



*Пермский институт железнодорожного транспорта  
филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Уральский государственный университет путей  
сообщения»  
(ПИЖТ УрГУПС)*

*Дисциплина: «Информатика»*

*Тема занятия:*

**«Электротехника. Электрические машины»**

*Преподаватель:*

*кандидат технических наук, доцент*

**Мормуль Роман Викторович**

# Типы электрических машин

## 1. Электрические машины переменного тока

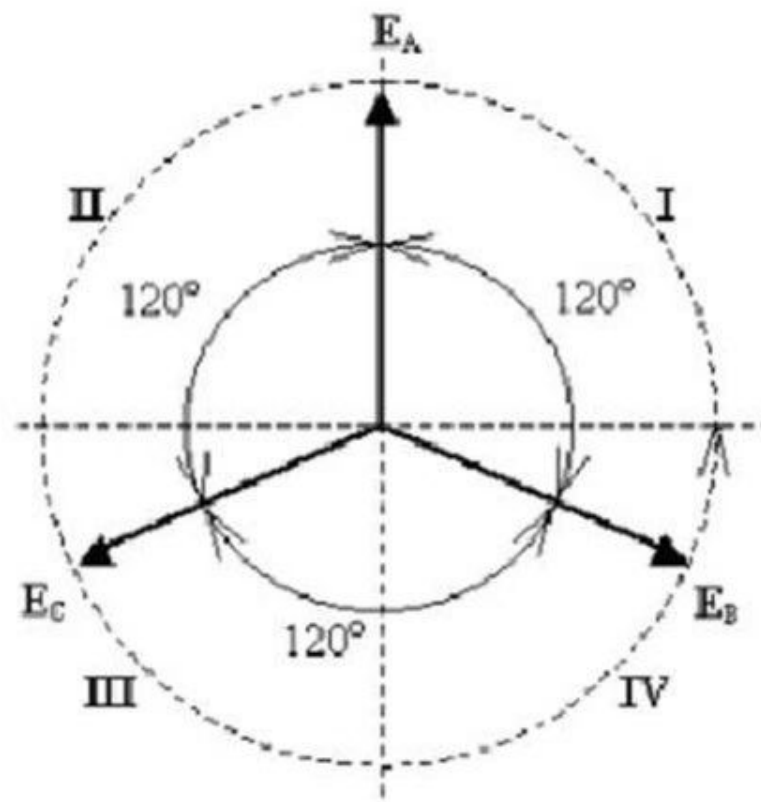
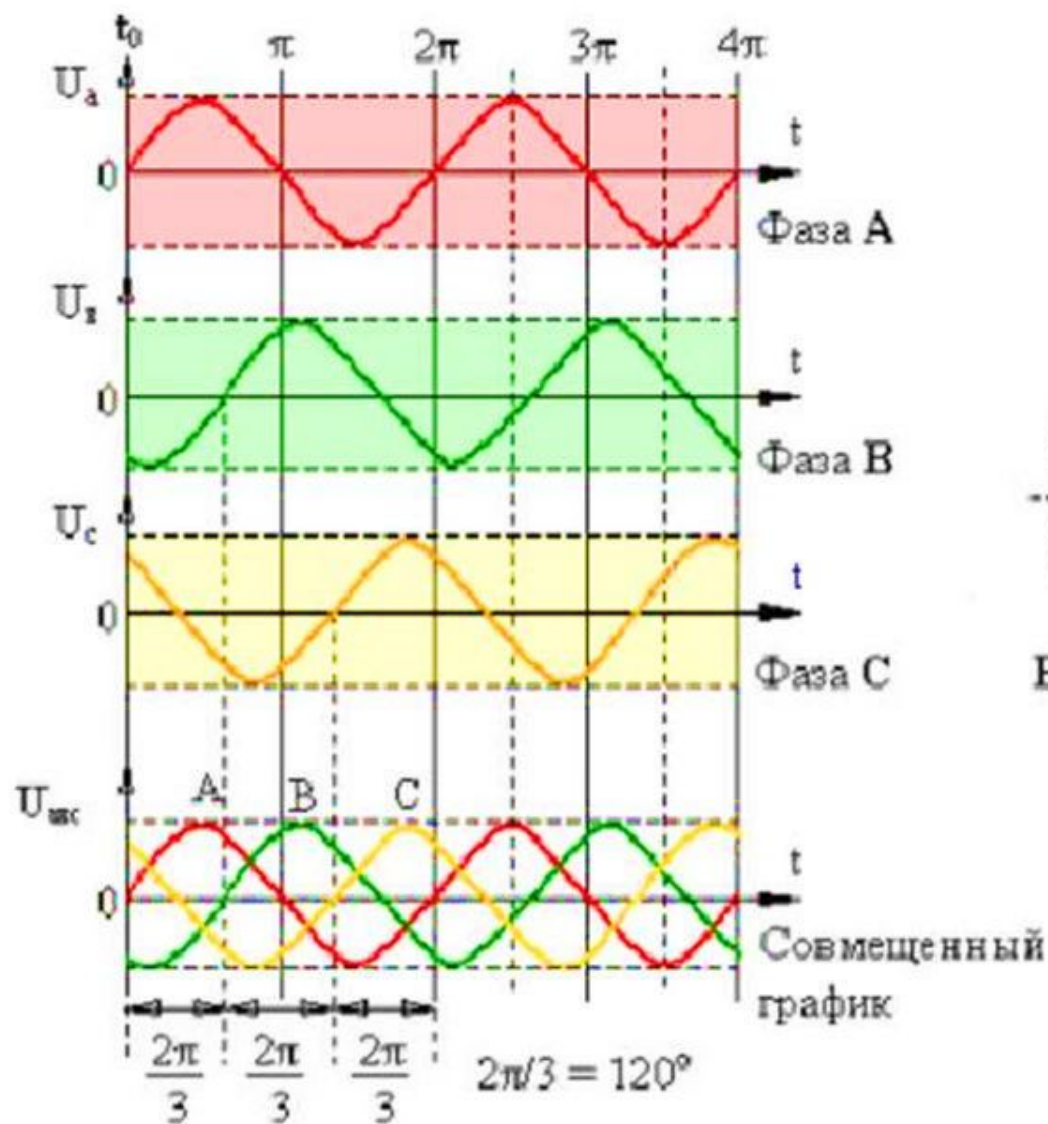
Синхронные машины: генераторы, двигатели, компенсаторы.

Асинхронные машины: двигатели

## 2. Электрические машины постоянного тока

Двигатели и генераторы

# Трехфазное вращающееся ЭМ-поле



# Асинхронные машины

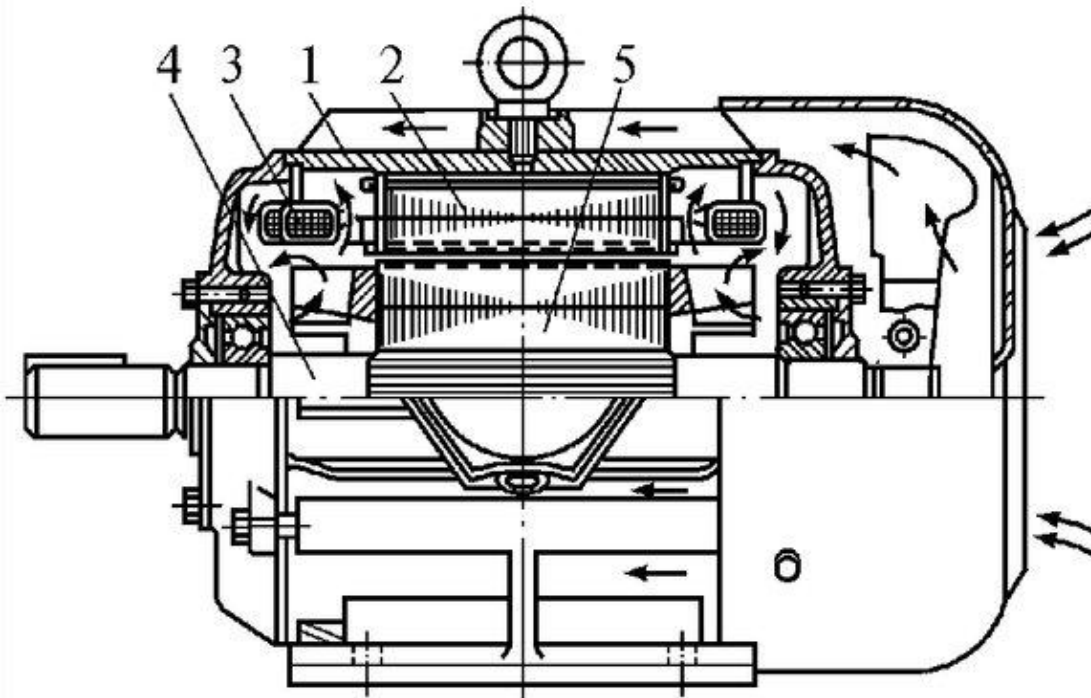
**Асинхронная машина** – двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна (первичная) получает питание от сети с частотой  $f_1$ , а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате индукции. Их частота  $f_2$  является функцией частоты вращения ротора.

Первая обмотка располагается в пазах статора – неподвижной части, вторая – в пазах ротора – подвижной части.

- Асинхронные двигатели являются самыми распространёнными из всех двигателей.



## Устройство асинхронного двигателя



**Статор** – неподвижная часть двигателя – имеет цилиндрическую форму.

- 1-корпус
- 2-сердечник
- 3-обмотка

**Магнитопровод статора**  
собирается из тонких листов электротехнической стали.

**Ротор асинхронного двигателя** – вращающаяся часть – состоит из:

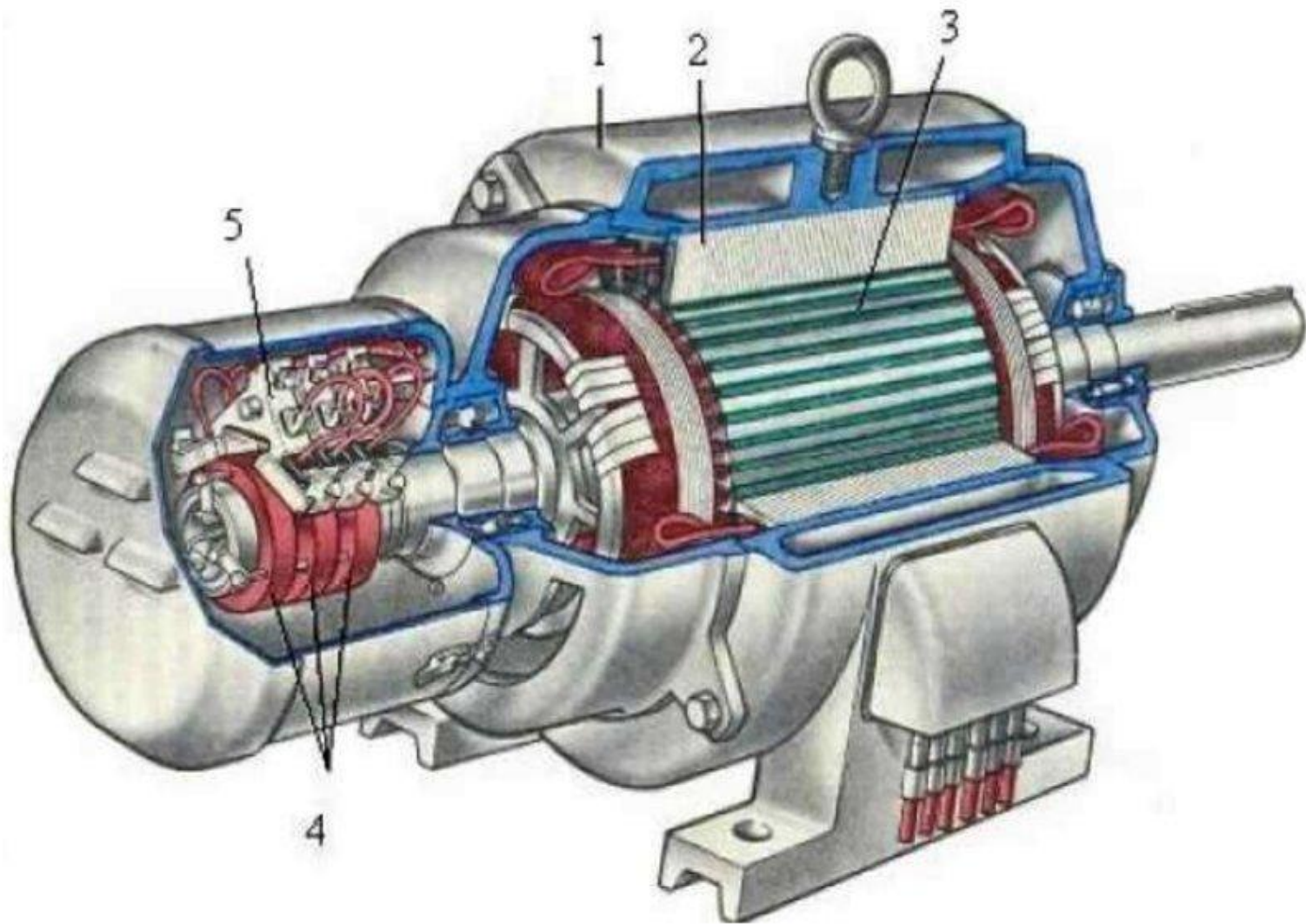
- 4-стальной вал,
- 5-магнитопровод,

### Обмотка ротора:

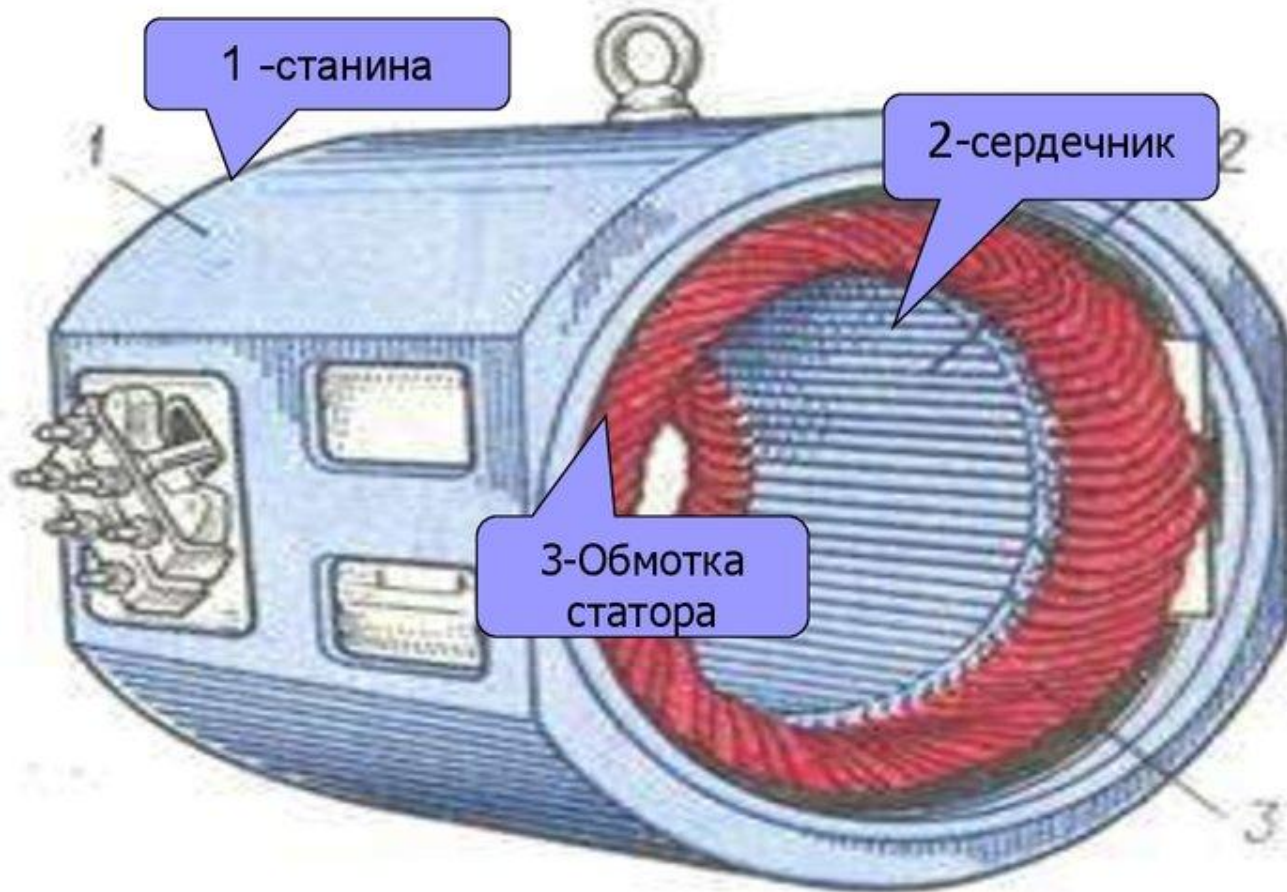
-**короткозамкнутая** (выполняется из алюминиевых или медных стержней, замкнутых с обоих торцов ротора накоротко)

-**фазная** (имеет трехфазную обмотку, соединенную в звезду)

# АД с фазным ротором

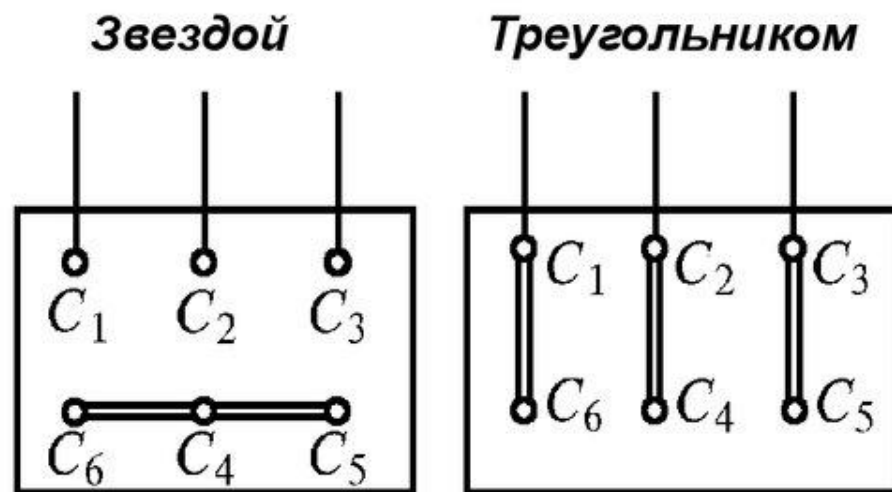
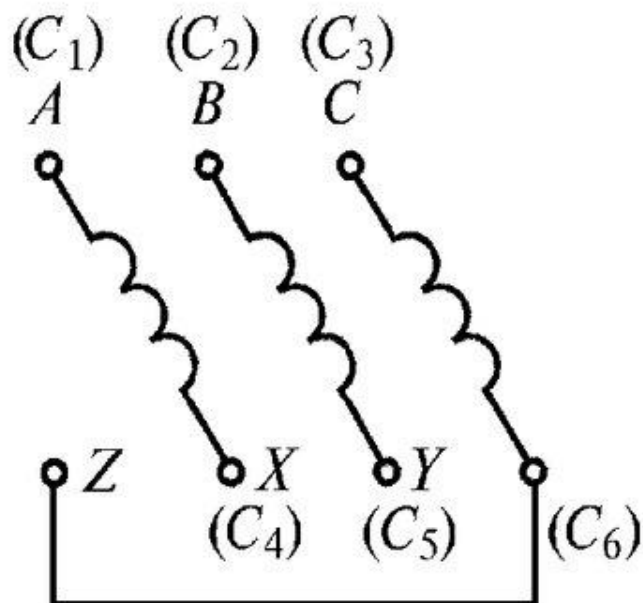


# Устройство трёхфазного двигателя





- Соединение обмотки статора осуществляется в коробке, в которую выведены начала фаз  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и концы фаз  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ .

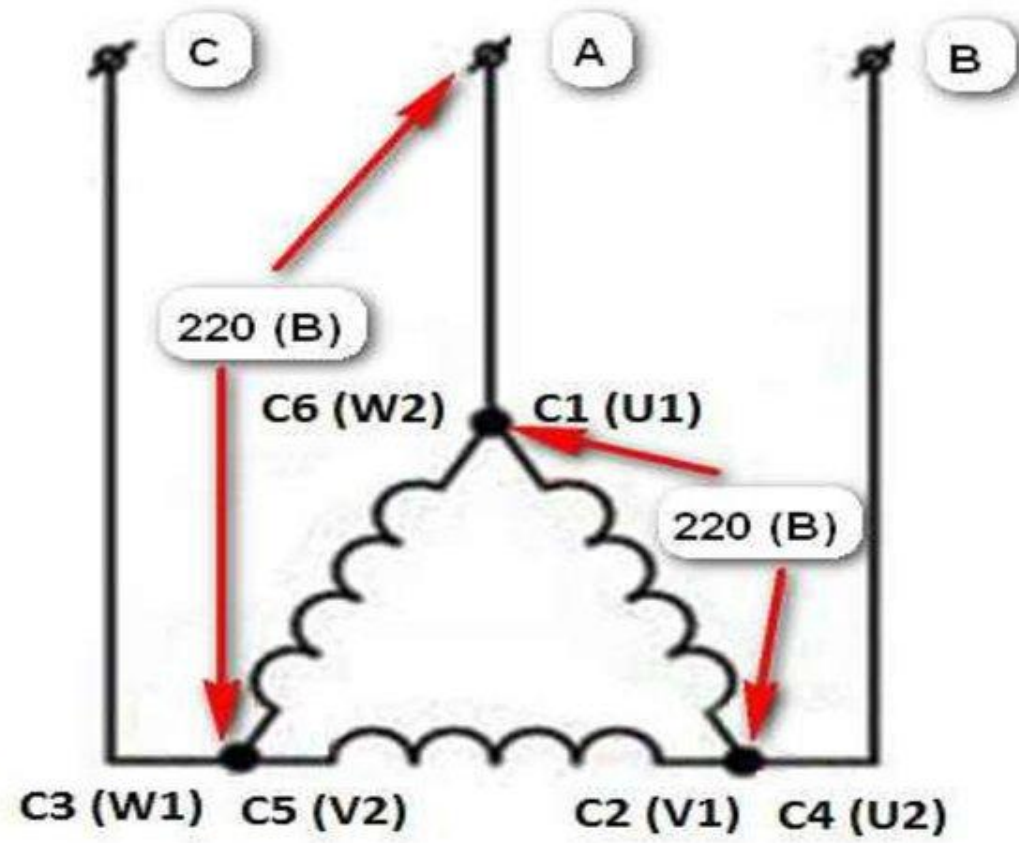




# Схема соединения обмоток АД

Схема соединения "Треугольник"

Сеть ~220 (В)

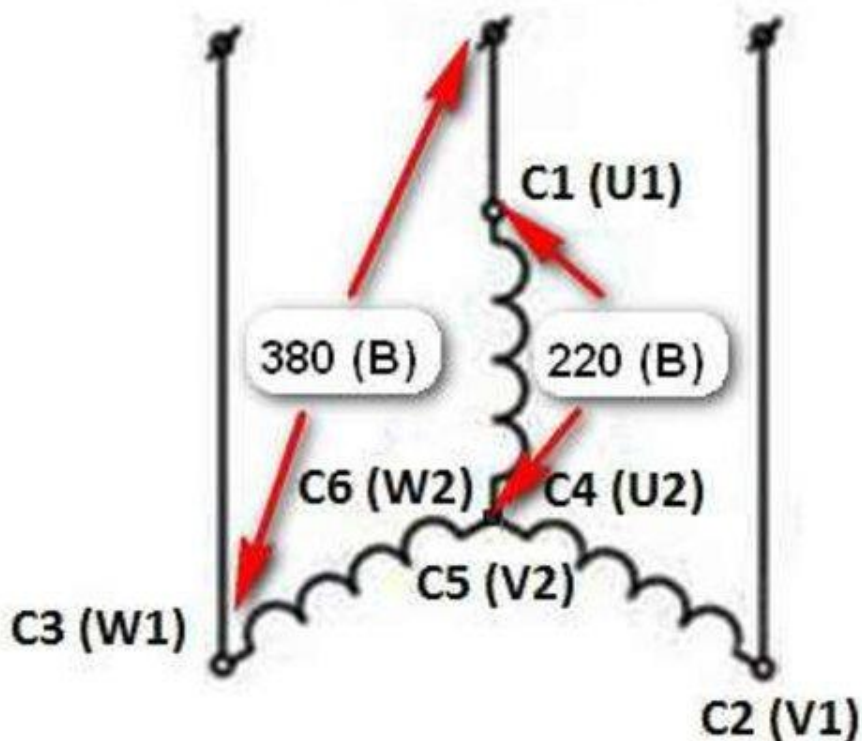


# Схема соединения обмоток АД



Схема соединения "Звезда"

Сеть ~380 (В)

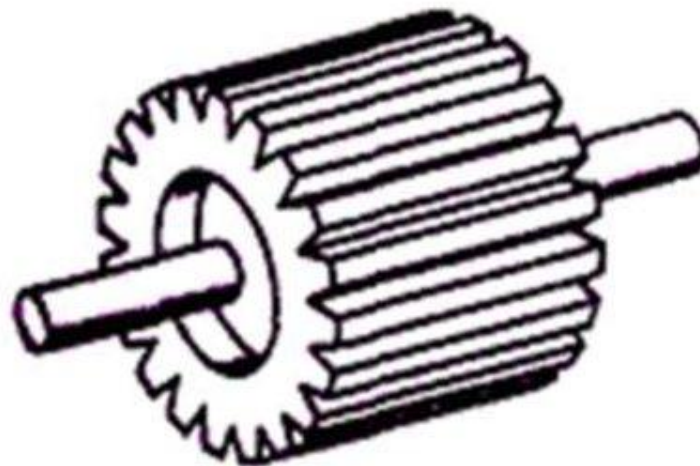


# Конструкция ротора.

**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.

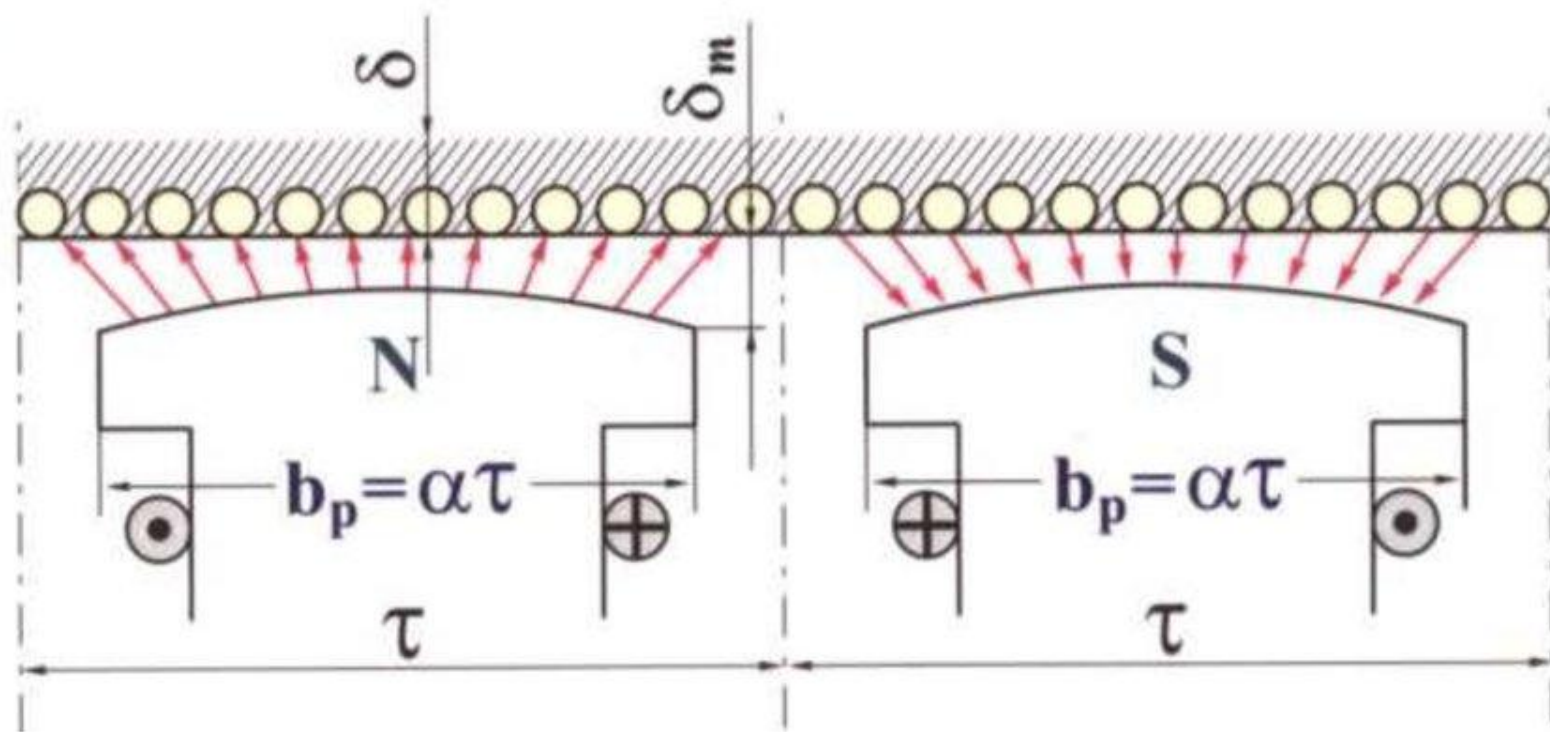


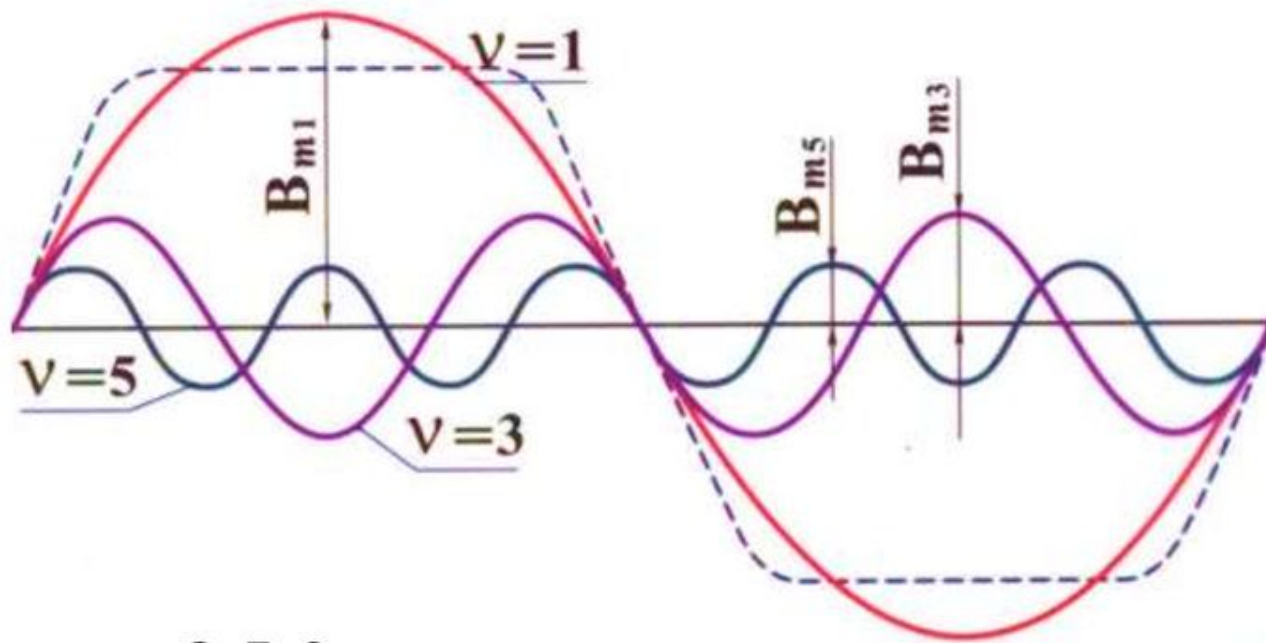
Сердечник ротора



ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТОК  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭДС от основной гармоники магнитного поля ( $V=1$ )





### Э.Д.С. проводника

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot \tau \cdot l_{\delta}$$

$$e = - d\Phi/dt$$

(закон электромагнитной индукции)

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{м пр}} \cdot \sin \omega t;$$

$$E_{\text{м пр}} = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot v, \text{ где } v = \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{2p}{2p} = 2\tau \frac{pn}{60} = 2\tau f.$$

При синусоидальном распределении индукции

$$B_{\text{м1}} = B_{\delta} = \frac{\pi}{2} B_{\text{ср}},$$

где  $B_{\text{ср}}$  - среднее значение индукции в воздушном зазоре.

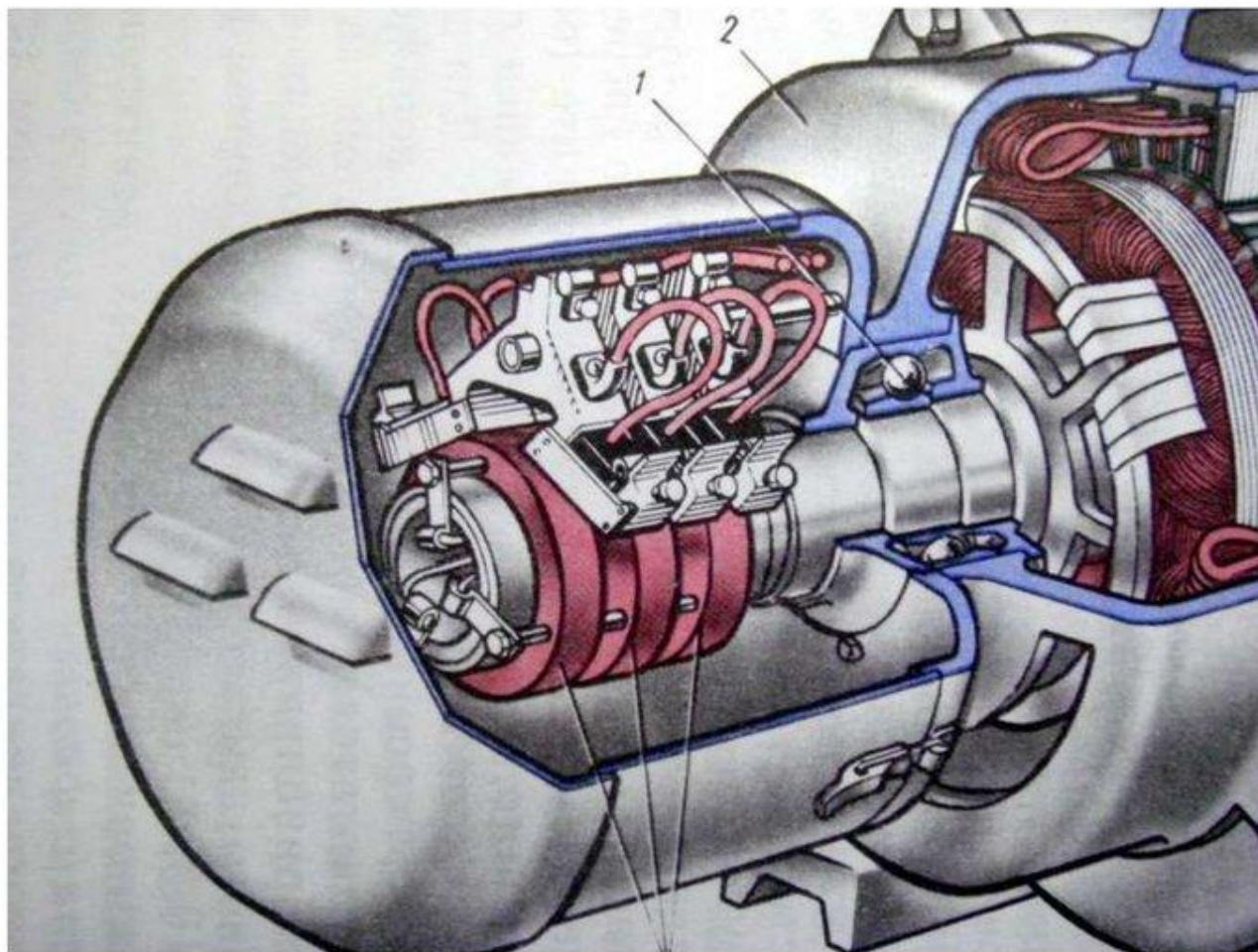
Следовательно,

$$E_{\text{м пр}} = \frac{\pi}{2} \cdot 2f l_{\delta} \cdot \tau B_{\text{ср}} = \pi f_1 \Phi \text{ и}$$

действующее значение ЭДС проводника

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{м пр}}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \Phi = 2,22 f_1 \Phi .$$

# Коллекторный узел





# Принцип действия асинхронной машины и режимы ее работы

- Трехфазная обмотка статора создает магнитное поле, вращающееся со скоростью  $n_1 = \frac{60f}{P}$
- Это поле пронизывает ротор и в его обмотках возникает переменный электрический ток
- Взаимодействие переменного тока в роторе с вращающимся магнитным полем статора создаёт вращающийся момент.

$$M = c\Phi I_2 \cos\psi_2,$$

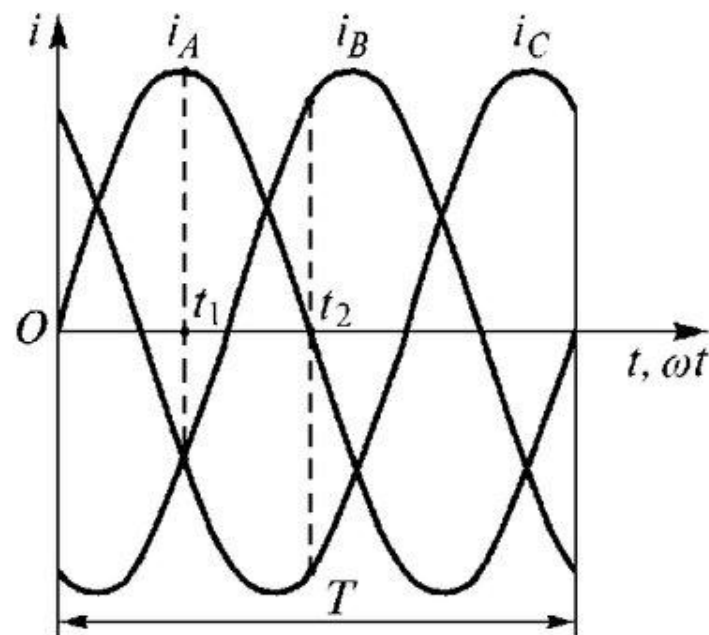
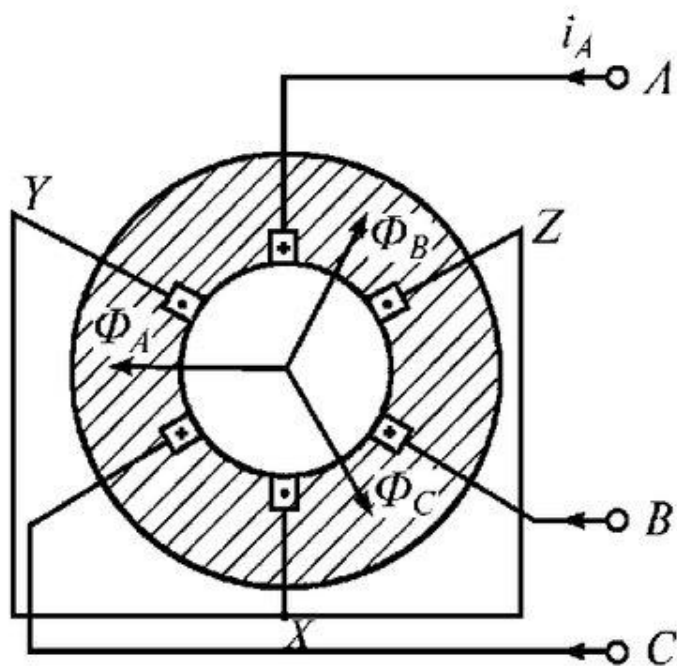
$c$  - констр.коэфф.-т,  $\Phi$ -магнитный поток,  $I_2$  - ток в роторе,  
 $\psi_2$  - сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора

- Ротор двигателя начинает вращаться в ту же сторону, что и статор, но с небольшим отставанием, т.е. асинхронно

Скольжение асинхронной машины  $s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%$

# Получение вращающегося магнитного поля

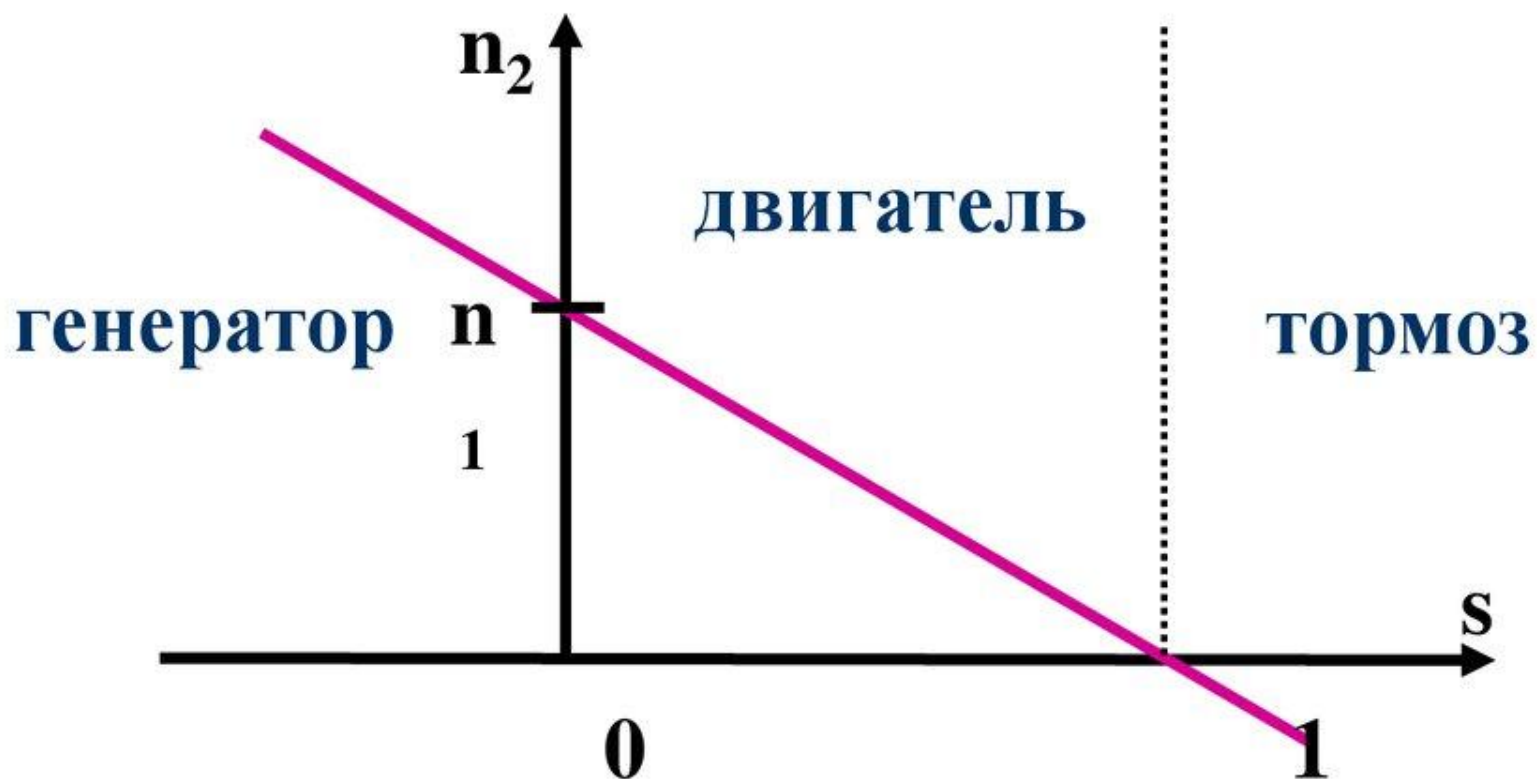
- Если по системе проводников, распределенных в пространстве по окружности, протекают токи, сдвинутые по фазе, то в пространстве создается вращающееся поле.



В зависимости от соотношения  $n_2$  и  $n_1$  различают

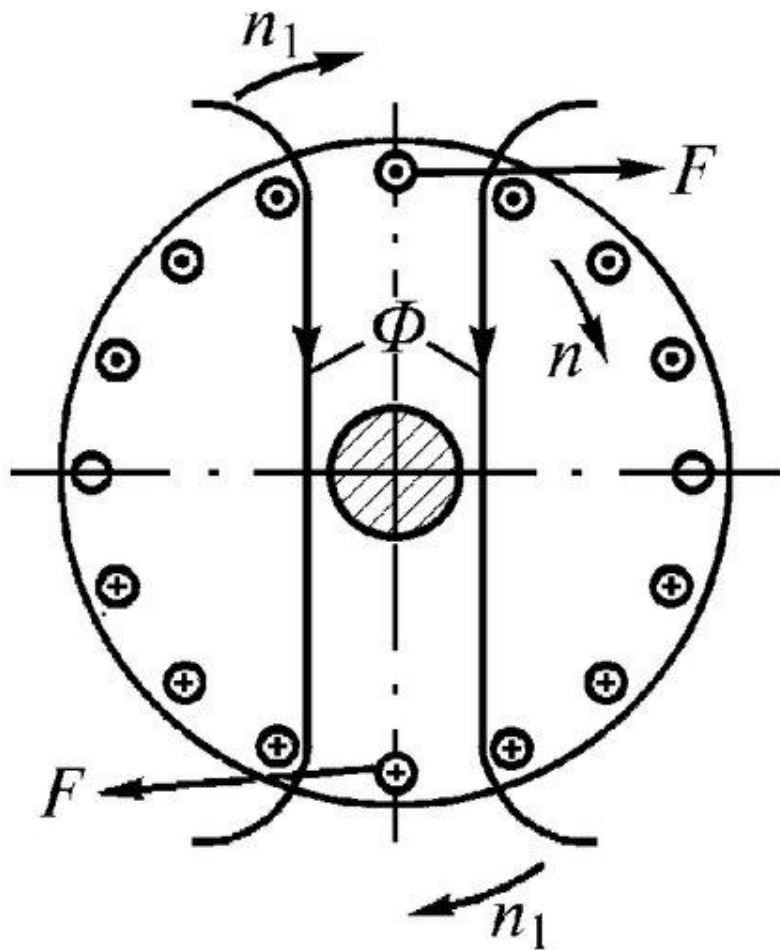
**три режима работы:**

- в режиме двигателя;
- в режиме генератора;
- в режиме электромагнитного тормоза.





# Работа в режиме двигателя



При  $n < n_1$

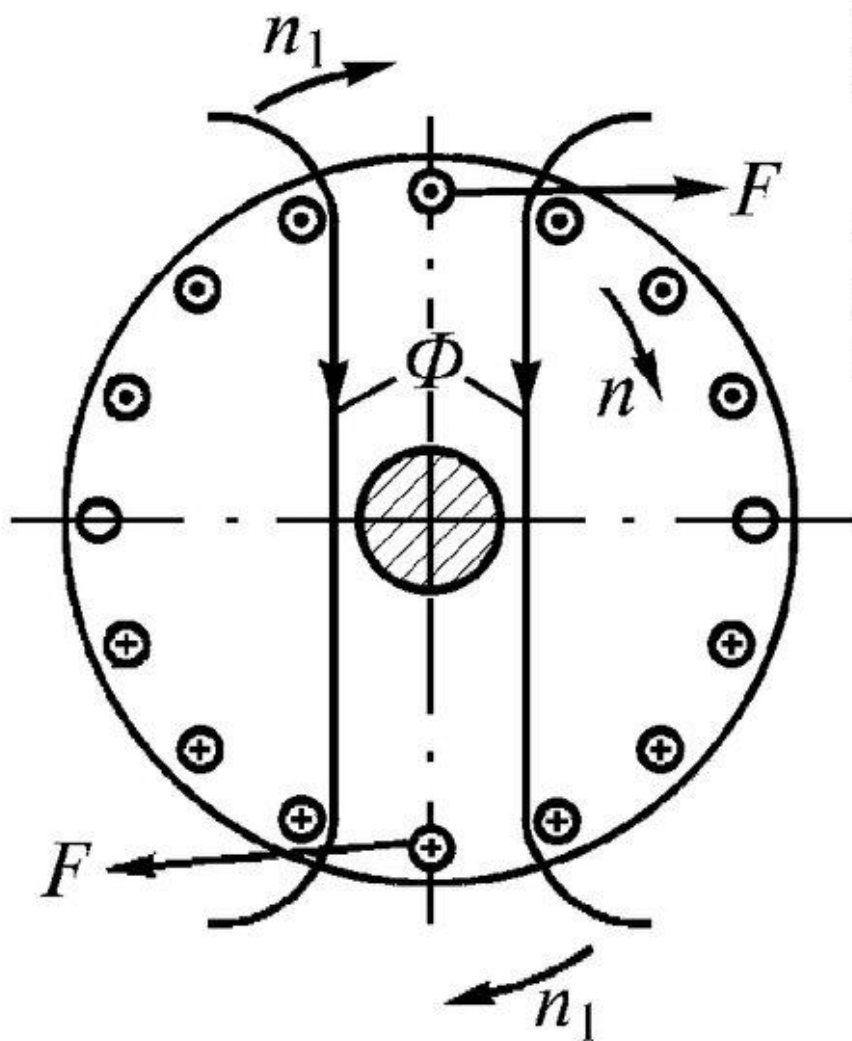
линии поля статора перемещаются относительно ротора также по часовой стрелке со скоростью

$n = 0$  до  $n \approx n_1$

т.е. при скольжении от

$s = +1$  до  $s \approx 0$

## Работа в режиме генератора



ротор приводится во вращение в том же направлении со скоростью  $n_1$

Асинхронная машина может работать в режиме генератора параллельно с сетью в пределах от

$$n = n_1 \text{ до } n = +\infty$$

т.е. при скольжении от

$$s = 0 \text{ до } s = -\infty$$

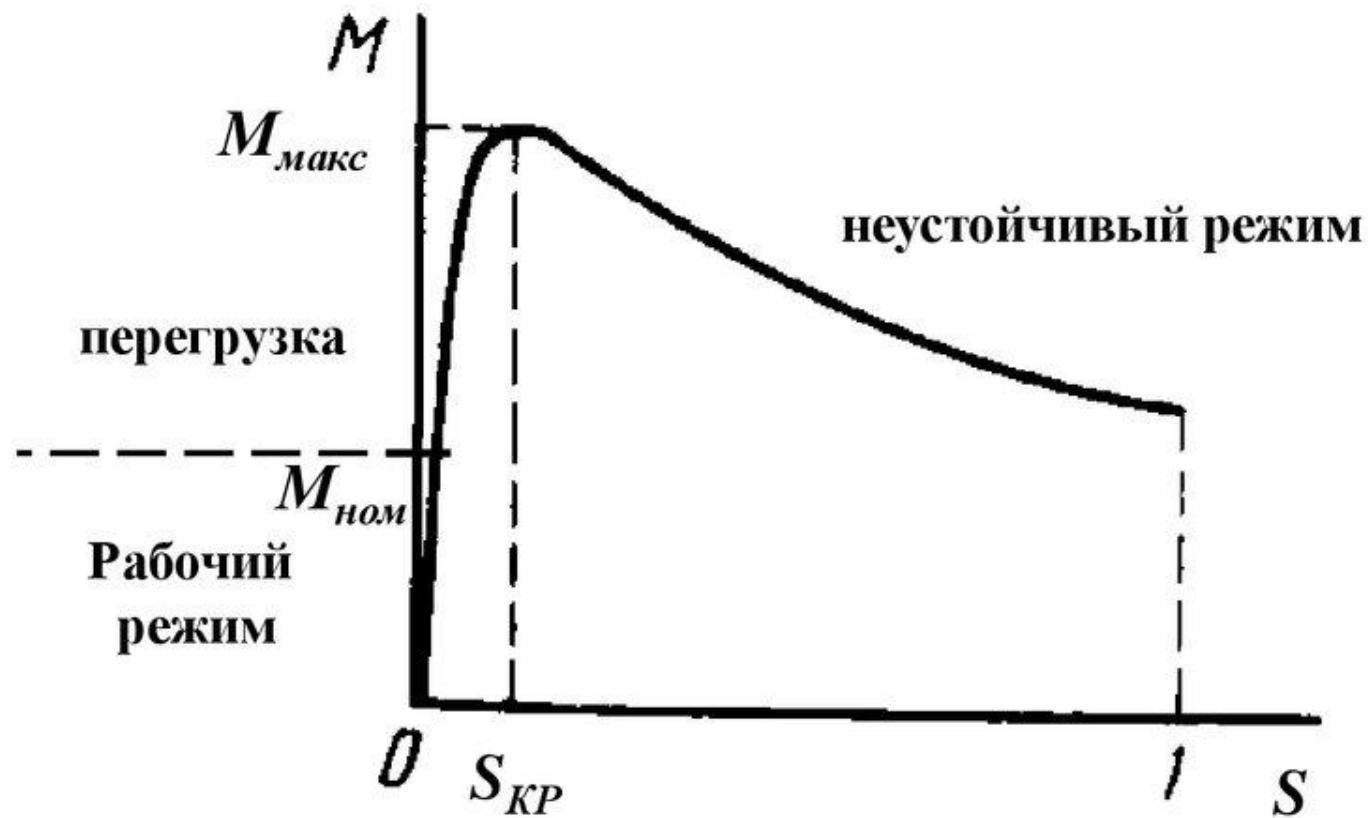
## **Режим электромагнитного тормоза ( $S \geq 1$ ).**

**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)**

## Зависимость электромагнитного момента от скольжения





$$M = f(S)$$

**Участок от 0 до  $M_{НОМ}$**

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

$$M_B = M$$

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

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

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

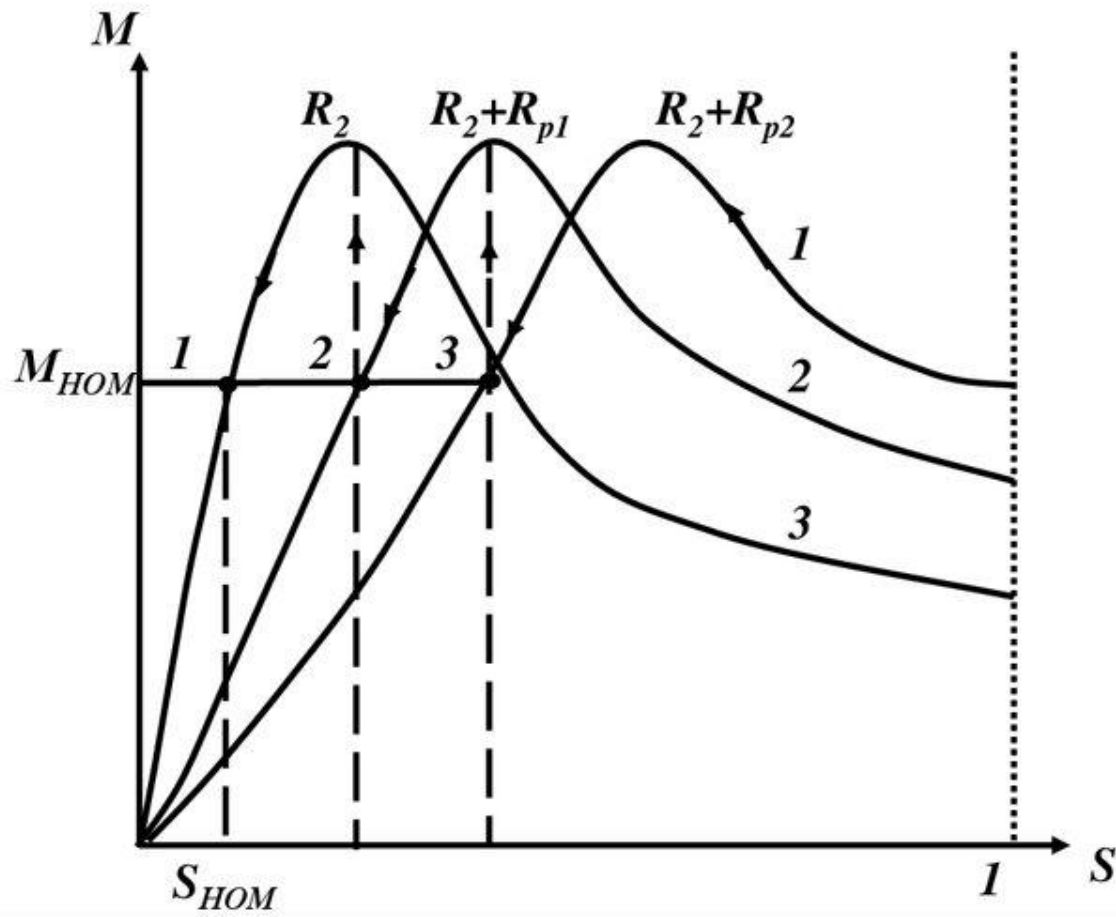
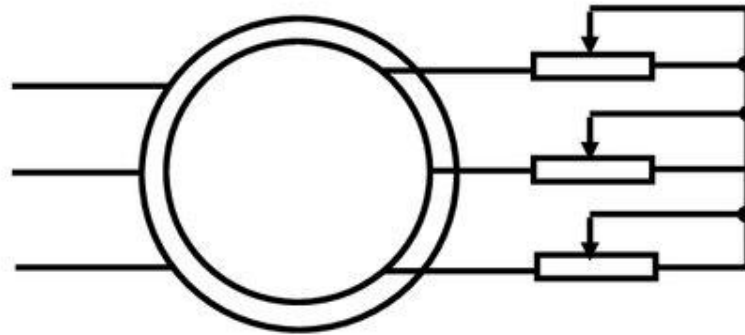
$$M_B \succ M$$

Для расчета момента можно использовать уравнение Клосса.

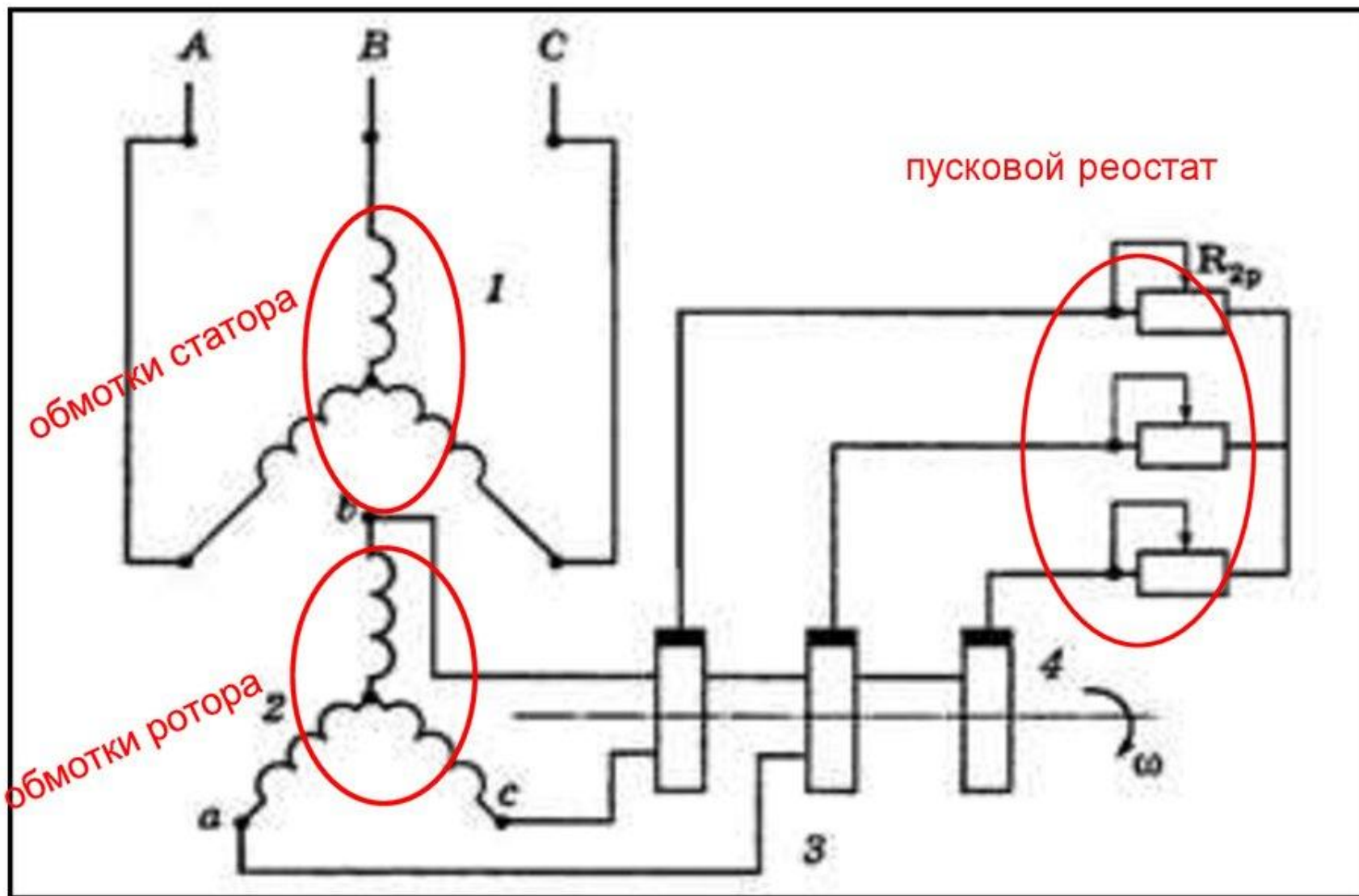
$$M = \frac{2M_H}{\frac{S_{KP}}{S} + \frac{S}{S_{KP}}}$$

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

## § 8.1 Пуск АД с фазным ротором



# Пуск АД с фазным ротором





# Регулирование частоты вращения 3-х фазного АД

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

**АД с короткозамкнутым ротором:**

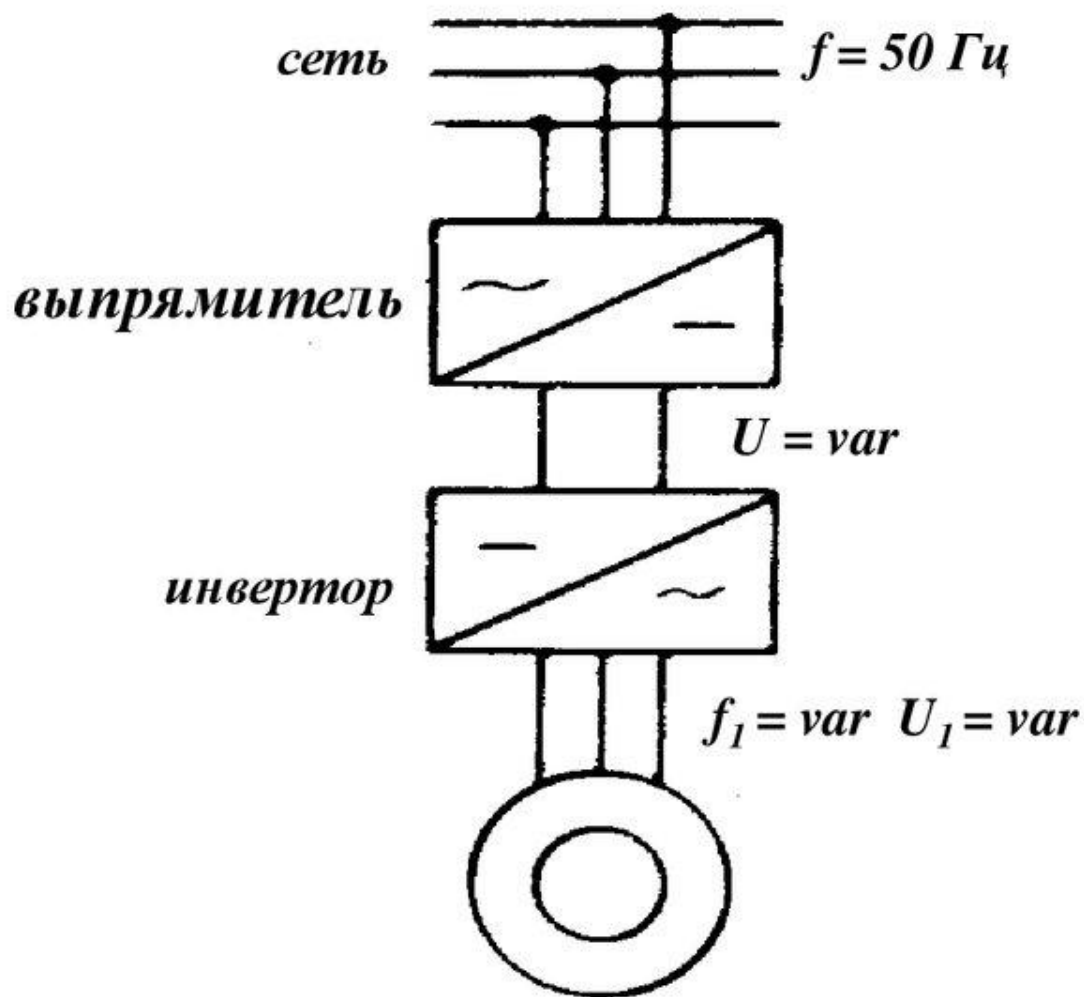
- метод частотного регулирования:

- метод изменения числа пар полюсов

**вращающегося магнитного поля.**

**АД с фазным ротором - метод реостатного регулирования.**

# Схема включения АД с частотным регулированием скорости



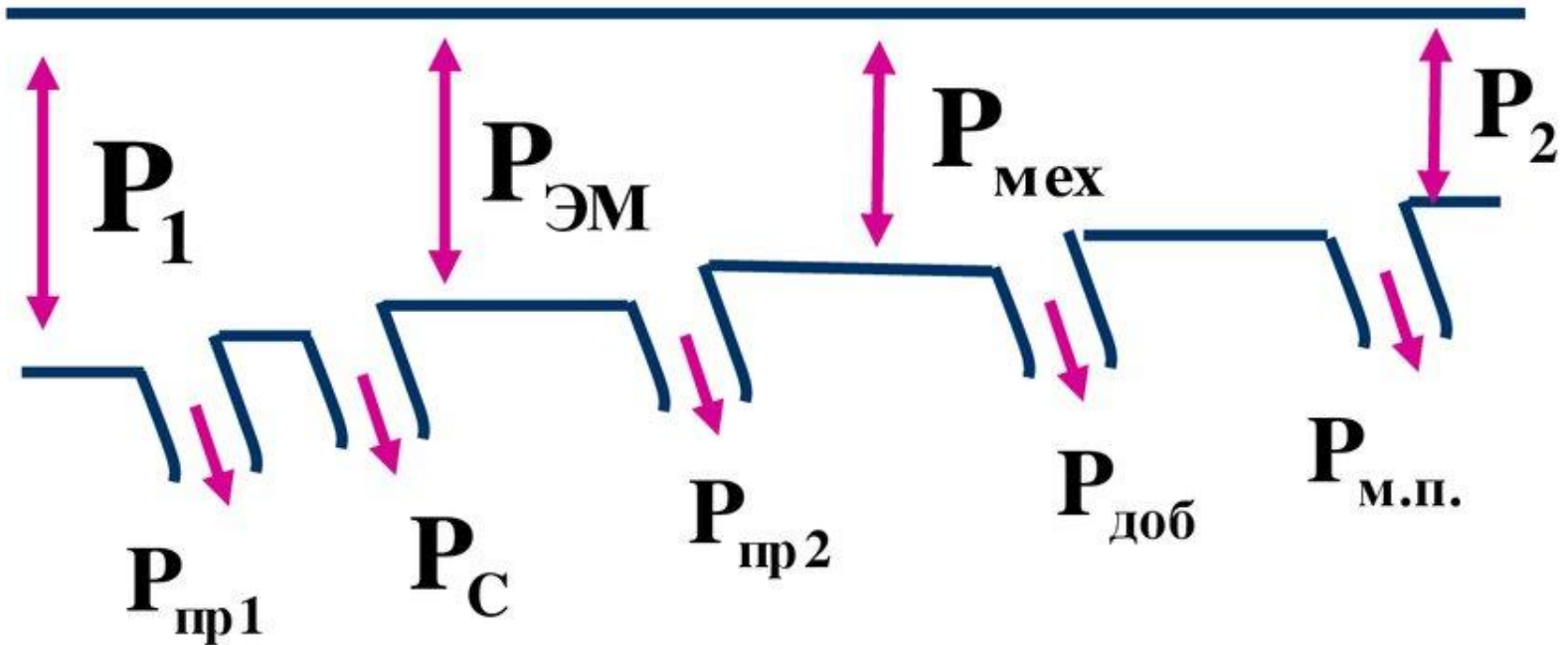
# Комплексная мощность трехфазного асинхронного двигателя

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

где

$P_1, Q_1$  — активная и реактивная мощности двигателя

# Энергетическая диаграмма двигателя



$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$  – мощность,  
подведенная из  
сети;



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

$P_{\text{C}}$  — 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;

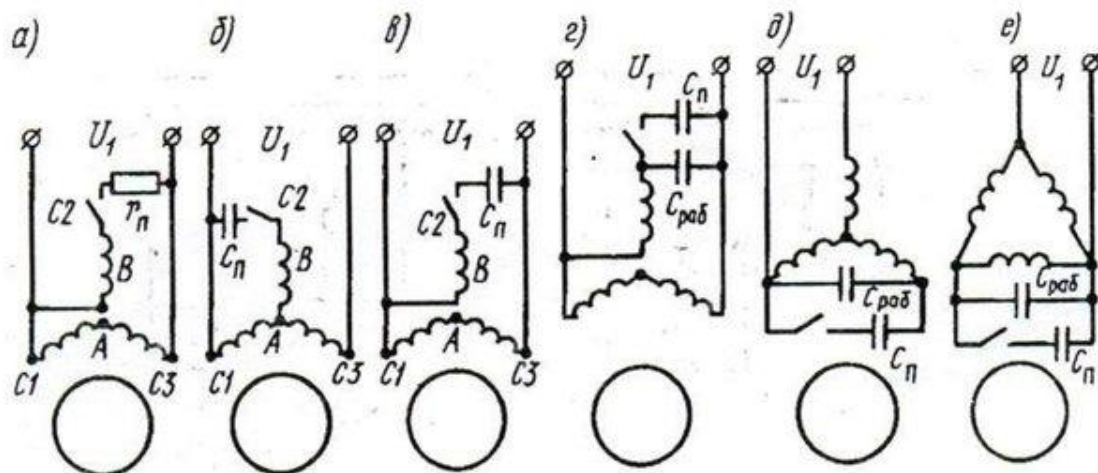
**$P_{\text{доб}}$**  — добавочные потери (создаются пульсациями магнитного поля);

**$P_{\text{м.п.}}$**  — механические потери;

**$P_2$**  — полезная механическая мощность, отдаваемая на валу двигателя

Мощность потерь в роторе пропорциональна  $S$ ,  
Поэтому АД конструируется так, чтобы  $n_{\text{НОМ}} \approx n_1$ .

# Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть

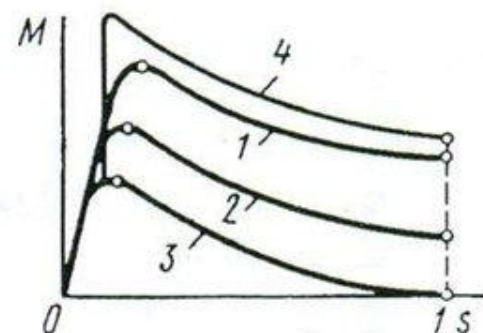


Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

$$C_{\text{раб}} \approx 2700 I_{\text{ном}} / U_1, \quad \text{г)}$$

$$C_{\text{раб}} \approx 2800 I_{\text{ном}} / U_1, \quad \text{д)}$$

$$C_{\text{раб}} \approx 4800 I_{\text{ном}} / U_1, \quad \text{е)}$$



Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при различных схемах включения

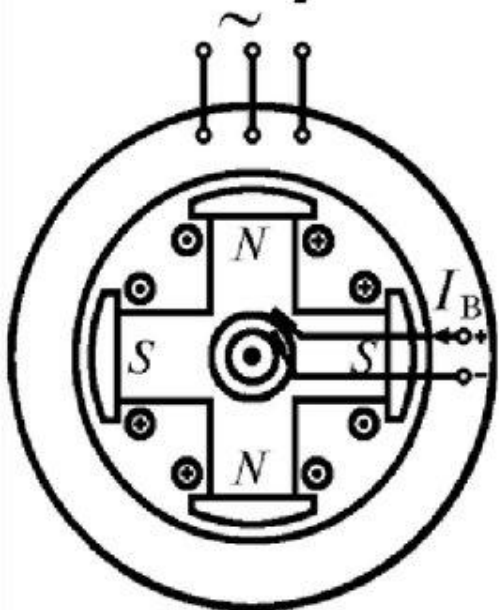


# Синхронные машины

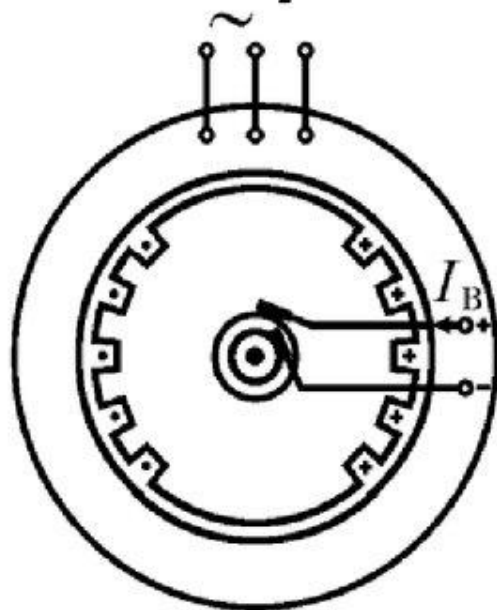
- Синхронными машинами называют электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора находится в строго постоянном соотношении с частотой тока электрической сети.
- **Преимущества:**
  - способность вырабатывать как активную, так и реактивную мощность (с возможностью ее регулирования);
  - возможность регулирования выходного напряжения;
  - возможность работы как с сетью, так и в автономном режимах без применения каких-либо сложных дополнительных устройств;
  - высокий КПД.



# Устройство синхронной машины



а)



б)

- ▶ **Неподвижный статор** – выполняет функции якоря,
- ▶ **Вращающийся ротор** – служит индуктором.

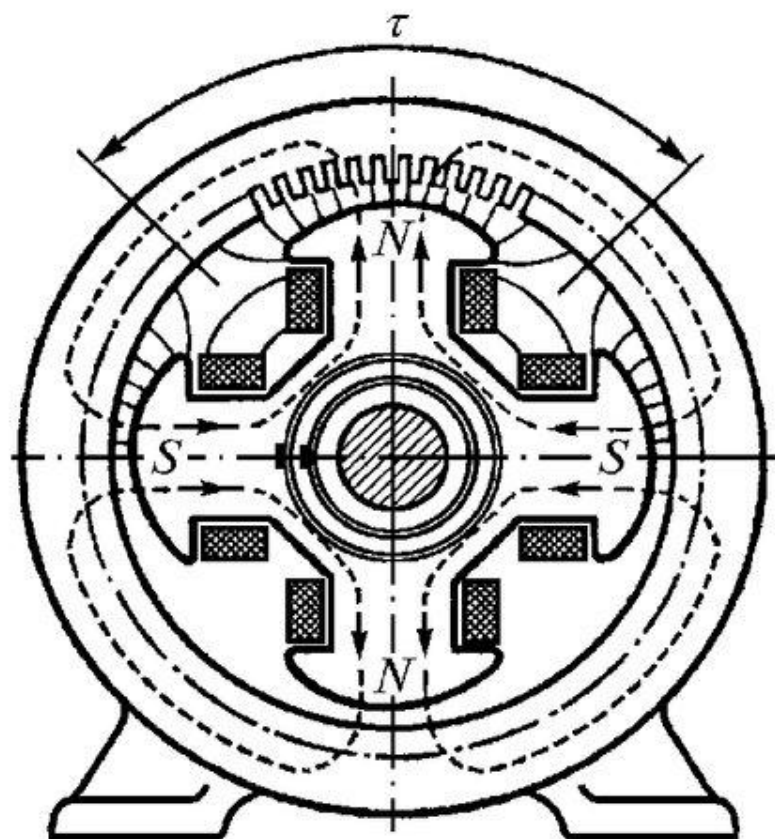
два типа роторов:

1. Явнополюсный а)
2. Неявнополюсный б)

**Явнополюсный ротор** – имеет выступающие полюсы, применяют у машин с частотой вращения до 1000, 1500 *об/мин*.

**Неявнополюсный ротор** – имеет вид цилиндра, применяют при скоростях 1500 и 3000 *об/мин*.

## Холостой ход синхронного генератора



$$E = f(I_B) \text{ при } I = 0$$

характеристика холостого хода

обмотка якоря (статора)  
разомкнута и магнитное поле  
машины создается только  
обмоткой возбуждения ротора

$$E = 4,44k_{об}wf\Phi_0$$

$k_{об}$  – обмоточный коэффициент;

$w$  – число витков одной фазы  
обмотки статора

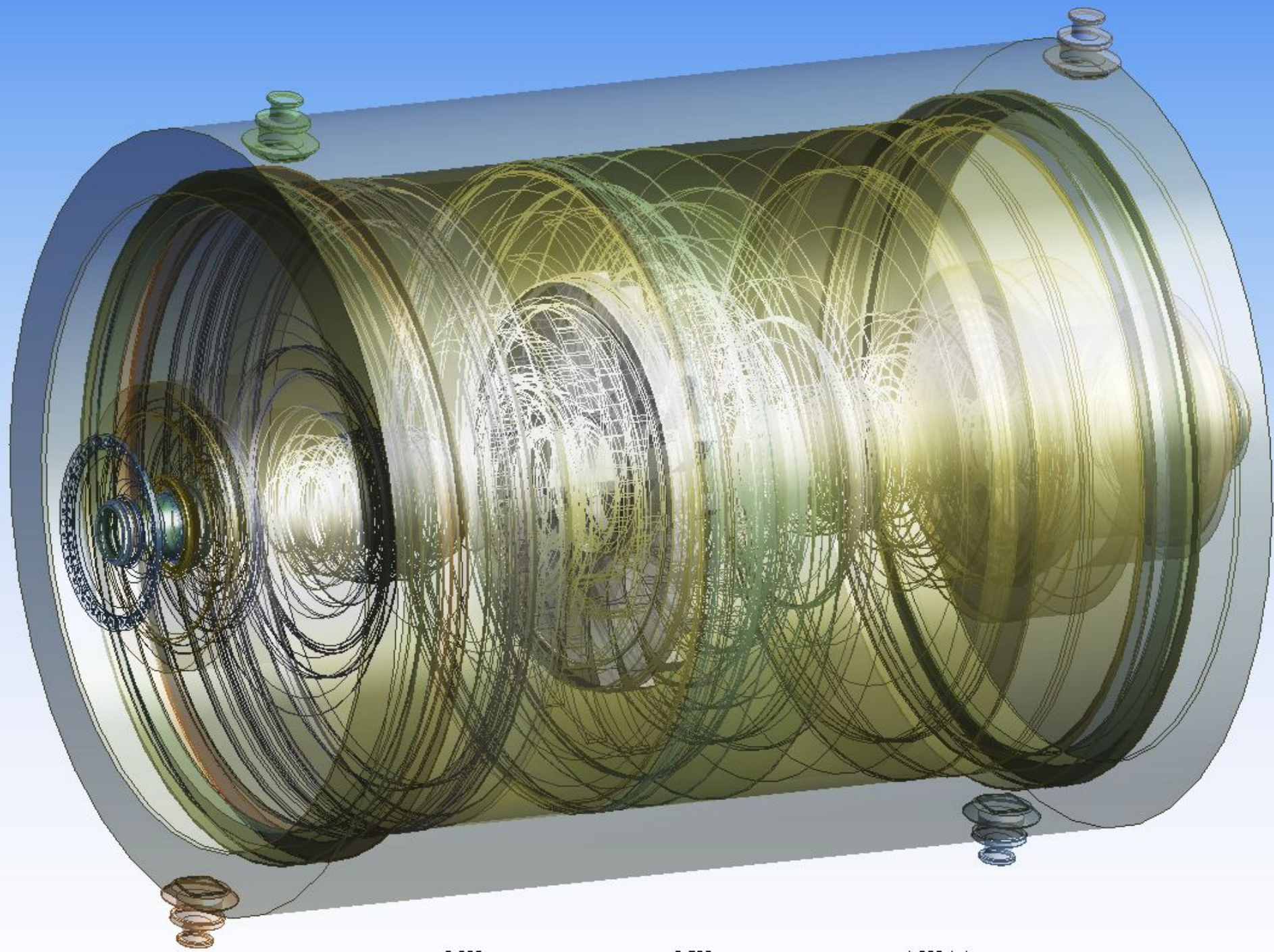
$$f = \frac{pn_1}{60} \text{ – частота синусоидальных ЭДС;}$$

$p$  – число пар полюсов;

$\Phi_0$  – максимальный магнитный  
поток полюса ротора;

$n_1$  – синхронная частота вращения.











# Машины постоянного тока

*Машины постоянного тока* (МПТ) используются как в качестве *генераторов*, так и в качестве *двигателей*.

Наибольшее применение нашли *двигатели постоянного тока (ДПТ)*:

- от долей ватт ( в устройствах автоматики и вычислительной техники), до нескольких тысяч киловатт (привод прокатных станков, шахтных подъемников и др.);
- ДПТ широко используются для привода *подъемных средств* (крановые двигатели) и привода *транспортных средств* (тяговые двигатели).

*Основные преимущества ДПТ* по сравнению с бесколлекторными двигателями переменного тока:

- хорошие пусковые и регулировочные свойства;
- возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин.

*Основные недостатки ДПТ:*

- относительно высокая стоимость;
- сложность в изготовлении;
- пониженная надежность;
- наличие радиопомех и пожароопасности.

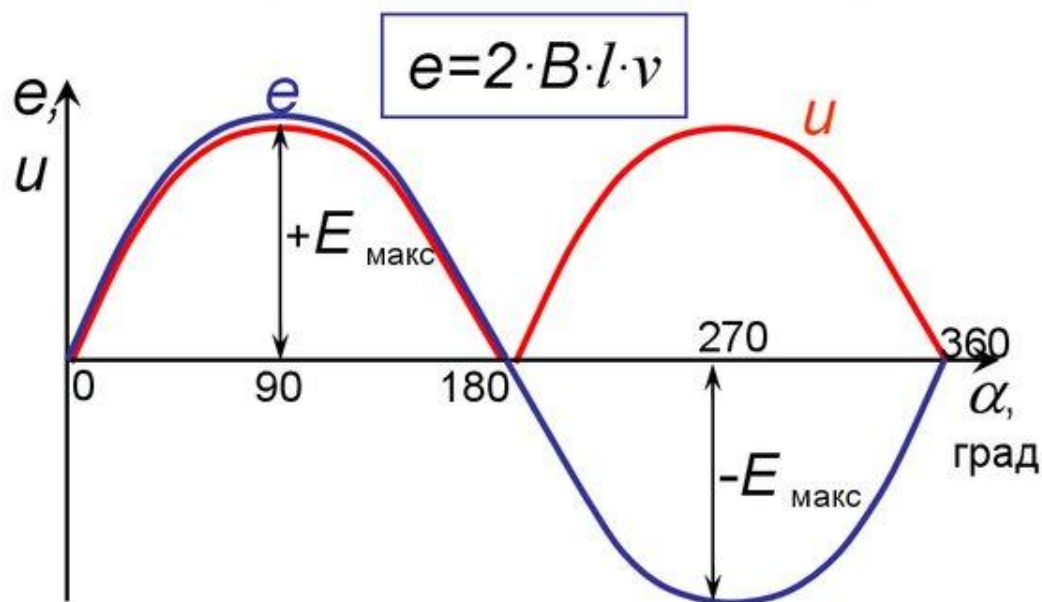
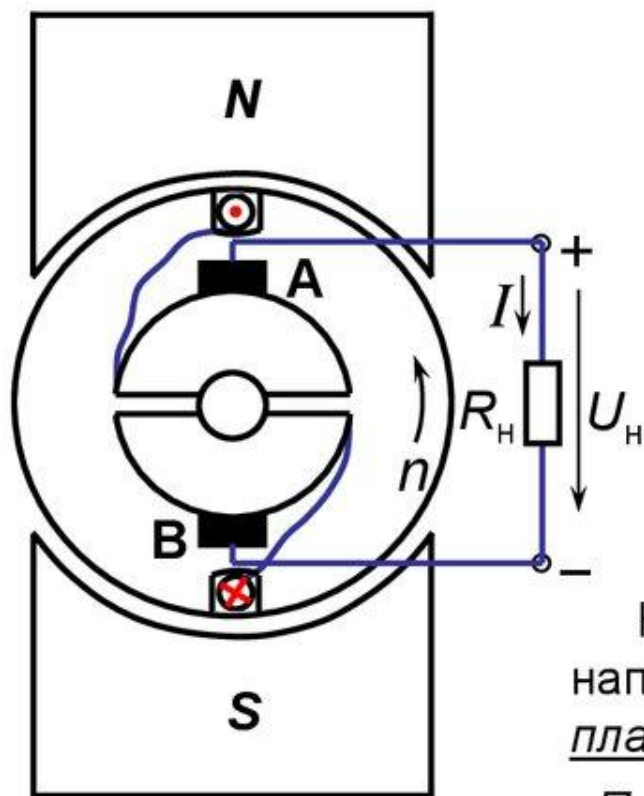
Все недостатки ДПТ обусловлены *наличием коллекторно-щеточного узла*. Они ограничивают применение ДПТ.

# Принцип действия машин постоянного тока

Характерным признаком коллекторных МПТ является наличие у них коллекторно-щеточного узла – механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот

## Принцип действия генератора постоянного тока

При вращении якоря в витке якорной обмотки наводится ЭДС

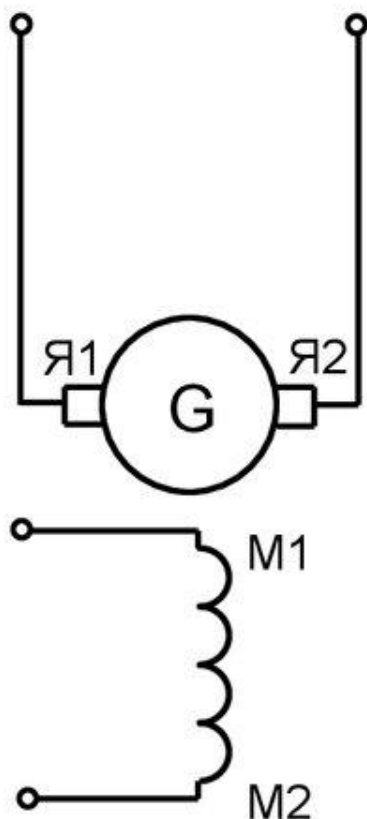


Когда ЭДС в витке якорной обмотки меняет свое направление происходит смена коллекторных пластин под щетками.

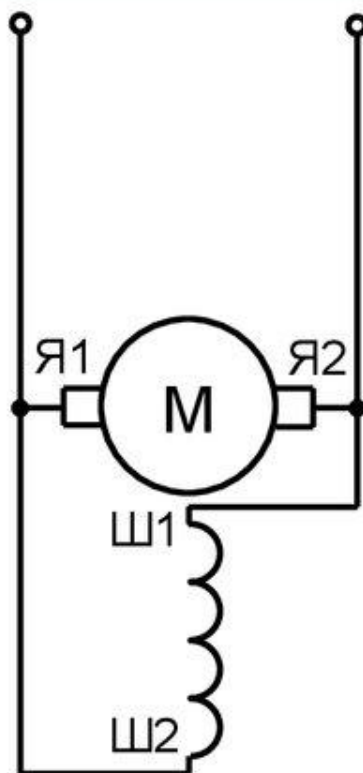
Полярность щеток всегда остается неизменной независимо от положения витка якорной обмотки.

# Способы возбуждения электрических машин постоянного тока

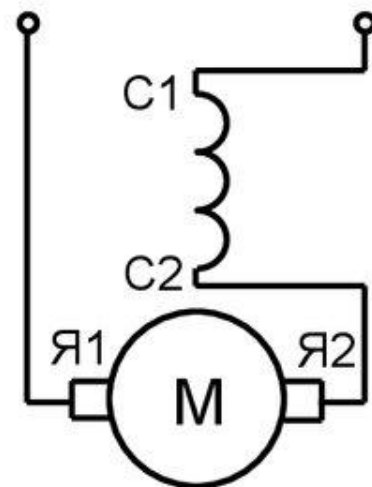
Свойства МПТ в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т. е. способом возбуждения.



Независимое  
возбуждение

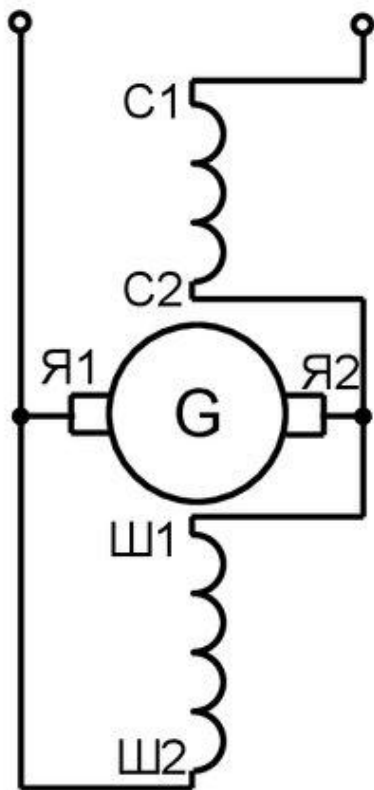


Параллельное  
возбуждение

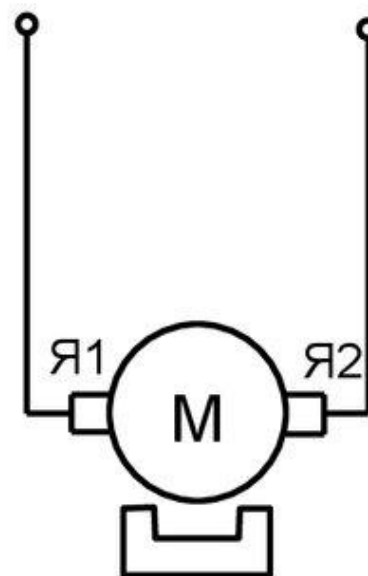


Последовательное  
возбуждение

# Способы возбуждения электрических машин постоянного тока



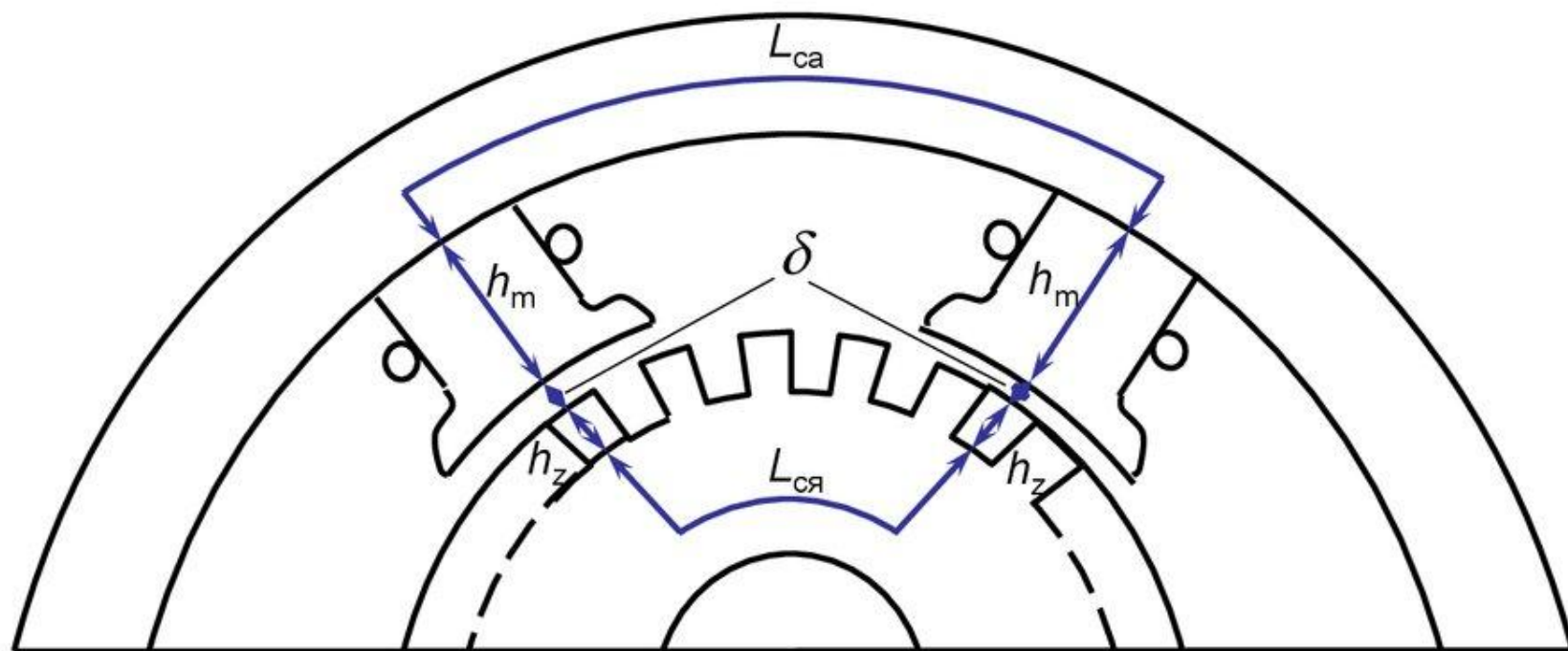
Смешанное  
возбуждение



Возбуждение от  
постоянных магнитов



# Магнитная цепь машины постоянного тока



$L_{ca}$  – статор (ярмо)

$h_m$  – главный полюс

$\delta$  – воздушный зазор

$h_z$  – зубцовый слой якоря

$L_{ся}$  – спинка якоря

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода:

$$F_{во} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + F_a + F_{я}$$

$F_{\delta}$  – магнитное напряжение воздушного зазора

$F_z$  – магнитное напряжение зубцового слоя якоря

$F_m$  – магнитное напряжение главного полюса

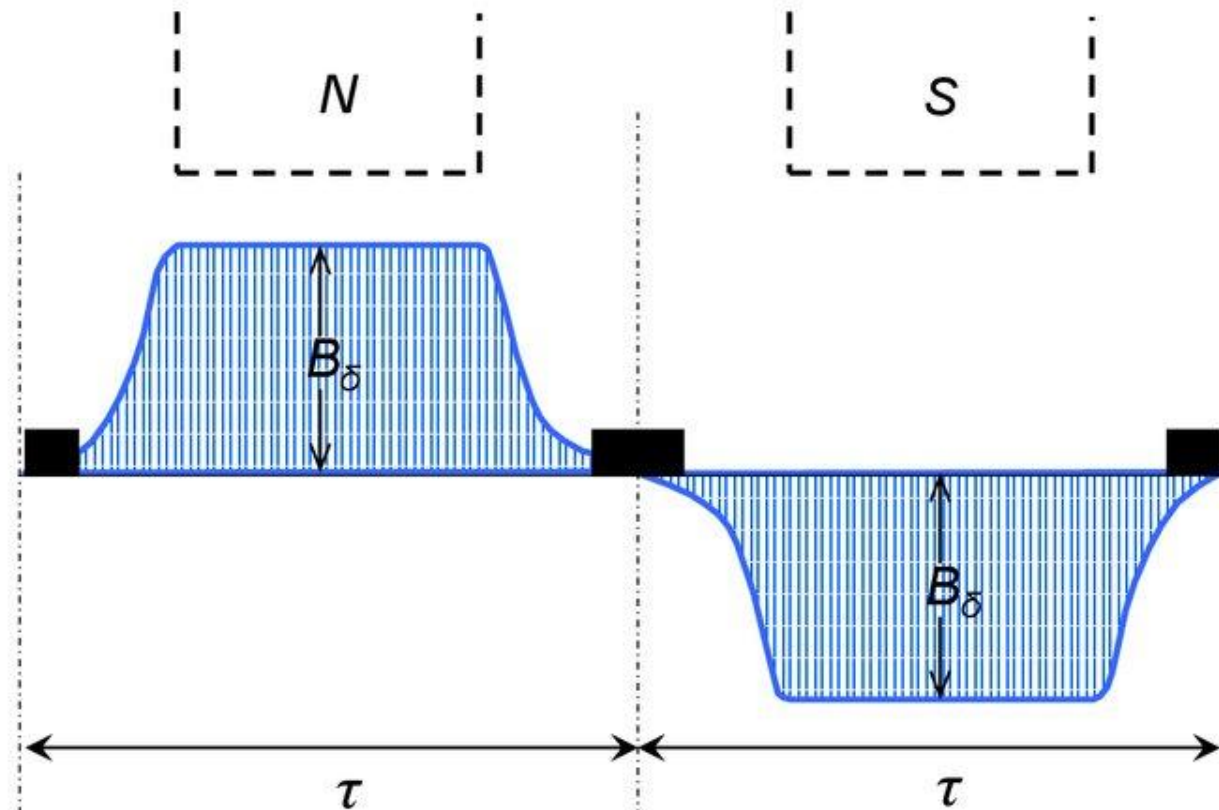
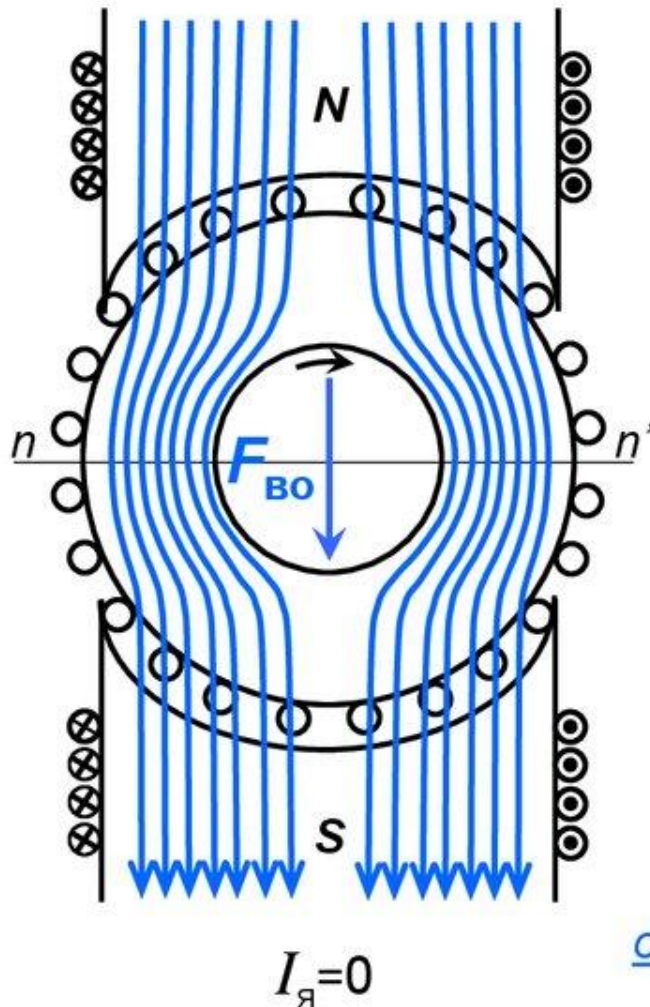
$F_a$  – магнитное напряжение статора (ярма)

$F_{я}$  – магнитное напряжение спинки якоря

*Наибольшим магнитным сопротивлением* обладает воздушный зазор  $\delta$ , поэтому магнитное напряжение  $F_{\delta}$  *намного больше остальных слагаемых*  $F_{во}$

# Реакция якоря машины постоянного тока

В режиме холостого хода  $I_{\text{я}}=0$  и в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения  $F_{\text{во}}$



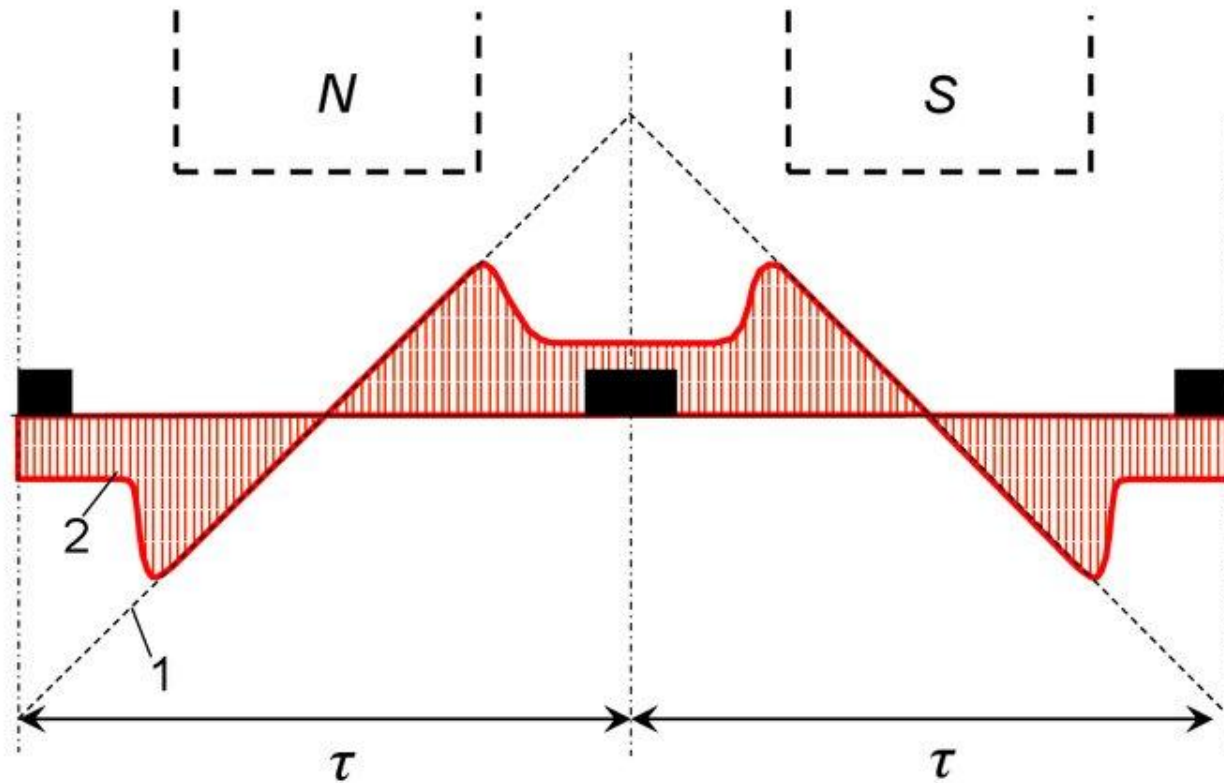
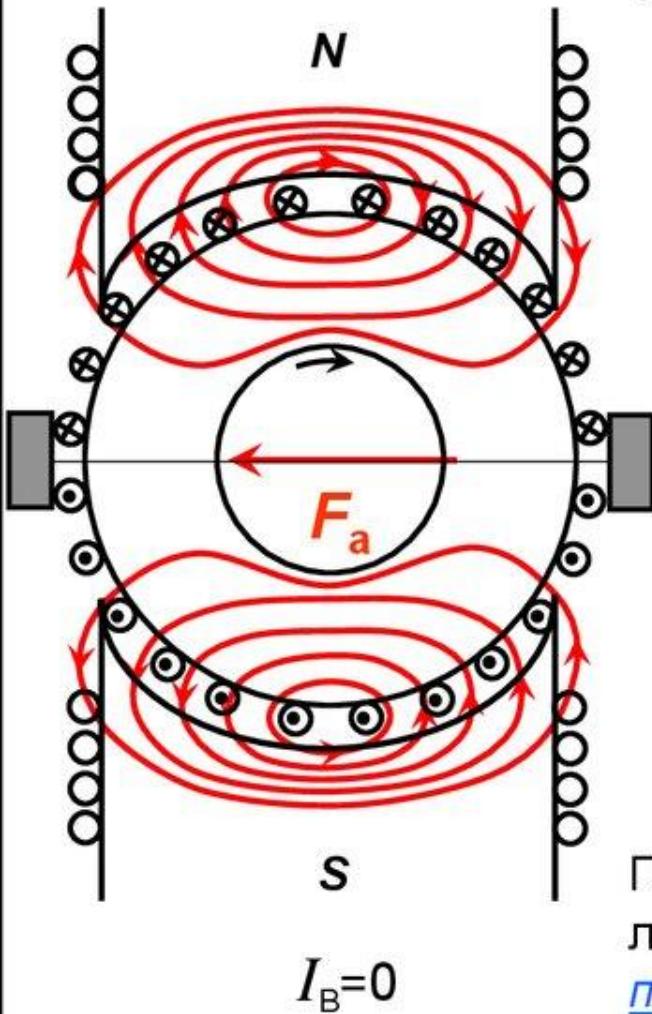
В этом случае магнитное поле симметрично относительно оси полюсов



# Реакция якоря машины постоянного тока

Если машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток  $I_{я}$ , кот создает МДС якоря  $F_a$ .

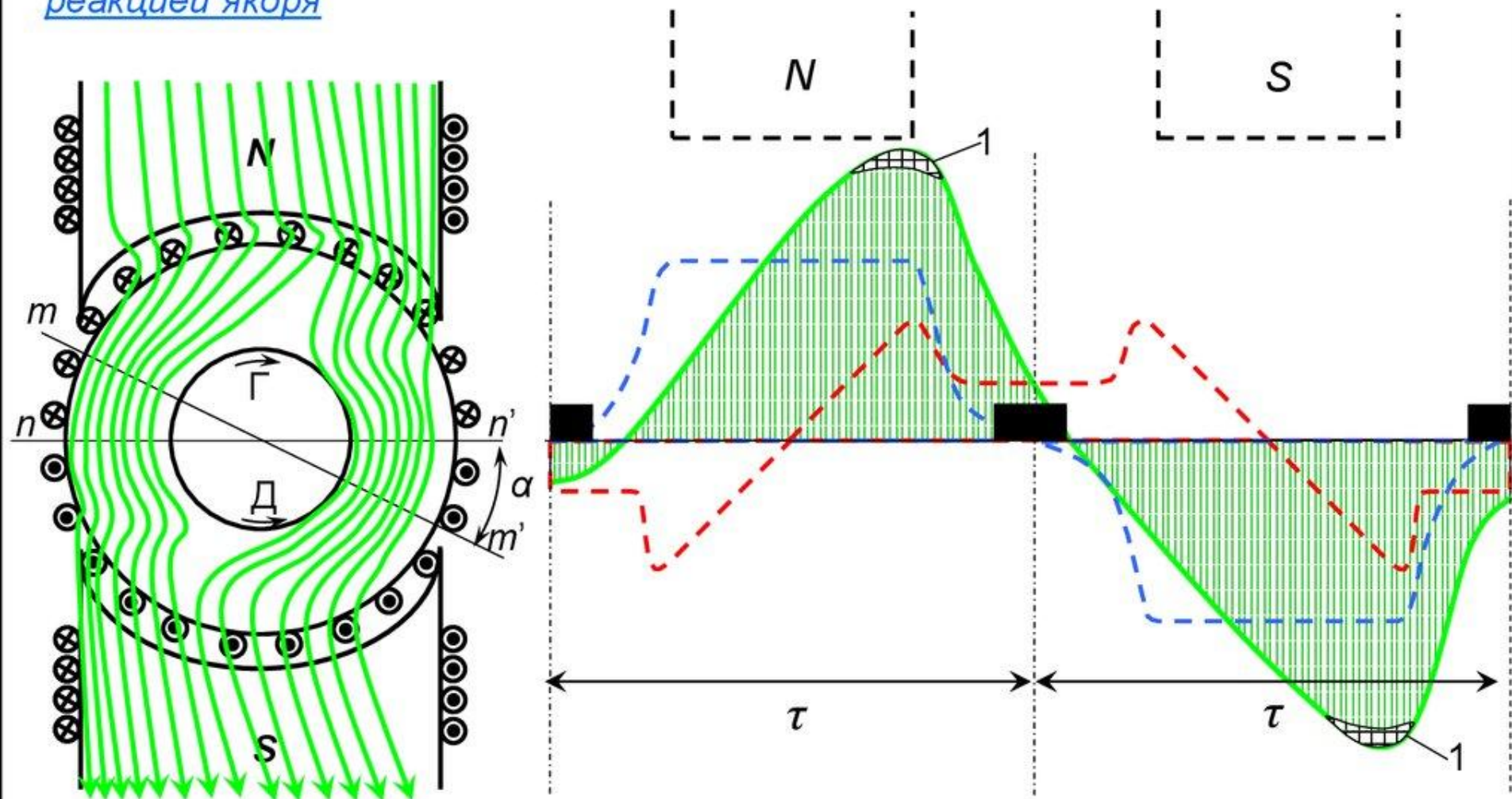
Допустим, что МДС обмотки возбуждения  $F_{во}=0$ , тогда магнитное поле МДС якоря  $F_a$  будет иметь вид:



Пространственное положение МДС якоря  $F_a$  определяется положением щеток и остаётся неизменным при вращении якоря

# Реакция якоря машины постоянного тока

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря



Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.



## Электродвижущая сила машины постоянного тока

$$E_a = E_{\text{пр}} \cdot [N / 2a] \quad ,$$

где  $N$  – число пазовых проводников;  $2a$  – число параллельных ветвей.

$$E_{\text{пр}} = B_{\delta} \cdot l_i \cdot v \quad - \text{ЭДС одного пазового проводника,}$$

активная длина которого  $l_i$

$$v = \pi D_a n / 60 = 2p\tau n / 60 \quad \text{где } \pi D_a = 2p\tau$$

$$E_a = B_{\delta} l_i \tau \quad (2pn / 60) [N / 2a]$$

или с учетом  $B_{\delta} l_i \tau = \Phi$

$$E_a = [pN / (60a)] \Phi n = C_e \Phi n,$$

где  $C_e = pN / (60a)$  – постоянная для данной машины

# Электромагнитный момент машины постоянного тока

$$F_{\text{эм}} = B_{\delta} l i_a \quad \text{- электромагнитная сила}$$

$$M = F_{\text{эм}} N (D_a / 2) \quad \text{- электромагнитный момент}$$

где  $D_a/2$  – радиус сердечника якоря

$$M = B_{\delta} l_i [I_a / 2a] N (D_a / 2)$$

где  $I_a/2a = i_a$  – ток параллельной ветви

$$M = [pN / (2\pi a)] \Phi I_a = C_M \Phi I_a$$

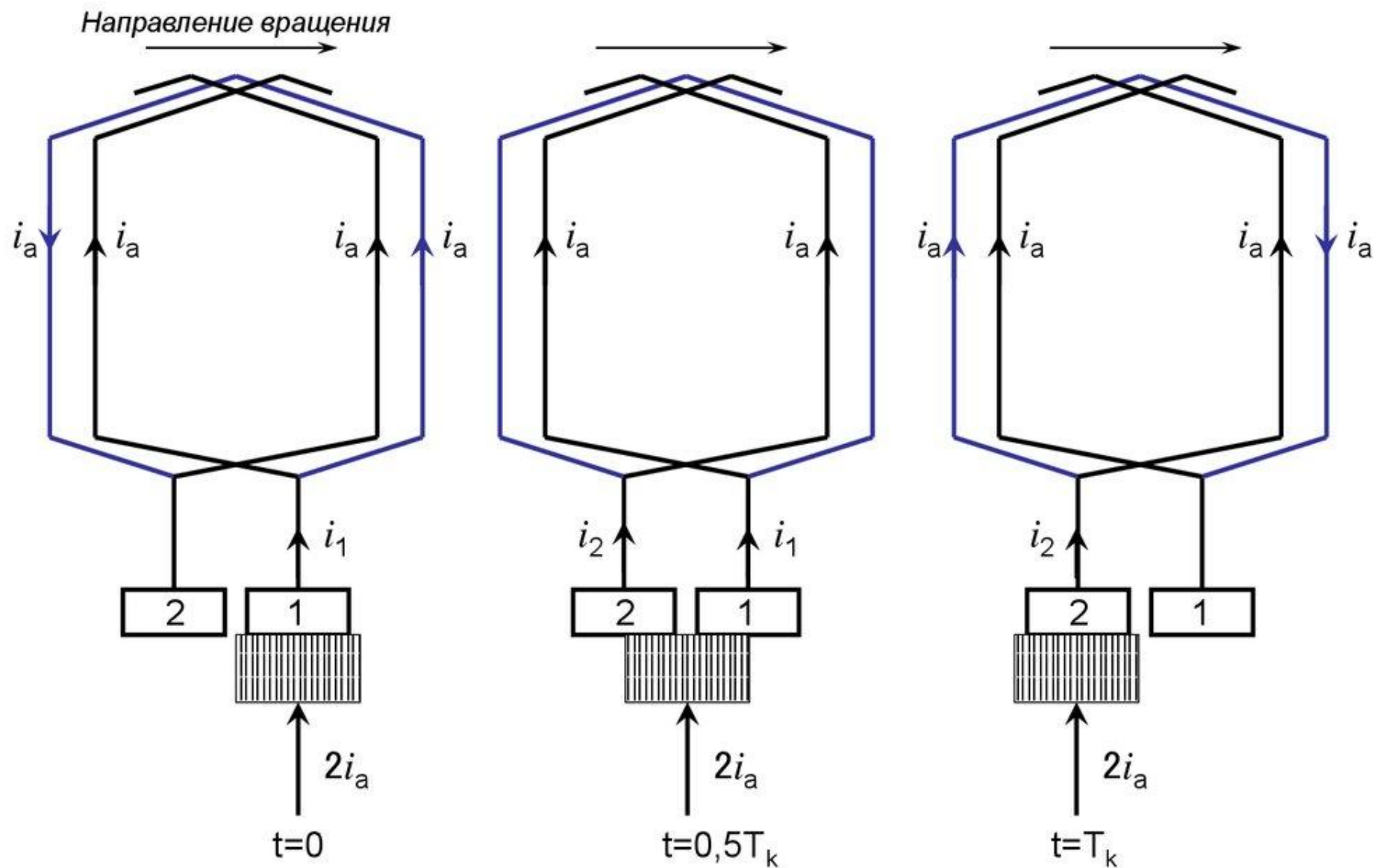
где  $C_M = [pN / (2\pi a)]$  – постоянная для данной машины

$$M = [60 / (2\pi n)] E_a I_a = 9.55 P_{\text{эм}} / n = P_{\text{эм}} / \omega$$

где  $\omega = 2\pi n / 60$  – угловая скорость вращения

$P_{\text{эм}} = E_a I_a$  – электромагнитная мощность машины постоянного тока

# Коммутация в машинах постоянного тока



$$T_k = (60 / Kn) (b_{щ} / b_k) - \text{период коммутации}$$

$K$  – число коллекторных пластин;

$n$  – частота вращения якоря, об/мин;

$b_{щ}$  – ширина щетки;

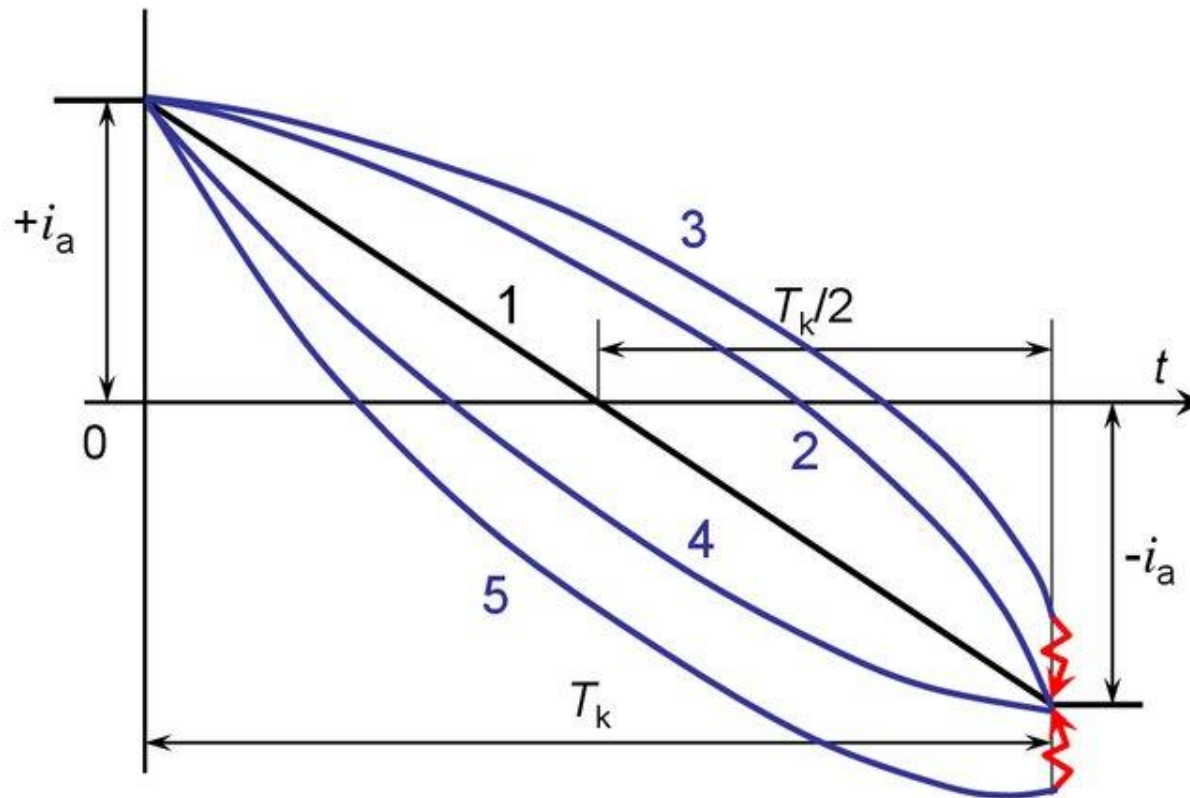
$b_k$  – расстояние между серединами соседних коллекторных пластин  
(коллекторное деление)

**Коммутация** – процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением как значения, так и направления тока в этой секции. Ток в коммутируемой секции равен нулю.



# Коммутация в машинах постоянного тока

Изменение тока в короткозамкнутой секции в процессе коммутации



- 1 - прямолинейная коммутация
- 2 - замедленная коммутация
- 3 - сильно замедленная коммутация
- 4 - ускоренная коммутация
- 5 - сильно ускоренная коммутация