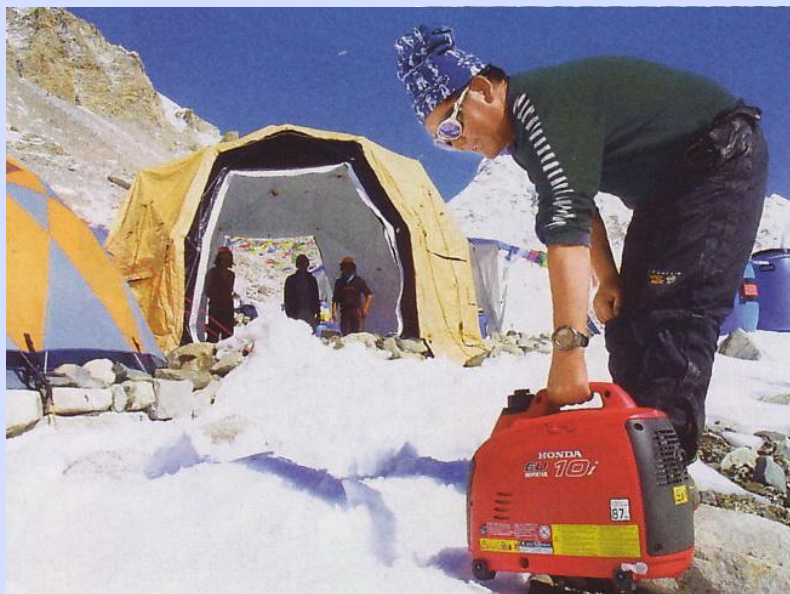
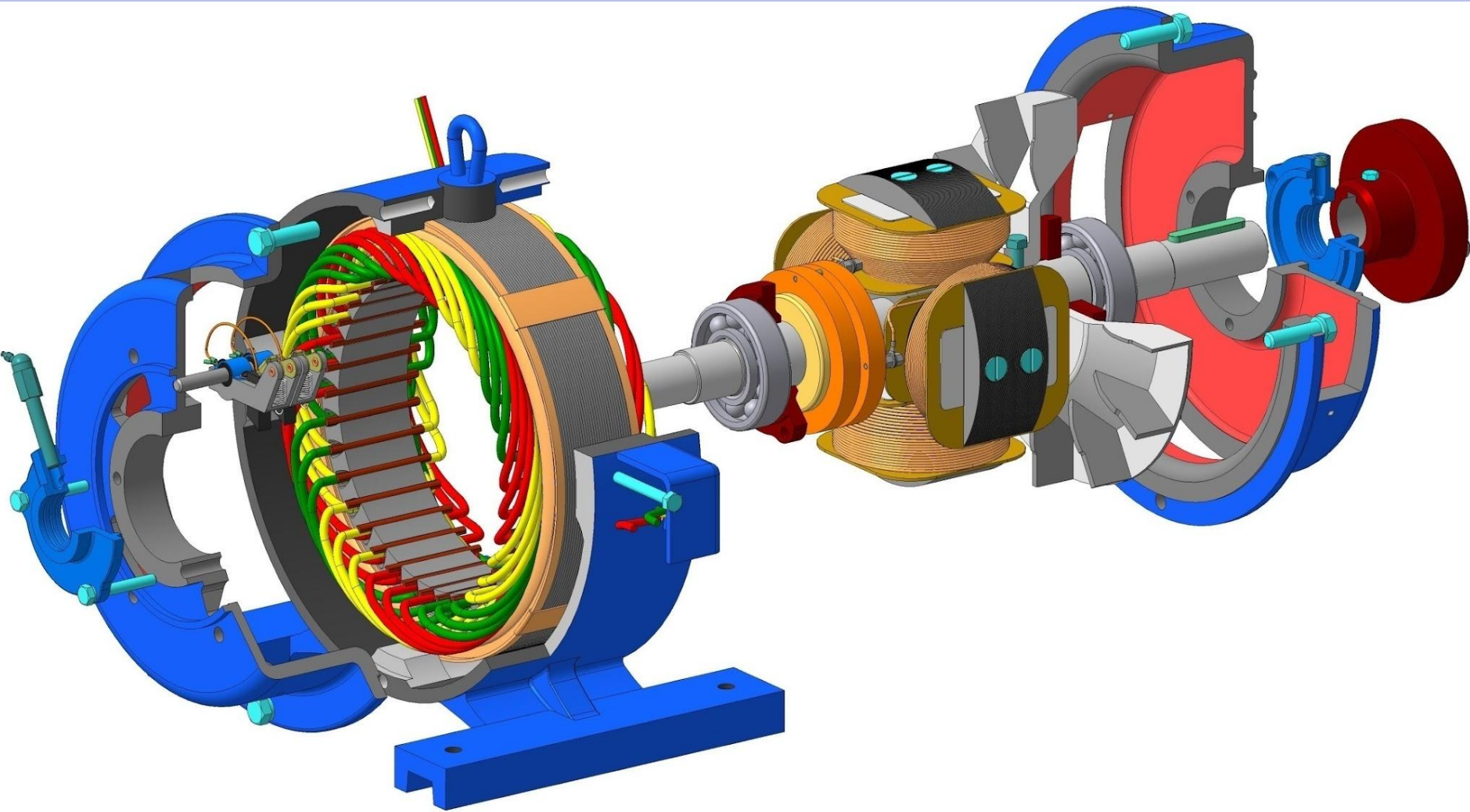


# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ





*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

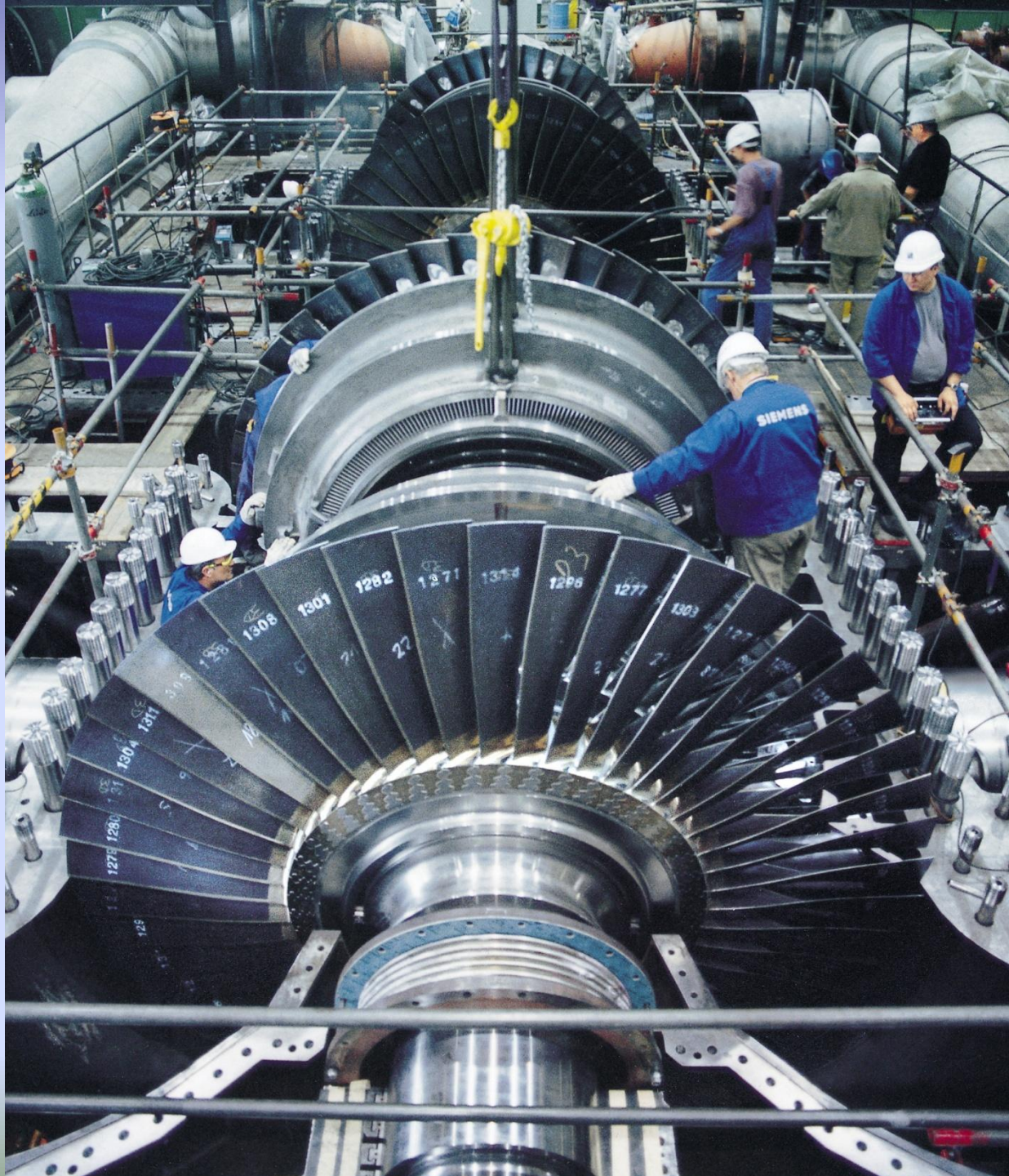
# Синхронный генератор автомобиля



# 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*

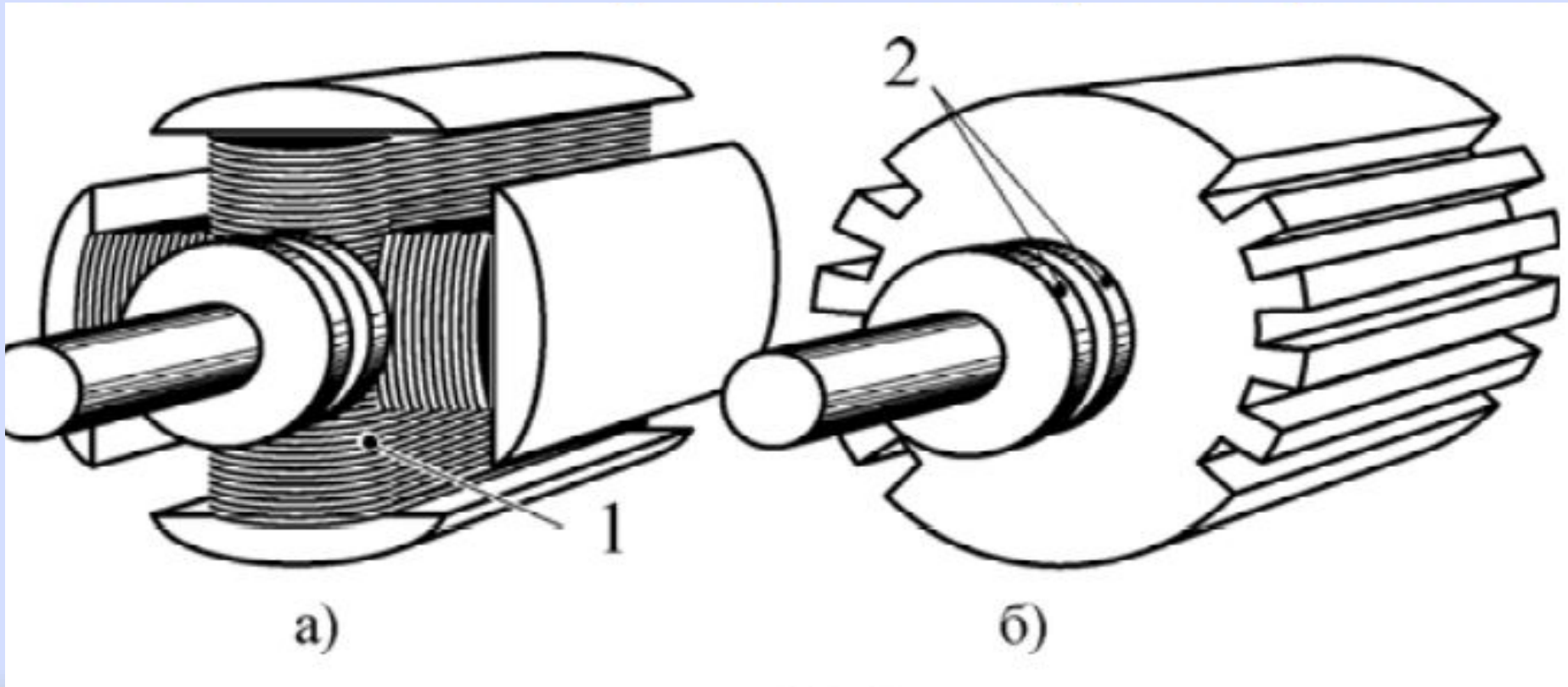
# Синхронный компенсатор подстанции



# 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.

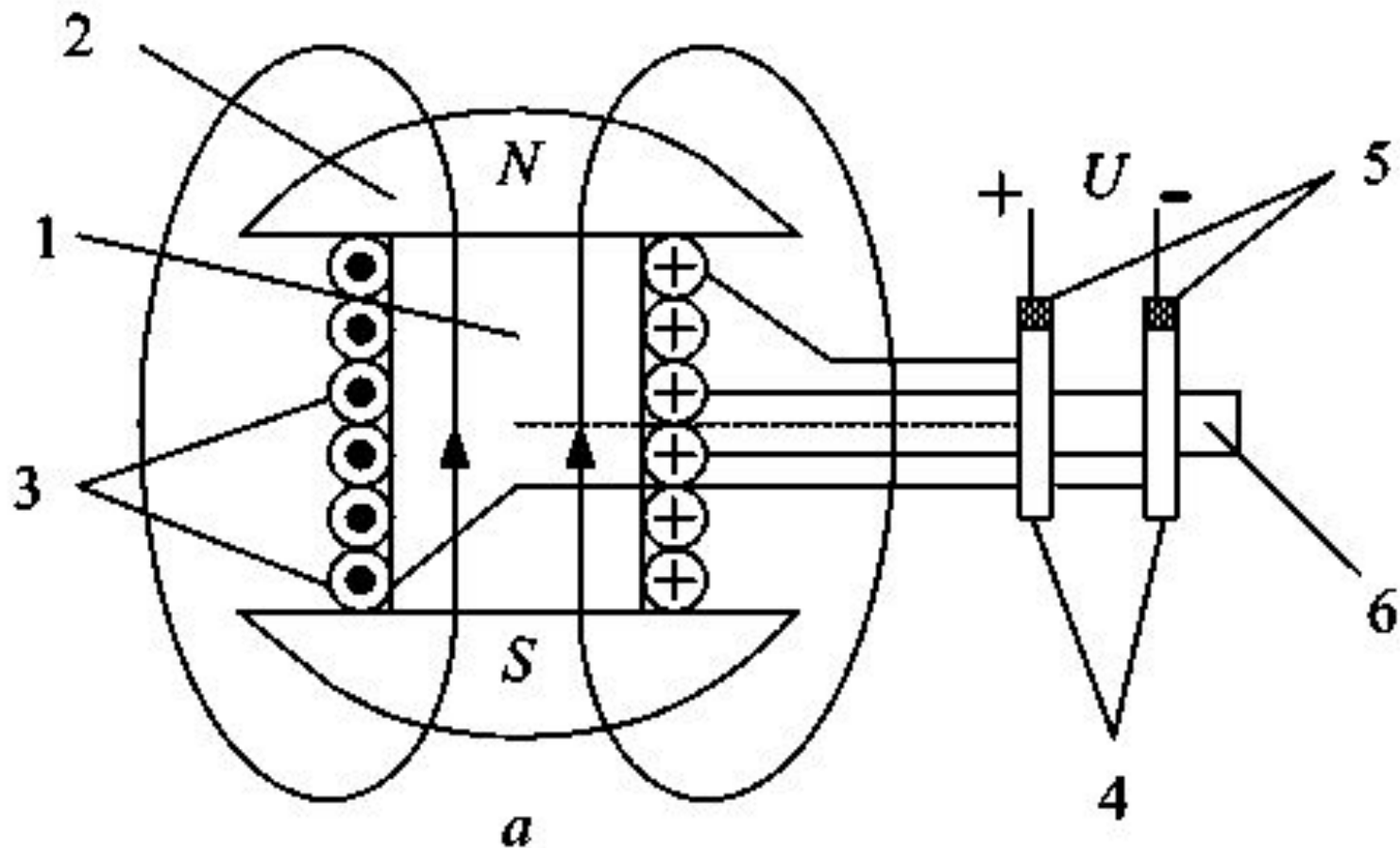
По конструкции ротора различают  
**неявнополюсный (а) и**  
**явнополюсный (б) ротор**





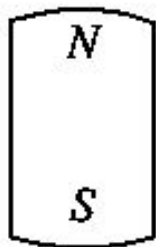
**Явнополюсный** ротор, имеющий  
выступающие полюсы,  
применяется для тихоходных машин  
с частотами вращения до **1000**  
об/мин.

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

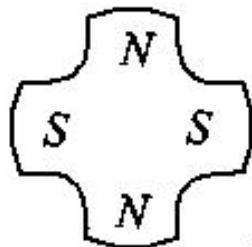


**Явнополюсный ротор с электромагнитным возбуждением состоит из сердечника 1, полюсных наконечников 2, обмотки возбуждения 3, контактных колец 4, медно-графитовых щеток 5, вала 6.**

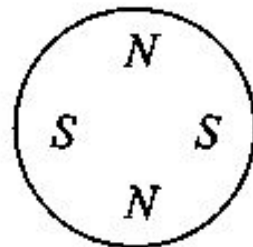
# Роторы-магниты, применяемые в СМ малой мощности, чаще всего в микромашинах (до 500 Вт)



$v$   
 $p=1$   
Явнополюсный



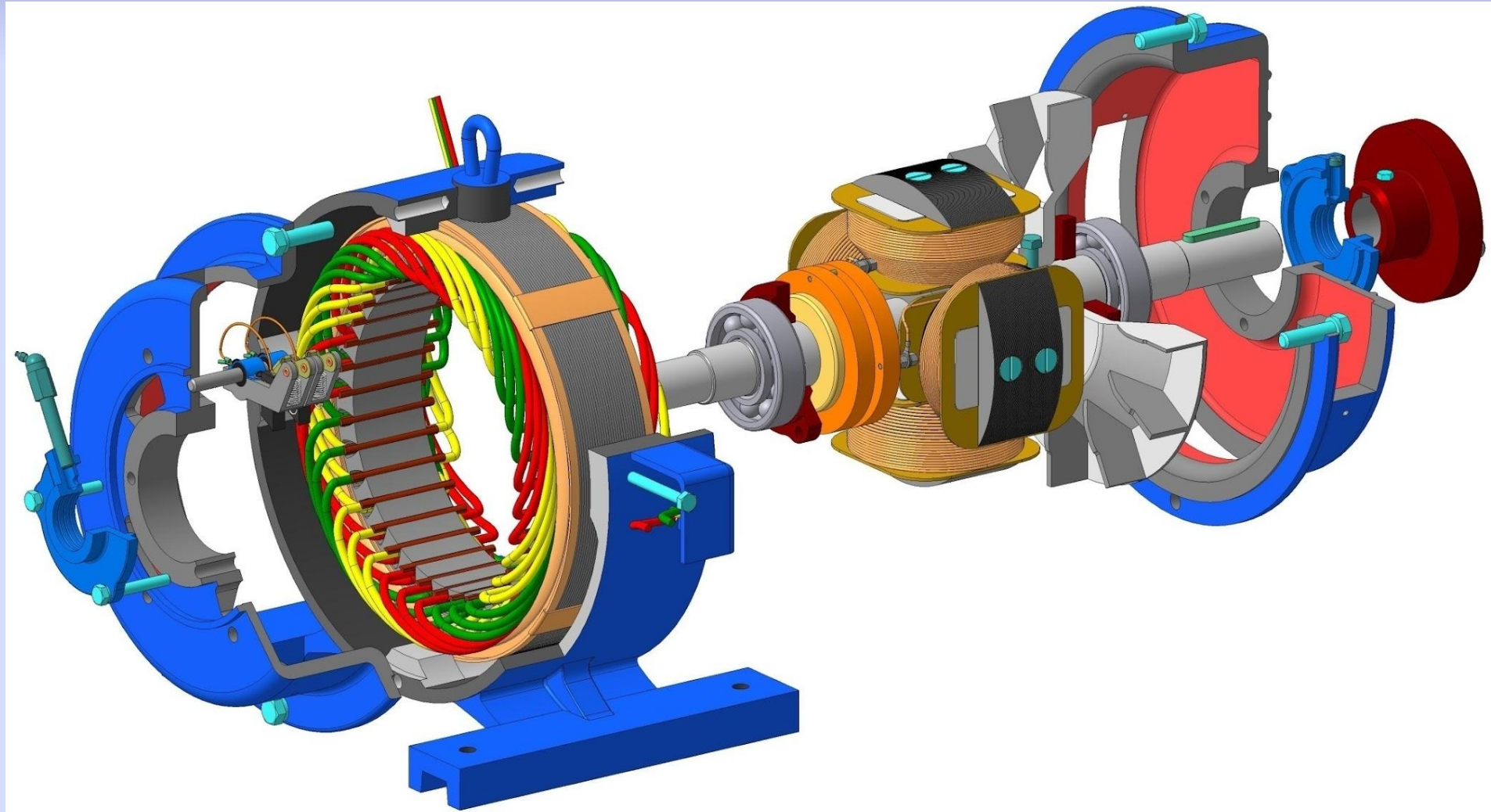
$z$   
 $p=2$   
Явнополюсный

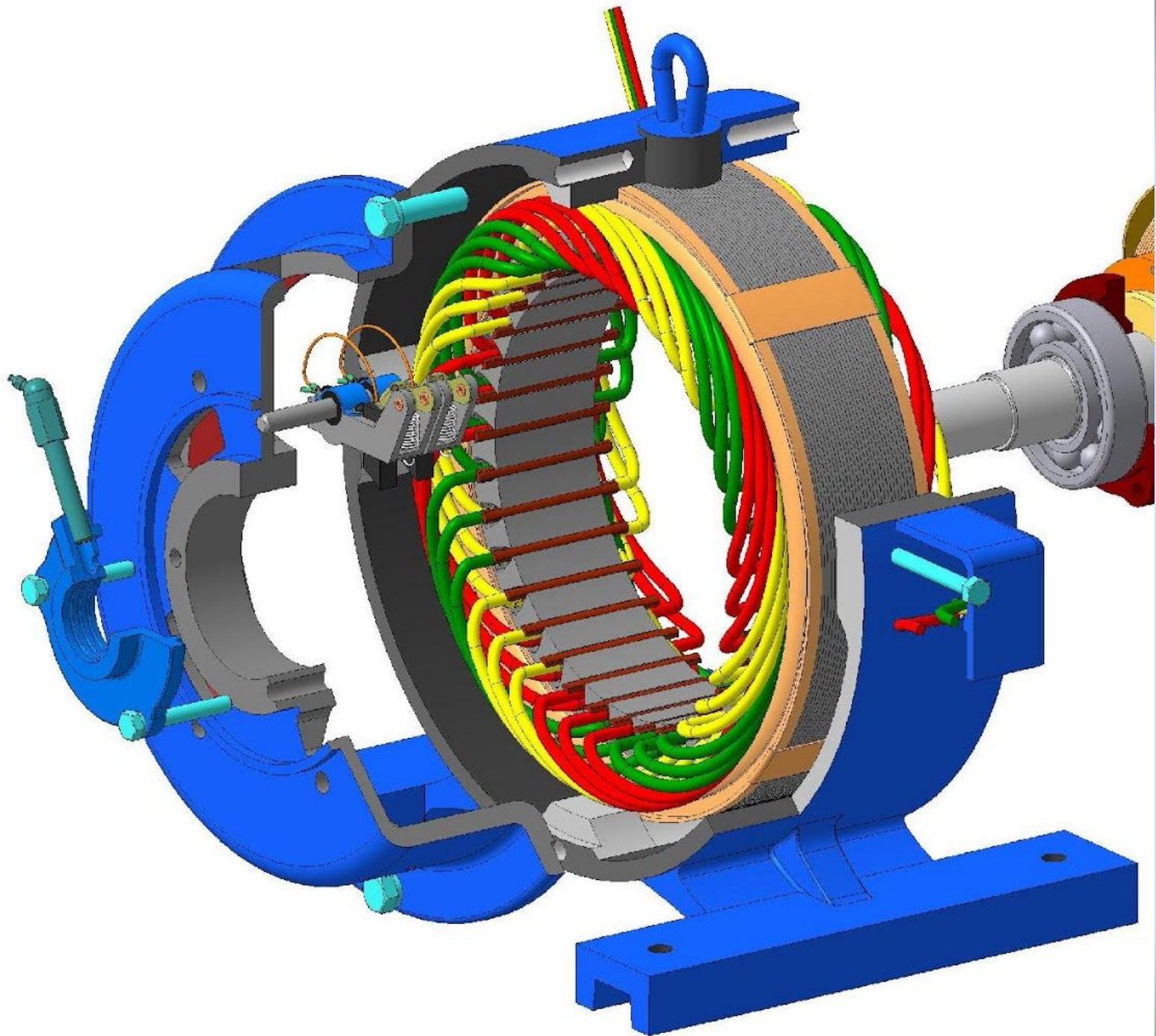


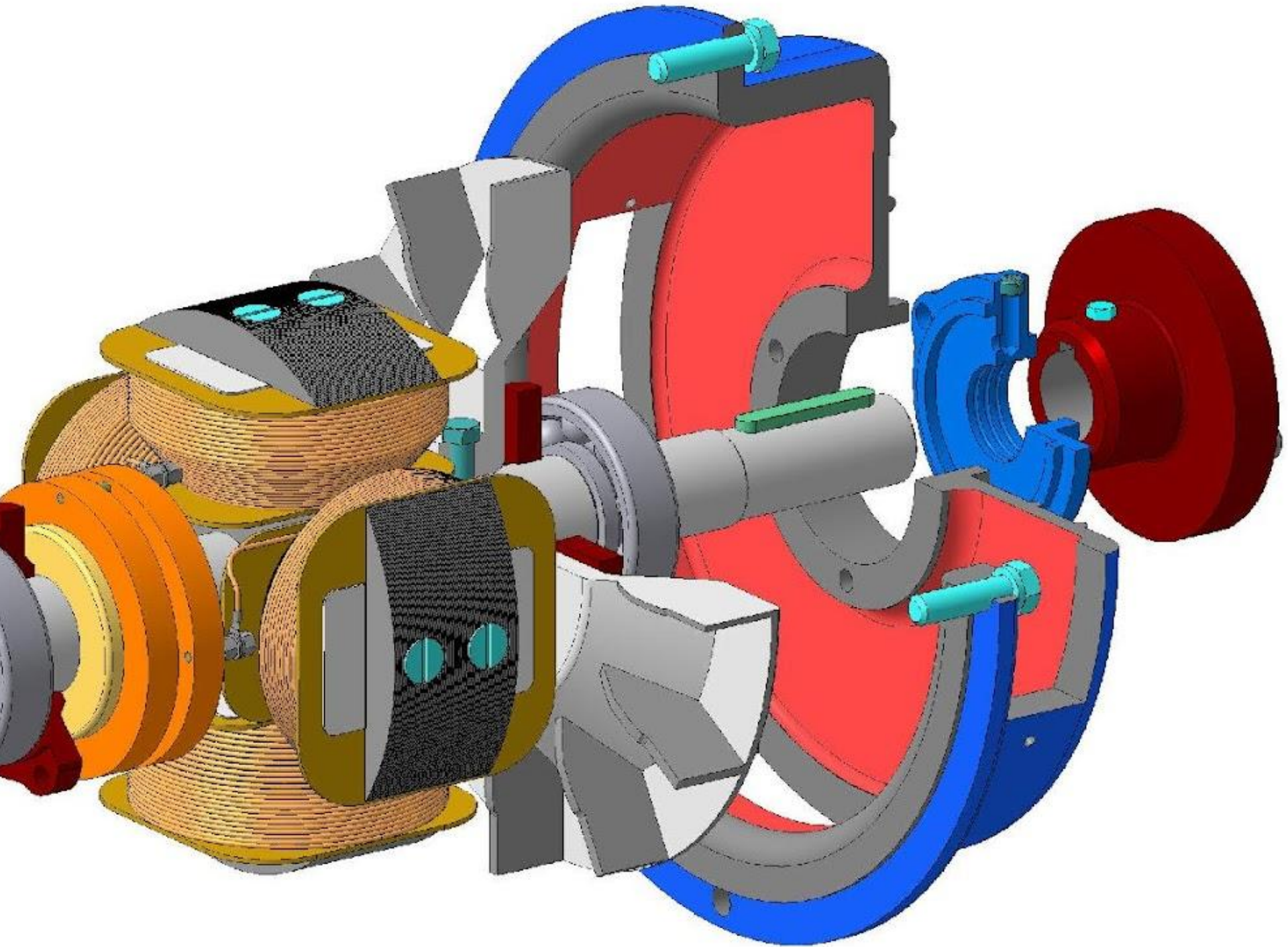
$\partial$   
 $p=2$   
Неявнополюсный



# 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**.



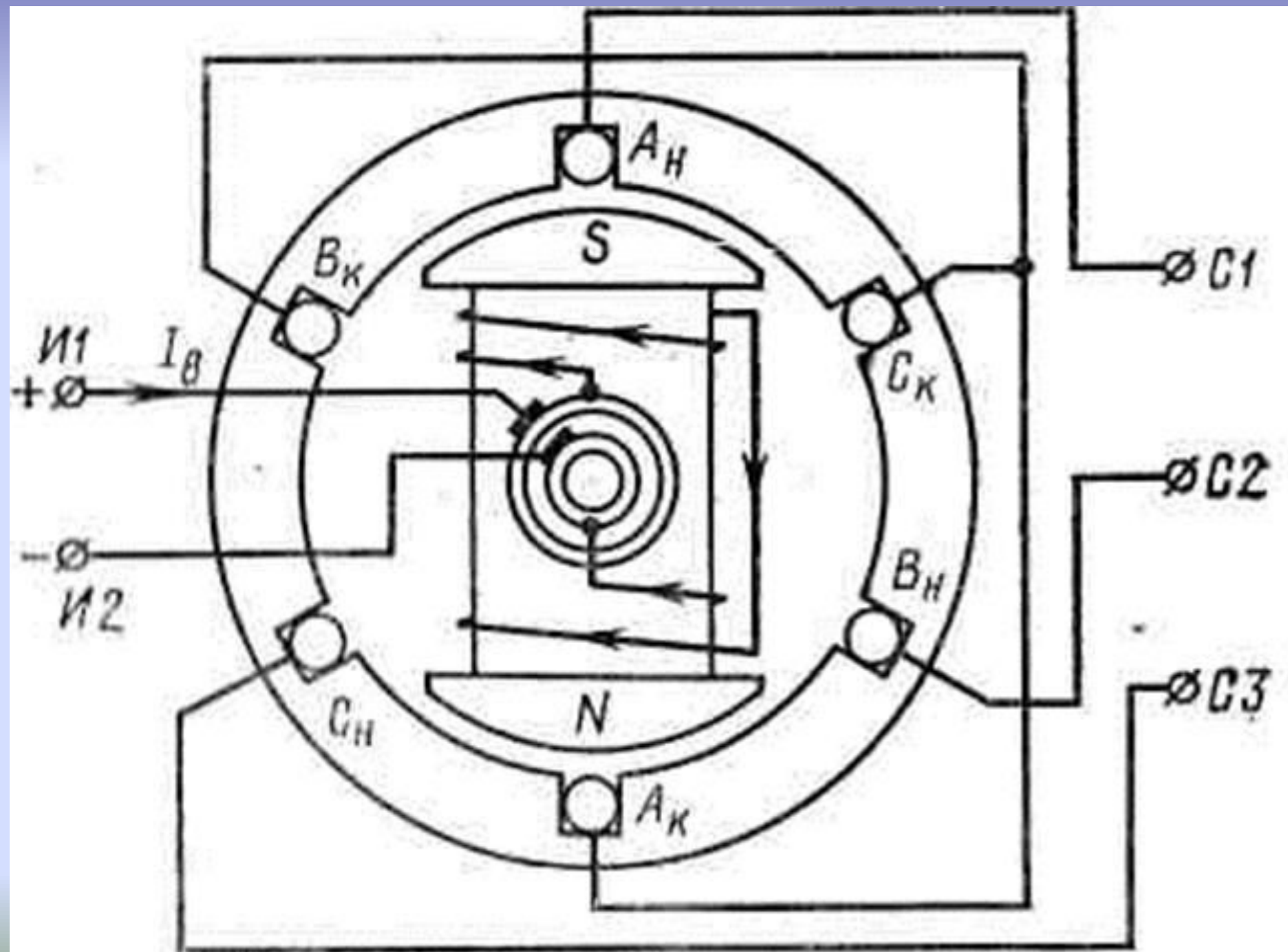
# **Синхронный генератор**

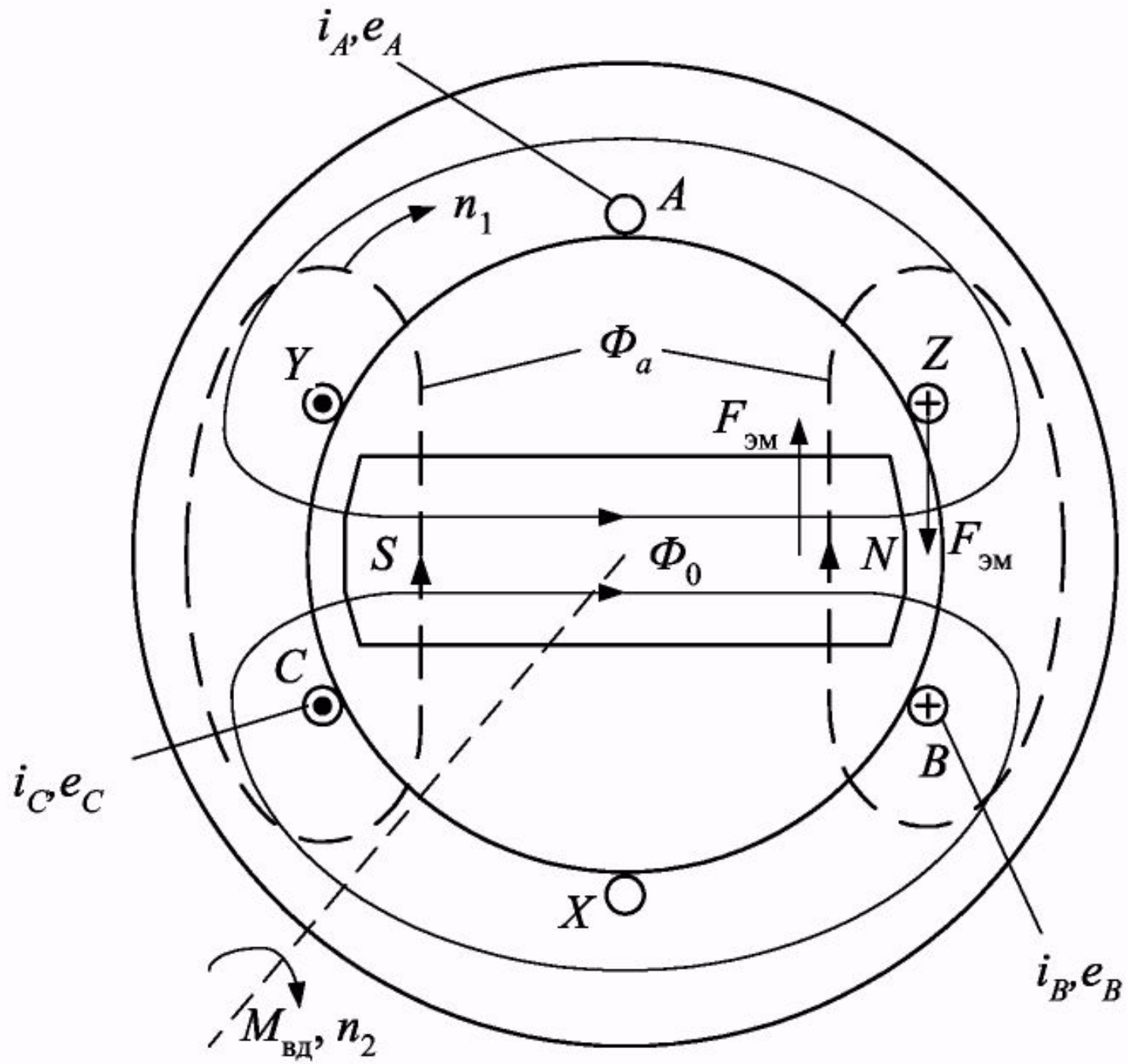
**Синхронный генератор, как и любой другой генератор, преобразует механическую энергию в электрическую. Для этого ротор СГ должен приводиться во вращение вспомогательным двигателем. На гидроэлектростанции это водяная турбина, на ТЭЦ – это паровая турбина, в автономных установках – это двигатель внутреннего 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  $\Phi_0$ , 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;  
 $\Phi_m$  – максимальный магнитный  
поток полюса ротора при токе  
возбуждения  $I_B$

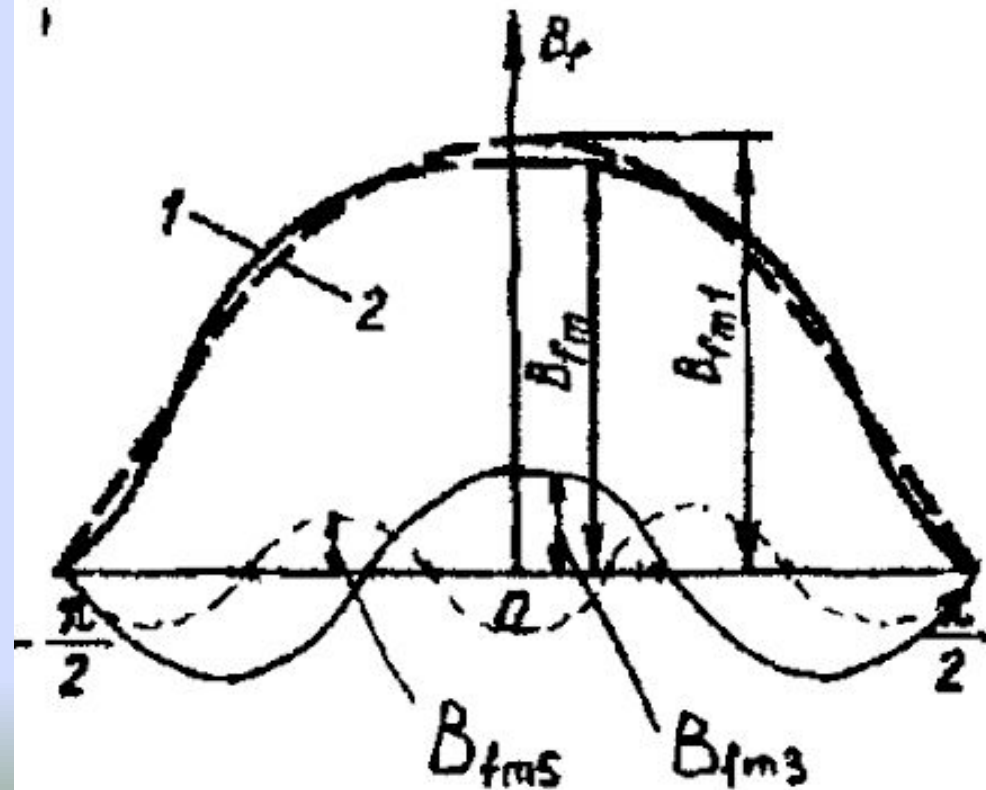
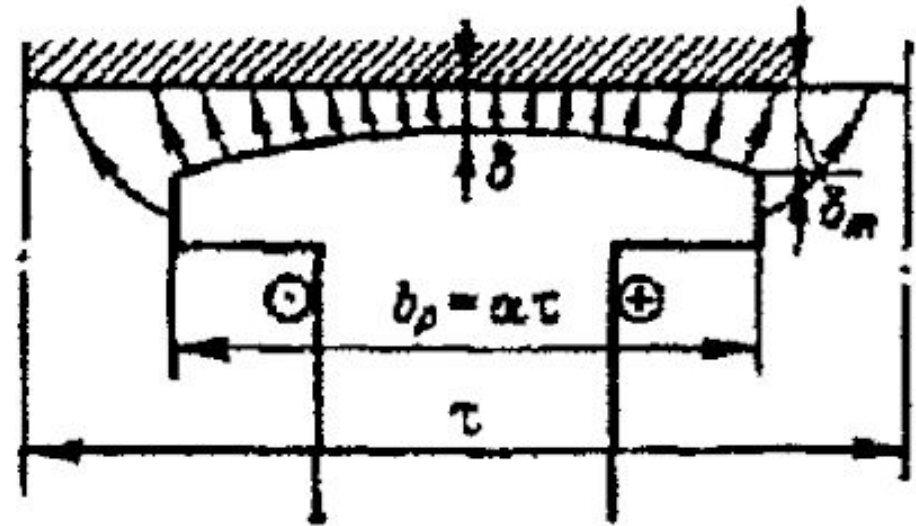


**Обмотки статора обычно  
соединяют звездой, так  
как при этом в отличие от  
соединения  
треугольником в них  
отсутствуют высшие  
гармонические  
составляющие тока,  
кратные трем.**

# 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:

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

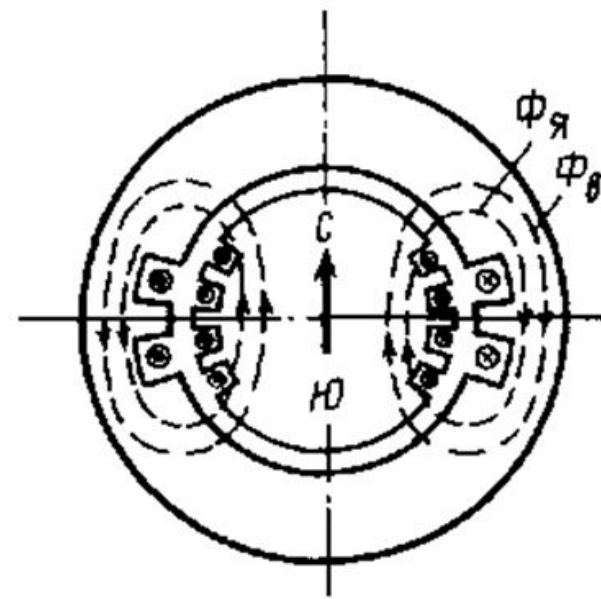
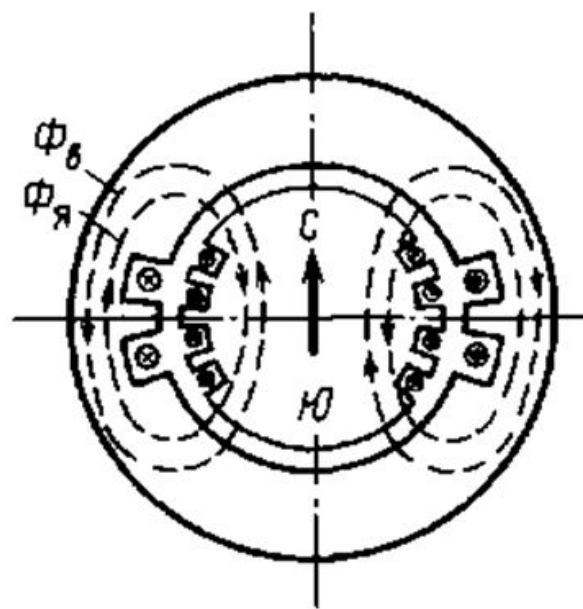
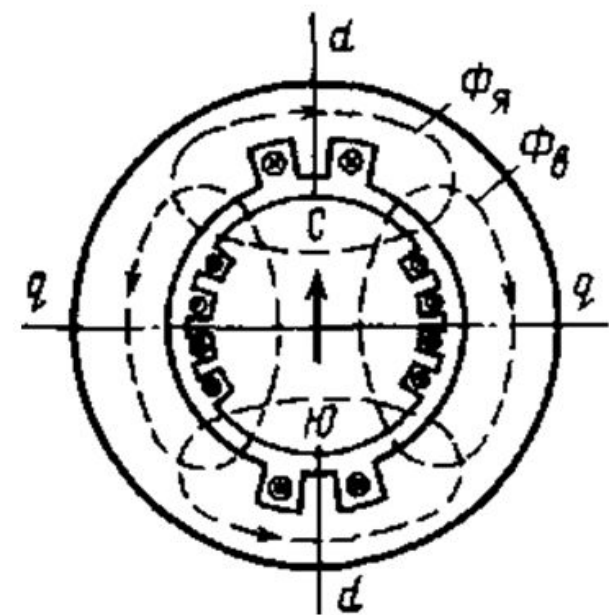
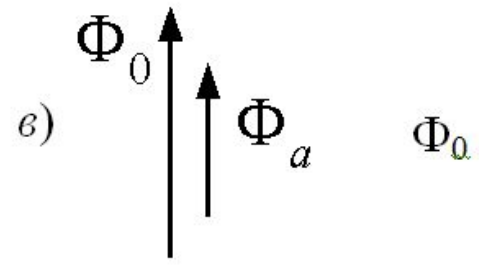
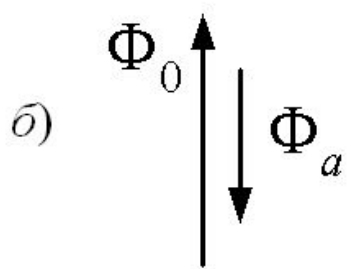
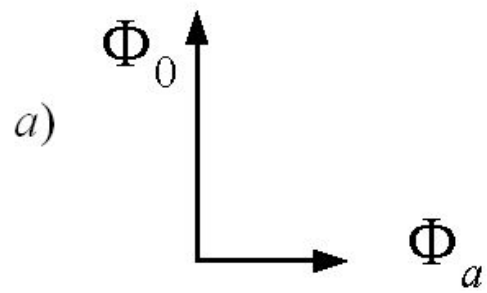
$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) ;$$

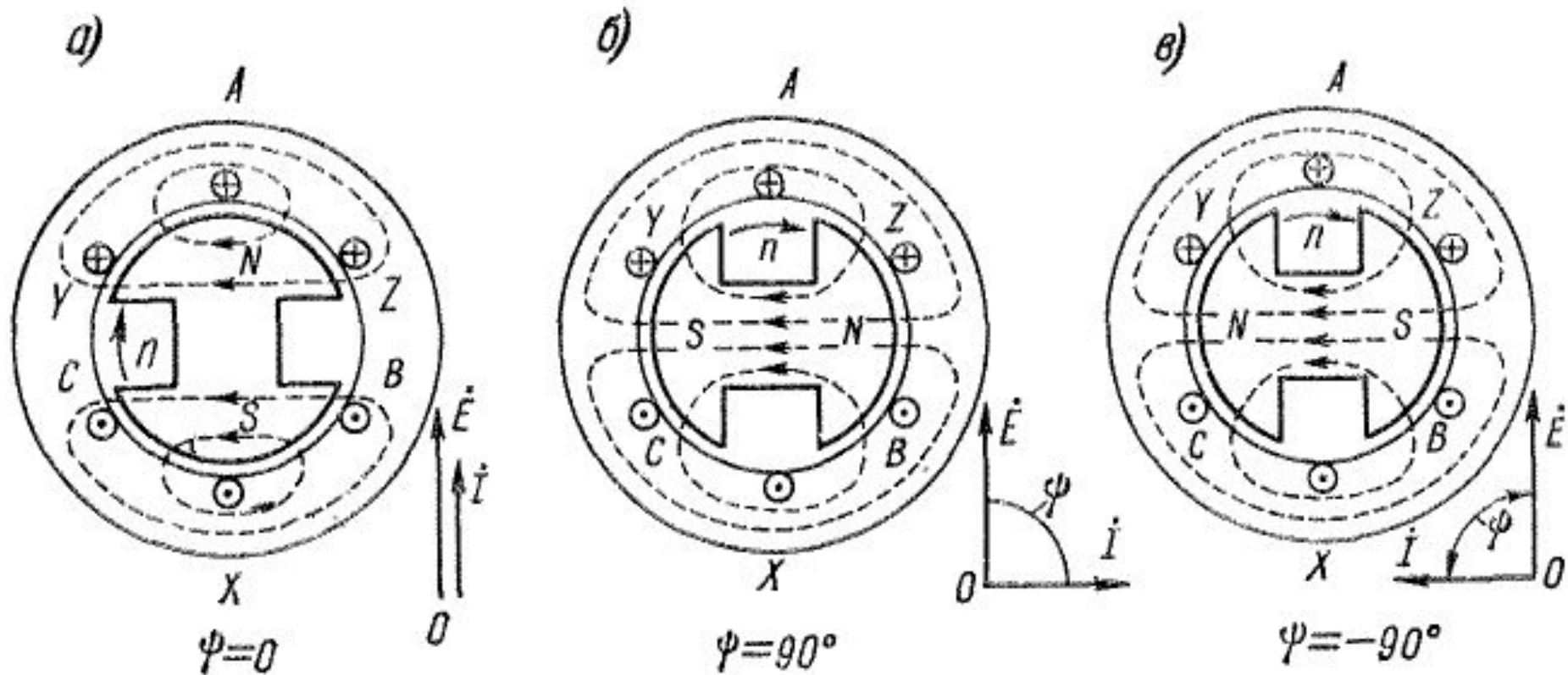
$$e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ) .$$

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

**Сдвиг тока относительно ЭДС определяется характером нагрузки.**

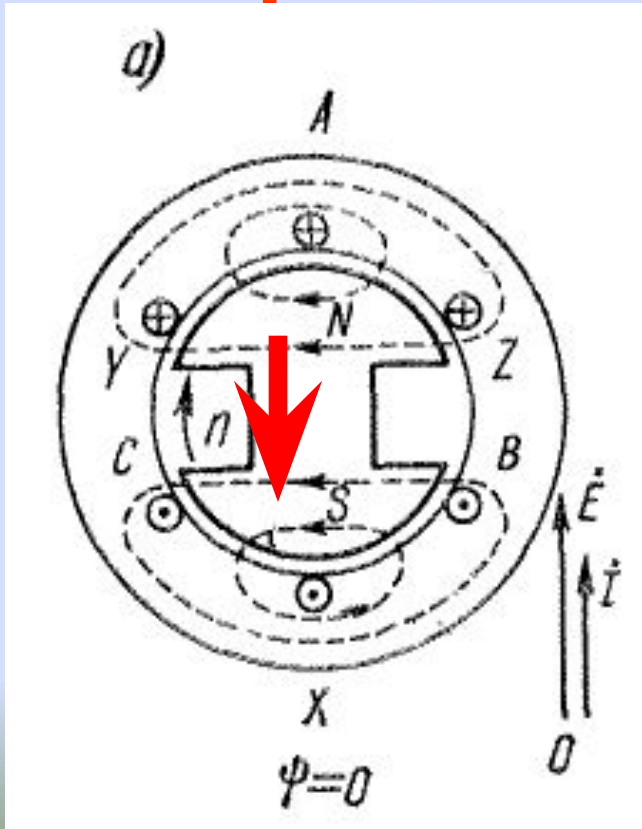
**При активной нагрузке ток в фазе совпадает с ЭДС, при активно-индуктивной – отстает от ЭДС, при активно-емкостной – опережает ЭДС.**





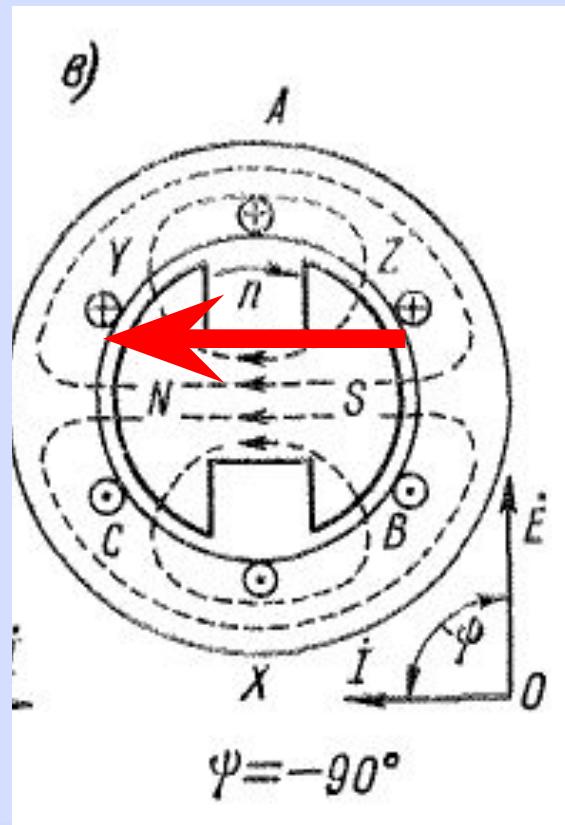
**Поперечная (а), продольная  
 размагничивающая (б) и продольная  
 намагничивающая (в) реакция якоря**

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

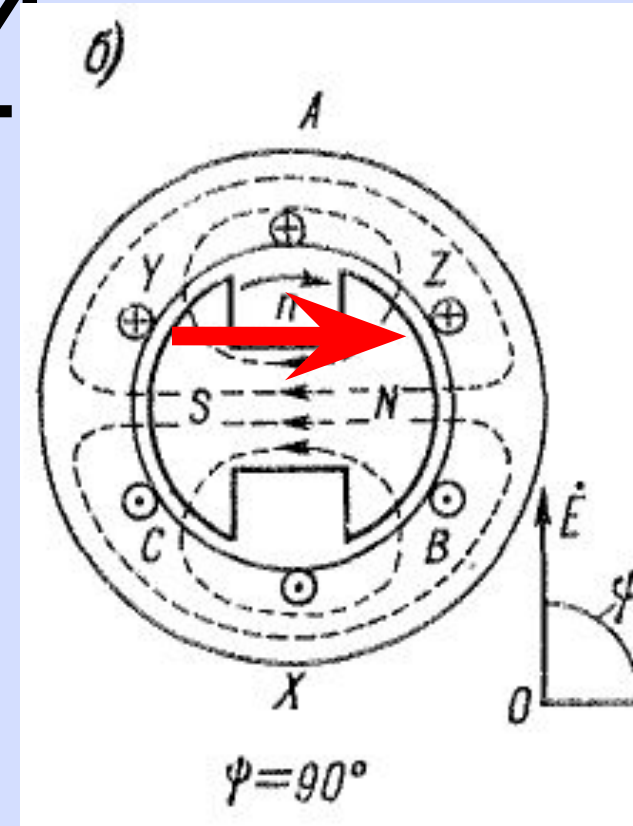




При чисто емкостной нагрузке  
реакция якоря продольная,  
**подмагничивающая.**



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

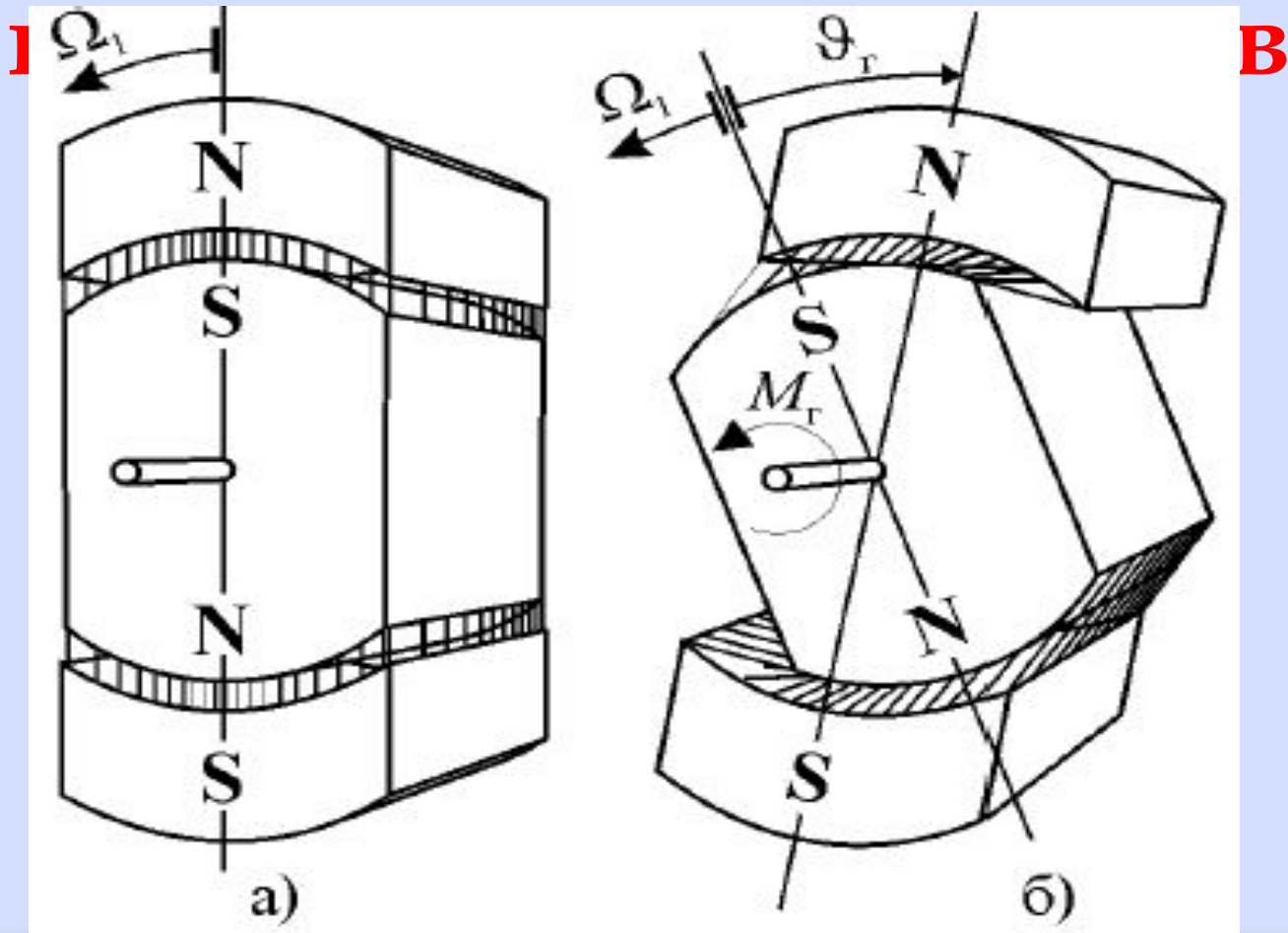


# Реакция якоря СГ

При протекании тока нагрузки по обмотке якоря создается вращающийся **магнитный поток якоря  $\Phi_a$** . Поток якоря  $\Phi_a$  и поток возбуждения  $\Phi_0$  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  $\theta$  - пространственный угол  
сдвига между осью  
результатирующего магнитного**



**холостой ход**

**нагрузка**

**При увеличении нагрузки  
растет электромагнитная  
сила и угол  
пространственного  
смещения  $\theta$ , 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  $\Phi_f$ , 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  $\underline{E}_\sigma$

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:**

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

$$x_c = x_a + x_\sigma$$

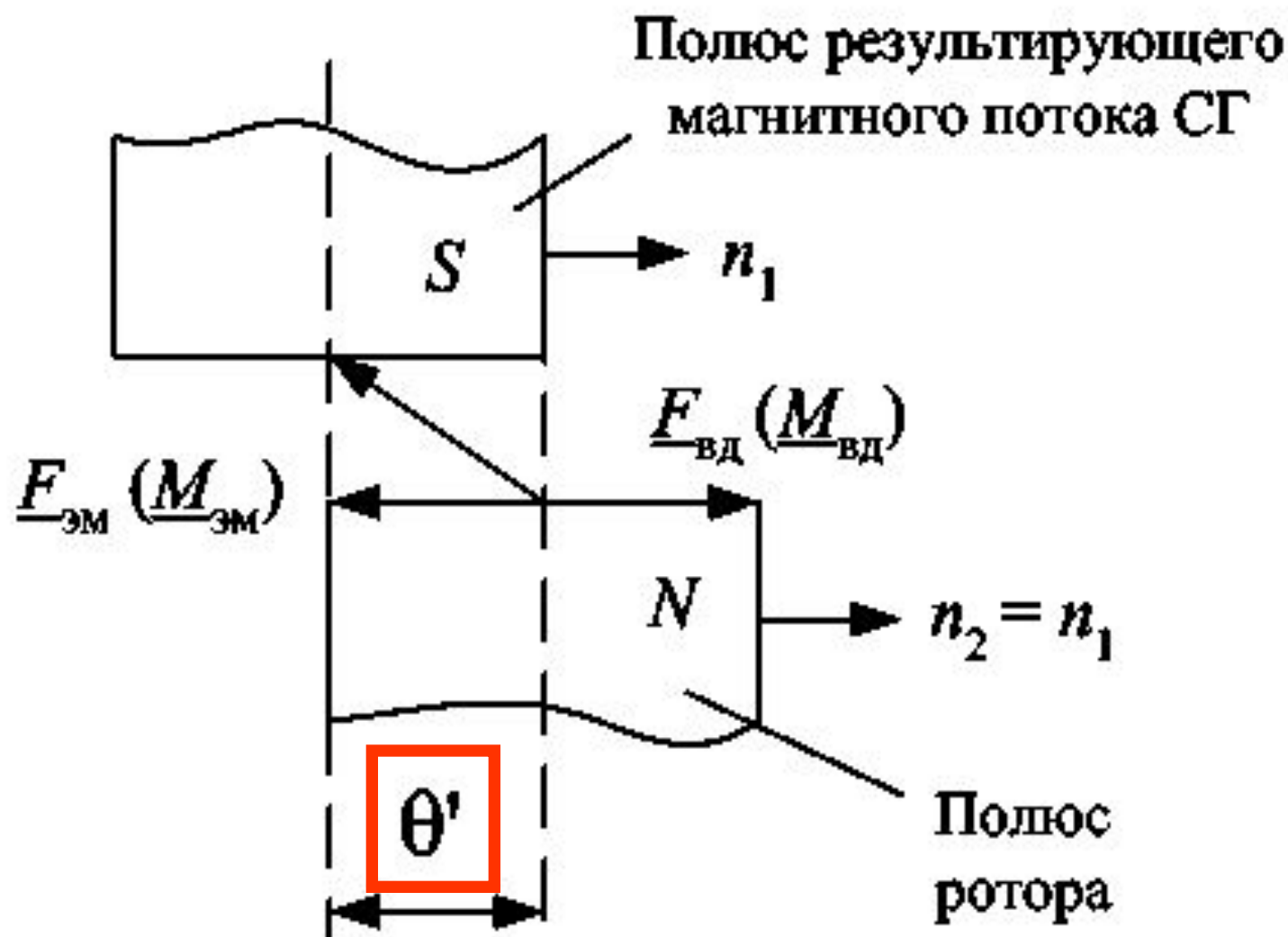
$x_c$  – полное синхронное сопротивление,

$x_a$  – главное индуктивное сопр. СТ

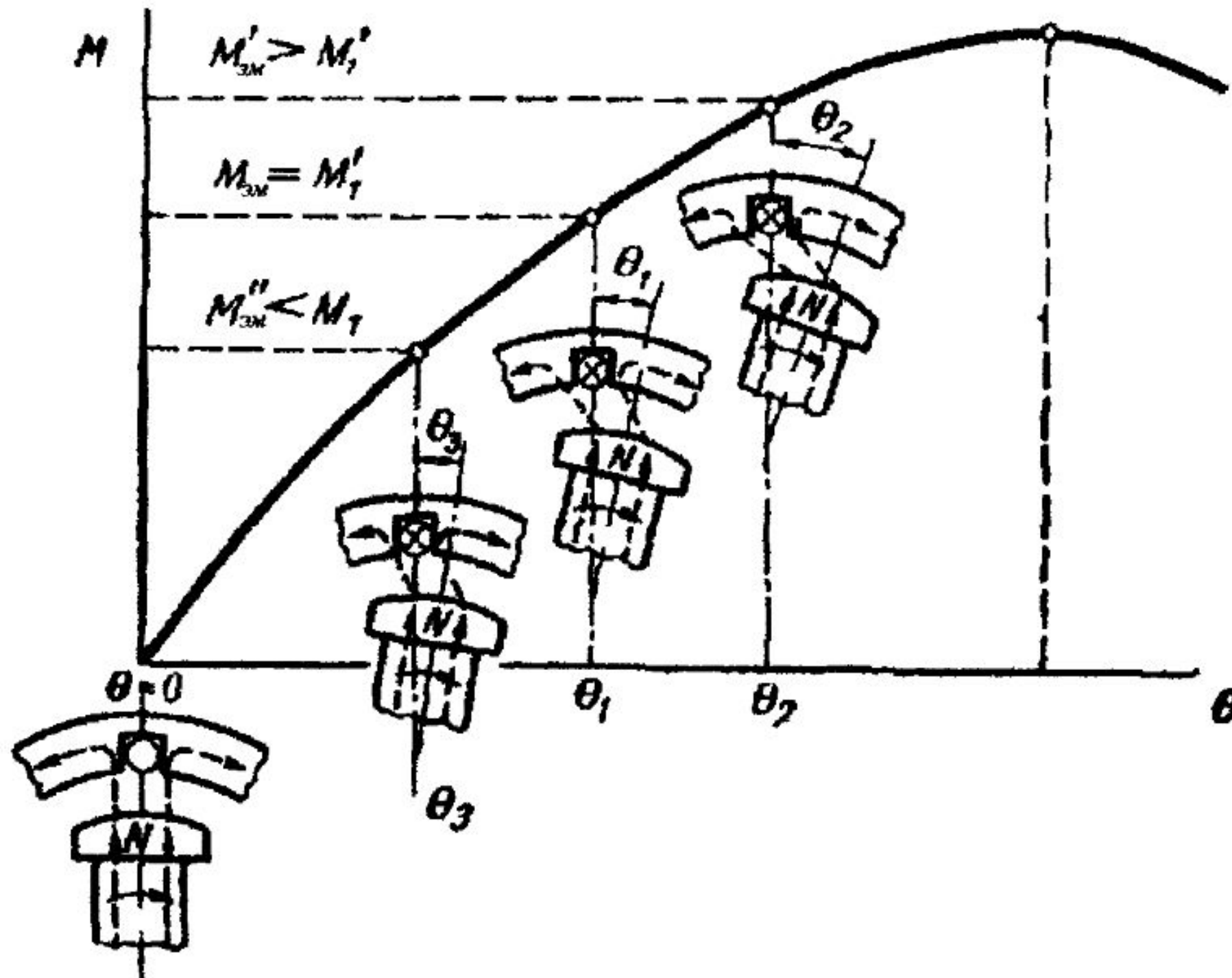
$$x_a = 4m_1 f_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu q} \delta} \frac{w_1^2 k_{об}^2}{p}$$

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

*Полюс ротора идет впереди полюса  
результирующего магнитного*

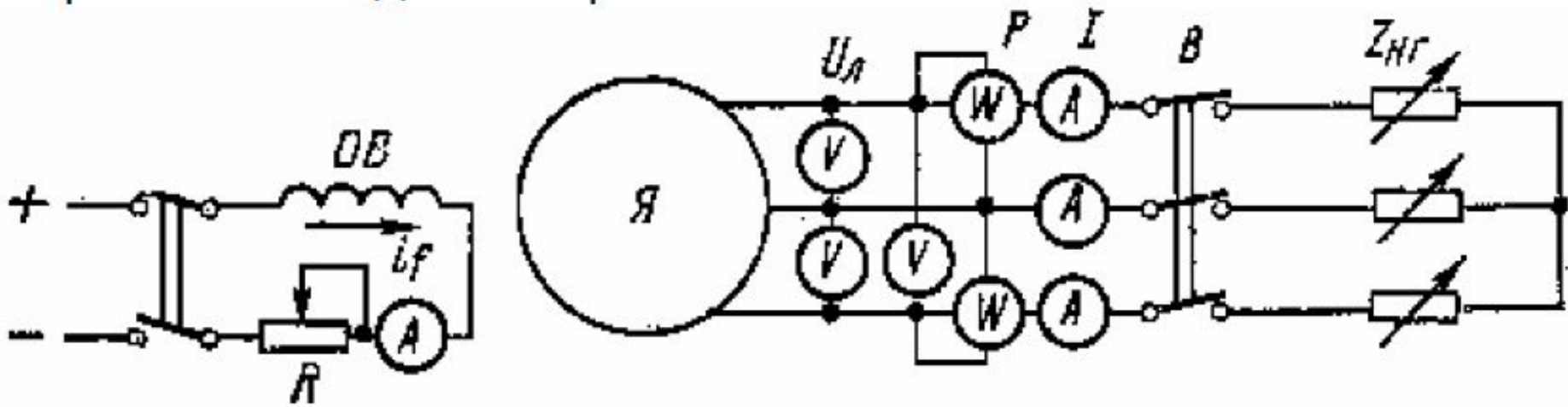


Взаимодействие магнитных полей в СТ



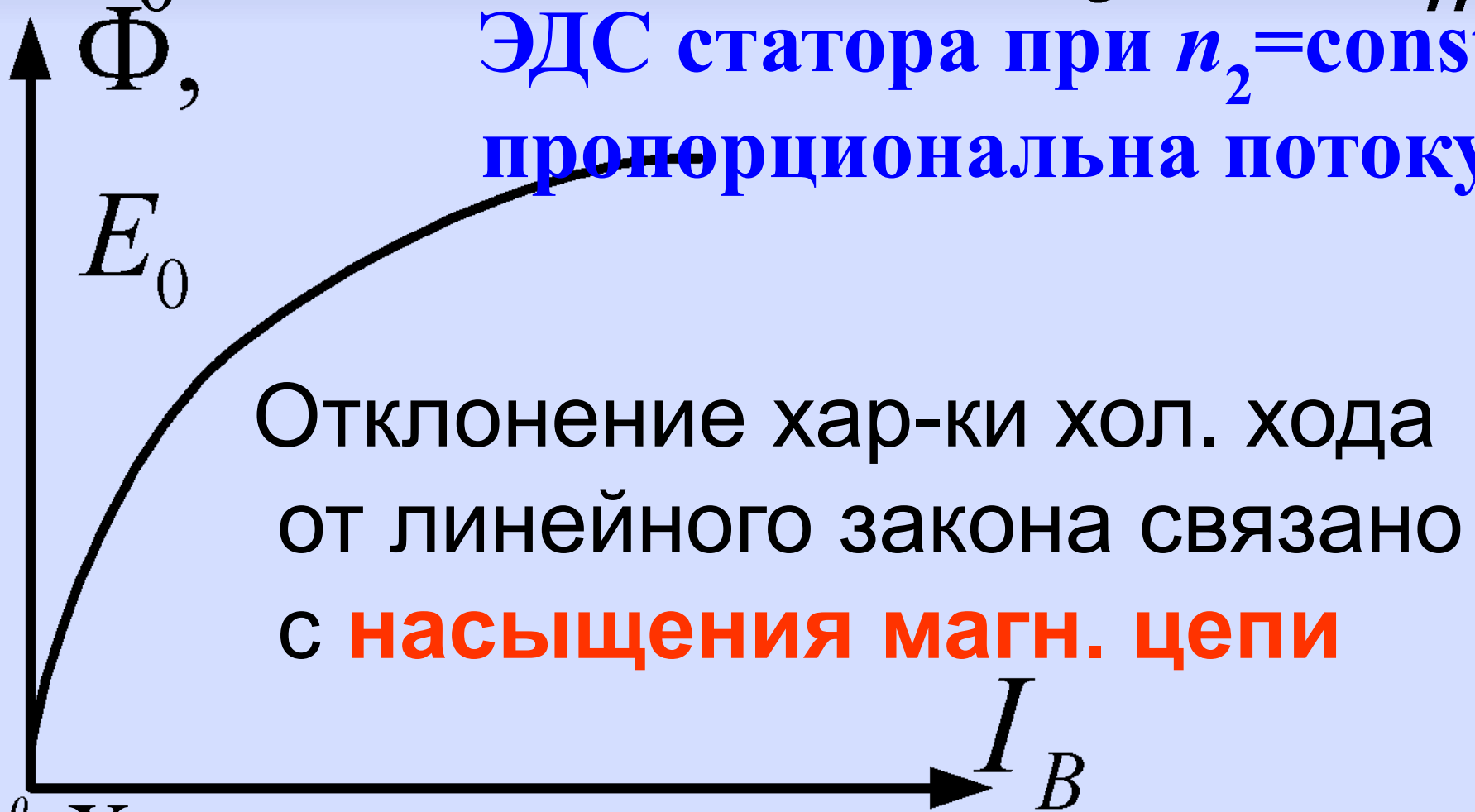
При холостом ходе (без нагрузки)  $\theta' = 0$ ,  
при увеличении нагрузки растет  
электромагнитная сила  $F_{\text{ЭМ}}$ , значит  
и угол  $\theta'$ , **но до некоторого предела**,  
после которого ротор **выходит из**  
**синхронизма**, поскольку не хватает  
мощности (момента) приводного  
двигателя

# 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

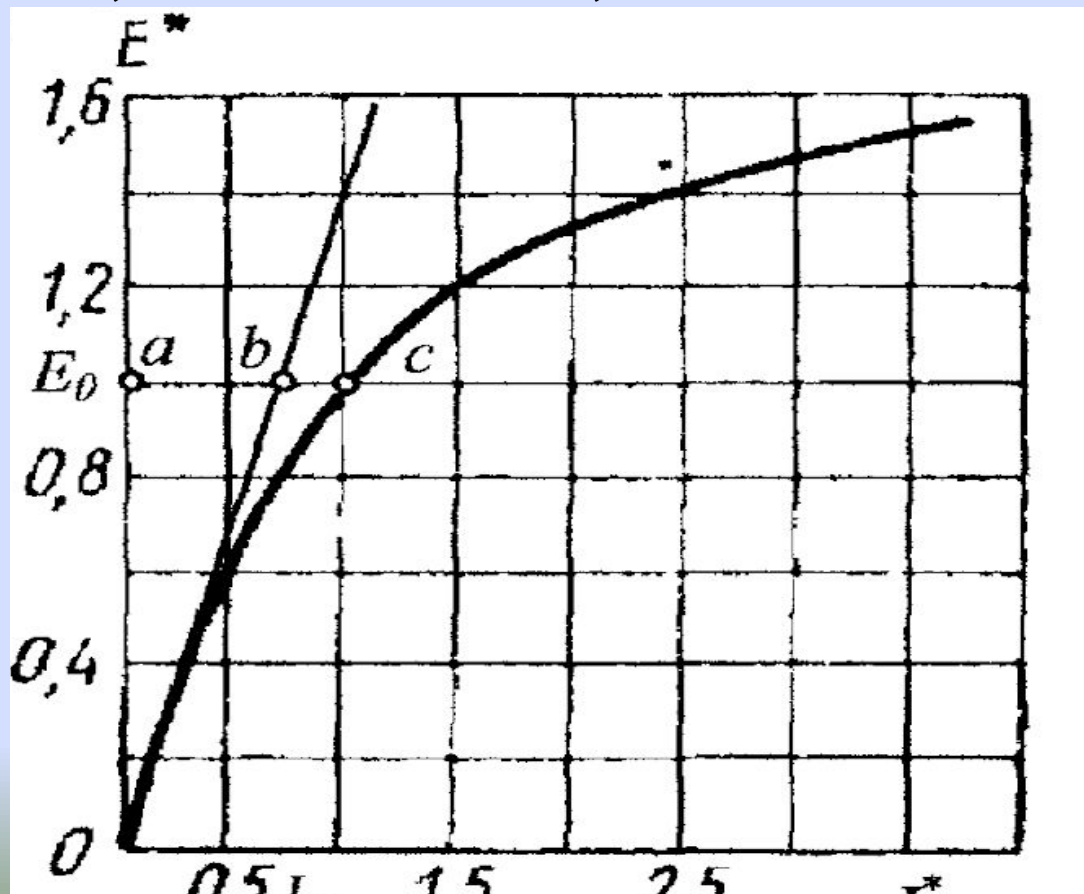


Единая для всех СГ хар-ка холостого

хода в относительных единицах:

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

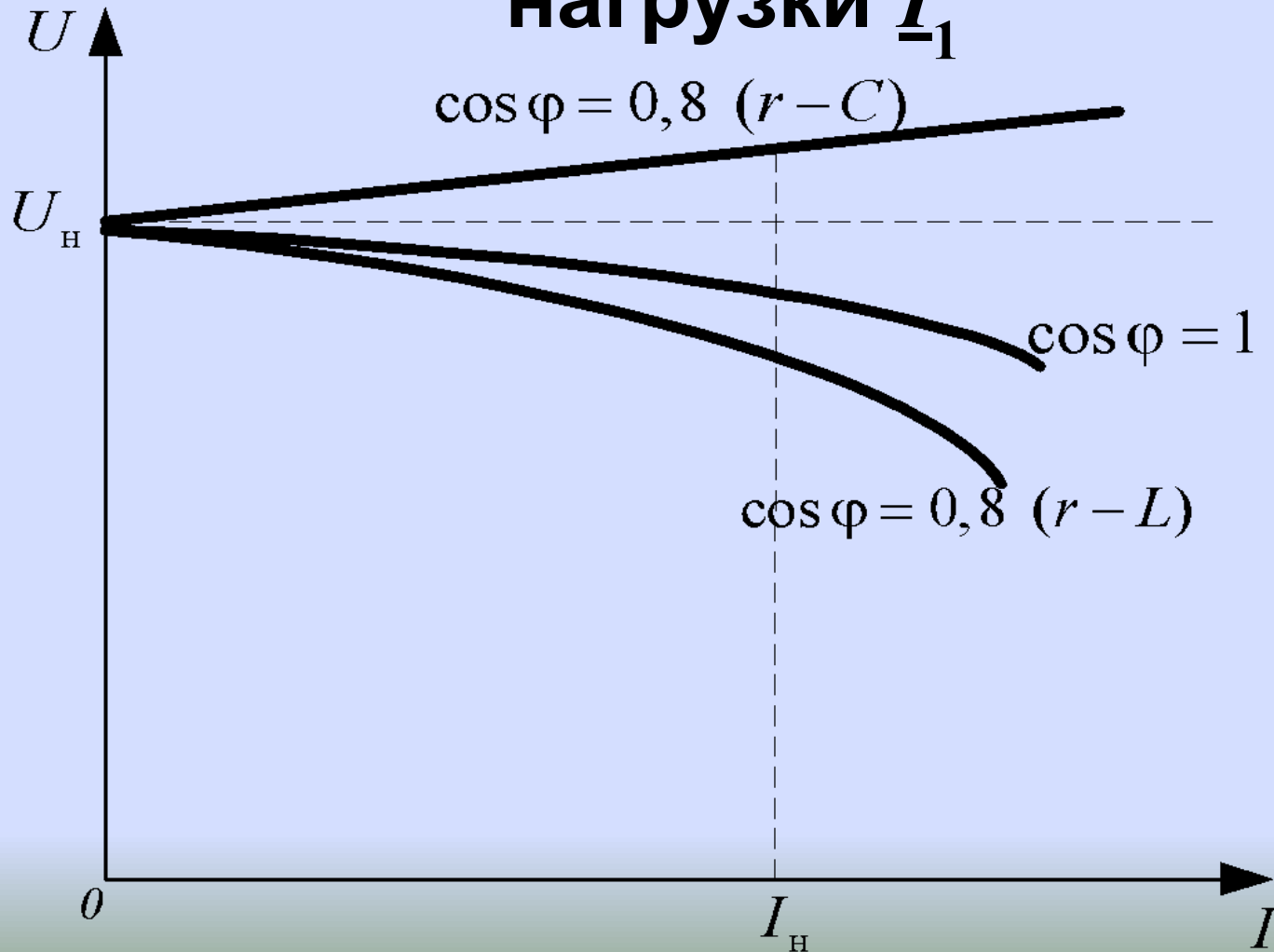
$F_f$  0,5 1 1,5 2 2,5



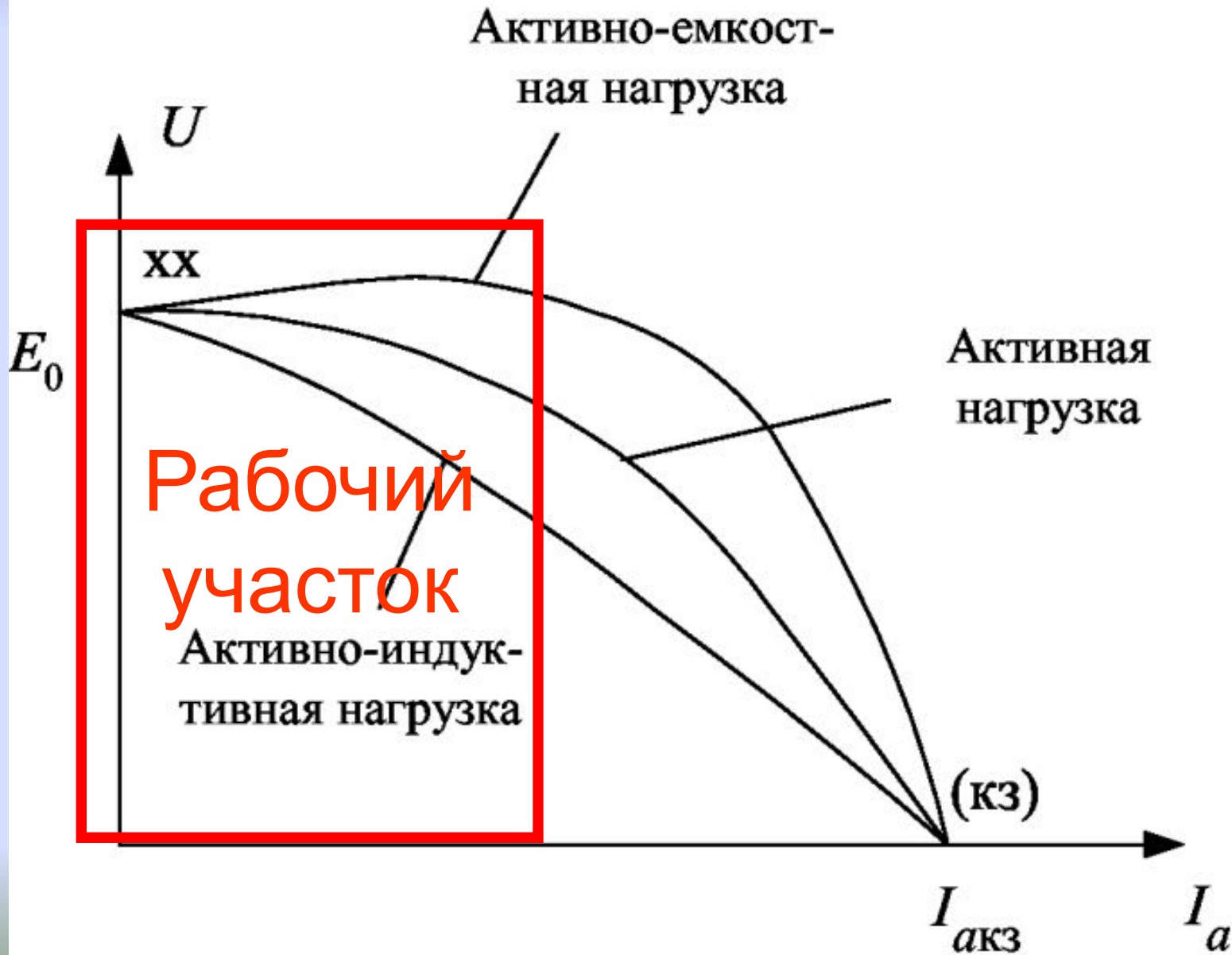
# Внешняя характеристика СГ -

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

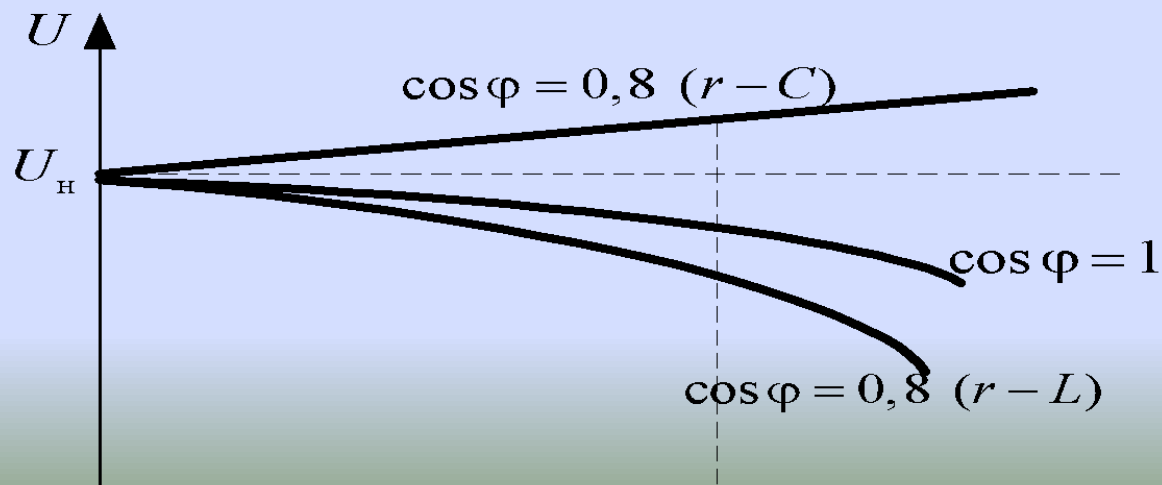
нагрузки  $\underline{I}_1$



# 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

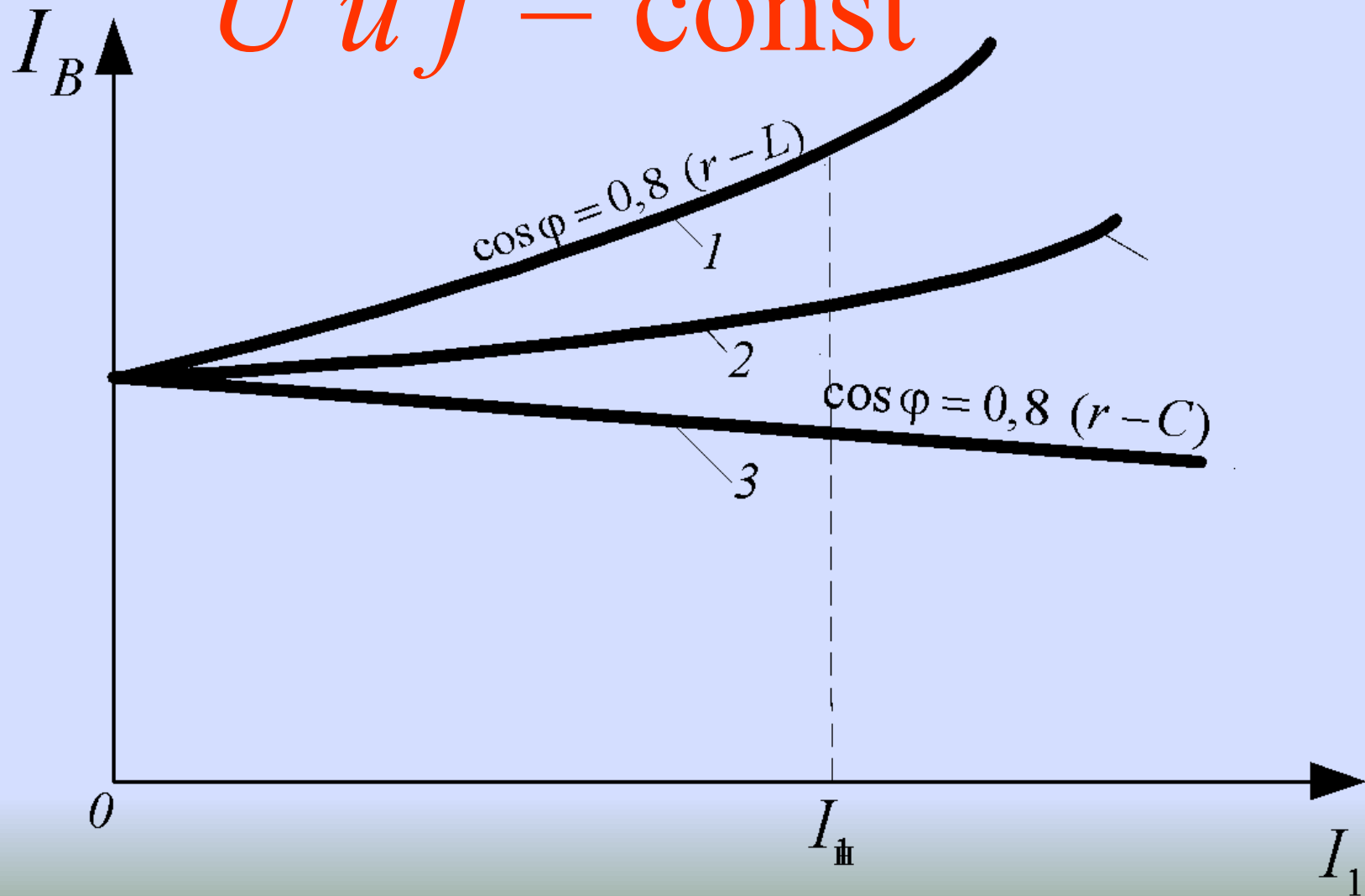
при  $\cos\varphi = 0,8$ .

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

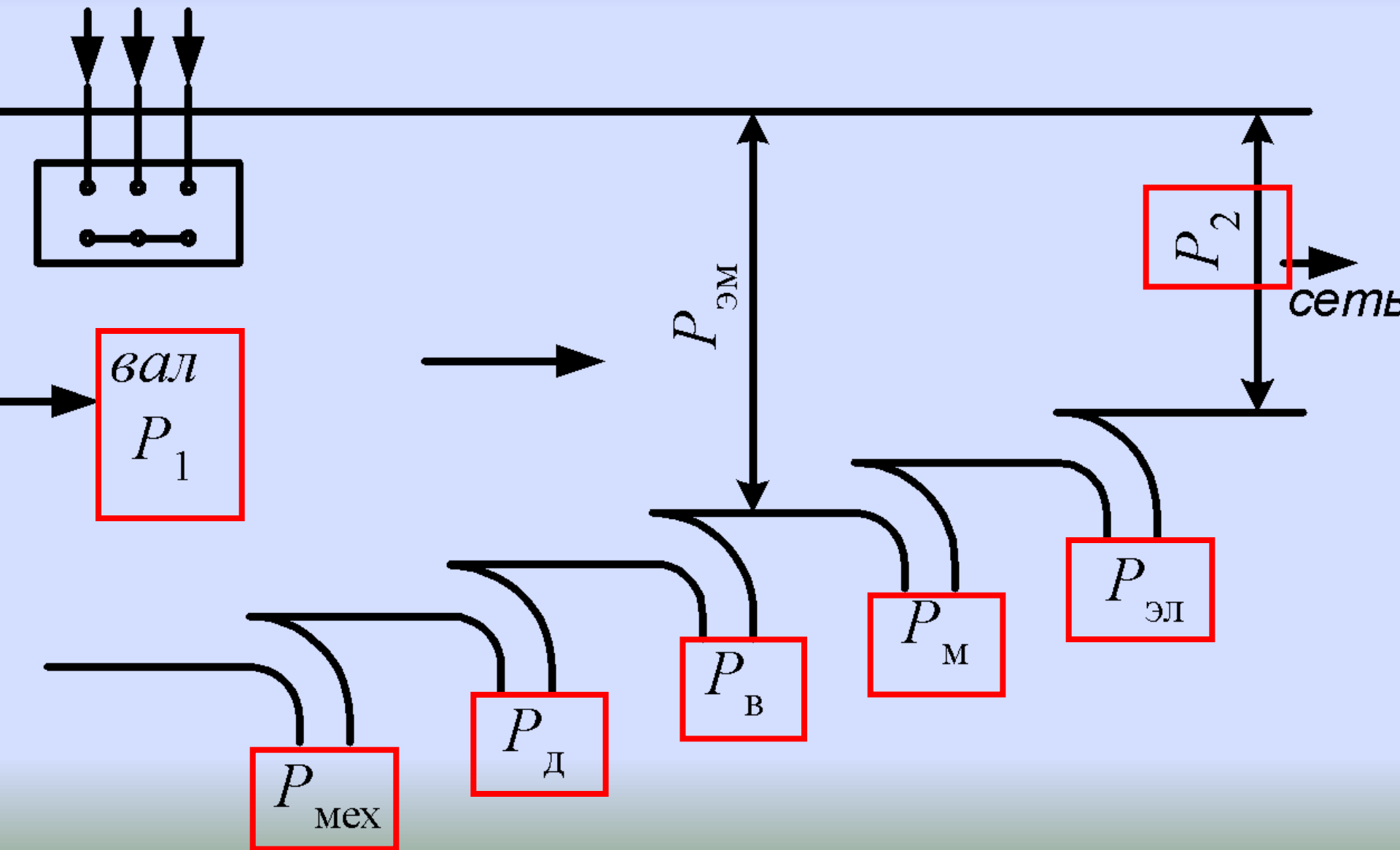
$$P_{\text{мех}} = \omega_p M,$$

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

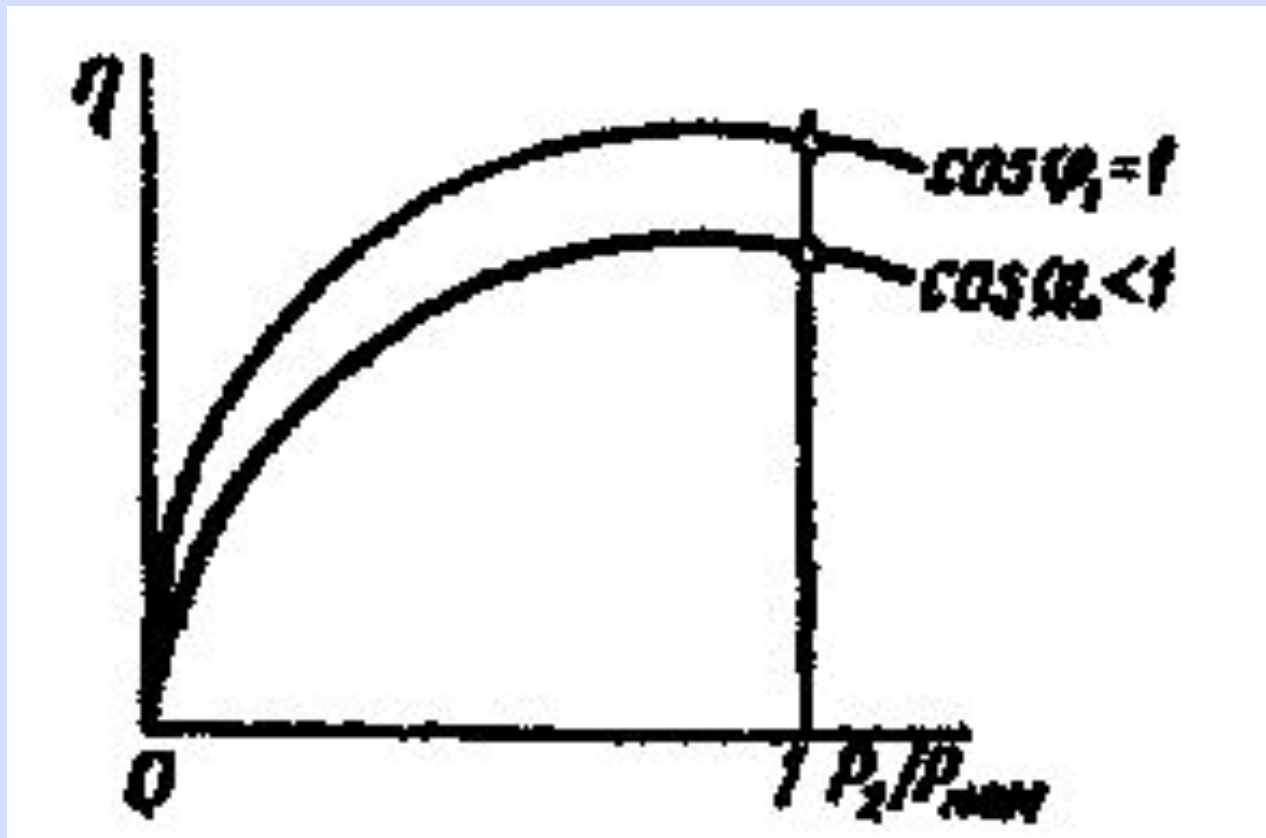
***Магнитные потери*** в сердечнике статора  $P_{\text{м}}$  слагаются из потерь гистерезиса и вихревых ТОКОВ.

***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) –  $\eta = 96-99 \%$ .**