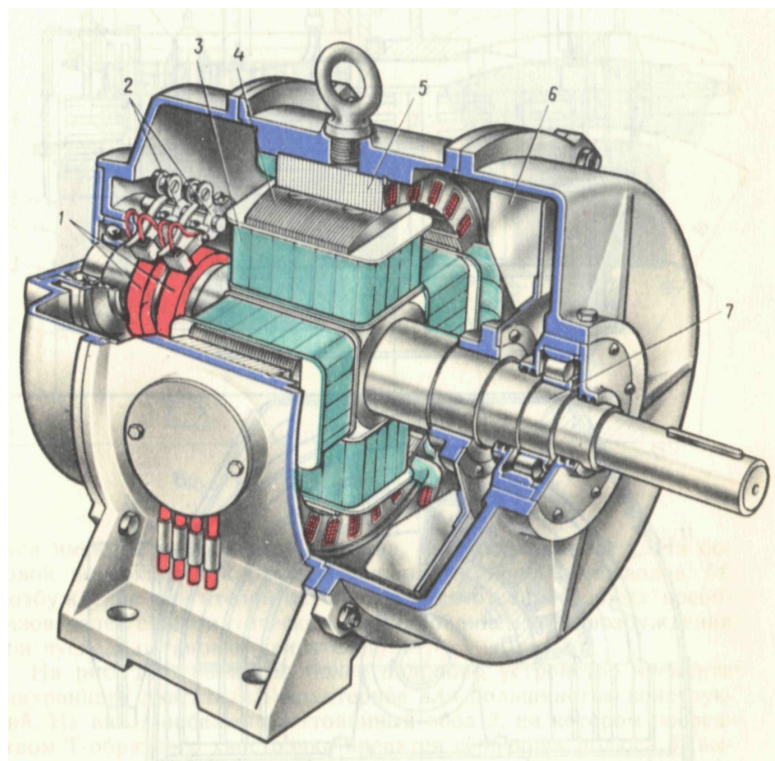


БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
кафедра электротехники, О8

Лекция 14

Синхронные машины



## Синхронные машины

Синхронные машины являются машинами переменного тока, у которой магнитное поле статора и ротор вращаются с одинаковыми скоростями.

Синхронные машины в основном используются в качестве генераторов переменного тока.

Синхронные генераторы большой мощности (до 1500 МВт) используются в парогенераторах и гидрогенераторах. У них высокое значение КПД (выше 90%).  
в основном используются в качестве генераторов переменного тока.

Синхронные двигатели имеют постоянную скорость вращения. Их применяют, там где нет необходимости регулирования скорости. Их применяют в металлургии, компрессорах, шахтах. Мощность двигателя от 50 кВт и выше.

Имеется отдельный класс синхронных машин малой мощности, которые применяются в средствах автоматики, устройств управления, где необходима стабильная скорость вращения.

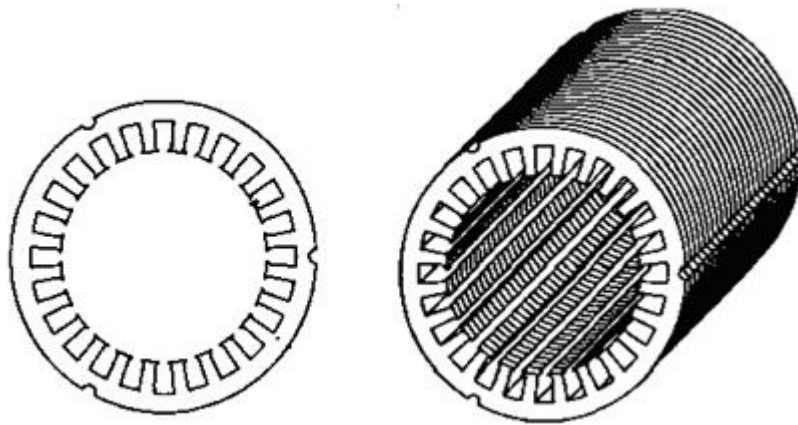
Отдельная группа синхронных машин, где в качестве возбудителя используются **постоянные магниты**, которые питаются от сети постоянного напряжения и управляются с помощью электронных ключей. Такие двигатели называются **бесколлекторными двигателями постоянного тока**.

Синхронные машины также применяются в качестве компенсаторов *реактивной мощности*

## Устройство синхронной машины

Статор синхронной машины имеет аналогичное устройство как и статор асинхронной машины.

Корпус статора представляет собой полый цилиндр, собранный из листов электротехнической стали и имеет пазы. В пазы уложены обмотки. Обмотки называются – обмотками *якоря*. Сердечник вместе с обмотками – *якорем*.



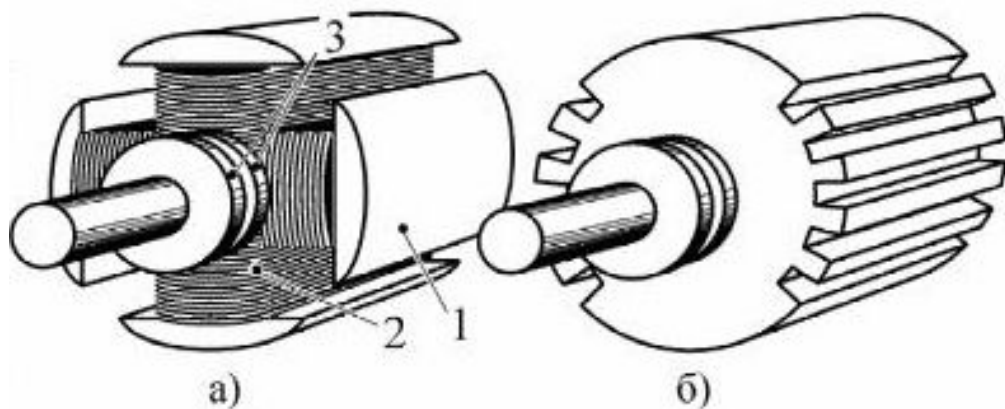
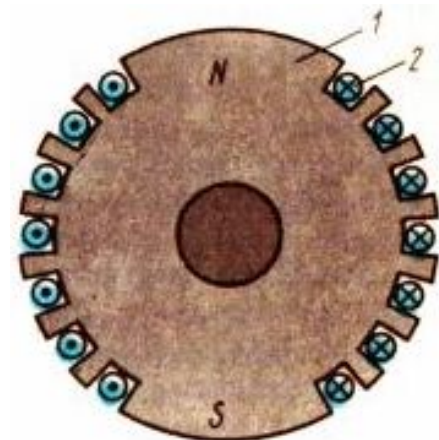
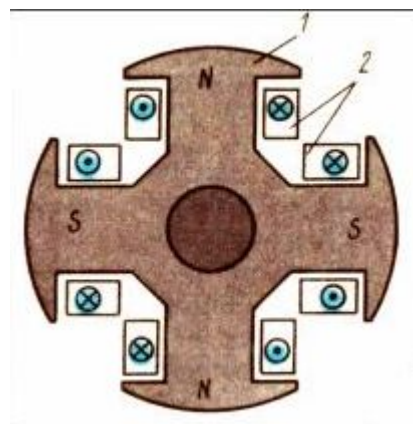
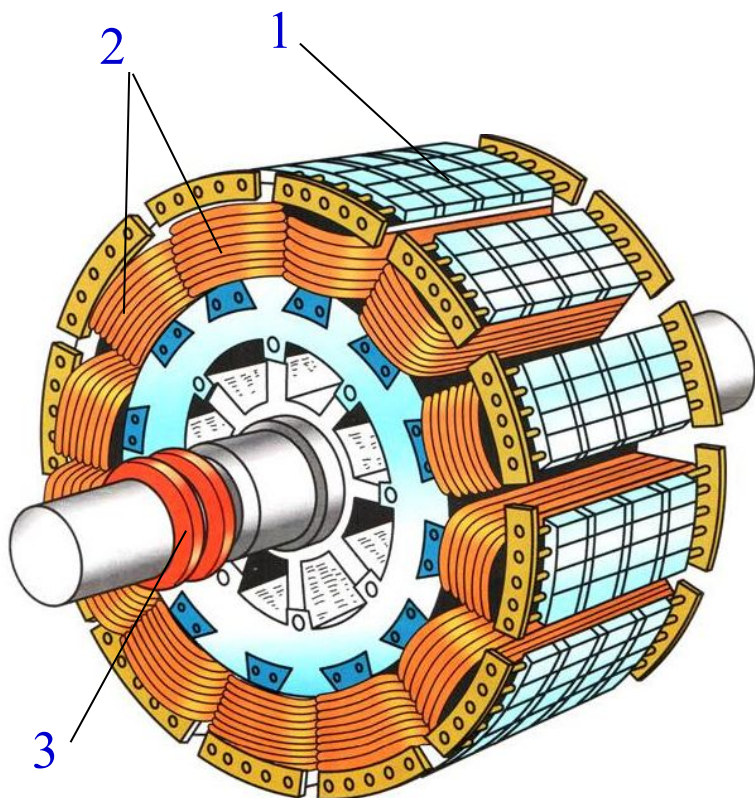
Статор (Якорь) синхронной машины



## Устройство ротора синхронной машины

Ротор машины бывает *явнополюсный* и *невлополюсный*.

На роторе располагается обмотка возбуждения. Обмотка возбуждения подключаются к источнику постоянного тока.



1. магнитопровод;
2. обмотка возбуждения;
3. контактные кольца

Ротор *явнополюсный* и *невлополюсный*

## Ротор синхронной машины

Ротор синхронной машины является возбудителем и создает основной магнитный поток.

*Явнополюсный ротор* применяется в тихоходных машинах (до 1000 об/мин);

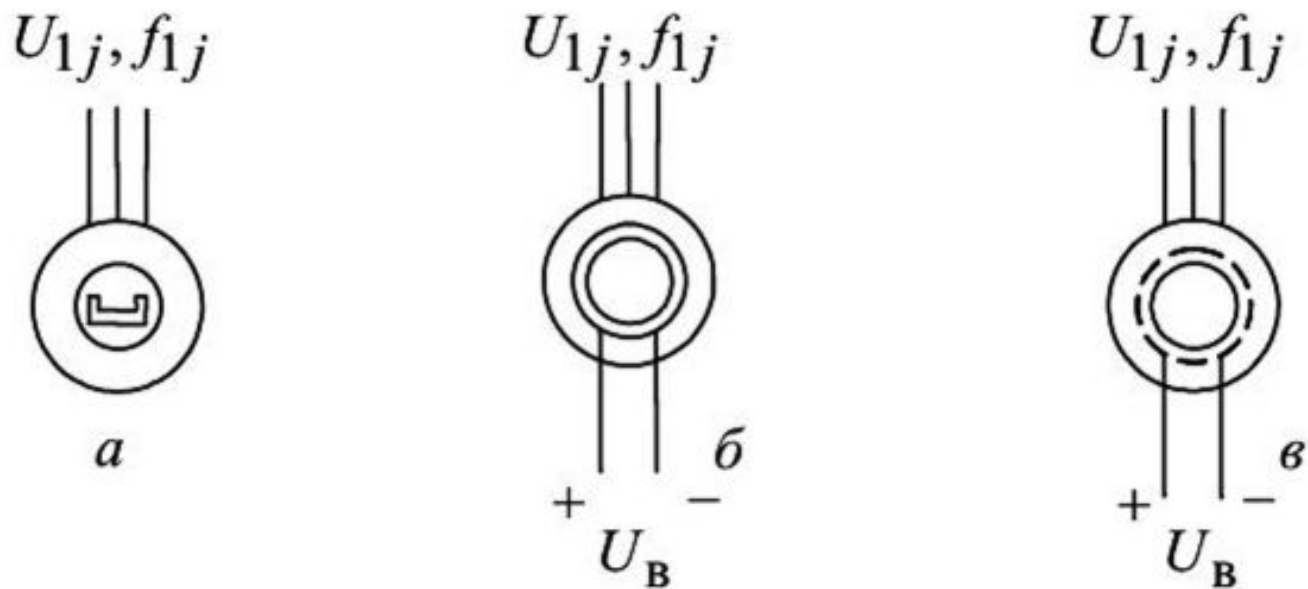
*Неявнополюсный ротор* применяется в высокооборотных машинах;

Чтобы получить частоту  $f=50$  Гц при малой частоте вращения, необходимо большое число пар полюсов  $p$ .

$$f = \frac{p \cdot n_1}{60} = 50 \text{ Гц}$$

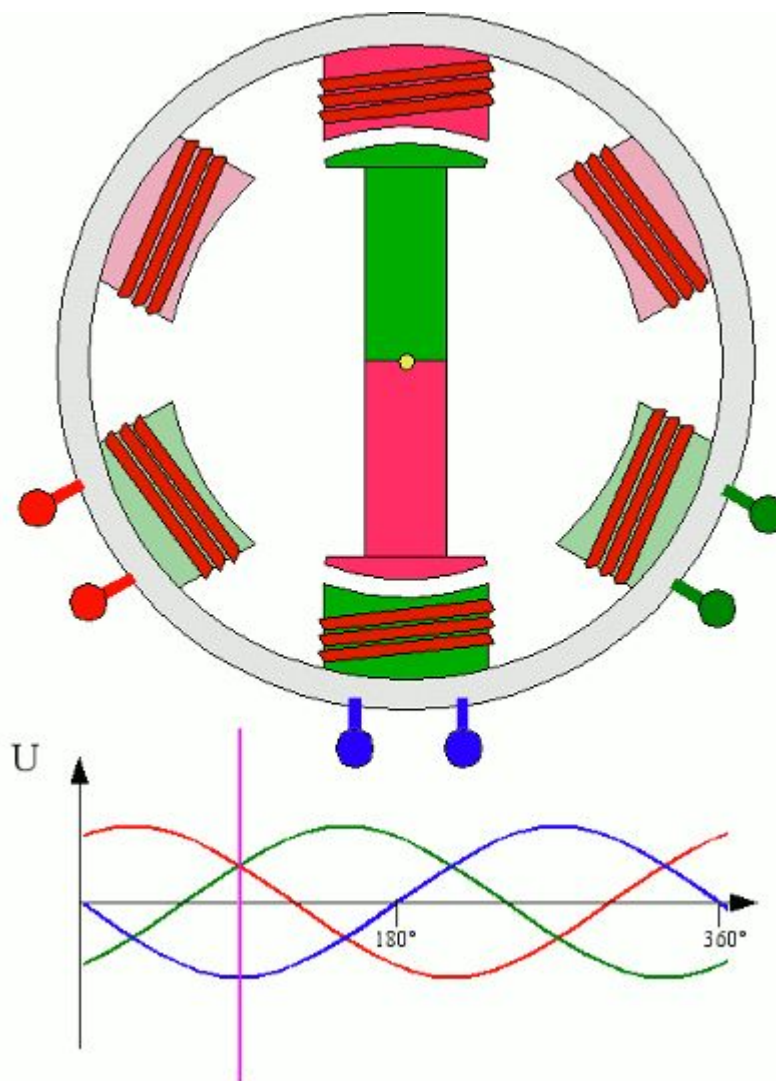
Например, на Саяно-Шушенской ГЭС при частоте вращения ротора  $n_1=142,8$  об/мин, число пар полюсов  $p=21$ .

## Обозначение синхронной машины в электрических схемах



- a* - синхронный двигатель с постоянными магнитами;
- б* - синхронный двигатель с неявнополюсным ротором;
- в* - синхронный двигатель с явнополюсным ротором;

## Принцип действия синхронного генератора



## Принцип действия синхронного генератора

При вращении возбудителя в обмотках якоря, расположенных в пространстве по углом  $120^\circ$  относительно друг другу обмотках якоря возникают переменные ЭДС:

$$e_A = E_0 \sin(\omega t + 0^\circ);$$

$$e_B = E_0 \sin(\omega t + 120^\circ);$$

$$e_C = E_0 \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$\dot{E}_A = E_0 e^{j0^\circ};$$

$$\dot{E}_B = E_0 e^{j120^\circ};$$

$$\dot{E}_C = E_0 e^{-j120^\circ};$$

Действующее значение ЭДС  $E_0$ :  $E_0 = 4,44 f \omega k_{об.} \Phi_{0m}$

- $\Phi_{0m}$  – основной магнитный поток полюса ротора;
- $k_{об.}$  – обмоточный коэффициент машины;
- $f$  – частота индуцированного ЭДС;
- $\omega$  – число витков фазной обмотки статора.



## Параллельная работа синхронного генератора с сетью

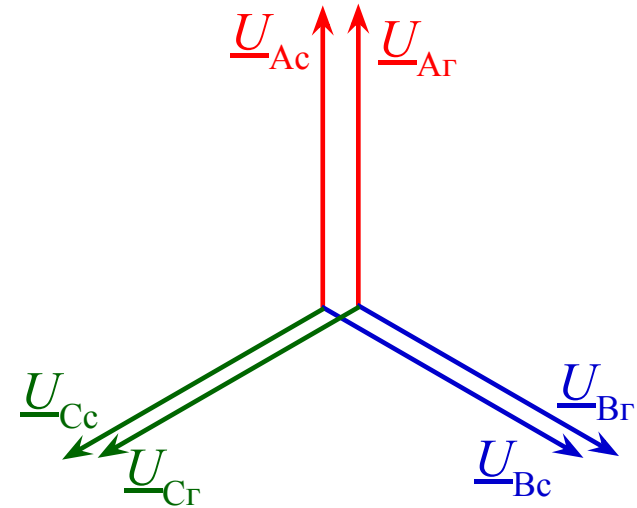
Для подключения синхронного генератора к сети необходимо равенство мгновенных значений фазных напряжений сети и генератора:

$$u_{\phi.c} = U_{\phi.c} \cdot \sin(\omega_c t + \psi_{\phi.c})$$

$$u_{\phi.\Gamma} = U_{\phi.\Gamma} \cdot \sin(\omega_\Gamma t + \psi_{\phi.\Gamma})$$

Последовательность:

1. Чередование фаз генератора совпадает с чередованием фаз генератора;
2. равенство частоты сети и частоты генератора ( $f_c = f_\Gamma$ );
3. равенство напряжений сети и генератора ( $U_c = U_\Gamma$ );
4. равенство начальных фаз сети и генератора ( $\psi_c = \psi_\Gamma$ ).

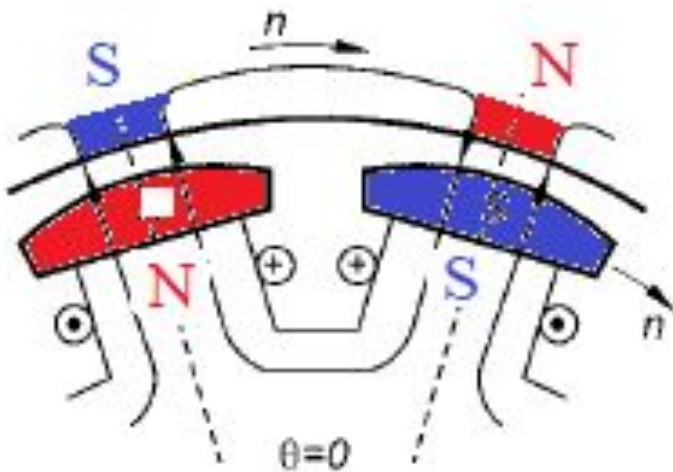


$$U_{A.c} - U_{A.\Gamma} = U_{B.c} - U_{B.\Gamma} = U_{C.c} - U_{C.\Gamma} = 0$$

Процедура выполнения перечисленных операций называется *синхронизацией*.  
Устройство обеспечения – *синхроноскопом*.

## Принцип действия синхронного двигателя

Ток возбуждения создает неизменный магнитный поток;  
Протекающий в обмотках якоря трёхфазный ток создает вращающее магнитное поле.



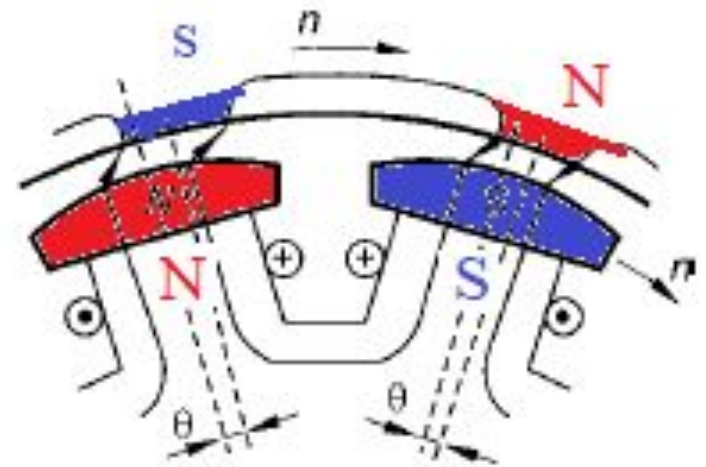
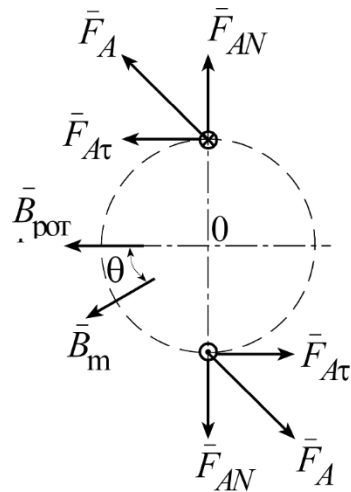
Полюсы статора притягивают полюсы ротора и начинают вместе (синхронно) двигаться.  
Скорость вращения магнитного потока статора и ротора (синхронная скорость):

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

$k_{\text{обм.1}}, k_{\text{обм.2}}$  – обмоточные коэффициенты машины

# Принцип действия синхронного двигателя

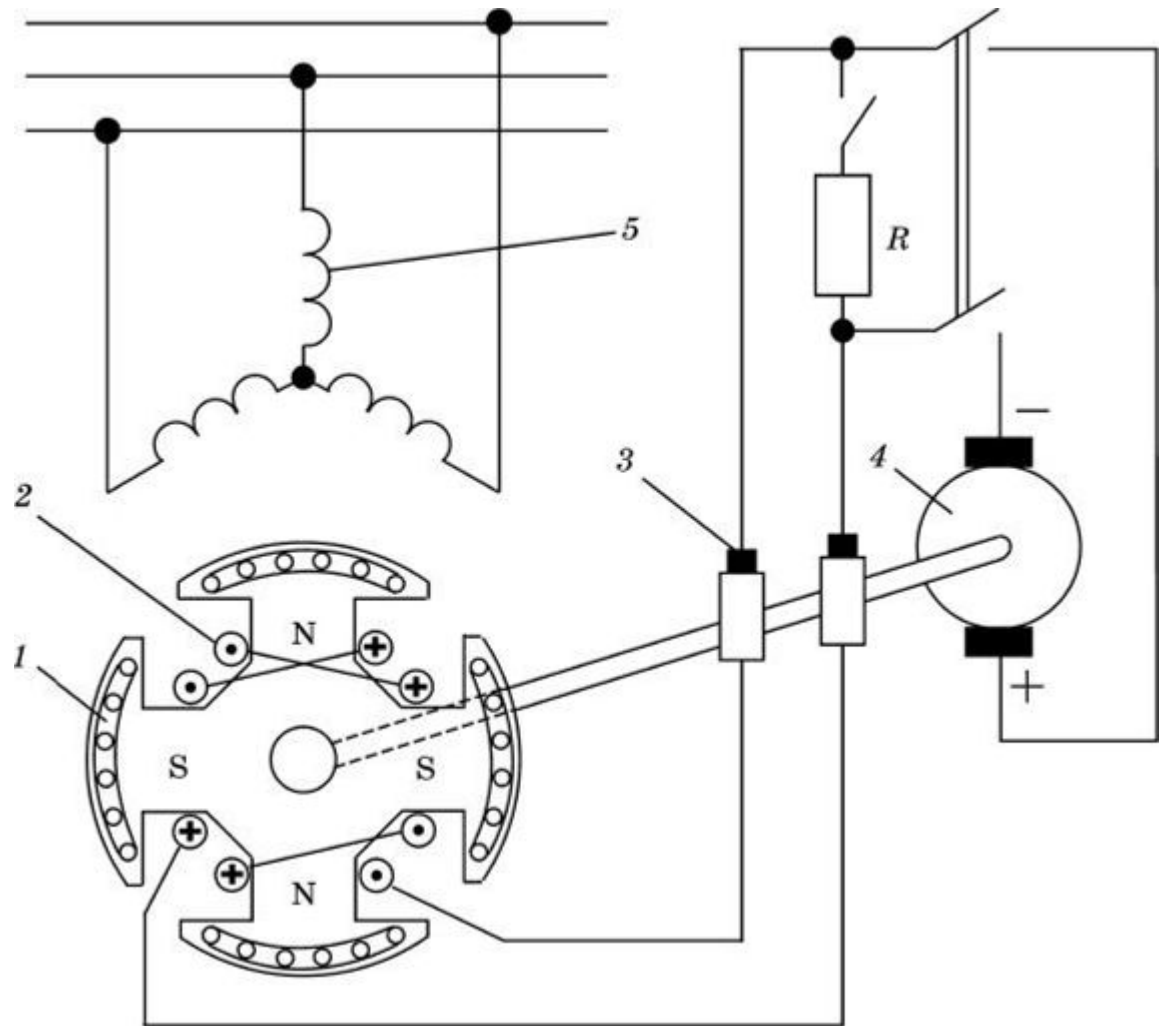
При приложении момента на вал двигателя  
Магнитные линии искривляются и между  
векторами  $B_m$  и  $B_{\text{рот}}$  появляется угол  $\theta$ .



# Пуск синхронного двигателя

Асинхронный пуск;  
Генераторный пуск.

- 1 пусковая обмотка;
- 2 обмотка возбуждения;
- 3 контактные кольца с щетками;
- 4 генератор постоянного тока;
- 5 обмотки якоря.



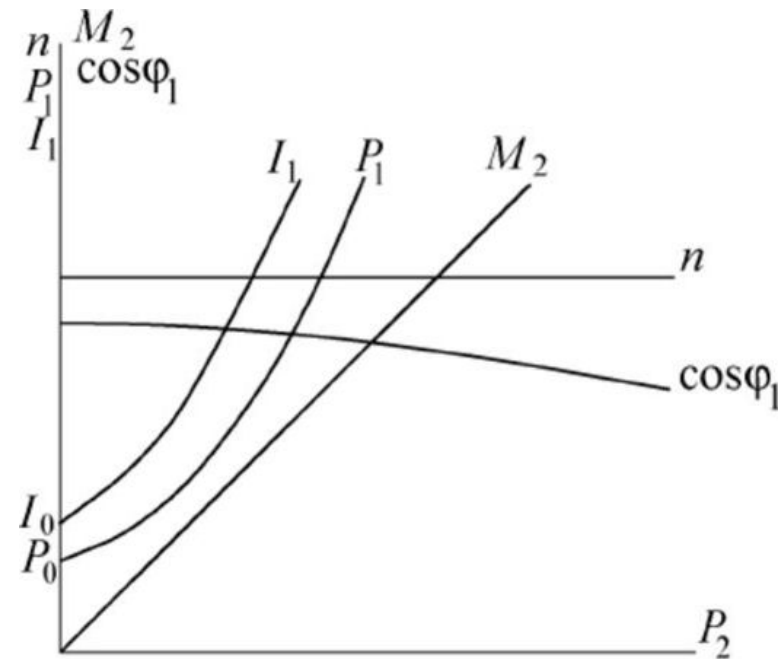
## Характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками называют зависимости

$n = f(P_2)$ ;  $M = f(P_2)$ ;  $I = f(P_2)$ ;  $\cos\phi = f(P_2)$   $\eta = f(P_2)$ ; при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  и  $I_B = \text{const}$ .

Рабочие характеристики соответствуют режиму холостого хода, при токе  $I_B$ , когда  $\cos\phi = 1$ .

В режиме холостого хода  $M = M_0$ , т.е. момент  $M$  определяется потерями в машине.



СД обладает свойством саморегулирования: при изменении момента на валу изменяется угол  $\theta$  и  $M_{ЭМ} = M_n$ . При этом изменяются  $P$  и ток статора. Но частота вращения остается неизменной: механическая характеристика СД – зависимость  $n(M)$  – представляет собой горизонтальный отрезок прямой.

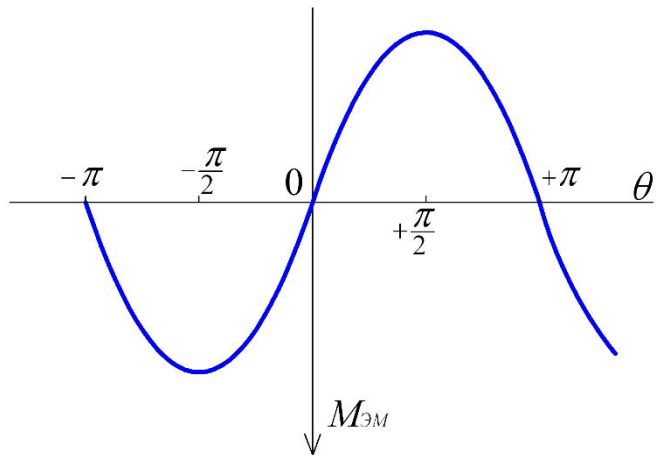
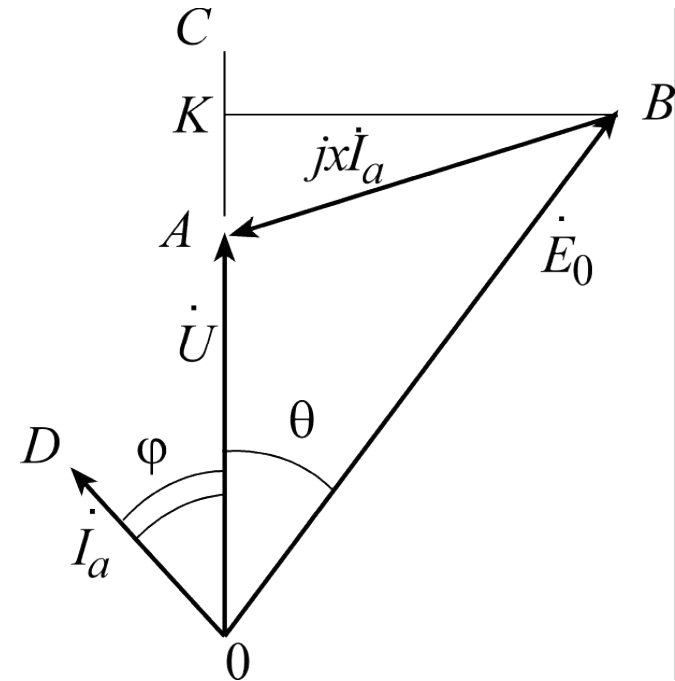
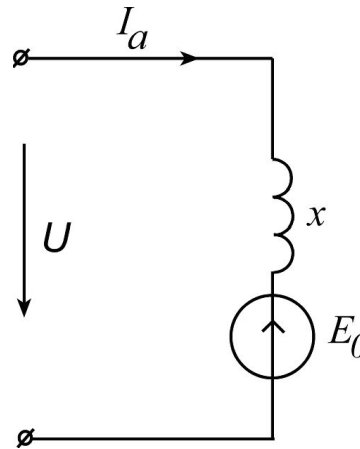


## Момент, угловая характеристика и механическая характеристика синхронного двигателя

$$M_{эм} = \frac{P_2}{\Omega} \quad P_1 = 3U I_a \cos \varphi$$

Примем, что  $\eta = 1$ , потому  $P_2 = P_1$

$$M_{эм} = \frac{3U I_a \cos \varphi}{\Omega}$$



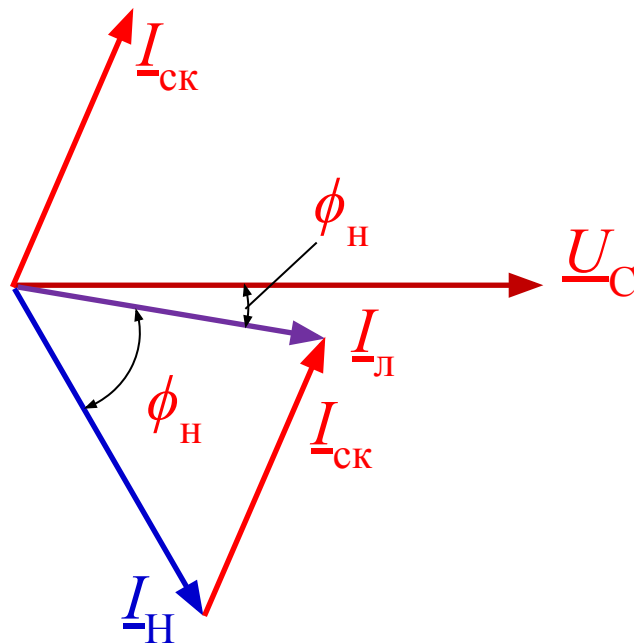
$$M_{эм} = \frac{3U E_0}{\Omega x} \sin \theta$$

# Синхронный компенсатор

*Синхронным компенсатором* называют синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности.

Активная составляющая тока якоря машины мала по сравнению с номинальным током, поэтому можно считать, что весь номинальный ток является *реактивным*.

Основным потребителем электрической энергии являются всевозможные электрические машины, которые могут быть заменены активно – индуктивной схемой.



$$I_L = I_H + I_{СК}$$

$$I_L < I_H$$

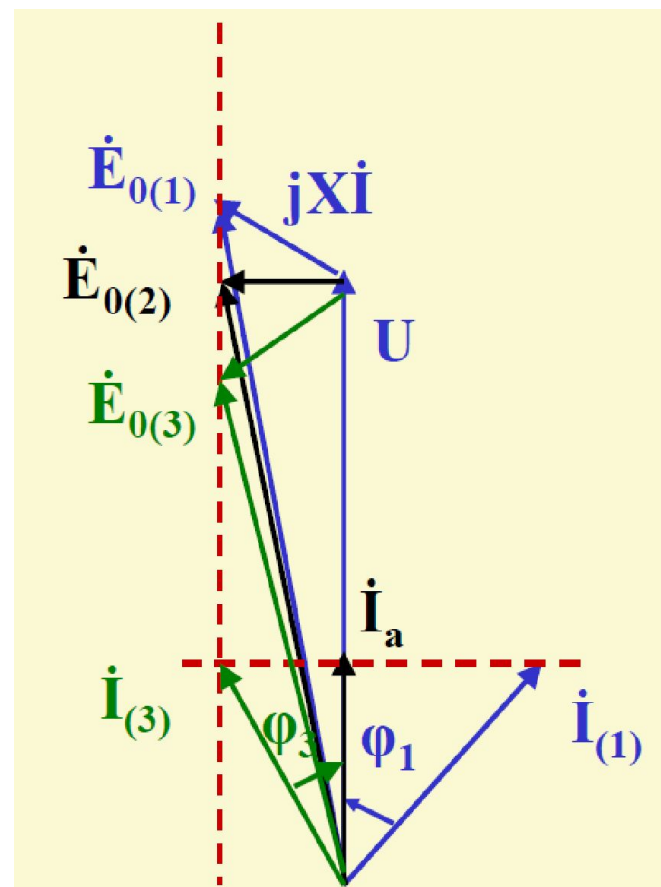
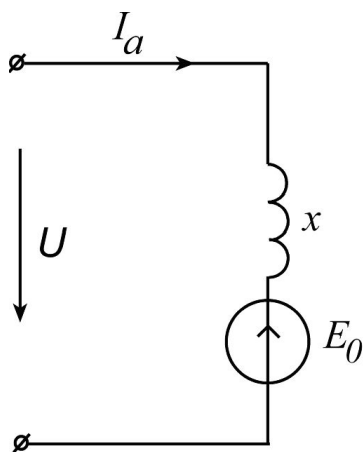
$$\cos \varphi_L > \cos \varphi_H$$

$$P_L = I_L^2 R_L$$

# U-образная характеристика синхронной машины

U-образная характеристика - зависимость тока статора от тока возбуждения ротора при постоянной активной мощности. Показывают возможность регулирования реактивной мощности.

Изменение тока возбуждения ротора СГ приводит к изменению характера реактивной мощности: при большом токе ротора (при перевозбуждении) реактивная мощность имеет **индуктивный характер**, при недо возбуждении – **емкостной характер**.



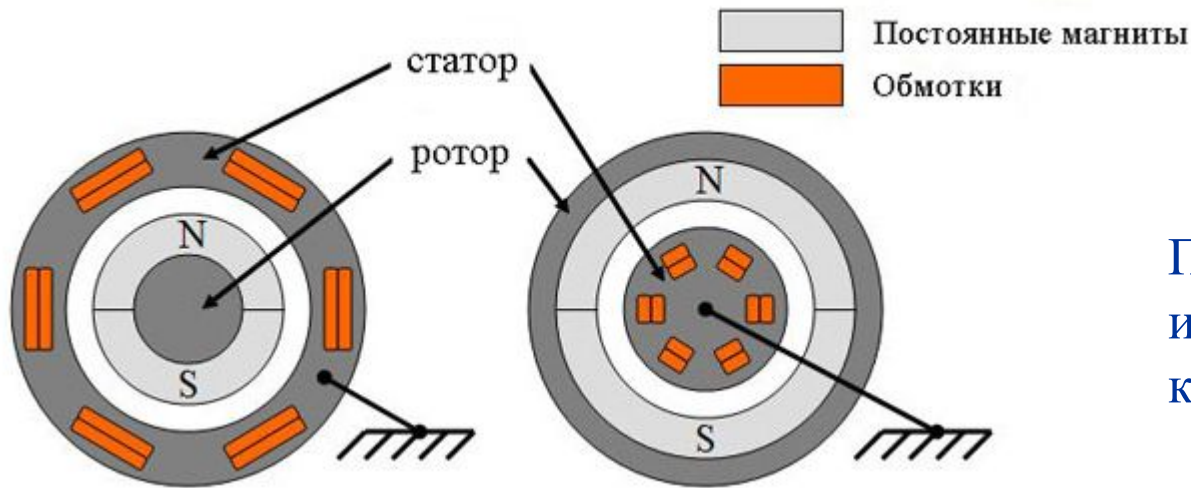
# Разновидности синхронных двигателей малой мощности

1. Синхронный двигатель с обмоткой возбуждения;
  2. Синхронный двигатель с постоянными машинами;
  3. Гистерезисный двигатель;
  4. Реактивный двигатель;
  5. Шаговый двигатель:
    - шаговый двигатель с постоянными магнитами;
    - реактивный шаговый двигатель;
- униполярные шаговые двигатели;
  - биполярные шаговые двигатели;

## Способы управления:

- волновое;
- пошаговое;
- полушаговое

# Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ)



Постоянные магниты имеют высокую коэрцитивную силу.

Обмотки статора создают вращающее магнитное поле. Данное поле взаимодействуя с постоянным полем ротора создает вращающий момент на валу.

СДМП не имеет пускового момента. Магнитное поле ротора не может сцепляться с бегущим полем статора. Поэтому для пуска применяют электронные схемы управления.

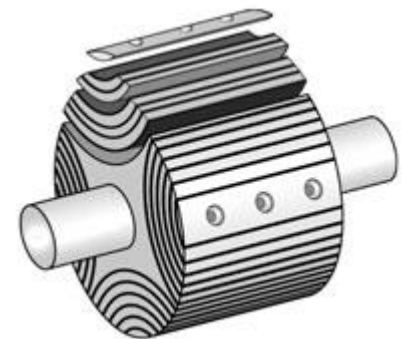
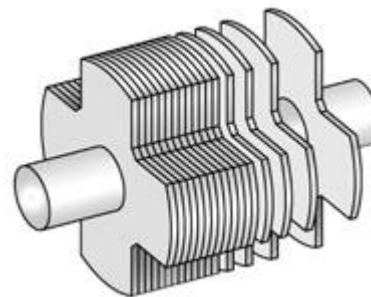
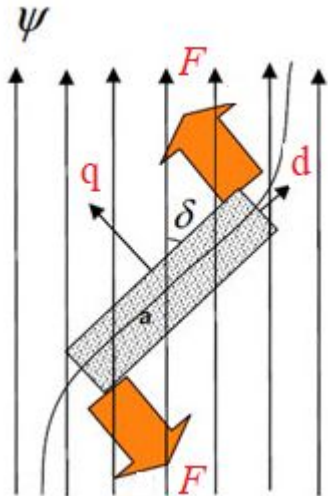
Для управления двигателем необходимо информация о положении ротора. Зная положение ротора формируют закон изменения фазных токов обмотки статора. Датчики положения бывают: **оптические; датчики Холла.**



# Синхронный реактивный двигатель

*Синхронный реактивный электродвигатель* - двигатель, вращающий момент которого обусловлен неравенством магнитных проводимостей по поперечной и продольной осям ротора, не имеющего обмоток возбуждения или постоянных магнитов.

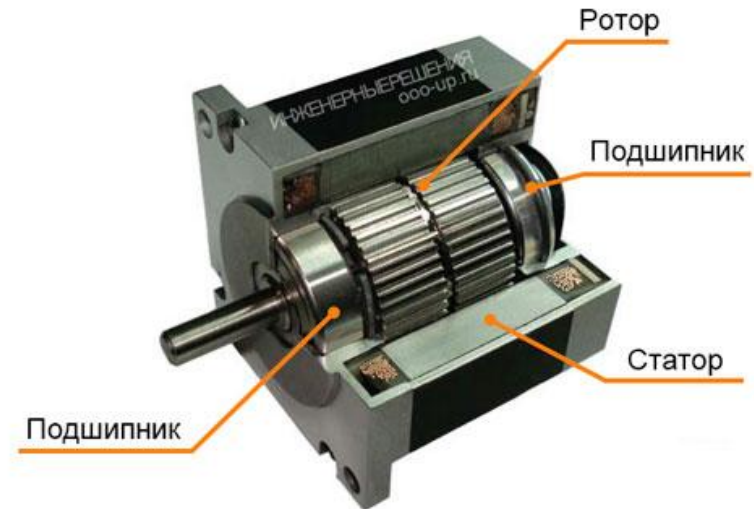
Переменный ток, проходящий по обмоткам статора, создает вращающее магнитное поле в воздушном зазоре электродвигателя. *Момент* создается, когда ротор пытается установить свою наиболее магнито проводящую ось с приложенным полем, для того чтобы минимизировать магнитное сопротивление в магнитной цепи.



# Шаговый двигатель

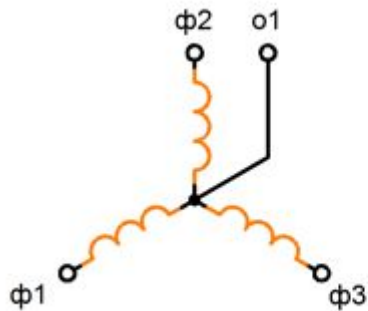
*Шаговый двигатель* - двигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет импульсов сигнала управления

*Шаговый двигатель* преобразует последовательность импульсов управления в дискретные повороты без датчиков обратной связи.



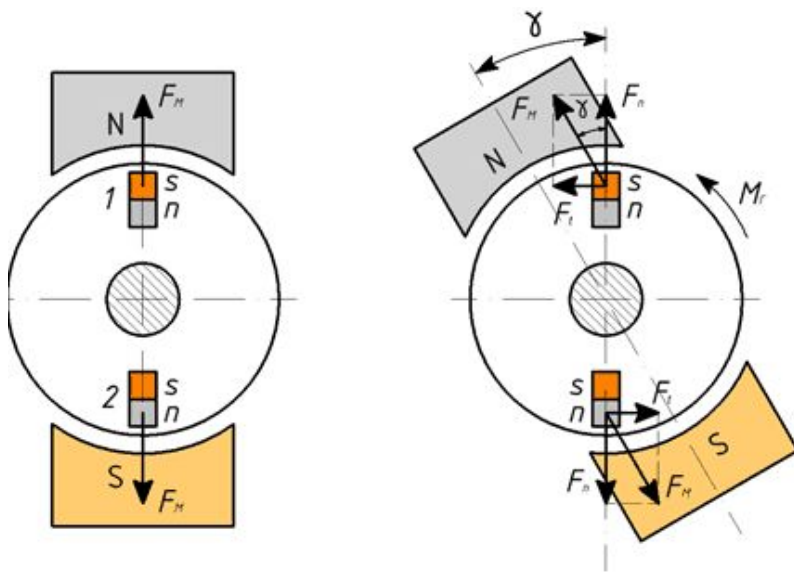
Шаг поворота:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N_p} - \frac{360^\circ}{N_{ст}}$$

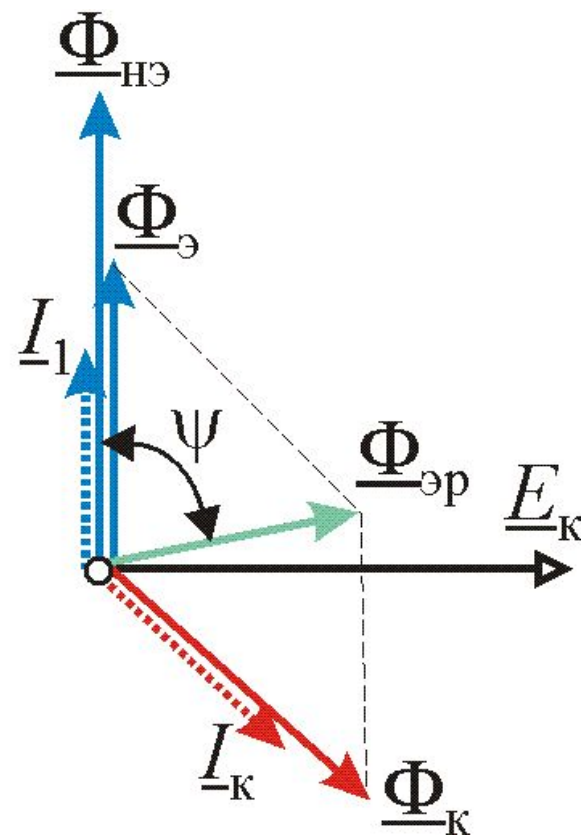
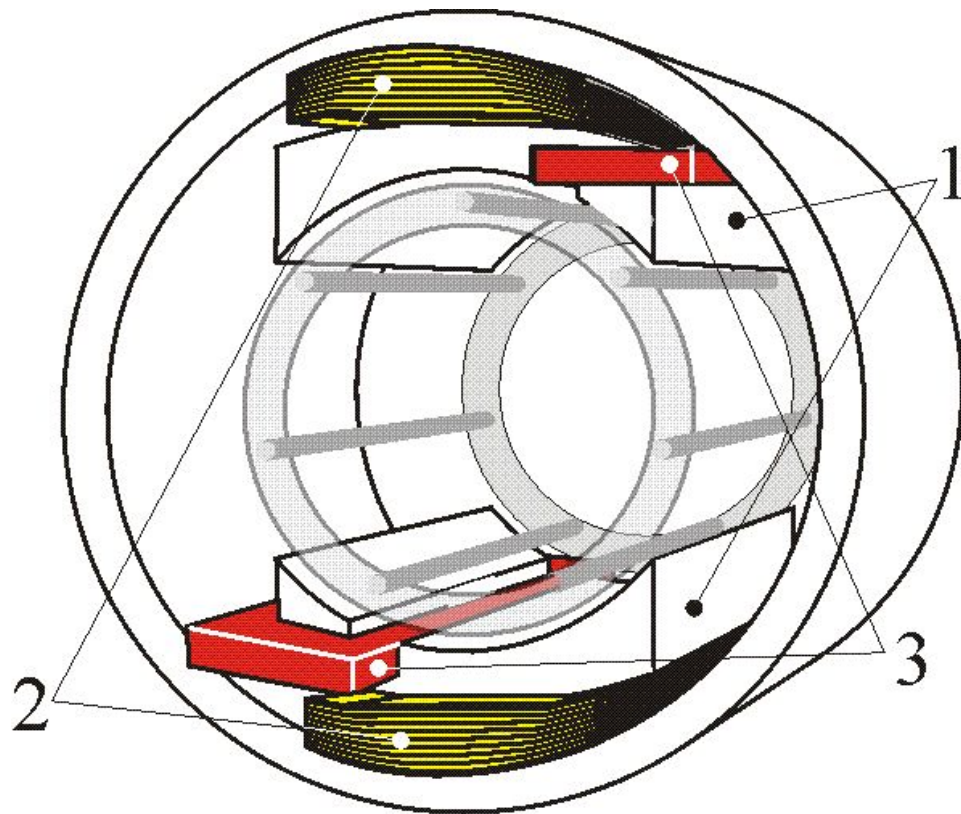


# Гистерезисный двигатель

**Гистерезисный двигатель** - это неявнополюсный **синхронный двигатель**, без обмотки возбуждения, ротор которого выполнен из магнитного материала с большим остаточным намагничиванием, пуск в ход которого осуществляется за счет потерь на гистерезис в роторе.



# Конструктивная схема однофазного асинхронного двигателя с экранированными (расщеплёнными) полюсами



- 1 – полюсы статора
- 2 – обмотка полюсов
- 3 – короткозамкнутые  
ВИТКИ

