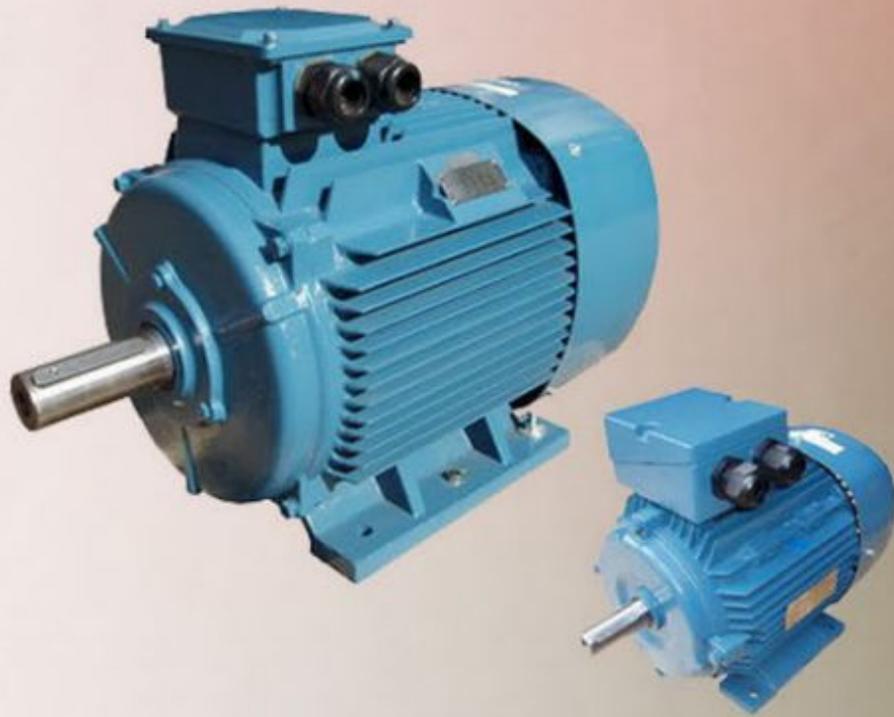


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



Классификация электрических машин

- **Генераторы** преобразуют механическую энергию в электрическую посредством ЭМ-поля
- **Двигатели** преобразуют электрическую энергию в механическую посредством ЭМ-поля
- **Трансформаторы** преобразуют один уровень напряжения и тока в другой уровень напряжения и тока
- **Датчики** получают информацию о механическом перемещении и преобразуют её в электрический сигнал

Три основных закона электромеханики

- ✓ Преобразование энергии осуществляется с коэффициентом полезного действия (кпд) меньше 1

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

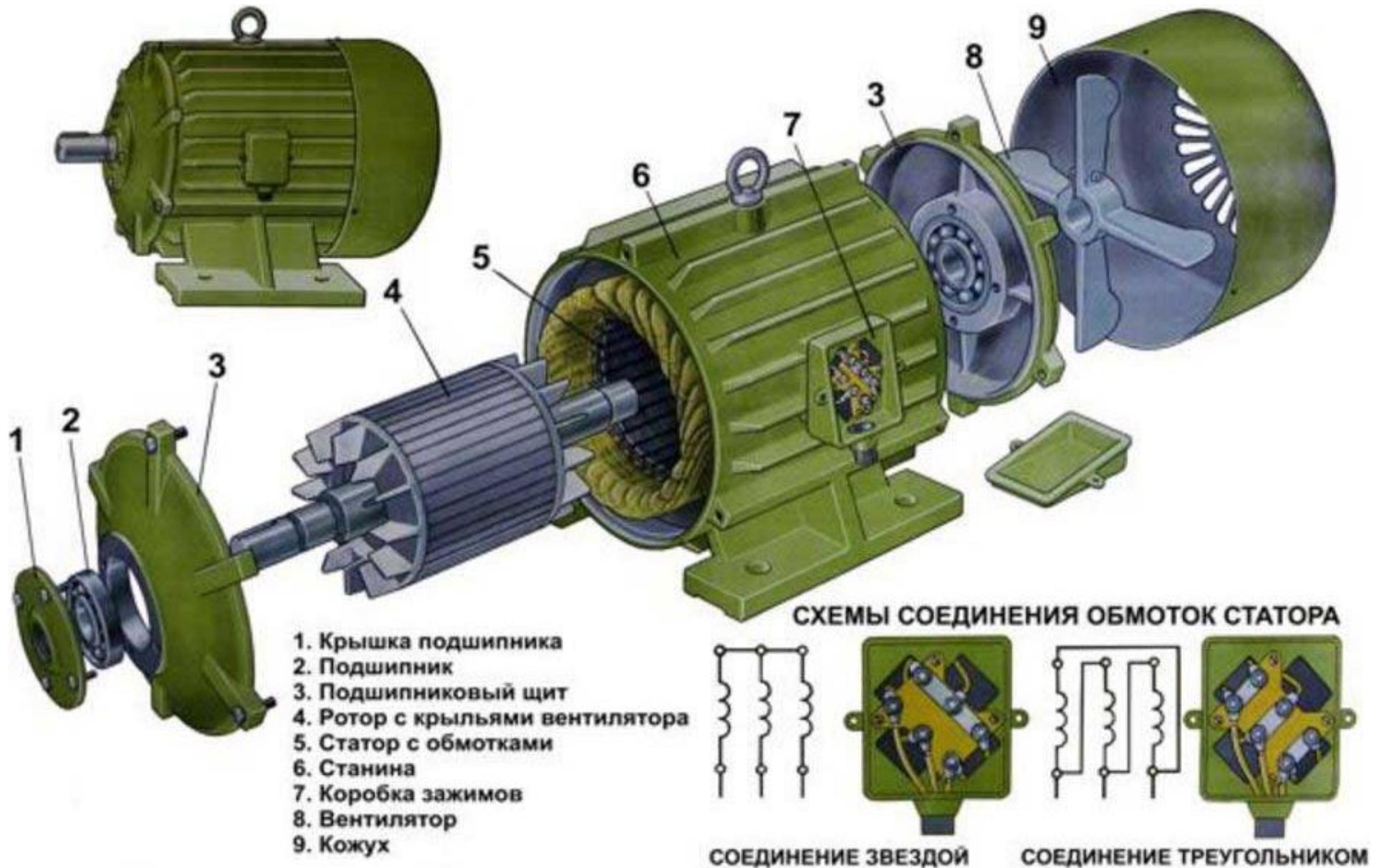
$$P_2 = P_1 - \Sigma p$$

Σp — сумма электрических, магнитных и механических потерь энергии

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} < 1$$

- ✓ Электрические двигатели и генераторы обратимы: одна и та же электрическая машина при наличии ЭМ-поля может работать и в режиме двигателя, и в режиме генератора
- ✓ Электромеханическое преобразование энергии осуществляется ЭМ-полями, неподвижными относительно друг друга

Асинхронные машины (двигатели)

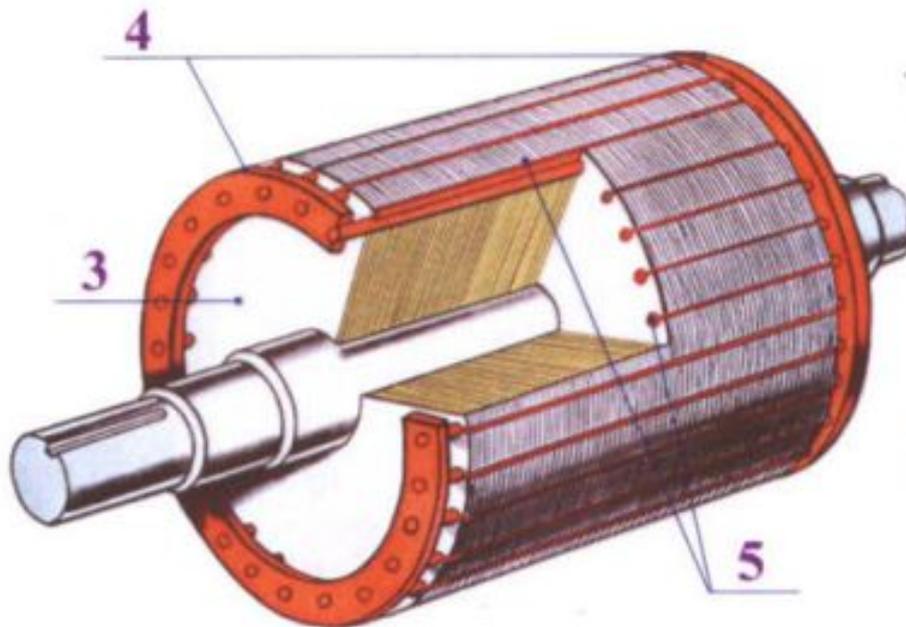


Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором примерно 90% всех двигателей

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

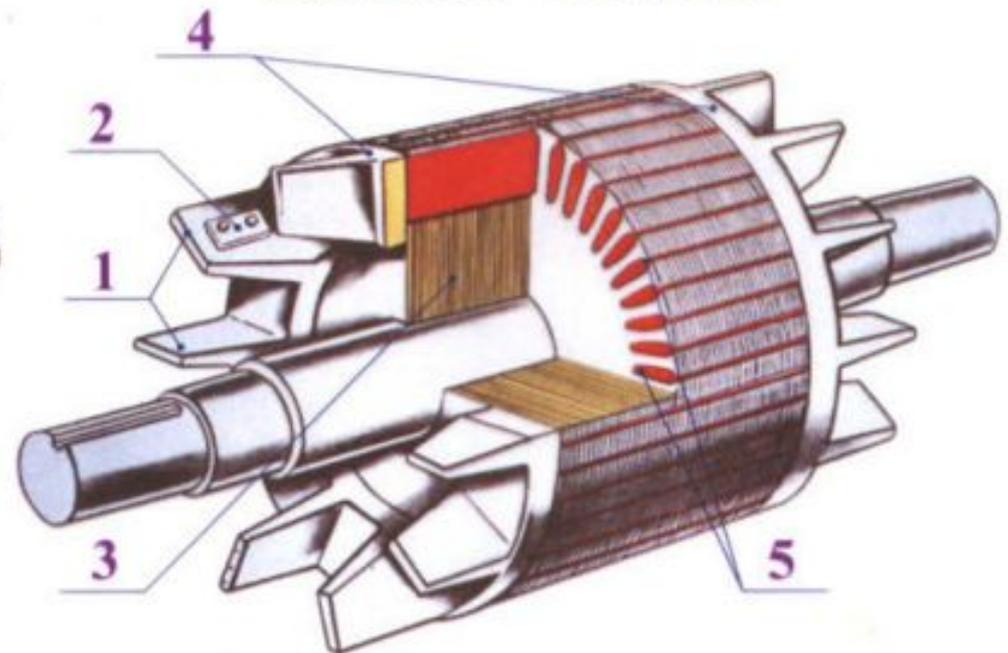
КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ротор со сварной
беличьей клеткой



- 1 - вентиляционные лопатки;
- 2 - балансировочный груз;
- 3 - магнитопровод ротора;

Ротор с литой
беличьей клеткой



- 4 - короткозамыкающие кольца;
- 5 - стержни в пазах.

Создатели асинхронного двигателя

1888 г.



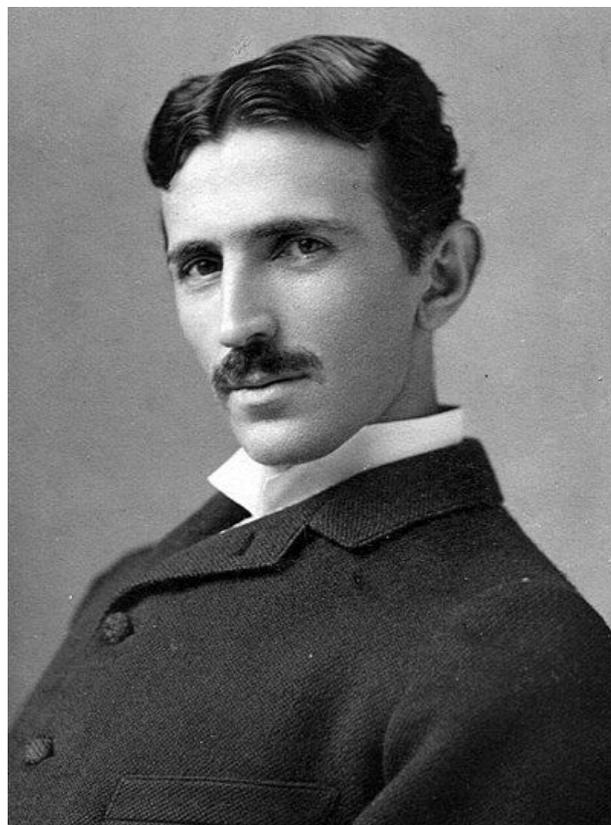
G. Ferraris

GALILEO FERRARIS

nato a Livorno Vercellese (Piemonte) il 31 ottobre 1847
morto a Torino il 7 febbraio 1897.

Da una fotografia di Gibson di Chicago.

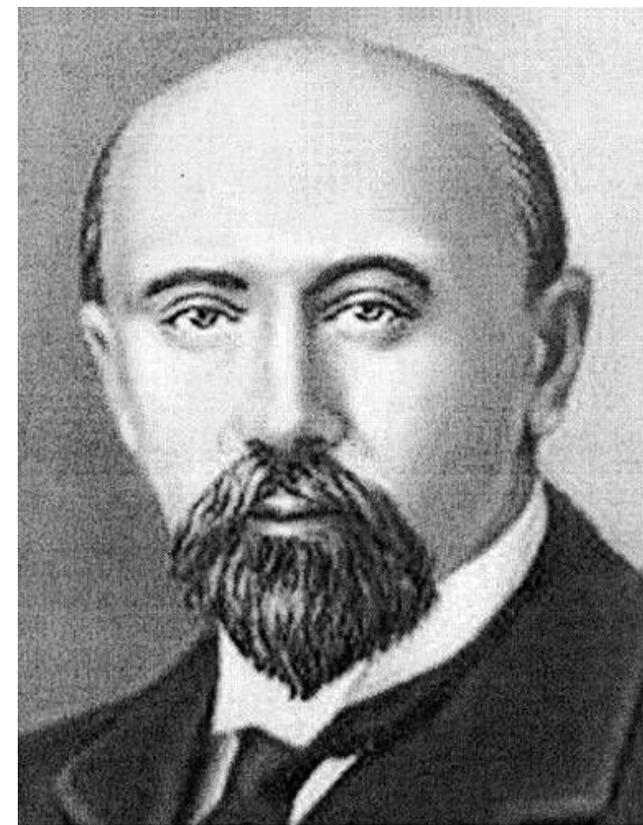
1888 г.



Никола Тесла

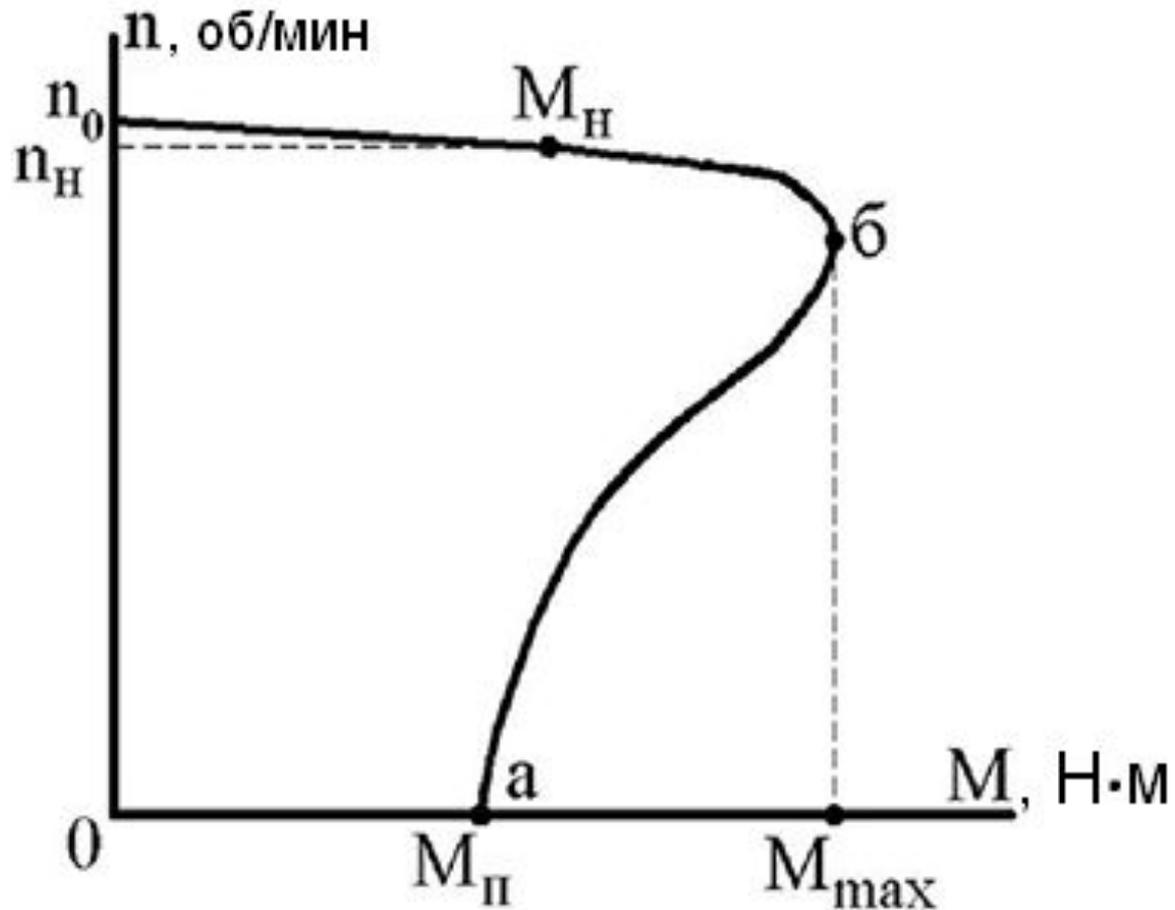
1889 г.

1890 г.



М.О. Доливо-Добровольский

Механическая характеристика асинхронного двигателя

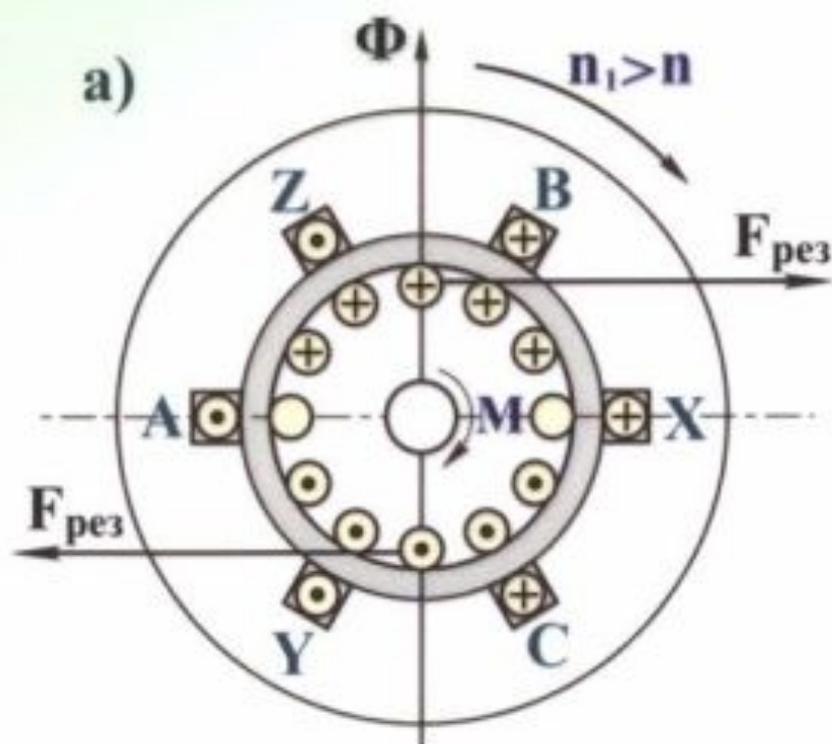


Механическая мощность:

$$P_{\text{мех}} = M \omega = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{60}$$

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ



Режим двигателя (а)

$$n_1 > n > 0$$

$$0 < S < 1$$

$n_1 = \frac{60f_1}{p}$ – синхронная частота вращения;

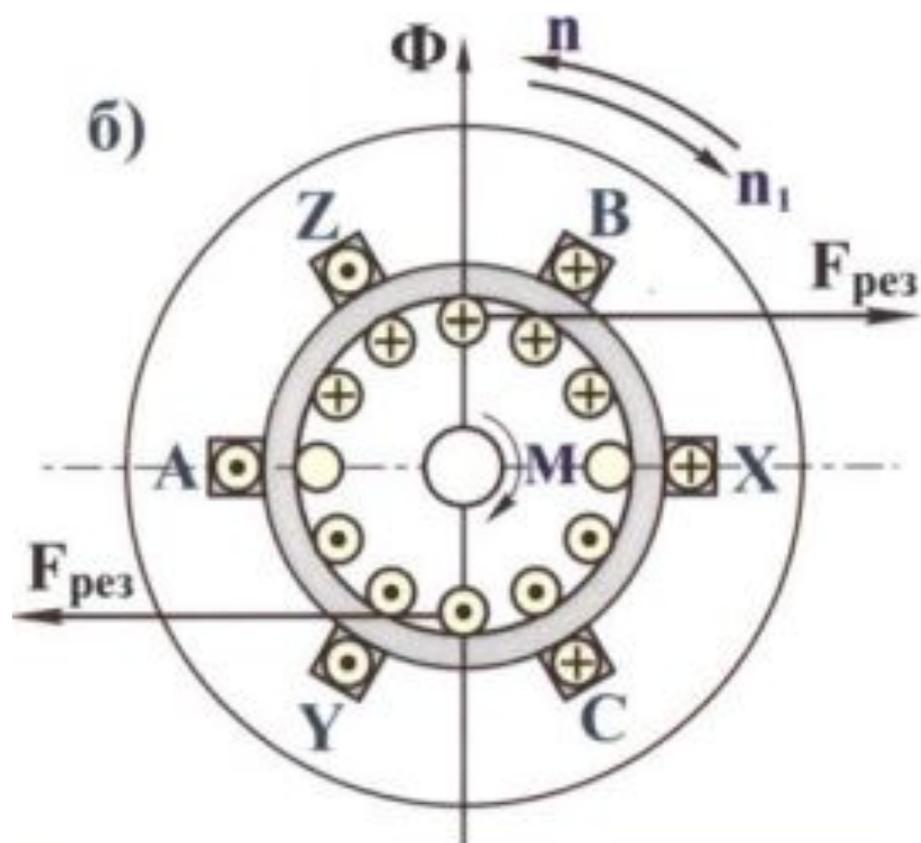
n – частота вращения ротора;

$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{2\pi f_1}{p}$ – синхронная угловая частота вращения;

$\Omega = \frac{\pi n}{30}$ – угловая частота вращения ротора;

$n_1 - n$ – частота скольжения;

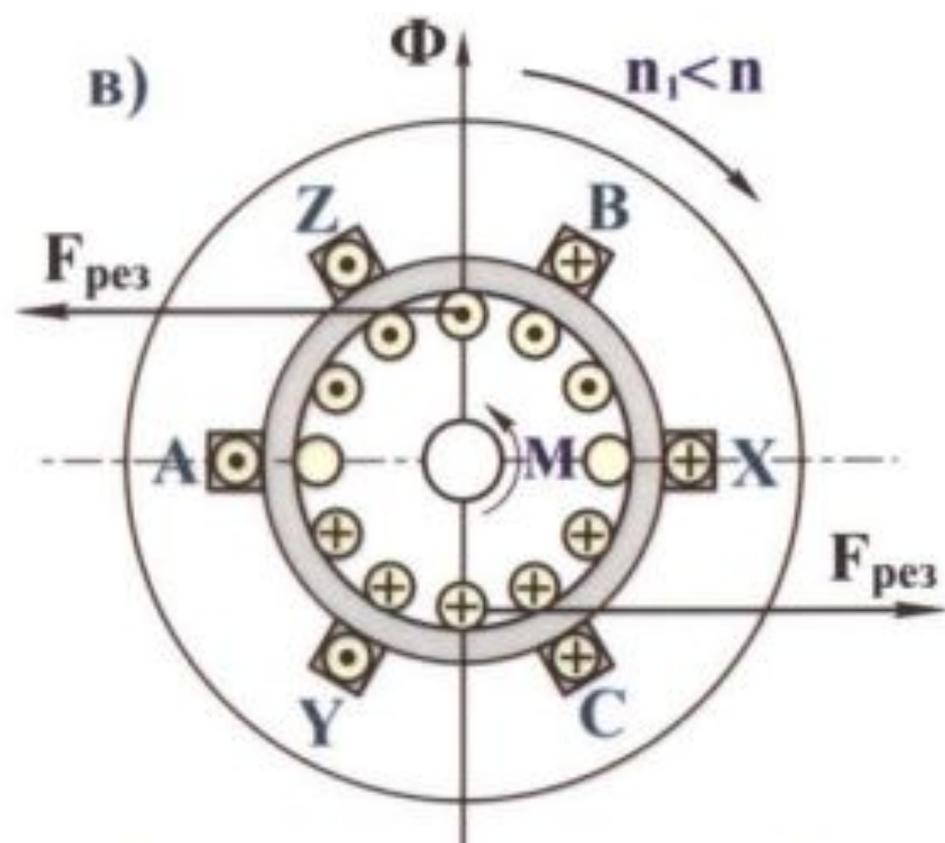
$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ – скольжение.



Режим электромагнитного
тормоза (б)

$$0 < n < n_1$$

$$1 < S < +\infty$$



Режим генератора (в)

$$+\infty > n > n_1$$

$$-\infty < S < 0$$

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.

Асинхронный двигатель с фазным ротором

ФАЗНЫЙ РОТОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

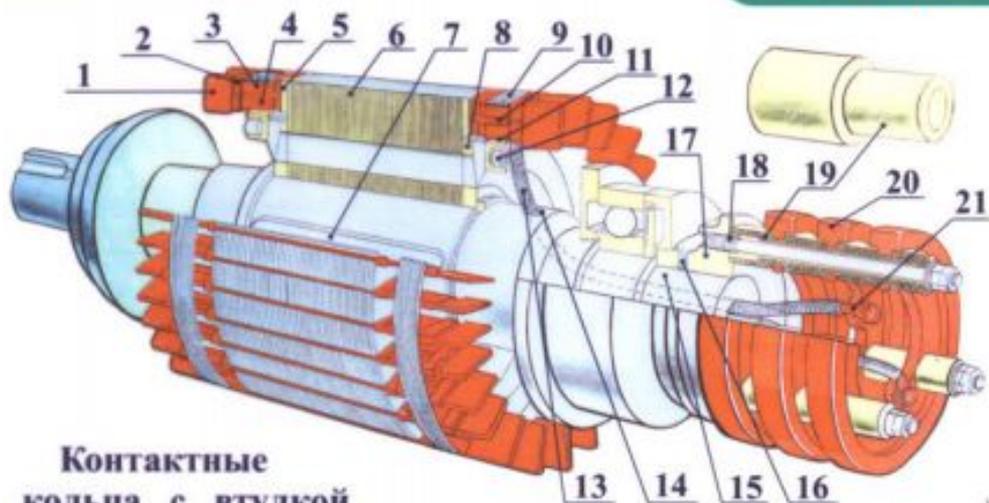
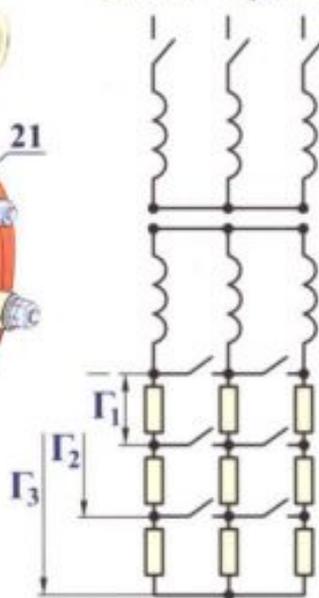
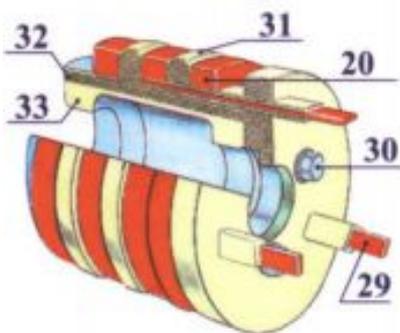


Схема пуска

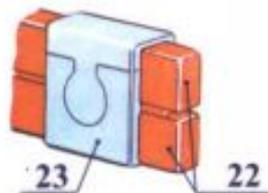


- 1- вентиляционная лопатка;
- 2- хомутик для соединения стержней;
- 3, 4- верхние и нижние стержни;
- 5- пазовая изоляция;
- 6- магнитопровод ротора;
- 7- шпонка;
- 8- нажимная шайба с обмоткодержателем;
- 9- бандаж;
- 10- изоляция между стержнями;
- 11- изоляция на обмоткодержателе;
- 12- балансировочный груз;
- 13- выводной конец обмотки;
- 14- отверстие в валу;
- 15- вал;
- 16- винт;
- 17- ступица контактных колец;
- 18- шпилька для крепления контактных колец;
- 19- изоляционная втулка;
- 20- контактное кольцо;
- 21- соединение вывода с контактным кольцом;
- 22- стержни;
- 23- хомутик;
- 24- пружина;
- 25- щетка;
- 26- щеткодержатель;
- 27- болт крепления щеткодержателя;
- 28- токоведущий тросик;
- 29- выводы для присоединения обмотки;
- 30- болт крепления изоляционной шайбы;
- 31- изоляция между контактными кольцами;
- 32- изоляция втулки;
- 33- втулка.

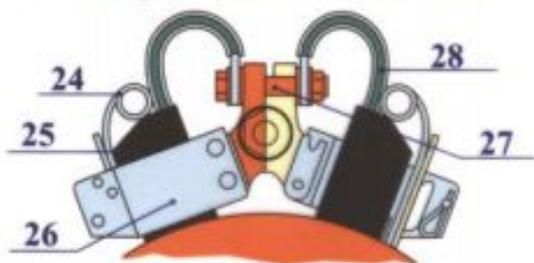
Контактные кольца с втулкой



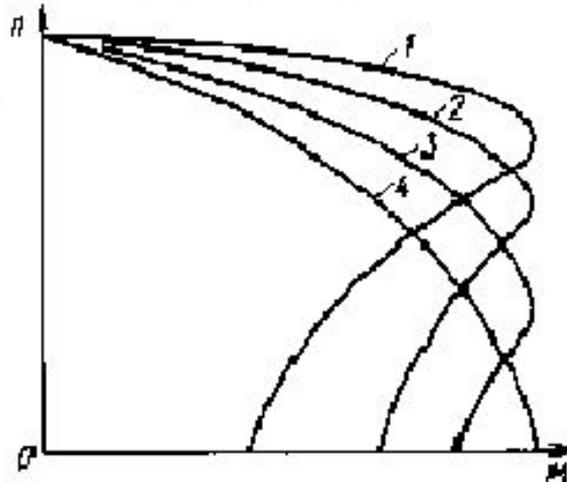
Соединение стержней хомутиком



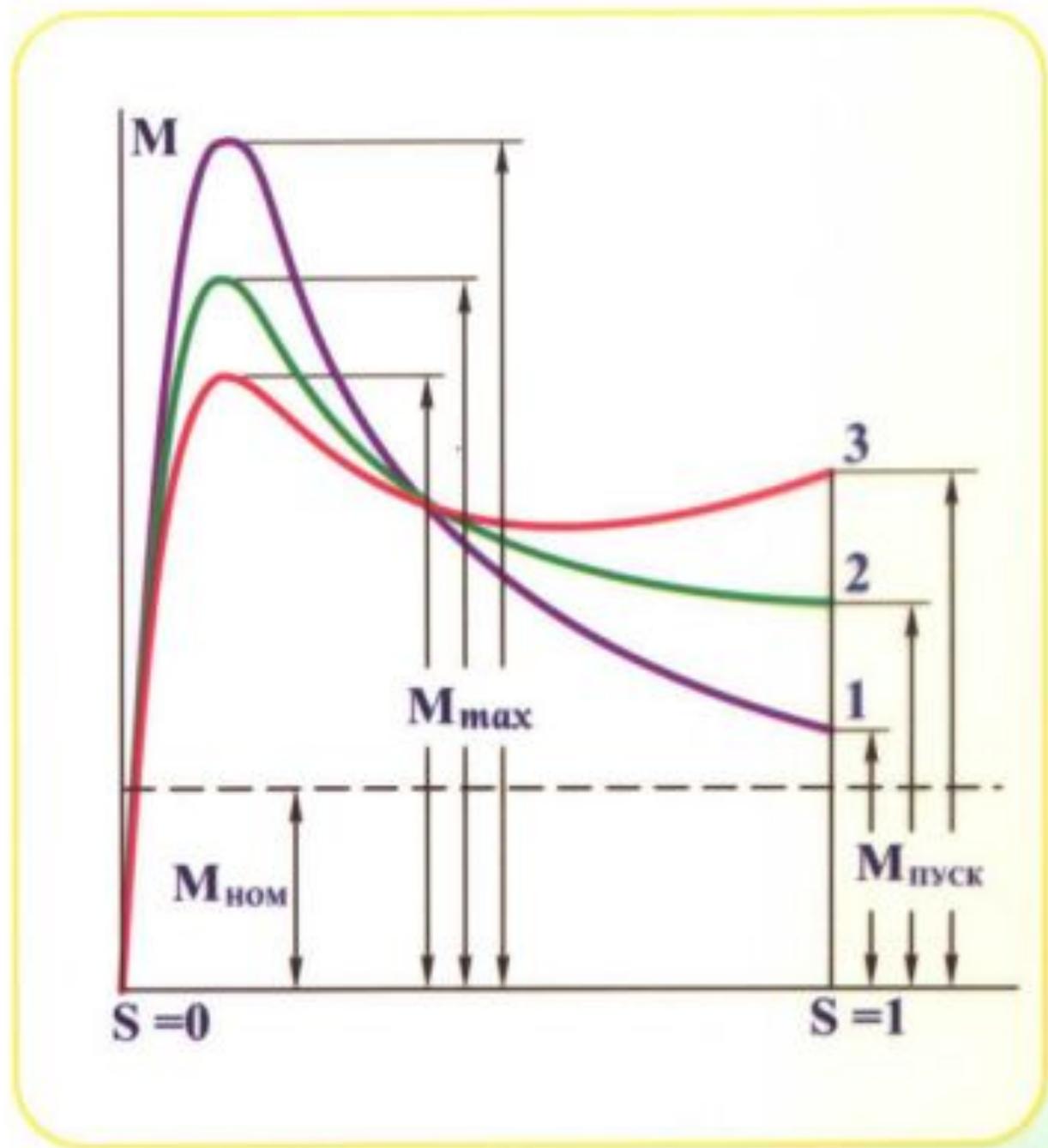
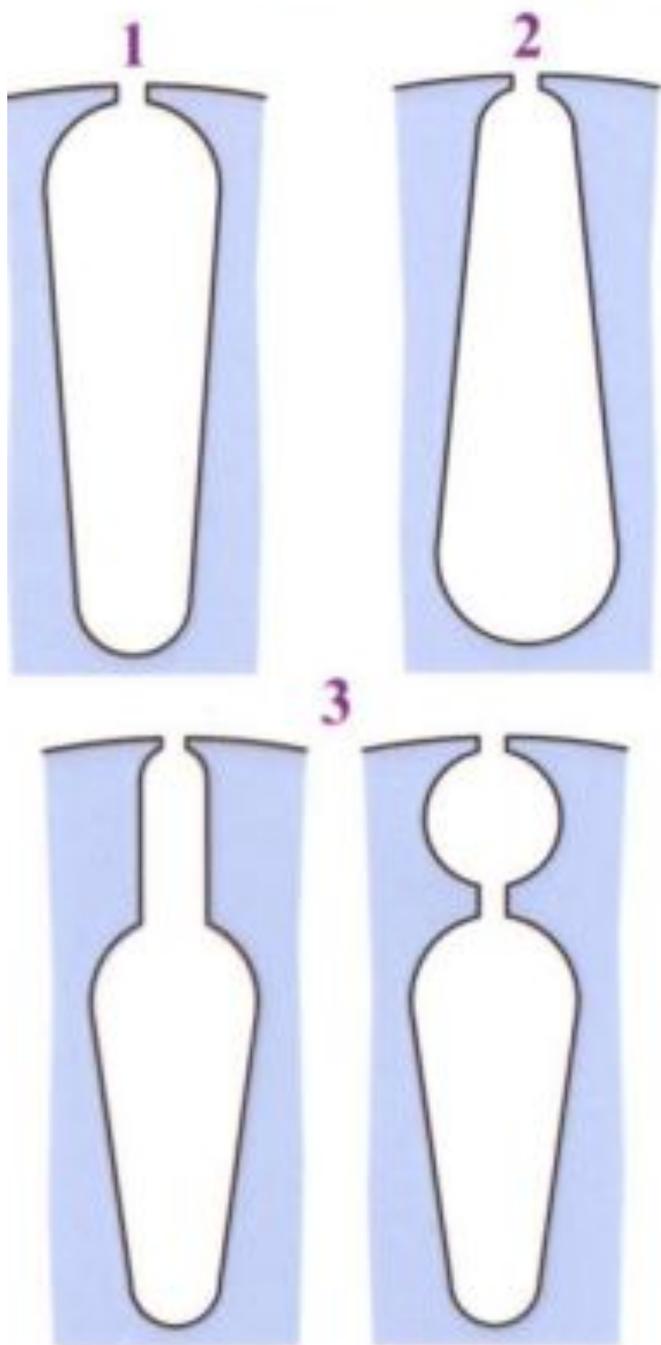
Щеткодержатели с щетками



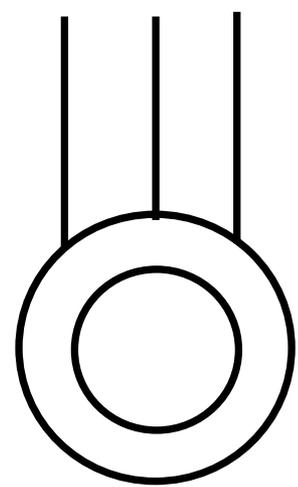
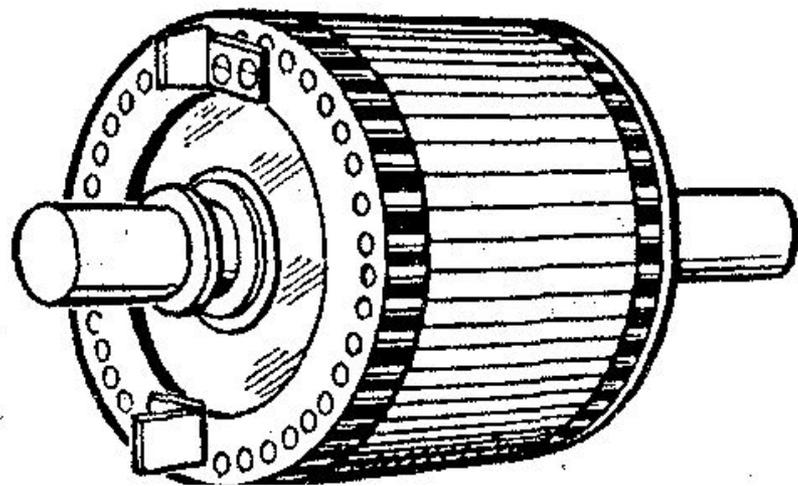
Пусковые характеристики



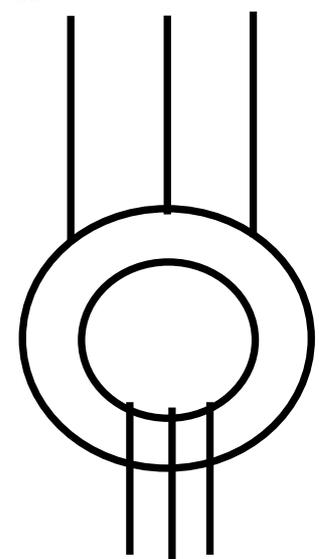
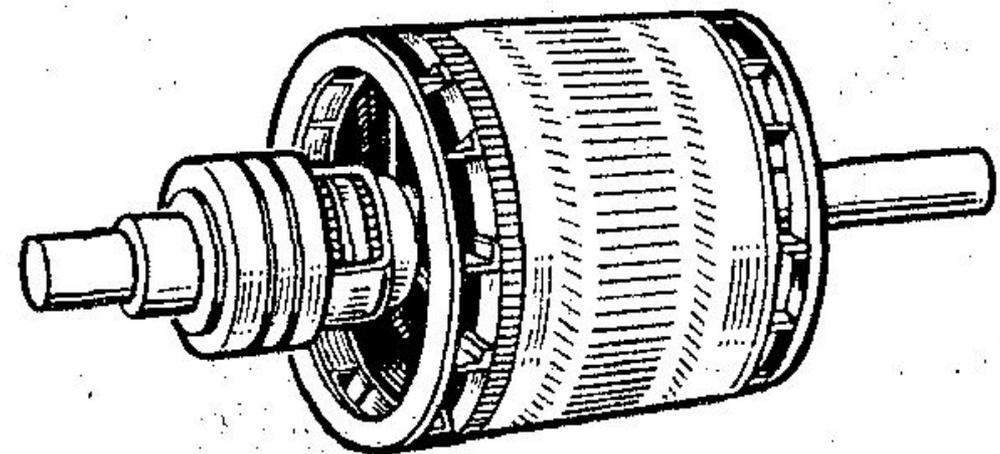
Пусковые характеристики двигателей с различными пазами ротора



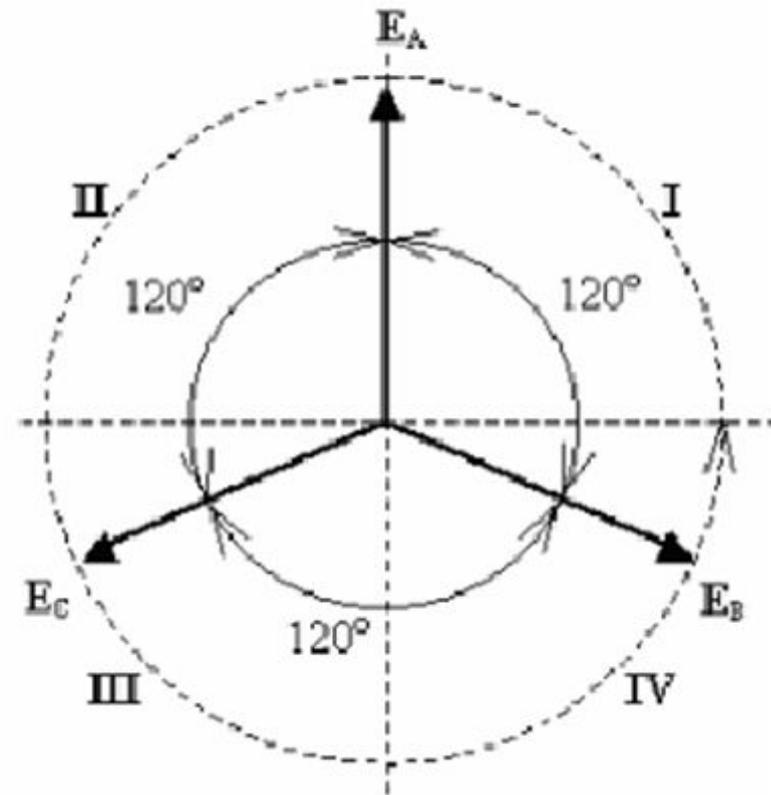
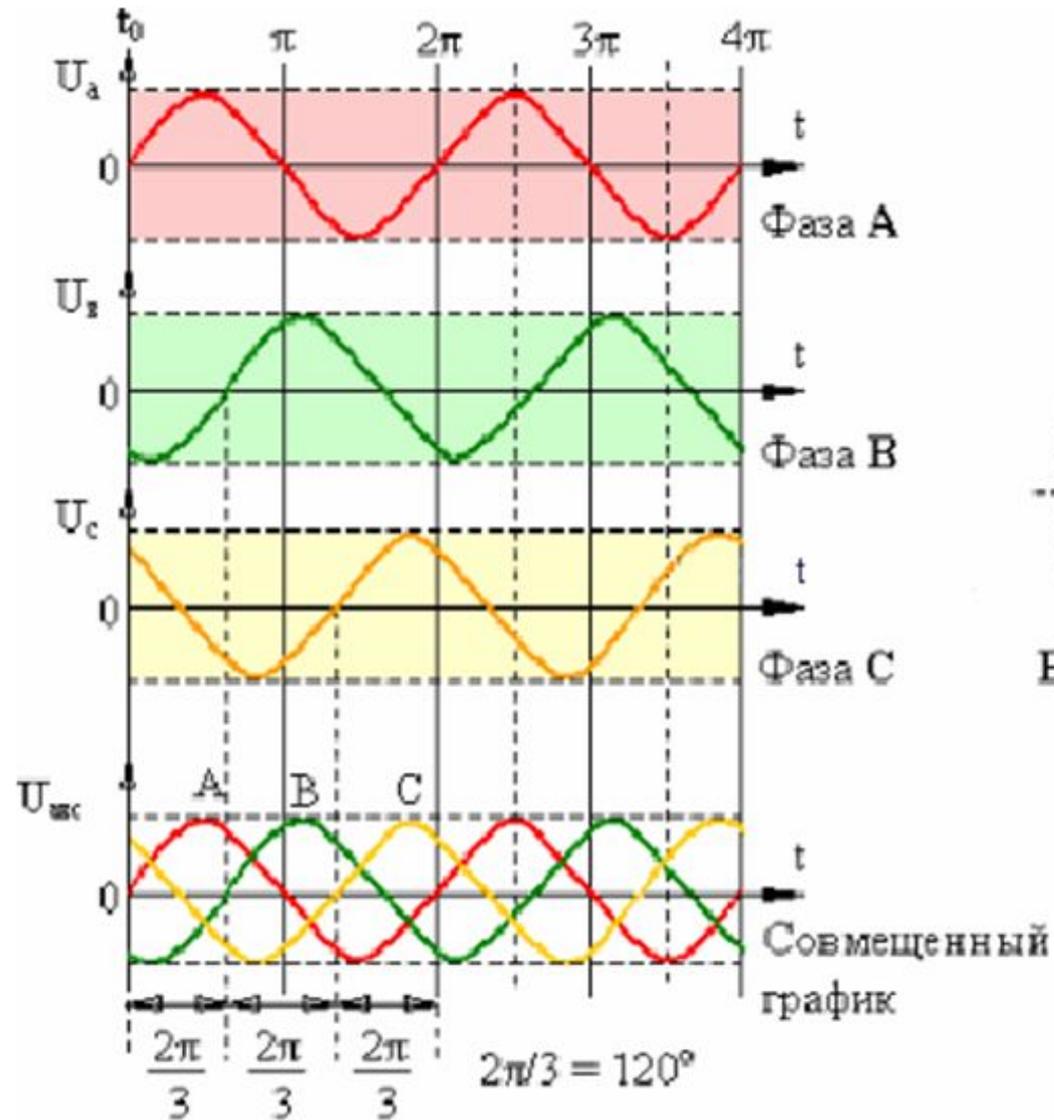
Короткозамкнутый ротор



Фазный ротор



Принцип работы машин переменного тока: вращающееся ЭМ-поле



Вращение асинхронного двигателя за счёт действия 2-х законов

1. Закон электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

\mathcal{E}_i – ЭДС индукции в контуре

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ – скорость изменения магнитного потока

2. Действие силы Ампера на проводники с током обмотки ротора

$$F_A = BI \Delta l \sin \alpha$$

$$B = \Phi / S, \text{ Тл}$$

F_A – модуль силы Ампера

B – магнитная индукция поля

I – сила тока в проводнике

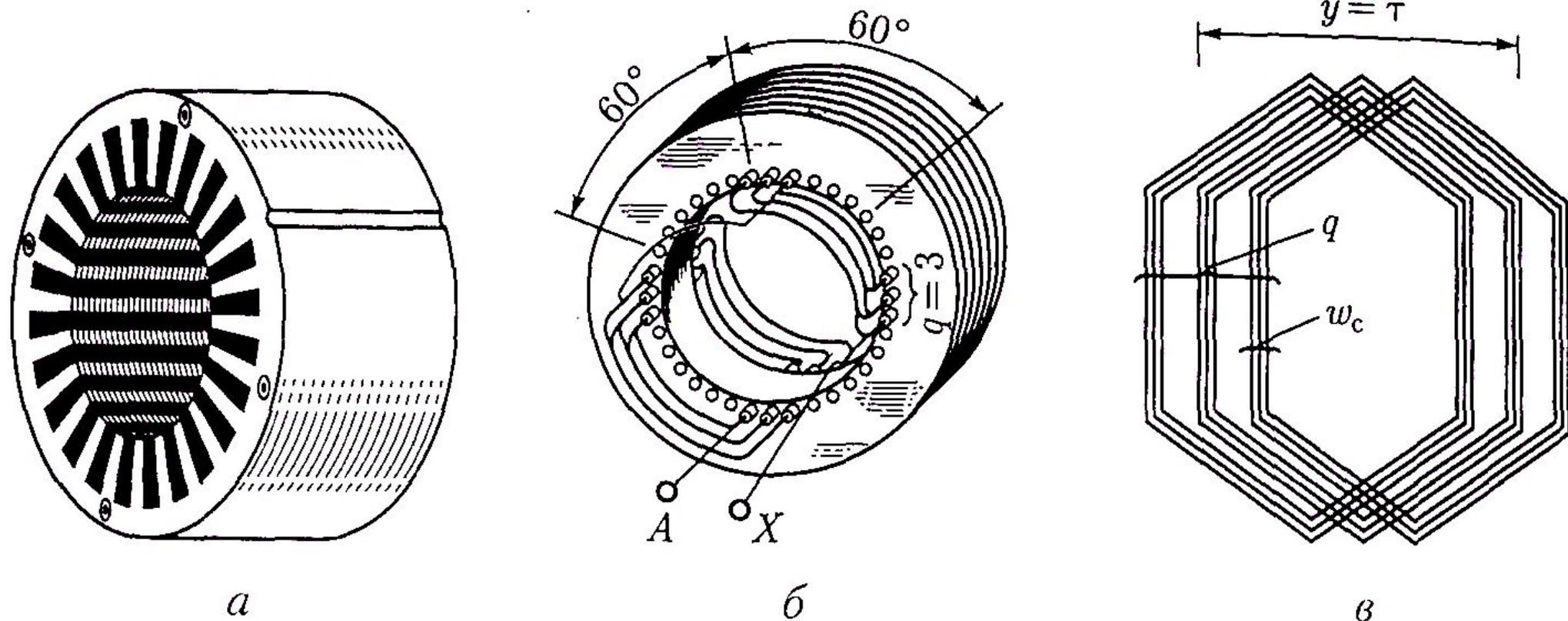
Δl – длина прямолинейного отрезка проводника

α – угол между вектором магнитной индукции и направлением тока в проводнике

Конструкция статора

Сердечник статора – полый цилиндр, собранный из отдельных кольцевых пластин, штампованных из листов электротехнической стали (0,5 мм).

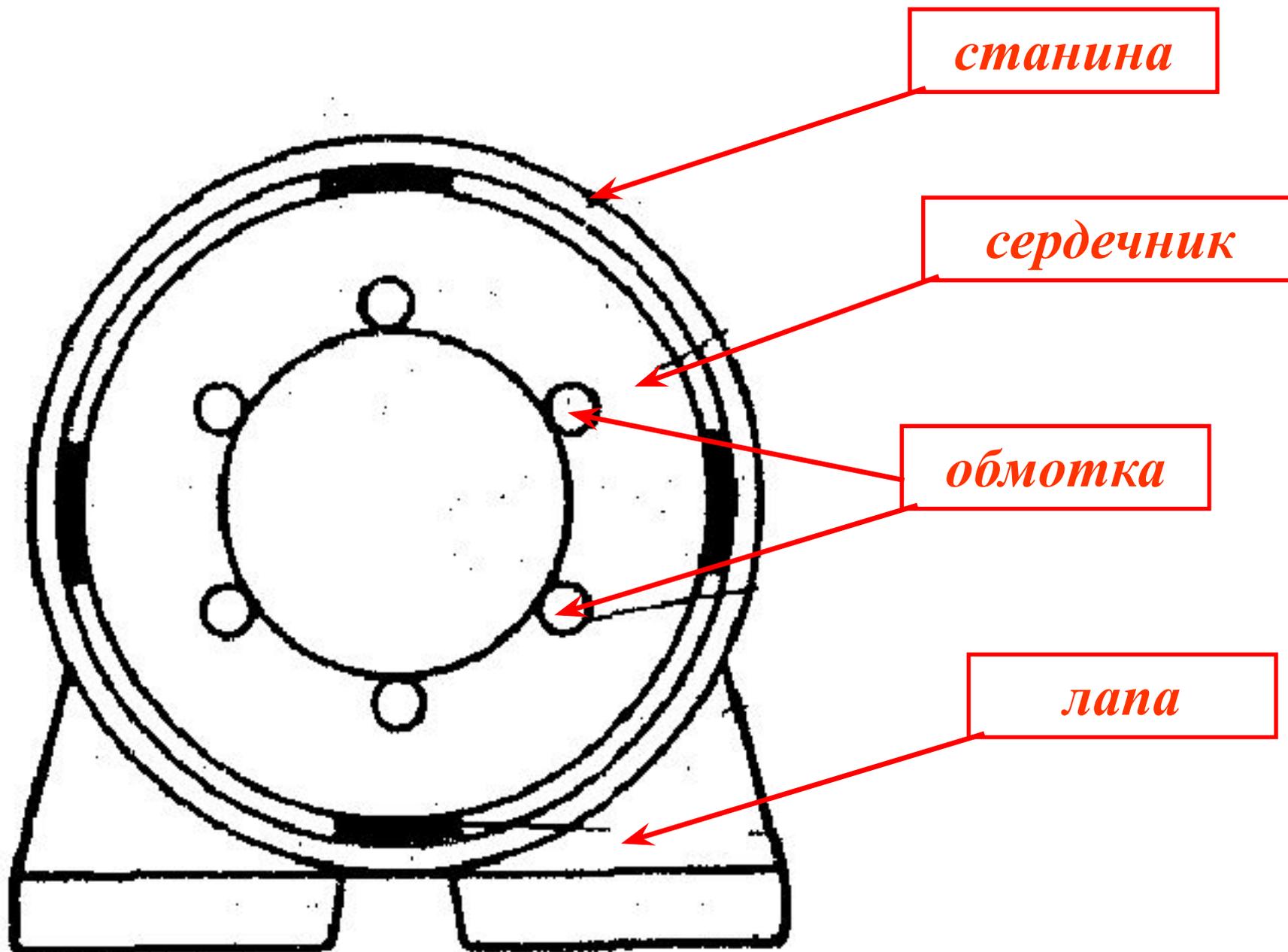
Пластины изолированы друг от друга с помощью лака или оксидирования (для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи)



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

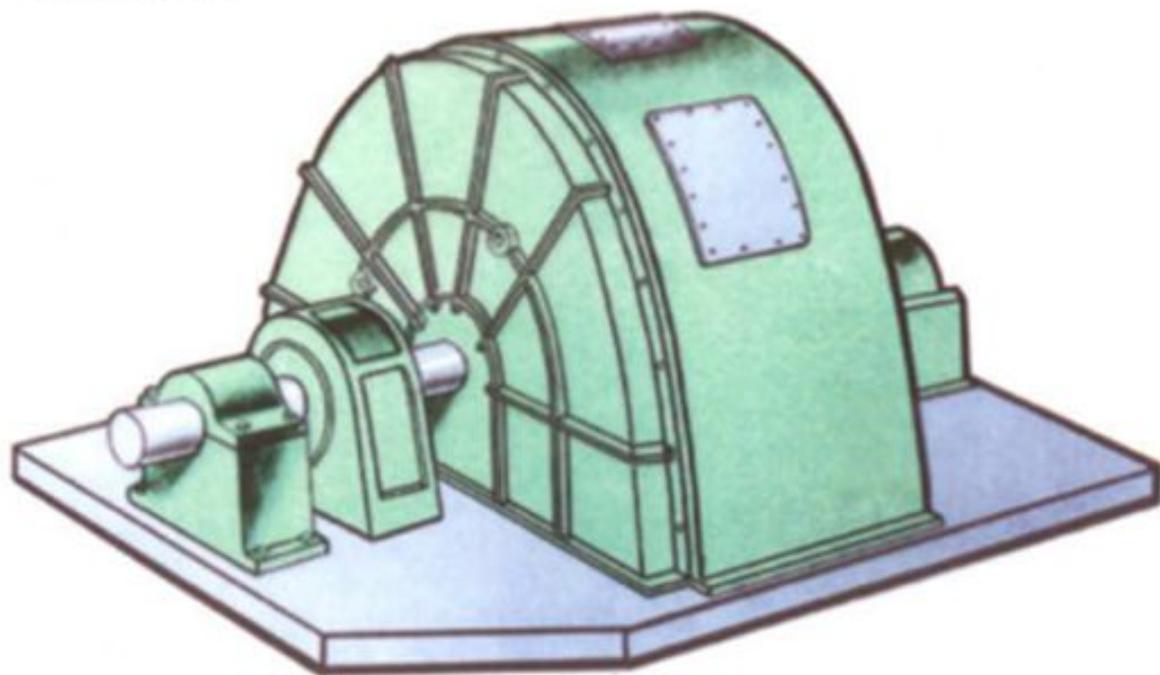
Конструкция статора



КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

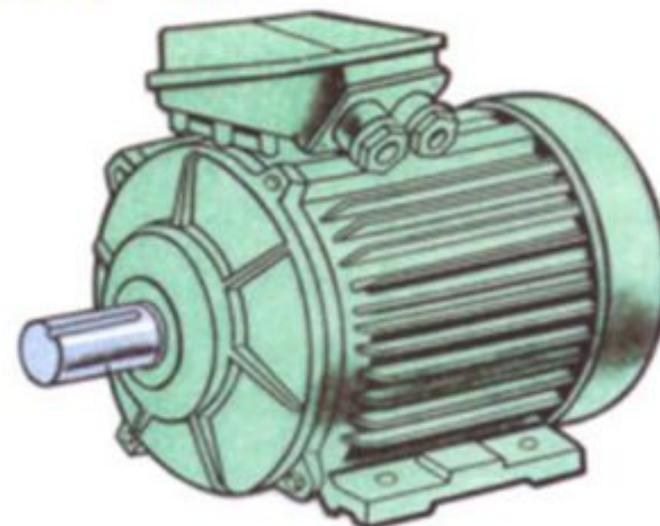
По способу монтажа

ГРУППА IM7



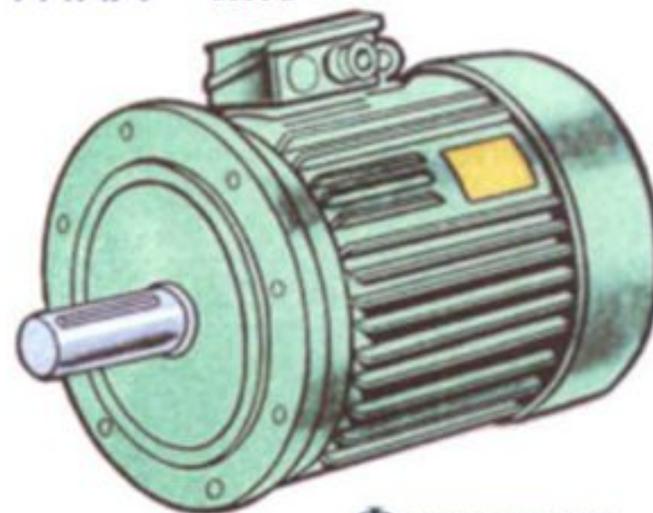
На выносных подшипниковых стойках

ГРУППА IM1



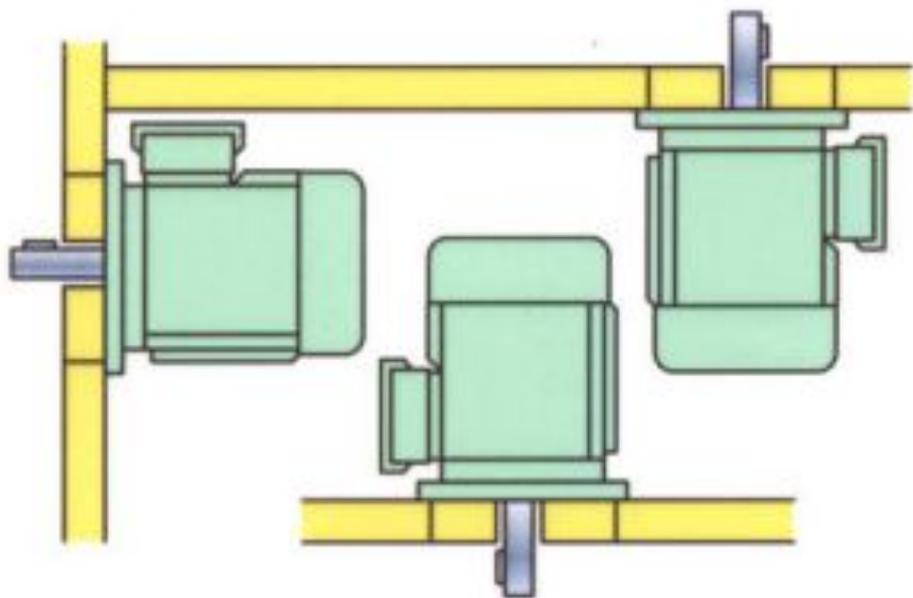
На лапах

ГРУППА IM3



Фланцевое

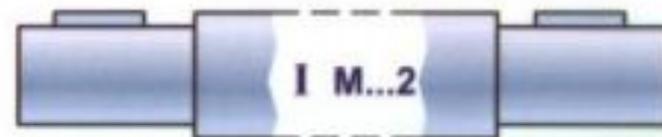
Обозначение способов монтажа



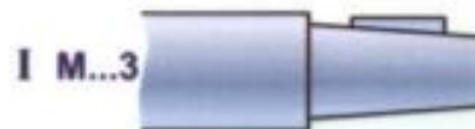
ГОСТ 2479-79 Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа

Обозначение концов вала

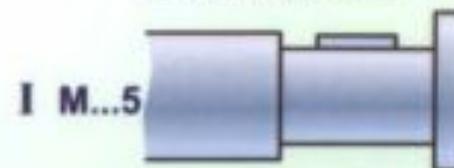
Цилиндрические



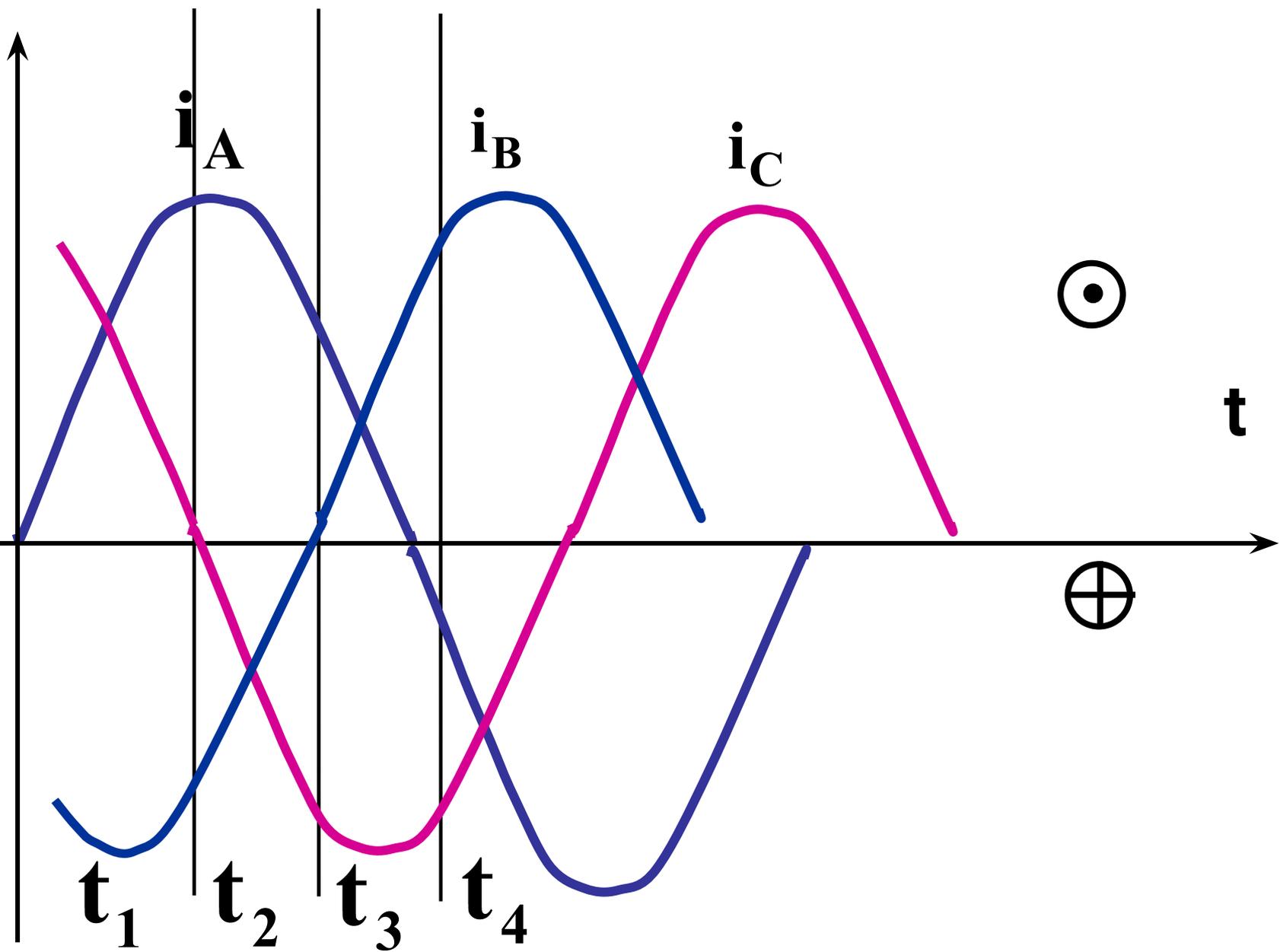
Конические



Фланцевые

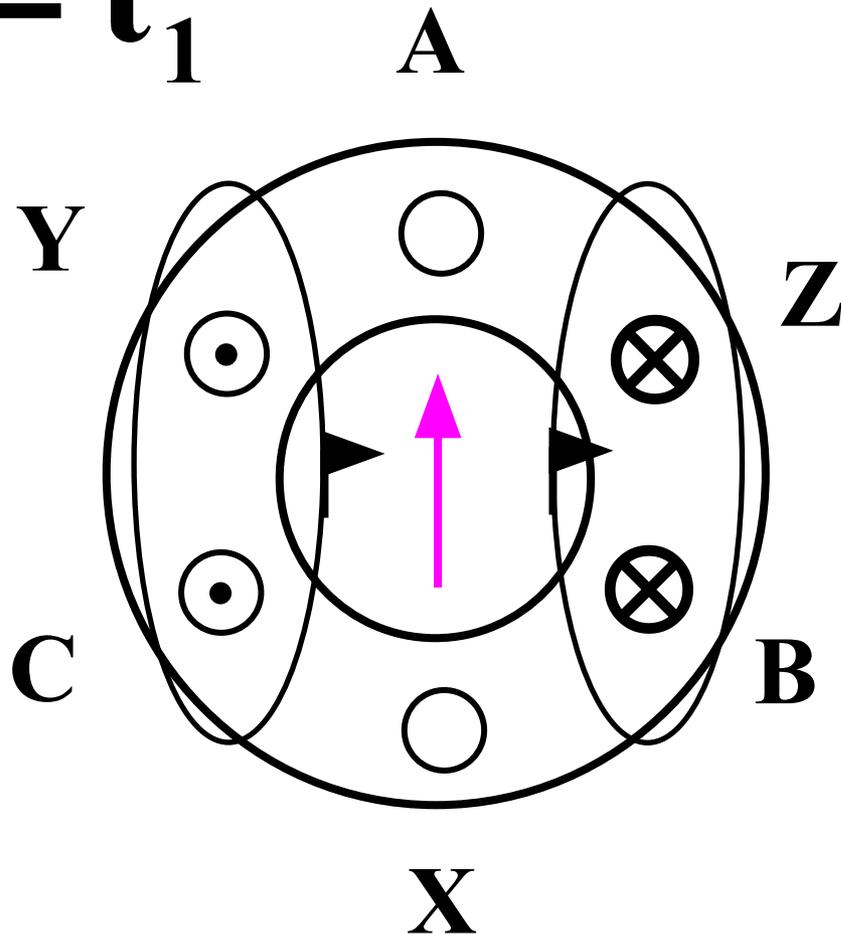


Начала и концы фаз обмоток статора выведены на клеммник, закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются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



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

$$t = t_1$$

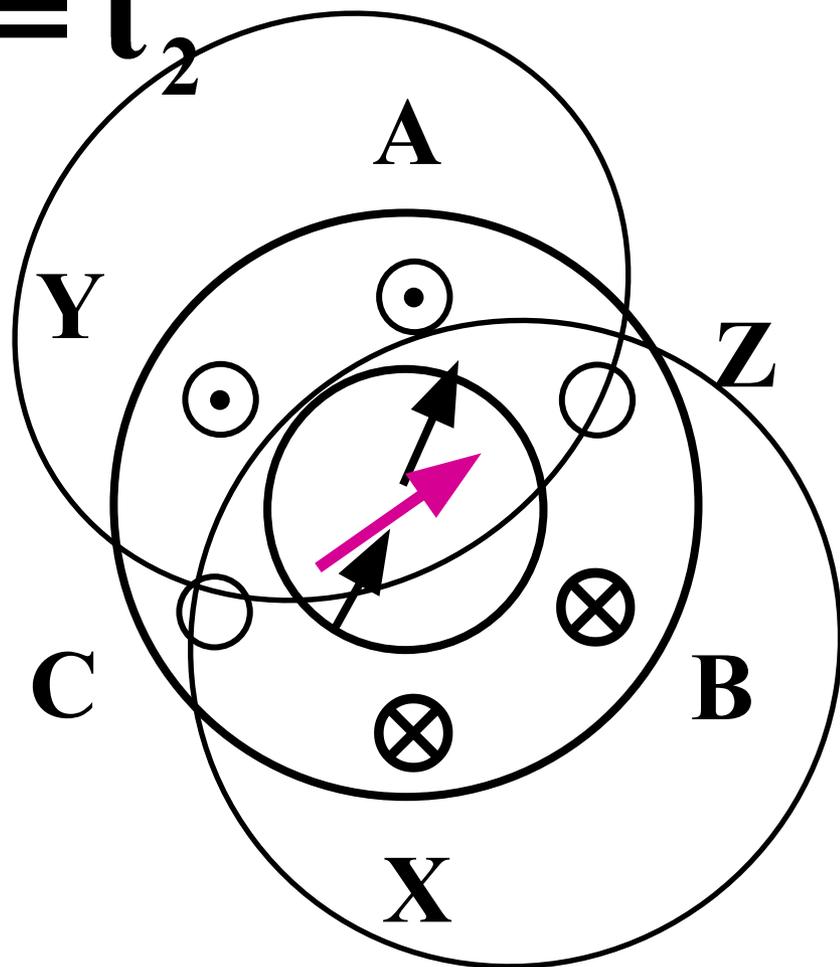


$$i_A = 0,$$

$$i_B < 0,$$

$$i_C > 0$$

$t = t_2$

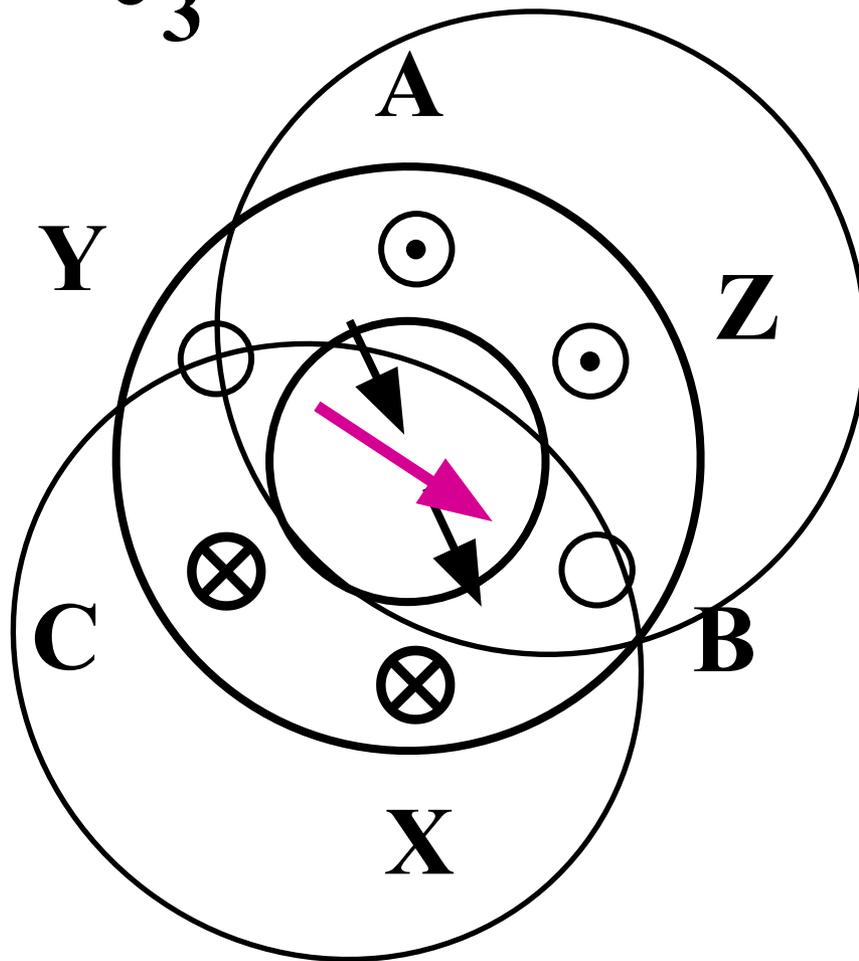


$$\mathbf{i}_A > \mathbf{0},$$

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

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

$t = t_3$

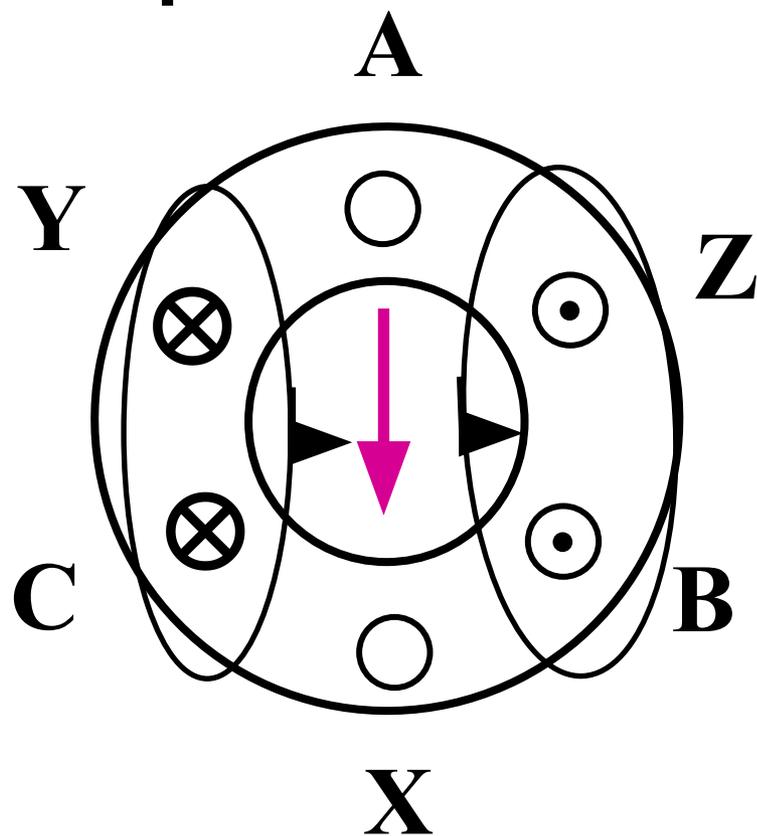


$$i_A > 0,$$

$$i_B = 0,$$

$$i_C < 0$$

$t = t_4$



$i_A = 0,$

$i_B > 0,$

$i_C < 0$

- 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, сдвинутых на 180° , 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:

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \text{ об / МИН}$$

Частоты вращения магнитного поля

ρ	1	2	3	4	5
n_0	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_0 .

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:**

$$s = \frac{n_0 - n_2}{n_0}$$

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

$$\mathbf{0 < s < 1}$$

Режим генератора

Если на работающем двигателе ротор разогнать с помощью двигателя до частоты $> n_0$ в том же направлении, то машина перейдет в генераторный режим и избыток механической мощности преобразуется в электрическую.

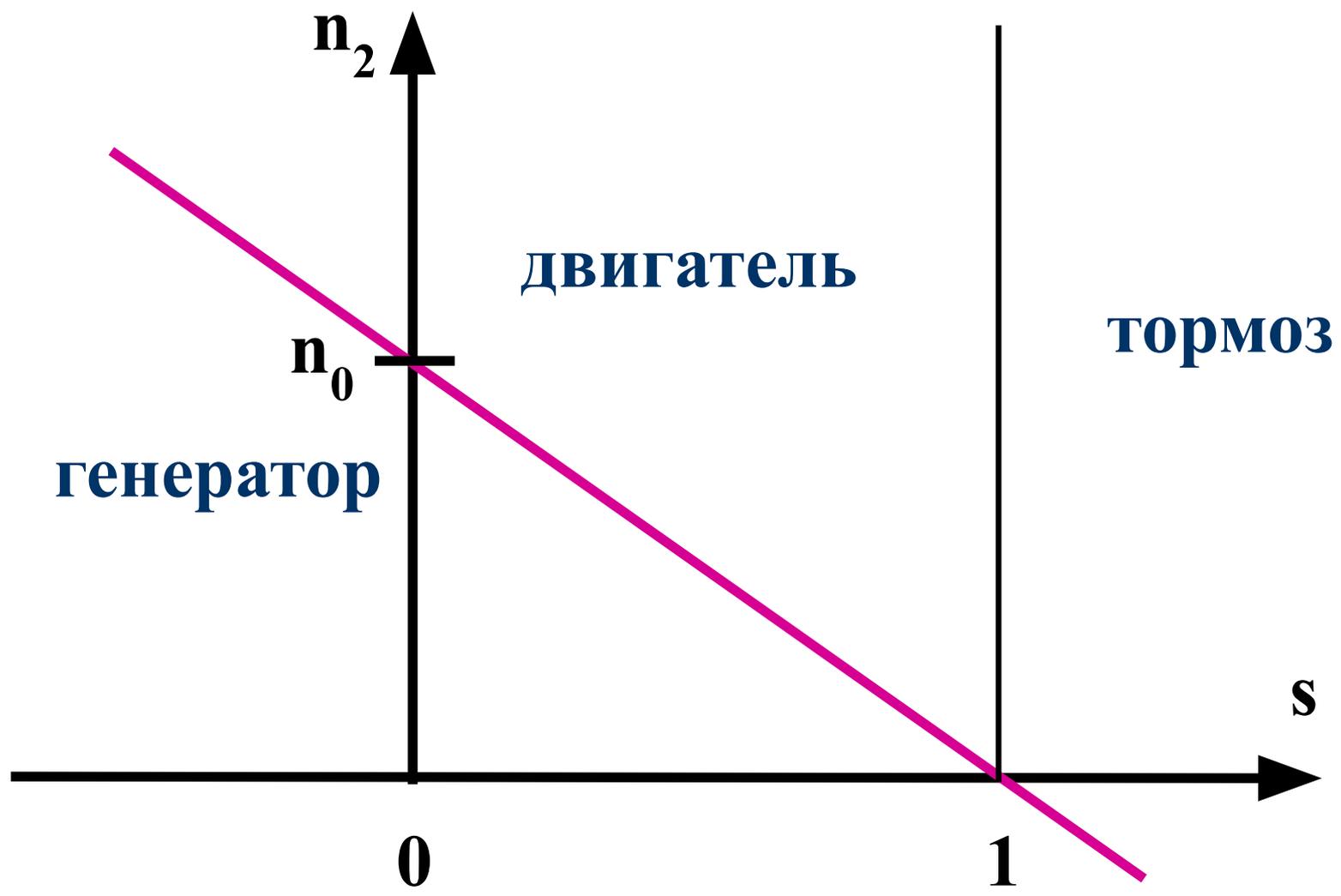
$$s < 0$$

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 S на частоту э.д.с. ротора и её значение

$$E_1 = 4.44$$

$f_1 W_1 \Phi$
 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

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

$$E_2 = 4.44 f_{2s} W_2 \Phi_M$$

$n_s = n_1 - n_2$ частота скольжения

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

$$f_{2s} = n_s p n_0 / n_0$$

$$f_{2s} =$$

$$s p n_1 =$$

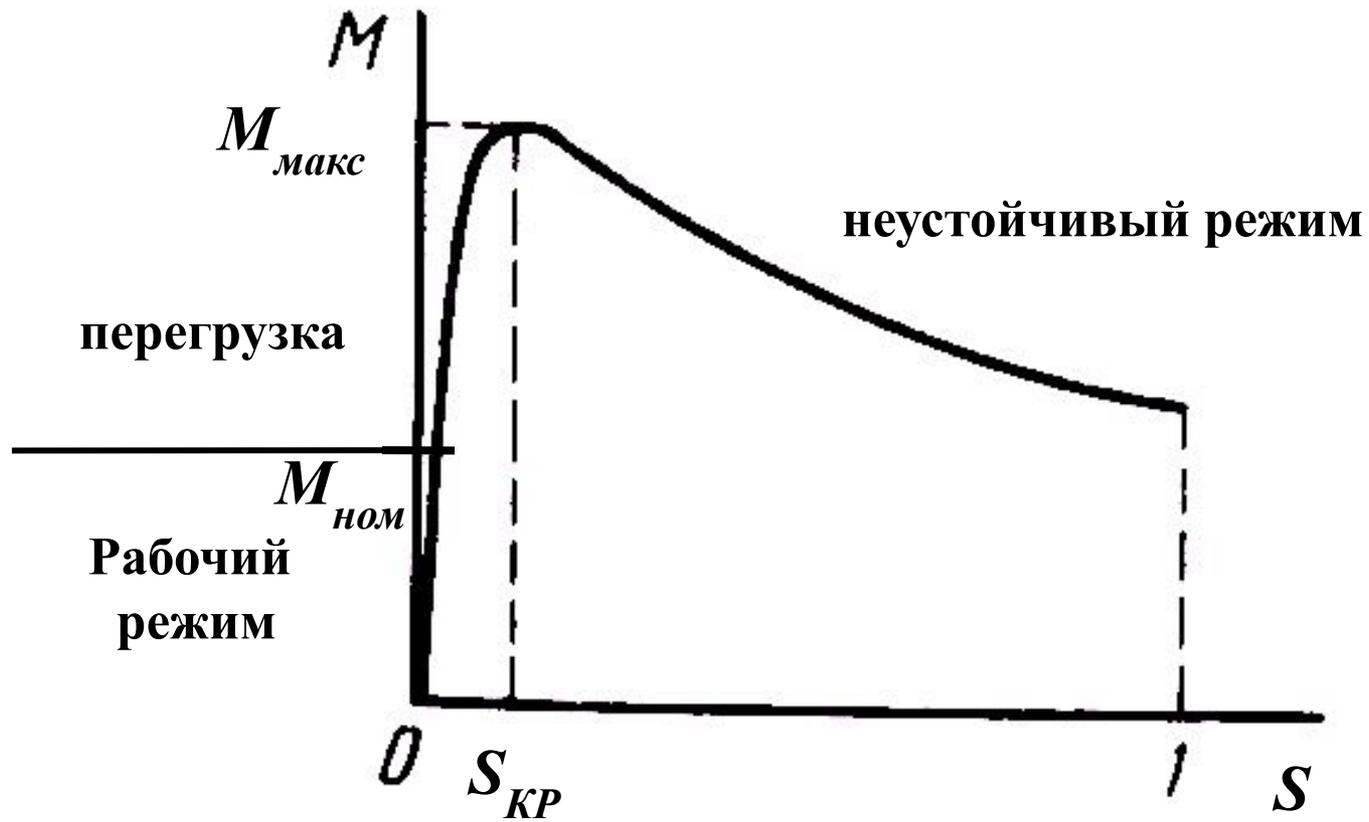
$$s f_1$$

$$E_{2s} = s E_{20}$$

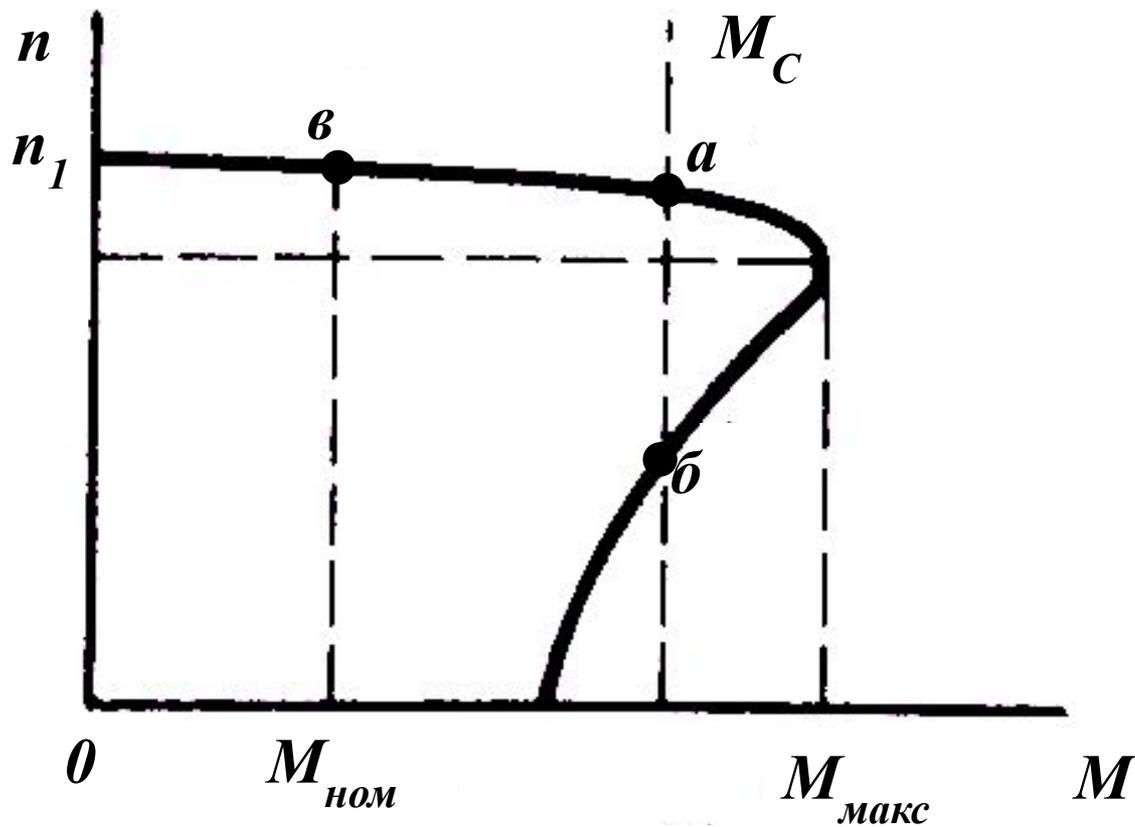
Тогда

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

Зависимость электромагнитного момента от скольжения



Механическая характеристика



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

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

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

С короткозамкнутым ротором:

- метод частотного регулирования:

- метод изменения числа пар полюсов

вращающегося магнитного поля.

С фазным ротором - также метод реостатного регулирования.

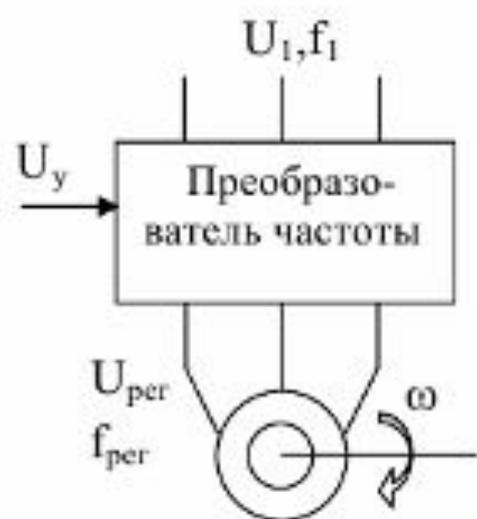
Метод частотного регулирования

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

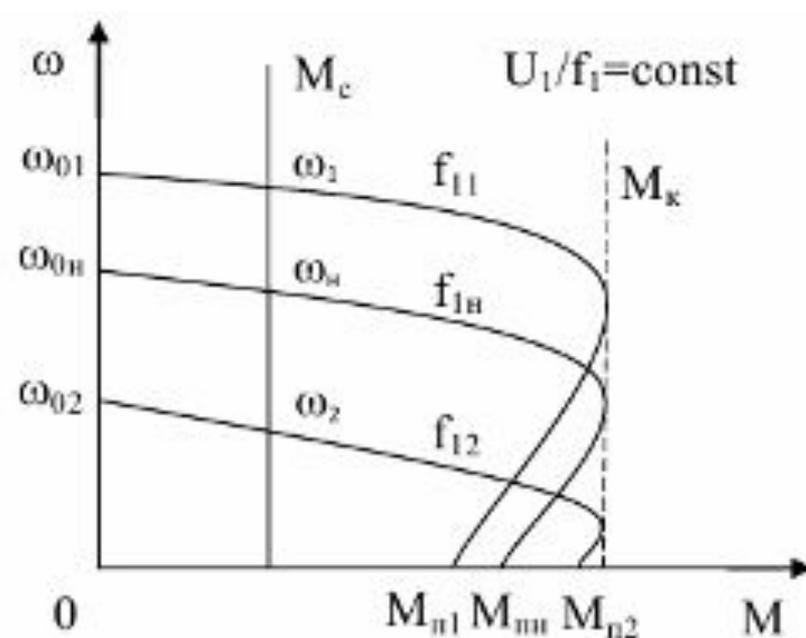
Достоинства:

-плавность и большой диапазон регулирования частоты,

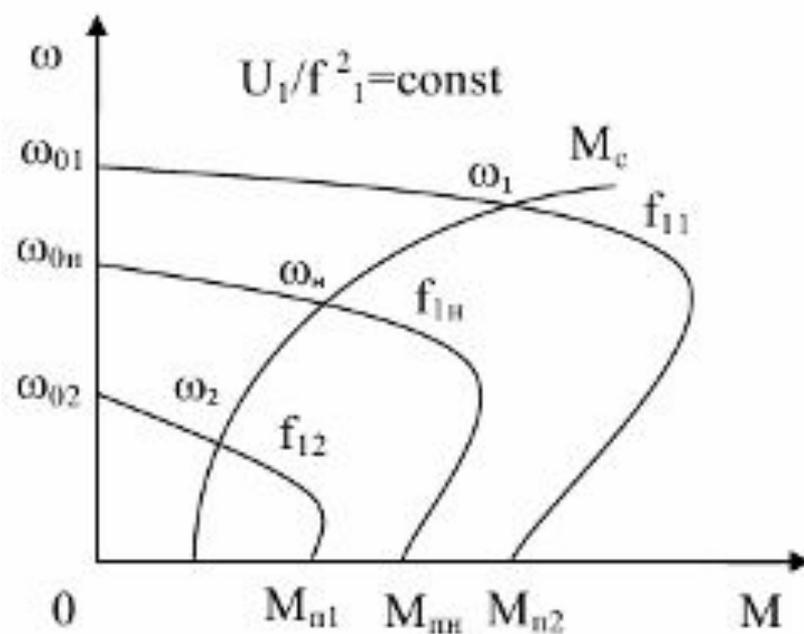
-экономичность, т.к. не выделяются дополнительные потери.



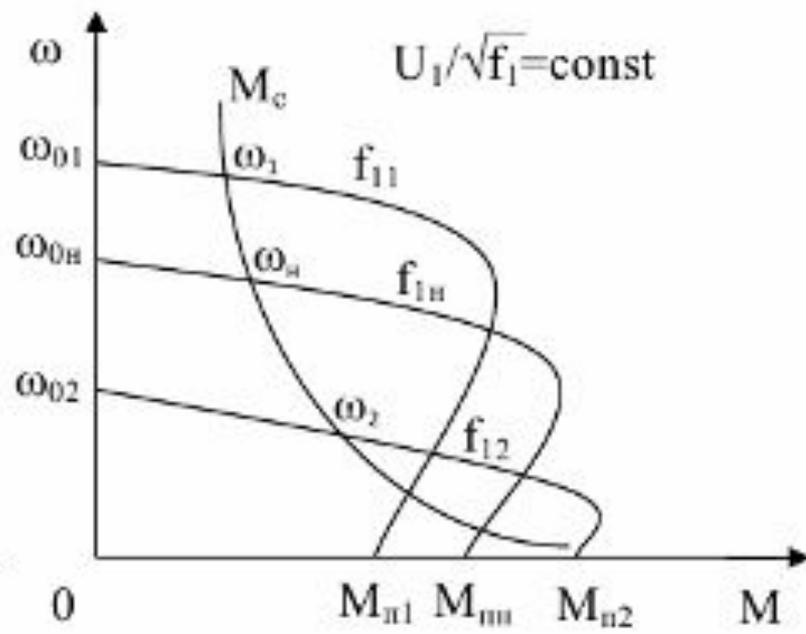
а



б



в



г

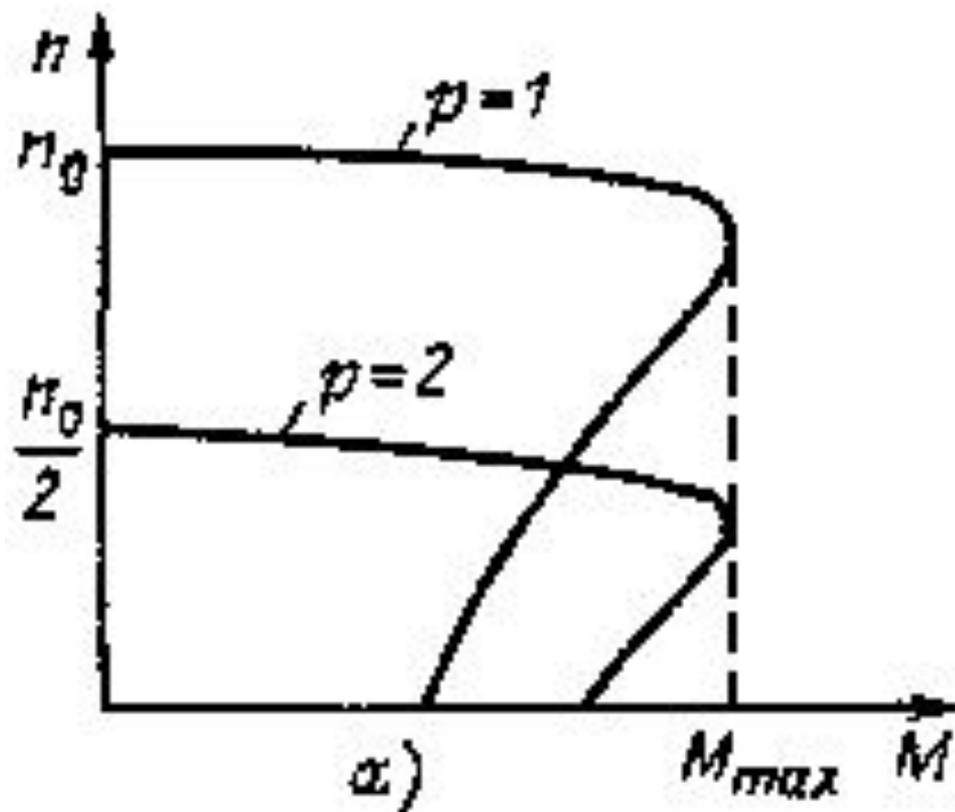
Метод изменения числа пар полюсов

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

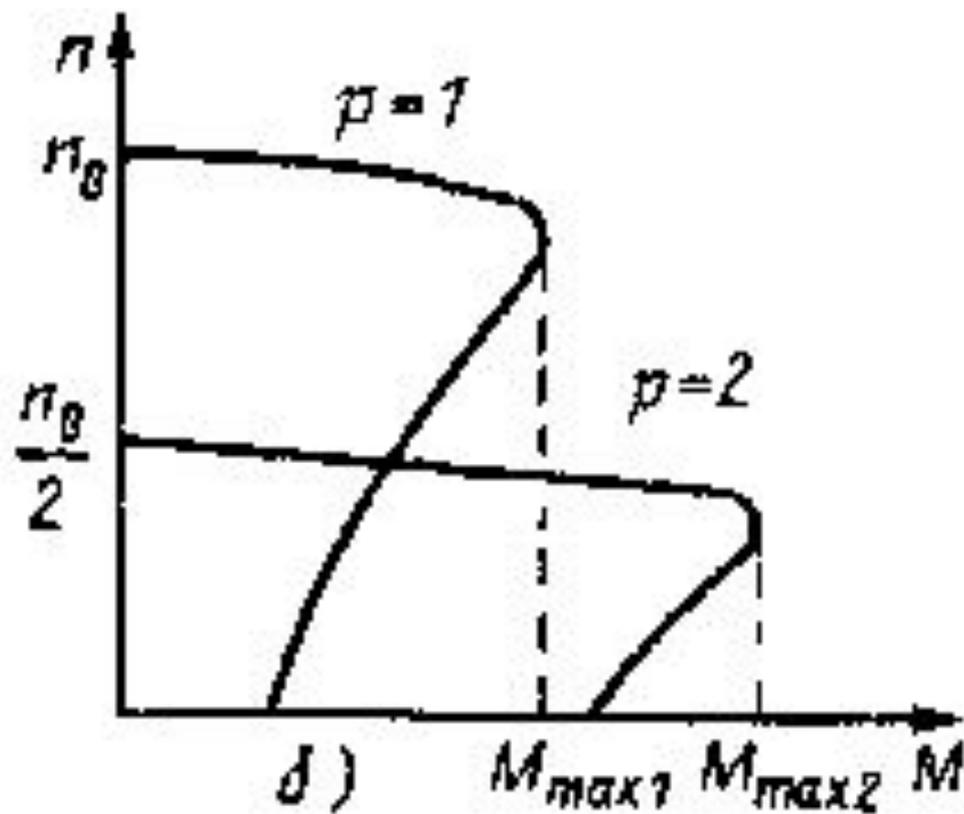
При $f_1 = \text{const}$ $\omega_{\text{п}} = \frac{2\pi \times f}{p}$ зависит только от p

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.

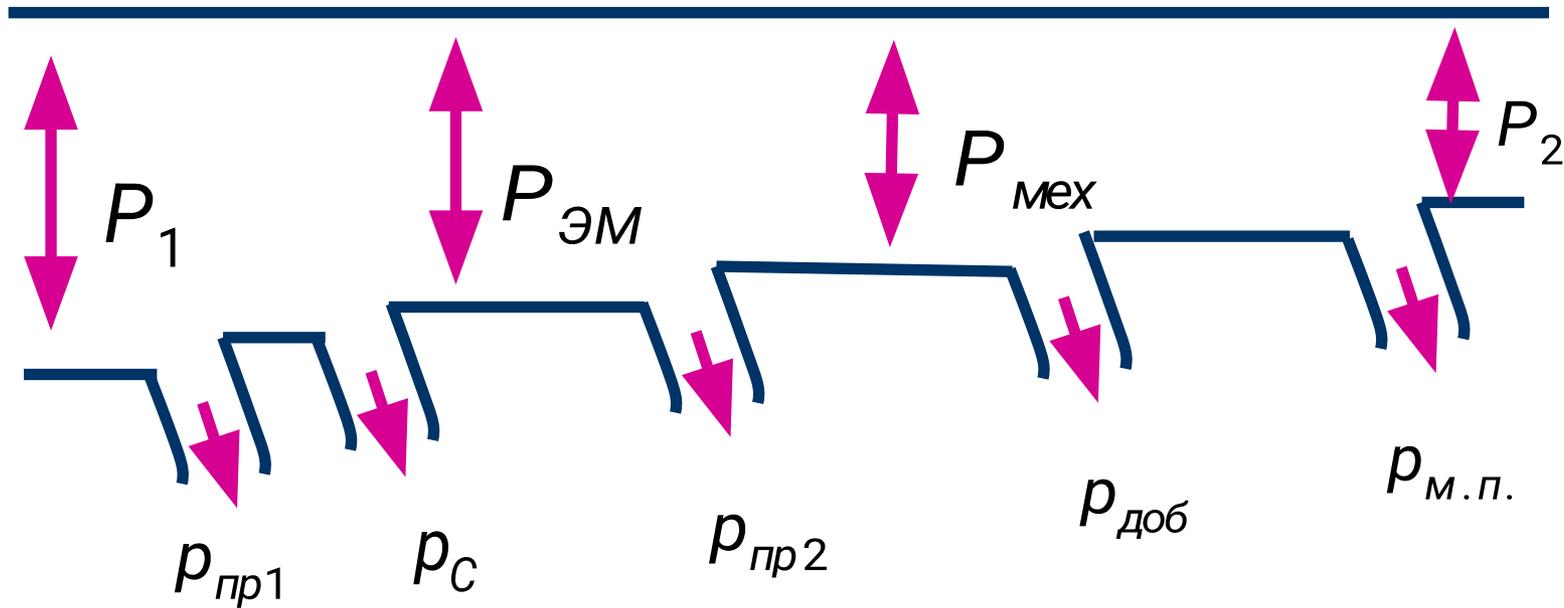


С постоянным максимальным моментом



С постоянной мощностью

Энергетическая диаграмма двигателя



$P_1 = 3U_1I_1 \cos \varphi_1$ — **МОЩНОСТЬ,
ПОДВЕДЕННАЯ ИЗ
СЕТИ;**

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

P_c — мощность потерь на гистерезис и вихревые токи в обмотке статора (потери в стали);

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

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

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

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

$P_{м.п.}$ — механические потери;

P_2 — полезная механическая мощность, отдаваемая на валу двигателя

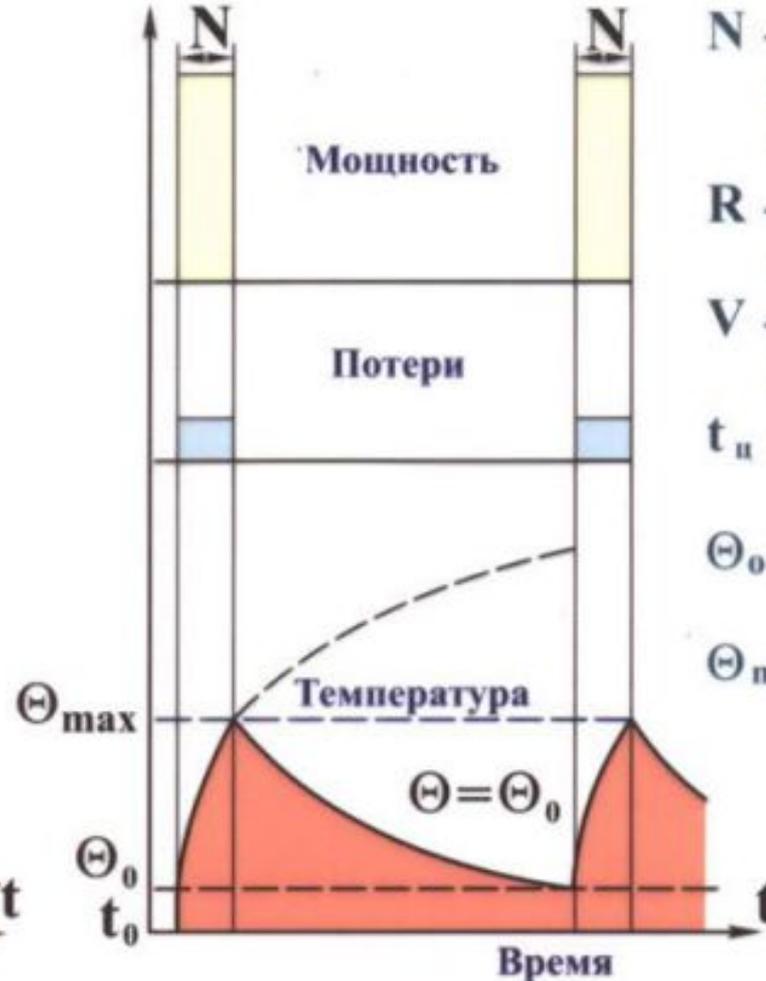
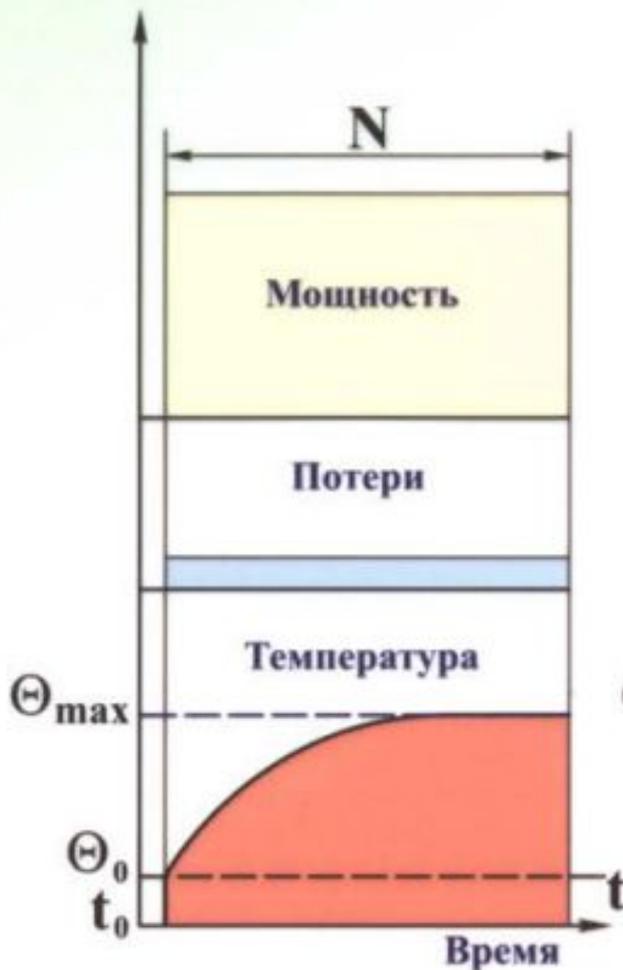
$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Режимы работы электрических машин

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЙ - S1

КРАТКОВРЕМЕННЫЙ - S2



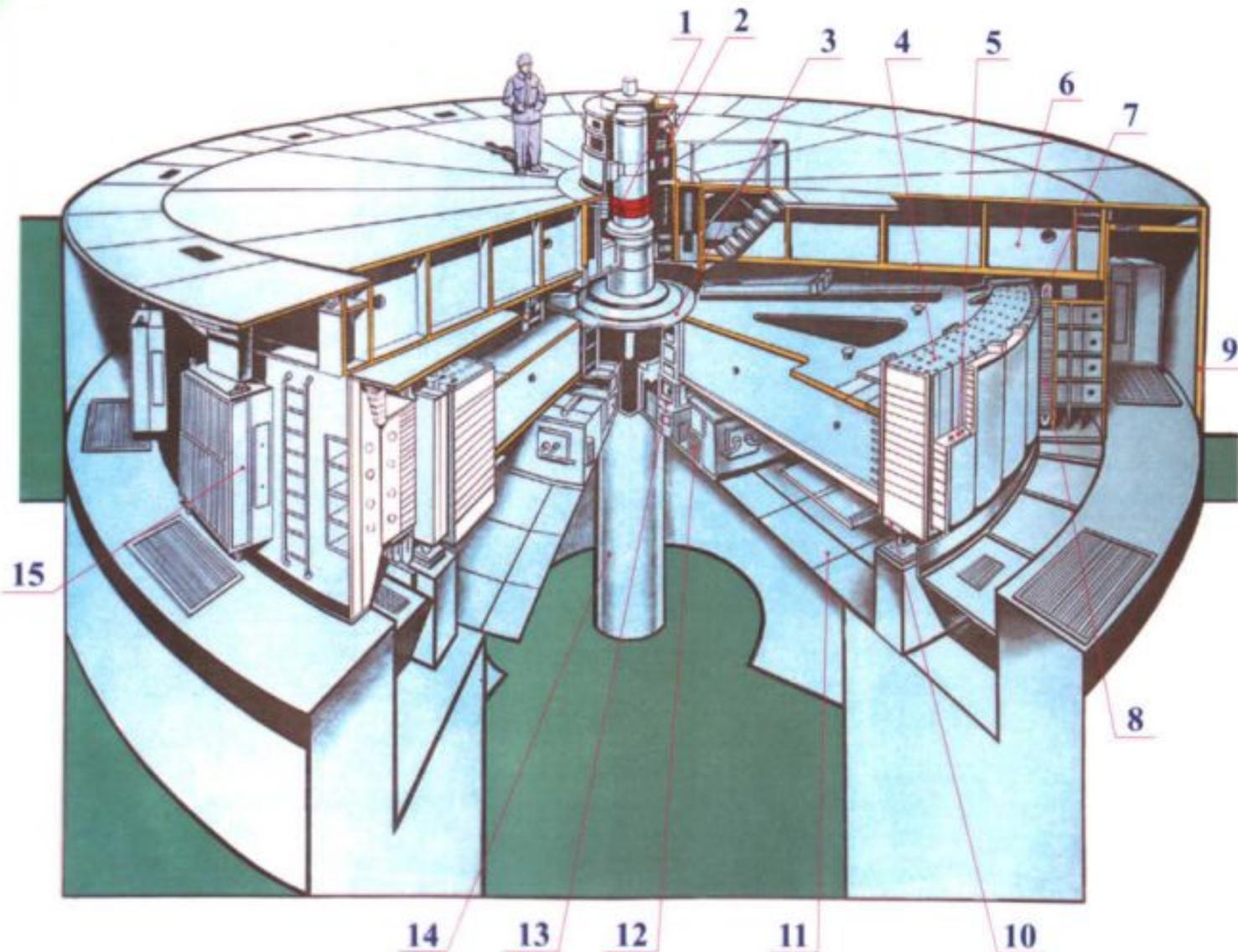
- N - время работы машины с нормальной нагрузкой, мин. ;
- R - продолжительность паузы, мин. ;
- V - время холостого хода, мин. ;
- $t_{ц}$ - продолжительность цикла, мин. ;
- Θ_0 - температура холодной машины, $^{\circ}\text{C}$;
- Θ_{max} - наибольшая температура машины, $^{\circ}\text{C}$.

Режимы работы электрических машин см. в ГОСТ IEC 60034-1-2014

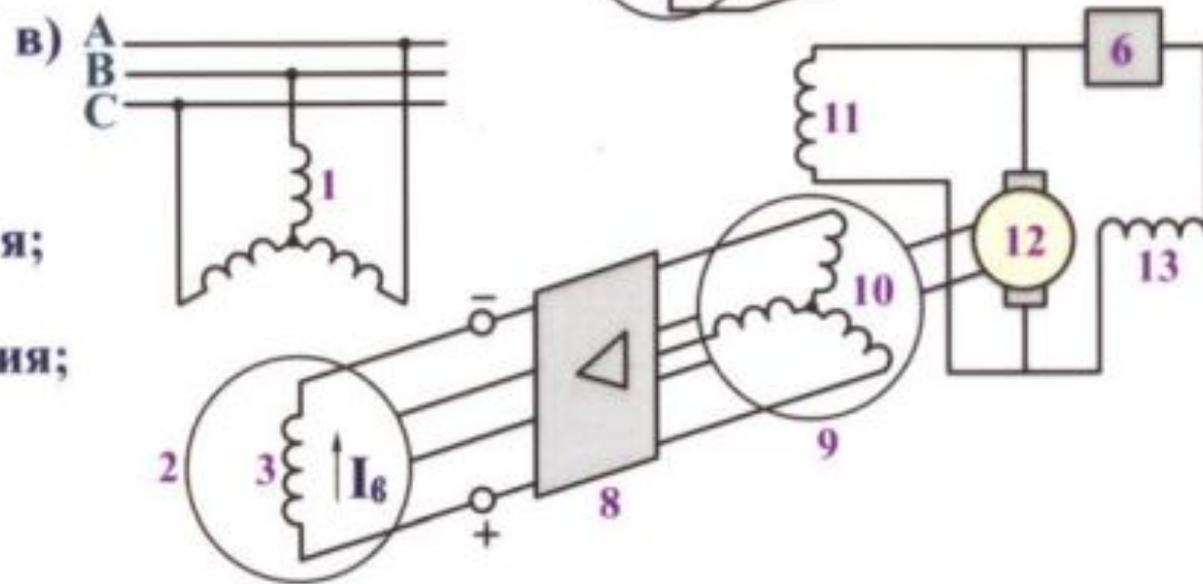
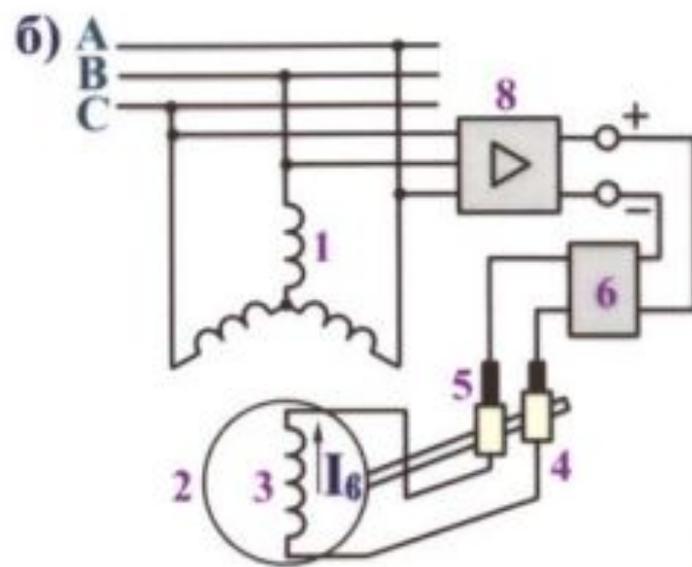
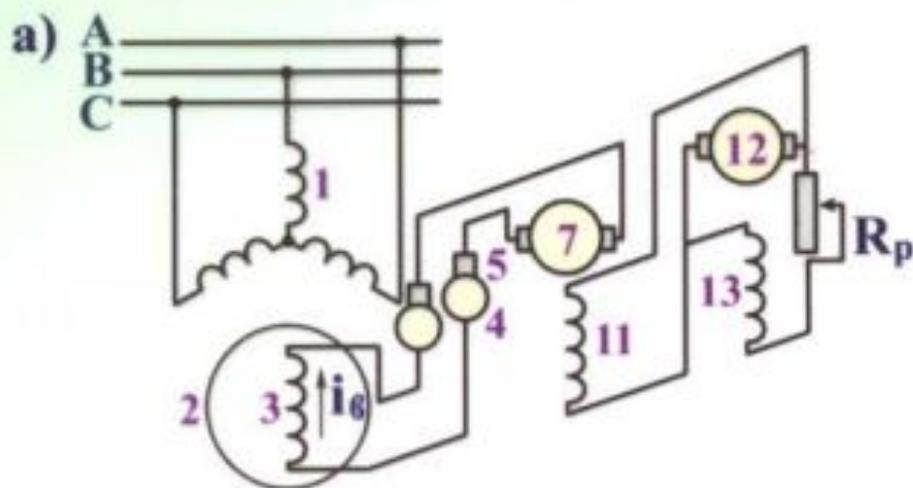
Синхронные машины

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГИДРОГЕНЕРАТОР КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС



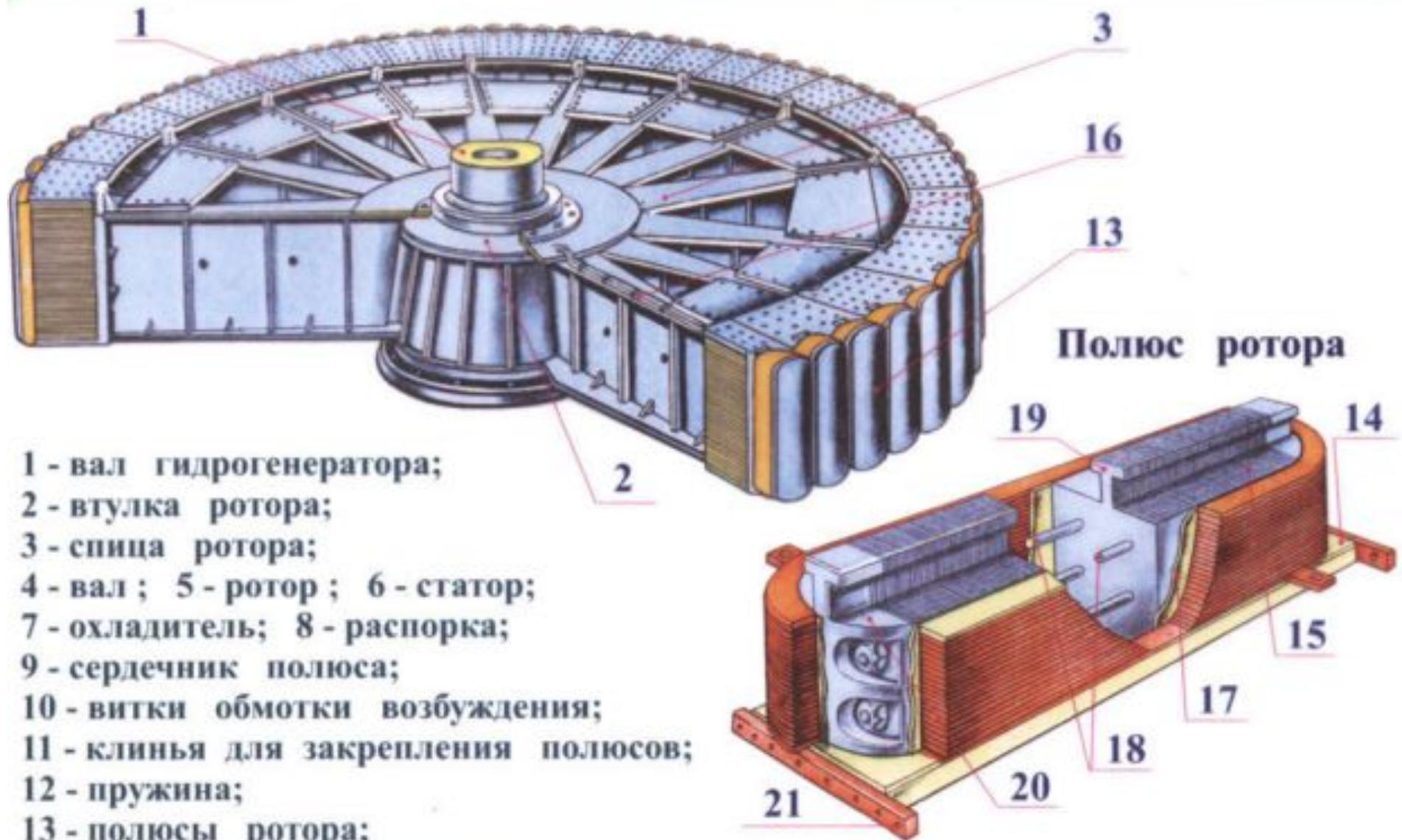
- 1 - контактные кольца;
- 2 - возбудитель;
- 3 - втулка ротора;
- 4 - обод ротора;
- 5 - полюс;
- 6 - верхняя крестовина;
- 7 - обмотка статора;
- 8 - сердечник статора;
- 9 - корпус статора;
- 10 - тормоз-домкрат;
- 11 - нижняя крестовина;
- 12 - масляная ванна подпятника;
- 13 - подпятник;
- 14 - вал;
- 15 - воздухоохладитель.



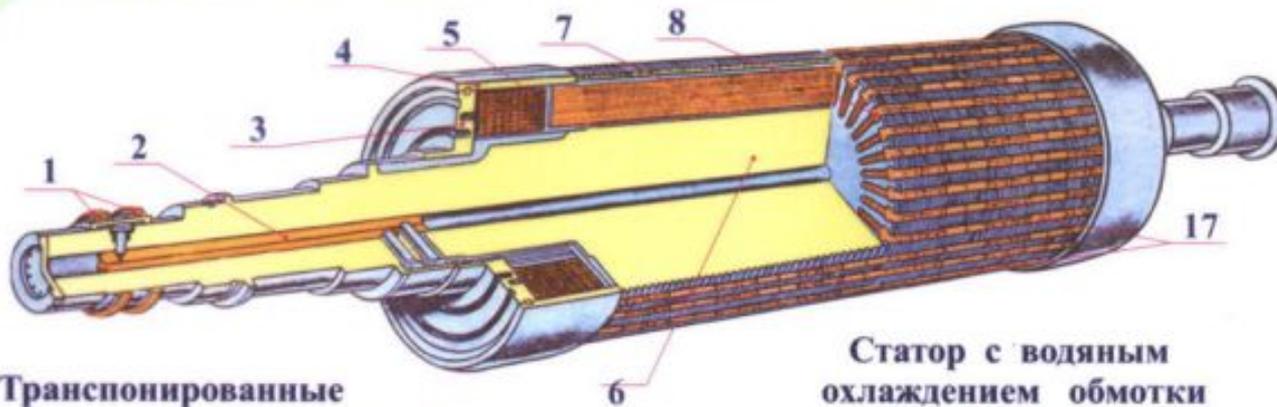
- 1- обмотка якоря;
- 2- ротор генератора;
- 3- обмотка возбуждения;
- 4- кольца; 5- щетки;
- 6- регулятор напряжения;
- 7- возбудитель;
- 8- выпрямитель;
- 9- обмотка якоря возбудителя;
- 10- ротор возбудителя;
- 11- обмотка возбуждения возбудителя;

- 12- подвозбудитель;
- 13- обмотка возбуждения подвозбудителя

РОТОР ГИДРОГЕНЕРАТОРА



Ротор с форсированным водородным охлаждением



Транспонированные стержни в пазах статора

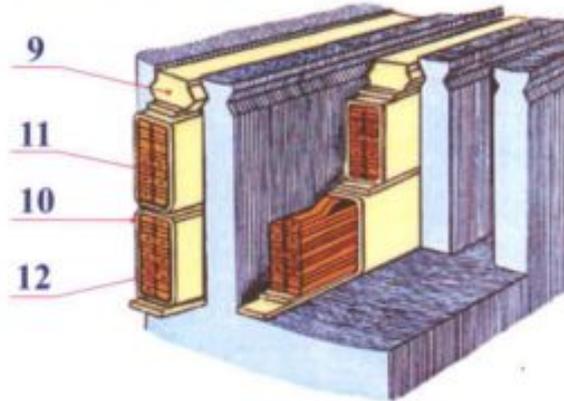
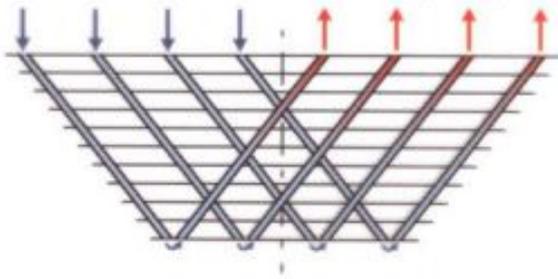


Схема непосредственного охлаждения обмотки ротора



Статор с водяным охлаждением обмотки

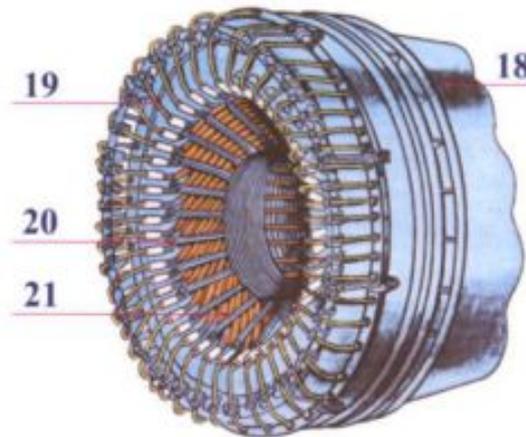
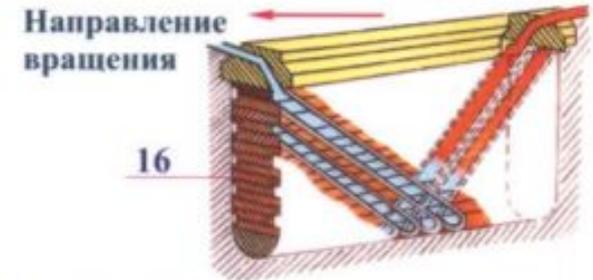
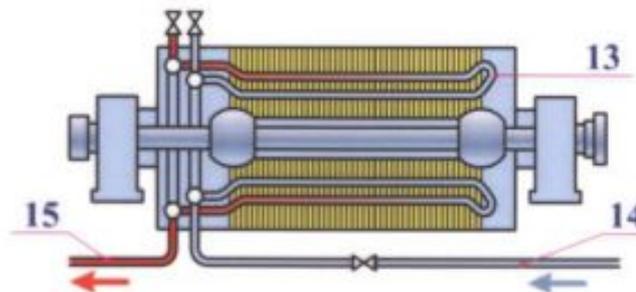


Схема циркуляции охлаждающей воды



- 1 - контактные кольца;
- 2 - токопровод к обмотке возбуждения;
- 3 - центрирующее кольцо;
- 4 - бандажное кольцо;
- 5 - лобовая часть обмотки;
- 6 - бочка ротора;
- 7 - пазовая часть обмотки ротора;
- 8 - пазовые клинья ротора;
- 9 - пазовые клинья статора;
- 10 - корпусная изоляция стержня обмотки статора;
- 11 - сплошные проводники стержня;
- 12 - полые проводники стержня;
- 13 - циркуляция воды вдоль проводников;
- 14 - подвод охлаждающей воды;
- 15 - выход нагретой воды;
- 16 - проводники обмотки ротора;
- 17 - козырьки клина для захвата охлаждающего водорода;
- 18 - корпус статора;
- 19 - детали подвода охлаждающей воды к обмотке статора;
- 20 - детали крепления лобовых частей обмотки;
- 21 - лобовые части обмотки статора.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (СГ)

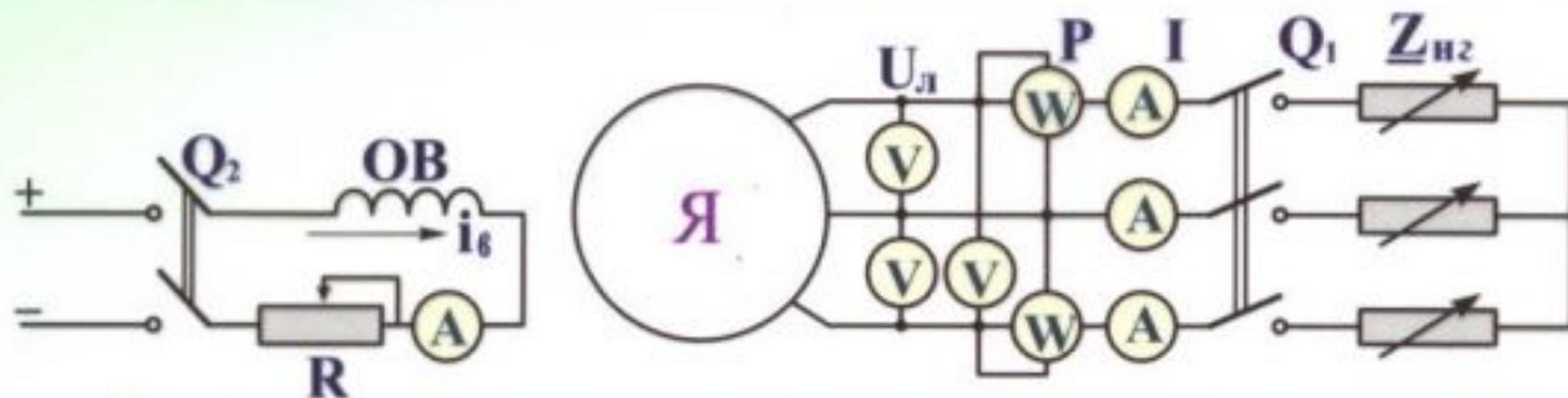
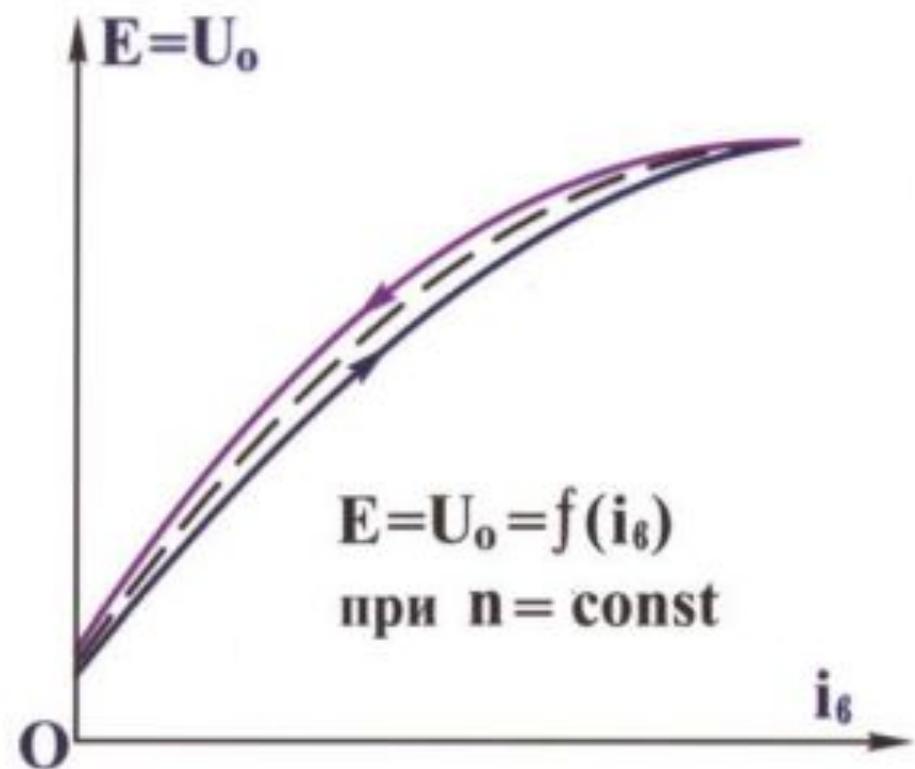
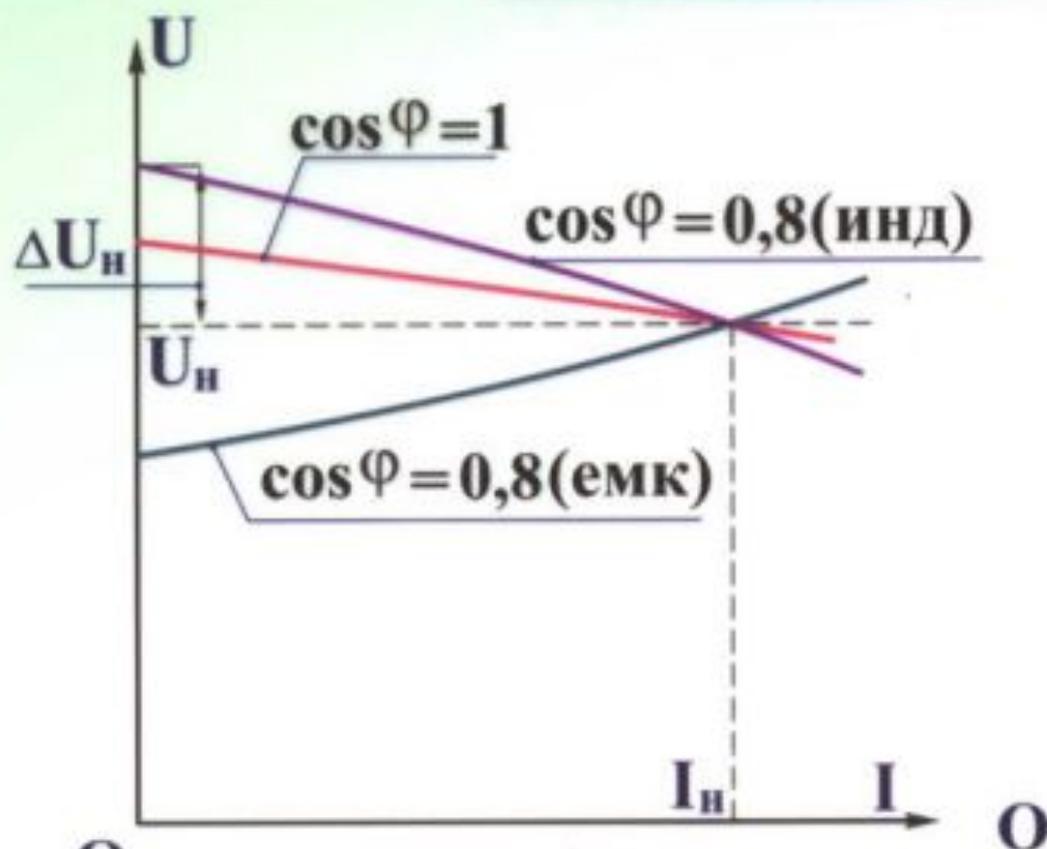


Схема для опытного определения характеристики СГ

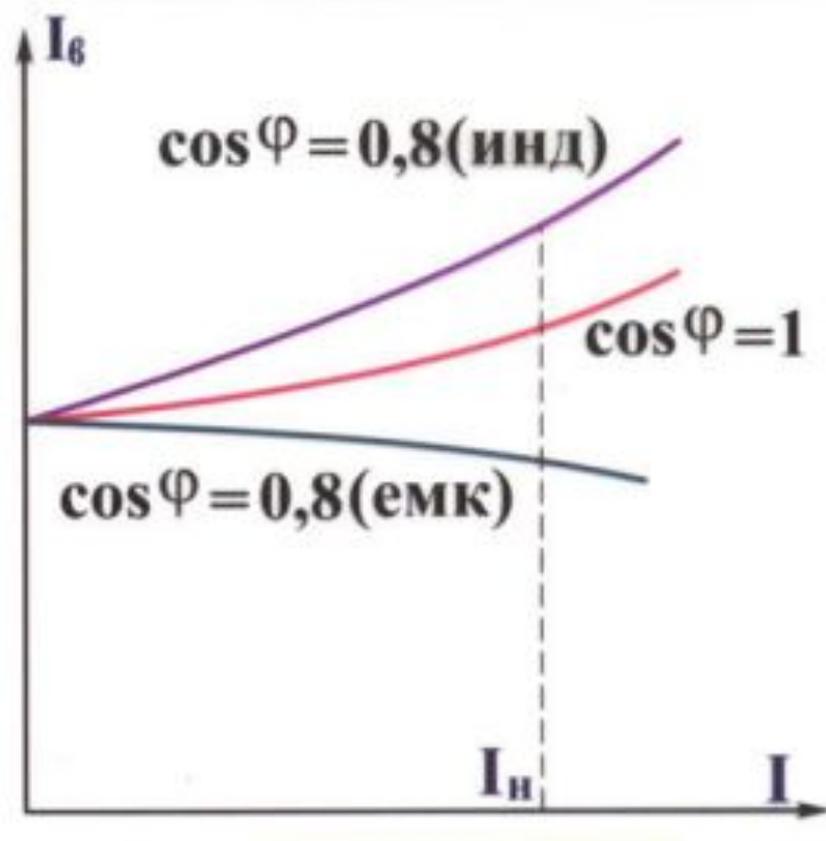


Характеристики холостого хода

ХАРАКТЕРИСТИКИ СГ



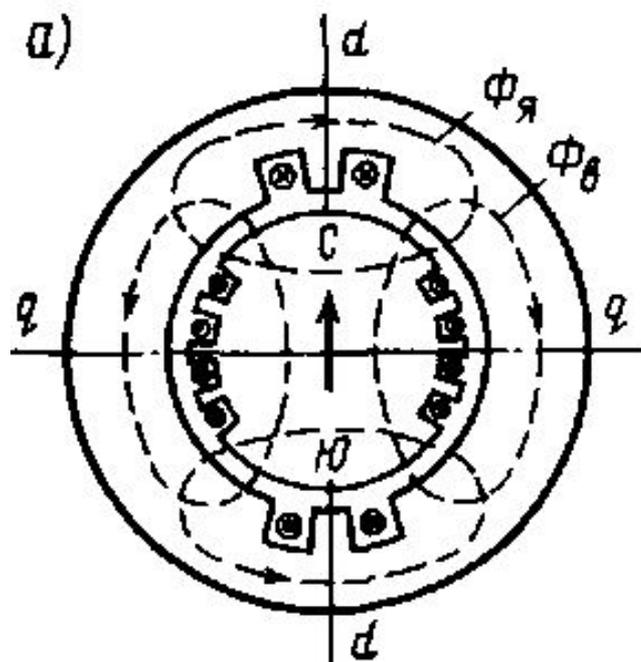
$U=f(I)$ при $i_6 = \text{const}$
и $n = \text{const}$



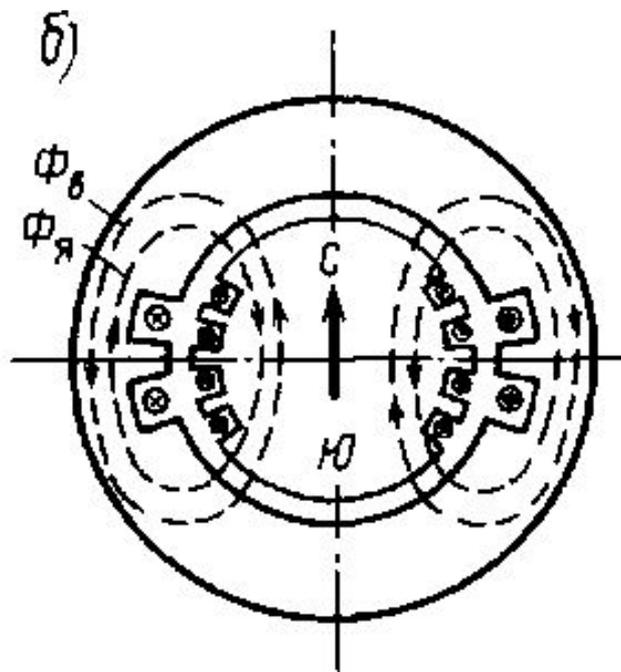
$i_6=f(I)$ при $U = \text{const}$
и $n = \text{const}$

Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики СГ

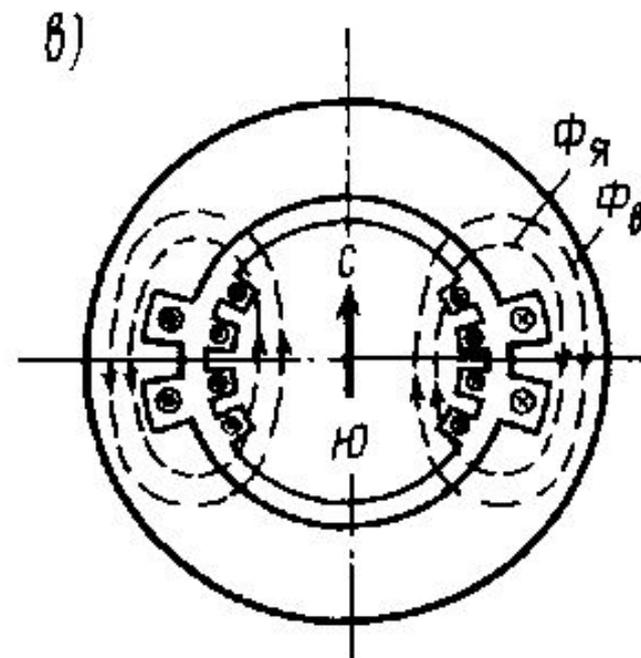
Реакция якоря в синхронном генераторе



Активная нагрузка

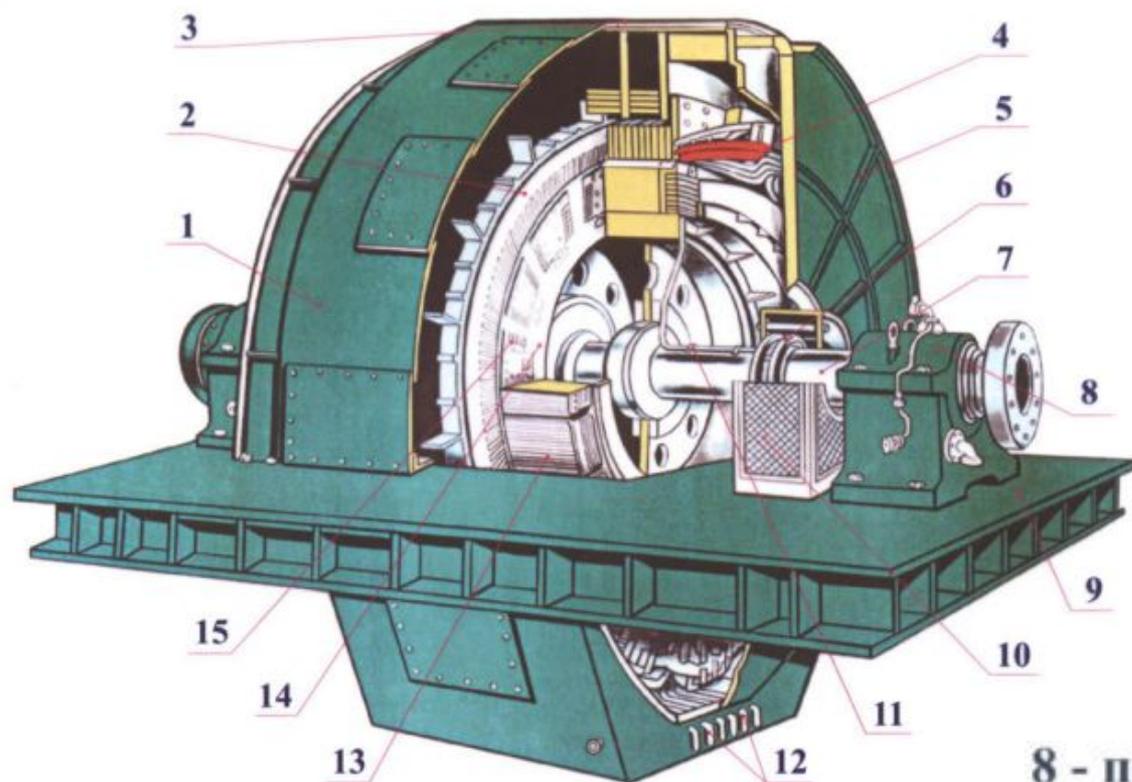


Индуктивная нагрузка



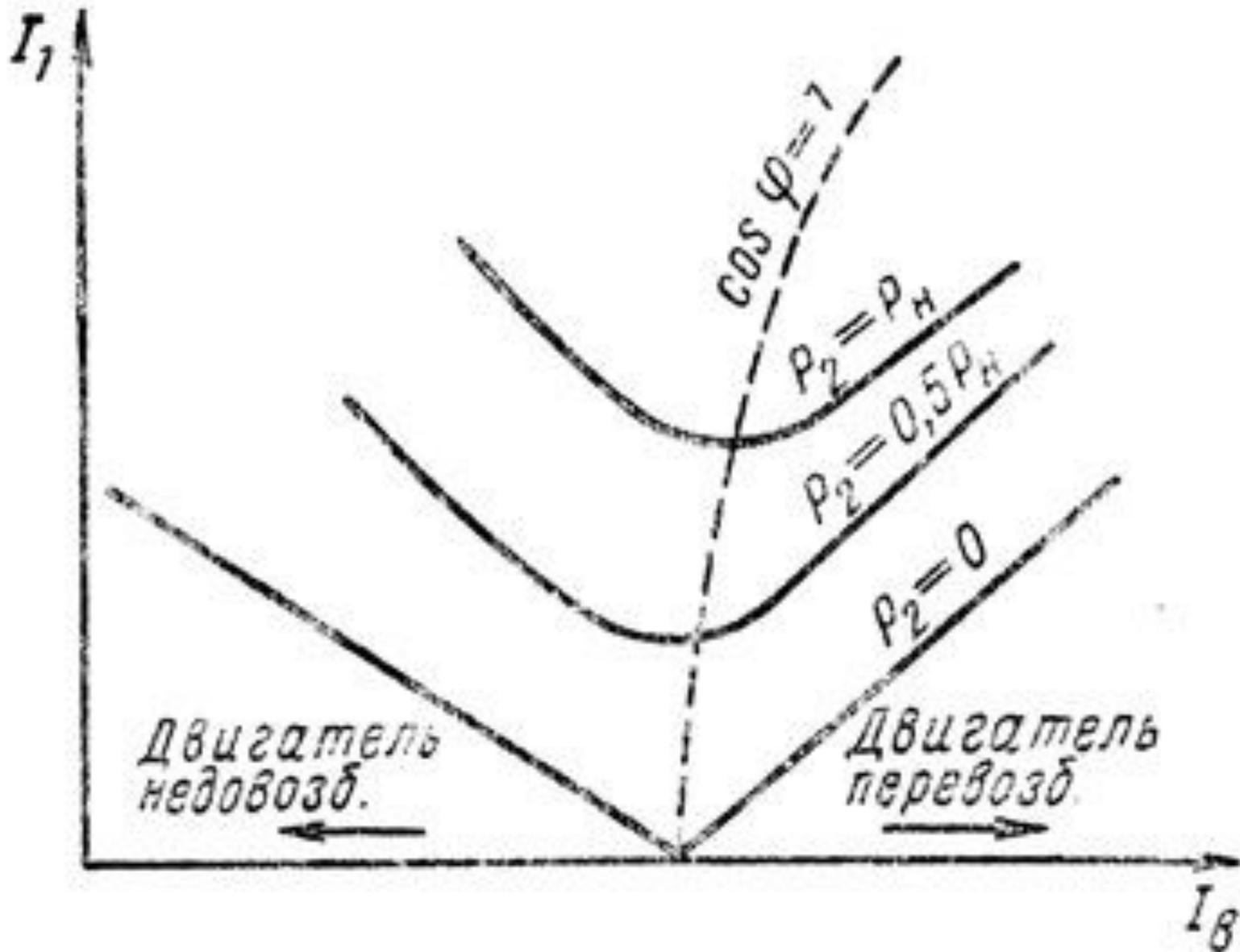
Емкостная нагрузка

СИНХРОННЫЙ ЯВНОПОЛЮСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

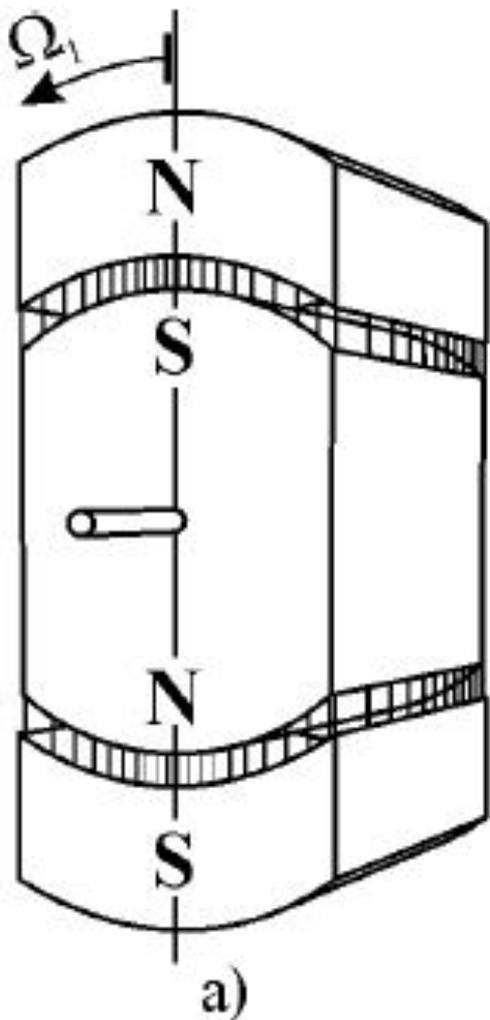


- 1 - корпус;
- 2 - сердечник статора;
- 3 - сердечник полюса;
- 4 - лобовые части обмотки статора;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - контактные кольца;
- 7 - вал;
- 8 - подшипник;
- 9 - фундаментная плита;
- 10 - кожух контактных колец;
- 11 - токоподвод к обмотке;
- 12 - выводы обмотки статора;
- 13 - стержни пусковой обмотки;
- 14 - сердечник ротора;
- 15 - обмотка полюса.

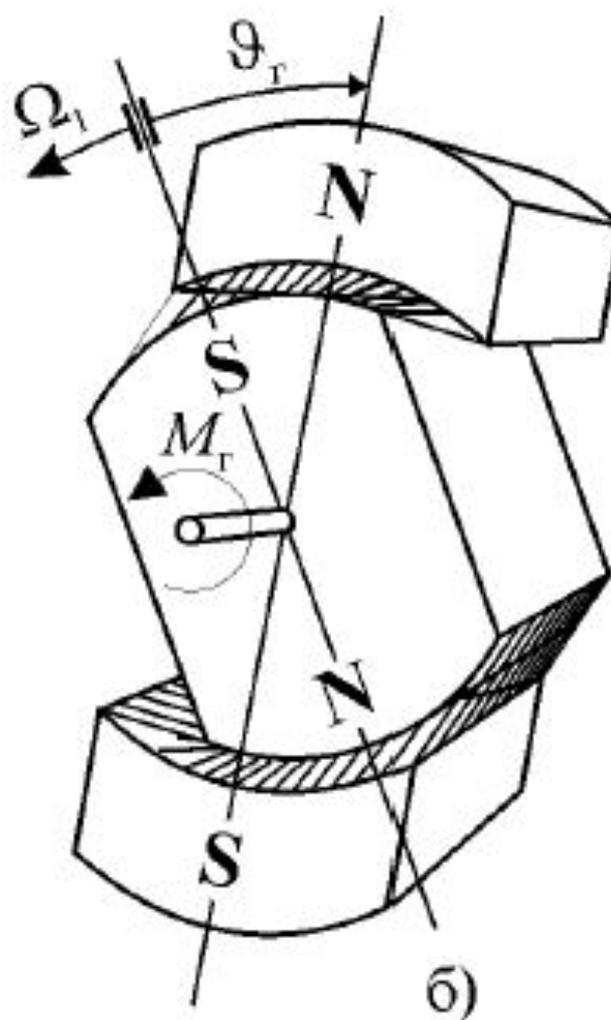
U-образные характеристики синхронного двигателя / компенсатора



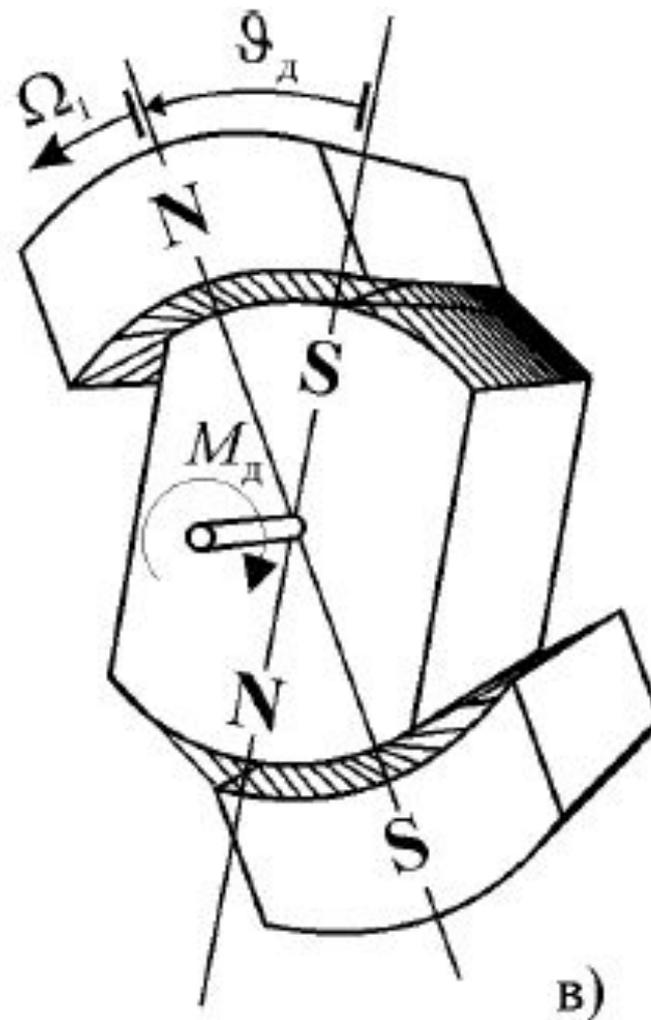
Угол нагрузки синхронных машин



Без нагрузки



Генератор
под нагрузкой



Двигатель
под нагрузкой

Угловая характеристика

