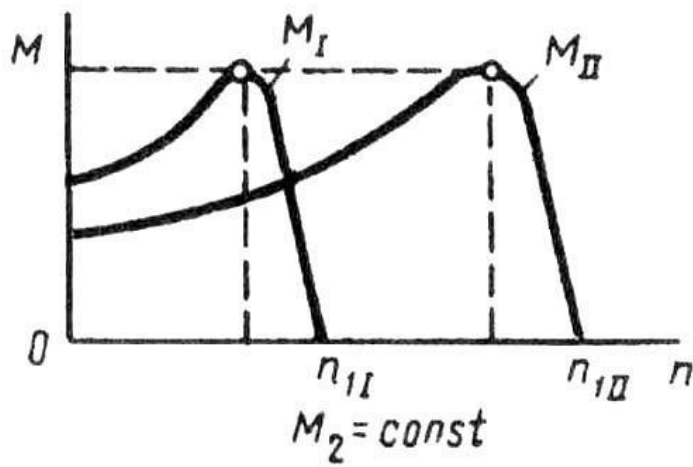


$$2p_I = 8$$

4C1 4C2 4C3

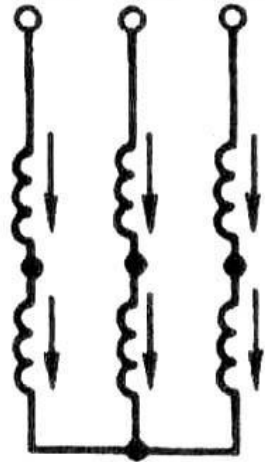


$$2p_{II} = 4$$



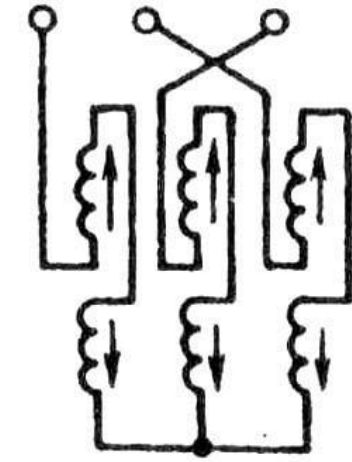
δ)

8C1 8C2 8C3

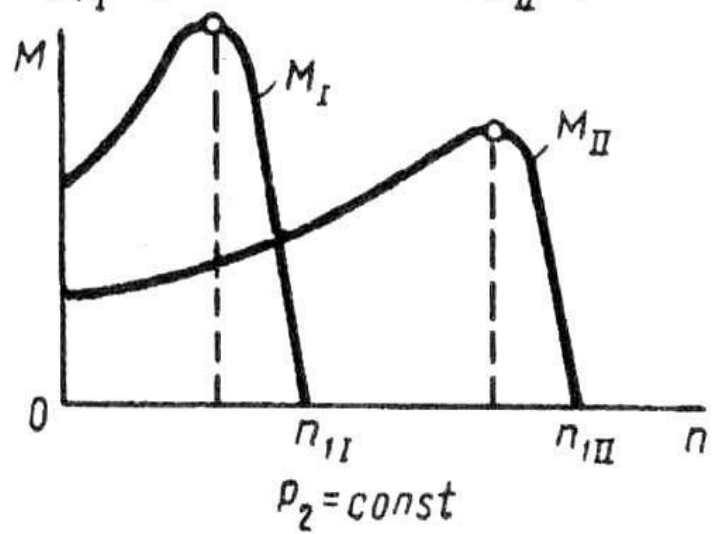


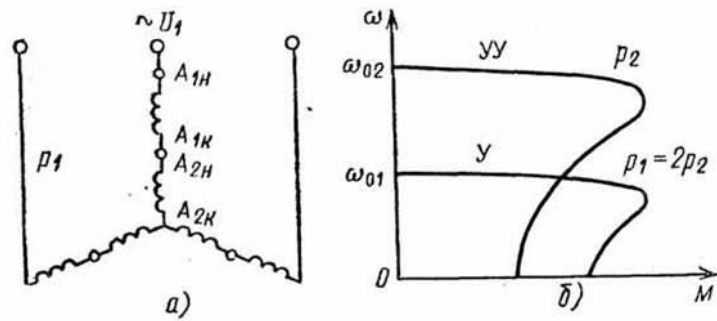
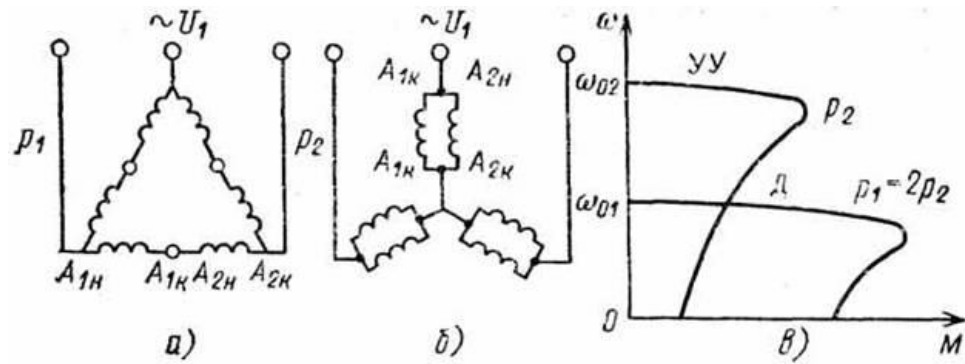
$$2p_I = 8$$

4C1 4C2 4C3



$$2p_{II} = 4$$





Регулирование частоты вращения изменением частоты тока в статоре.

Этот способ регулирования (частотное регулирование) основан на изменении синхронной частоты вращения $n_1 = f_1 \cdot 60 / p$.

Для осуществления этого способа регулирования необходим источник питания двигателя переменным током с регулируемой частотой. В качестве таких источников могут применяться электромашинные или полупроводниковые преобразователи частоты (ПЧ).

Чтобы регулировать частоту вращения, достаточно изменить частоту тока f_1 . Но с изменением частоты будет изменяться и максимальный момент. Поэтому для сохранения неизменными перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя на требуемом уровне необходимо одновременно с изменением частоты f_1 изменять и напряжение питания U_1 .

Характер одновременного изменения f_1 и U_1 зависит от закона изменения момента нагрузки и определяется уравнением

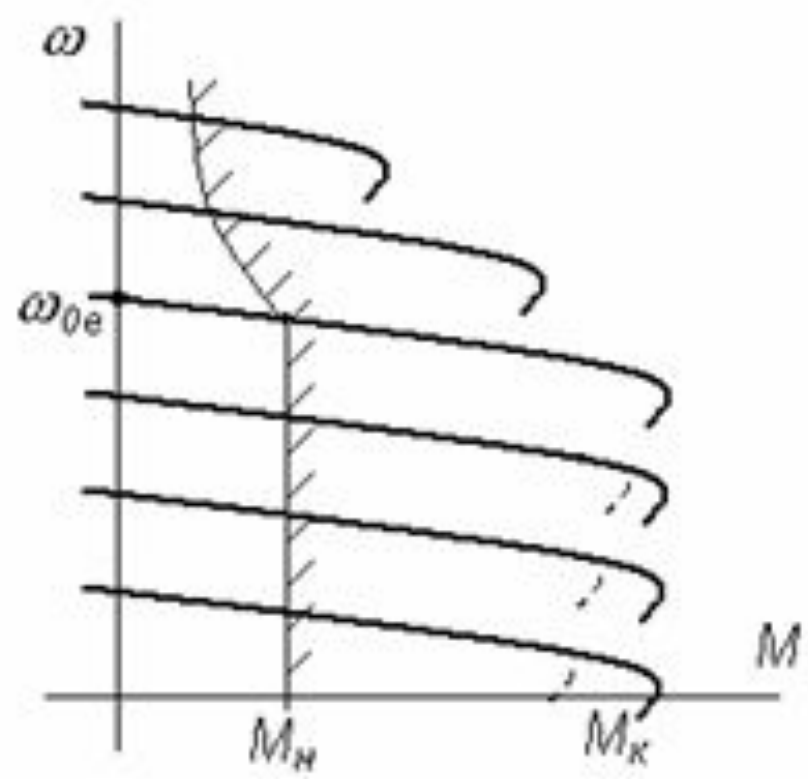
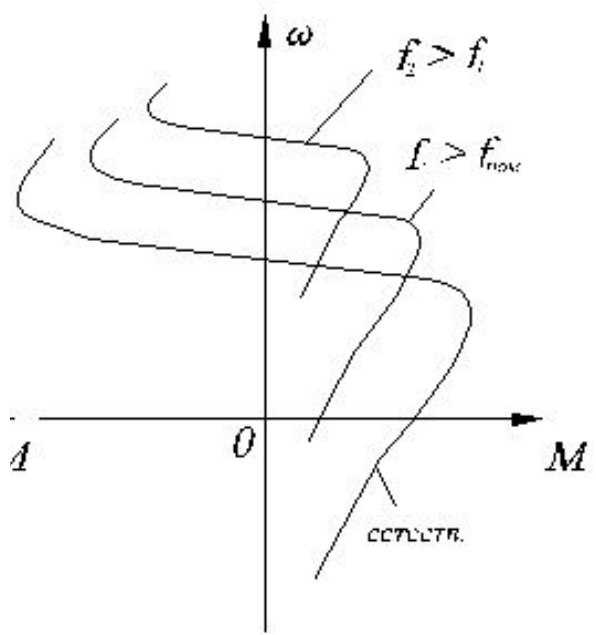
$$U'_1/U_1 = (f'_1/f_1) \sqrt{M'/M}$$

где U_1 и M — напряжение и момент при частоте f_1 ; U'_1 и M' -напряжение и момент при частоте f'_1 .

Если частота вращения двигателя регулируется при условии постоянства момента нагрузки ($M = M' = \text{const}$), то подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты тока:

$$U'_1 = U_1 f'_1/f_1$$

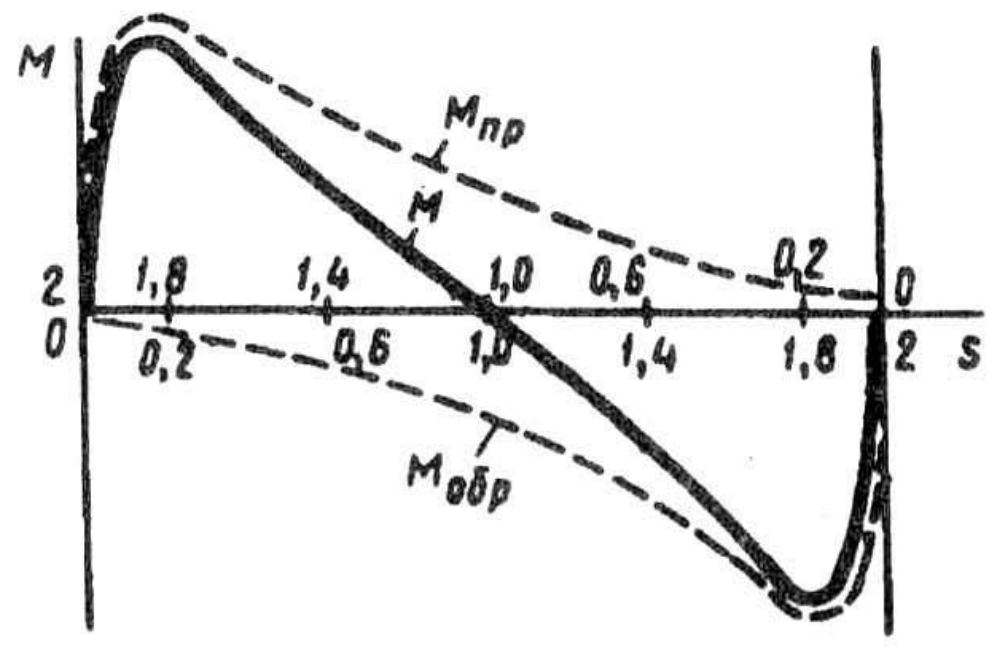
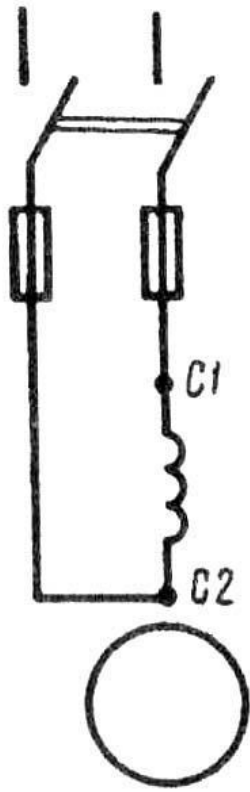
Если же регулирование производится при условии постоянства мощности двигателя ($P_{эм} = M\omega_1 = \text{const}$), то подводимое напряжение следует изменять в соответствии с законом $U'_1 = U_1 \sqrt{f'_1/f_1}$



**60. Однофазные,
конденсаторные и
специальные
асинхронные машины**

По своему устройству однофазный асинхронный двигатель аналогичен трехфазному и состоит из статора, в пазах которого уложена однофазная обмотка, и короткозамкнутого ротора.

Особенность работы однофазного асинхронного двигателя заключается в том, что при включении однофазной обмотки статора С1—С2 в сеть МДС статора создает не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток с амплитудой Φ_{\max} , изменяющейся от $+\Phi_{\max}$ до $-\Phi_{\max}$. При этом ось магнитного потока остается неподвижной в пространстве.



Однофазный асинхронный двигатель не создает пускового момента. Чтобы этот момент появился, необходимо во время пуска двигателя создать в нем вращающееся магнитное поле.

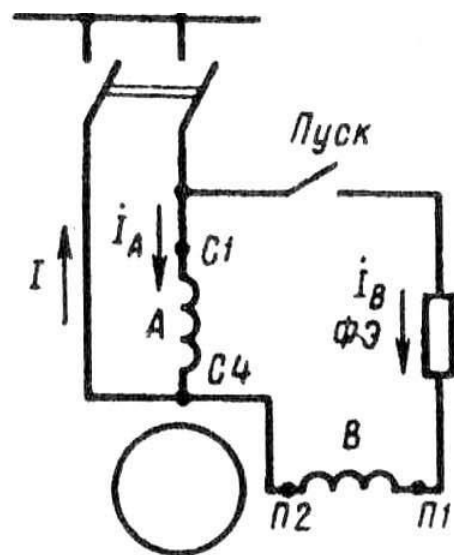
С этой целью на статоре двигателя помимо рабочей обмотки А применяют еще одну обмотку — пусковую В.

Эти обмотки располагают на статоре обычно так, чтобы их оси были смещены относительно друг друга на 90 эл. град.

Кроме того, токи в обмотках статора должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга.

Для этого в цепь пусковой обмотки включают фазосмещающий элемент (ФЭ), в качестве которого могут быть применены активное сопротивление, индуктивность или емкость.

По достижении частотой вращения значения близкого к номинальному, пусковую обмотку В отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска двигатель является **двухфазным**, а во время работы — **однофазным**.



Для получения вращающегося магнитного поля посредством двух обмоток на статоре, смещенных относительно друг друга на 90 эл. град, необходимо соблюдать следующие условия:

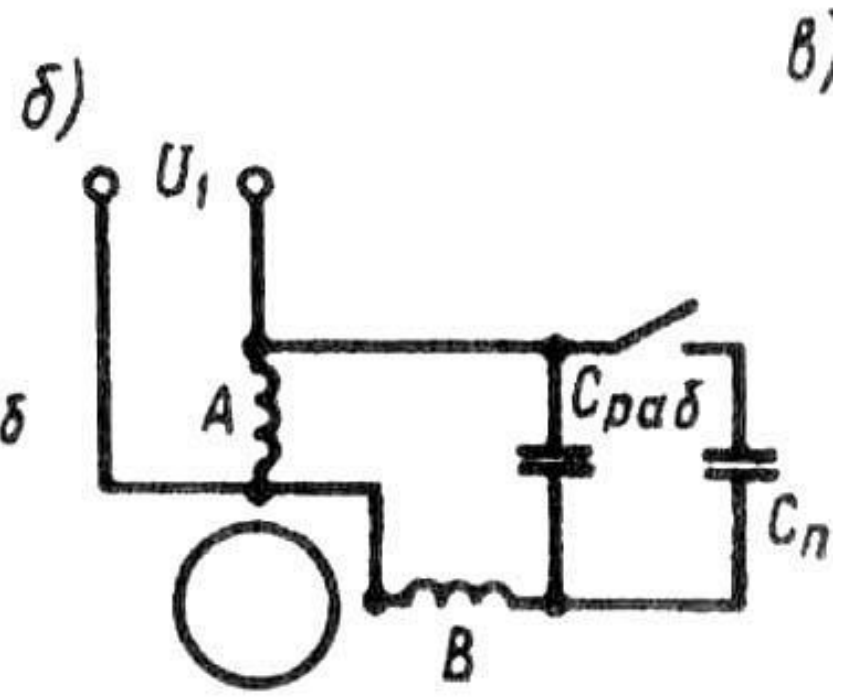
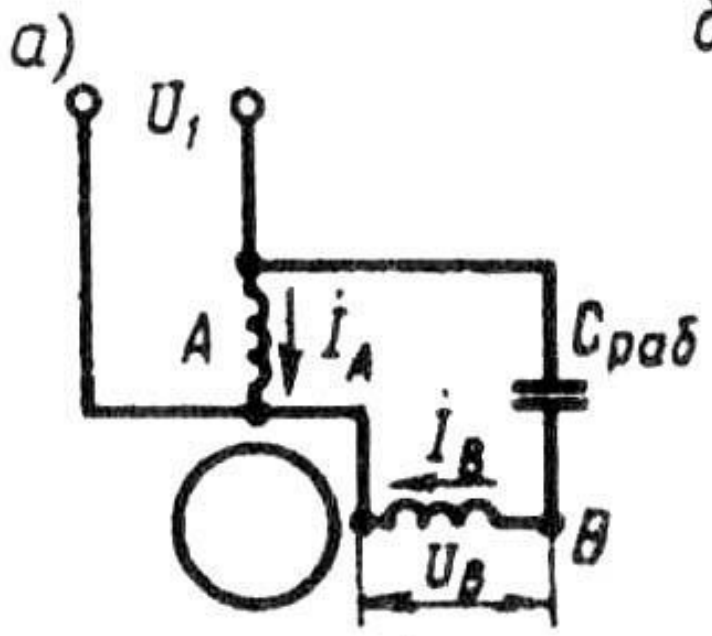
а) МДС рабочей и пусковой обмоток должны быть и равны и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град;

б) токи в обмотках статора должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° .

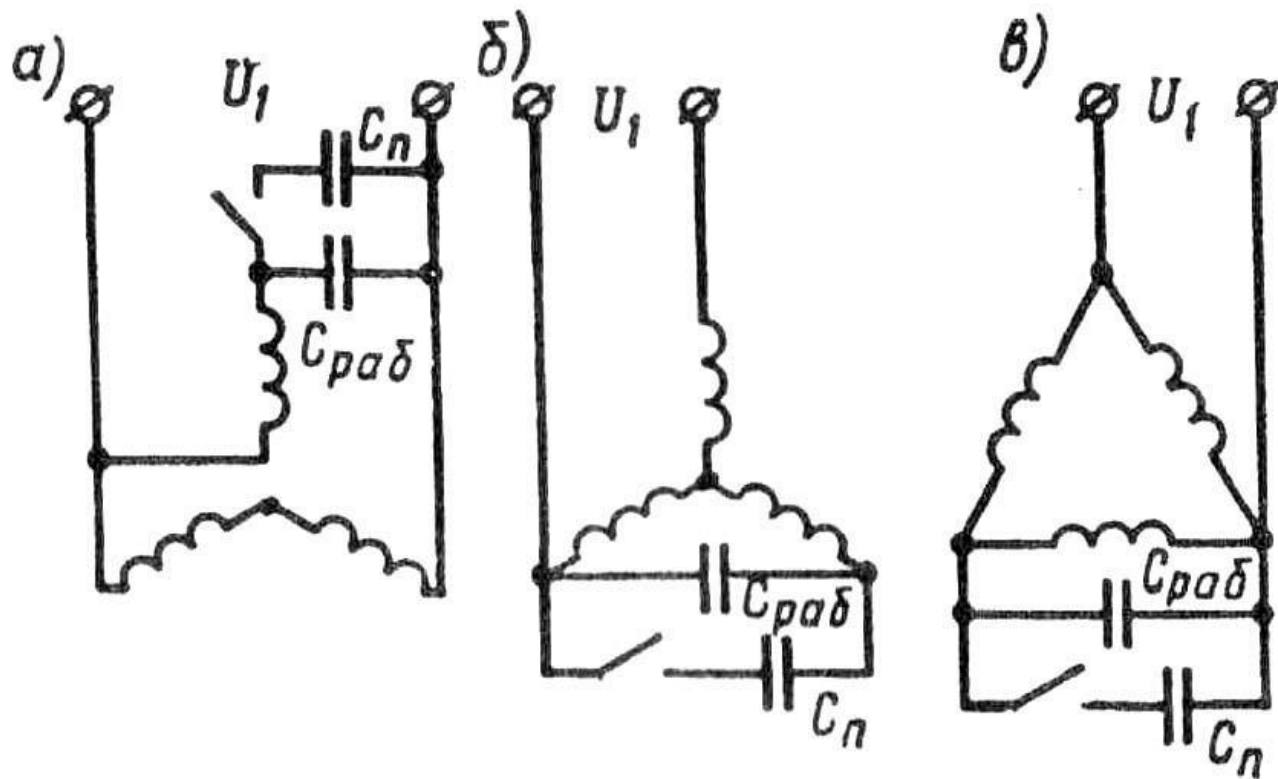
При строгом соблюдении указанных условий вращающееся поле статора является круговым, что соответствует наибольшему вращающему моменту. При частичном нарушении какоголибо из условий поле статора становится эллиптическим, содержащим обратную составляющую. Обратная составляющая поля создает тормозной момент и ухудшает пусковые свойства двигателя.

Асинхронный конденсаторный двигатель имеет на статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну из обмоток — главную — включают непосредственно в однофазную сеть, а другую — вспомогательную — включают в эту же сеть, но через рабочий конденсатор $C_{\text{раб}}$.

В отличие от однофазного асинхронного двигателя в конденсаторном двигателе вспомогательная обмотка после пуска не отключается и остается включенной в течение всего периода работы, при этом емкость $C_{\text{раб}}$ создает фазовый сдвиг между токами



Трехфазный асинхронный двигатель может быть использован для работы от однофазной сети. В этом случае такой двигатель включают как конденсаторный по одной из схем.



Значение рабочей емкости $C_{\text{раб}}$ (мкФ) при частоте переменного тока 50 Гц можно ориентировочно определить по одной из формул

$$C_{\text{раб}} \approx 2700 I_1 / U_{\text{с}};$$

$$C_{\text{раб}} \approx 2800 I_1 / U_{\text{с}};$$

$$C_{\text{раб}} \approx 4800 I_1 / U_{\text{с}};$$

Если пуск двигателя происходит при значительной нагрузке на валу, то параллельно рабочей емкости $C_{\text{раб}}$ следует включить пусковую емкость

$$C_{\text{п}} = (2,5 \div 3,0) C_{\text{раб}}.$$

Серии асинхронных двигателей

Серия трехфазных асинхронных двигателей 4А охватывает диапазон мощностей от 0,06 до 400 кВт. В основу разделения двигателей на типоразмеры положен конструктивный параметр - высота оси вращения h .

Двигатели серии 4А изготавливаются с высотой оси вращения 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 и 355 мм.

Двигатели каждой высоты оси вращения выполняются двух типоразмеров с разной длиной пакетов сердечников, но одинаковым штампом их пластин.

Двигатели изготавливаются на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин.

В серии 4А принята следующая система обозначений:

Ж **X** **X** **X** **X** **X** **X**
2 3 4 5 6 7 8

1 — название серии (4А);

2 - исполнение АД по способу защиты:

буква Н — исполнение IP23, отсутствие буквы означает исполнение IP44;

3 — исполнение АД по материалу станины и щитов: А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы - станина и щиты чугунные или стальные;

4 - высота оси вращения, мм (две или три цифры);

5 — установочный размер по длине станины: буквы S, М или L (меньший, средний или больший);

6 — длина сердечника: А — меньшая, В — большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, М или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 - число полюсов АД (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Различают следующие модификации двигателей серии 4А:

а) двигатели с повышенным скольжением, с «мягкой» механической характеристикой (4АС); короткозамкнутая обмотка этих двигателей имеет повышенное активное сопротивление;

б) двигатели с повышенным пусковым моментом, имеющие двойную клетку на роторе (4АР);

в) многоскоростные двигатели — на две, три и четыре частоты вращения в диапазоне от 500 до 3000 об/мин;

г) двигатели на частоту 60 Гц, имеющие частоту вращения на 20 % выше, чем двигатели основного исполнения при той же мощности;

д) двигатели малошумные (с улучшенной балансировкой, с подшипниками более высокого класса и т.д.);

е) двигатели со встроенным электромагнитным тормозом (для электроприводов с частыми пусками);

к) двигатели, встраиваемые в механизмы, приводимые ими во вращение (4АВ);

з) двигатели лифтовые двухскоростные со встроенной температурной защитой, малошумные для привода лифтов в жилых и промышленных зданиях и др.

Серия трехфазных асинхронных двигателей АИ. Двигатели этой серии имеют общепромышленное назначение. Они изготавливаются с высотами осей вращения от 45 до 355 мм мощностью от 0,025 до 315 кВт на напряжение 220/380 и 380/660 В, частотой 50 Гц. Возможно изготовление двигателей на частоту тока 60 Гц. По степени защиты двигатели этой серии имеют исполнения: закрытое обдуваемое для всех высот оси вращения или защищенное с внутренней самовентиляцией для высот оси вращения от 160 до 355 мм.

В отличие от серии 4А в двигателях серии АИ более широко использованы высокопрочные алюминиевые сплавы и пластмассы и применена более совершенная система вентиляции, обеспечивающая снижение температуры нагрева двигателей при номинальной нагрузке на 10—20 °С относительно двигателей серии 4А. Для наиболее массового отрезка серии с высотами осей вращения от 71 до 100 мм применены подшипники с улучшенными виброакустическими характеристиками. Улучшение вентиляционного и подшипниковых узлов обеспечило двигателям серии АИ снижение уровня шума и повышение надежности.

Высоковольтные асинхронные двигатели. Для привода ряда промышленных установок требуются двигатели большой мощности: 500, 800, 1000 кВт и более. Обычно асинхронные двигатели такой мощности делают высоковольтными — на 6000 или 10 000 В.

Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии **АН2** применяют для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, например мощных вентиляторов, насосов и т. п. Двигатели этой серии изготавливаются мощностью от 500 до 2000 кВт при частоте вращения (синхронной) 1000, 750, 600, 500 и 375 об/мин. Двигатели предназначены для включения в трехфазную сеть напряжением 6000 В, частотой 50 Гц.

Крановые и краново-металлургические асинхронные двигатели. Для привода крановых механизмов общепромышленного назначения, а также других агрегатов, работа которых характеризуется частыми пусками и остановками, большими перегрузками, применяют крановые трехфазные асинхронные двигатели серий **МТ** (с фазным ротором) и **МТК** (с короткозамкнутым ротором).

Двигатели этих серий отличаются большой перегрузочной способностью ($M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}} = 3,3 \text{ — } 3,5$), повышенным значением пускового момента ($M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 3,0 \text{ — } 3,5$) и пониженным значением момента инерции ротора. Последнее свойство придает двигателям хорошие динамические свойства, что важно при работе в режиме частых пусков, реверсов и т. п.

Свойства электрических машин определяются не только их электромеханическими параметрами и формой характеристик. Прежде всего, электрическая машина должна быть безопасной в эксплуатации для обслуживающего персонала, удобной при монтаже, успешно противостоять воздействиям внешних факторов. Перечисленные требования учитываются конструктивными формами исполнения электрических машин, которые определяются степенью защиты, способами охлаждения и монтажа, климатическими условиями и местом эксплуатации.

Степень защиты электрических машин обозначается двумя буквами IP - начальные буквы слов International Protection и двумя цифрами.

Первая цифра обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь машины твердых тел.

Вторая цифра обозначает степень защиты от попадания внутрь машины воды. Для машин напряжением до 1000 В установлено шесть степеней защиты, обозначаемых следующим образом:

- 0 — защита отсутствует;
- 1 — защита от случайного соприкосновения большого участка человеческого тела с токоведущими и вращающимися частями; отсутствует защита от преднамеренного соприкосновения; имеется защита от попадания внутрь твердых тел диаметром не менее 52,5 мм;
- 2 — защита от соприкосновения пальцев человека с токоведущими и вращающимися частями и защита от попадания внутрь машины твердых тел диаметром не менее 12,5 мм;
- 3 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями инструмента, проволоки и других предметов, толщина которых превышает 2,5 мм; защита от попадания внутрь машины твердых тел диаметром не менее 2,5 мм;
- 4 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями предметов толщиной более 1 мм и защита от попадания внутрь машины твердых тел толщиной не менее 1 мм;
- 5 — полная защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и полная защита от вредных отложений пыли внутри машины.

Существует девять степеней защиты от проникания воды внутрь машины:

0 — защита отсутствует;

1 — защита от капель сконденсировавшейся воды, падающих вертикально;

2 — защита от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали.

3 — защита от дождя, падающего под углом не более 60° к вертикали;

4 — защита от брызг воды любого направления;

5 — защита от водяных струй в любом направлении;

6 — защита от воздействий, характерных для палубы корабля, включая захлестывание морской волной;

7 — защита при погружении в воду в течение времени и давления, указанных в стандарте;

8 — защита при погружении в воду на неограниченное время при давлении указанном в стандарте.