



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Типы электрических машин

1. Электрические машины переменного тока

Синхронные машины: генераторы, двигатели, компенсаторы.

Асинхронные машины: двигатели

2. Электрические машины постоянного тока

Двигатели и генераторы



Асинхронные машины

(асинхронные двигатели)

Конструкция и принцип асинхронной машины

**предложен русским
изобретателем**

М.О. Доливо-Добровольским

**в 1888г. и до настоящего времени
сохранила свою простую форму**

**95% приводов
производственных механизмов
имеют в своем составе
асинхронный двигатель**

**(насосно-компрессорные, кузнечно-
прессовые, подъемно-транспортные
системы; устройства
электропривода станков;
медицинское оборудование и
бытовые приборы)**

Асинхронные машины

Асинхронная машина – двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна (первичная) получает питание от сети с частотой f_1 , а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате индукции. Их частота f_2 является функцией частоты вращения ротора.

Первая обмотка располагается в пазах статора – неподвижной части, вторая – в пазах ротора – подвижной части.

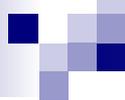
- Асинхронные двигатели являются самыми **распространенными** из всех двигателей.

Достоинства:

- простота конструкции
- низкая себестоимость
- надежность (нет легко повреждающихся частей)
- высокий срок службы
- высокий пусковой момент
- высокая перегрузочная способность
- Асинхронный двигатель может работать с длительной перегрузкой, допускает частые пуски и реверсы

Недостатки:

сложность регулирования частоты вращения.



Мощность асинхронных двигателей составляет от десятков мегаватт до долей ватт.

Выпускаются двигатели в виде **серий**, охватывающих определенный набор мощностей, частот вращения и напряжений. Машины одной серии имеют общее конструктивное решение, технологию изготовления и однотипность материалов (4А от 0,06 до 400 кВт).



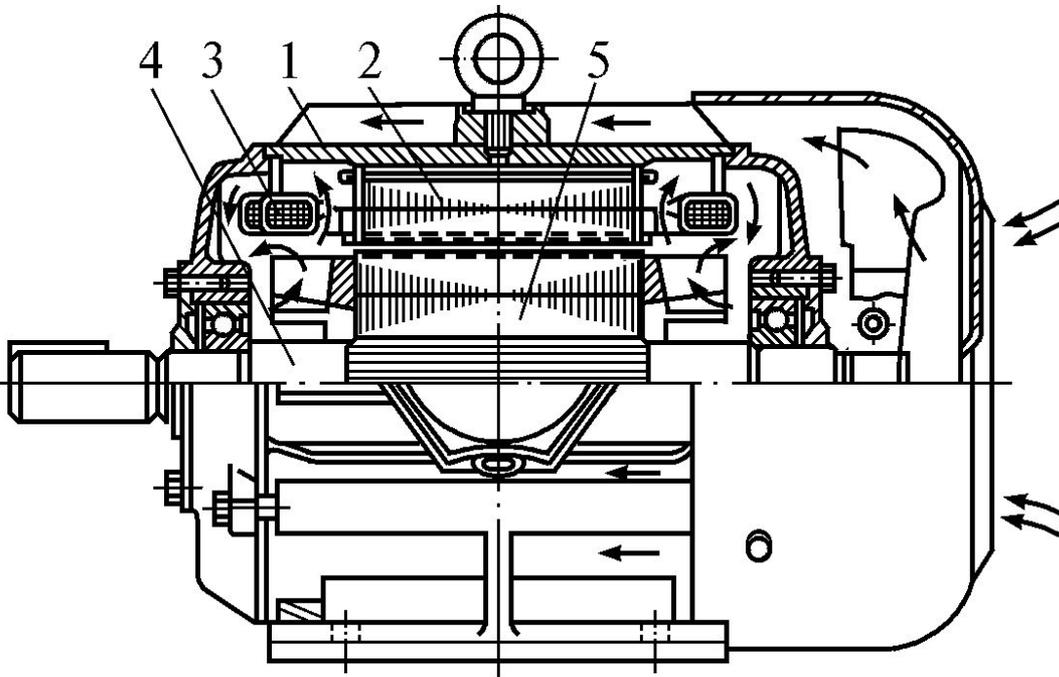
Устройство асинхронной машины



**Асинхронная машина состоит
из двух частей:**

**неподвижной – статора
вращающейся – ротора.**

Устройство асинхронного двигателя



Статор – неподвижная часть двигателя – имеет цилиндрическую форму.

1-корпус

2-сердечник

3-обмотка

Магнитопровод статора

собирается из тонких листов электротехнической стали.

Ротор асинхронного двигателя – вращающаяся часть – состоит из:

4-стальной вал,

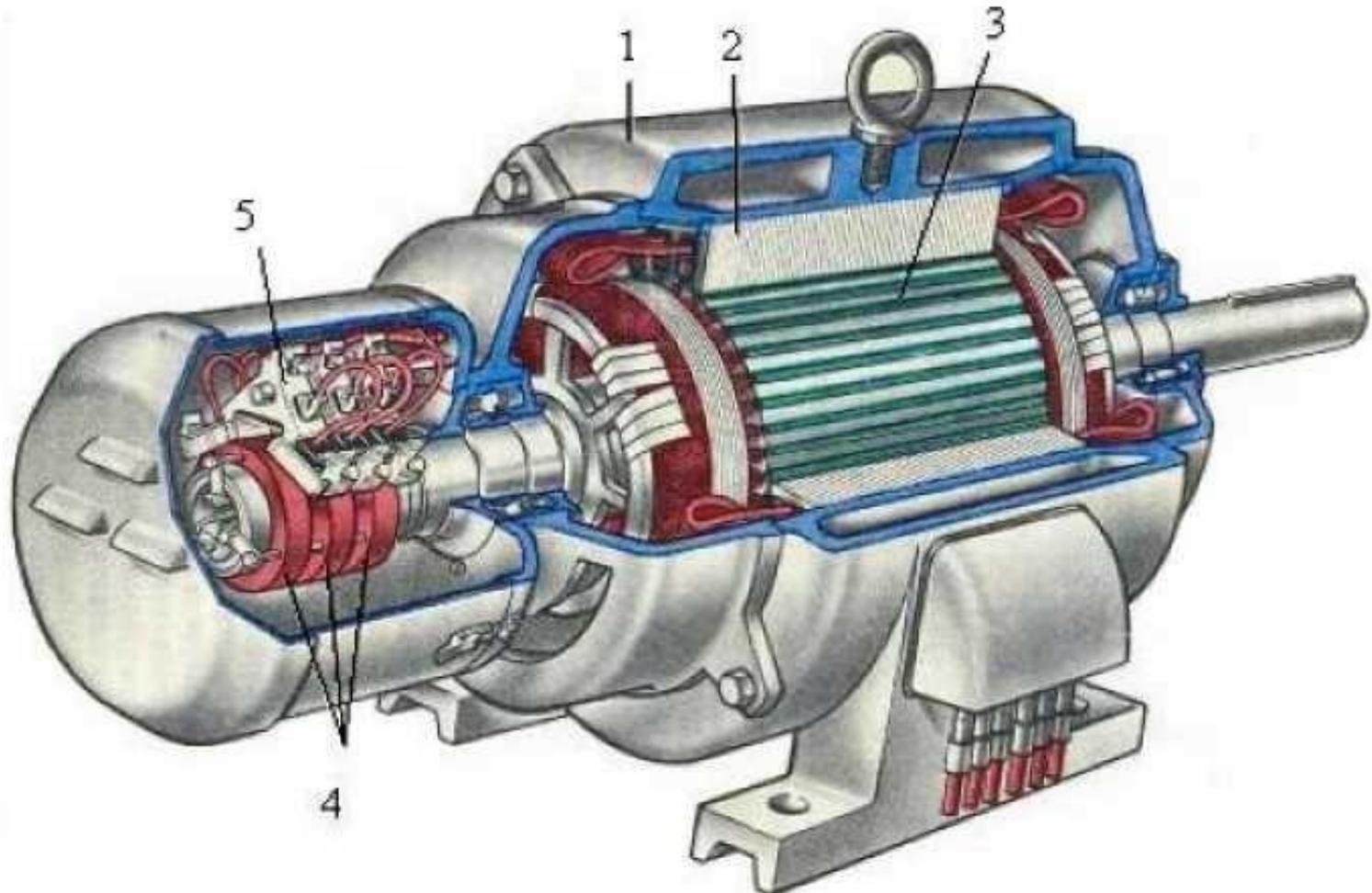
5-магнитопровод,

Обмотка ротора:

-**короткозамкнутая** (выполняется из алюминиевых или медных стержней, замкнутых с обоих торцов ротора накоротко)

-**фазная** (имеет трехфазную обмотку, соединенную в звезду)

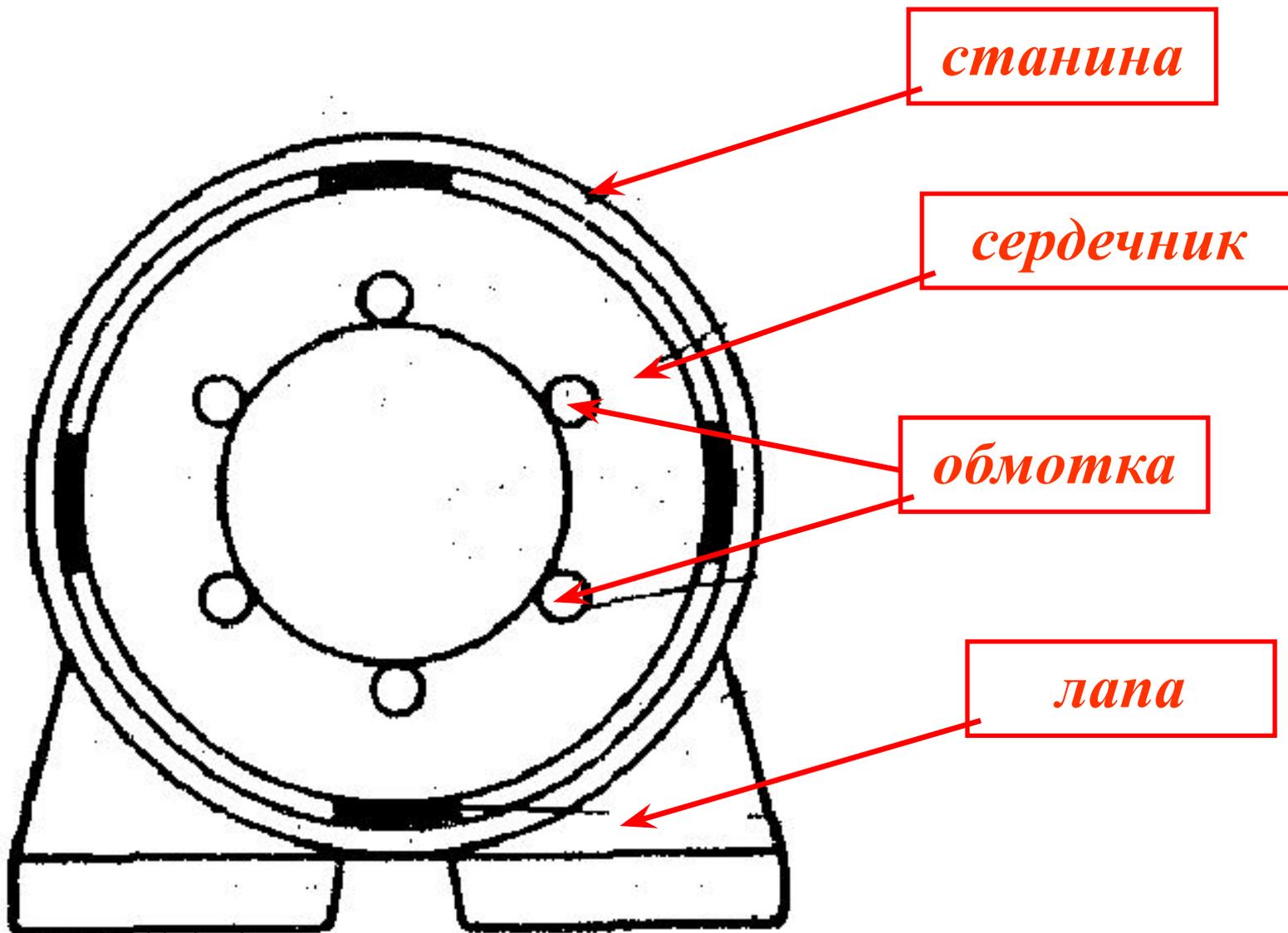
АД с фазным ротором



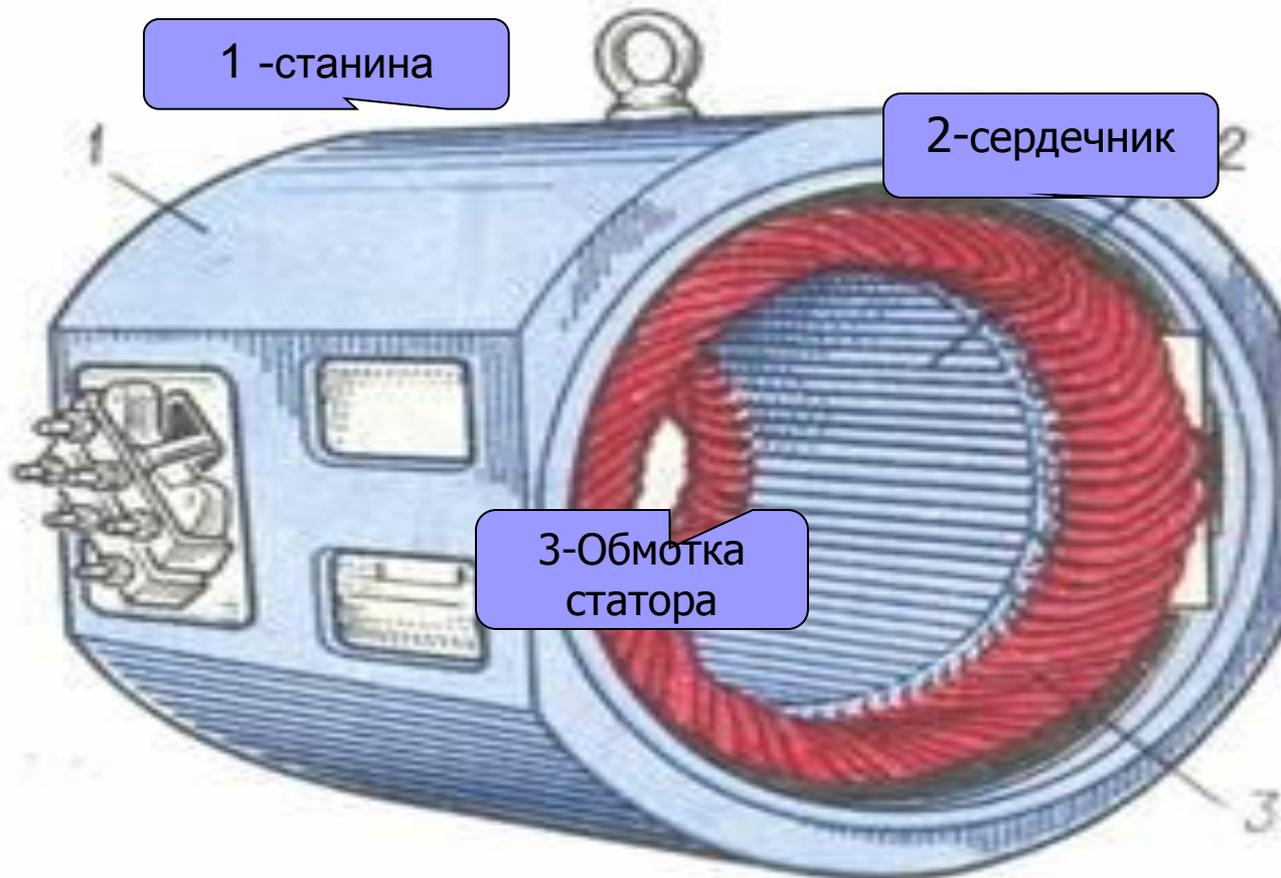
Конструкция статора

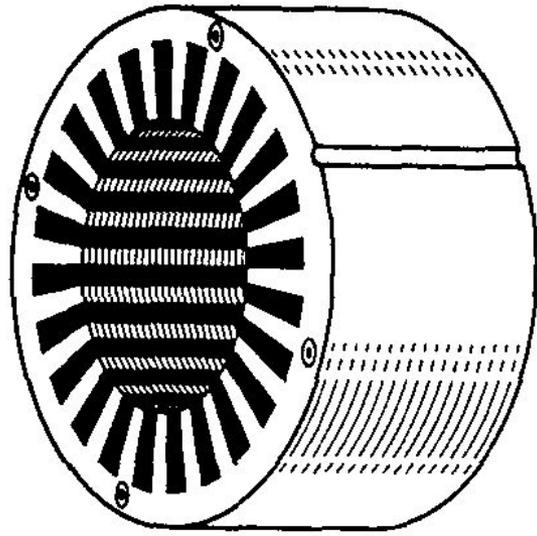
Сердечник статора – полый цилиндр, собранный из отдельных колец, штампованных из листов электротехнической стали (0,5 мм). Кольца изолированы друг от друга слоями лака (для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи)

Конструкция статора



Устройство трёхфазного двигателя

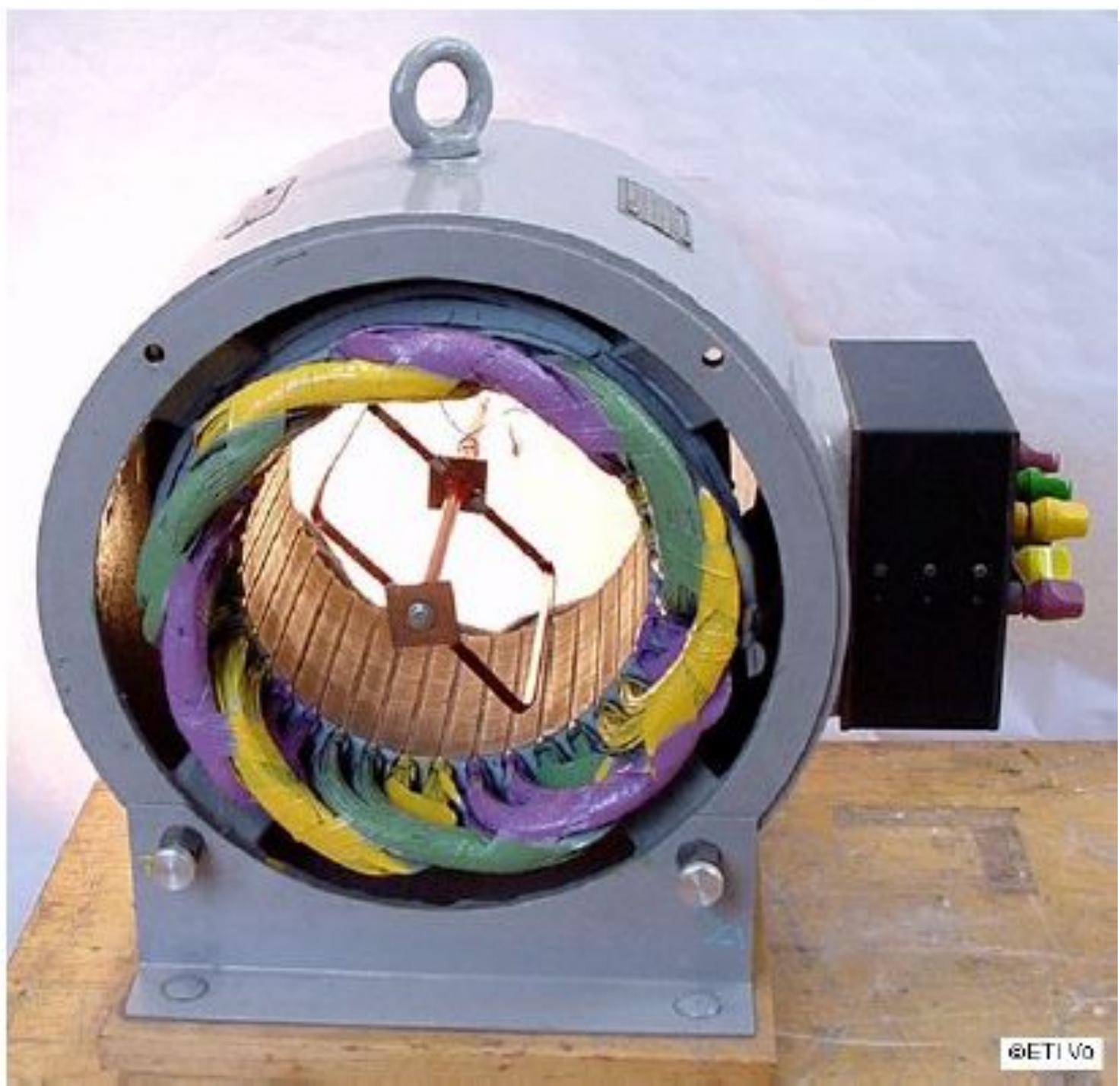




a

Собранный пакет колец статора запрессован в корпус – станину (чугун), которая крепится к неподвижному жесткому основанию.

В пазах статора размещаются три фазные обмотки. Каждая фазная обмотка состоит из нескольких последовательно включенных катушек



- Соединение обмотки статора осуществляется в коробке, в которую выведены начала фаз C_1 , C_2 , C_3 и концы фаз C_4 , C_5 , C_6 .

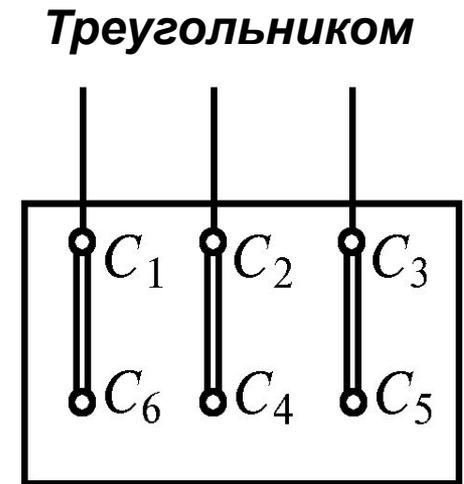
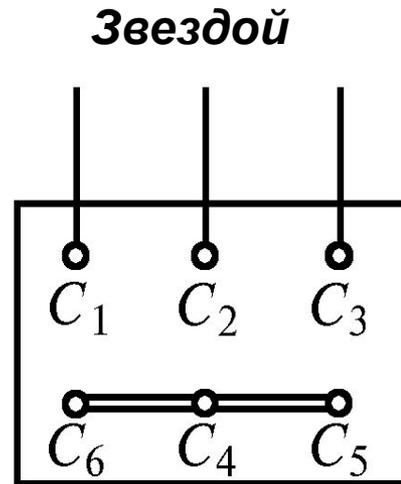
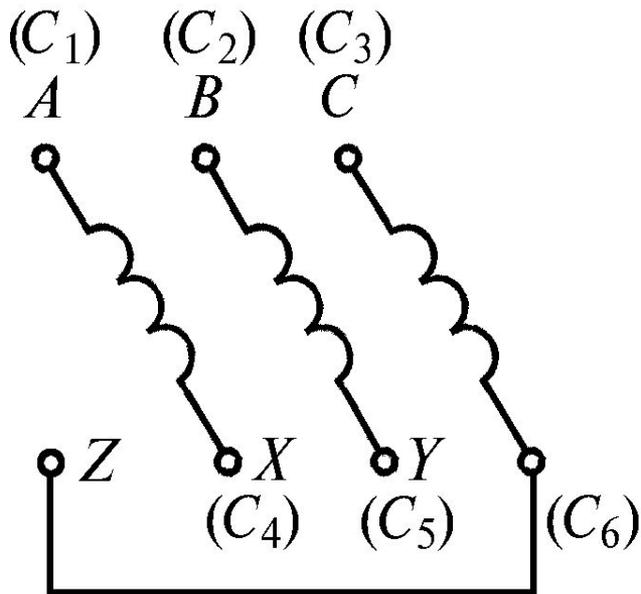


Схема соединения обмоток АД

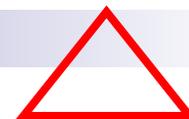


Схема соединения "Треугольник"

Сеть ~220 (В)

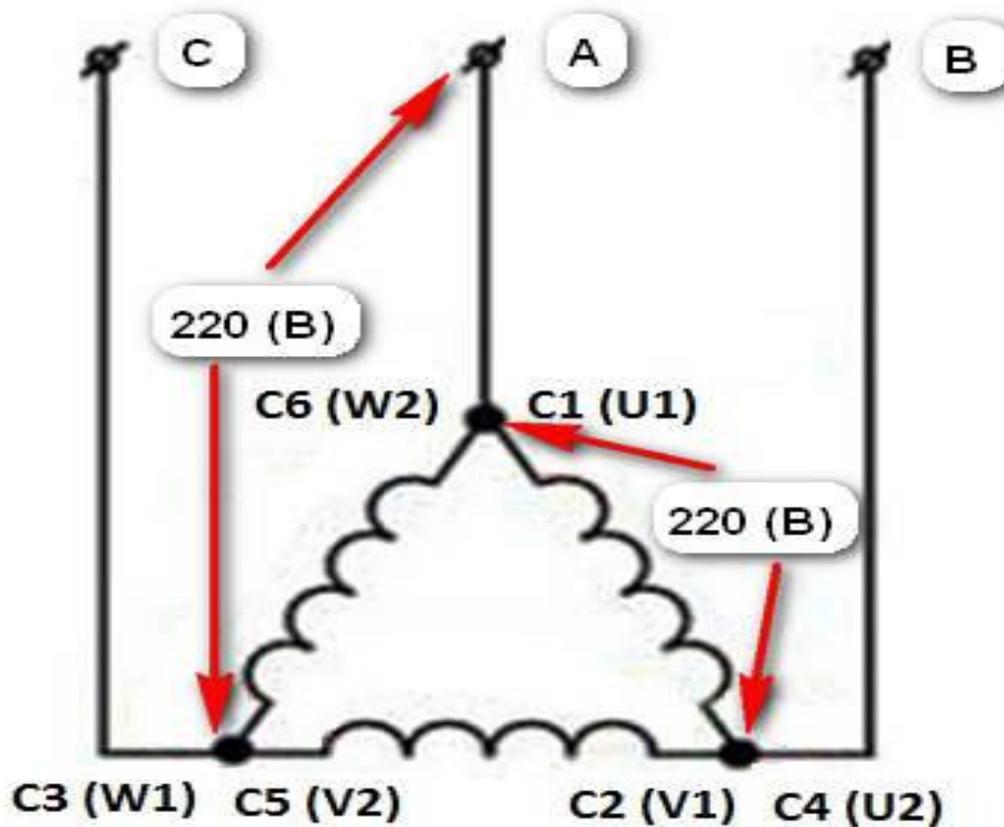
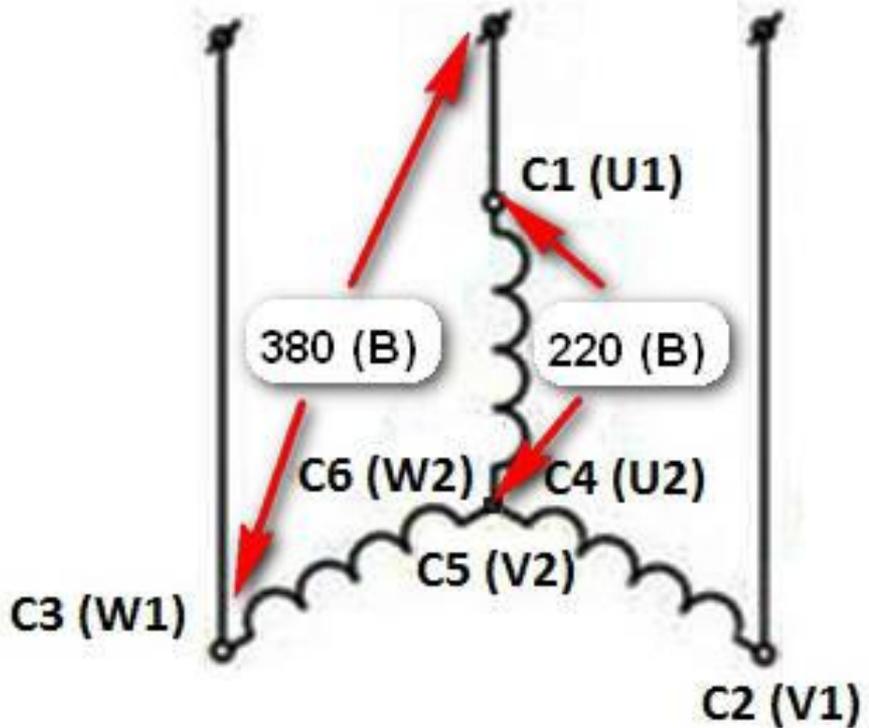


Схема соединения обмоток АД



Схема соединения "Звезда"

Сеть ~380 (В)

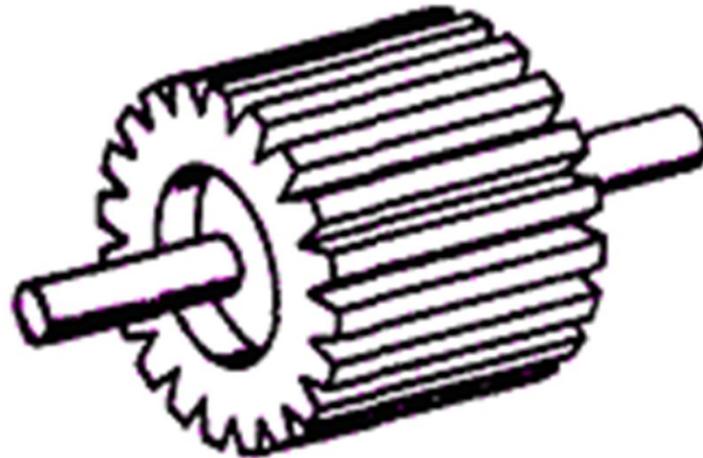


Конструкция ротора.

Ротор – цилиндрический сердечник, собранный из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком.

Сердечник ротора насажен на вал, закрепленный в подшипниках.

В пазах расположены витки обмотки ротора.

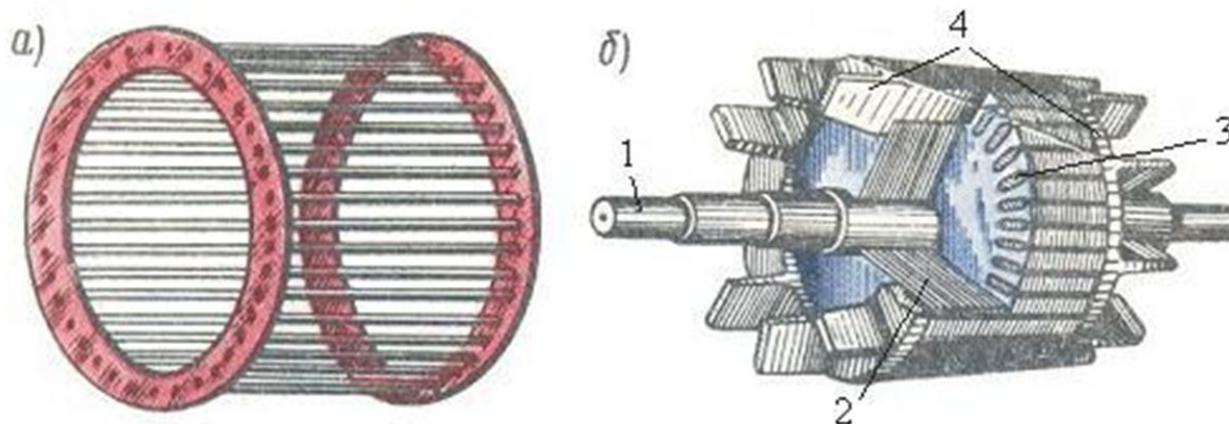


Сердечник ротора

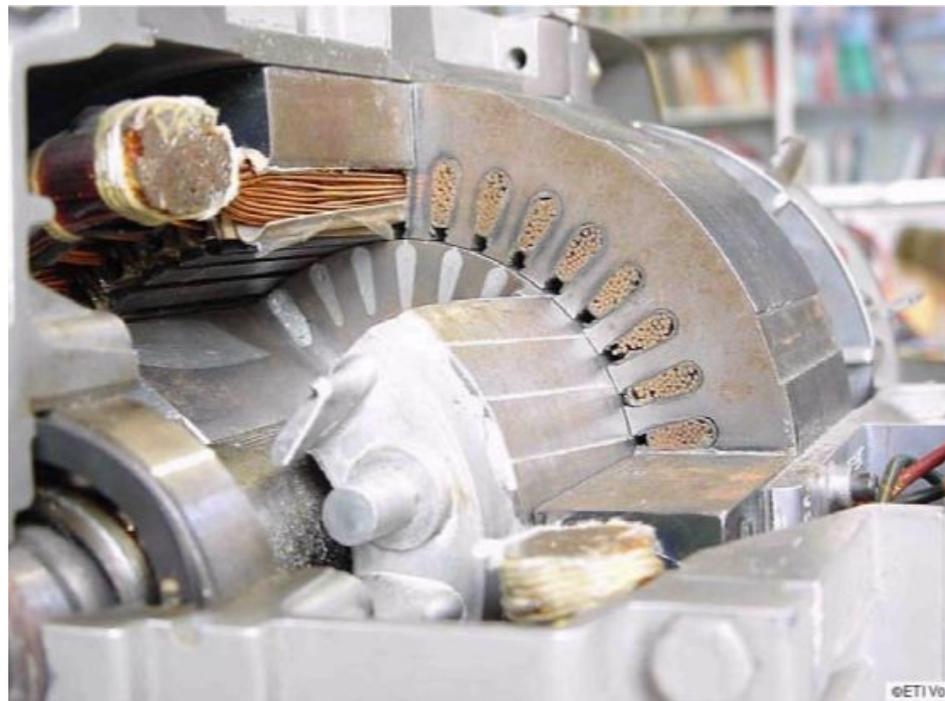
Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, которые без изоляции вставляются в пазы ротора. Торцевые концы стержней замыкаются накоротко кольцами из того же материала.

Часто обмотка изготавливается путем заливки пазов ротора расплавленным алюминием.

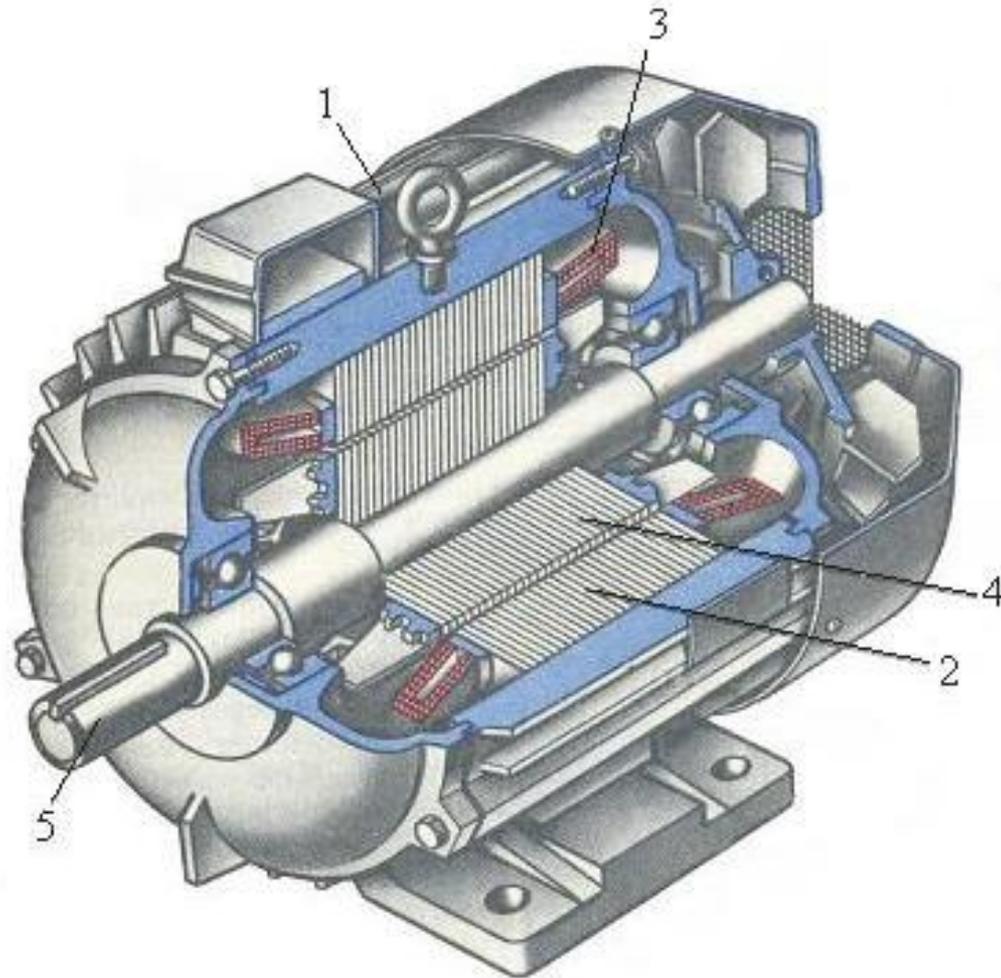
Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью



1 – вал; 2 – ; 3 – стержни, которые закладываются в пазы сердечника ротора; 4 – торцевые кольца



Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.





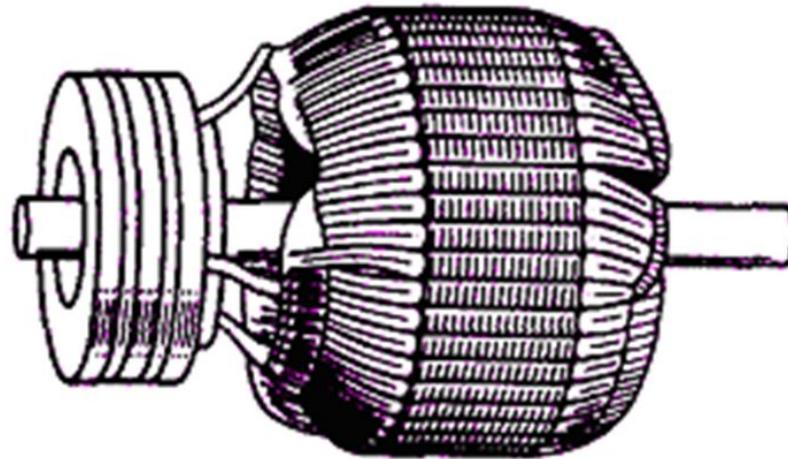
Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства.

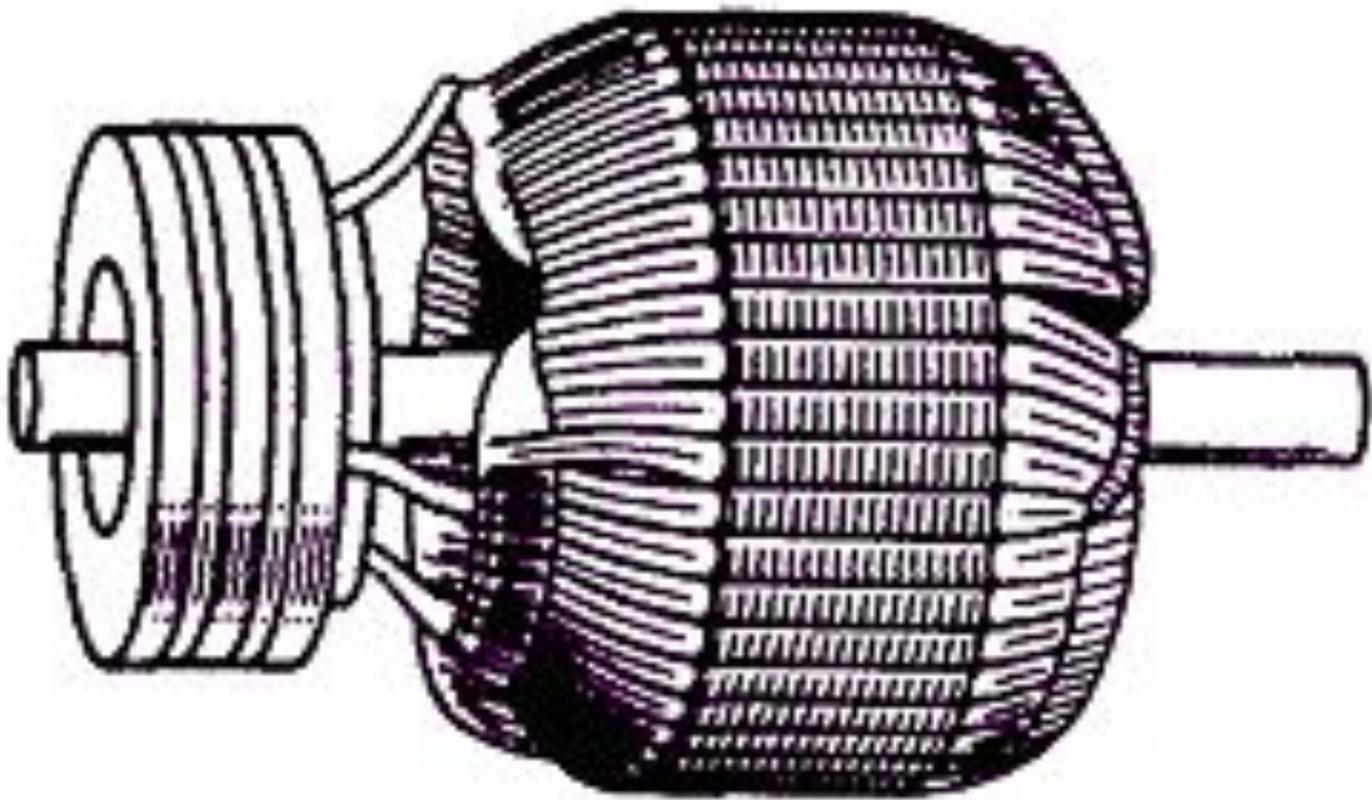
Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент.

Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

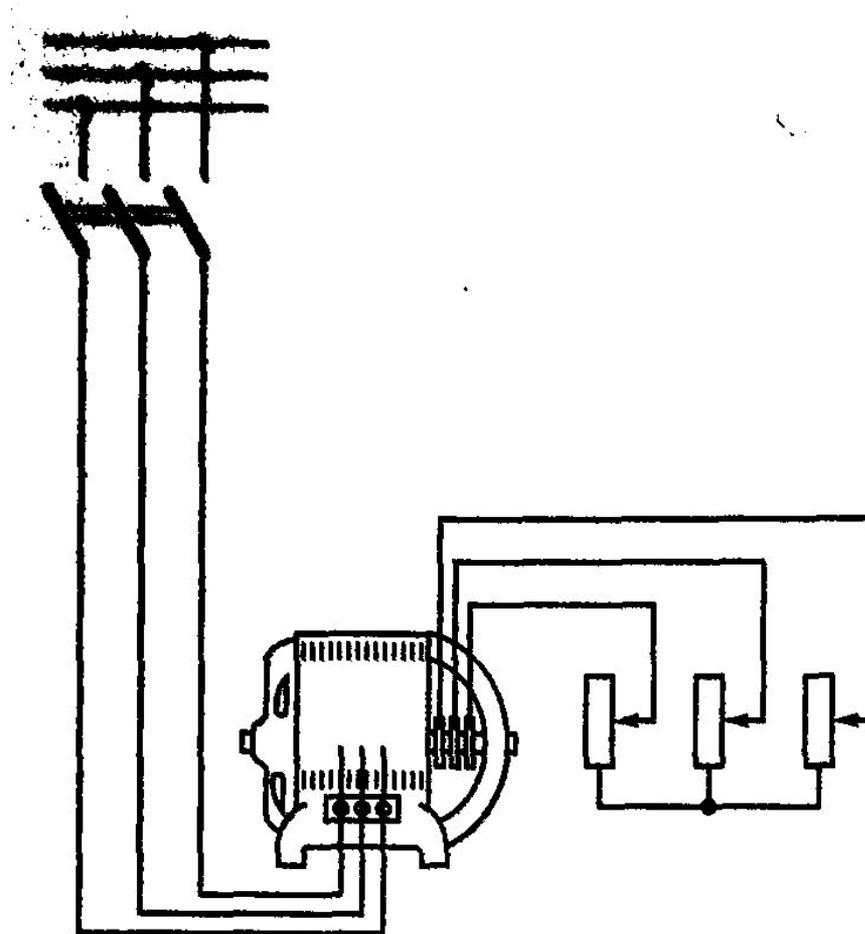
Обмотка фазного ротора выполняется изолированным проводом (обычно трехфазная с тем же числом катушек, что и обмотка статора).

Три конца фазных обмоток ротора соединяются звездой, а свободные концы соединяются с тремя контактными кольцами (чугун или медь), укрепленными на валу машины.

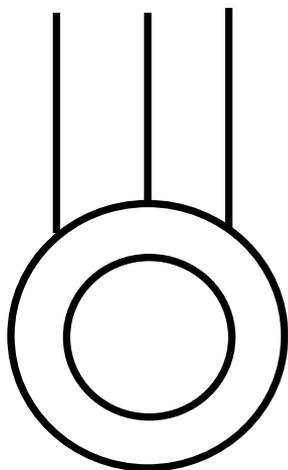
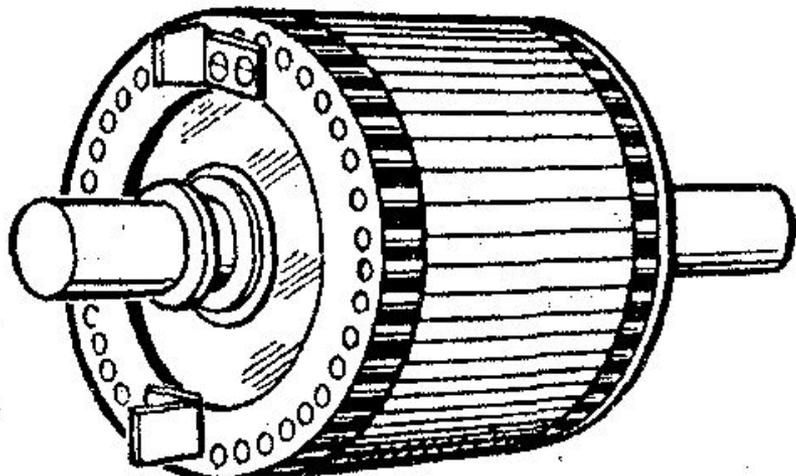




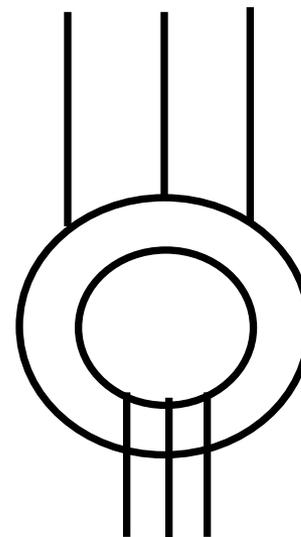
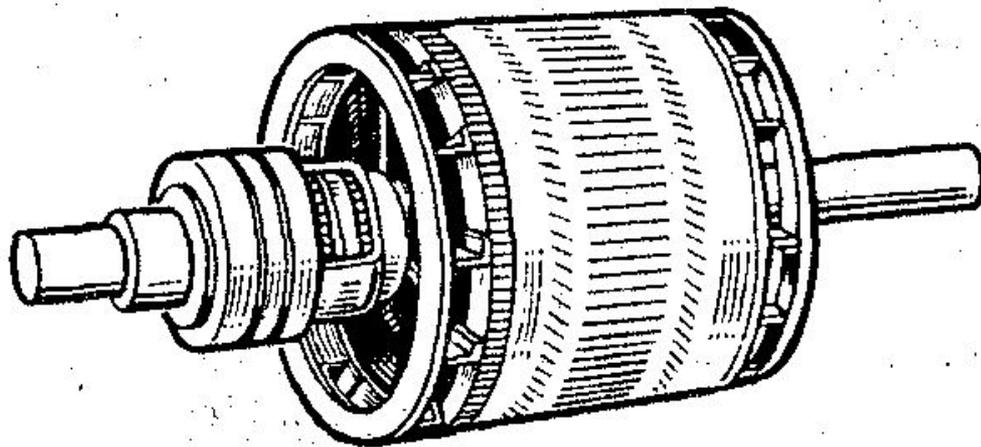
На кольца наложены щетки, установленные в щеткодержателях. Через щетки и кольца обмотка присоединена к трехфазному реостату.



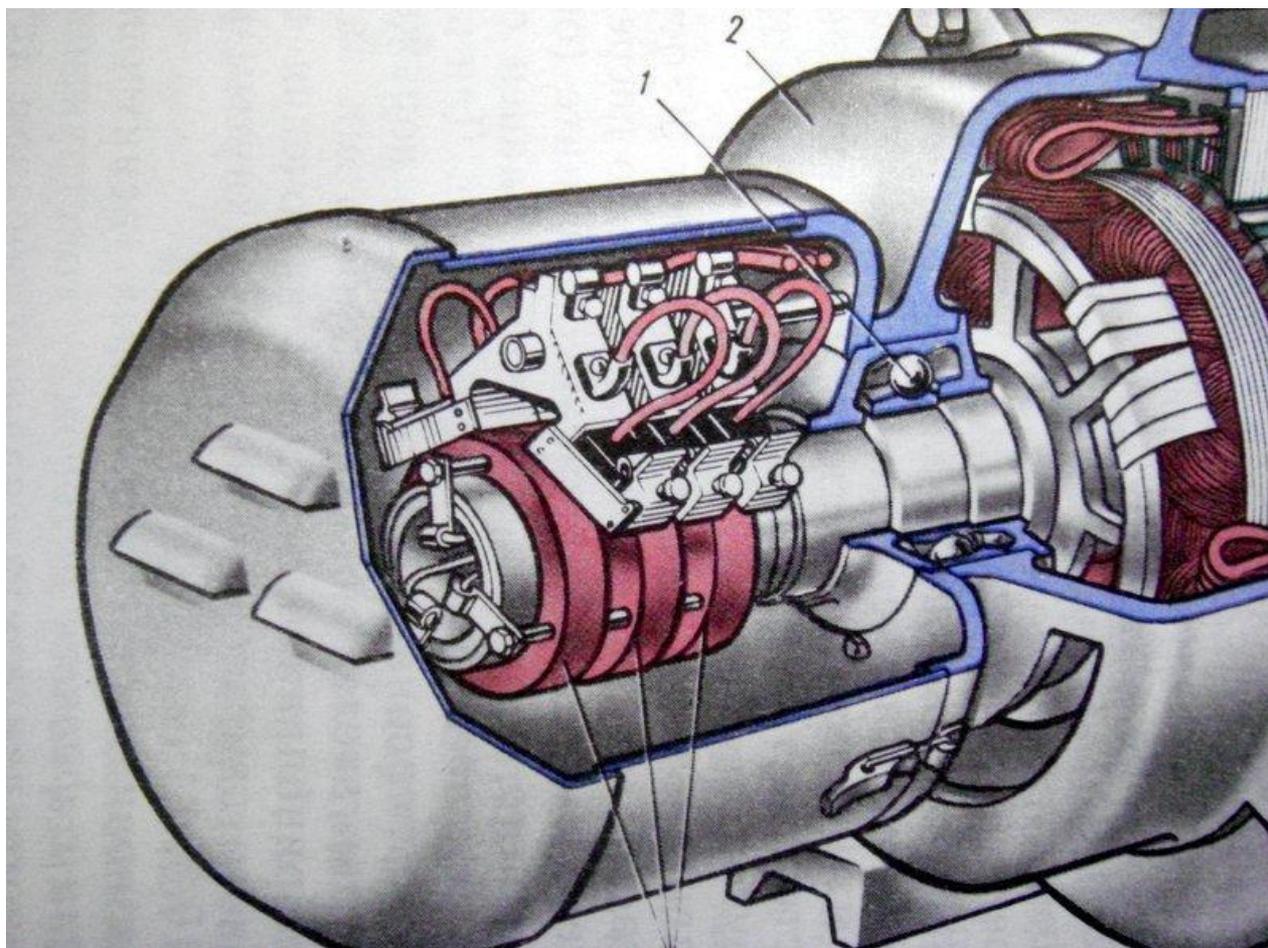
Короткозамкнутый ротор

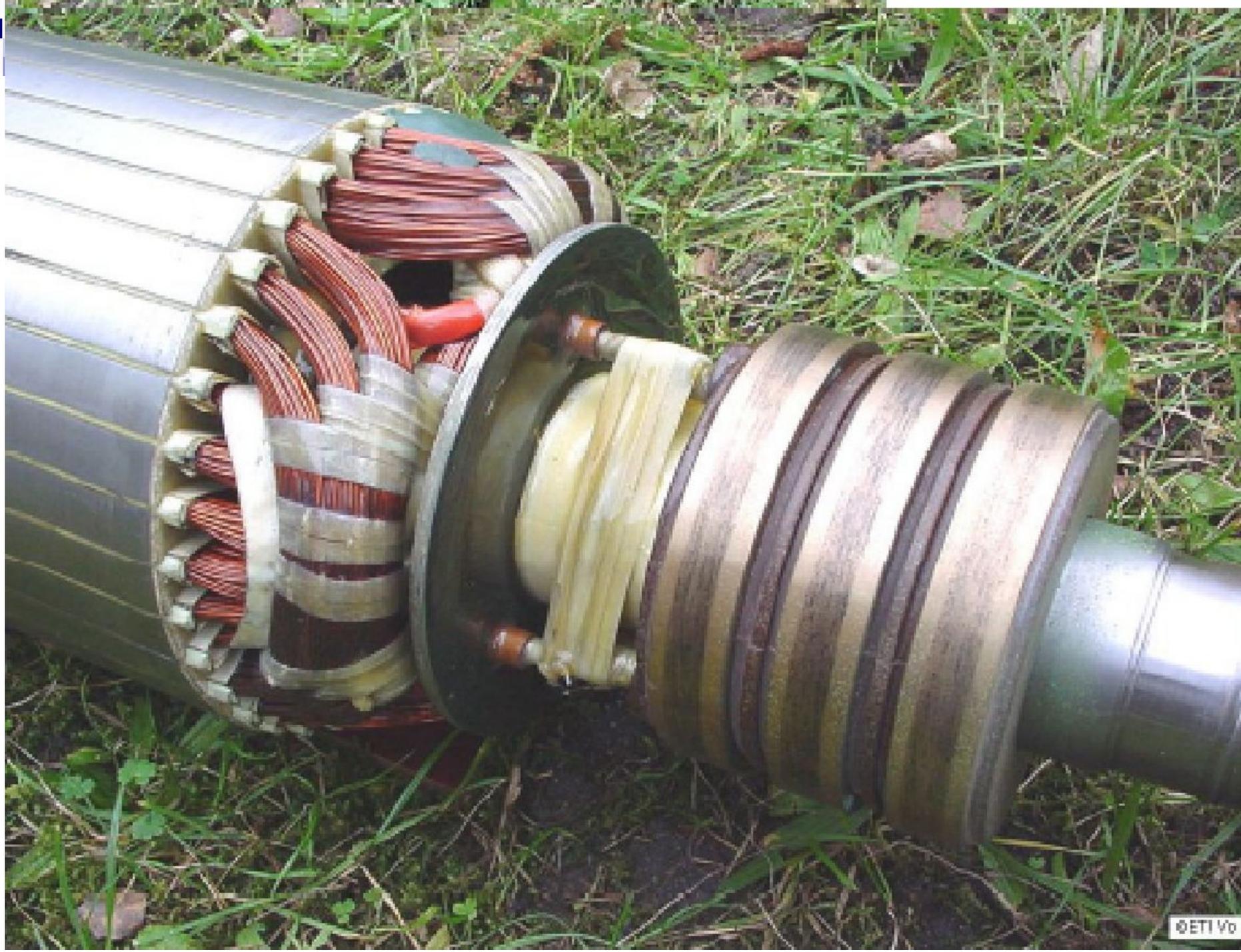


Фазный ротор



Коллекторный узел





На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся данные: P_H , U_H , I_H , n_H , а также тип машины.

P_H – это номинальная полезная мощность (на валу)

U_H и I_H – номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения.

Например, 380/220, Y/ Δ , I_H Y/ I_H Δ .

n_H – номинальная частота вращения в об/мин.

**Тип машины, например, задан в виде
4A315S8.**

**Это асинхронный двигатель (A) четвёртой
серии защищённого исполнения.**

315 – высота оси вращения в мм;

**S – установочные размеры (они задаются в
справочнике);**

8 – число полюсов машины.

Принцип действия АД

- Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции. При подачи напряжения на обмотки статора внутри него возникает вращающееся магнитное поле. Это поле пронизывает ротор и в его обмотках возникает переменный электрический ток.

Взаимодействие переменного тока в роторе с вращающимся магнитным полем статора создаёт вращающийся момент.

$$M = c \Phi I_2 \cos \psi_2$$

c - констр.коэфф.-т, Φ -магнитный поток, I_2 - ток в роторе,

ψ_2 - сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора

Ротор двигателя начинает вращаться в ту же сторону, что и статор, но с небольшим отставанием, т.е.

асинхронно

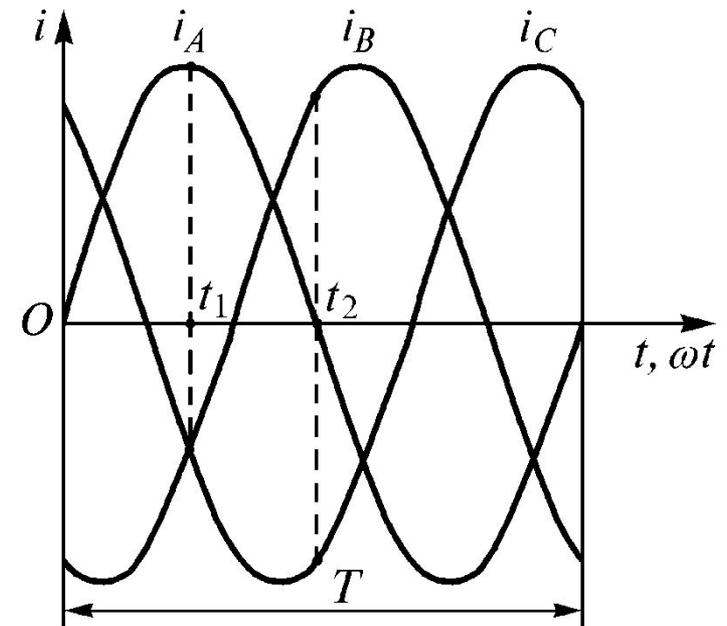
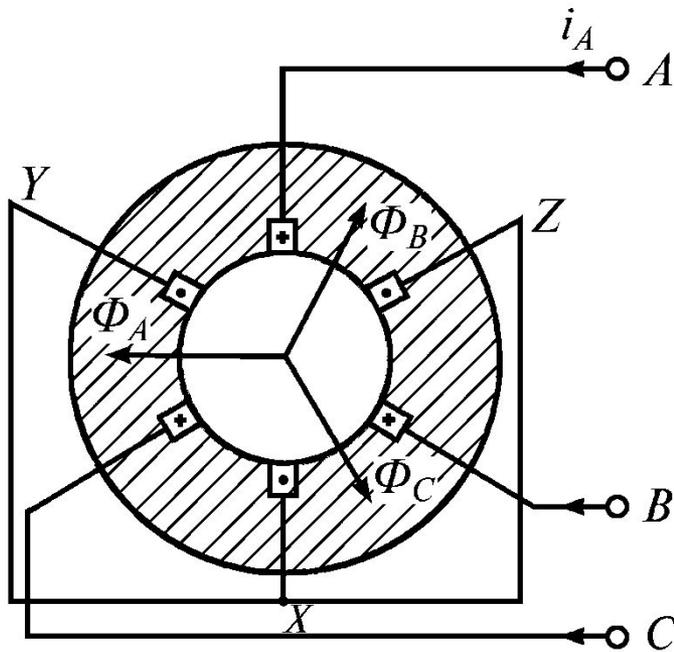


Статор

Создание вращающегося магнитного поля

Получение вращающегося магнитного поля

- Если по системе проводников, распределенных в пространстве по окружности, протекают токи, сдвинутые по фазе, то в пространстве создается вращающееся поле.



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

За период направление суммарного магнитного поля сделает один оборот. В этом случае обмотка статора создаст магнитное поле с одной парой полюсов ($p=1$).

При стандартной частоте переменного тока $f=50$ Гц частота вращения магнитного поля статора двухполюсной машины

$$n_c = 50 \cdot 60 = 3000 \text{ об / мин}$$

**Внутри статора существует
постоянное по значению
равномерно вращающееся
магнитное поле.**

**!!!!Основное условие создания
такого поля – пространственный и
временной сдвиг токов на 120
градусов!!!!.**

Принцип действия асинхронной машины и режимы ее работы

- Трехфазная обмотка статора создает магнитное поле, вращающееся со скоростью $n_1 = \frac{60f}{p}$
- Это поле пронизывает ротор и в его обмотках возникает переменный электрический ток
- Взаимодействие переменного тока в роторе с вращающимся магнитным полем статора создаёт вращающийся момент.

$$M = c\Phi I_2 \cos\psi_2,$$

c - констр.коэфф.-т, Φ -магнитный поток, I_2 - ток в роторе,

ψ_2 – сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора

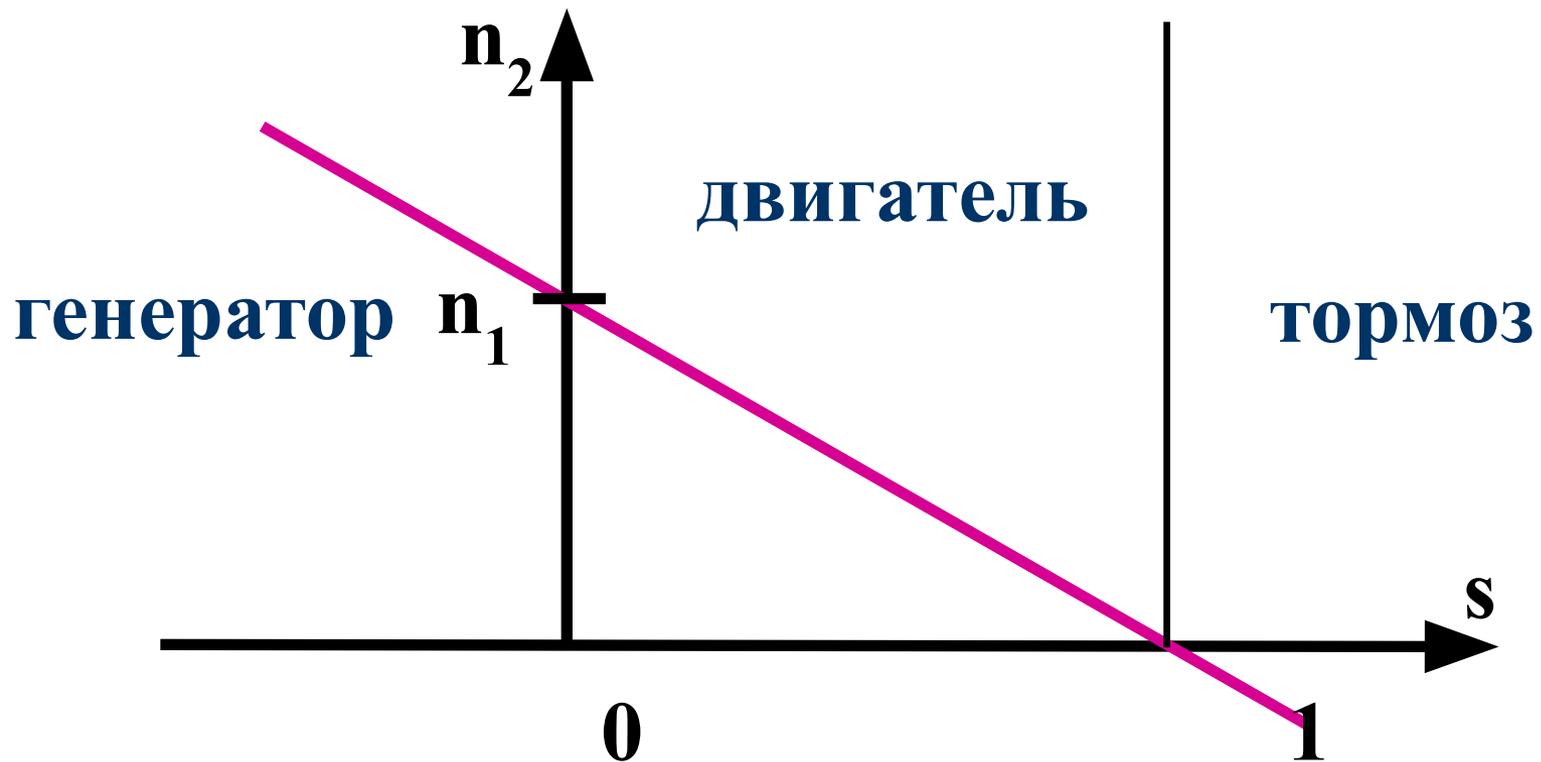
- Ротор двигателя начинает вращаться в ту же сторону, что и статор, но с небольшим отставанием, т.е. асинхронно

Скольжение асинхронной машины

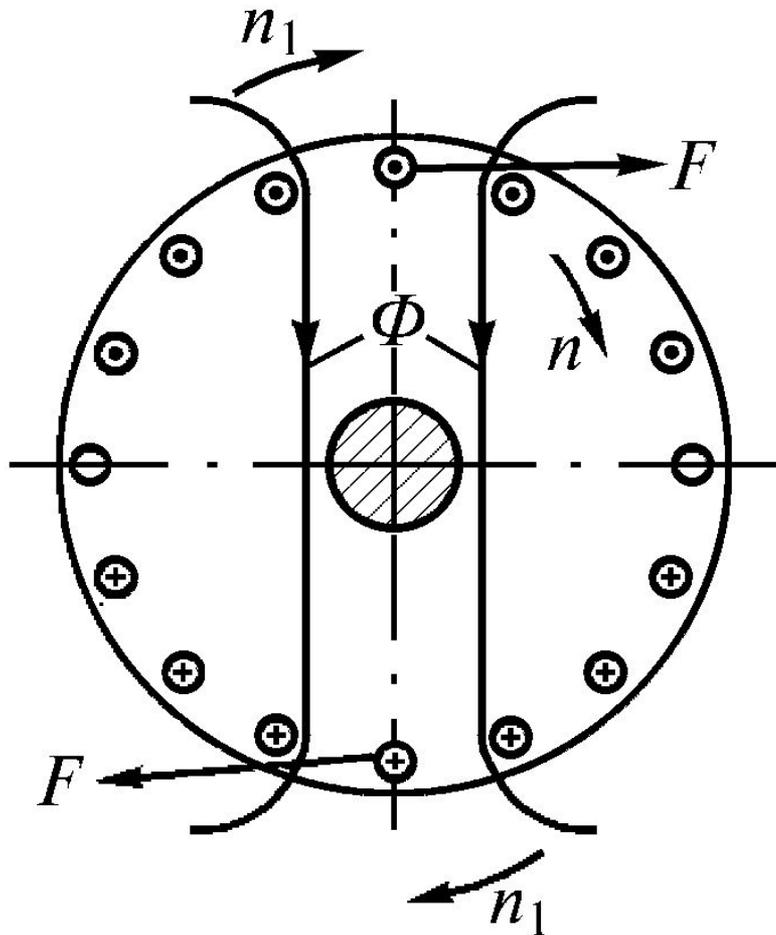
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%$$

В зависимости от соотношения n_1 и n_2 различают три режима работы:

- в режиме двигателя;
- в режиме генератора;
- в режиме электромагнитного тормоза.



Работа в режиме двигателя



При $n < n_1$

линии поля статора перемещаются относительно ротора также по часовой стрелке со скоростью

$n = 0$ до $n \approx n_1$
т.е. при скольжении
от

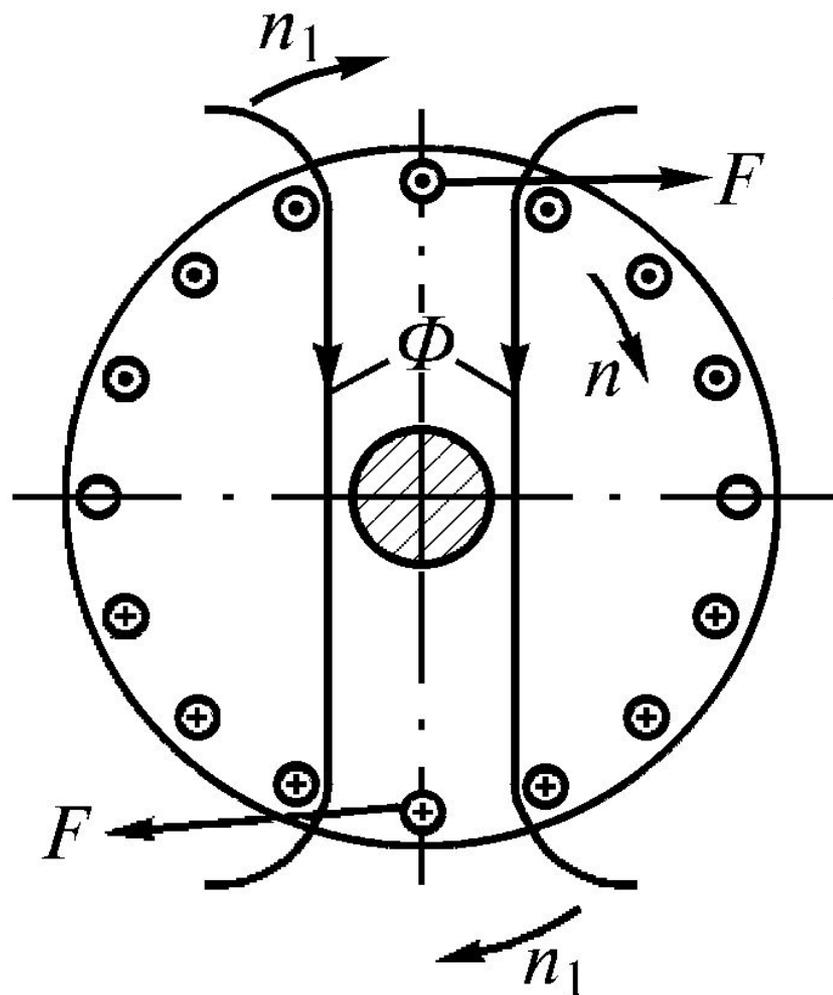
$s = +1$ до $s \approx 0$

Режим генератора

Если на работающем двигателе ротор разогнать с помощью двигателя до частоты $> n_1$ в том же направлении, то машина перейдет в генераторный режим и избыток механической мощности преобразуется в электрическую.

$$s < 0$$

Работа в режиме генератора



ротор приводится во вращение в том же направлении со скоростью n_1

Асинхронная машина может работать в режиме генератора параллельно с сетью в пределах от

$$n = n_1 \text{ до } n = +\infty$$

т.е. при скольжении от

$$s = 0 \text{ до } s = -\infty$$

Режим электромагнитного тормоза ($S \geq 1$).

Ротор вращается в направлении, противоположном направлению вращения поля статора.

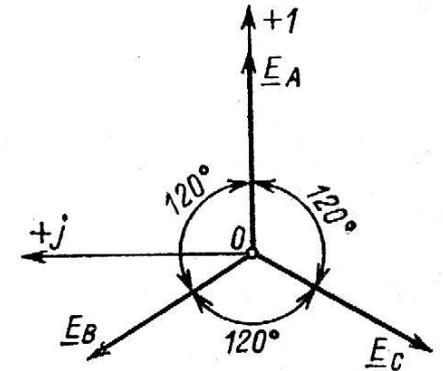
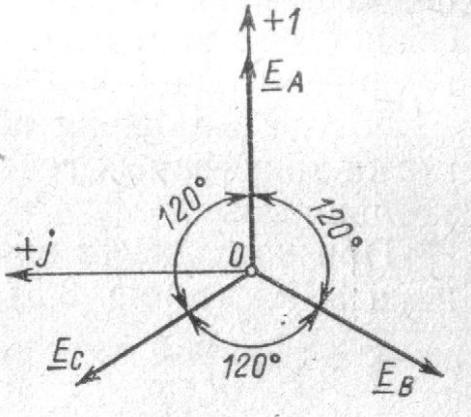
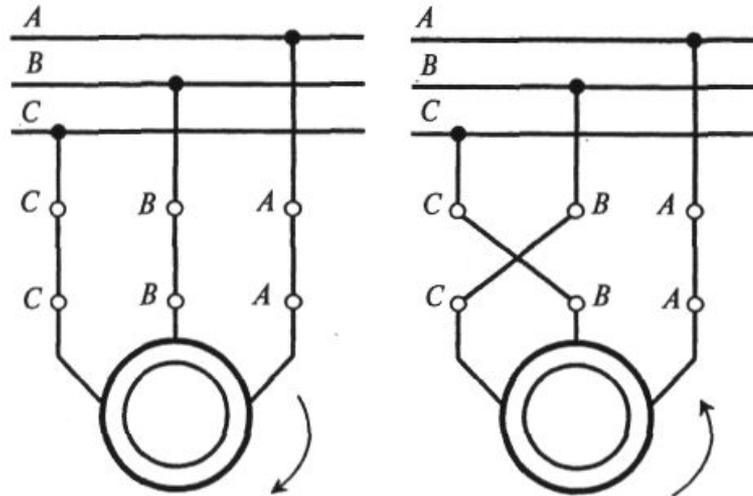
Это возможно при реверсе (поле поменяло направление вращения, а ротор все еще вращается в противоположном направлении (если $M_T > M_{BR}$)).

Применяется для быстрой остановки двигателя, для торможения приводного механизма (крановые и подъемные устройства при спуске грузов)

Работа в режиме электромагнитного тормоза

- Ротор приводится во вращение против направления вращения магнитного потока статора.
- Возникает при скольжении от $s = +1$ до $s = +\infty$
- Примером практического применения режима электромагнитного тормоза является опускание груза в подъемно-транспортных устройствах.

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ



Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора. Это достигается переключением двух фаз, т. е. двух из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью.

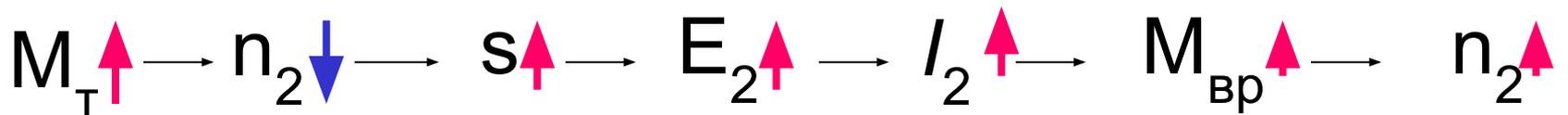
Влияние скольжения на работу асинхронных машин

- Работающие под нагрузкой АД имеет: $n_1 = \text{const}$, $n_2 = f(s)$ – т.е. зависит от величины нагрузки на вал машины.
- С увеличением нагрузки $n_2 \downarrow \rightarrow S \uparrow$

Магнитное поле чаще пересекает обмотки ротора, ток в ротора растет и магнитное поле ротора размагничивает поле статора, что вызывает автоматическое увеличение тока в статоре, т.е. увеличивается отбор мощности из сети

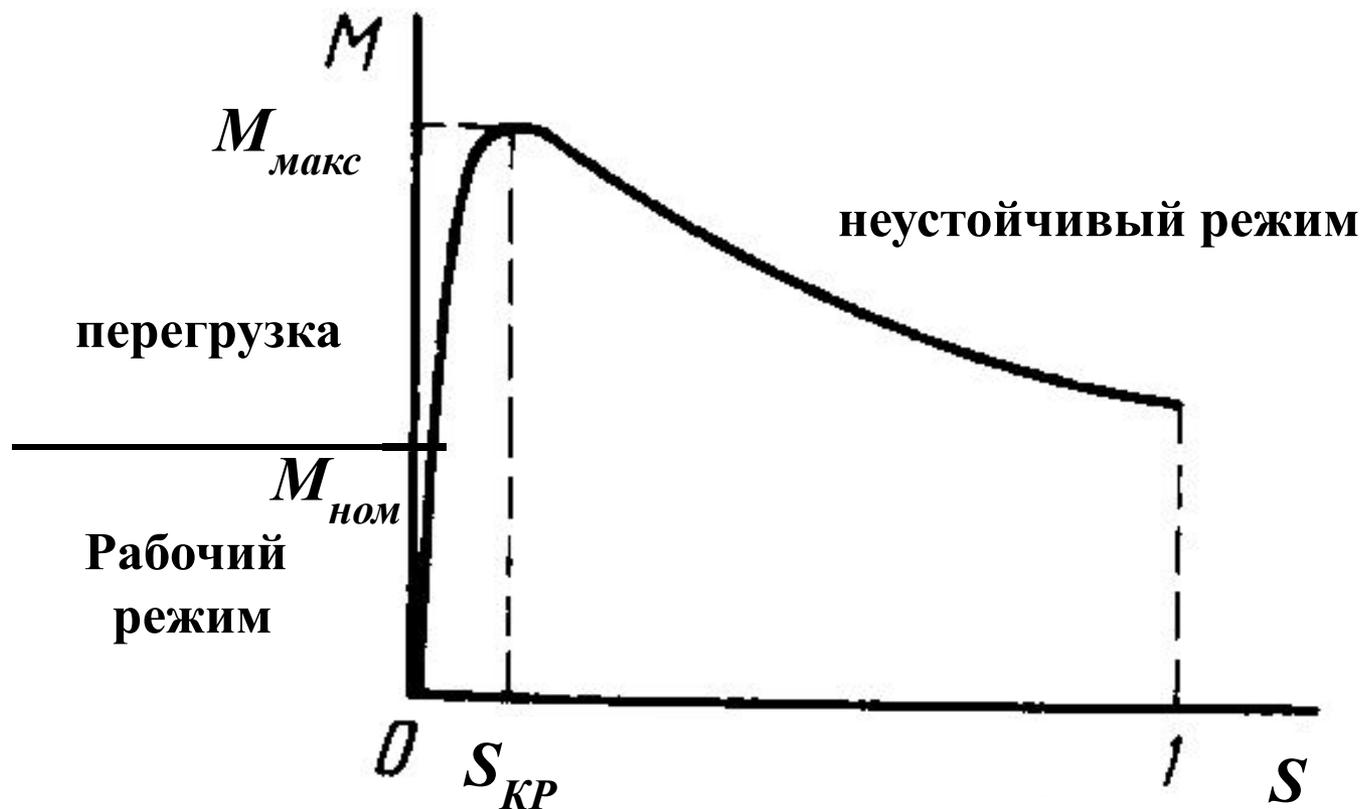
С уменьшением нагрузки на вал машины, по аналогии, уменьшается отбор мощности от сети.

Это автоматическое саморегулирование асинхронной машины.



$$M_{вр} = M_T$$

Зависимость электромагнитного момента от скольжения



$$M = f(S)$$

Участок от 0 до $M_{НОМ}$

$$M_B \uparrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow \cos \psi_2 = \frac{R_2}{Z_2} \downarrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow M \uparrow$$

$$M_B = M$$

**Участок от $M_{НОМ}$ до $M_{МАХ}$ это
возможная перегрузка**

**Участок M_{\max} до $M_{\text{пуск}}$ ($S = 1$)
это неустойчивый режим.**

$$S \geq S_{KP} \quad \uparrow \rightarrow I_2 = const \rightarrow \cos \psi_2 \downarrow$$

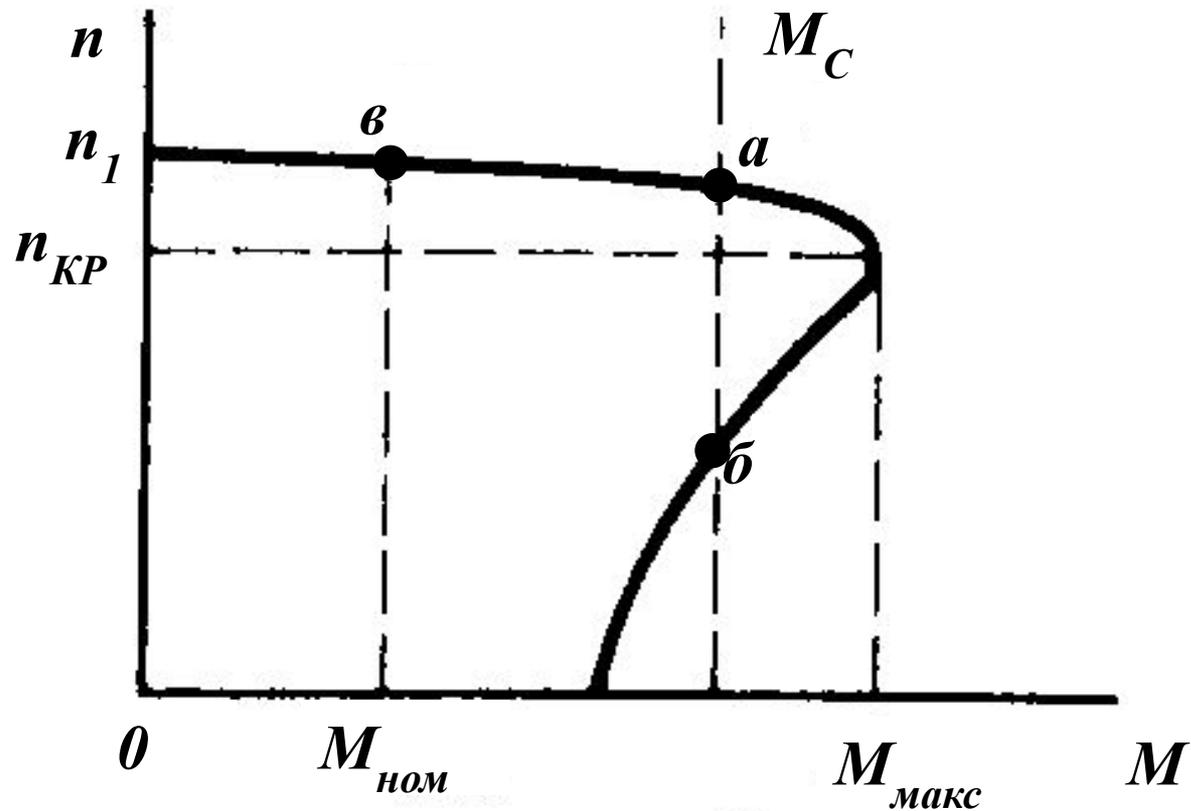
$$M_B \boxtimes M$$

Для расчета момента можно использовать уравнение Клосса.

$$M = \frac{2M_H}{\frac{S_{KP}}{S} + \frac{S}{S_{KP}}}$$

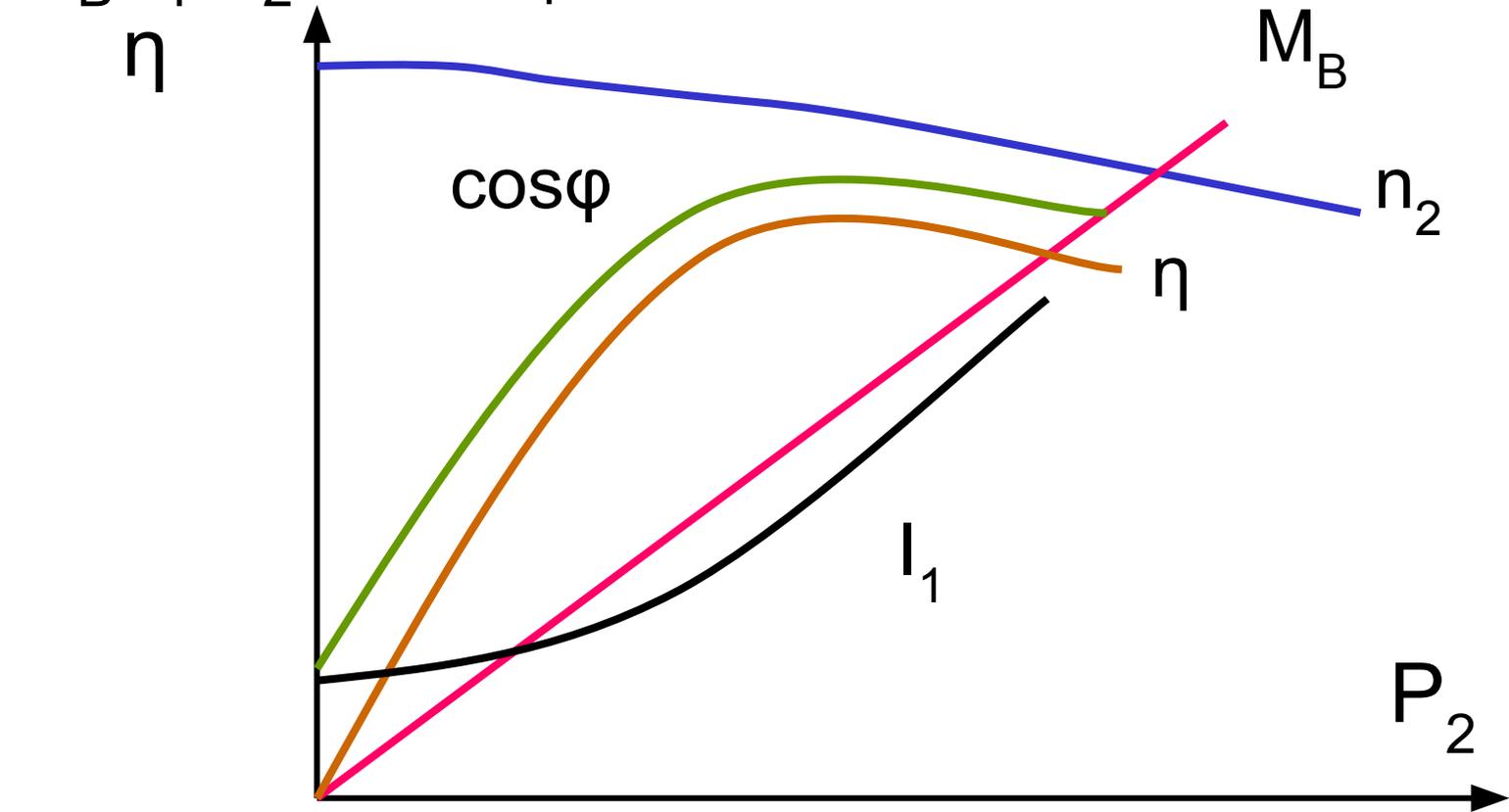
$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$$

Механическая характеристика



$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}} = (2 - 2.5)$$

Рабочие характеристики АД



Пуск 3-х фазного АД в ход

Пусковые свойства определяются

величинами:

пусковым током,

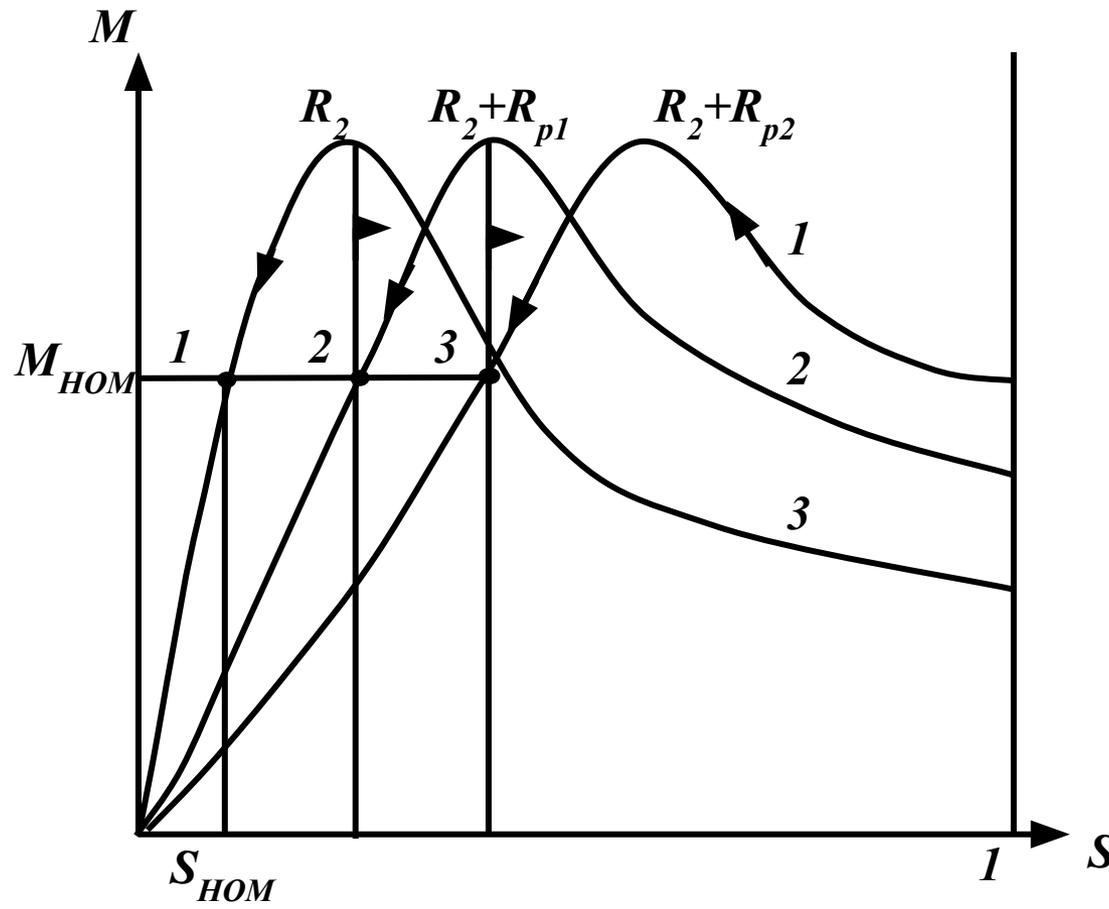
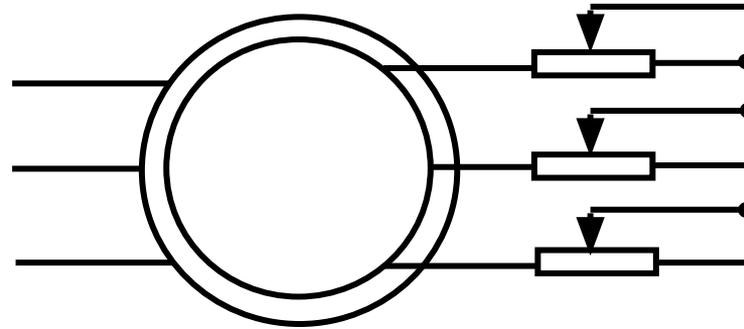
начальным пусковым моментом,

**плавностью и экономичностью пускового
процесса,**

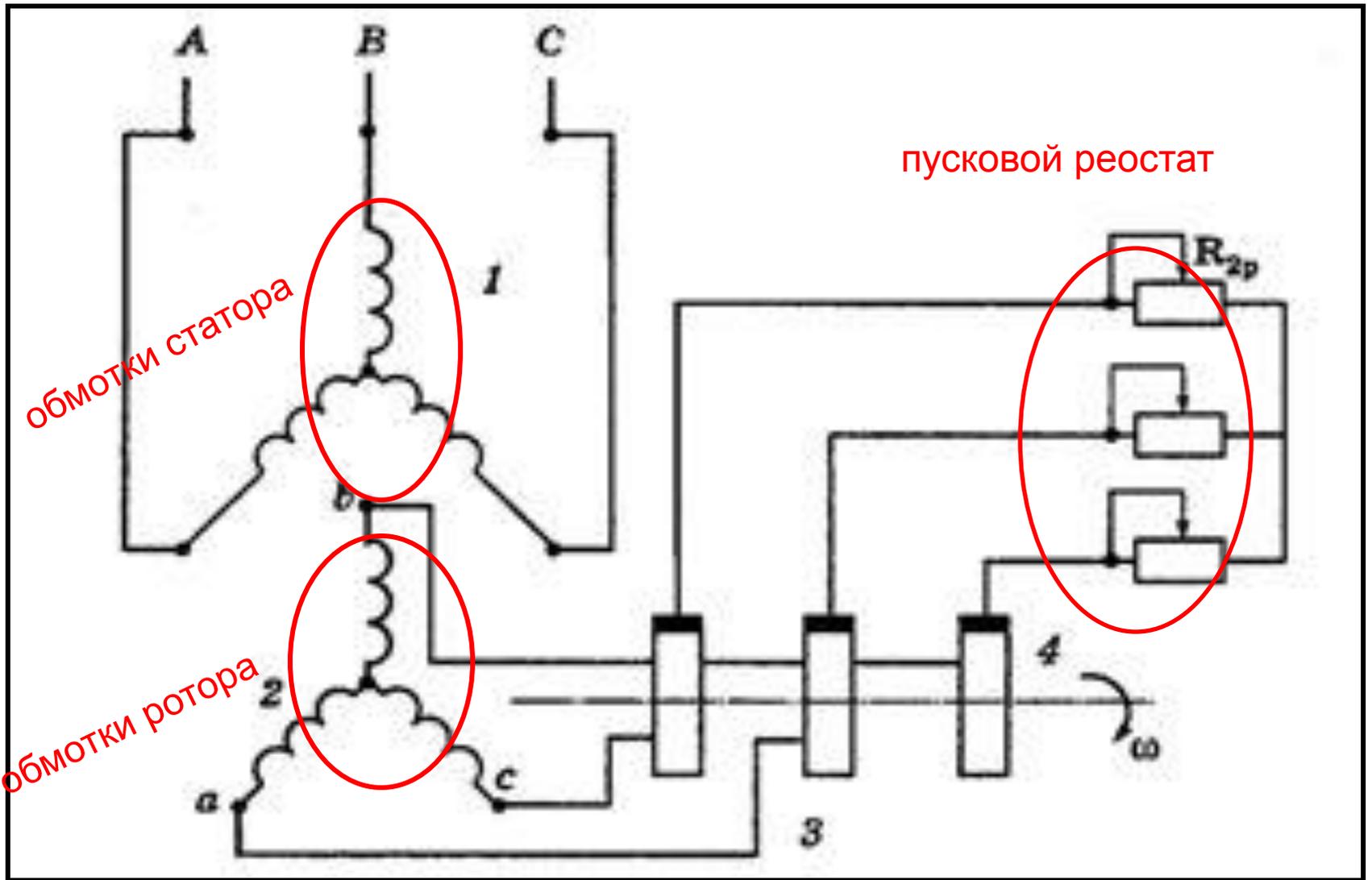
длительностью пуска.

**Пусковые свойства АД определяются
особенностями его конструкции, в частности
устройством ротор**

§ 8.1 Пуск АД с фазным ротором



Пуск АД с фазным ротором



Пуск АД с короткозамкнутым ротором

Прямой пуск. Применим для АД с короткозамкнутым ротором мощностью $P_2 \leq 100$ кВт.

Для пуска необходим рубильник или масляный выключатель.

$$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} = 5.5 - 7$$

Пуск при пониженном напряжении.

Для уменьшения $I_{\text{пуск}}$ на время понижают напряжение между выводами фазных обмоток статора, включив последовательно с обмоткой статора трехфазную катушку индуктивности.

Такой способ уменьшения $I_{\text{пуск}}$ вызывает уменьшение $M_{\text{пуск}}$, пропорционального квадрату напряжения.

Использование АД с короткозамкнутым ротором специальной конструкции

1. Обмотка ротора - двойная беличья клетка, т.е. ротор снабжен 2 клетками, лежащими одна над другой: наружной — пусковой (из марганцовистой латуни) и внутренней — рабочей (из меди).

2. применение АД с глубоким пазом.

Обмотка ротора изготавливается из прямоугольных стержней малой ширины и большой высоты, которые помещаются в глубокие пазы в сердечнике ротора.

Регулирование частоты вращения 3-х фазного АД

Частота вращения ротора $n_2 = \frac{60 f}{p} (1 - s)$

АД с короткозамкнутым ротором:

- метод частотного регулирования:

- метод изменения числа пар полюсов
вращающегося магнитного поля.

АД с фазным ротором - метод реостатного регулирования.

Метод частотного регулирования

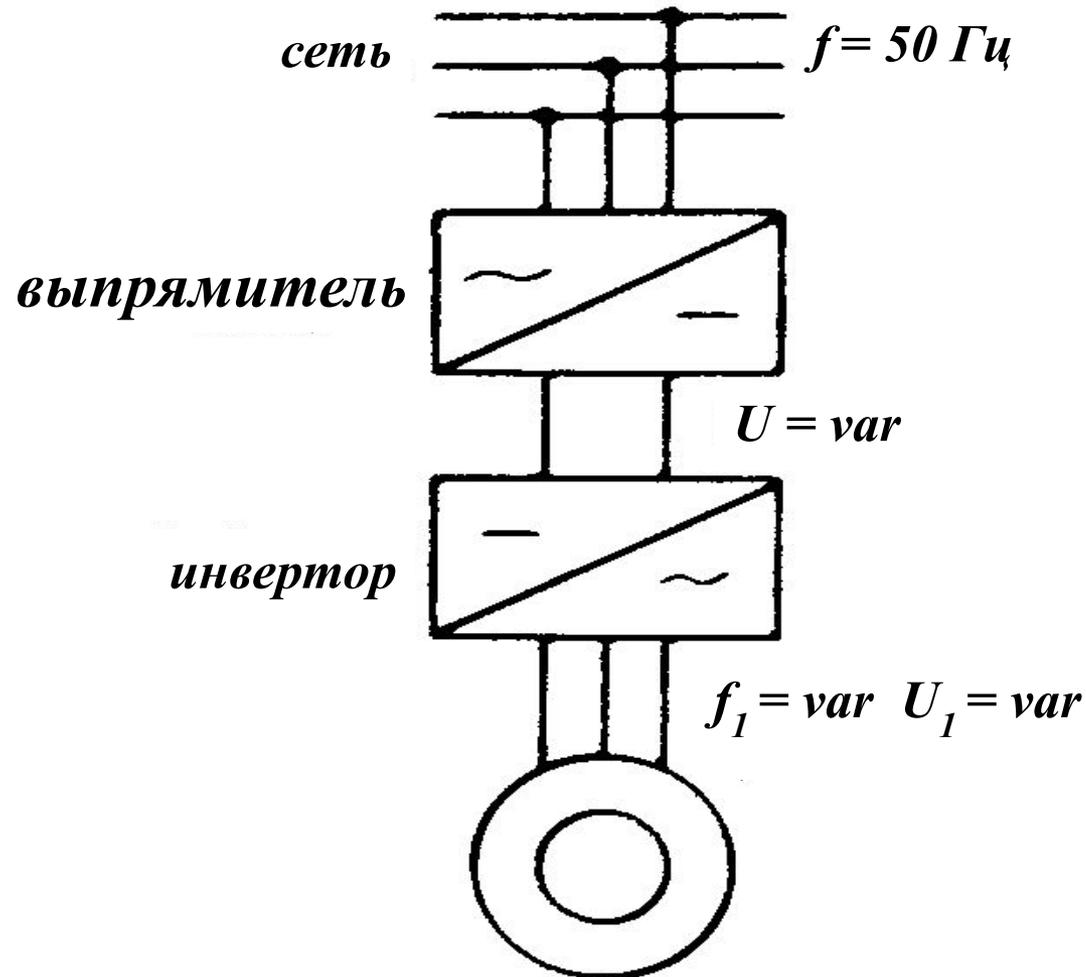
Это плавное регулирование частоты вращения магнитного поля путем регулирования частоты тока в обмотках статора

Достоинства:

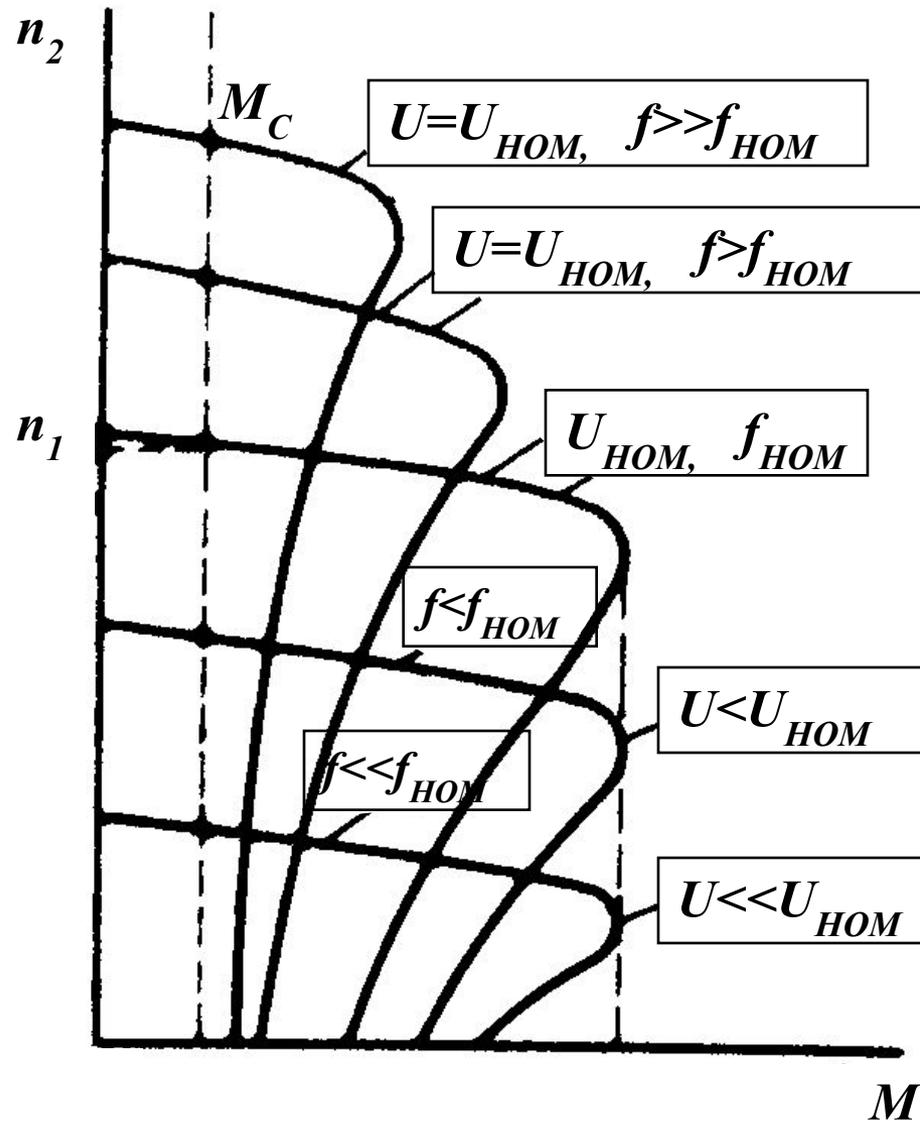
-плавность и большой диапазон регулирования частоты,

-экономичность, т.к. не выделяются дополнительные потери.

Схема включения АД с частотным регулированием скорости



Механические характеристики.



Метод изменения числа пар полюсов

Основан на изменении числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора, т. е. на изменении частоты вращения магнитного поля $n_1 = 60 \cdot f_1 / p$

При $f_1 = \text{const}$ $\omega_{\Pi} = \frac{2\pi \cdot f}{p}$ зависит только от p

1 способ (у АД небольшой мощности): на статор поместить две отдельные обмотки.

2 способ (у АД большой мощности): путем изменения схемы соединения катушек одной обмотки статора, что приведет к изменению числа пар полюсов

Метод реостатного регулирования

**Применяется у АД с фазным ротором.
В цепь обмотки ротора вводится
трехфазный реостат, рассчитанный на
длительный режим работы и называют
регулирующим реостатом.**

Самостоятельно рассмотреть

Однофазные АД

Конденсаторные АД

Комплексная мощность трехфазного асинхронного двигателя

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= P_1 + jQ_1 = \\ &= 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 \end{aligned}$$

где

P_1, Q_1 – активная и реактивная мощности двигателя



Активная мощность определяет среднюю мощность необратимого преобразования электрической энергии в механическую, тепловую и другие виды энергии, а реактивная мощность – максимальную мощность обмена энергией между источником и магнитным полем двигателя

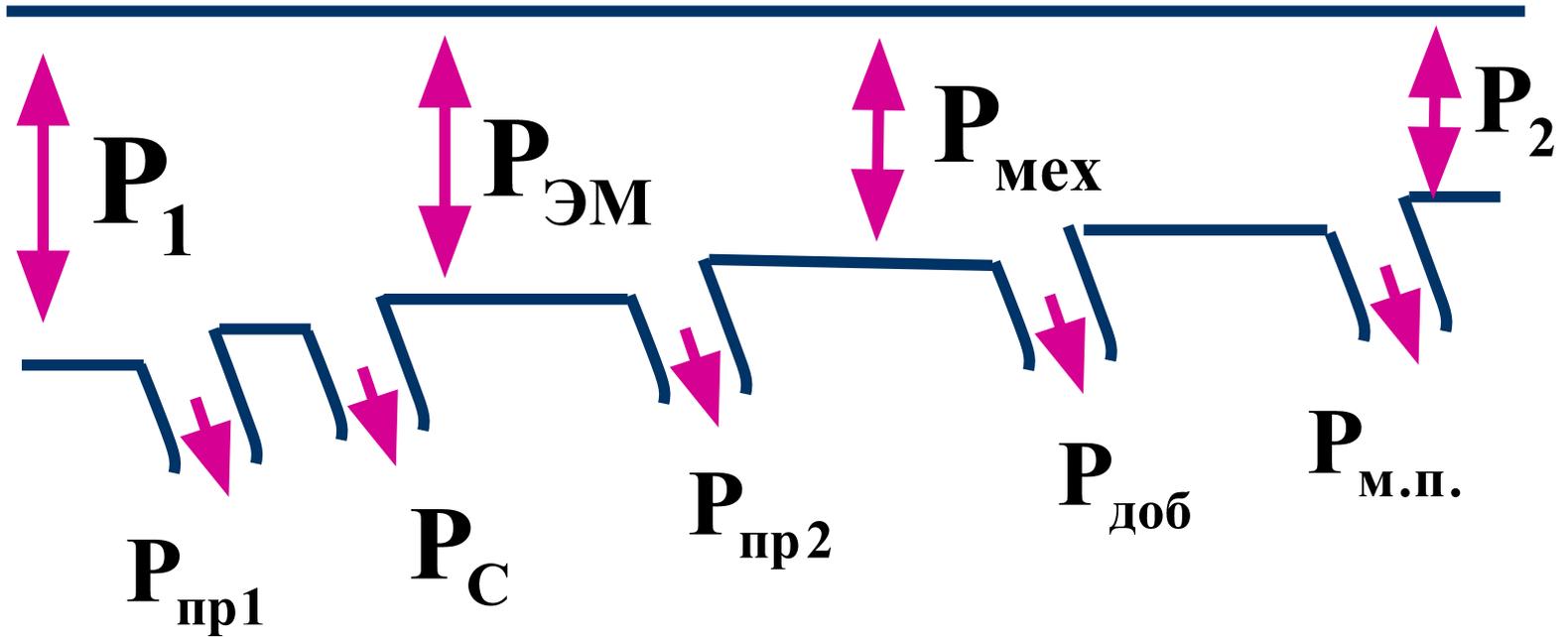
Коэффициент полезного действия АД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

P_2 - полезная мощность на валу

P_1 – мощность потребляемая из сети

Энергетическая диаграмма двигателя



$P_1 = 3U_1I_1 \cos \varphi_1$ – мощность,
подведенная из
сети;

$P_{\text{пр1}}$ — мощность потерь на нагревание проводов обмотки статора (потери в меди);

$P_{\text{с}}$ — мощность потерь на гистерезис и вихревые токи в обмотке статора (потери в стали);

$P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{вр}} \cdot \omega_1$ — электромагнитная мощность, передаваемая ротору;

$P_{\text{пр2}}$ — мощность потерь на нагревание проводов обмотки ротора (потери в меди);

$P_{\text{мех}} = M_{\text{вр}} \cdot \omega_2$ — механическая мощность;

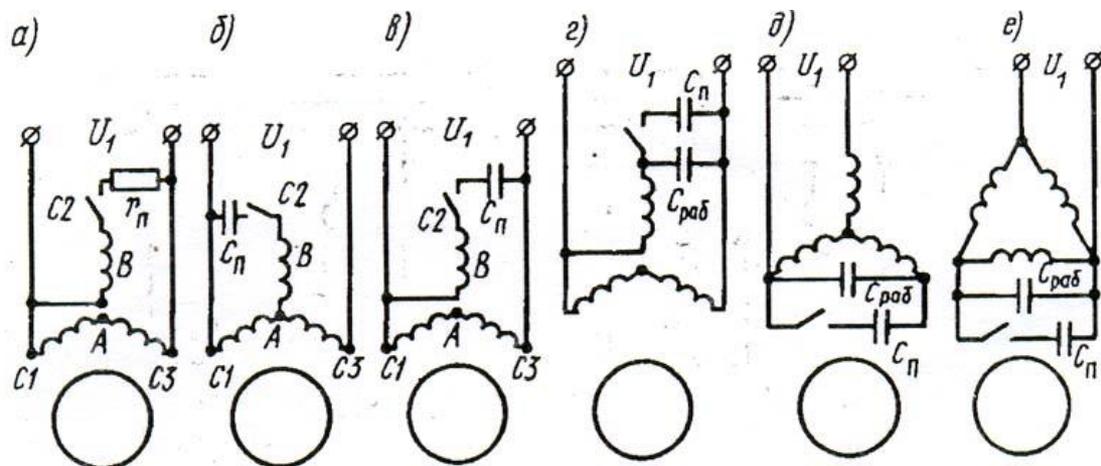
$P_{\text{доб}}$ — добавочные потери (создаются пульсациями магнитного поля);

$P_{\text{м.п.}}$ — механические потери;

P_2 — полезная механическая мощность, отдаваемая на валу двигателя

Мощность потерь в роторе пропорциональна S ,
Поэтому АД конструируется так, чтобы $n_{\text{НОМ}} \approx n_1$.

Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть

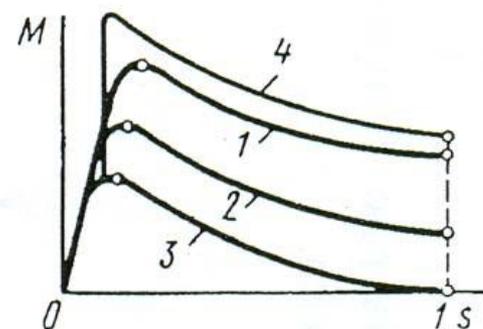


Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

$$C_{раб} \approx 2700 I_{ном} / U_1, \quad \text{г)}$$

$$C_{раб} \approx 2800 I_{ном} / U_1, \quad \text{д)}$$

$$C_{раб} \approx 4800 I_{ном} / U_1, \quad \text{е)}$$

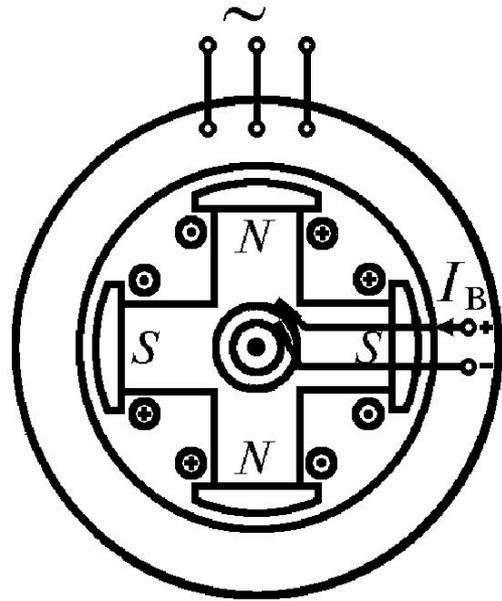


Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при различных схемах включения

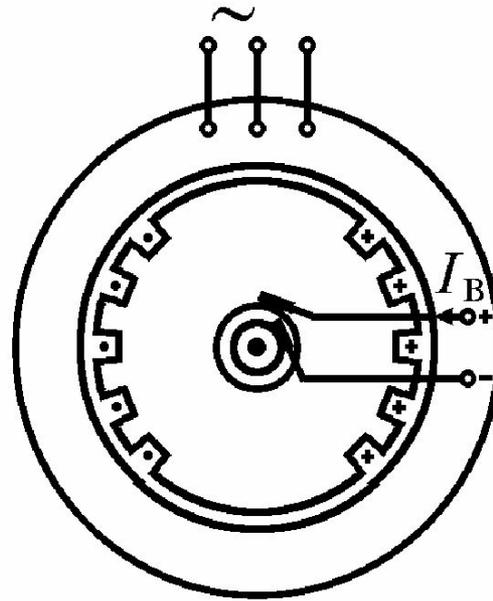
Синхронные машины

- Синхронными машинами называют электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора находится в строго постоянном соотношении с частотой тока электрической сети.
- **Преимущества:**
 - способность вырабатывать как активную, так и реактивную мощность (с возможностью ее регулирования);
 - возможность регулирования выходного напряжения;
 - возможность работы как с сетью, так и в автономном режиме без применения каких-либо сложных дополнительных устройств;
 - высокий КПД.

Устройство синхронной машины



а)



б)

два типа роторов:

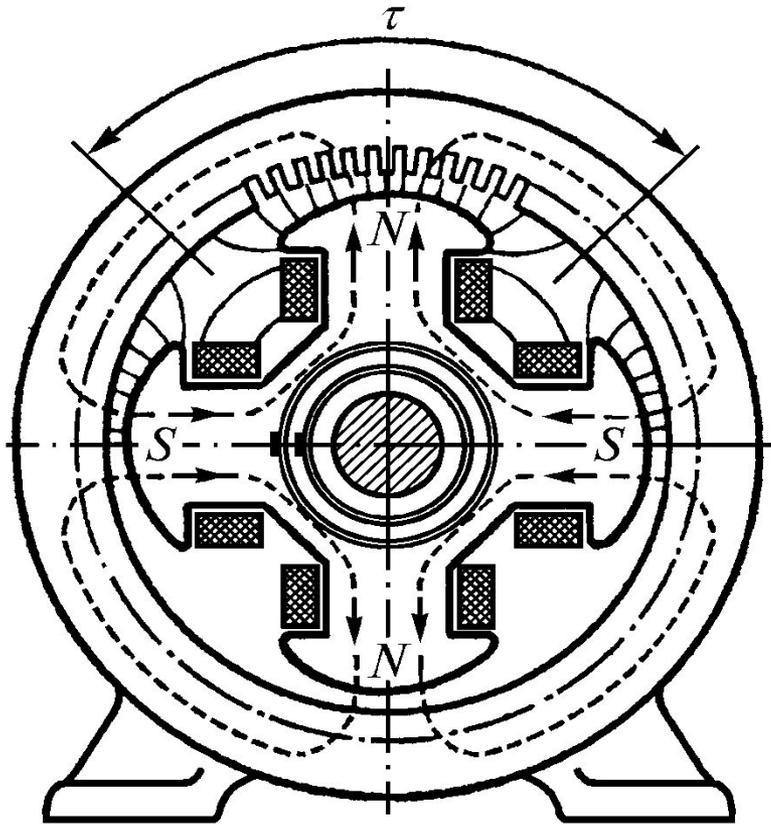
1. Явнополюсный а)
2. Неявнополюсный б)

Явнополюсный ротор – имеет выступающие полюсы, применяют у машин с частотой вращения до 1000, 1500 об/мин.

Неявнополюсный ротор – имеет вид цилиндра, применяют при скоростях 1500 и 3000 об/мин.

- **Неподвижный статор** – выполняет функции якоря,
- **Вращающийся ротор** – служит индуктором.

Холостой ход синхронного генератора



$E = f(I_B)$ при $I = 0$
характеристика холостого
хода

обмотка якоря (статора)
разомкнута и магнитное поле
машины создается только
обмоткой возбуждения ротора

$$E = 4,44k_{об}wf\Phi_0$$

$k_{об}$ – обмоточный
коэффициент;

w – число витков одной фазы
обмотки статора

$f = \frac{pn_1}{60}$ – частота синусоидальных
ЭДС;

p – число пар
полюсов;

Φ_0 – максимальный магнитный
поток полюса ротора;

n_1 – синхронная частота
вращения.