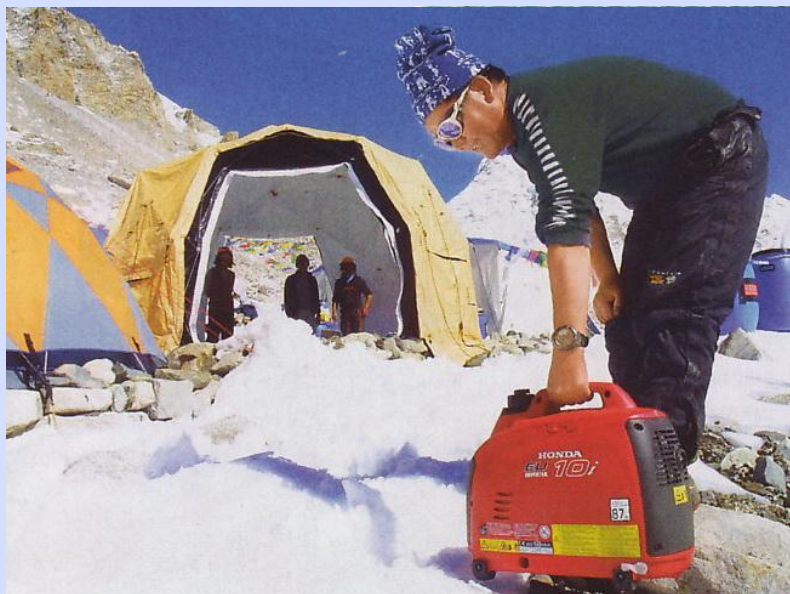
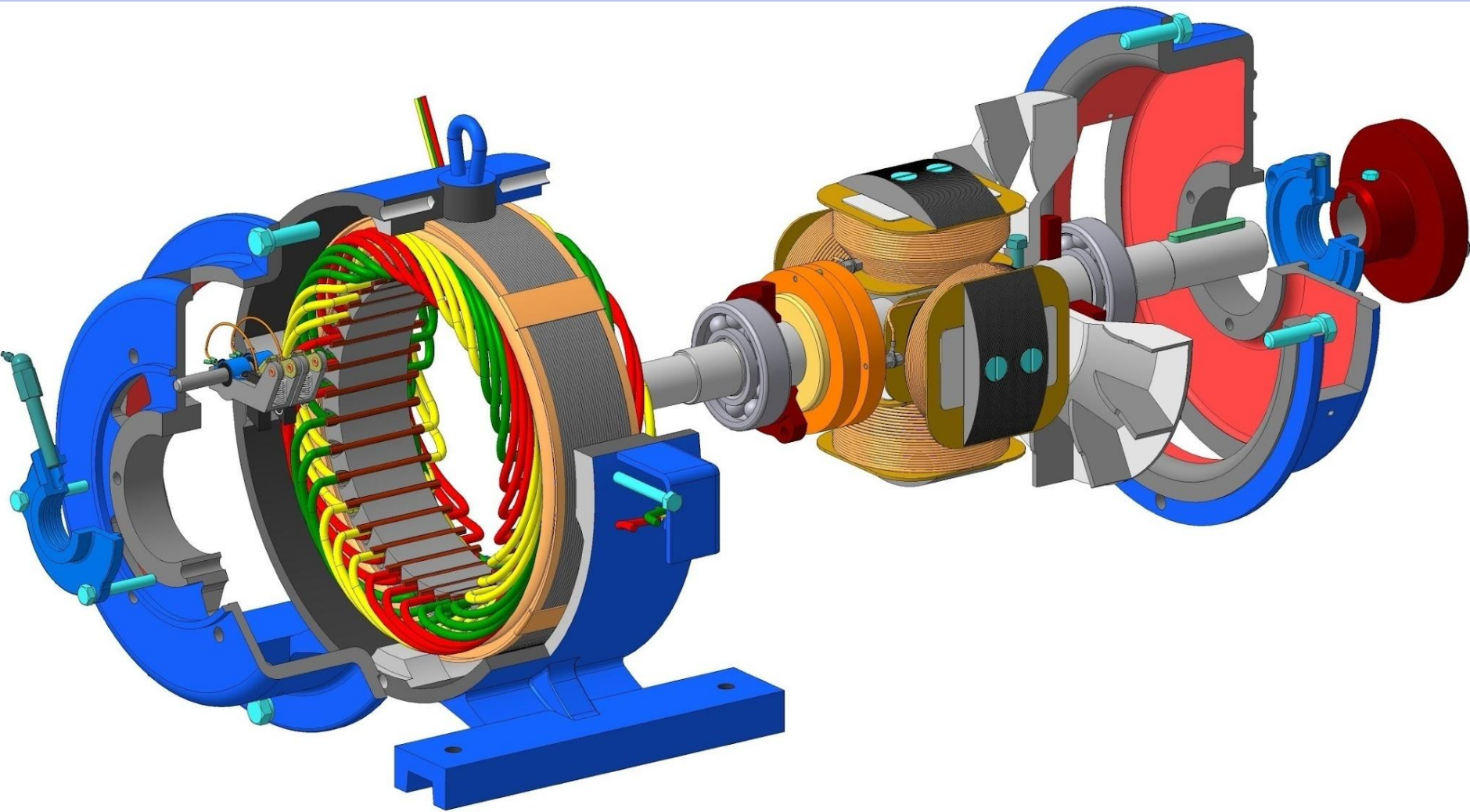


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ





Синхронные машины (СМ) – это
машины переменного тока, у
которых частота вращения
ротора n_2 равна частоте
вращения магнитного потока
статора.

Синхронные машины могут
работать как генераторами, так
и двигателями

В современных электростанциях электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами (СГ), которые **напрямую** соединяются с гидро-, паро- и газовыми турбинами и относительно редко – двигателями внутреннего сгорания. СГ также служат источниками **автономного электропитания** на транспорте, в передвижных электростанциях.

Дизель-генератор





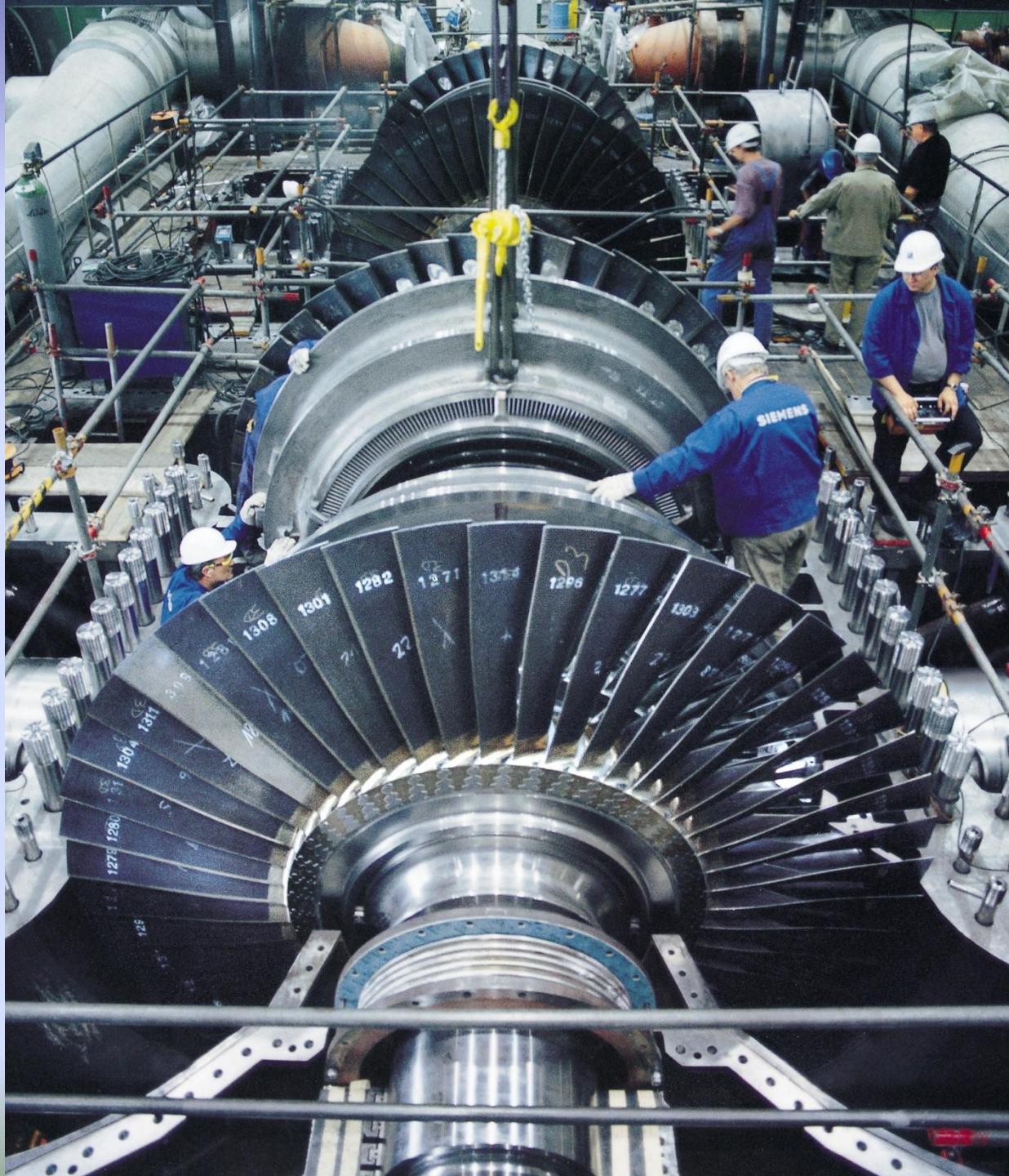
Домодел

Синхронный генератор автомобиля



Синхронный генератор электростанции





Синхронные двигатели (СД)
применяются там, где требуется
постоянная частота вращения.

Мощные синхронные двигатели
применяются на металлургических
заводах, холодильных станциях, на
компрессорных станциях, нефте- и
газоперекачивающих станциях
трубопроводов, для привода
некоторых станков, насосов,
вентиляторов и т. д.

Весьма ценным свойством СД является их способность работать при токе, опережающем по фазе питающее напряжение (***R-C***). Это свойство используется для **увеличения**

коэффициента мощности $\cos\varphi$ сети.

Такие СД называются ***компенсаторами***.

Они устанавливаются на крупных промышленных предприятиях и на трансформаторных подстанциях.

Синхронный привод компрессора



Синхронный компенсатор



ViaChester photo (c) 2010

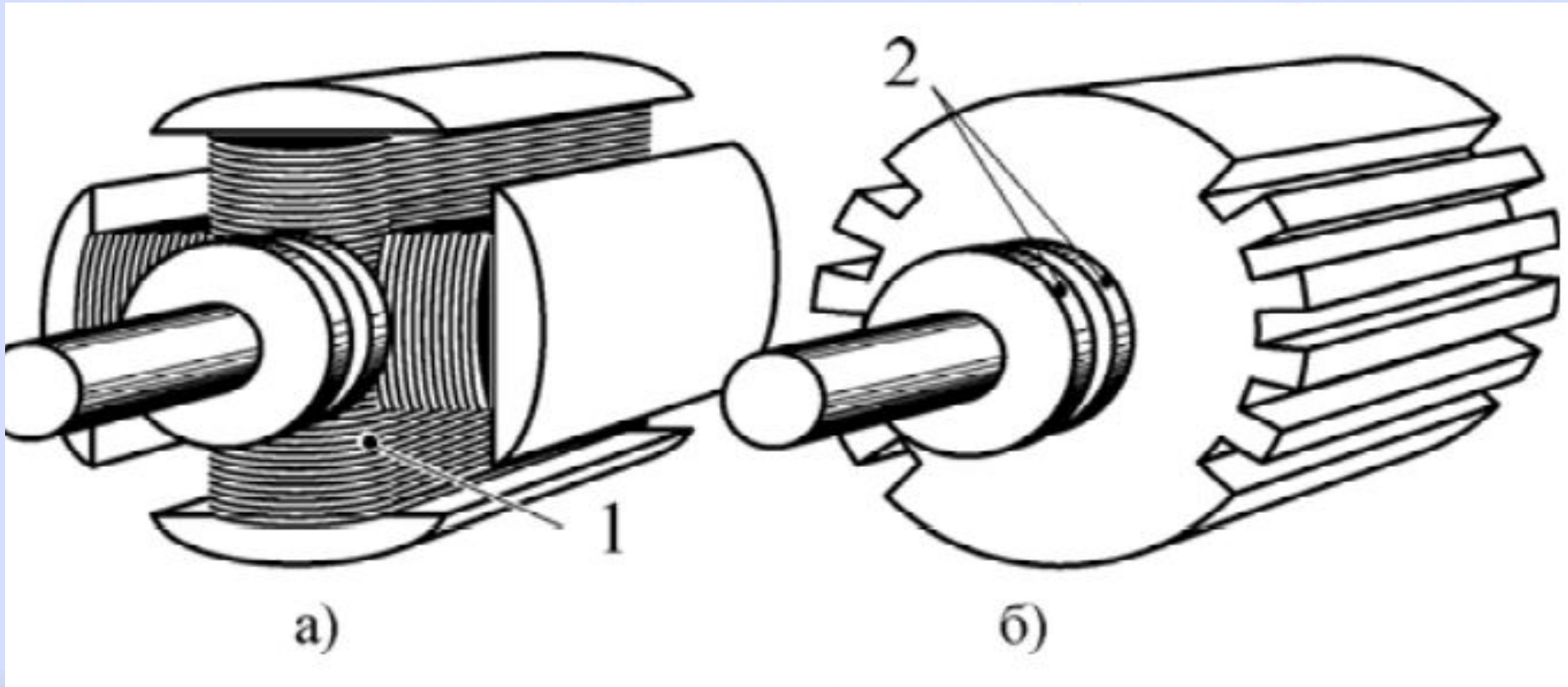
Синхронный компенсатор подстанции



КЛАССИФИКАЦИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

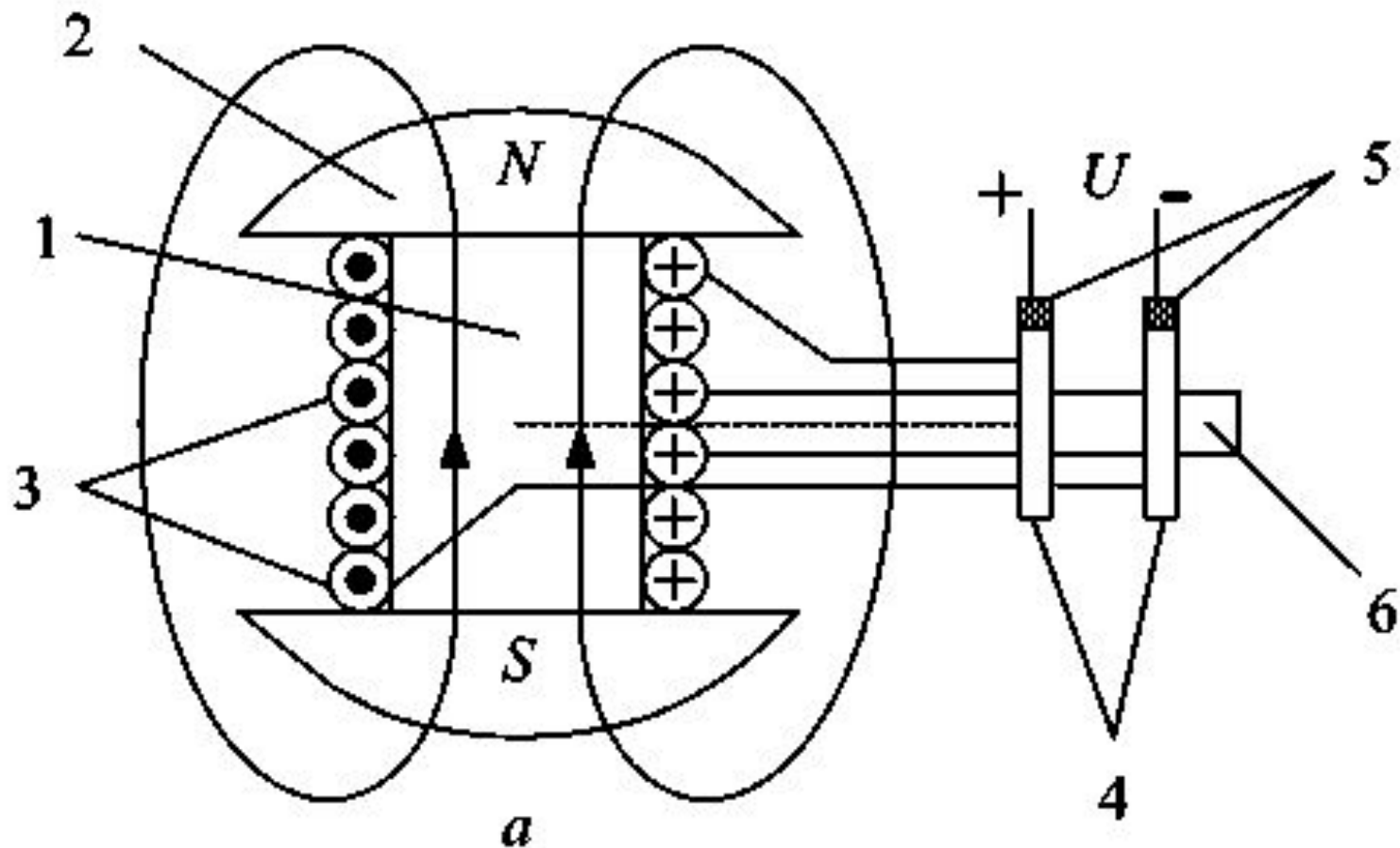
- **По назначению** СМ можно разделить на **генераторы, двигатели и специальные СМ.**
- **По способу возбуждения** СМ можно разделить на СМ с **электромагнитным возбуждением и от постоянных магнитов.**

**По конструкции ротора различают
неявнополюсный (а) и
явнополюсный (б) ротор**



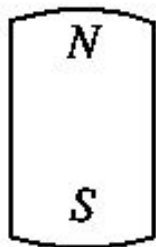
Явнополюсный ротор, имеющий
выступающие полюсы,
применяется для тихоходных машин
с частотами вращения до **1000**
об/мин.

Для **быстроходных** мощных машин
со скоростями **1500 – 3000** об/мин
применяют **неявнополюсный ротор**,
имеющий вид цилиндра без
выступающих полюсов.

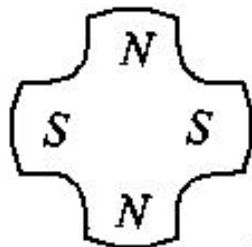


Явнополюсный ротор с электромагнитным возбуждением состоит из сердечника 1, полюсных наконечников 2, обмотки возбуждения 3, контактных колец 4, медно-графитовых щеток 5, вала 6.

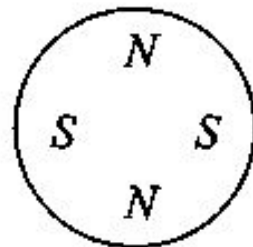
Роторы-магниты, применяемые в СМ малой мощности, чаще всего в микромашинах (до 500 Вт)



v
 $p=1$
Явнополюсный



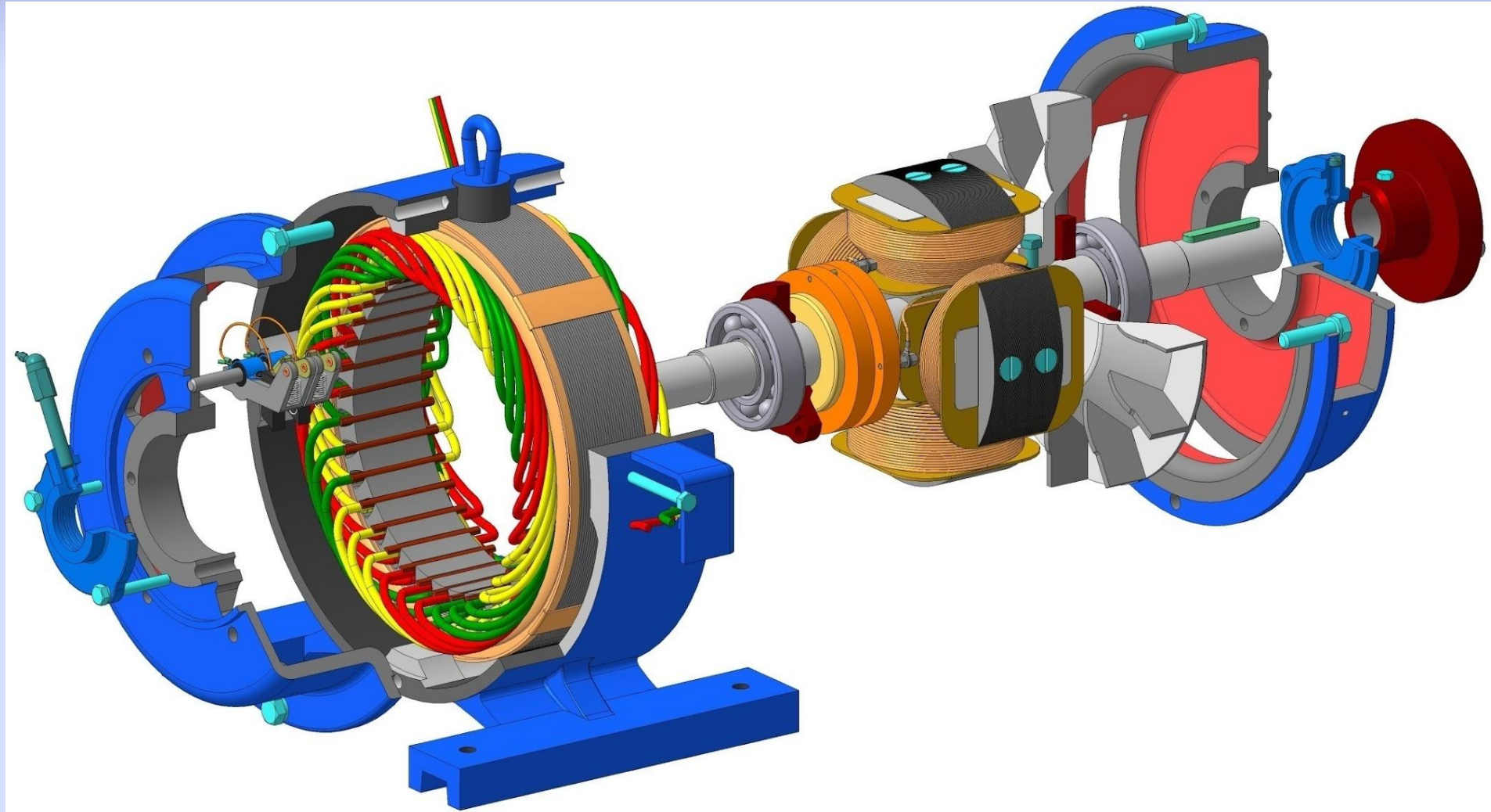
z
 $p=2$
Явнополюсный

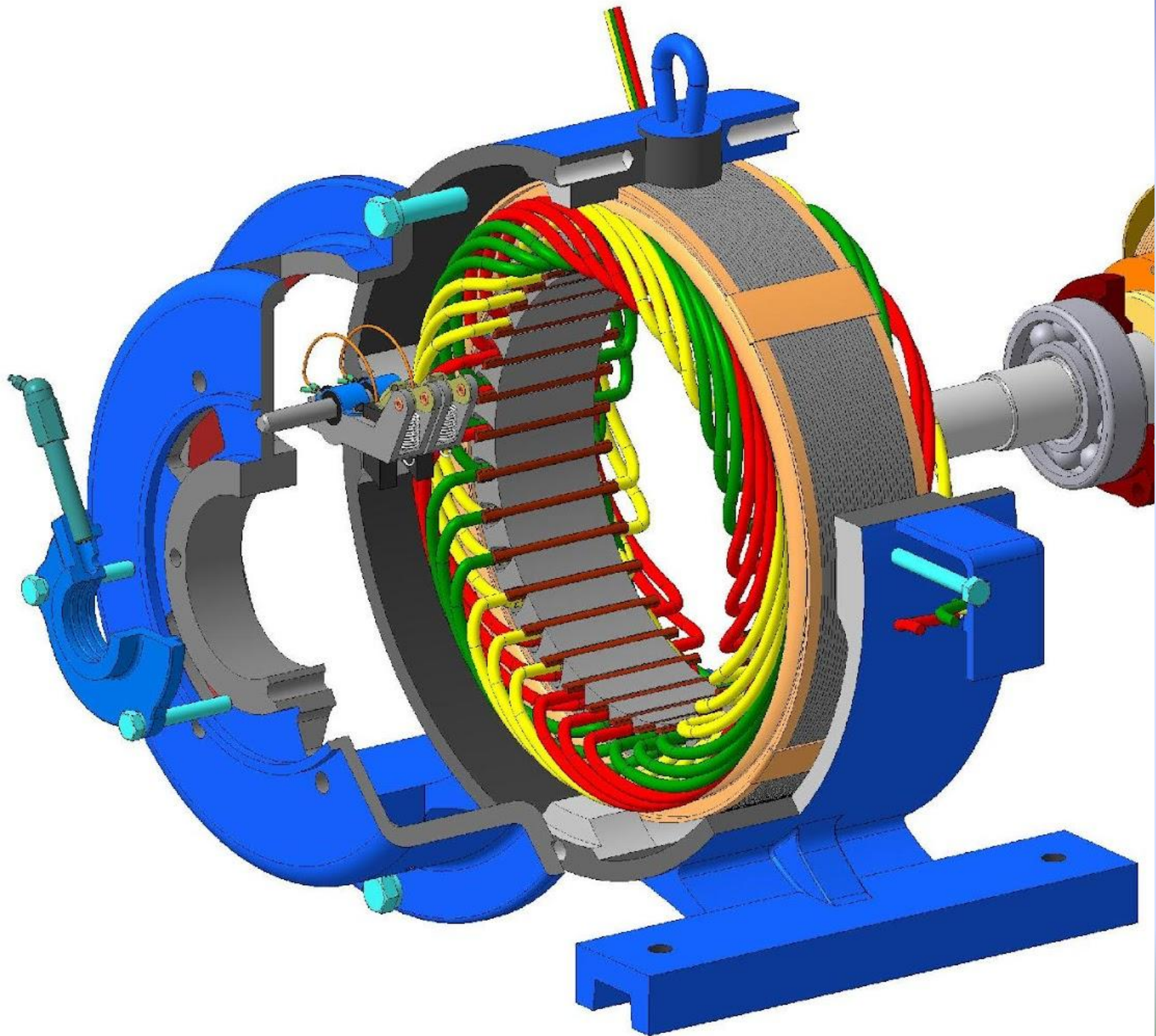


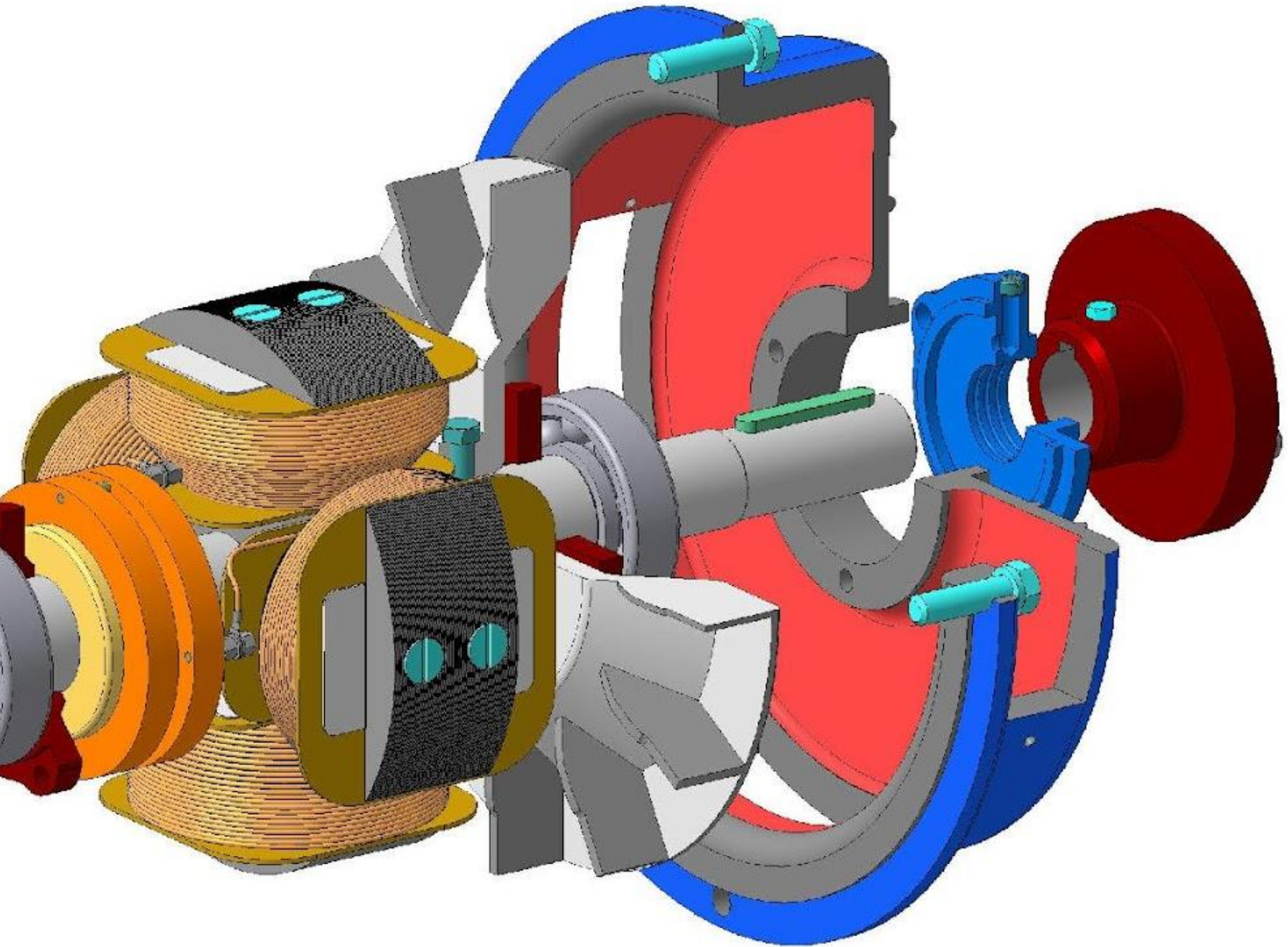
∂
 $p=2$
Неявнополюсный



Конструкция синхронных машин







Устройство **статора** СМ такое же как у статора асинхронной машины; существенные отличия имеются только в СМ большой мощности. **Ротор** представляет собой электромагнит, обмотка которого питается **ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ** через два контактных кольца на валу ротора.

Постоянный ток для питания обмотки ротора получают обычно от промышленной сети переменного тока при помощи управляемых тиристорных выпрямителей, но чаще с помощью **возбудителя**. Обмотка ротора таких машин питается от выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель, в свою очередь, получает питание от возбудителя, имеющего вращающуюся вместе с ротором трехфазную обмотку, **возбуждаемую неподвижным постоянным магнитом**.

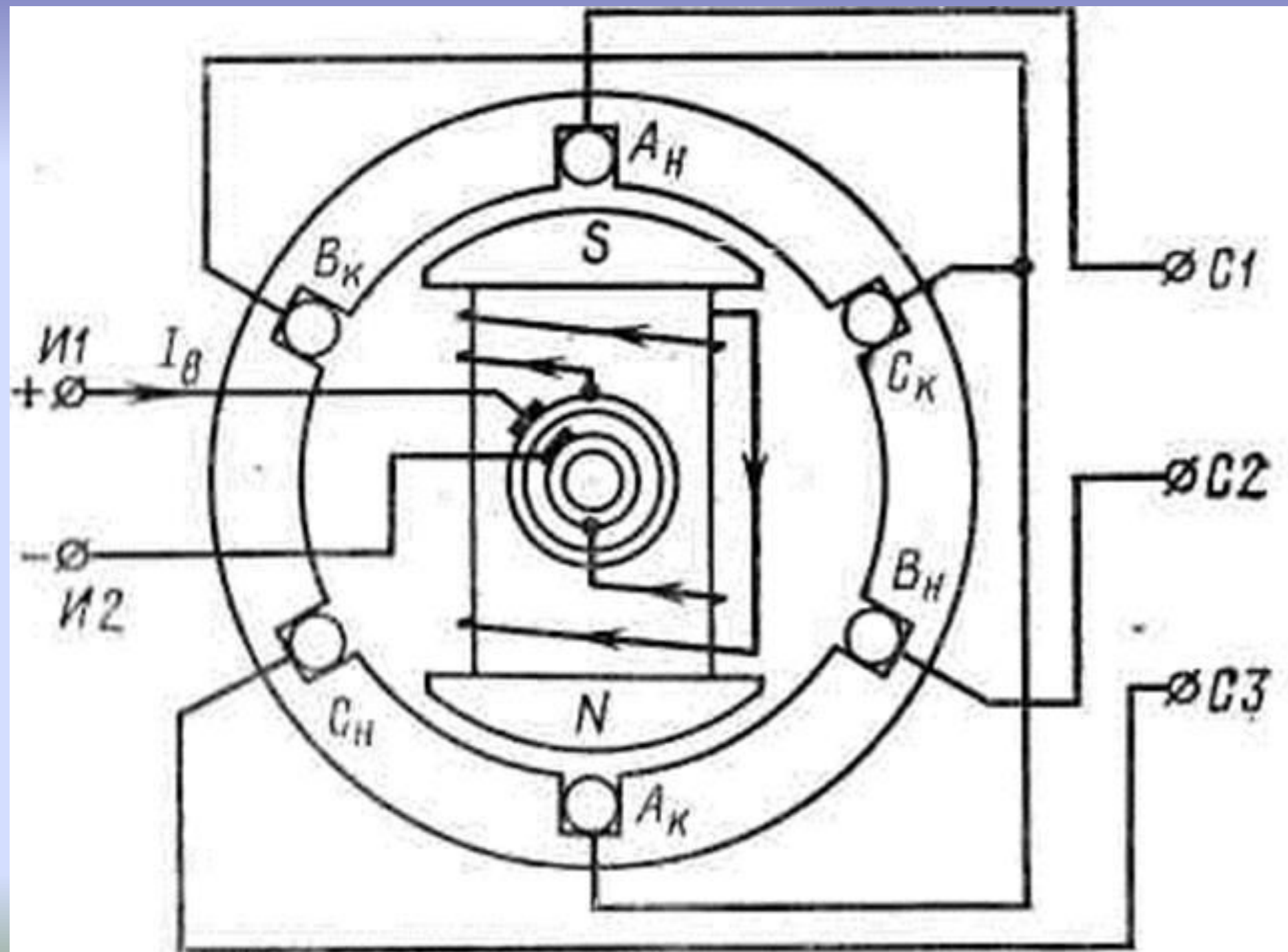
Синхронный генератор

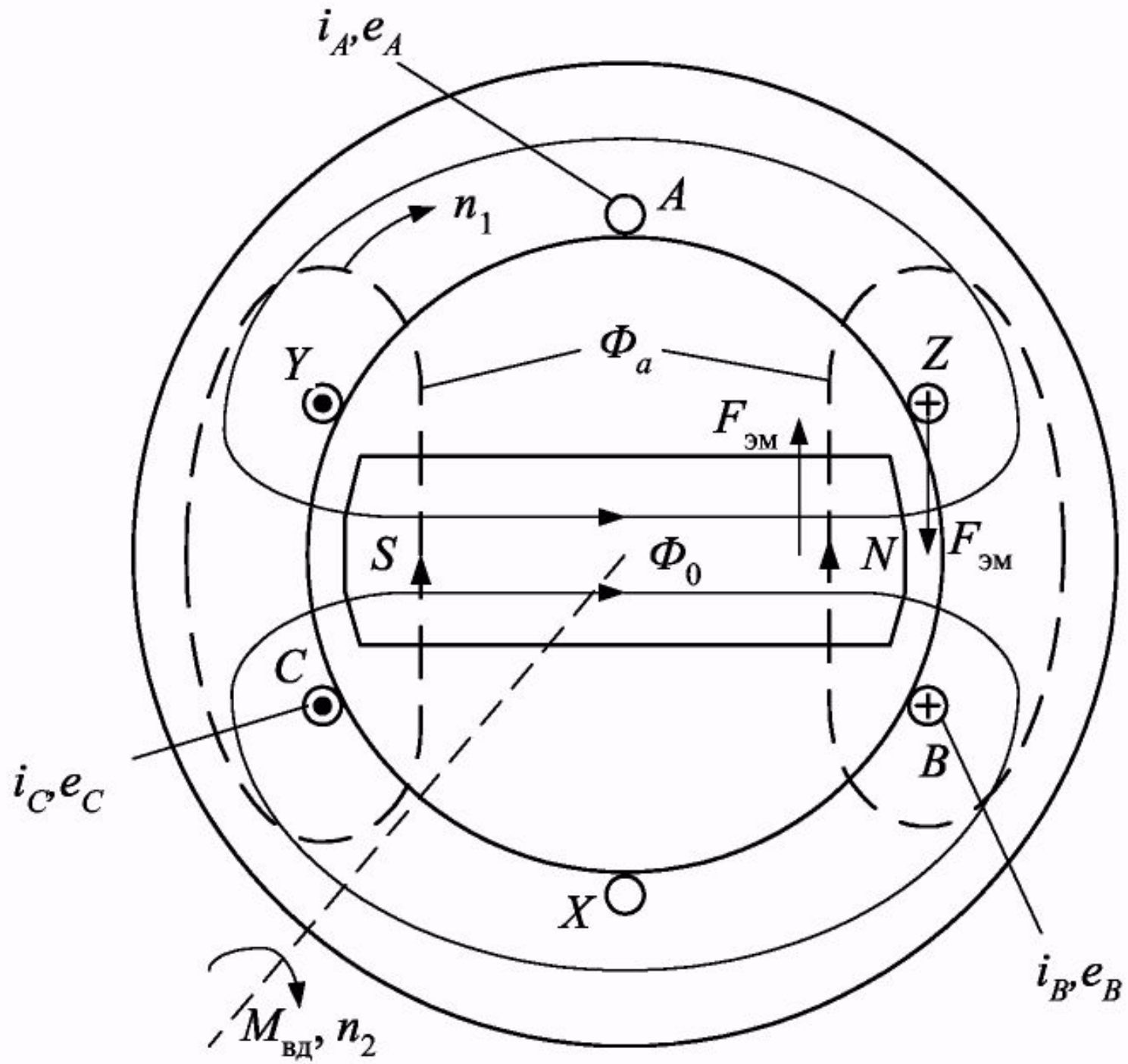
Синхронный генератор, как и любой другой генератор, преобразует механическую энергию в электрическую. Для этого ротор СГ должен приводиться во вращение вспомогательным двигателем. На гидроэлектростанции это водяная турбина, на ТЭЦ – это паровая турбина, в автономных установках – это двигатель внутреннего сгорания

**Одновременно и в
строгой математической
зависимости с
изменением частоты
вращения изменяется
частота тока.**

$$n = \frac{60f}{p}$$

**Синхронные генераторы
трехфазного тока изготавливают
на следующие номинальные
напряжения: 230, 400, 690,
3150, 6300, 10500, 21000 В.**





Принцип действия генератора:

При вращении ротора приводным двигателем с моментом $M_{\text{вд}}$ и частотой вращения n , вместе с ним вращается и основной магнитный поток Φ_0 , который идет по пути наименьшего магнитного сопротивления, замыкаясь по стали.

Пересекая проводники каждой фазы статорной обмотки, магнитный поток индуцирует в них ЭДС.

Действующее значение синусоидальной ЭДС E_0 при холостом ходе в фазе статора.

$$E_0 = \Phi_m 44 k w f$$

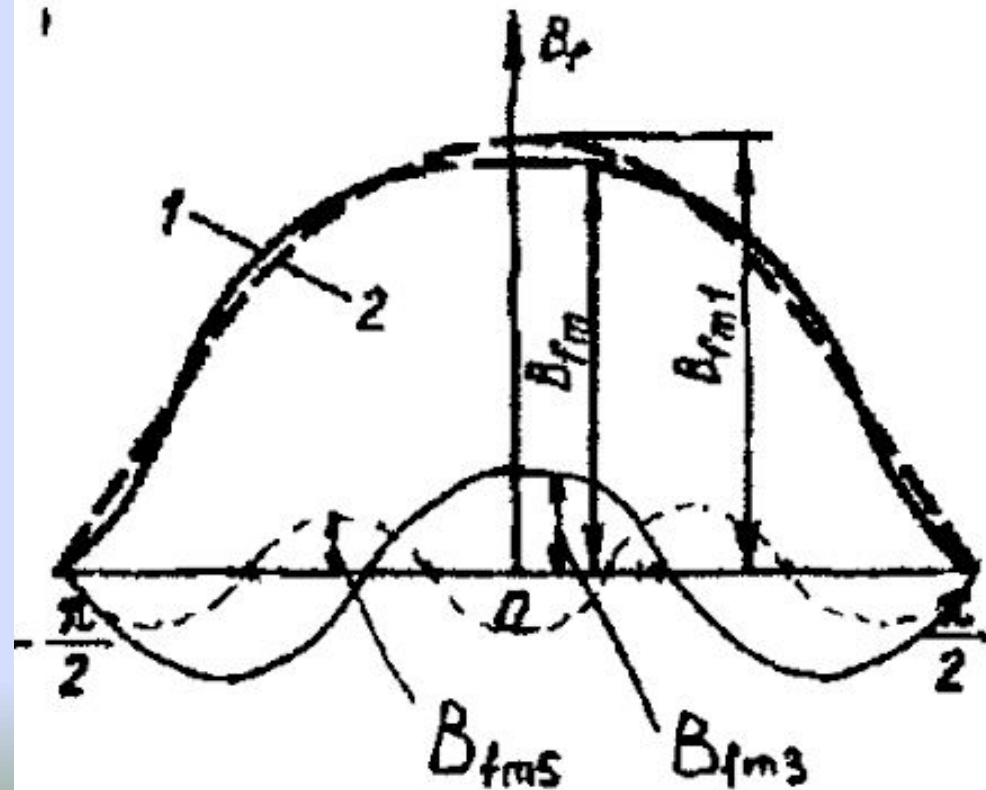
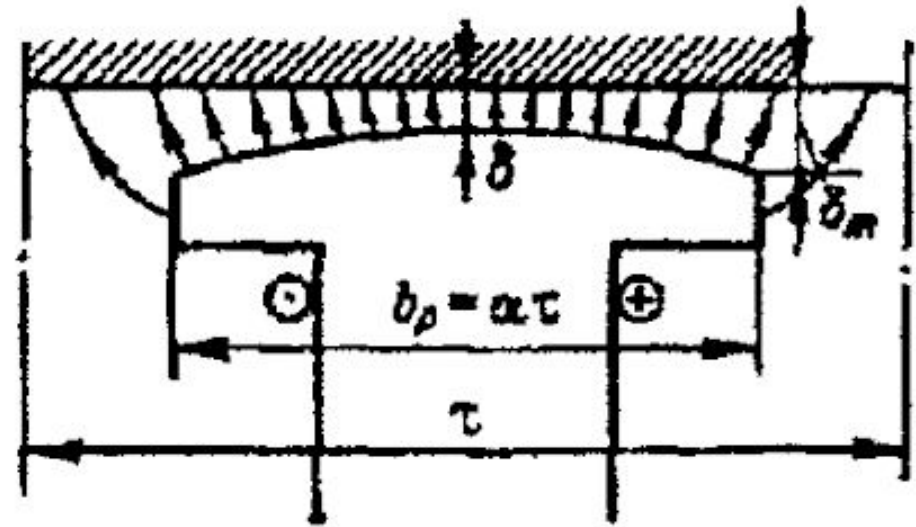
где k – обмоточный коэффициент;
 w – число витков фазы статора;
 Φ_m – максимальный магнитный
поток полюса ротора при токе
возбуждения I_B

**Обмотки статора обычно
соединяют звездой, так
как при этом в отличие от
соединения
треугольником в них
отсутствуют высшие
гармонические
составляющие тока,
кратные трем.**

Магнитные поля СМ

F_f

Магнитное поле
ротора
в воздушном
зазоре



При вращении ротора частота f ЭДС, индуцируемая в статоре, определяется выражением:

$$f = p n_2 / 60$$

Магнитный поток статора вращается в ту же сторону и с той же частотой, что и ротор. Следовательно, вращающееся поле статора неподвижно относительно ротора.

ЭДС трех обмоток статора:

$$e_A = E_m \sin \omega t ;$$

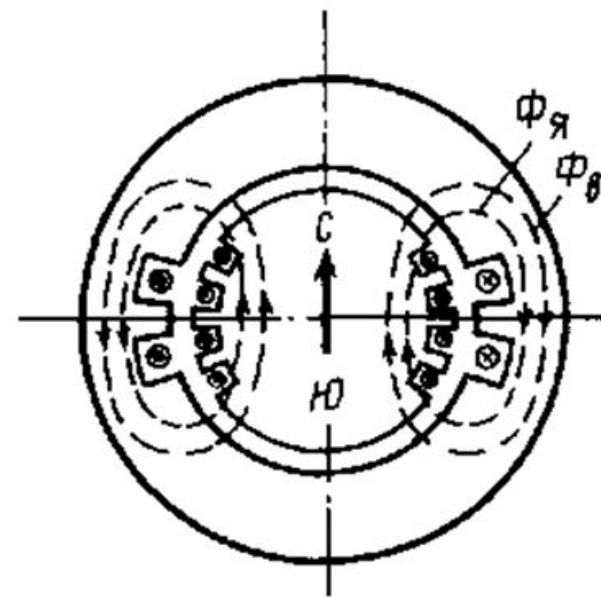
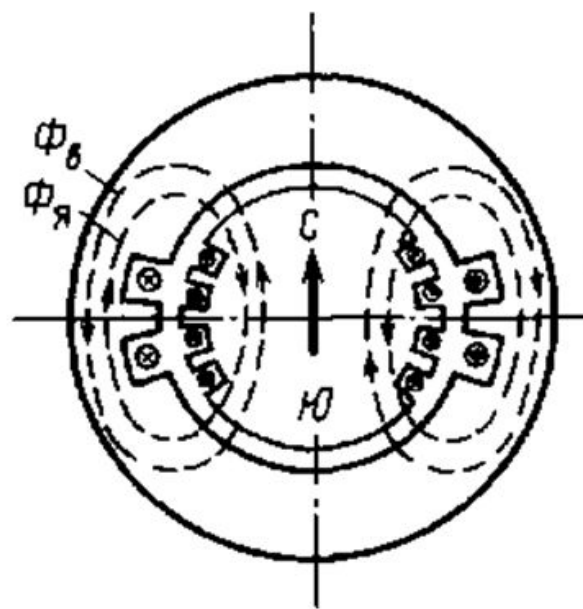
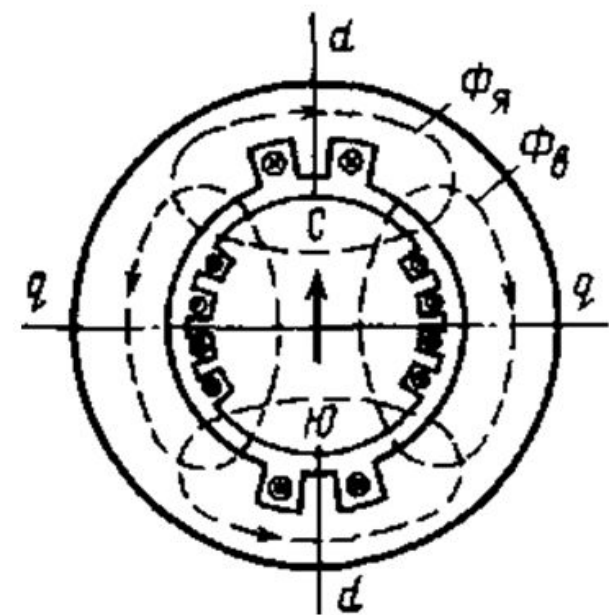
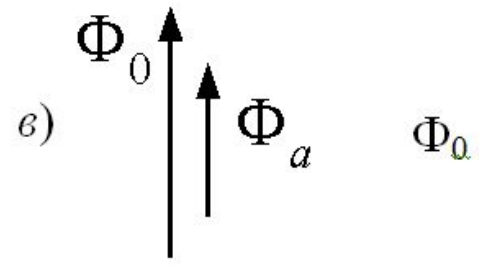
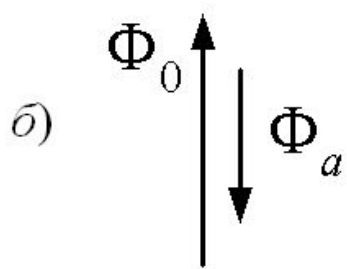
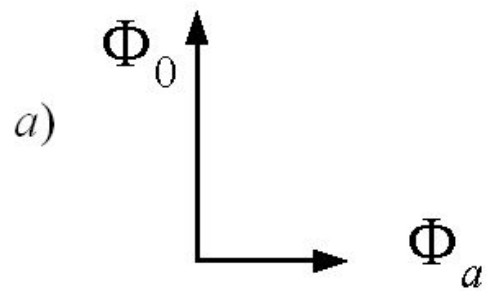
$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) ;$$

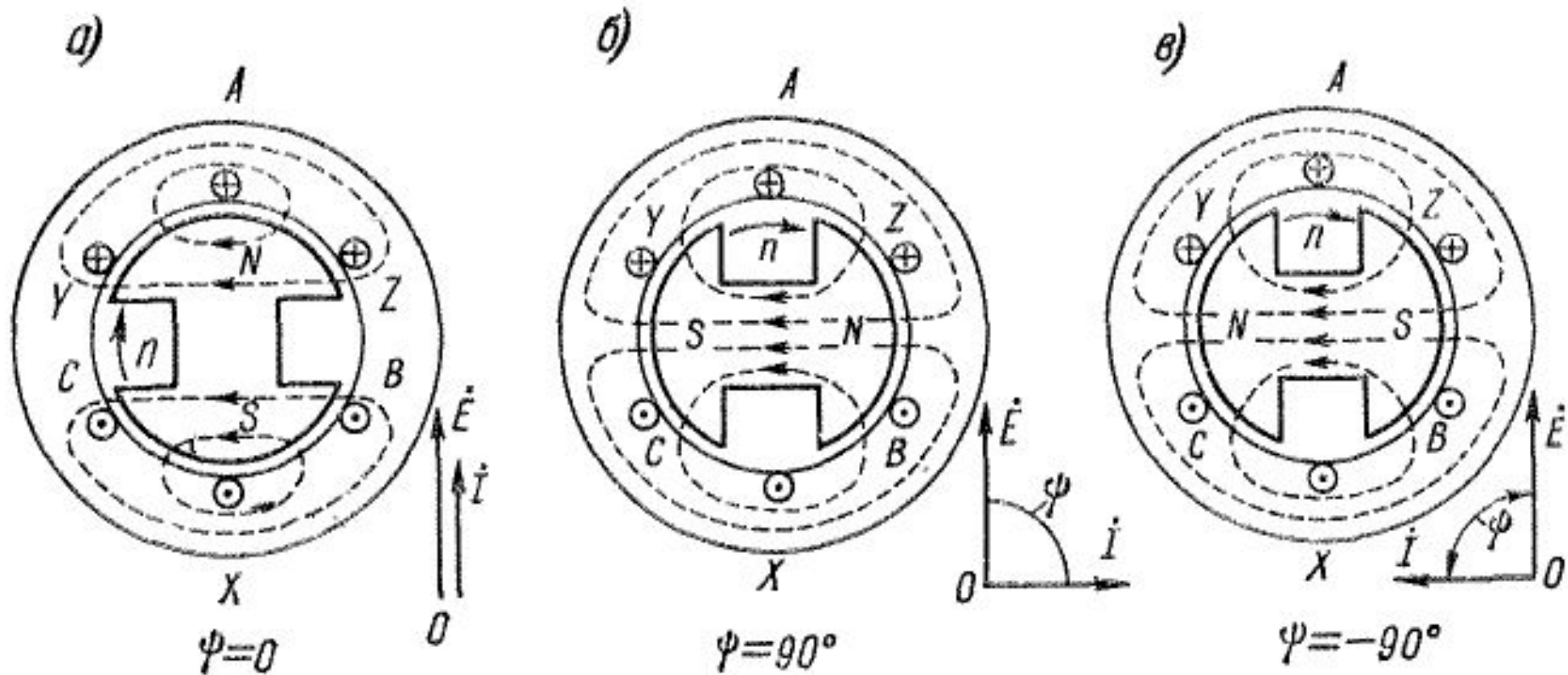
$$e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ) .$$

Присоединим к статорной обмотке трехфазную нагрузку. По фазам генератора и нагрузки потечет переменный ток.

Сдвиг тока относительно ЭДС определяется характером нагрузки.

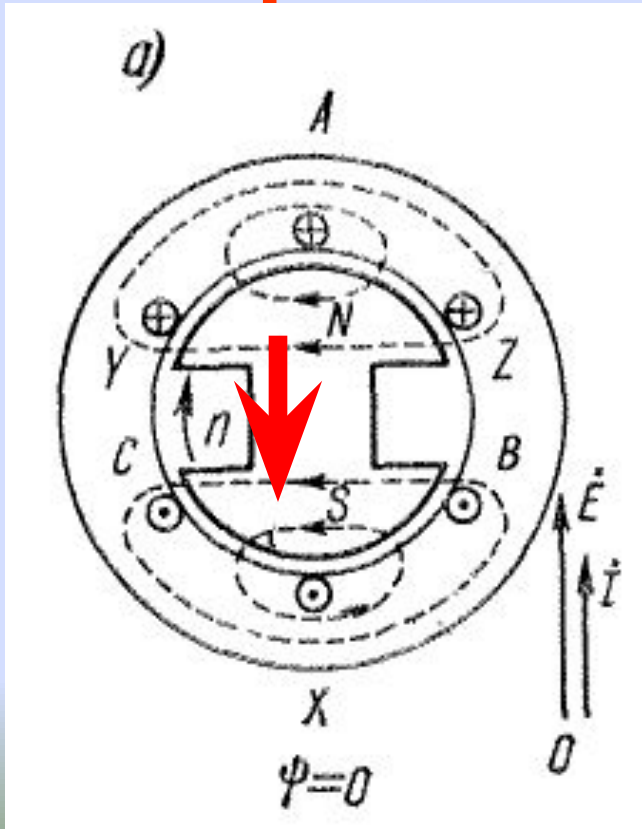
При активной нагрузке ток в фазе совпадает с ЭДС, при активно-индуктивной – отстает от ЭДС, при активно-емкостной – опережает ЭДС.



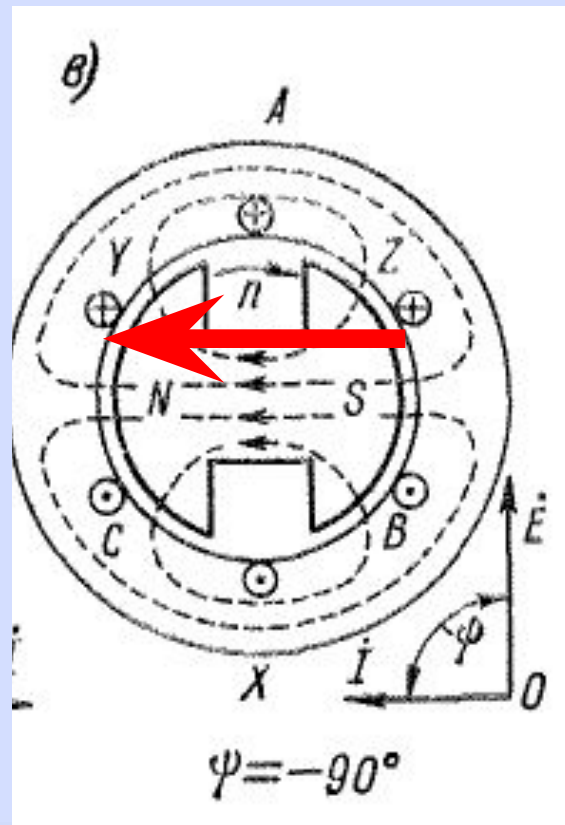


**Поперечная (а), продольная
размагничивающая (б) и продольная
намагничивающая (в) реакция якоря**

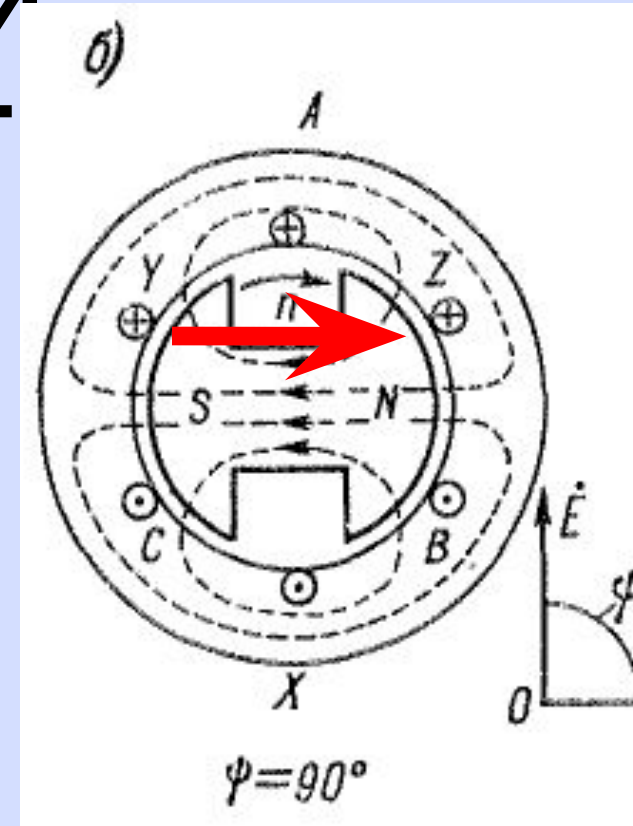
При чисто активной нагрузке реакция якоря поперечная, **потому что магнитные линии потока Φ_a в роторе перпендикулярны (идут поперек) магнитным линиям потока ротора**



При чисто емкостной нагрузке
реакция якоря продольная,
подмагничивающая.



При чисто индуктивной нагрузке ток I_a отстает от ЭДС на 90° , и реакция якоря будет продольной, **размагничивающей**.

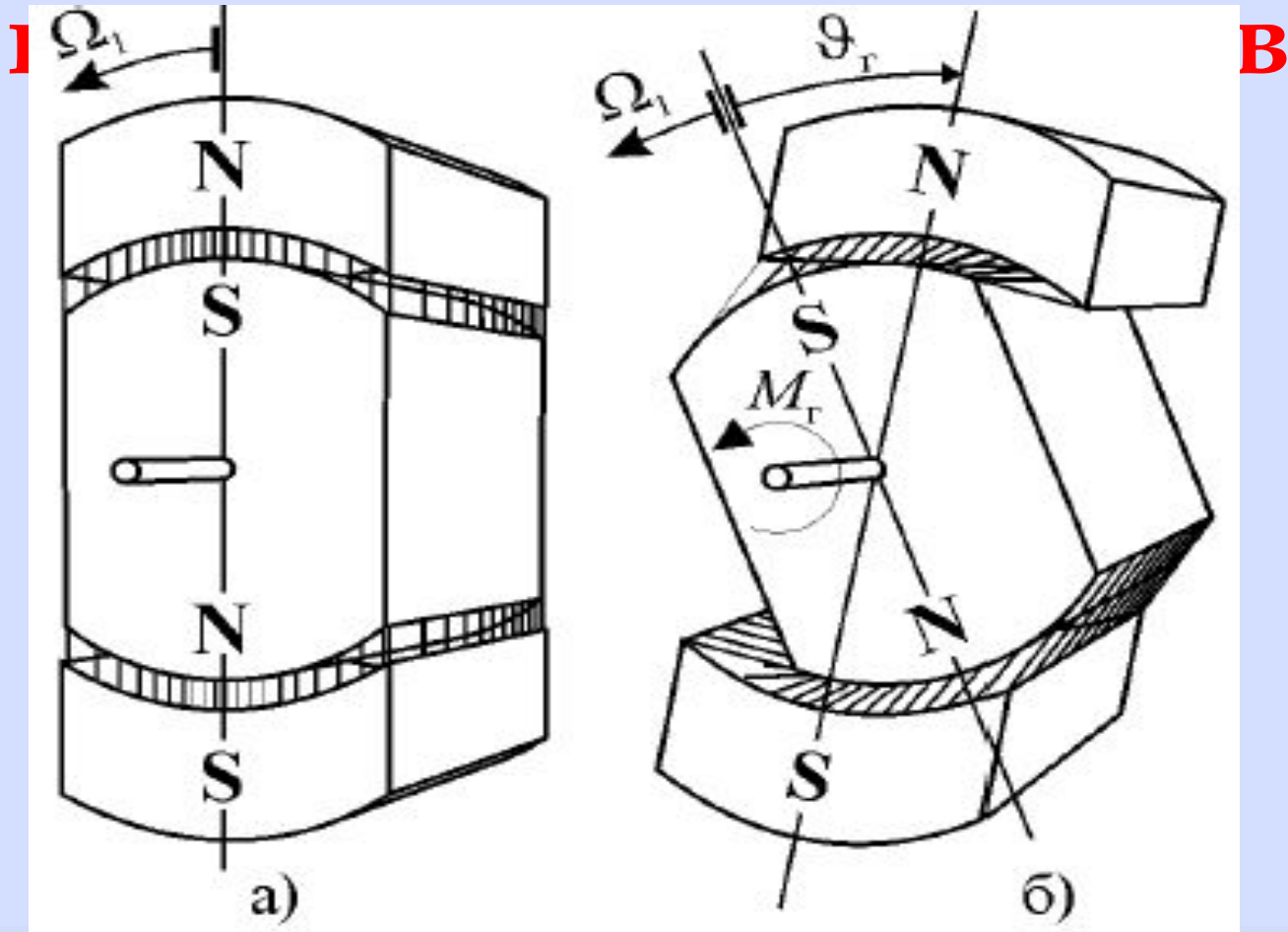


Реакция якоря СГ

При протекании тока нагрузки по обмотке якоря создается вращающийся **магнитный поток якоря Φ_a** . Поток якоря Φ_a и поток возбуждения Φ_0 вращаются с одинаковой частотой и создают, **результатирующий поток $\Phi_{рез} = \Phi_a + \Phi_0$** .

В результате ЭДС машины ($E = c_E \Phi_{рез} n$), т. е. будет отличаться от ЭДС E_0 при холостом ходе.

**угол θ - пространственный угол
сдвига между осью
результатирующего магнитного**



холостой ход

нагрузка

**При увеличении нагрузки
растет электромагнитная
сила и угол
пространственного
смещения θ , но до
некоторого предела,
ограниченного мощностью
приводного двигателя.**

**Синхронные генераторы
предназначены для работы на сеть с
коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,8$.**

**Более низкое значение
коэффициента мощности в сети
увеличивает реактивную
составляющую тока нагрузки, что
приводит к **снижению напряжения на
зжимах генератора**, поэтому в этом
случае **необходимо увеличить ток
возбуждения в обмотке ротора**.**

Уравнение ЭДС синхронного генератора

Напряжение на выводах СГ **под нагрузкой снижается** из-за:

- реакции якоря,
- магнитного **потока рассеяния**,
- падения напряжения в активном **сопротивлении** обмотки статора.

Перечислим влияние всех МДС:

1. Намагничивающая сила **обмотки возбуждения ротора** F_f создает основной магнитный поток Φ_f , который индуцирует в обмотке статора ЭДС генератора \underline{E}_0 .

2. Ток статора создает ЭДС **реакции якоря** \underline{E}_a , пропорциональную индуктивному сопротивлению.

3. **Магнитный поток рассеяния обмотки статора** индуцирует в обмотке статора ЭДС рассеяния \underline{E}_σ

4. Ток в обмотке статора \underline{I}_1 создает **падение напряжения в активном сопротивлении фазной обмотке статора** (не учитывают, т.к. влияние менее 1%) $\underline{I}_1 r_1$

Геометрическая сумма всех
перечисленных выше величин дает
напряжения на выводах СТ:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a + \underline{E}_\sigma - \underline{I}_1 r_1$$

$$x_c = x_a + x_\sigma$$

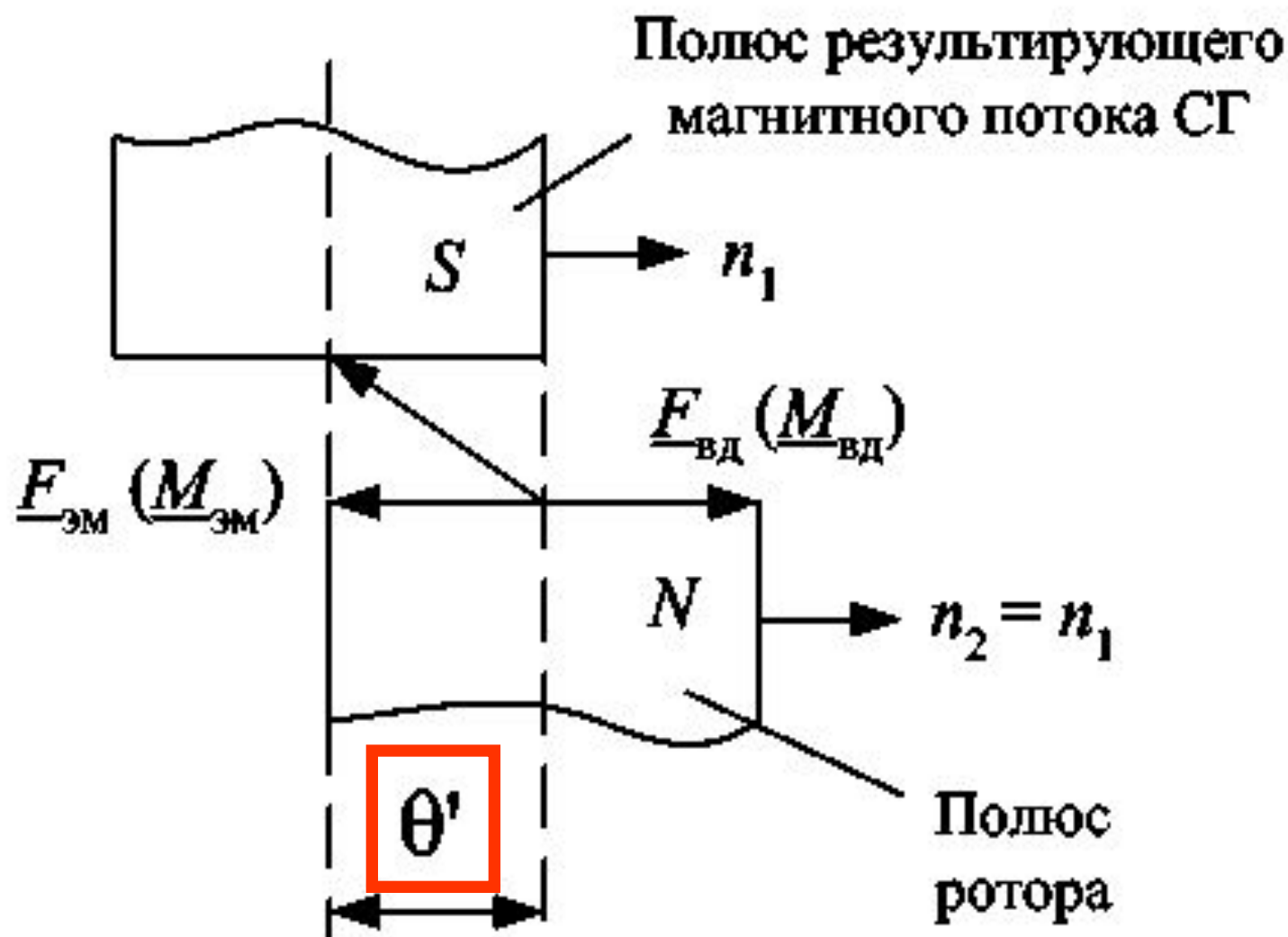
x_c – полное синхронное сопротивление,

x_a – главное индуктивное сопр. СТ

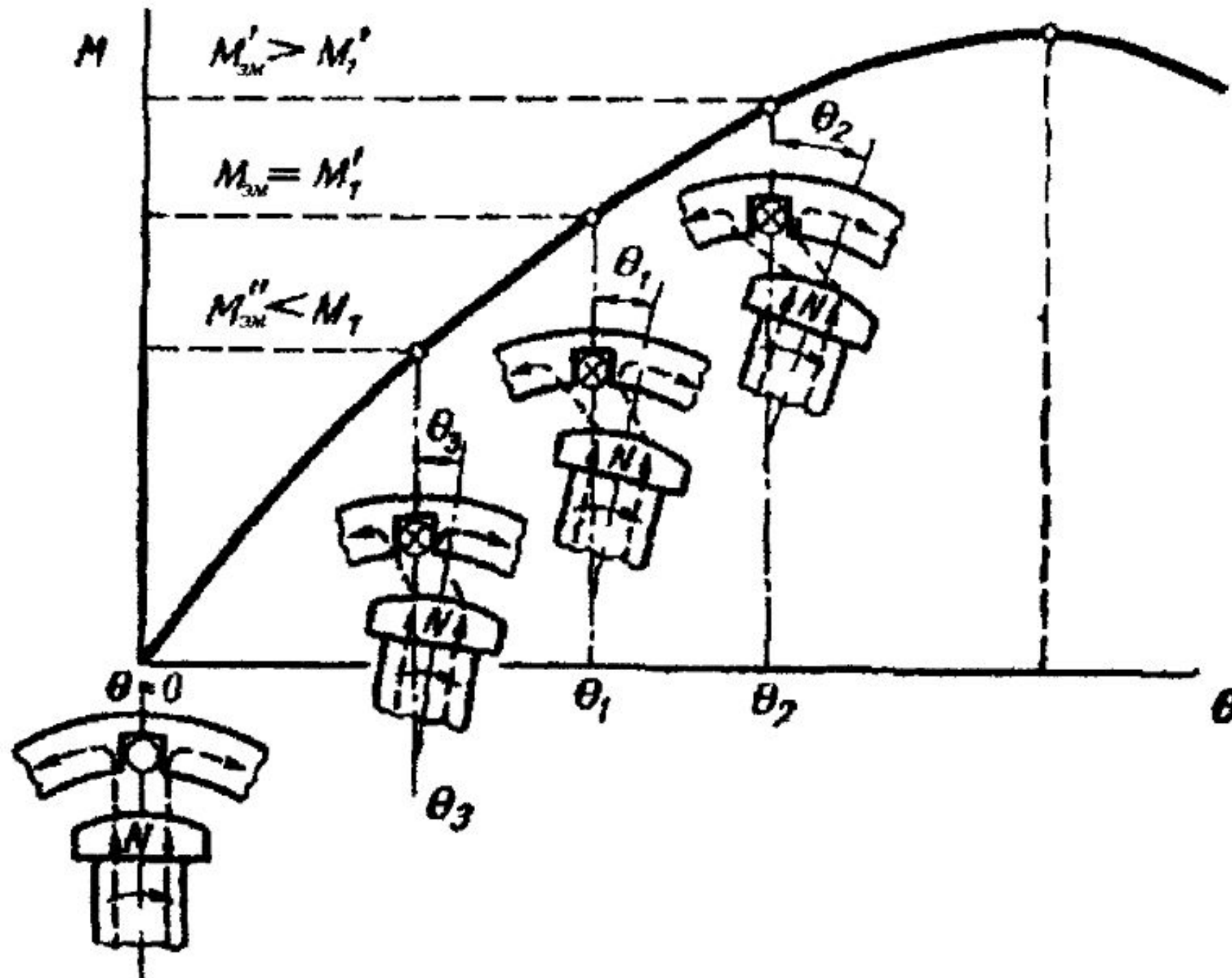
$$x_a = 4m_1 f_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu q} \delta} \frac{w_1^2 k_{об}^2}{p}$$

**При нагрузке генератора
Увеличивается пространственный
угол θ' между осями полюсов
ротора и результирующего
магнитного потока статора.**

*Полюс ротора идет впереди полюса
результирующего магнитного*

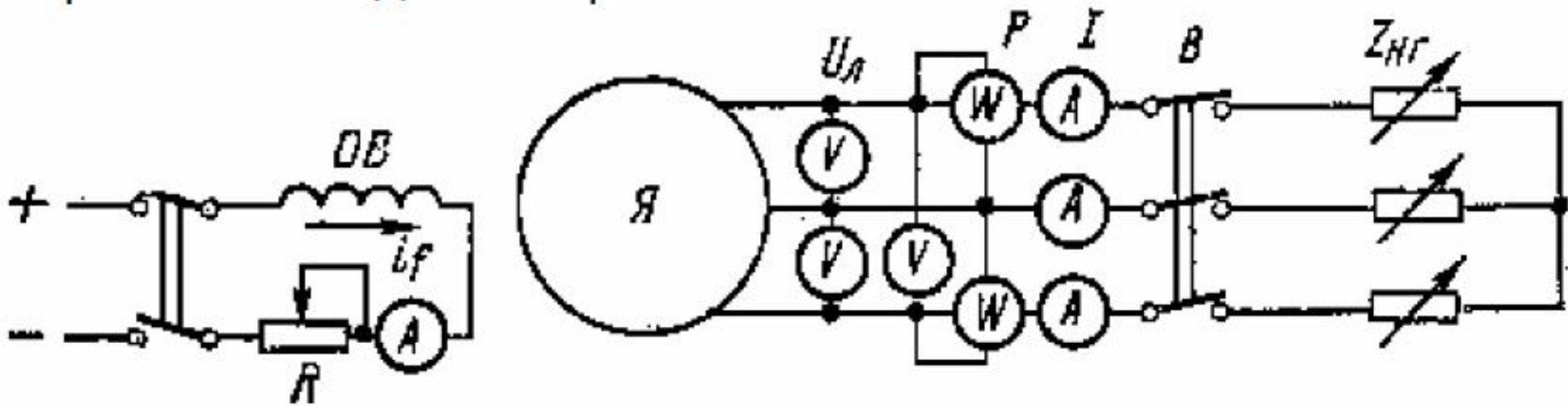


Взаимодействие магнитных полей в СТ



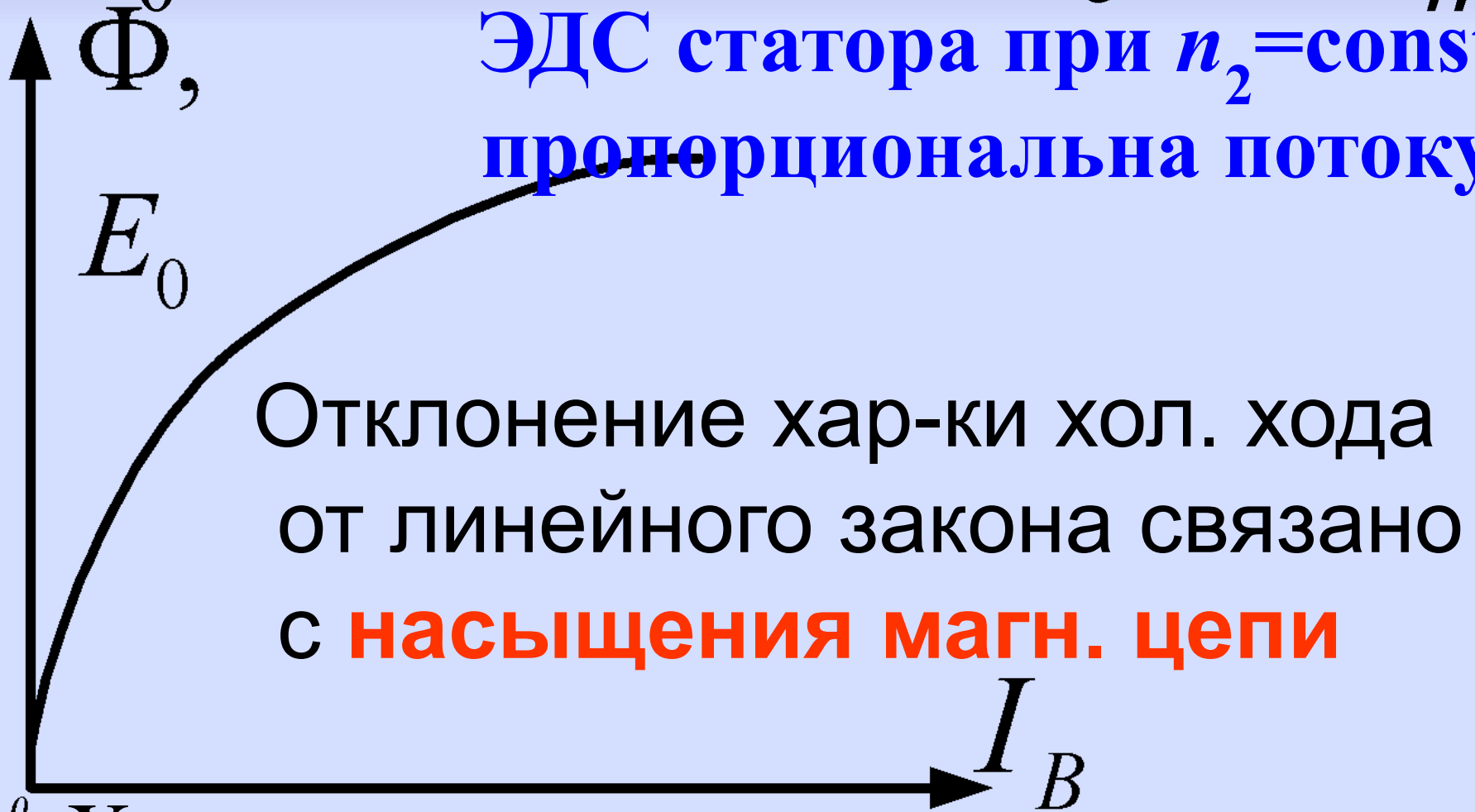
При холостом ходе (без нагрузки) $\theta' = 0$,
при увеличении нагрузки растет
электромагнитная сила $F_{\text{ЭМ}}$, значит
и угол θ' , **но до некоторого предела**,
после которого ротор **выходит из**
синхронизма, поскольку не хватает
мощности (момента) приводного
двигателя

Схема для опытного определения характеристик синхронного генератора



$$E_0 = 4,44 k w f \Phi_m$$

ЭДС статора при $n_2 = \text{const}$
пропорциональна потоку



Отклонение хар-ки хол. хода
от линейного закона связано
с **насыщения магн. цепи**

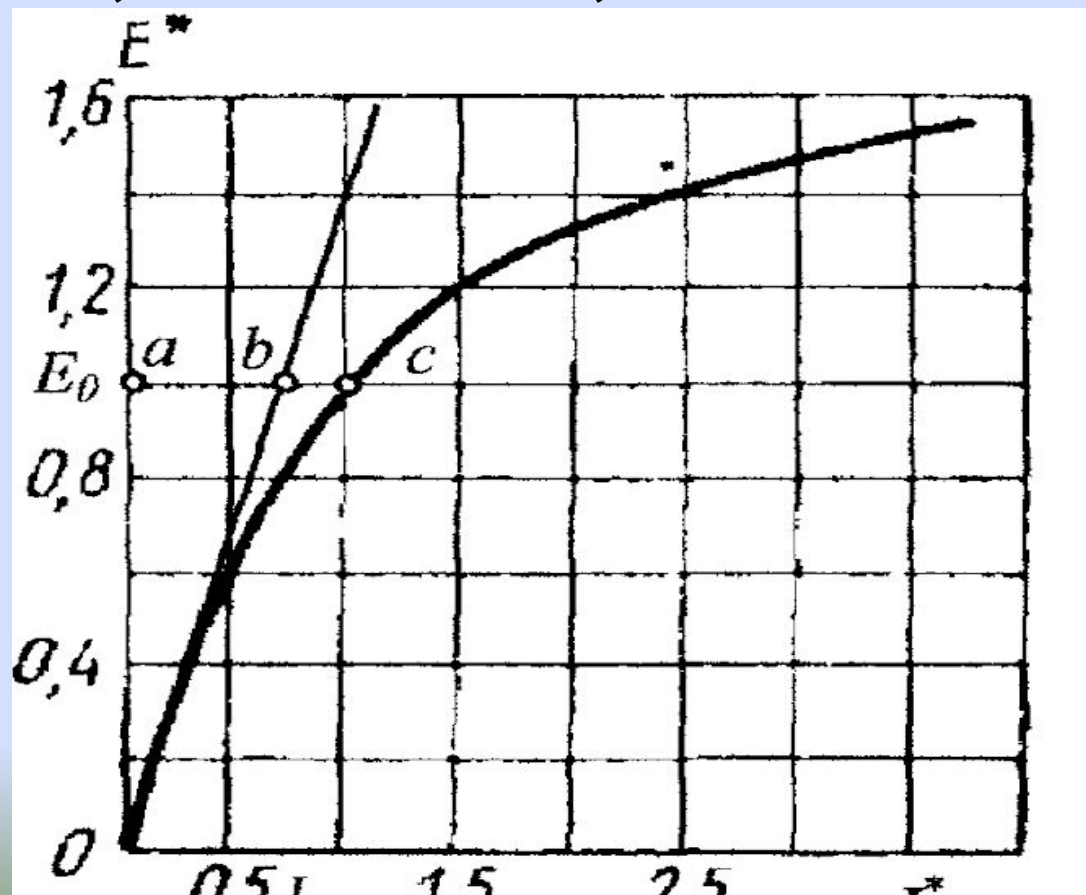
Характеристика холостого хода
синхр. генератора

Единая для всех СГ хар-ка холостого

хода в относительных единицах:

E^* 0,58 1 1,21 1,33 1,44

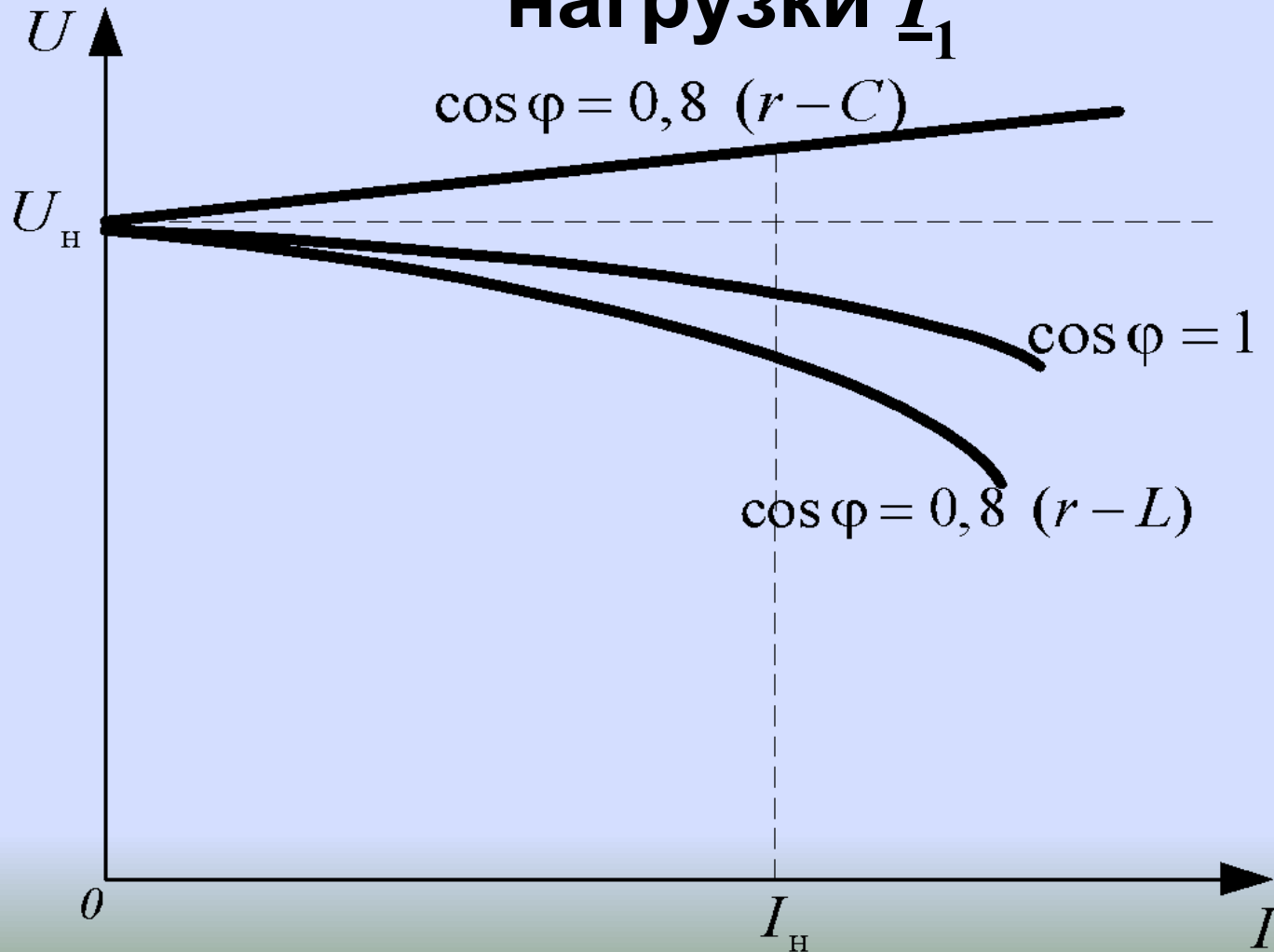
F_f 0,5 1 1,5 2 2,5



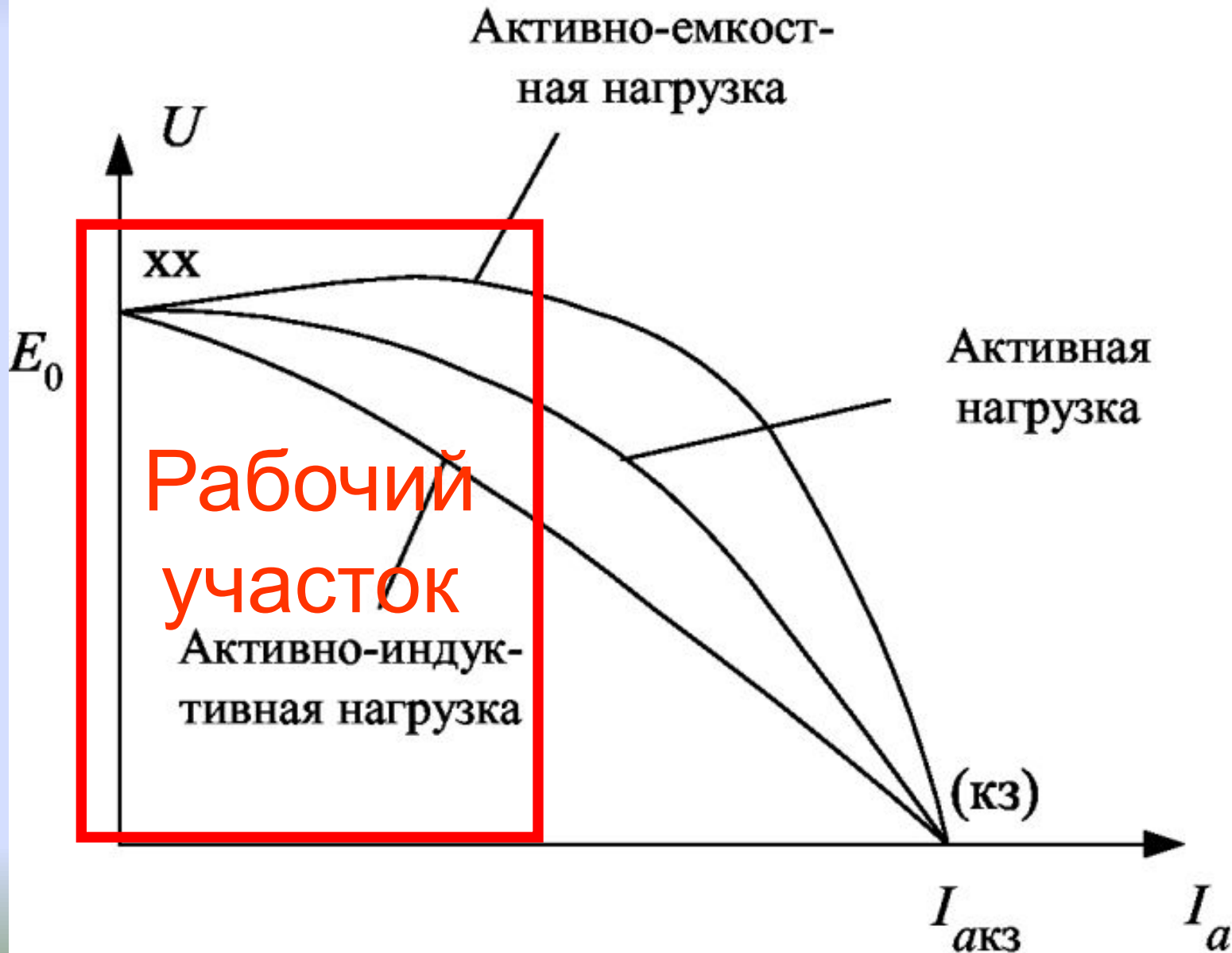
Внешняя характеристика СГ -

зависимость напряжения \underline{U}_1 на выводах статорной обмотки от величины тока

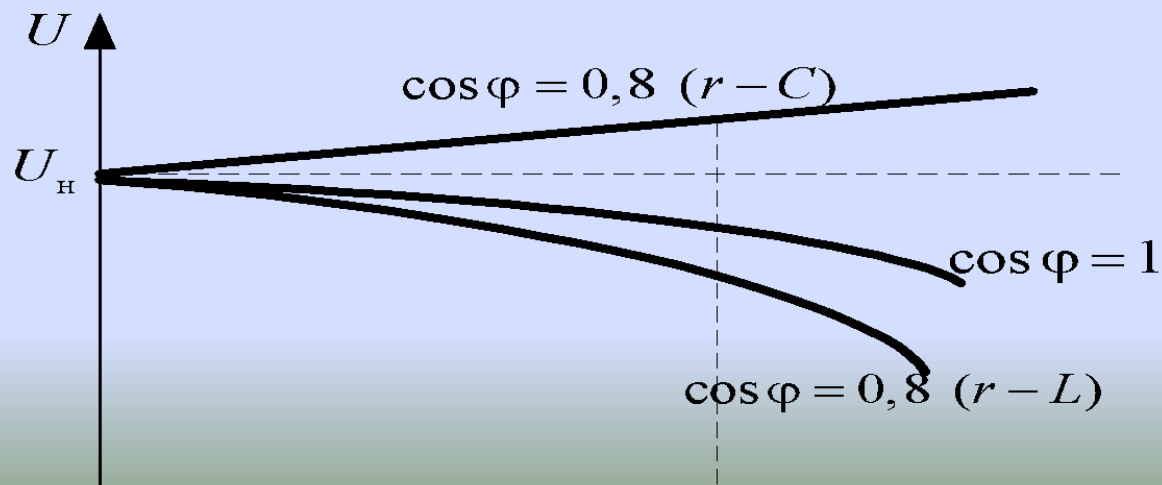
нагрузки \underline{I}_1



Вся внешняя характеристика



При увеличении тока нагрузки:
для **индуктивной** нагрузке U_1
падает из-за размагничивающего
действия магнитного поля тока
статора;
для **емкостной** – увеличивается
из-за подмагничивающего.



Синхронные генераторы обычно
рассчитываются для работы с

номинальной $R-L$ -нагрузкой

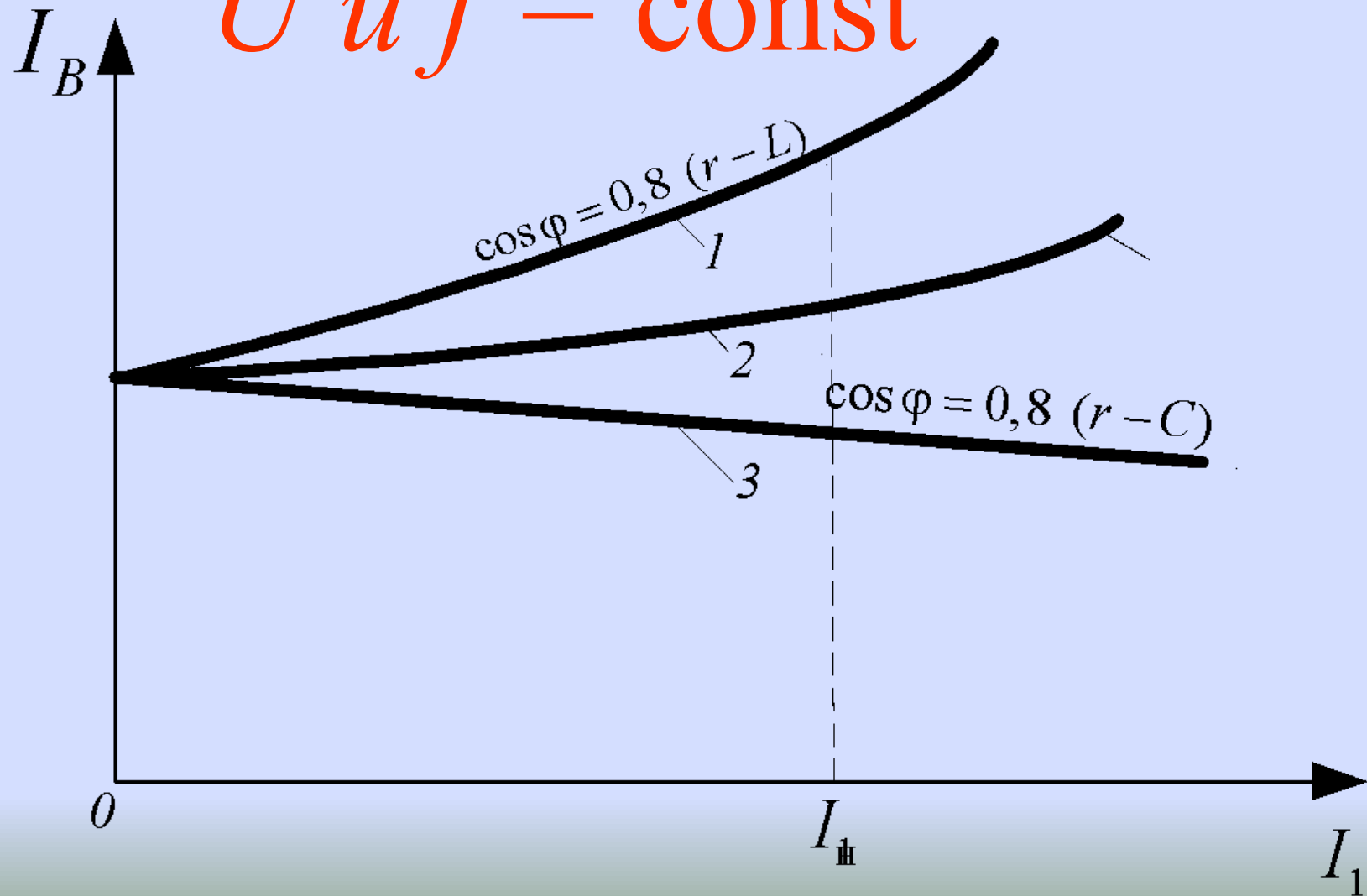
при $\cos\varphi = 0,8$.

Обычно

$$\Delta U_{\text{H}\%} = \frac{\Delta U_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} 100 \approx 25 \div 35\%.$$

Регулировочная характеристика

$$U \text{ и } f = \text{const}$$



Регулировочная характеристика
определяет зависимость $I_B = f(I_1)$ и
показывает, как нужно
регулировать ток возбуждения
синхронного генератора, чтобы при
изменении нагрузки его
напряжение оставалось неизменным
Вид регулировочных характеристик
также объясняется характером
действия реакции якоря

Электрическая мощность СГ

$$P = 3 I U \cos \varphi,$$

Механическая мощность

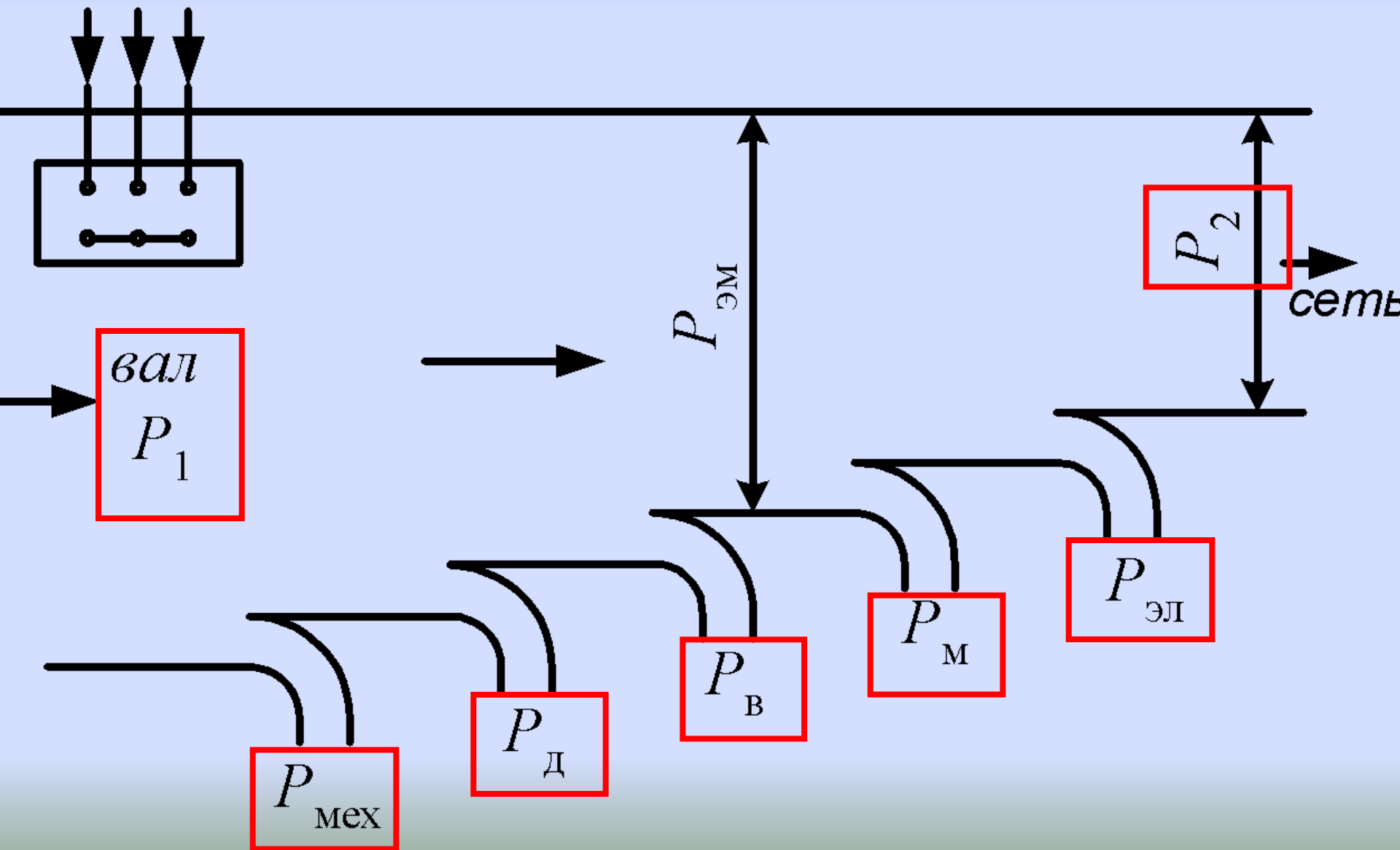
генератору первичным двигателем

$$P_{\text{мех}} = \omega_p M,$$

Выражение для момента

$$M = \frac{3UI \cos \varphi}{\omega_p}.$$

Энергетическая диаграмма СГ



Для генератора:

**P_1 – потребляемая с вала
механическая мощность;**

**P_2 – отдаваемая в сеть
электрическая мощность;**

**$P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность
передается магнитным полем с
ротора на статор.**

Механические потери $P_{\text{мех}}$ – трение: в подшипниках; о воздух; щеток о кольца

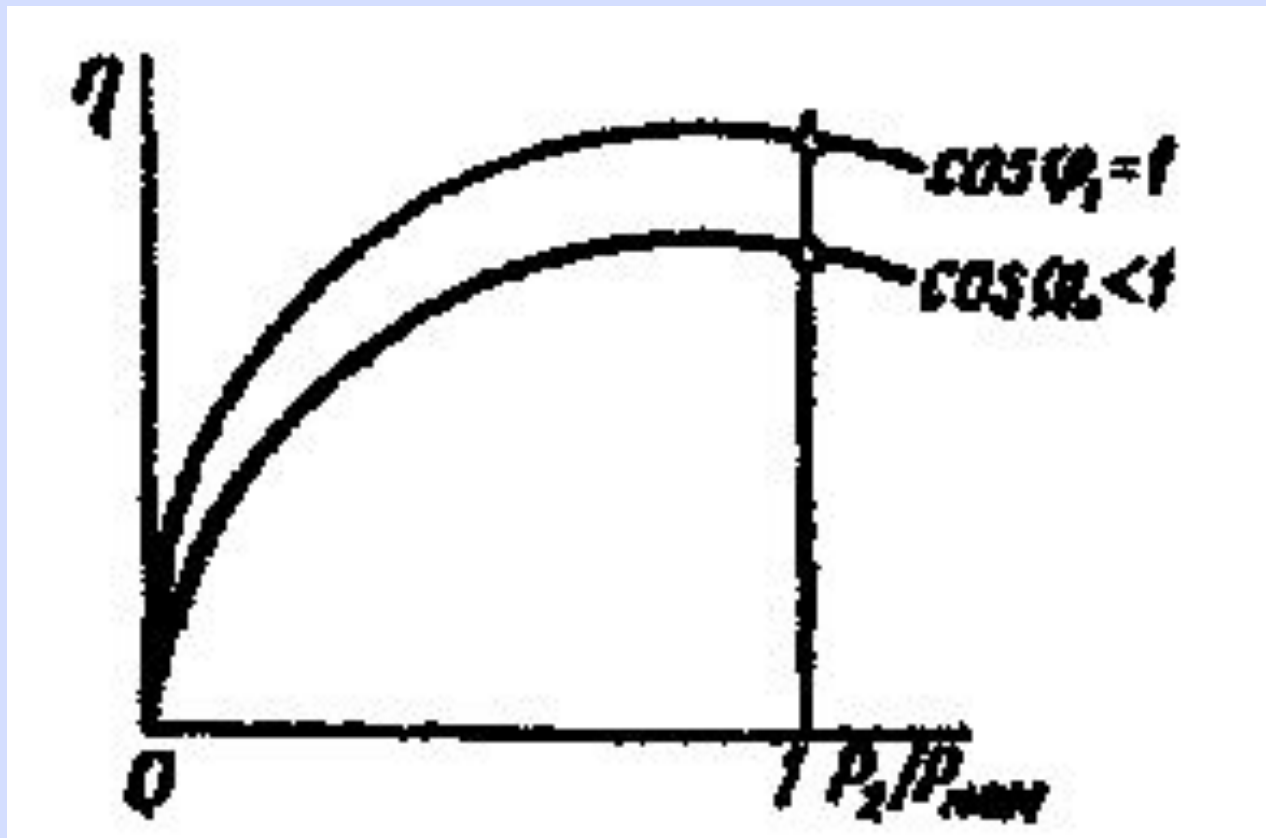
Магнитные потери в сердечнике статора $P_{\text{м}}$ слагаются из потерь гистерезиса и вихревых ТОКОВ.

Электрические потери $P_{\text{эл}}$ – нагрев обмотки статора.

Потери на возбуждение $P_{\text{в}}$ – нагрев обмотки ротора и в возбuditеле.

Добавочные потери $P_{\text{д}}$ – из-за пульсации поля, вследствие зубчатости статора и ротора, и поля рассеяния.

Механические + магнитные + потери в стали статора + потери на возбуждение = потери холостого хода



Зависимость $\eta = f(P_2)$ синх. машины

КПД зависит

как от величины нагрузки (I_1),

так и от ее характера ($\cos\varphi$):

с уменьшением $\cos\varphi$

КПД машины уменьшается

У СМ средней мощности

(до 500кВ А) $\eta = 85-95\%$;

большой мощности

(> 500кВ А) – $\eta = 96-99\%$.