

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)**

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.**

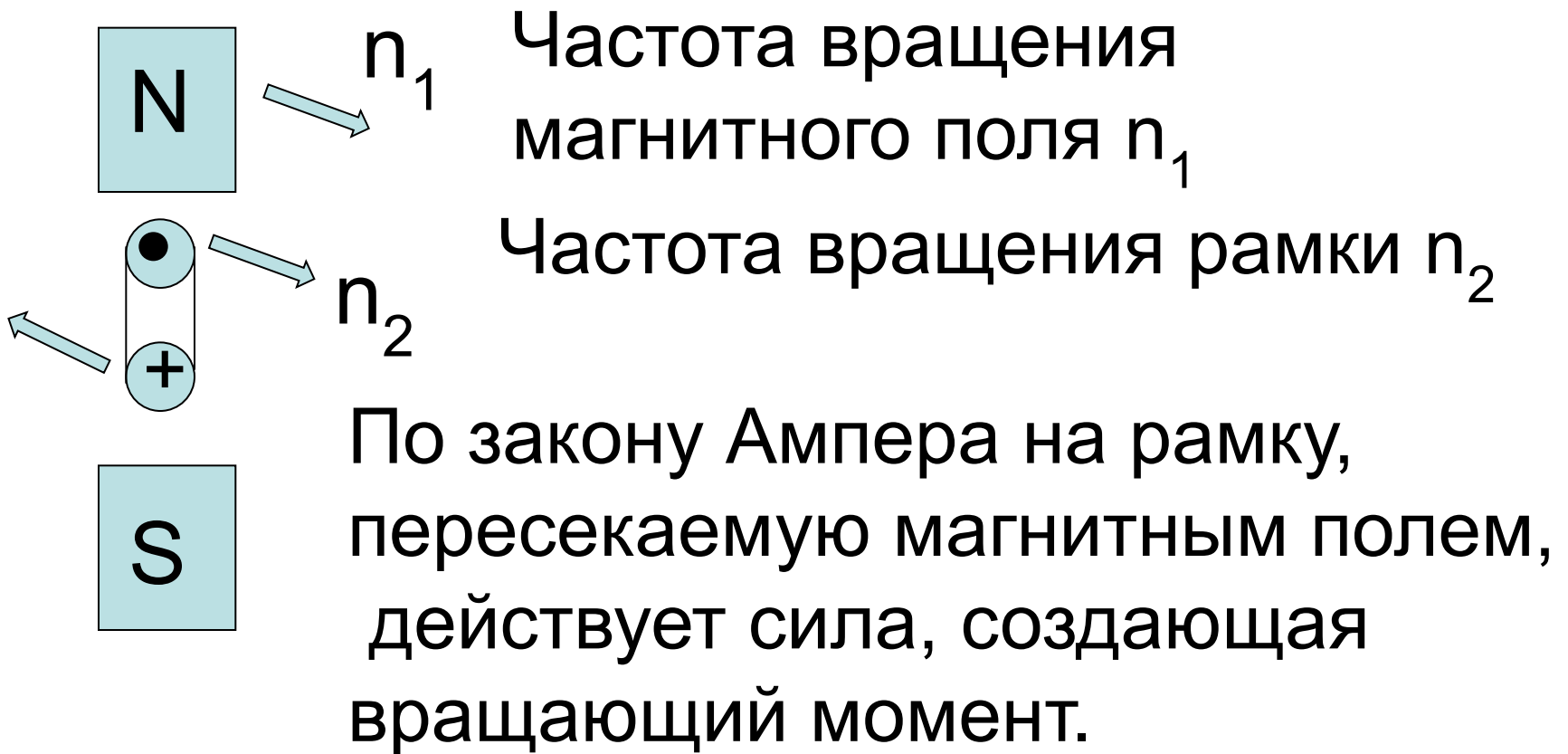
**Основной недостаток - сложность
регулирования частоты
вращения.**

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).

В основе устройства АД лежит свойство
3х фазных систем создавать
вращающееся магнитное поле

Принцип действия АД



При этом $n_2 < n_1$, т.к. момент силы возникает только при пересечении витка магнитным полем.

Устройства, у которых скорость вращения ротора (рамки) не совпадает со скоростью вращения магнитного поля, называются асинхронными.

Относительное отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля называется скольжением “ S ”

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

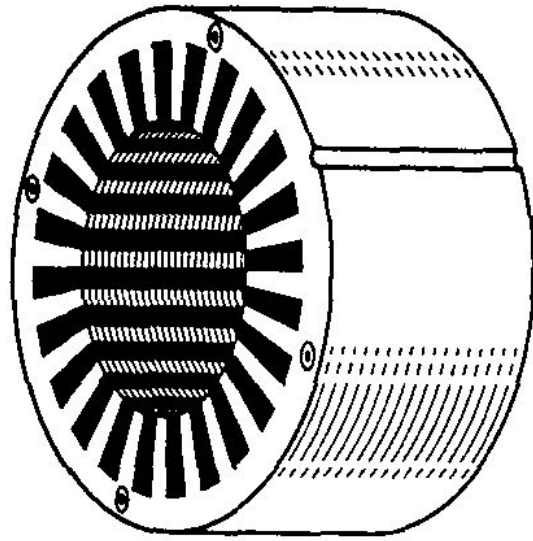
$S_n = n_1 - n_2$ называется частотой скольжения

Устройство асинхронной машины

**Асинхронная машина
состоит из двух частей:
неподвижной – статора и
вращающейся – ротора.**

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)

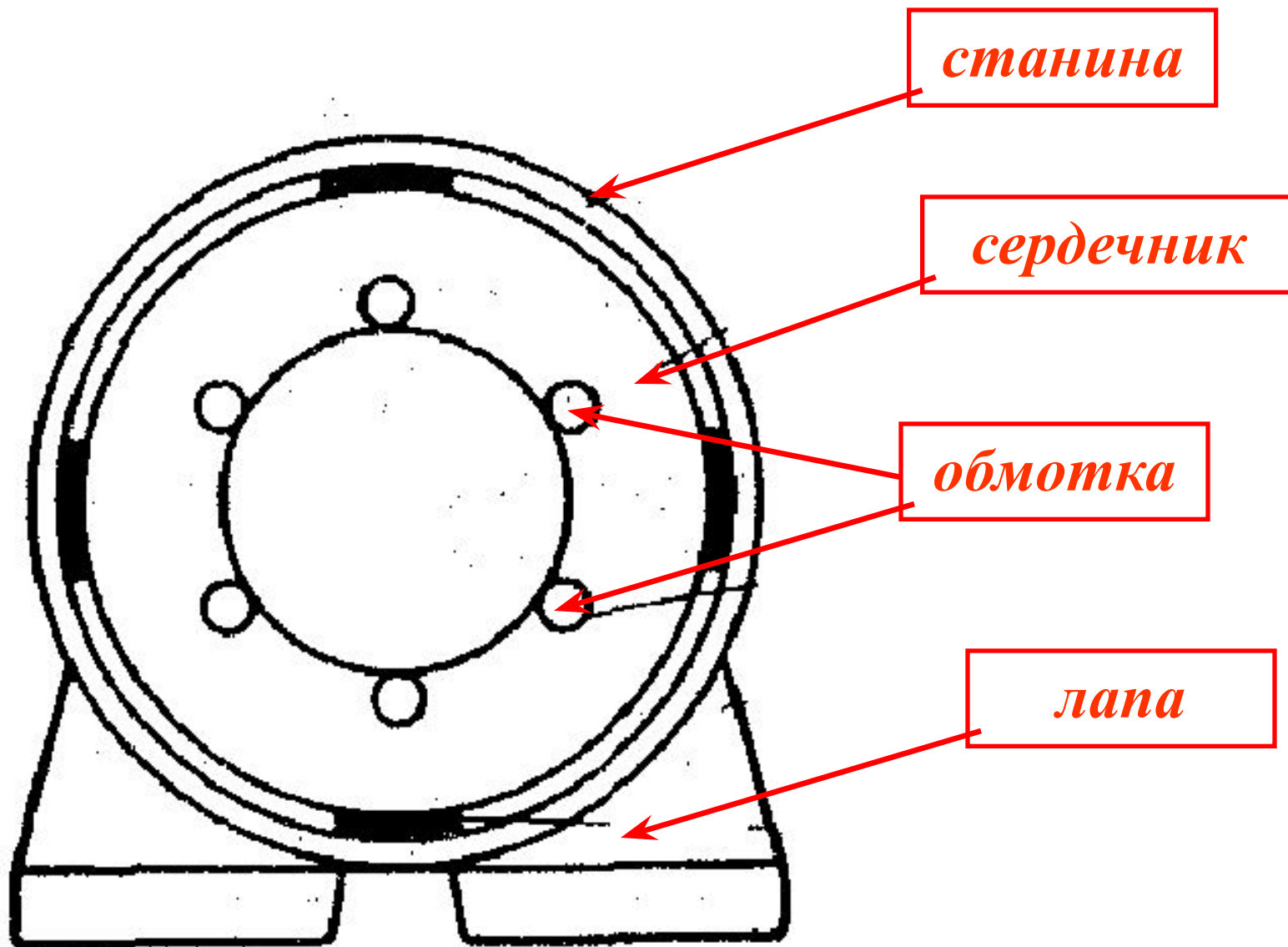


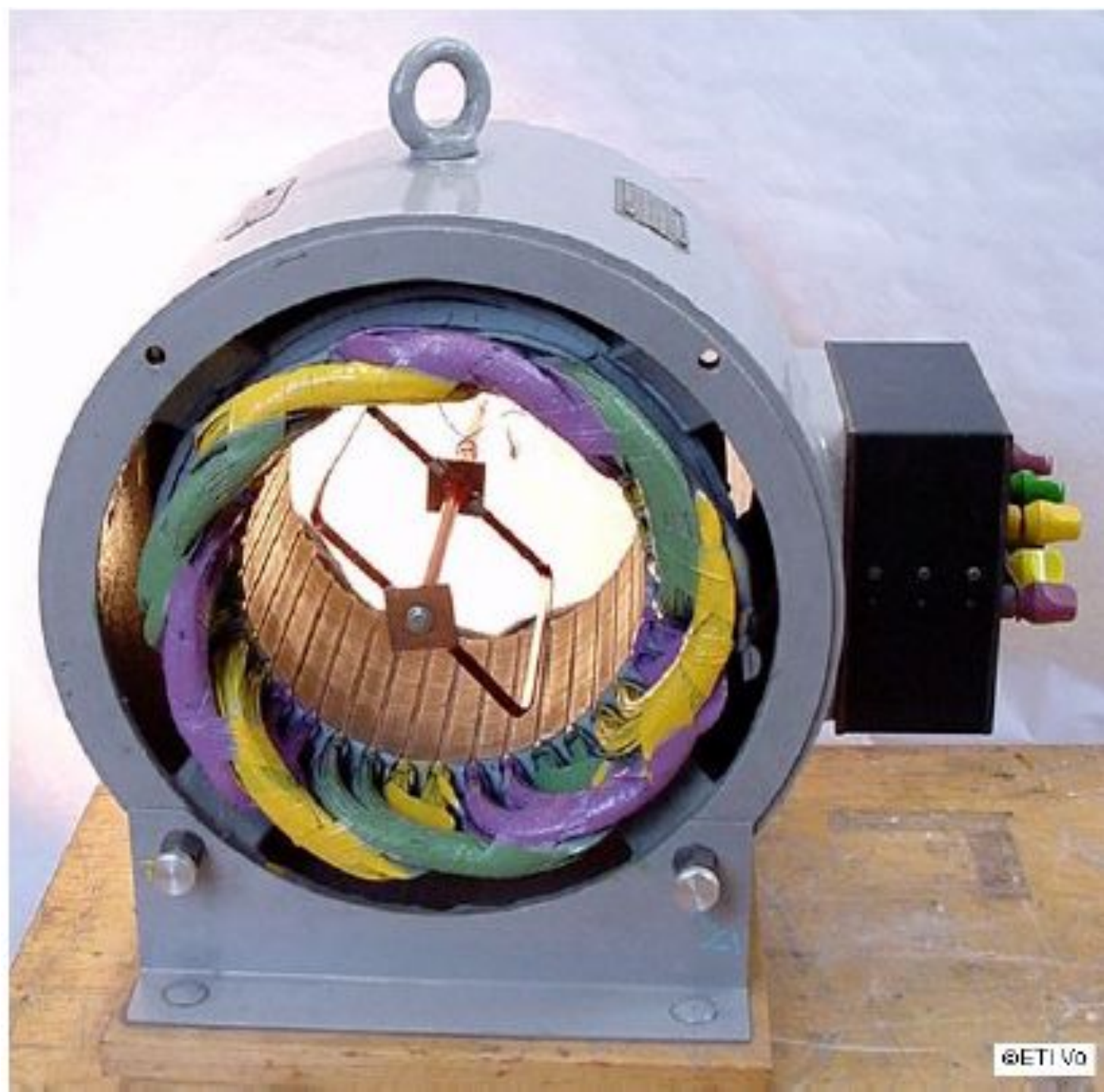
a

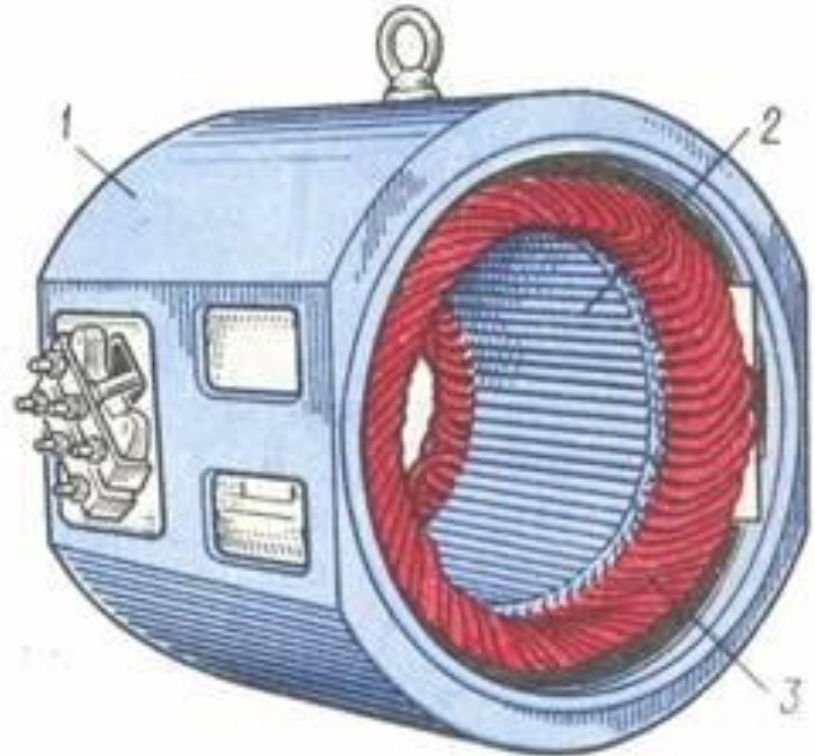
Собранный пакет колец статора запрессован в корпус – **станину (чугун), которая крепится к неподвижному жесткому основанию.**

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

Конструкция статора







1 — станина;

2 — внутренняя поверхность
листов;

3 — трехфазная обмотка

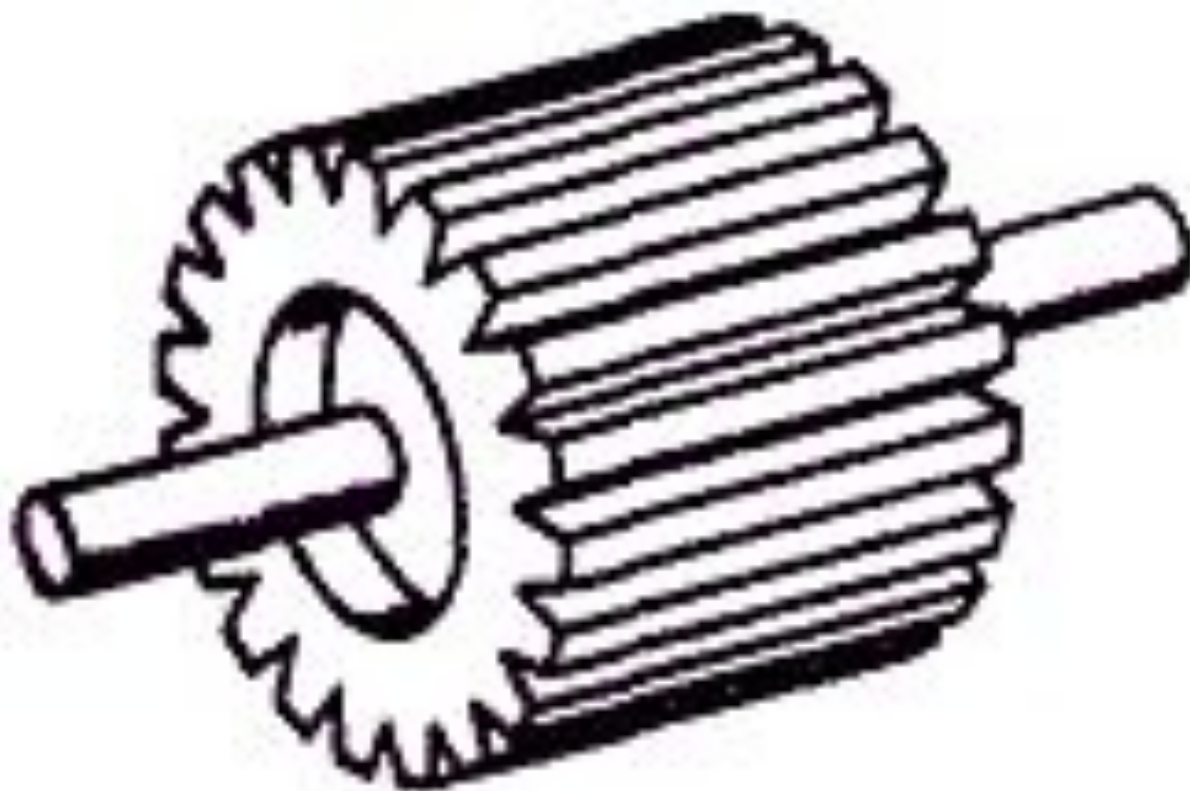
Начала и концы фаз обмоток статора выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 660/380, Y/ Δ . Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{\text{л}} = 660\text{В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{\text{л}} = 380\text{В}$ – по схеме треугольник.

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.

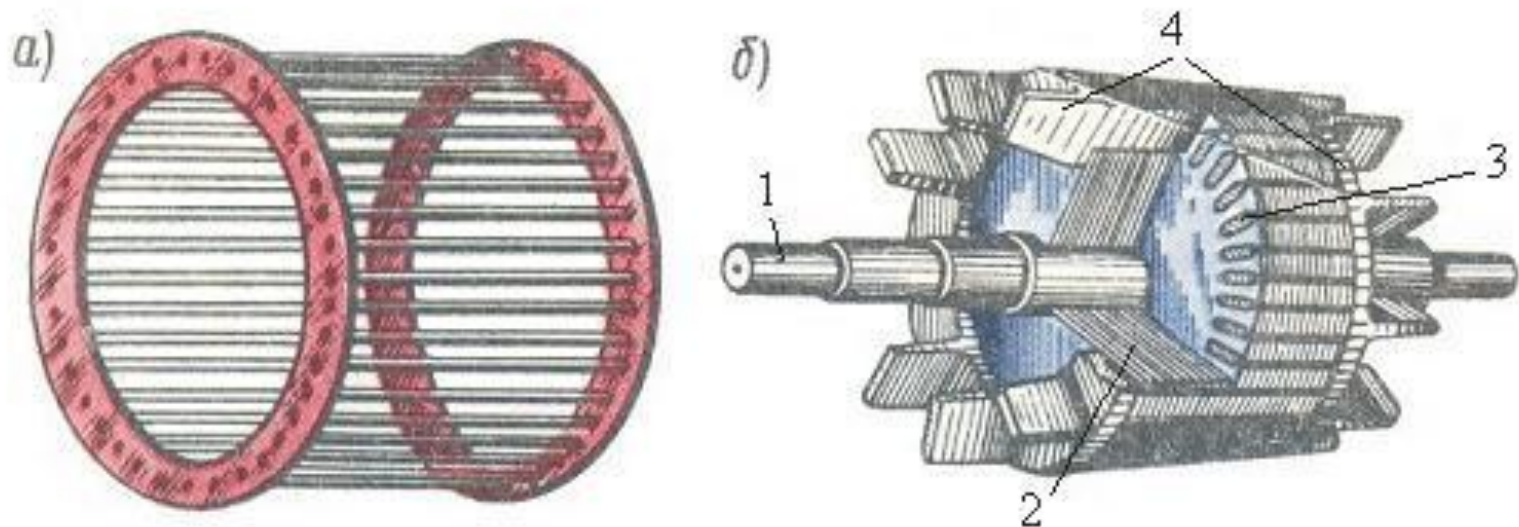


Сердечник ротора

Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, которые без изоляции вставляются в пазы ротора.

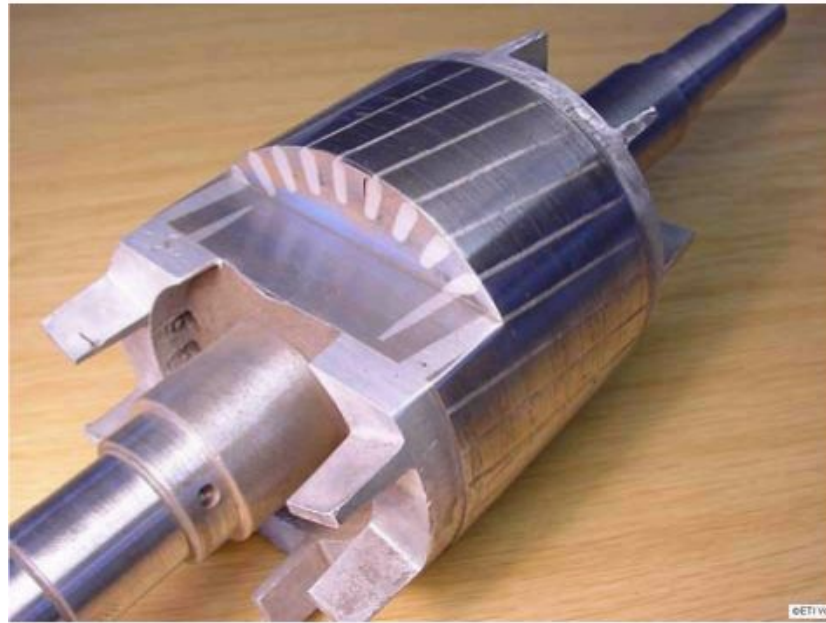
Торцевые концы стержней замыкаются накоротко кольцами из того же материала.

Часто обмотка изготавливается путем заливки пазов ротора расплавленным алюминием.

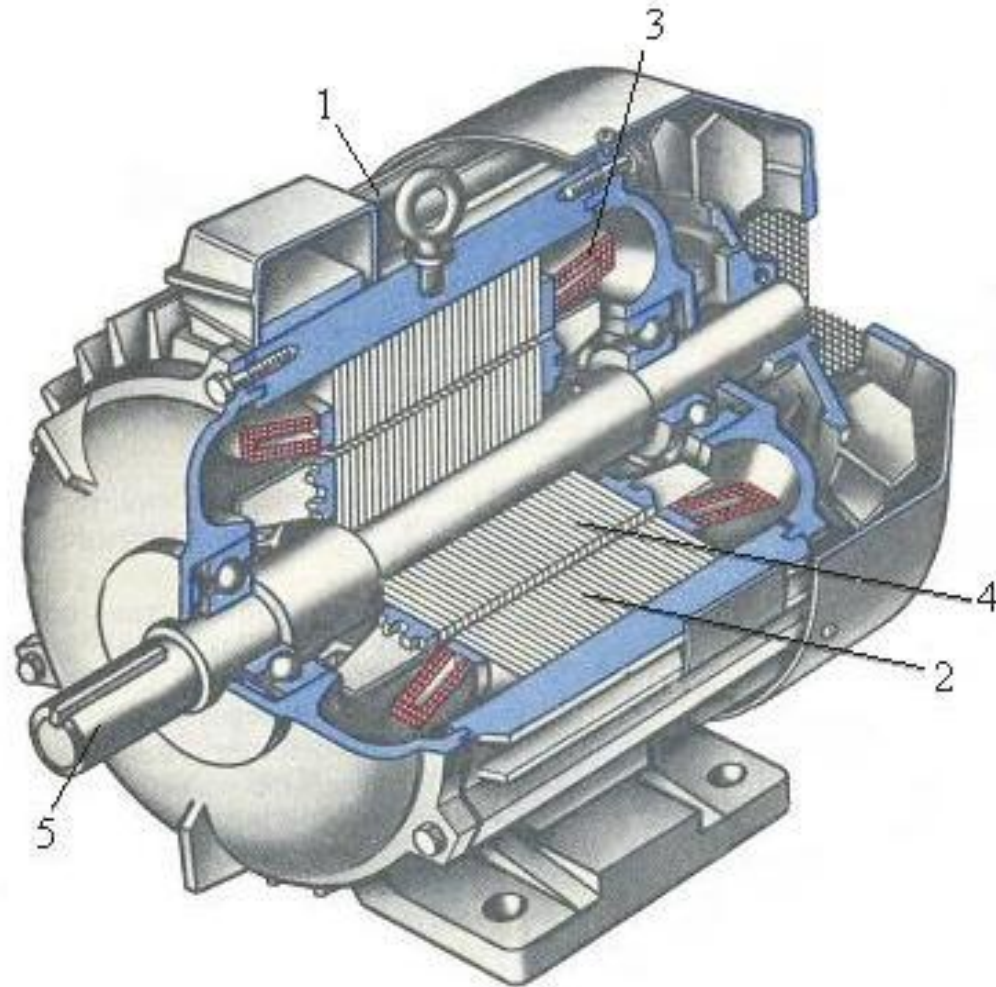


1 – вал; 2 – ; 3 – стержни, которые
закладываются в пазы сердечника ротора; 4 –
торцевые кольца

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



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



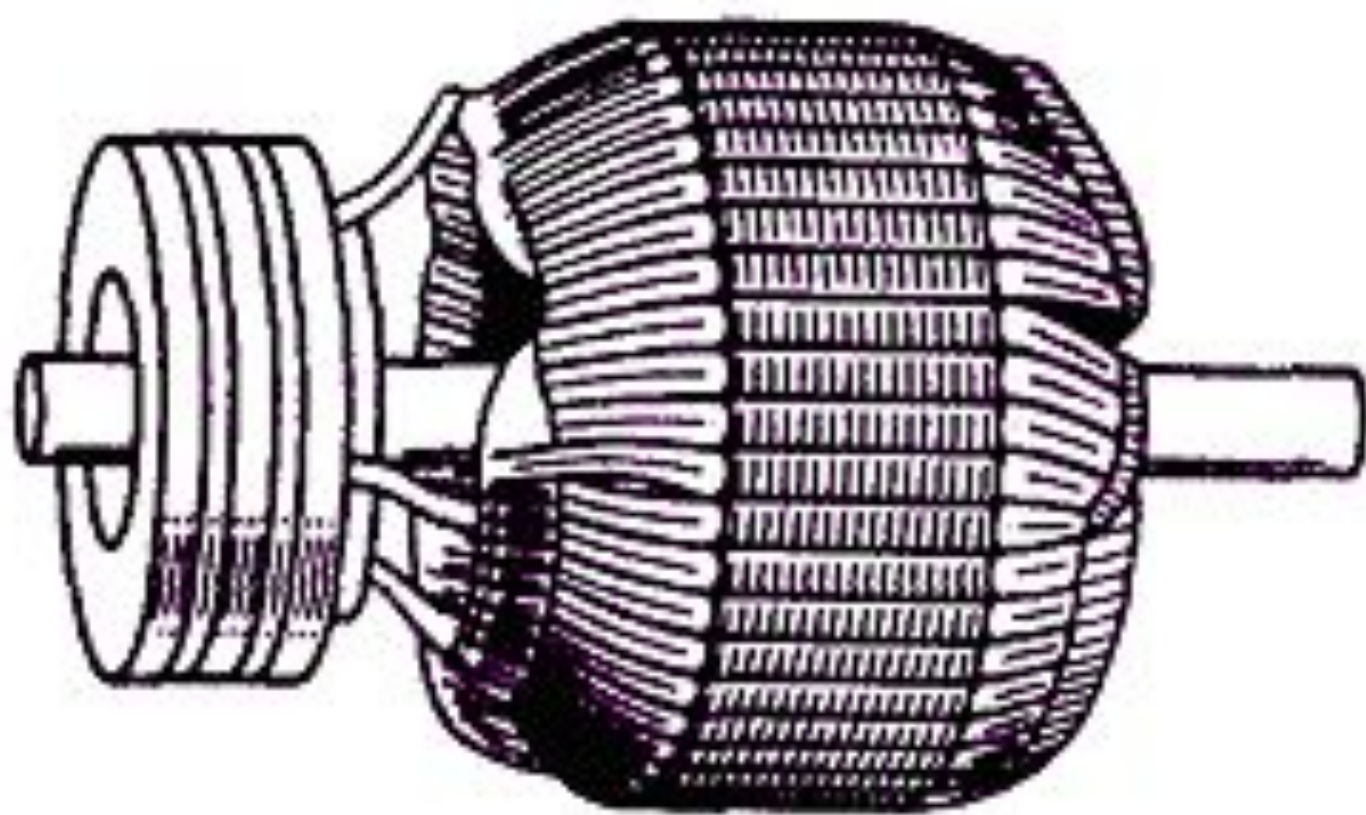
Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства.

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

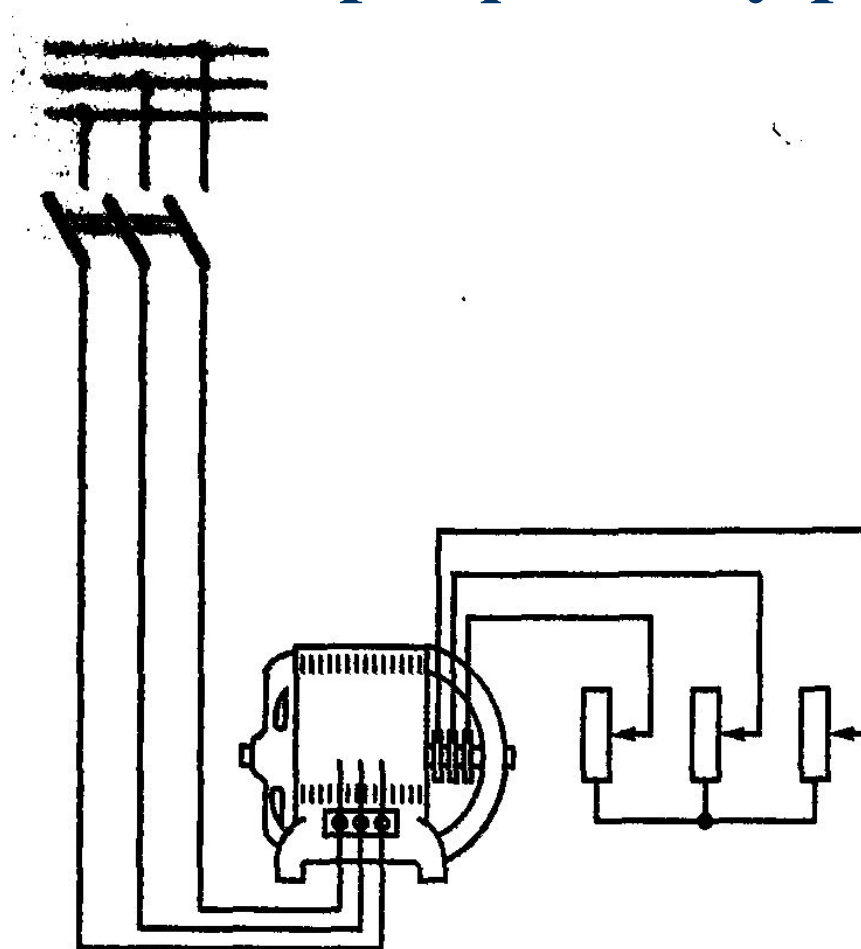
Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

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

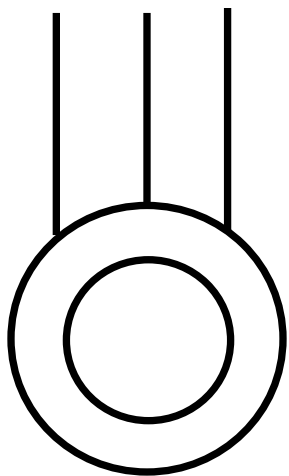
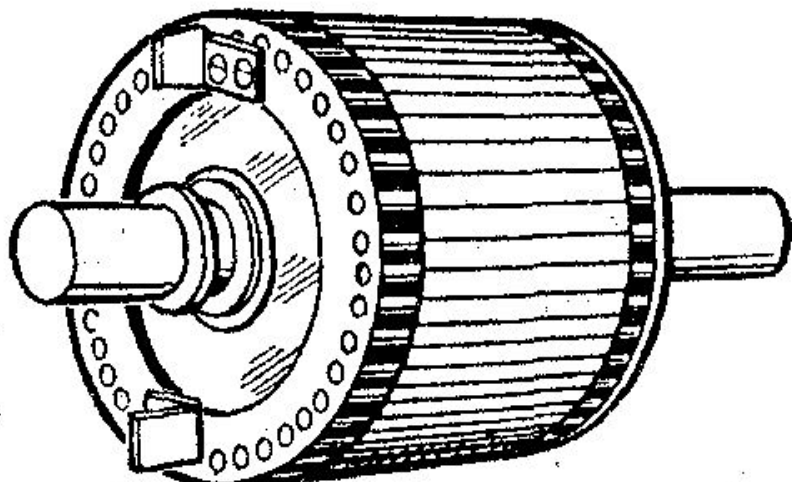
**Три конца фазных обмоток ротора
соединяются звездой, а свободные
концы соединяются с тремя
контактными кольцами (чугун или
медь), укрепленными на валу
машины.**



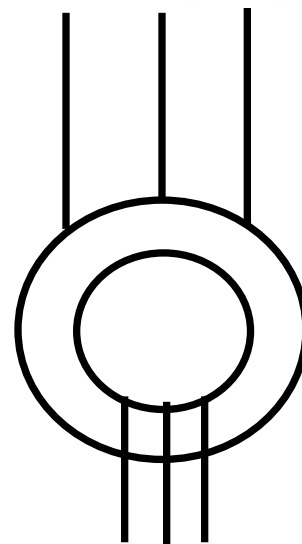
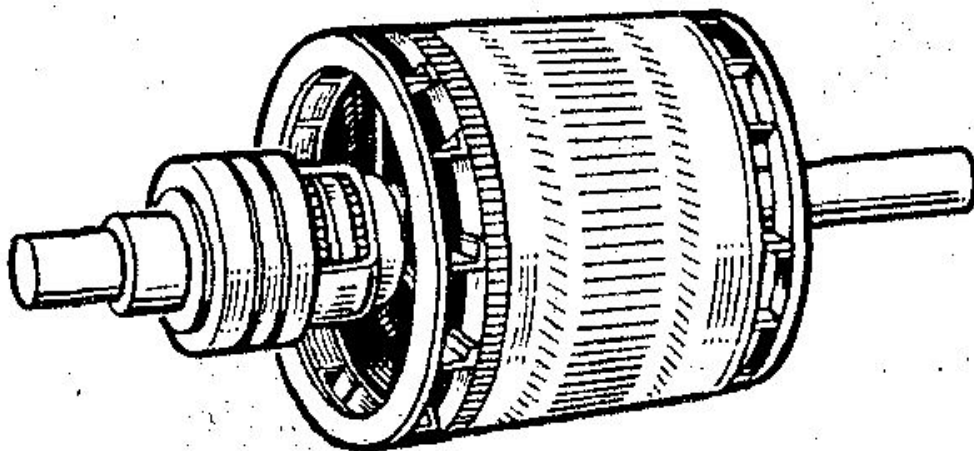
**На кольца наложены щетки,
установленные в щеткодержателях.
Через щетки и кольца обмотка
присоединена к трехфазному реостату.**



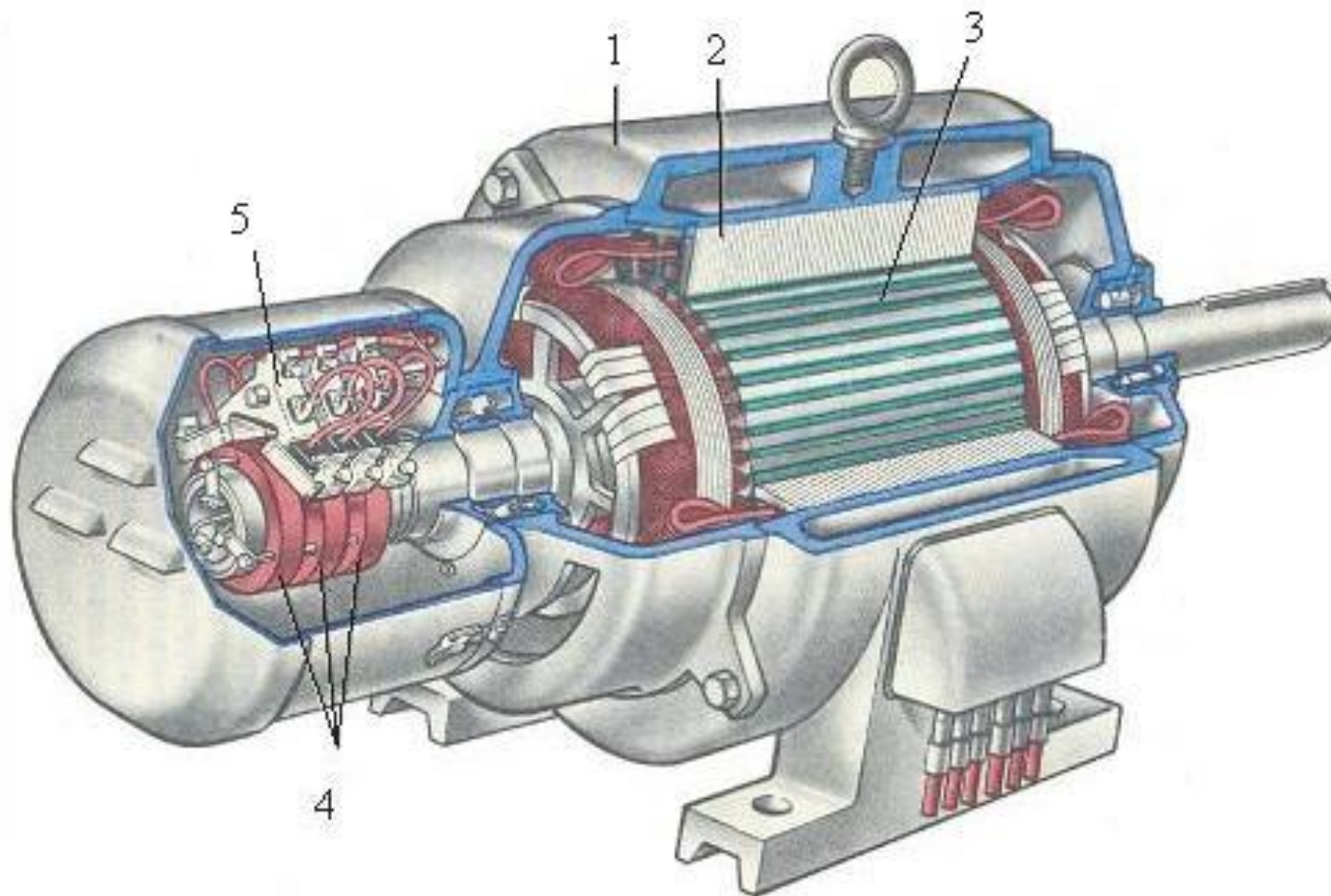
Короткозамкнутый ротор



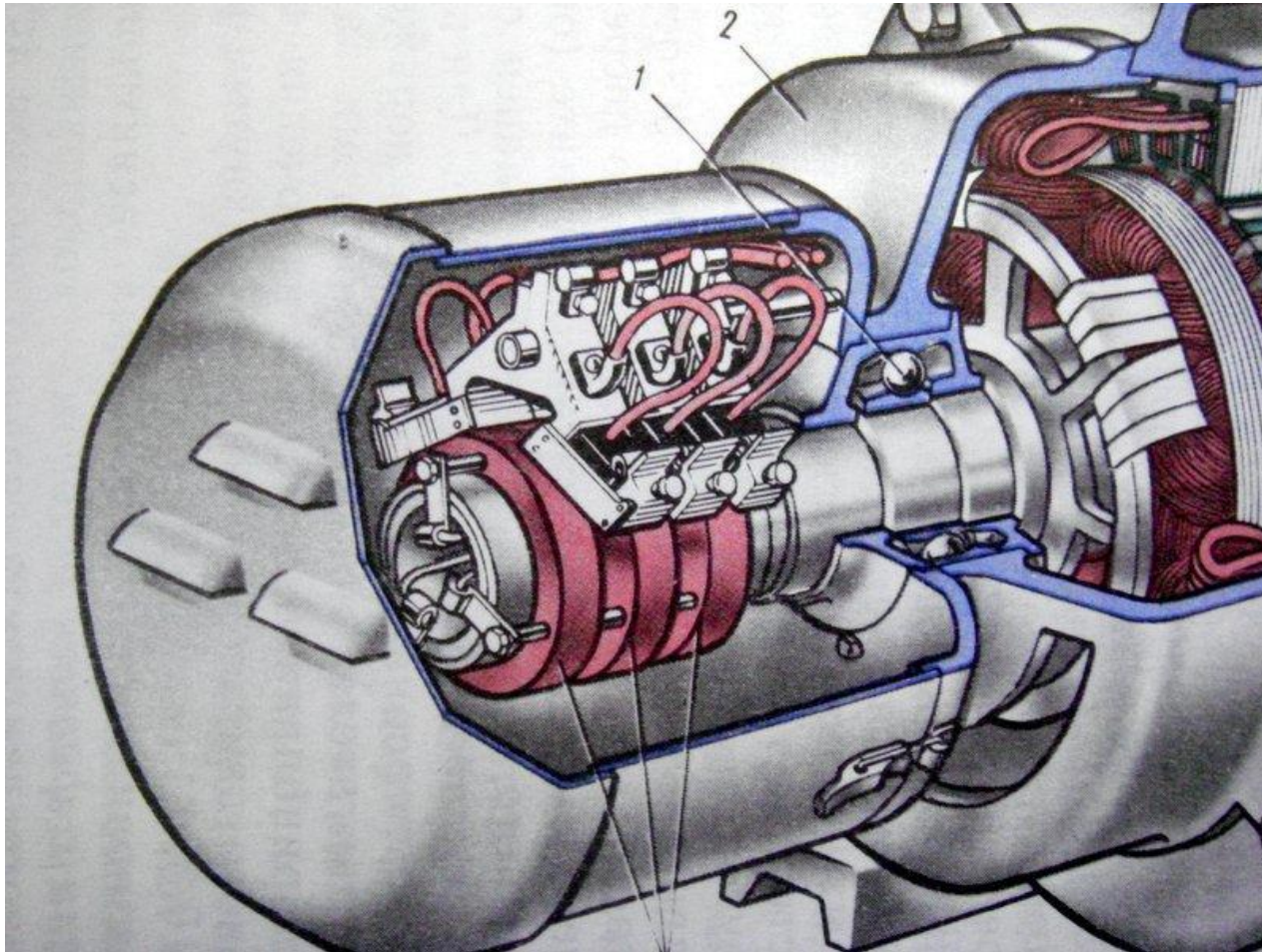
Фазный ротор

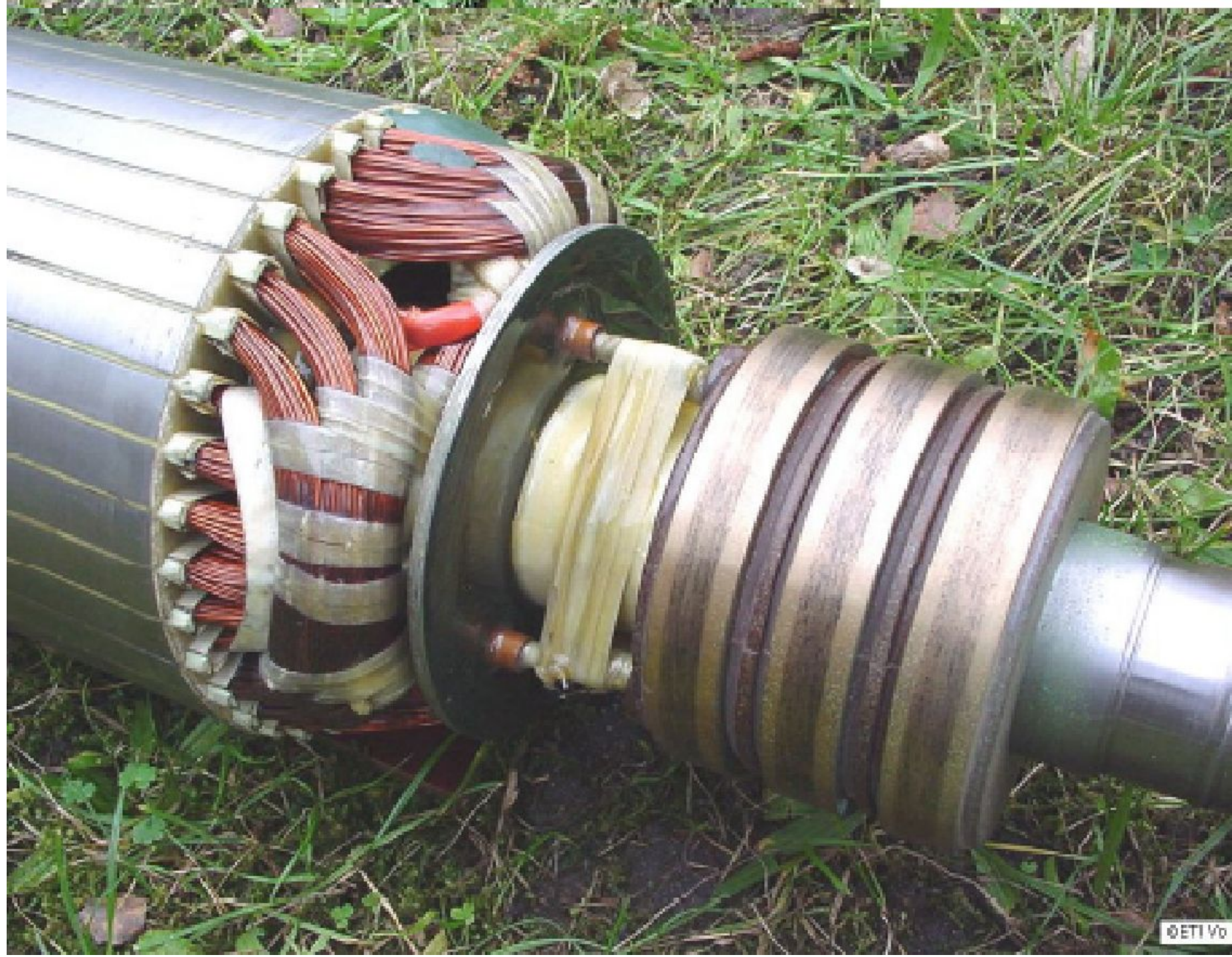


**Асинхронная машины с фазным ротором
в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка
статора, 3 – ротор, 4 – контактные
кольца, 5 – щетки.**



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/ $I_H \Delta$.

n_H – номинальная частота вращения в об/мин.

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

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

315 – высота оси вращения в мм;

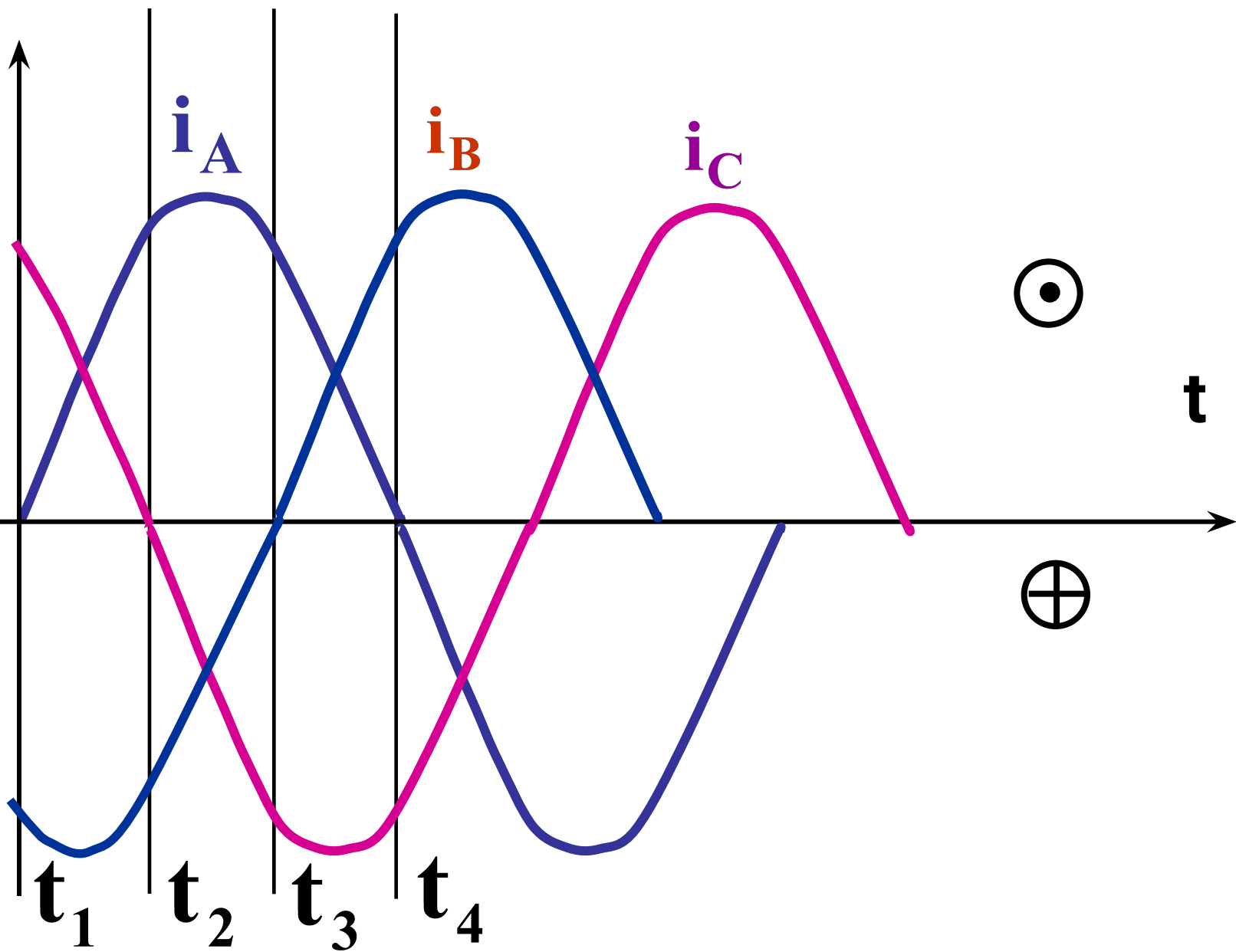
**S – установочные размеры (они задаются в
справочнике);**

8 – число полюсов машины.

Статор

Создание
вращающегося
магнитного поля

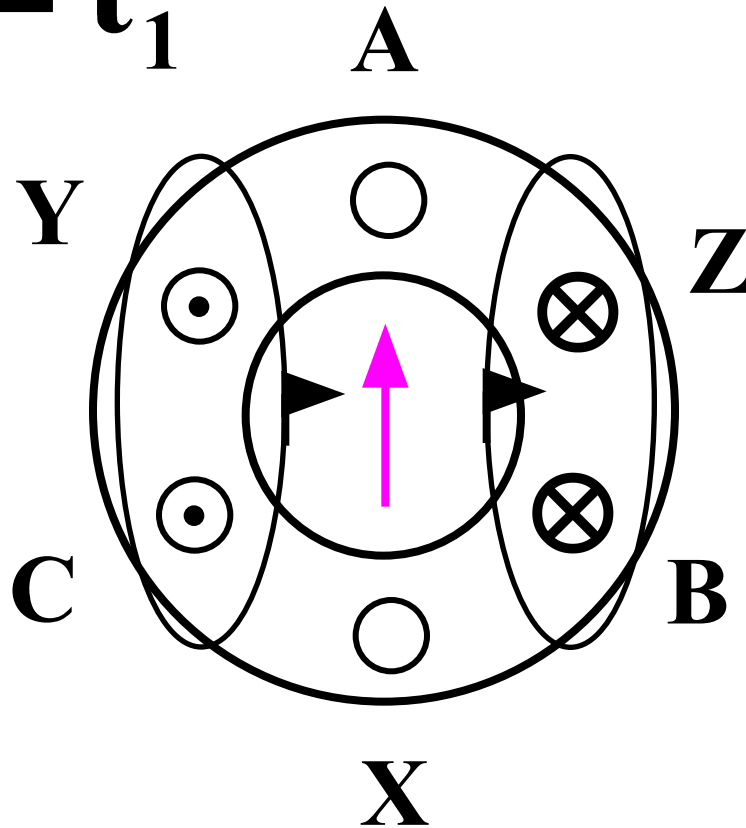
**Если три катушки,
расположенные под углом 120°
друг относительно друга,
включить в трехфазную сеть
переменного тока, а в центре этой
окружности поместить
магнитную стрелку на оси, то
стрелка придет во вращение.
Следовательно, эти три катушки
создают вращающееся магнитное
поле.**



Выбираем моменты времени через одну шестую часть периода. Для каждого из этих моментов последовательно изобразим направления результирующего магнитного поля внутри статора трехфазной машины, которая имеет три обмотки по одному витку. Начала обмоток обозначим буквами А, В, С, а концы – Х, Y, Z.

**Ток в начале обмотки будем
считать направленным к нам,
если его значение положительно**

$$t = t_1$$

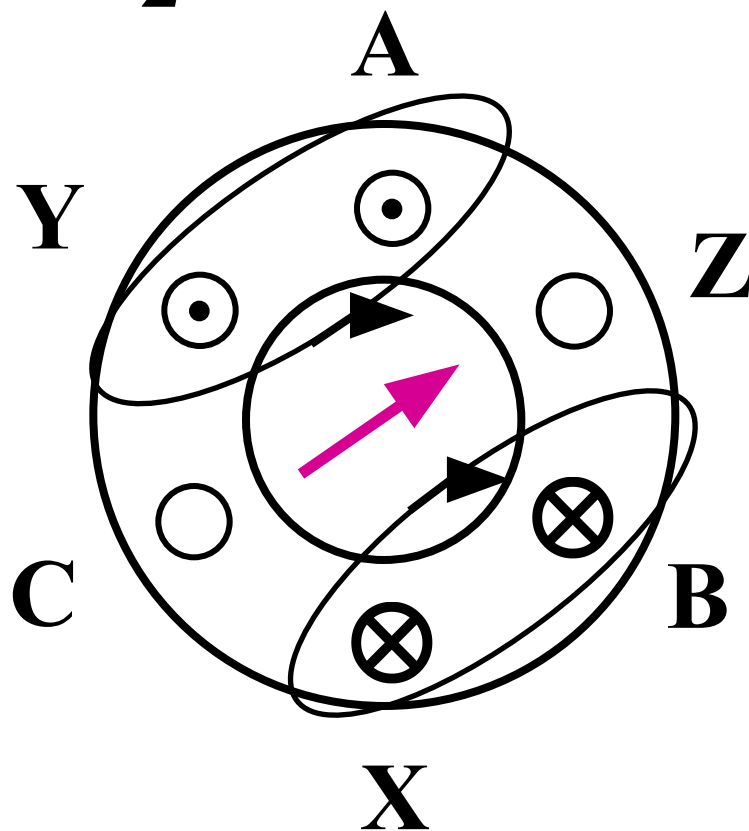


$$i_A = 0,$$

$$i_B < 0,$$

$$i_C > 0$$

$$t = t_2$$

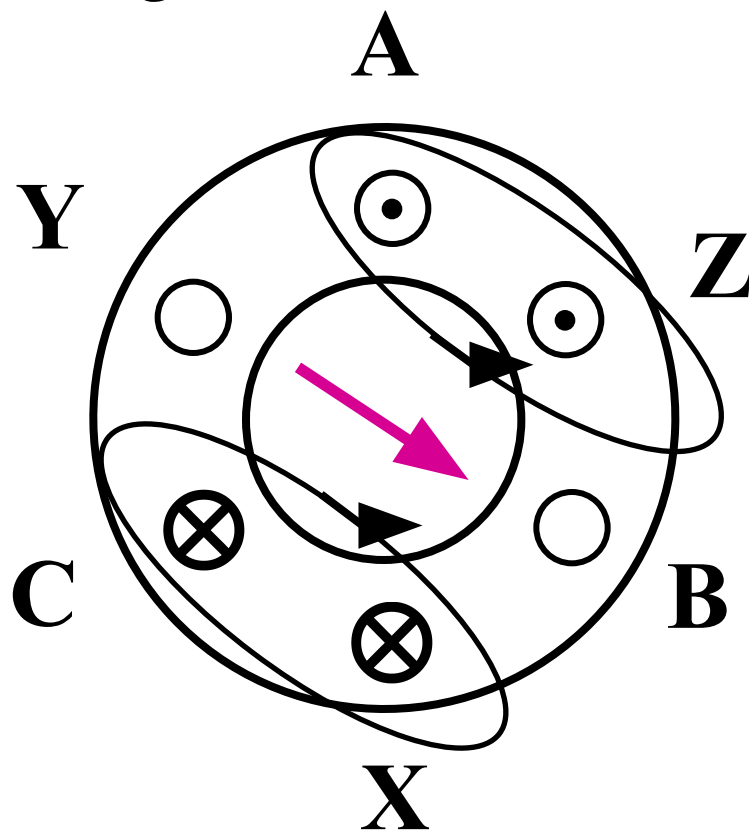


$$i_A > 0,$$

$$i_B < 0,$$

$$i_C = 0$$

$t = t_3$

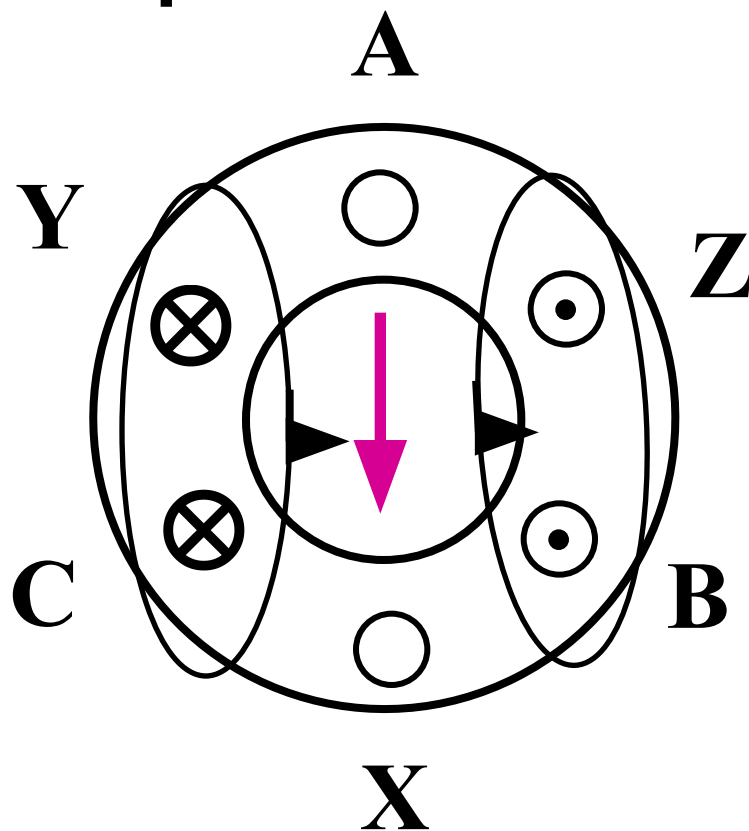


$$\mathbf{i}_A > 0,$$

$$\mathbf{i}_B = 0,$$

$$\mathbf{i}_C < 0$$

$$t = t_4$$



$$i_A = 0,$$

$$i_B > 0,$$

$$i_C < 0$$

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

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

**Таким образом, внутри статора
существует постоянное по значению
равномерно вращающееся
магнитное поле.**

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

Если поменять любые две фазы местами, то изменится направление вращения магнитного поля (реверсирование)

Видоизменив обмотку статора, можно получить вращающееся магнитное поле с несколькими парами полюсов.

Если каждая фаза будет состоять из двух катушек, сдвинутые на 180^0 , то магнитное поле будет иметь 2 пары полюсов ($p=2$)

**В этом случае частота вращения поля
будет в 2 раза меньше, чем для $p=1$.**

**Число пар полюсов можно сделать
любым, при этом частота вращения
магнитного поля будет определяться
по формуле:**

$$n_c = \frac{60f}{p}, \text{ об / мин}$$

Частоты вращения магнитного поля

p	1	2	3	4	5
n_c	3000	1500	1000	750	600

Режимы работы трехфазной асинхронной машины

Режим двигателя: на обмотку статора подается симметричная система токов и в машине создается вращающееся магнитное поле с частотой вращения n_c .

Силовые линии этого поля пересекают обмотку ротора, и в ней по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, и по обмотке ротора протекают токи.

Взаимодействие вращающегося магнитного поля и токов ротора создает вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения n_2 соответствует равенству вращающего момента $M_{\text{ВР}}$ тормозному $M_{\text{Т}}$, приложенному к валу от приводимого во вращение механизма и внутренних сил трения.

**Относительную разность частот
вращения магнитного поля и ротора
называют скольжением:**

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

**В режиме двигателя, т.е. преобразование
электрической энергии в механическую**

$$0 < s < 1$$

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.

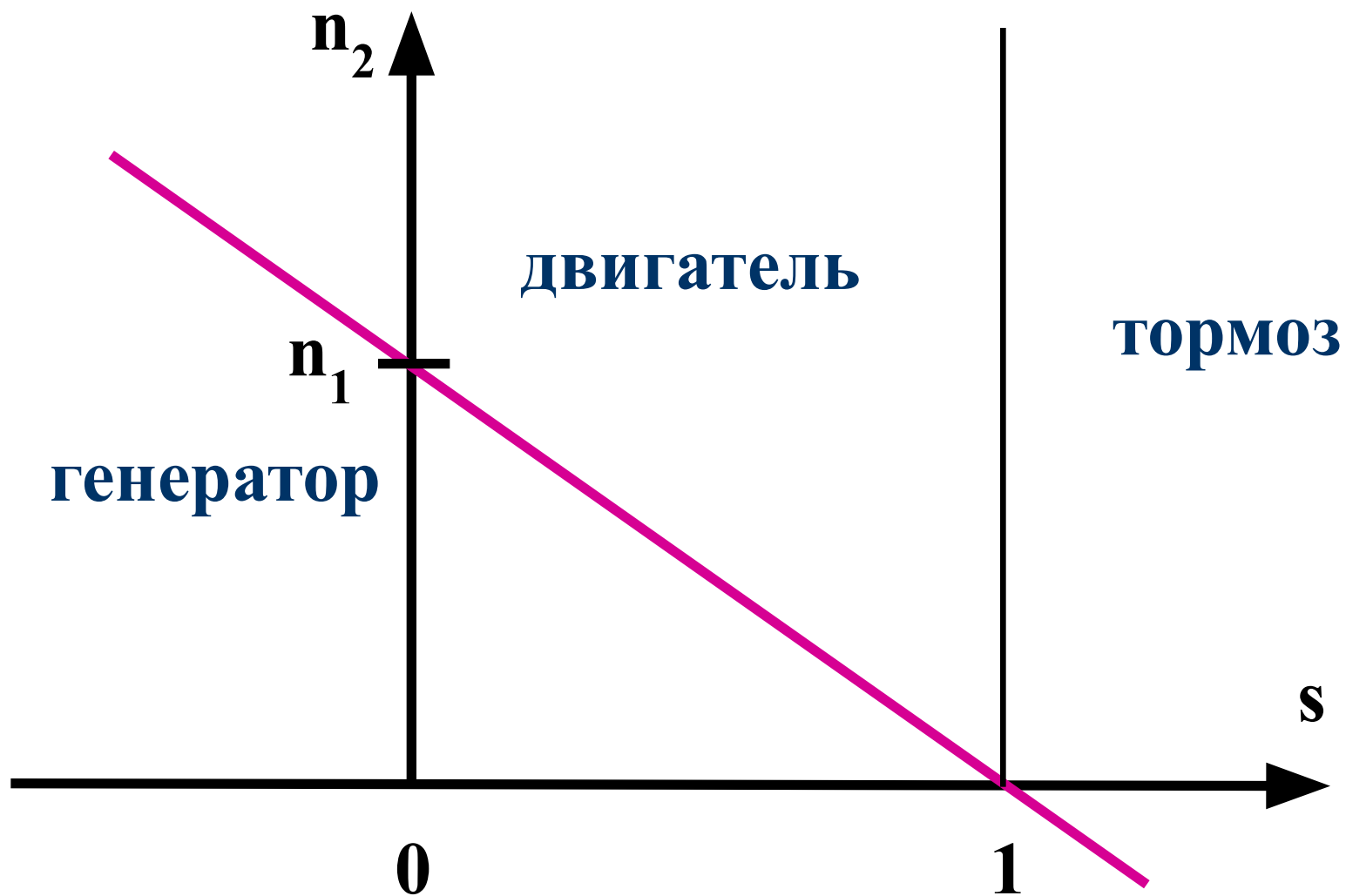
$$s < 0$$

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)



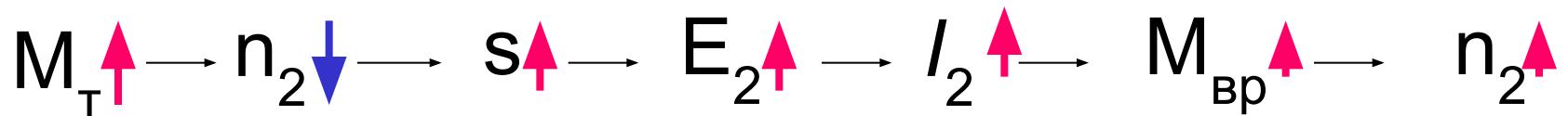
Влияние скольжения на работу асинхронных машин

- 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.



$$M_{вр} = M_T$$

Влияние S на частоту э.д.с. ротора и ее величину

$$E_1 = 4.44 f_1 w_1 \Phi_M$$

$$E_2 = 4.44 f_{2s} w_2 \Phi_M$$

f_1 -частота сети,

f_{2s} – частота изменения магнитного
поля во вращающемся роторе

W_1 и W_2 - число витков в фазных
обмотках статора и ротора,

Φ_M – магнитный поток статора

$$f_1 \neq f_{2s}$$

$n_s = n_1 - n_2$ частота скольжения

$f_{2s} = n_s p$ где p – число пар полюсов

$$f_{2s} = (n_1 - n_2) p n_0 / n_0 = s f_1$$

Тогда $E_{2s} = s E_{20}$

где E_{20} -э.д.с. ротора в состоянии
покоя

Влияние S на индуктивное сопротивление ротора и на ток в роторе

Комплексное сопротивление ротора

$$Z_P = R_2 + jX_2 \quad R_2 \ll X_2 \quad X_{2s} = \omega_2 L$$

$$X_{2s} = 2\pi f_{2s} L = 2\pi f_1 s L = X_{20} s$$

$$I_{2s} = \frac{I_{20}}{\sqrt{1 + \frac{R_2^2}{(X_{20} \cdot s)^2}}}$$

Электромагнитный момент и механические характеристики 3-х фазного АД

$$M = C_M \Phi_M \cdot I_{2s} \cdot \cos \psi_{2s}$$

C_M — постоянный коэффициент

$$I_{2s} = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$$

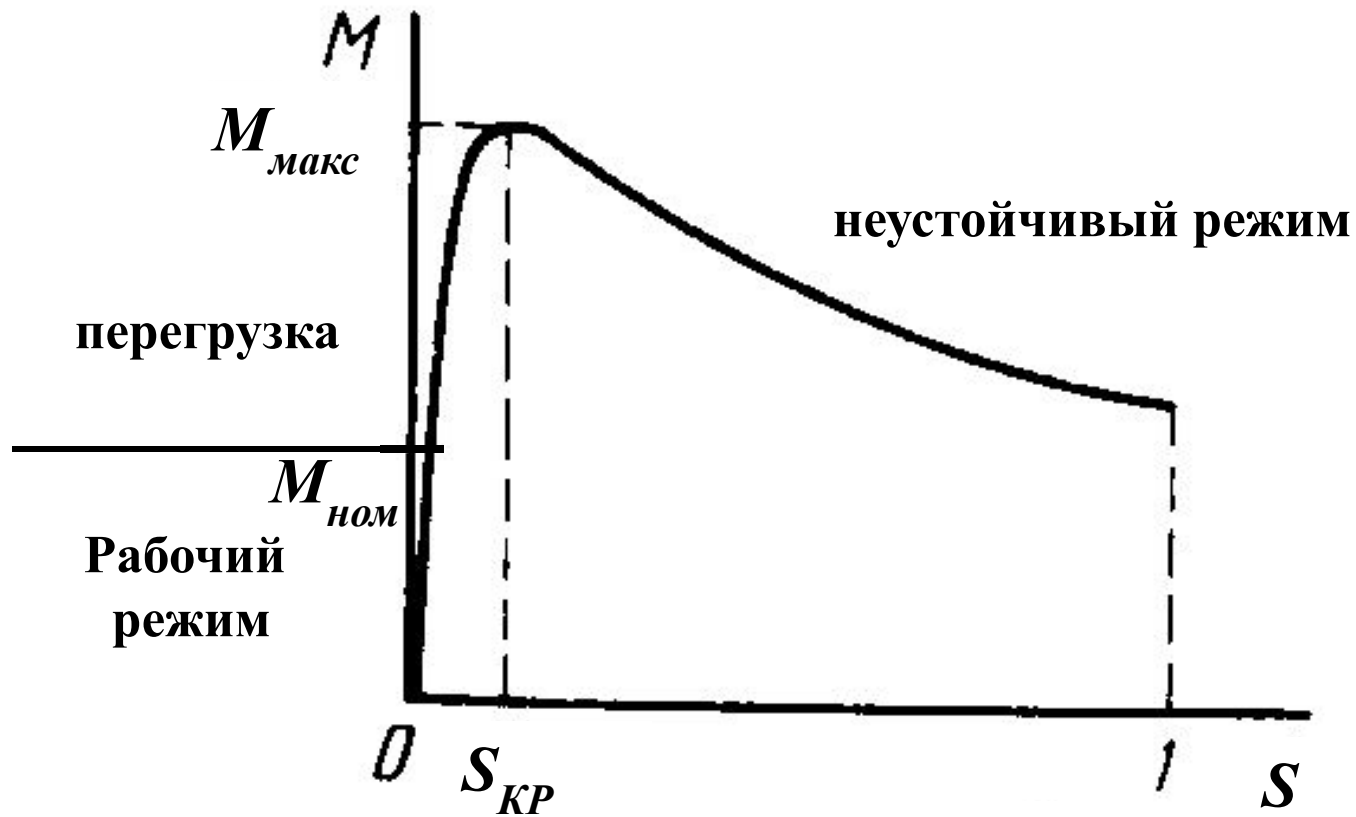
Ток в роторе

$$\cos(\psi_{2s}) = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}}$$

ψ_{2s} — угол между I_2 и E_2

Φ_M — магнитный поток статора

Зависимость электромагнитного момента от скольжения



$$M = f(S)$$

Участок от 0 до $M_{\text{НОМ}}$

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

$$M_B = M$$

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

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

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

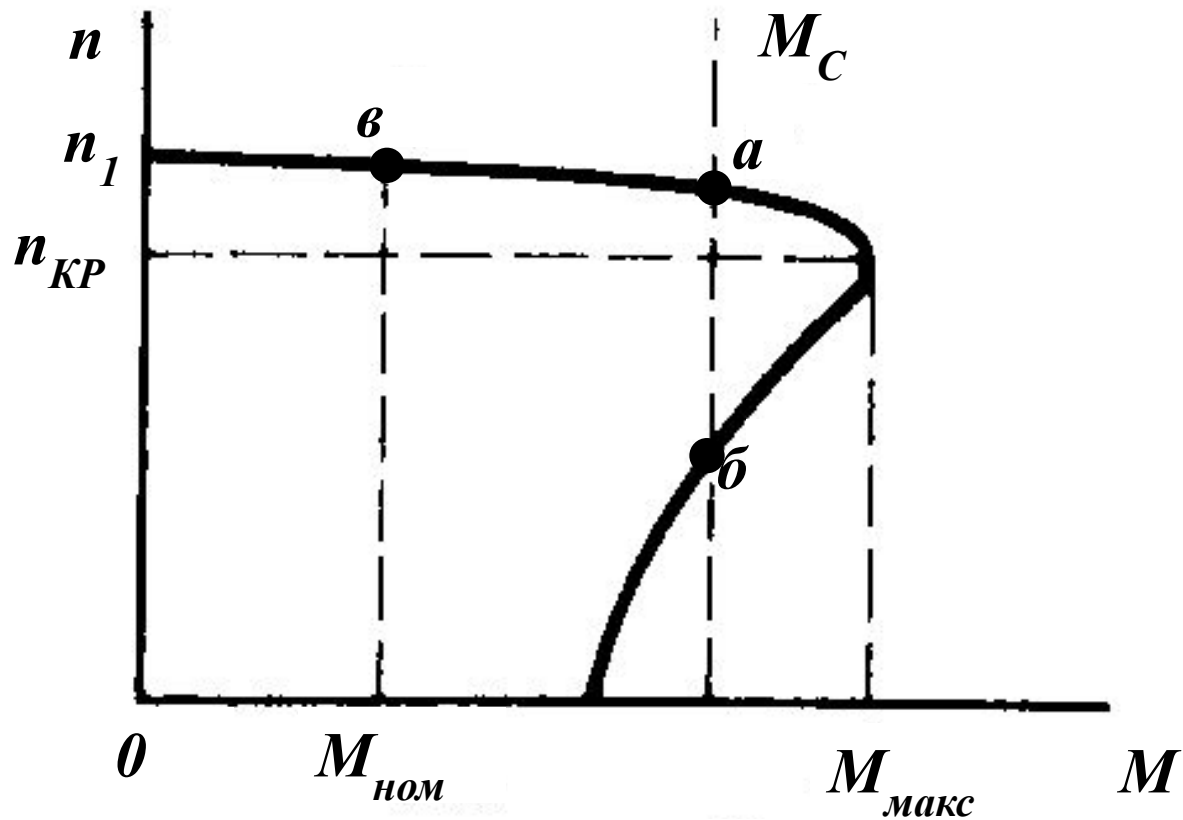
$$M_B \boxtimes M$$

Для расчета момента можно использовать уравнение Клосса.

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

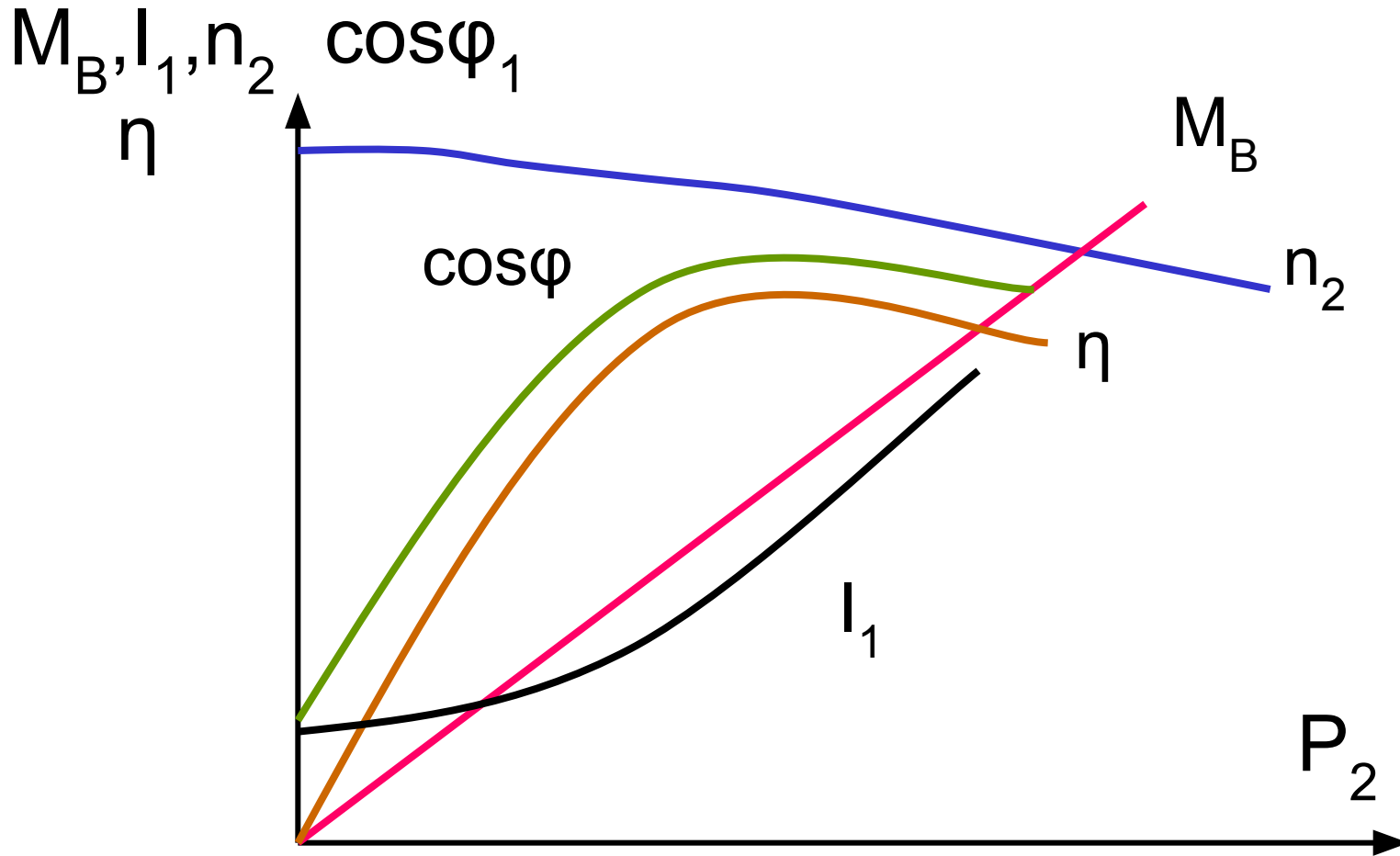
$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$$

Механическая характеристика



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

Рабочие характеристики АД



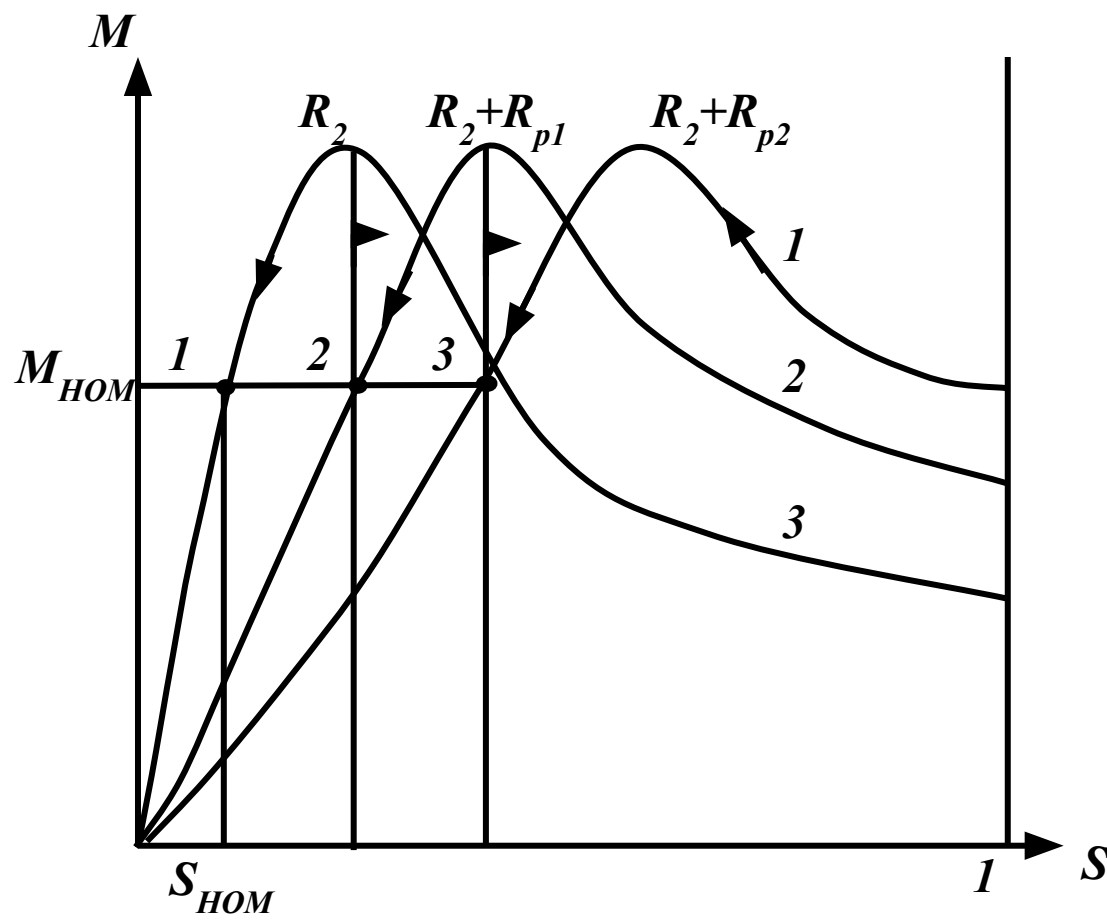
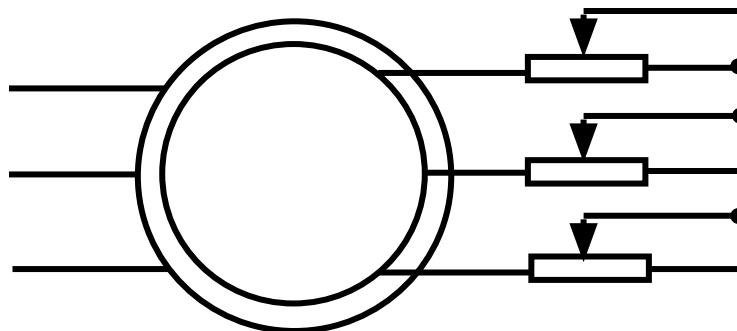
Пуск 3-х фазного АД в ход

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 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

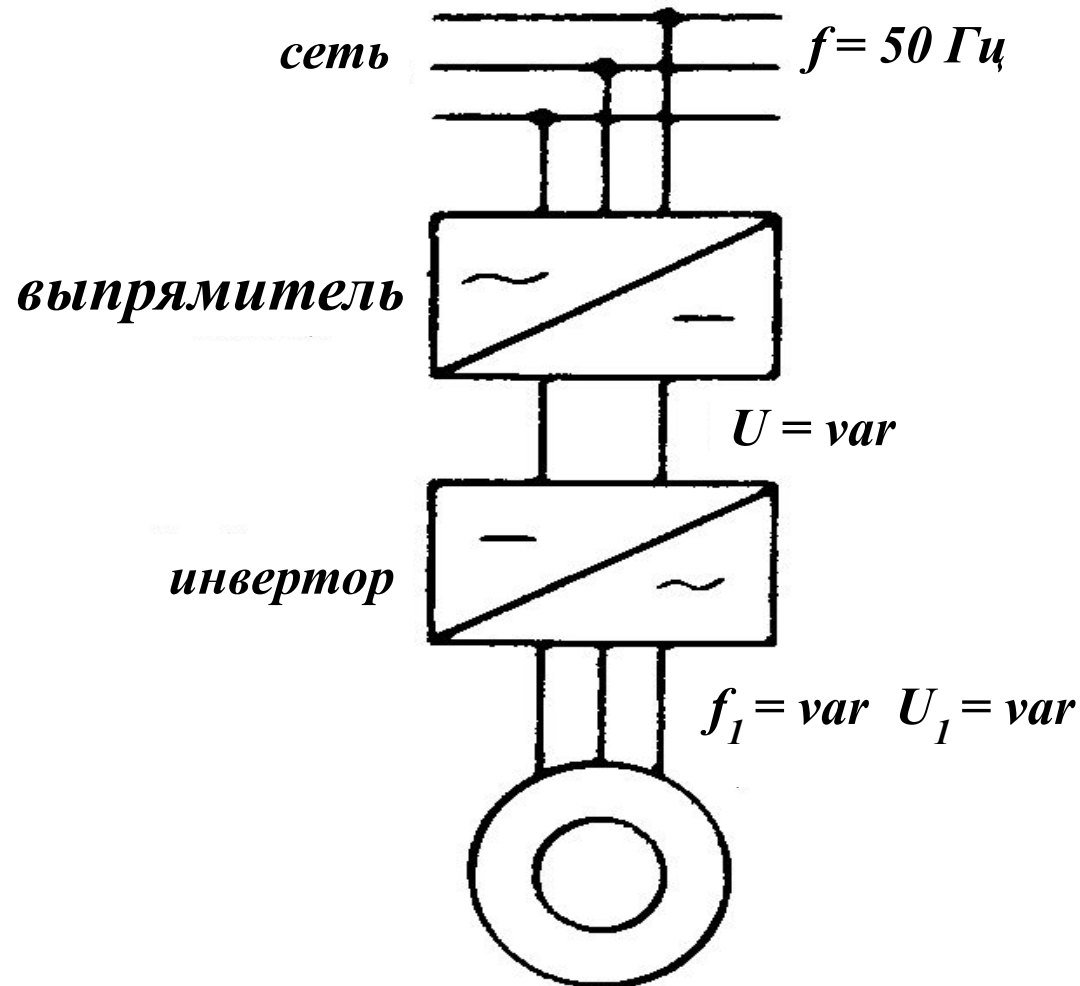
Это плавное регулирование частоты вращения магнитного поля путем регулирования частоты тока в обмотках статора

Достоинства:

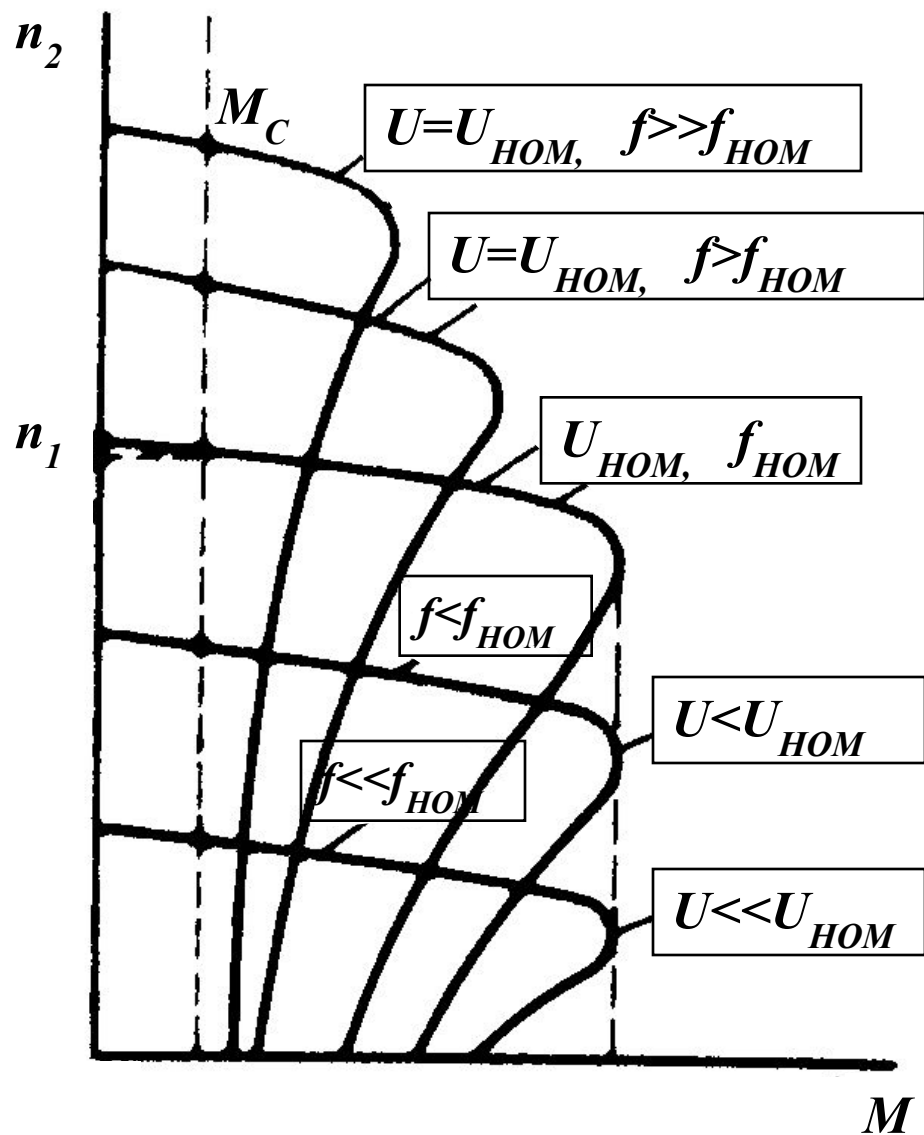
-плавность и большой диапазон регулирования частоты,

-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 $f_1 = \text{const}$ $\omega_H = \frac{2\pi \cdot f}{p}$ 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

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

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

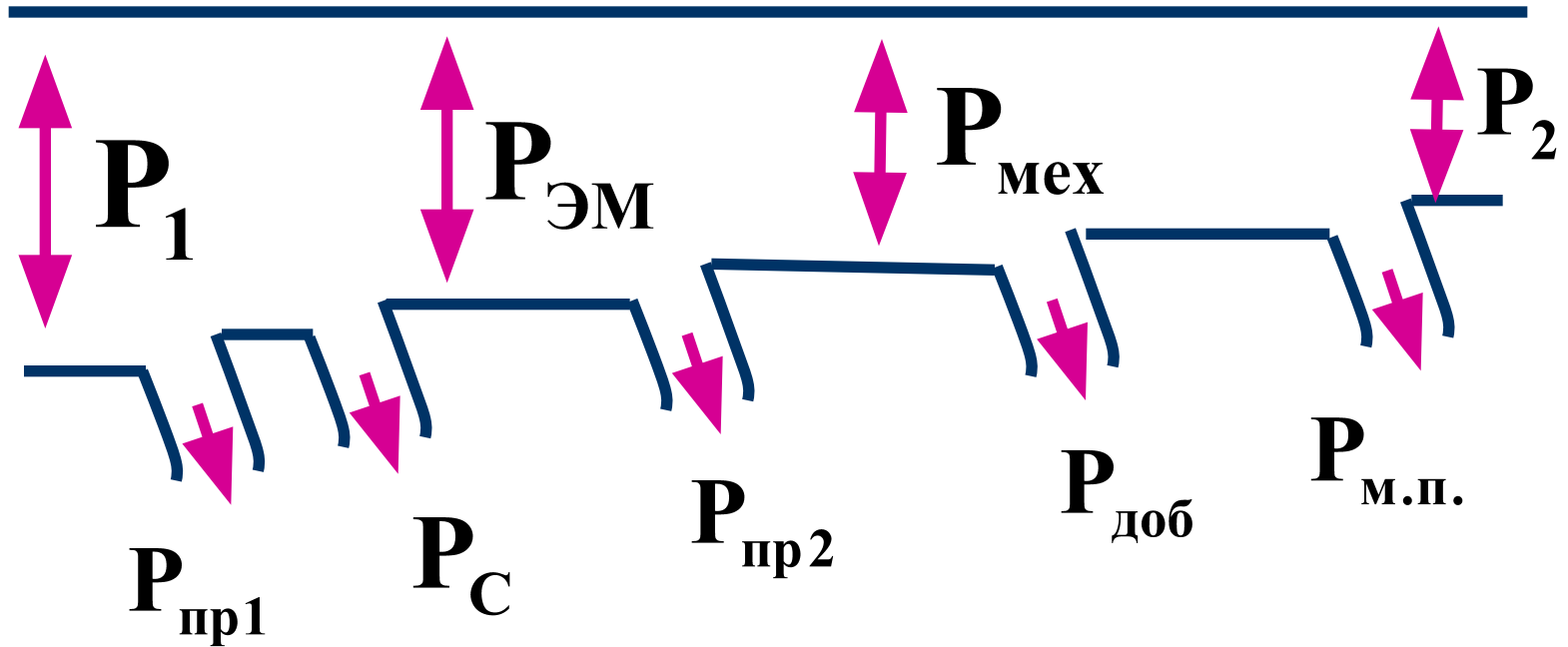
Коэффициент полезного действия АД

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

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 $\eta_{\text{НОМ}} \approx \eta_1$.