



*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

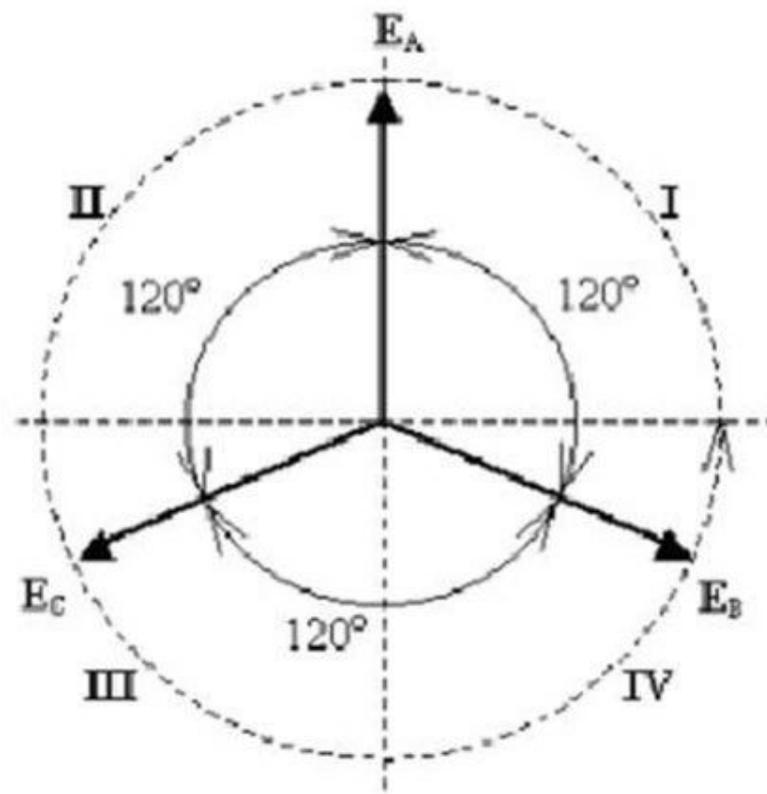
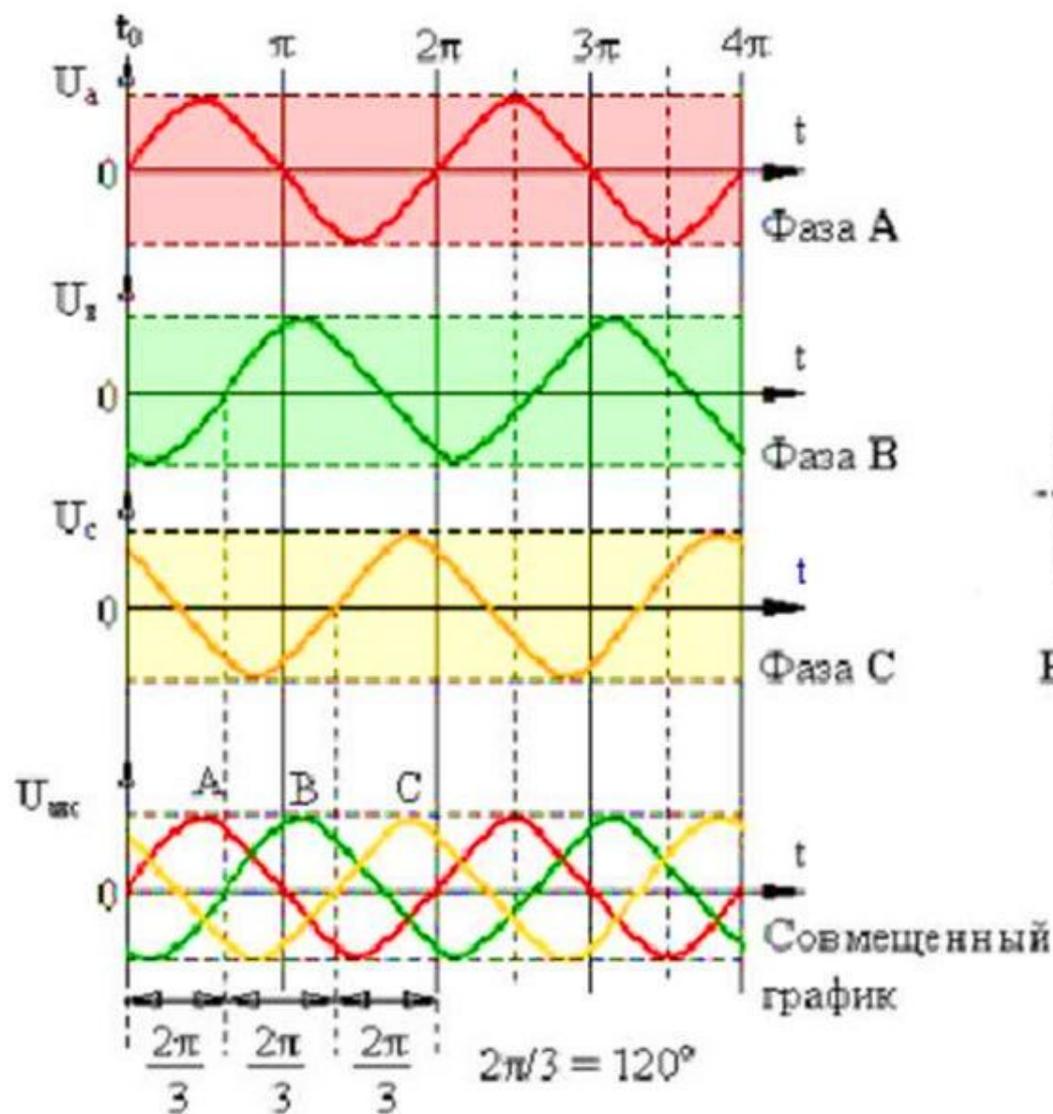
Синхронные машины: генераторы, двигатели, компенсаторы.

Асинхронные машины: двигатели

2. Электрические машины постоянного тока

Двигатели и генераторы

Трехфазное вращающееся ЭМ-поле



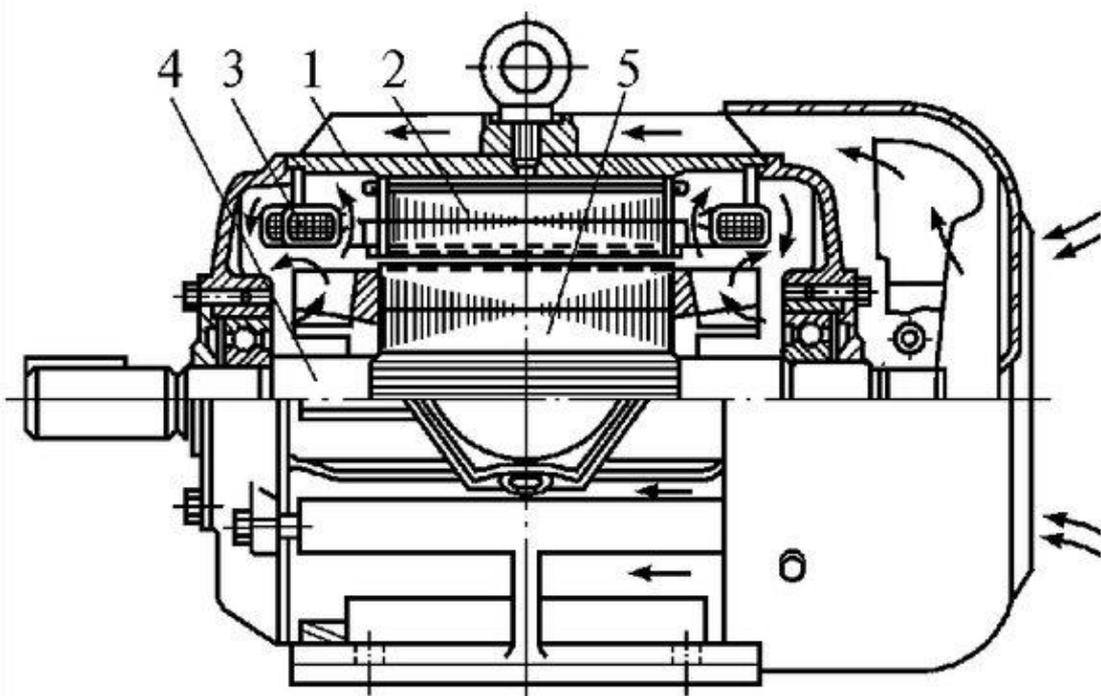
Асинхронные машины

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:

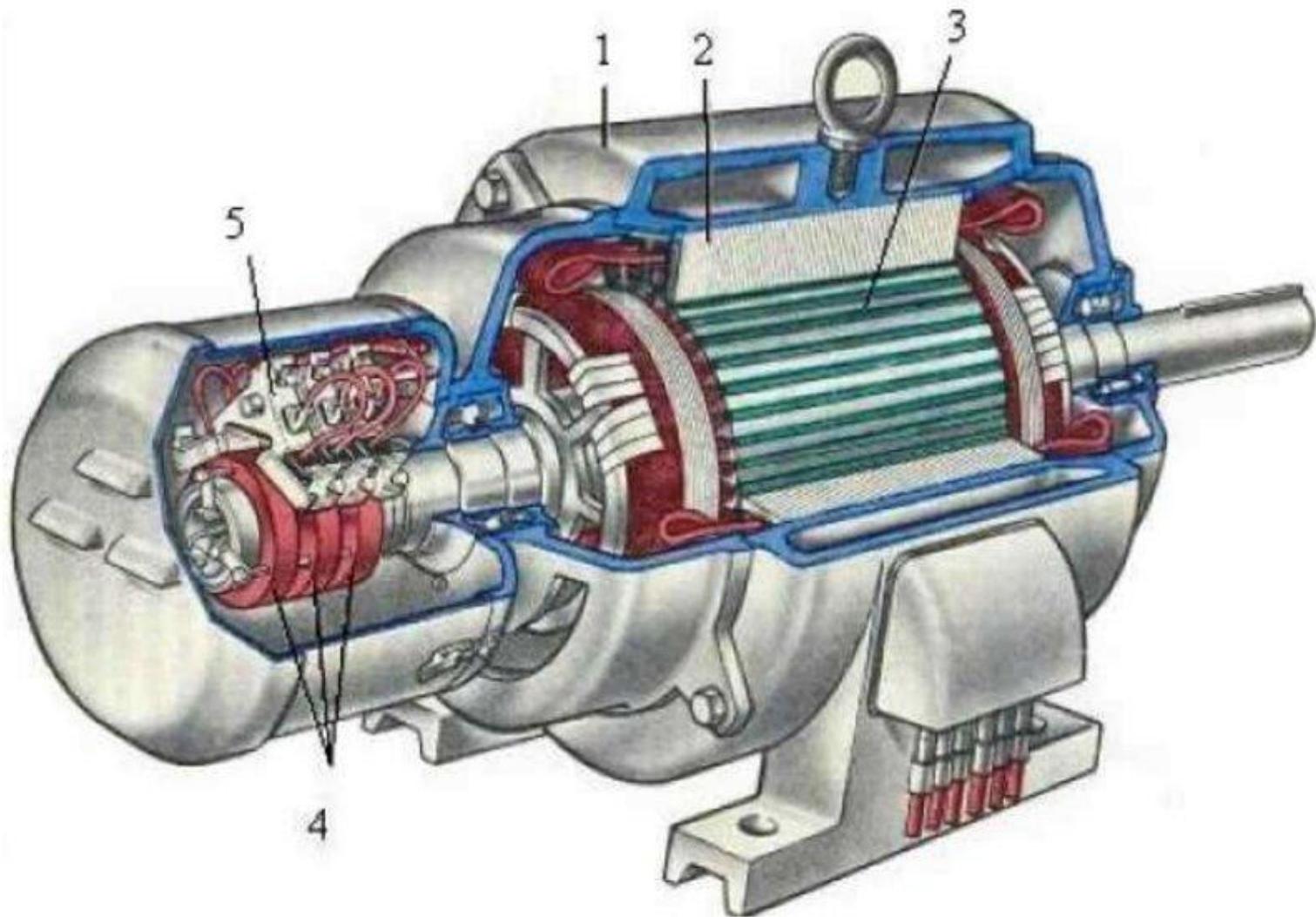
- 4-стальной вал,
- 5-магнитопровод,

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 .

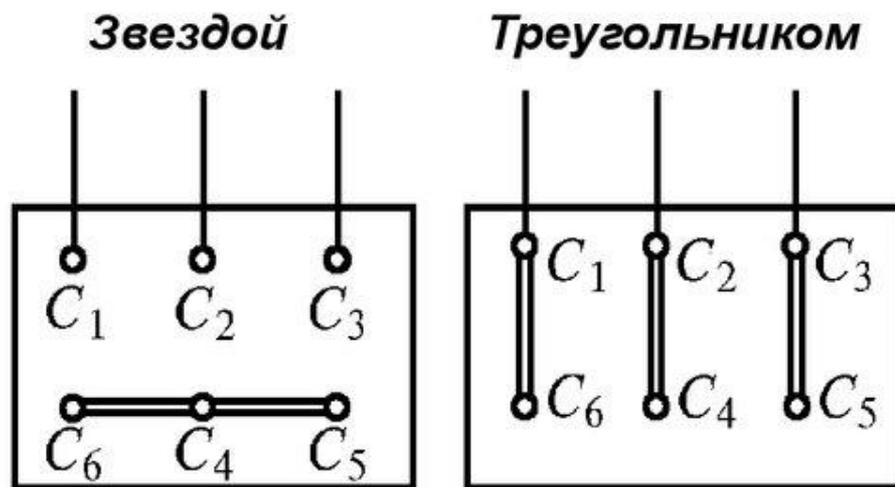
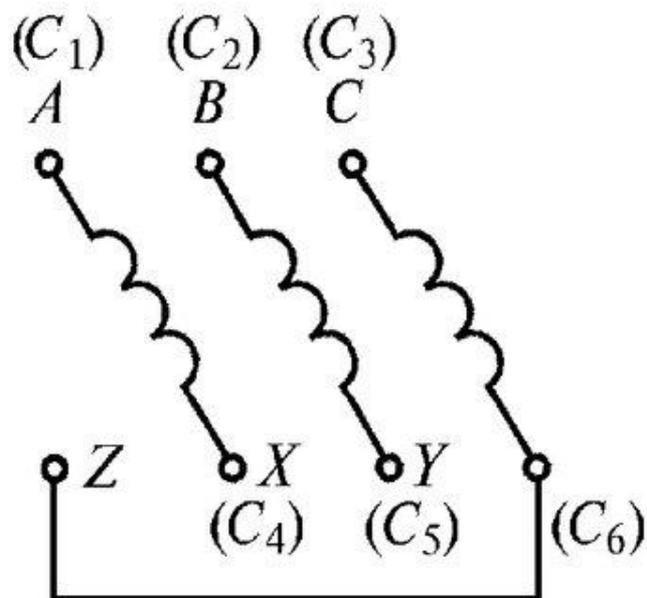


Схема соединения обмоток АД

Схема соединения "Треугольник"

Сеть ~220 (В)

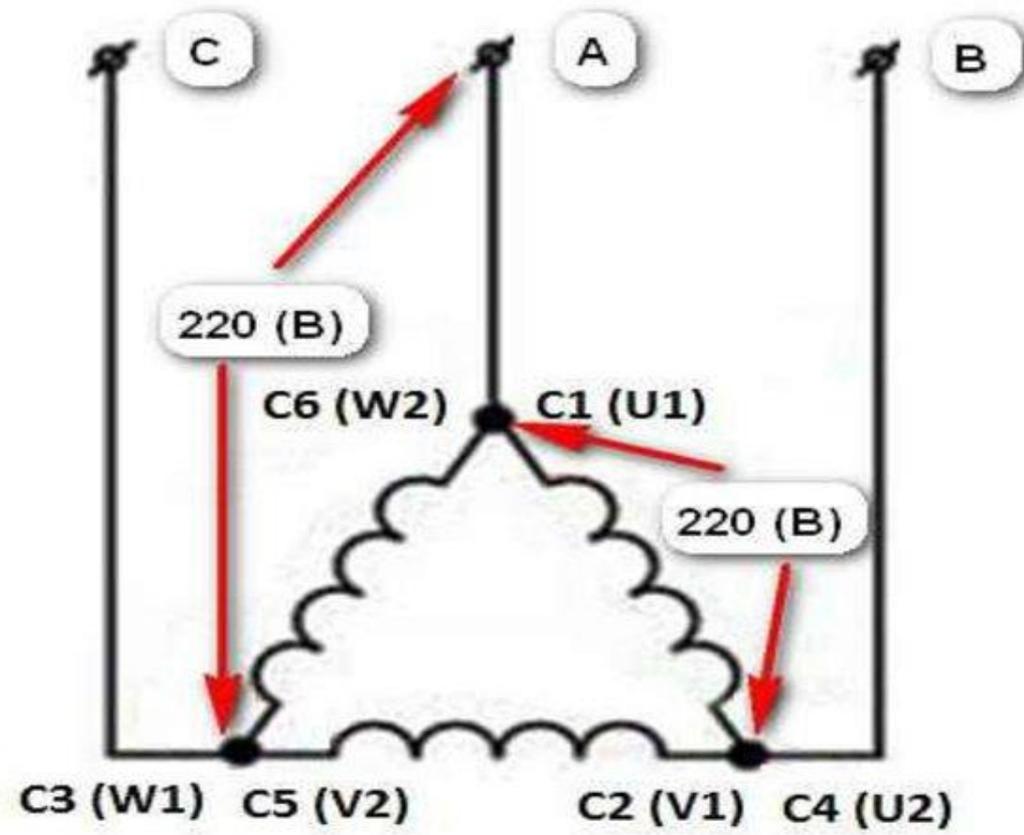
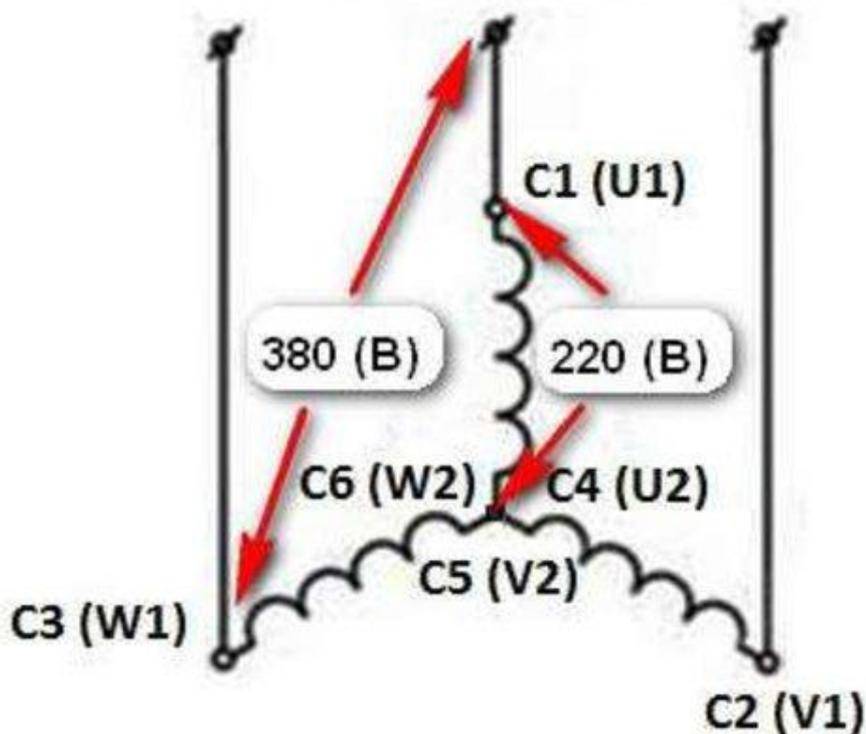


Схема соединения обмоток АД



Схема соединения "Звезда"

Сеть ~380 (В)

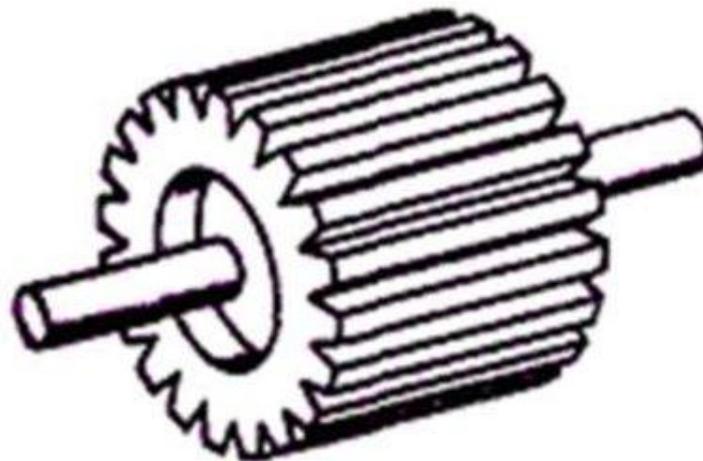


Конструкция ротора.

Ротор – цилиндрический сердечник, собранный из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком.

Сердечник ротора насажен на вал, закрепленный в подшипниках.

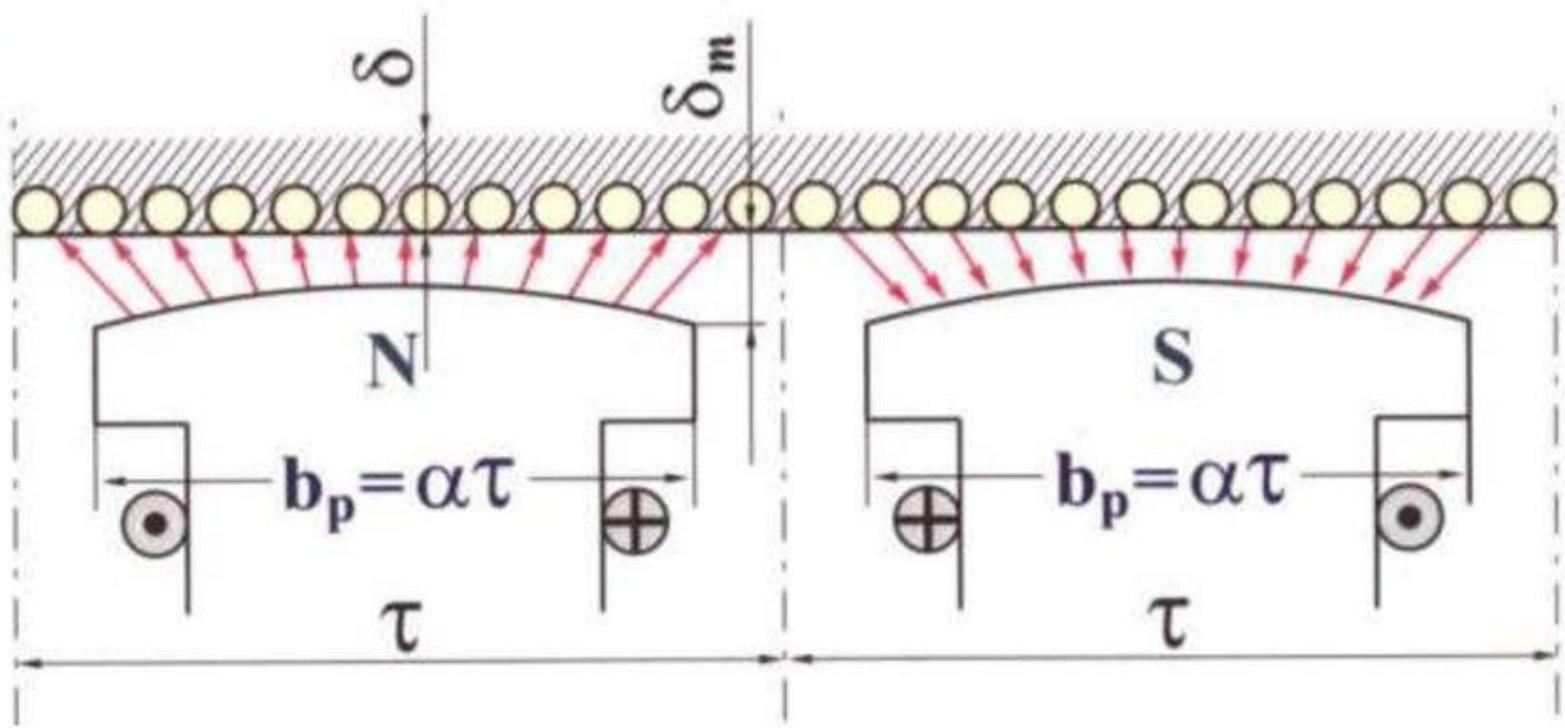
В пазах расположены витки обмотки ротора.

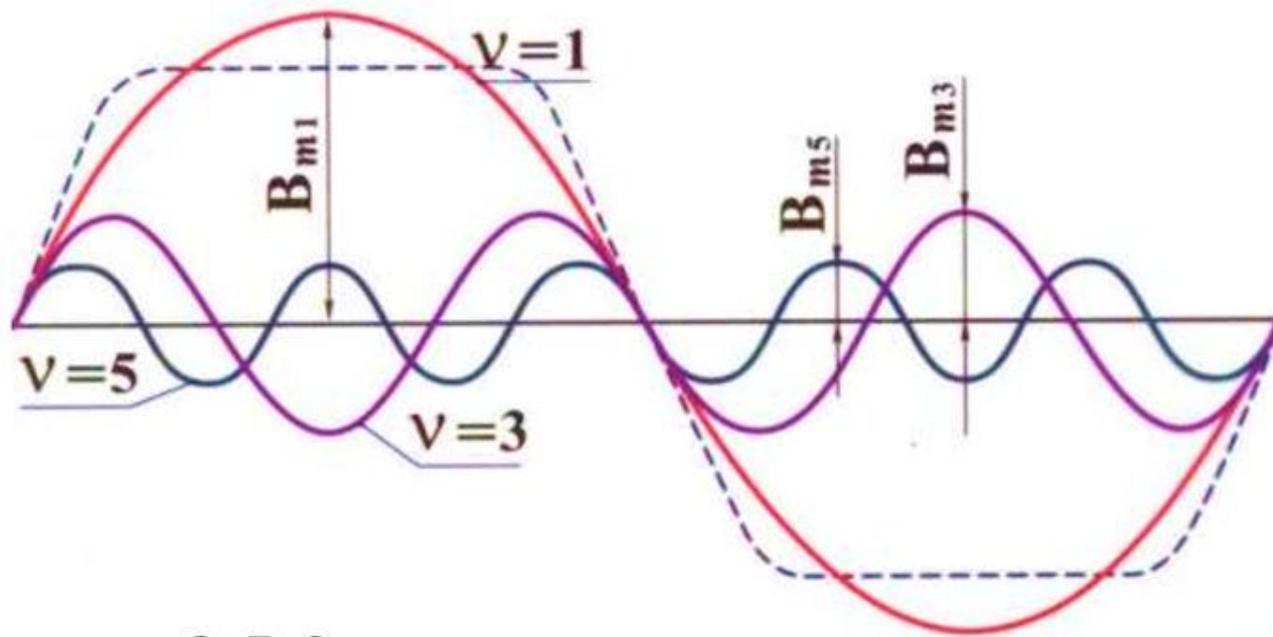


Сердечник ротора

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)

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

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

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.

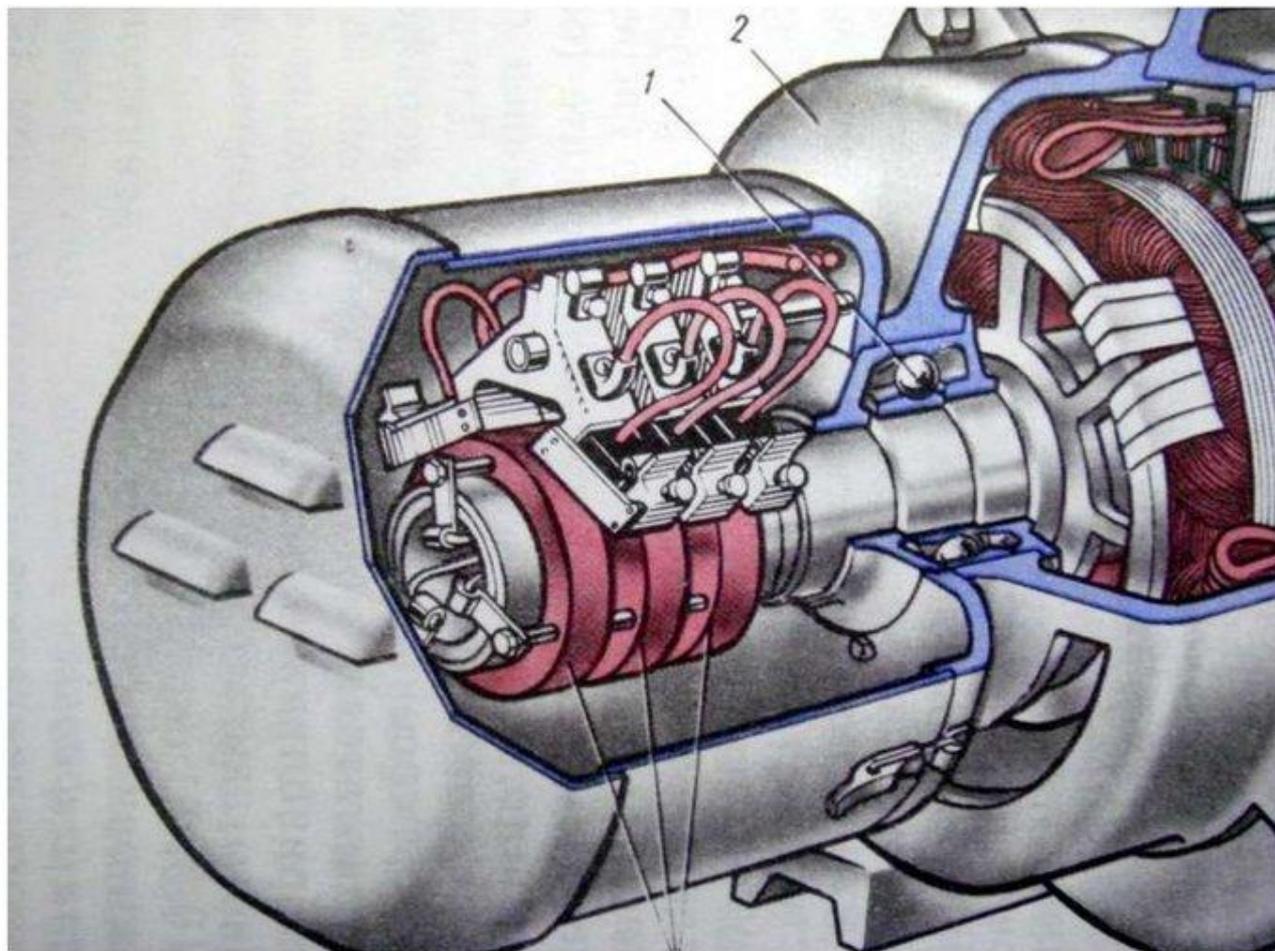
Следовательно,

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

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.

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

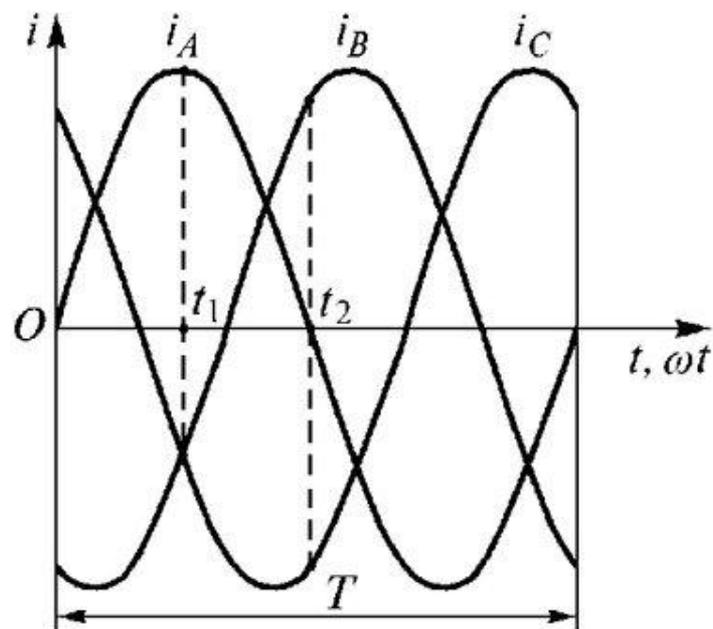
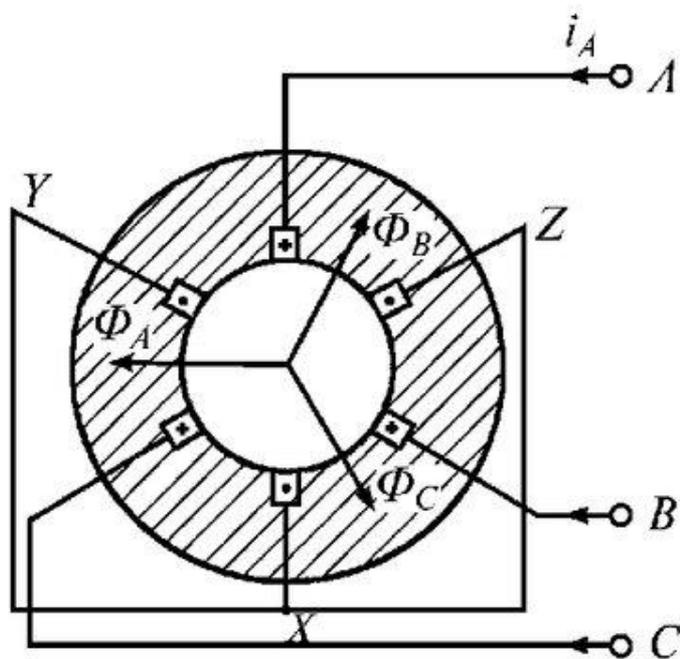
c - констр.коэфф.-т, Φ -магнитный поток, I_2 - ток в роторе,
 ψ_2 - сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора

- 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

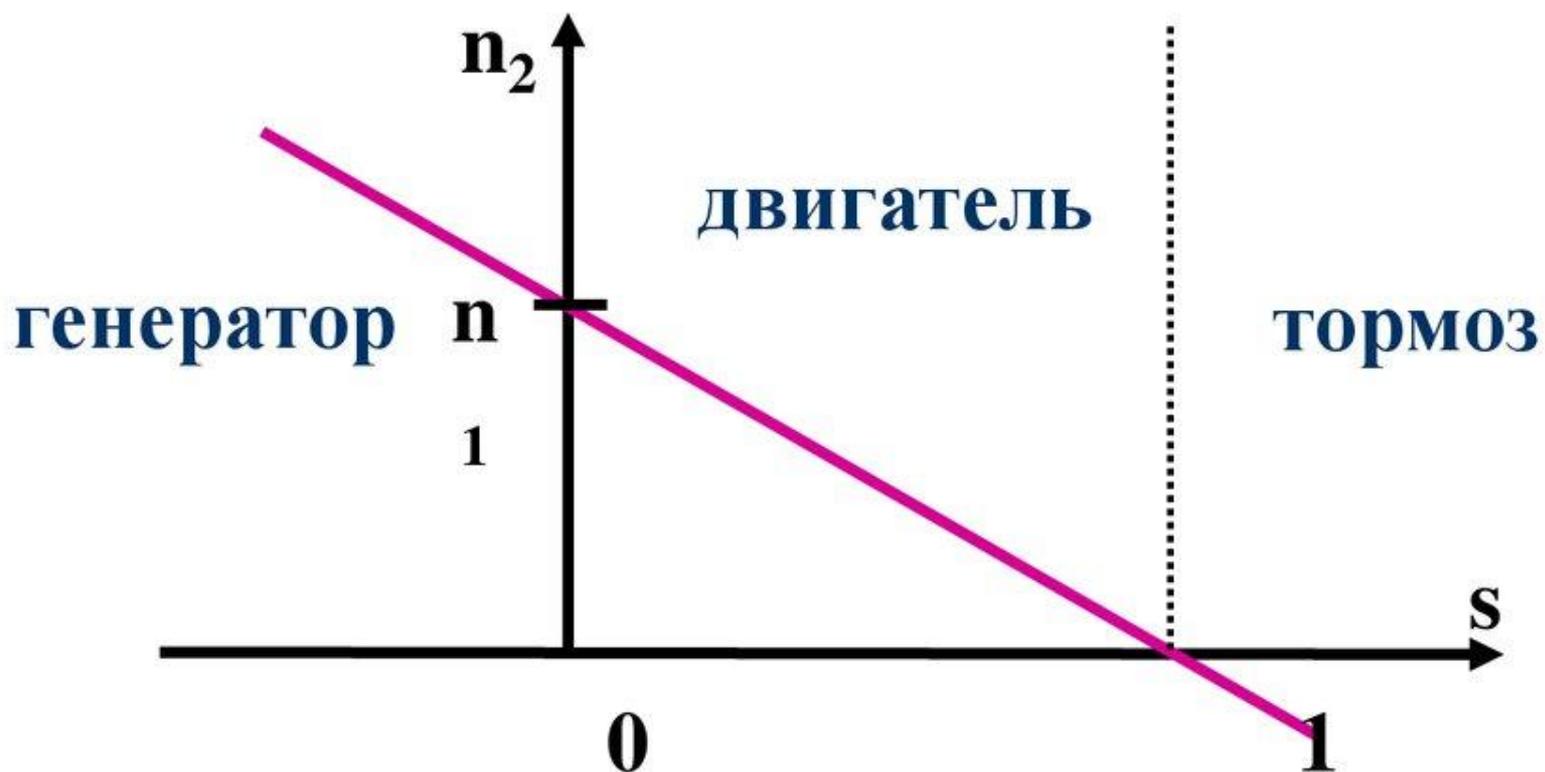
- Если по системе проводников, распределенных в пространстве по окружности, протекают токи, сдвинутые по фазе, то в пространстве создается вращающееся поле.



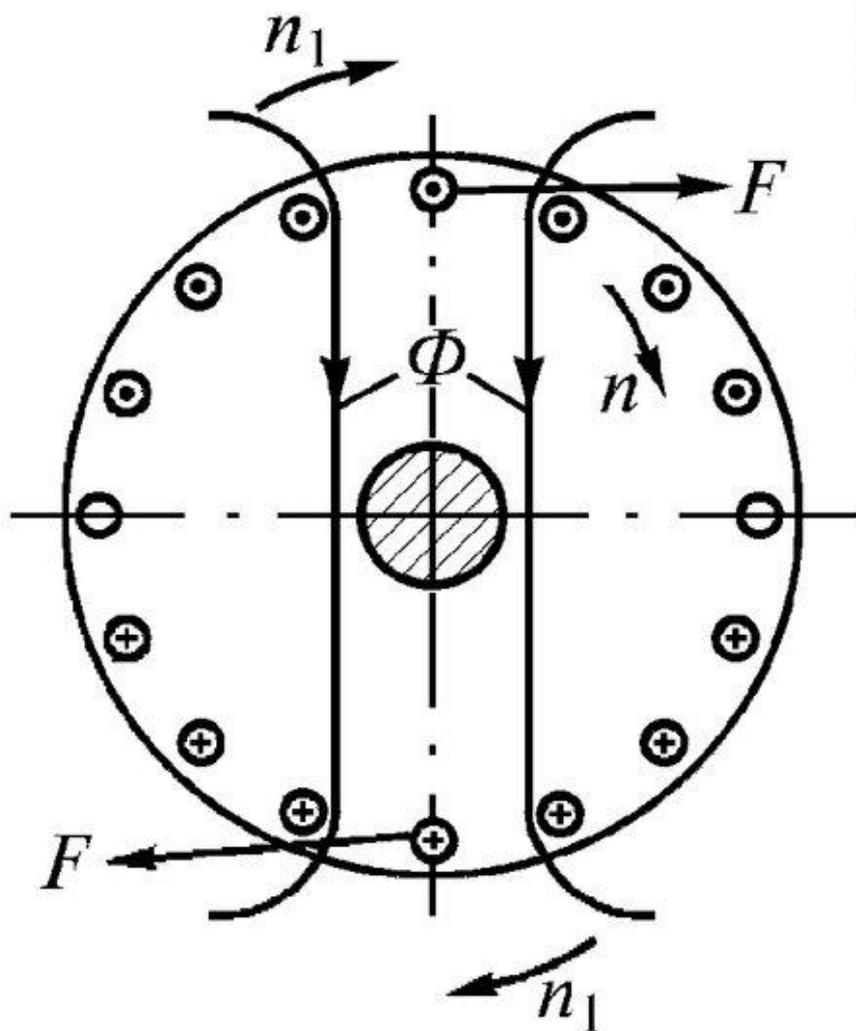
В зависимости от соотношения n_2 и n_1 различают

три режима работы:

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



Работа в режиме 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

$$s = 0 \text{ до } s = -\infty$$

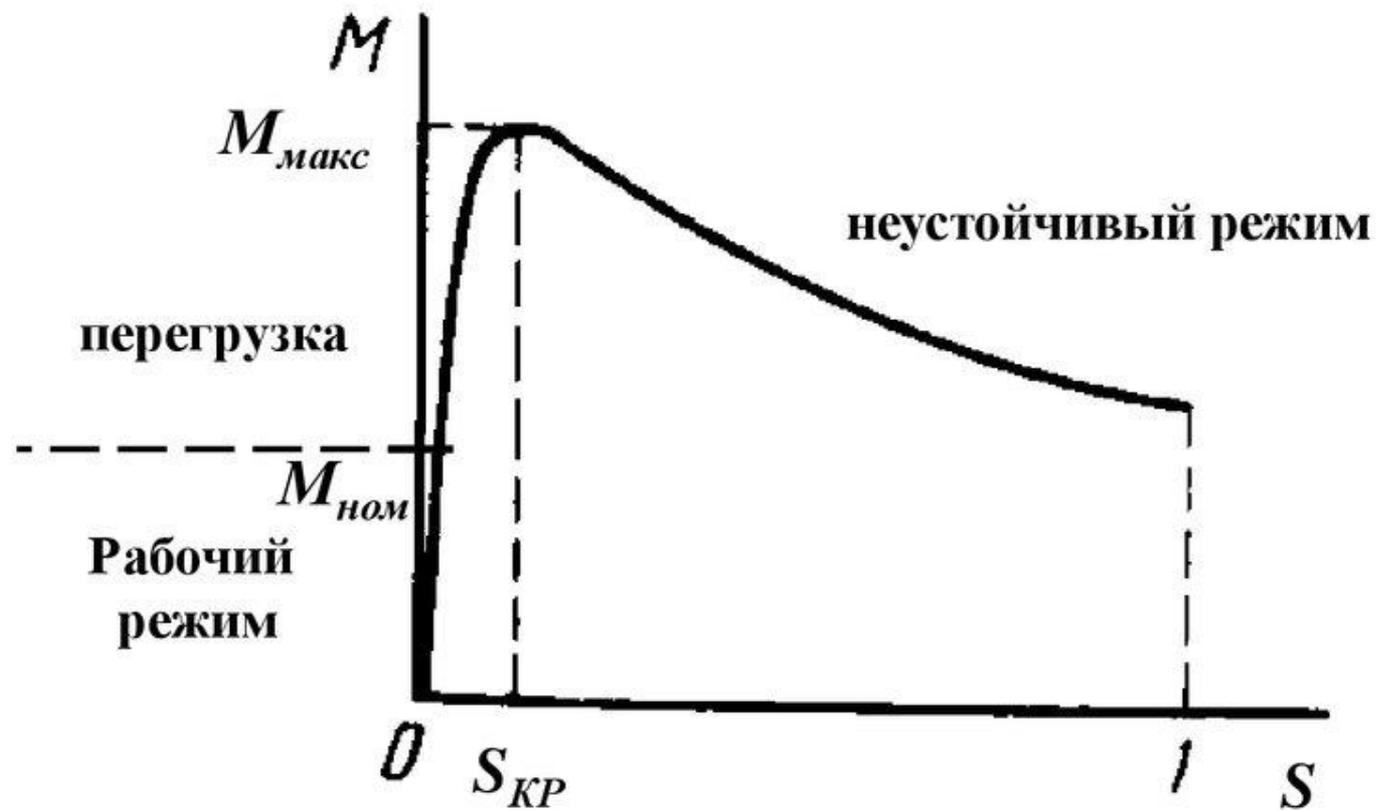
Режим электромагнитного тормоза ($S \geq 1$).

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.**

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

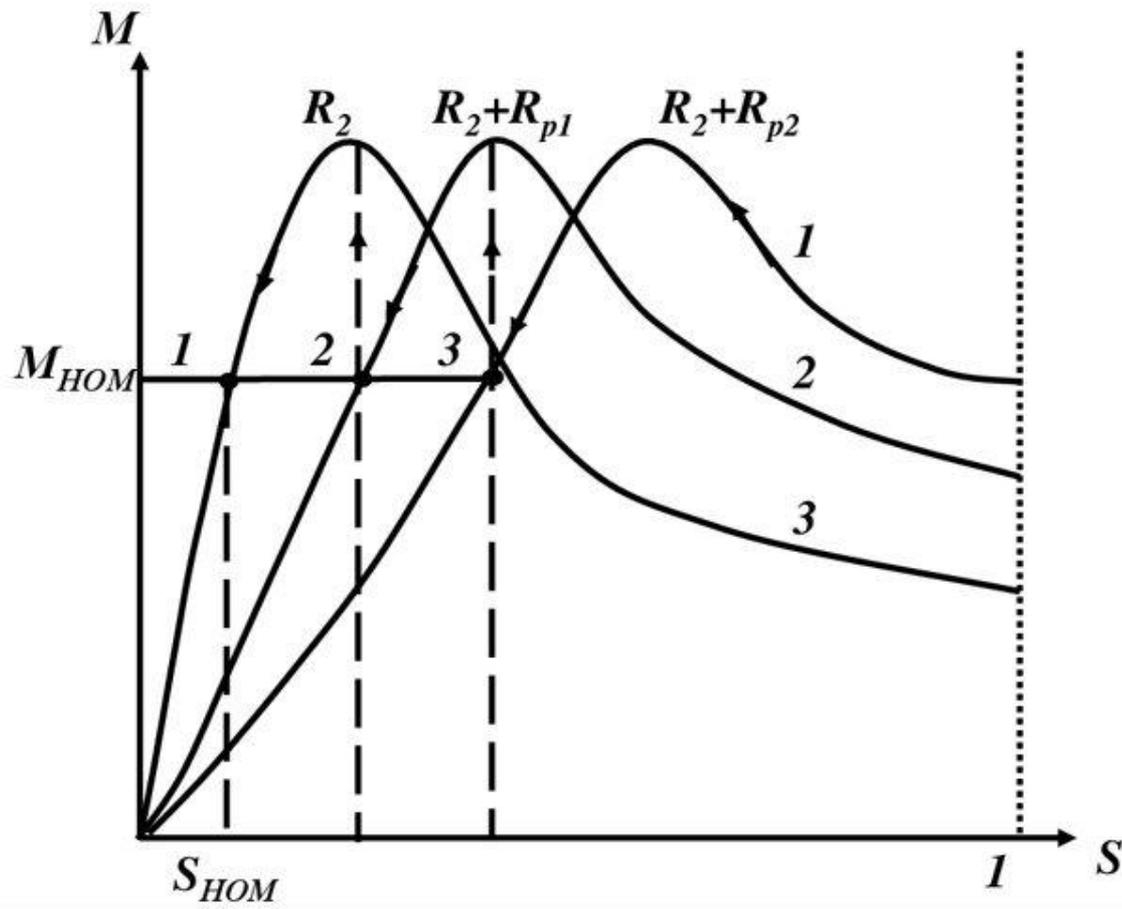
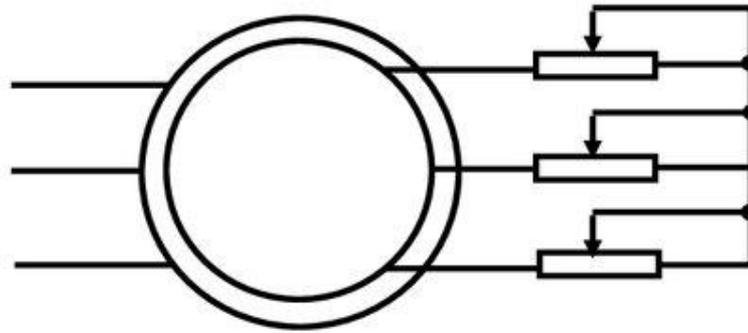
$$M_B \succ M$$

Для расчета момента можно использовать уравнение Клосса.

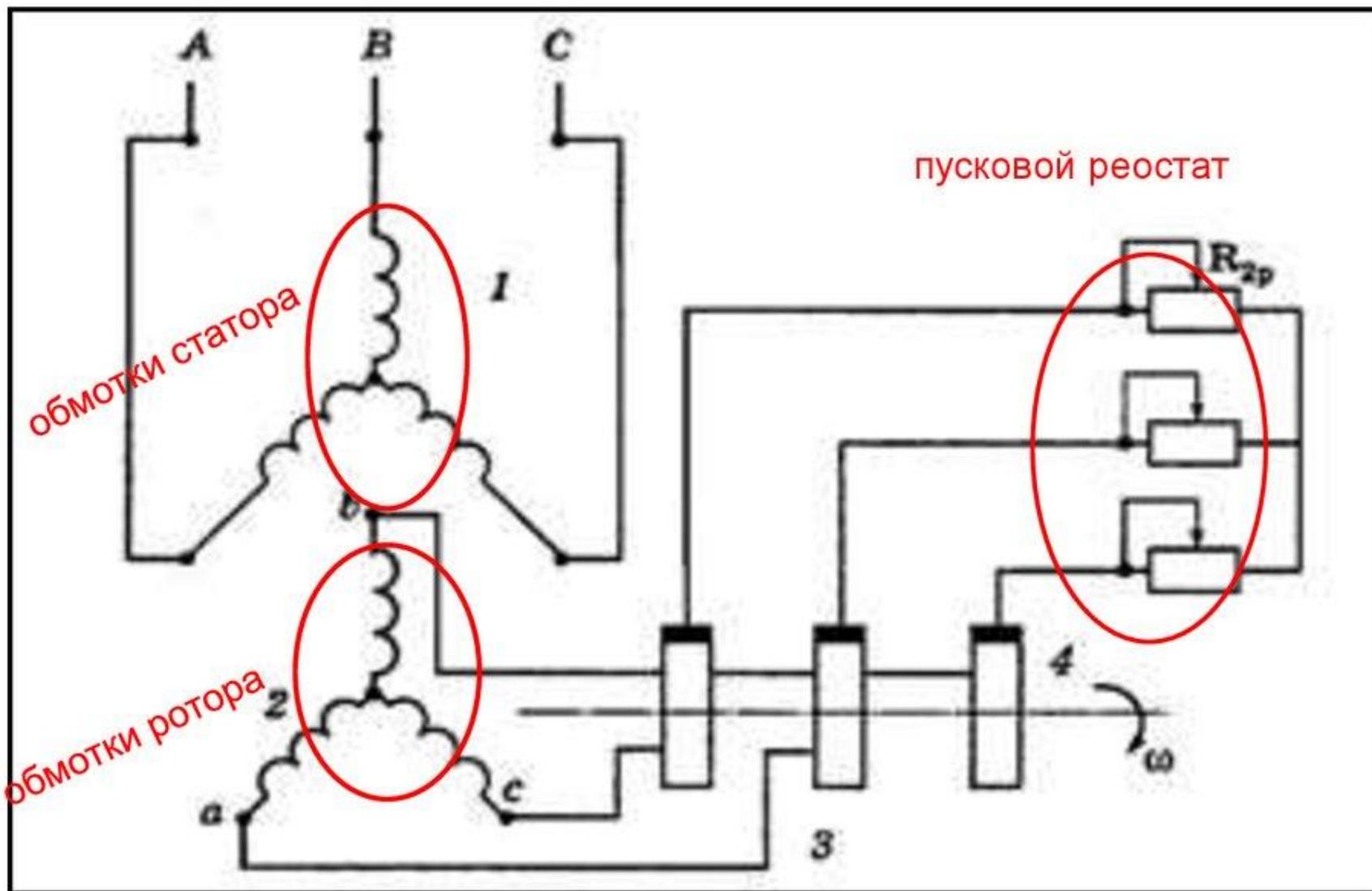
$$M = \frac{2M_H}{\frac{S_{KP}}{S} + \frac{S}{S_{KP}}}$$

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

§ 8.1 Пуск АД с фазным ротором



Пуск АД с фазным ротором



Регулирование частоты вращения 3-х фазного АД

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

АД с короткозамкнутым ротором:

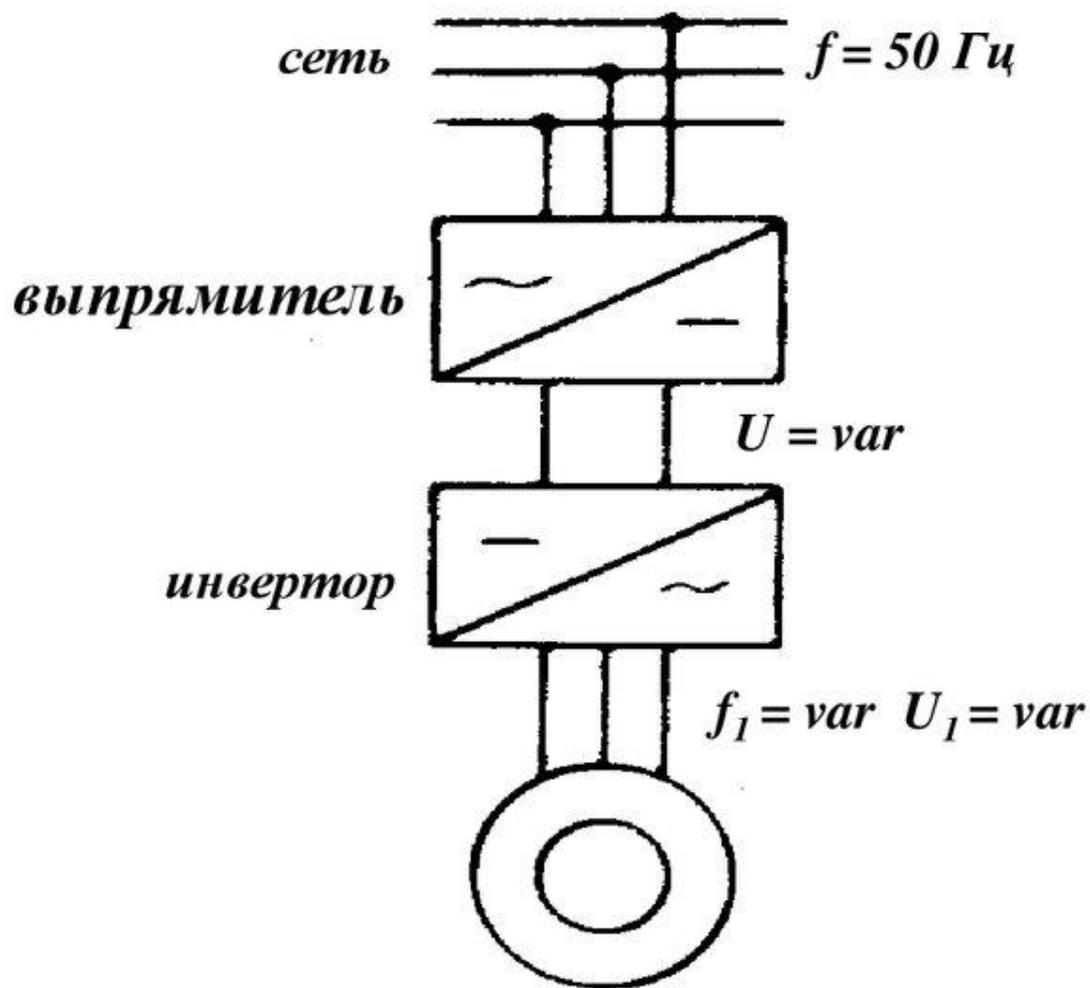
- метод частотного регулирования:

- метод изменения числа пар полюсов

вращающегося магнитного поля.

АД с фазным ротором - метод реостатного регулирования.

Схема включения АД с частотным регулированием скорости



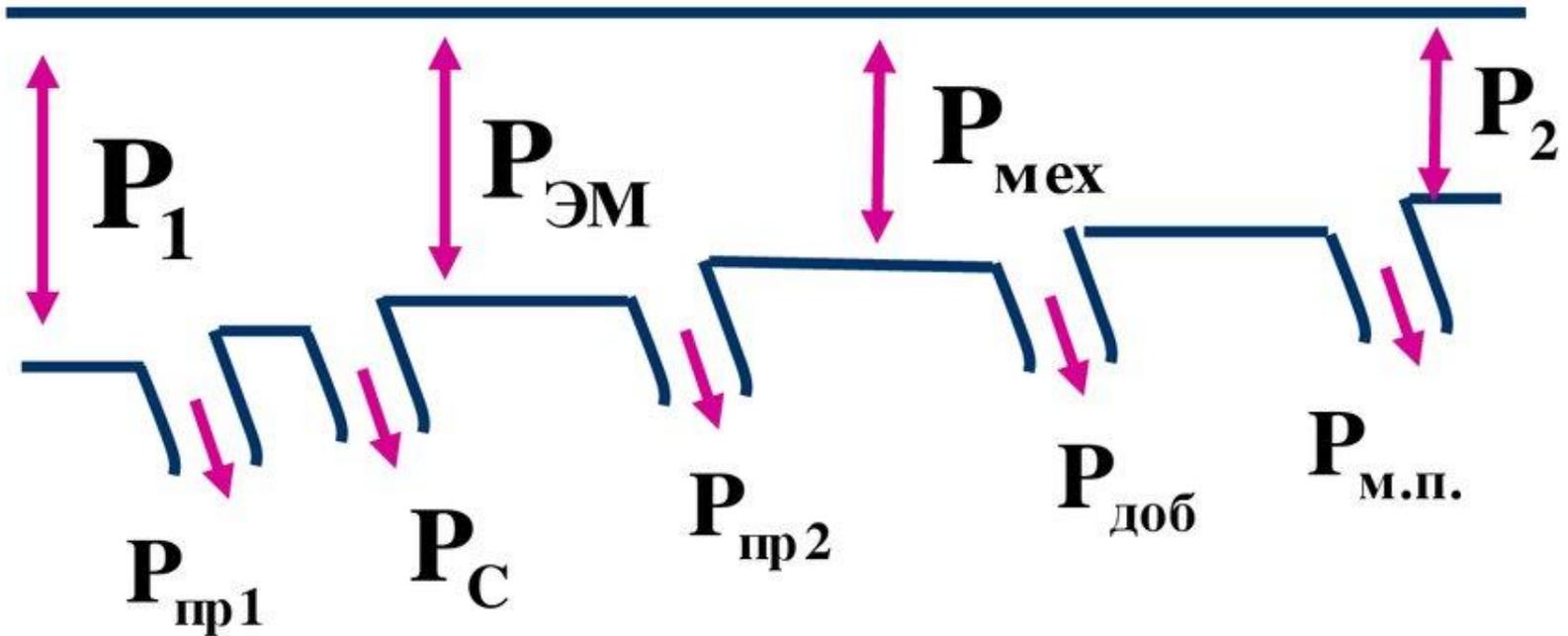
Комплексная мощность трехфазного асинхронного двигателя

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

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_{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;

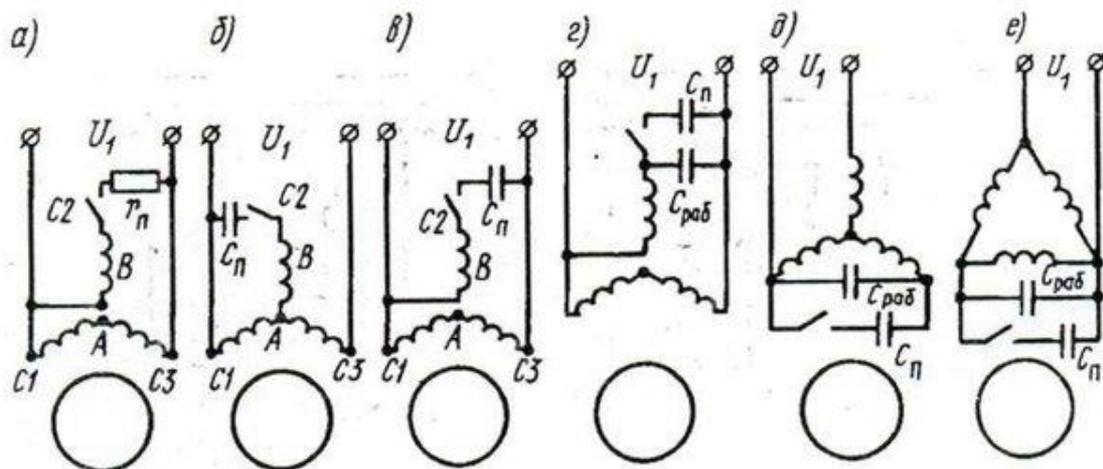
$P_{\text{доб}}$ — добавочные потери (создаются пульсациями магнитного поля);

$P_{\text{м.п.}}$ — 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

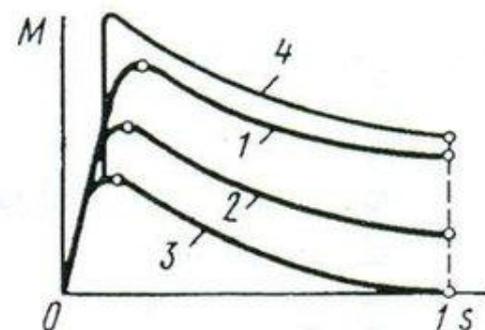


Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

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

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

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

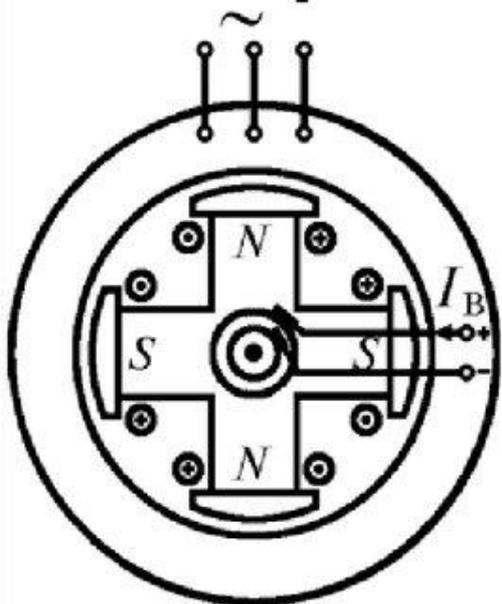


Механические характеристики трехфазного асинхронного двигателя при различных схемах включения

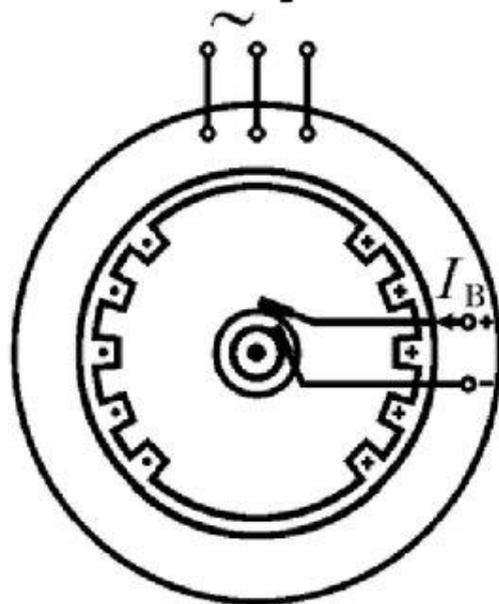
Синхронные машины

- 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.

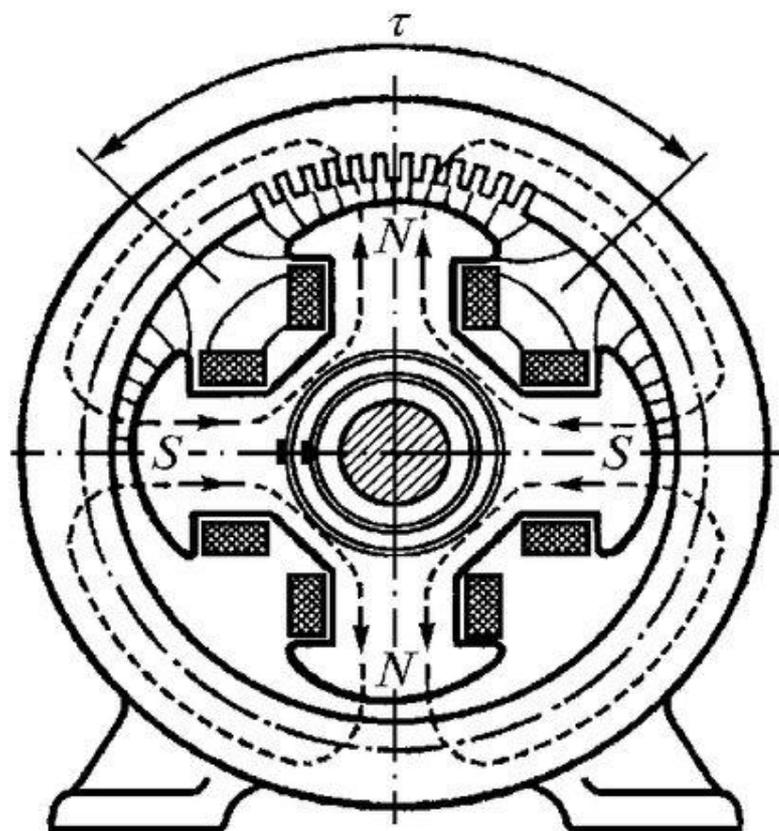
два типа роторов:

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;

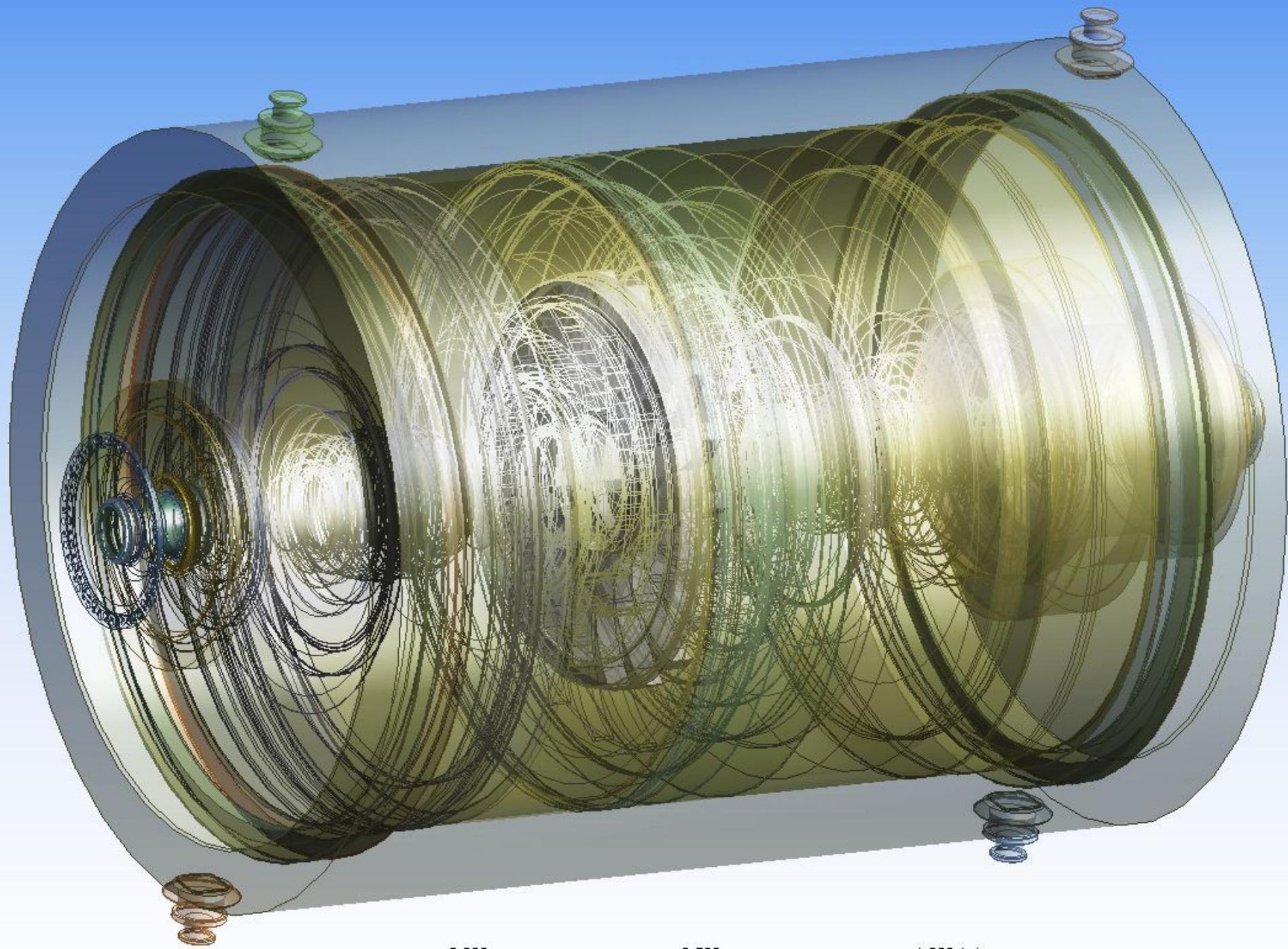
w – число витков одной фазы
обмотки статора

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

p – число пар полюсов;

Φ_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 станов, 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.

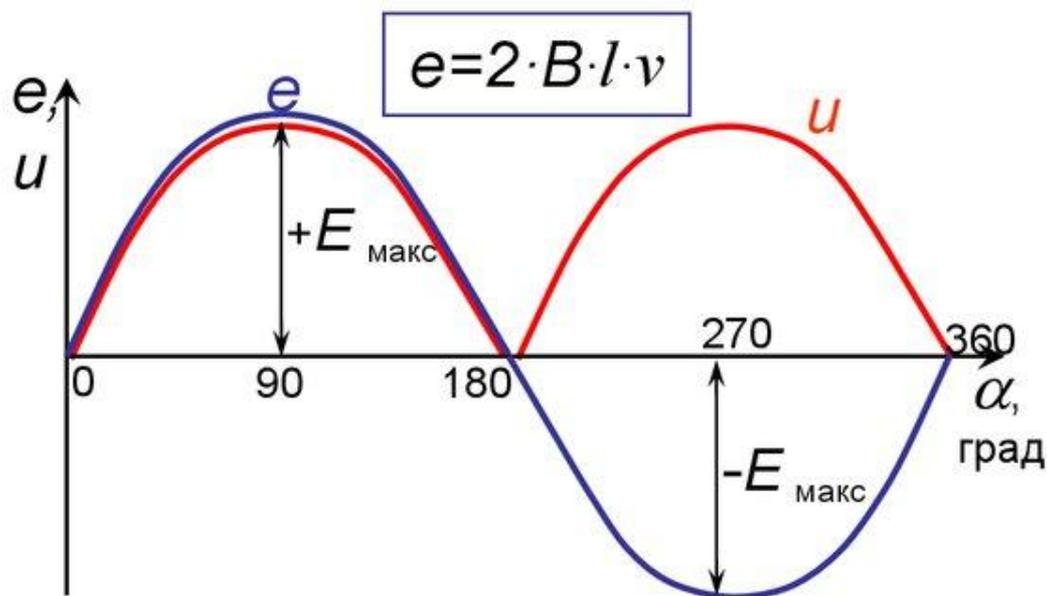
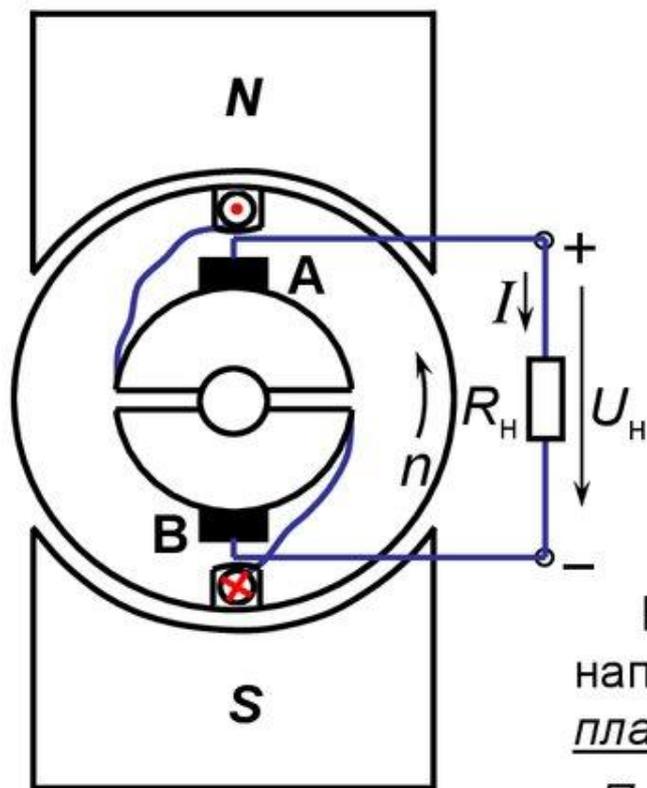
Все недостатки ДПТ обусловлены *наличием коллекторно-щеточного узла*. Они ограничивают применение ДПТ.

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

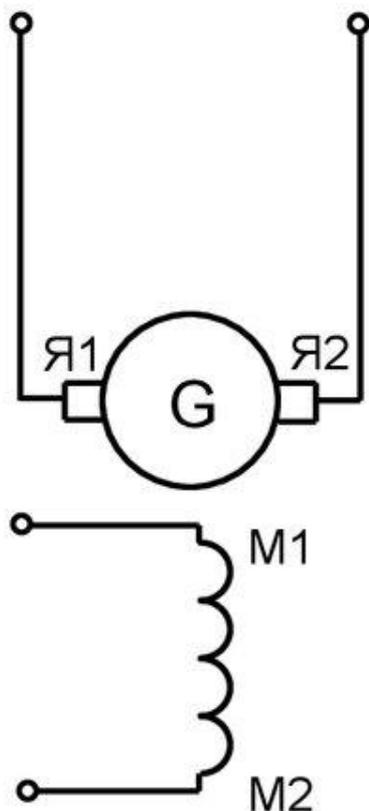


Когда ЭДС в витке якорной обмотки меняет свое направление происходит смена коллекторных пластин под щетками.

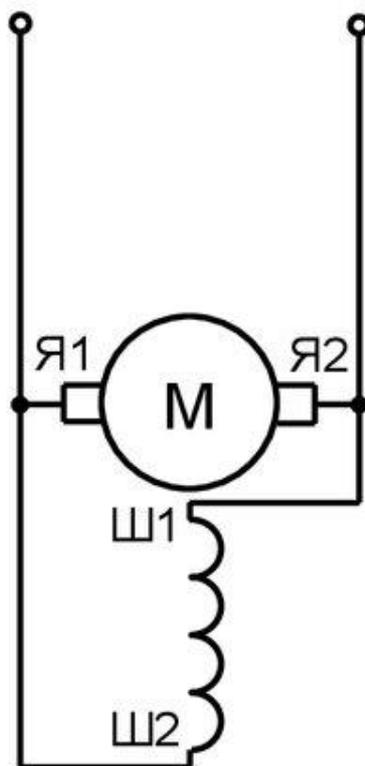
Полярность щеток всегда остается неизменной независимо от положения витка якорной обмотки.

Способы возбуждения электрических машин постоянного тока

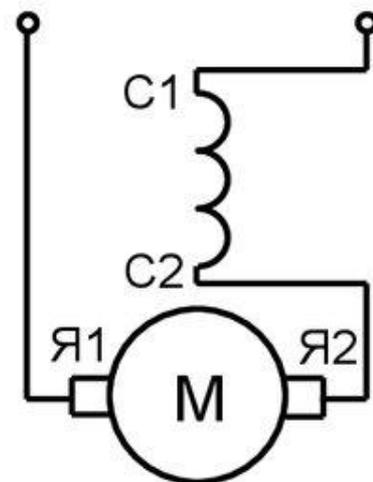
Свойства МПТ в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, т. е. способом возбуждения.



Независимое
возбуждение

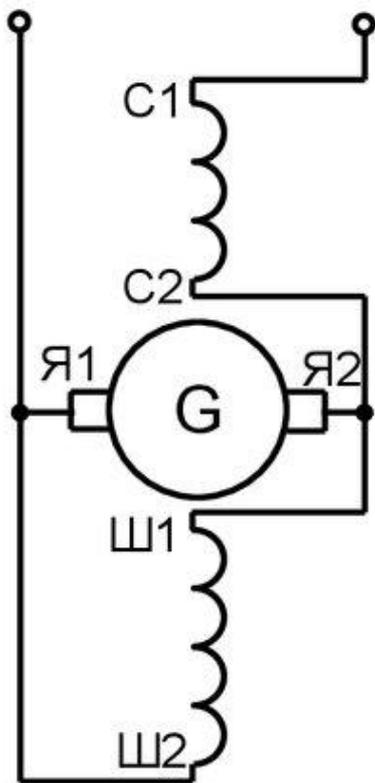


Параллельное
возбуждение

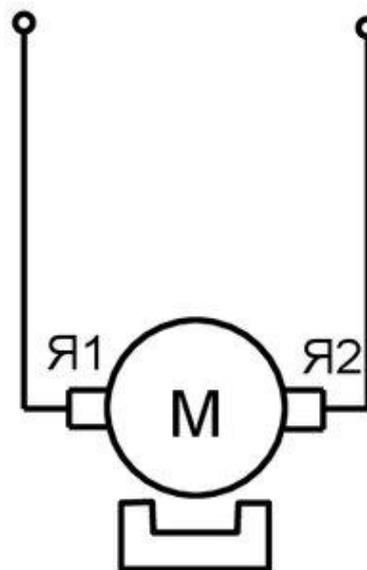


Последовательное
возбуждение

Способы возбуждения электрических машин постоянного тока

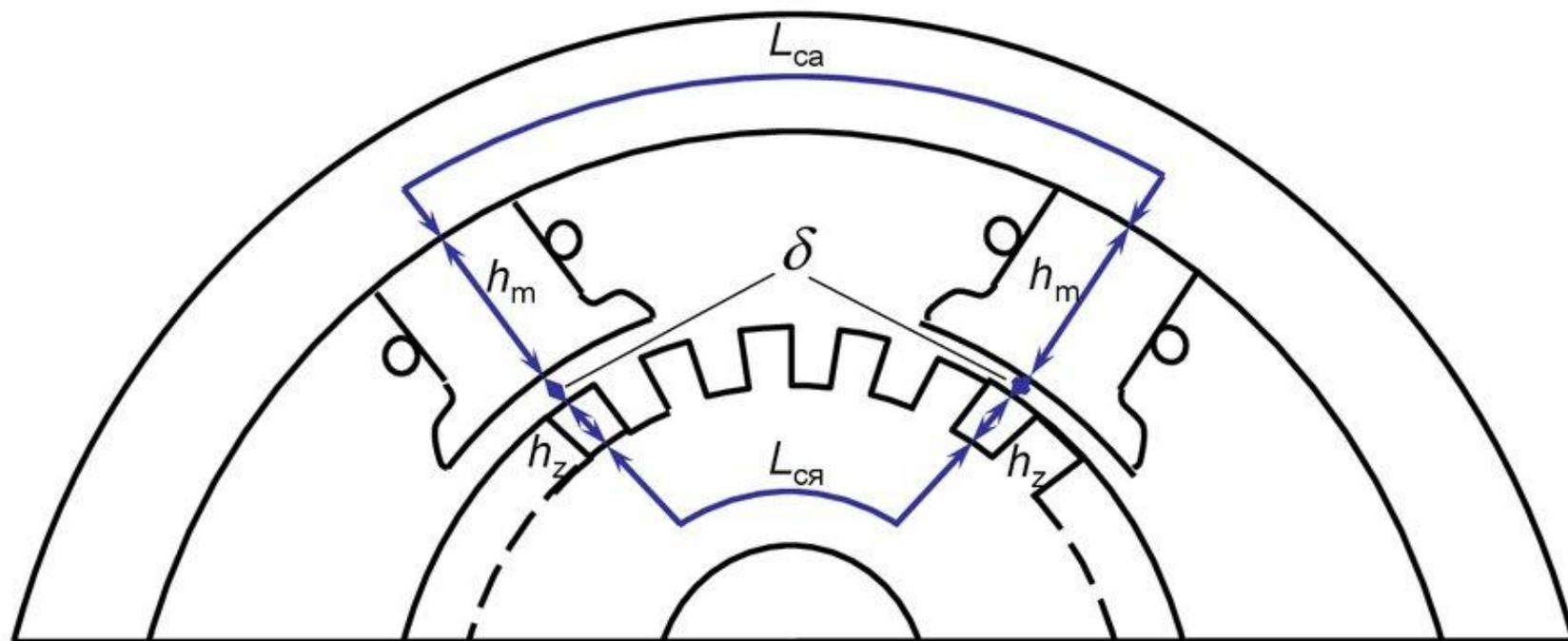


Смешанное
возбуждение



Возбуждение от
постоянных магнитов

Магнитная цепь машины постоянного тока



L_{ca} – статор (ярмо)

h_m – главный полюс

δ – воздушный зазор

h_z – зубцовый слой якоря

L_{cya} – спинка якоря

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода:

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

F_{δ} – магнитное напряжение воздушного зазора

F_z – магнитное напряжение зубцового слоя якоря

F_m – магнитное напряжение главного полюса

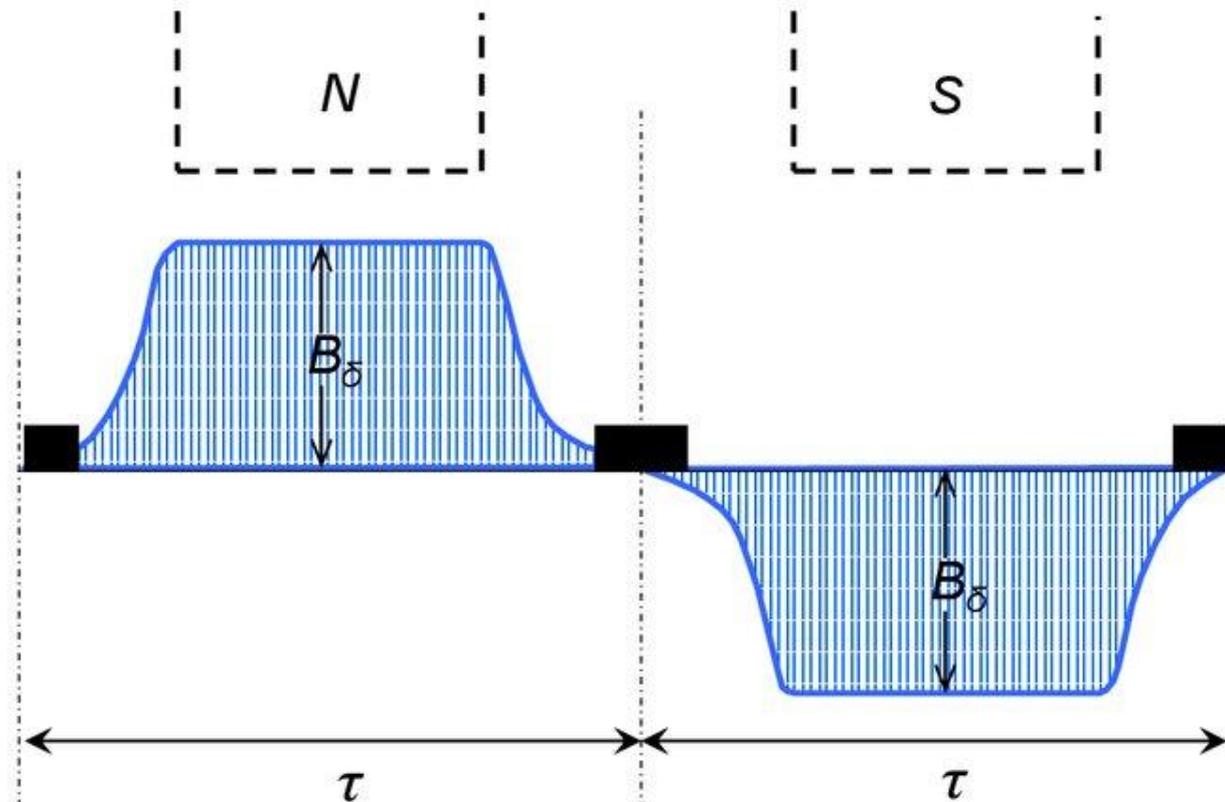
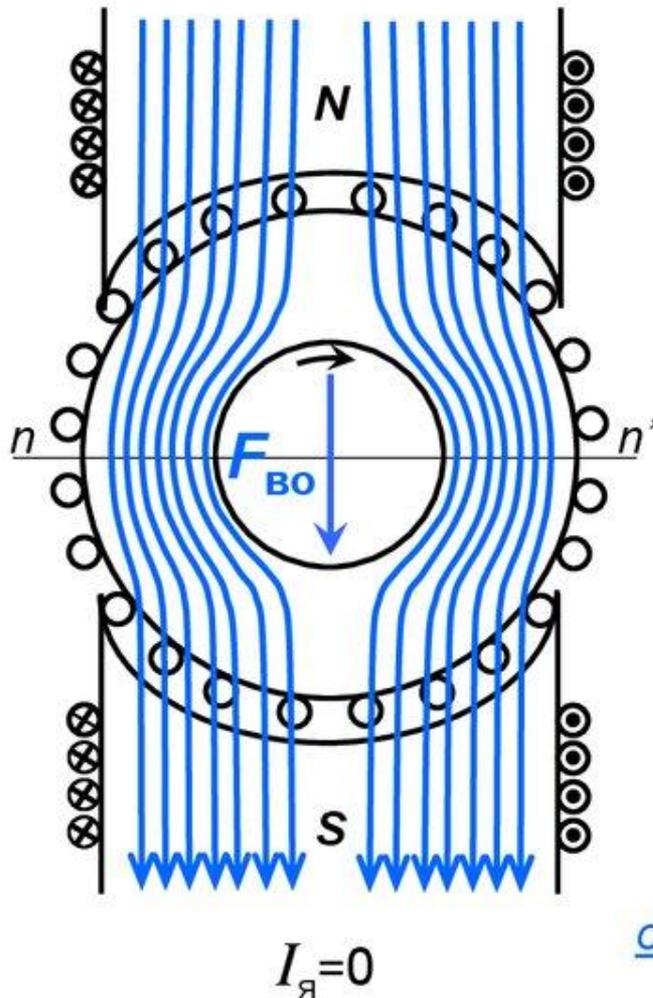
F_a – магнитное напряжение статора (ярма)

$F_{я}$ – магнитное напряжение спинки якоря

Наибольшим магнитным сопротивлением обладает воздушный зазор δ , поэтому магнитное напряжение F_{δ} *намного больше остальных слагаемых* F_{bo}

Реакция якоря машины постоянного тока

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

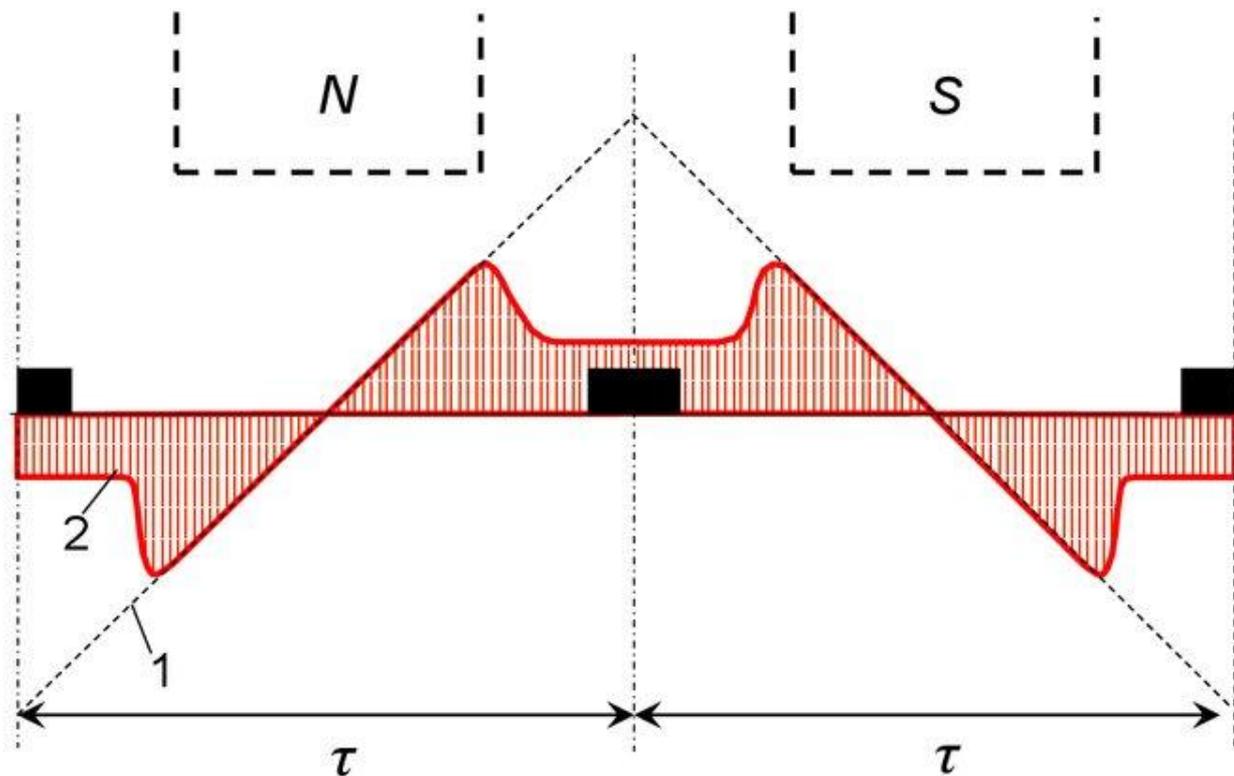
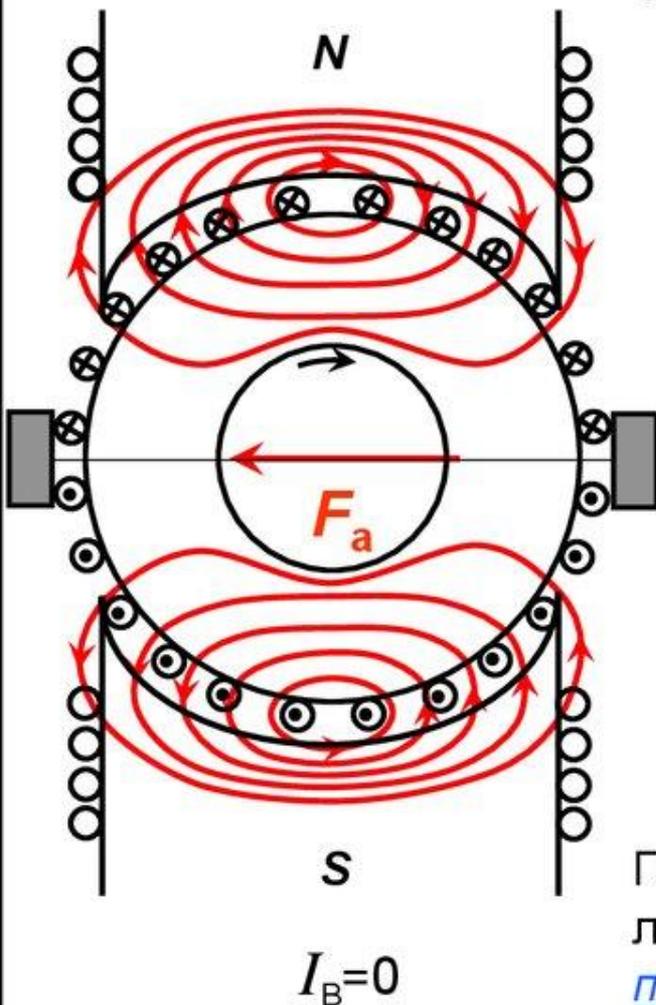


В этом случае магнитное поле симметрично относительно оси полюсов

Реакция якоря машины постоянного тока

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

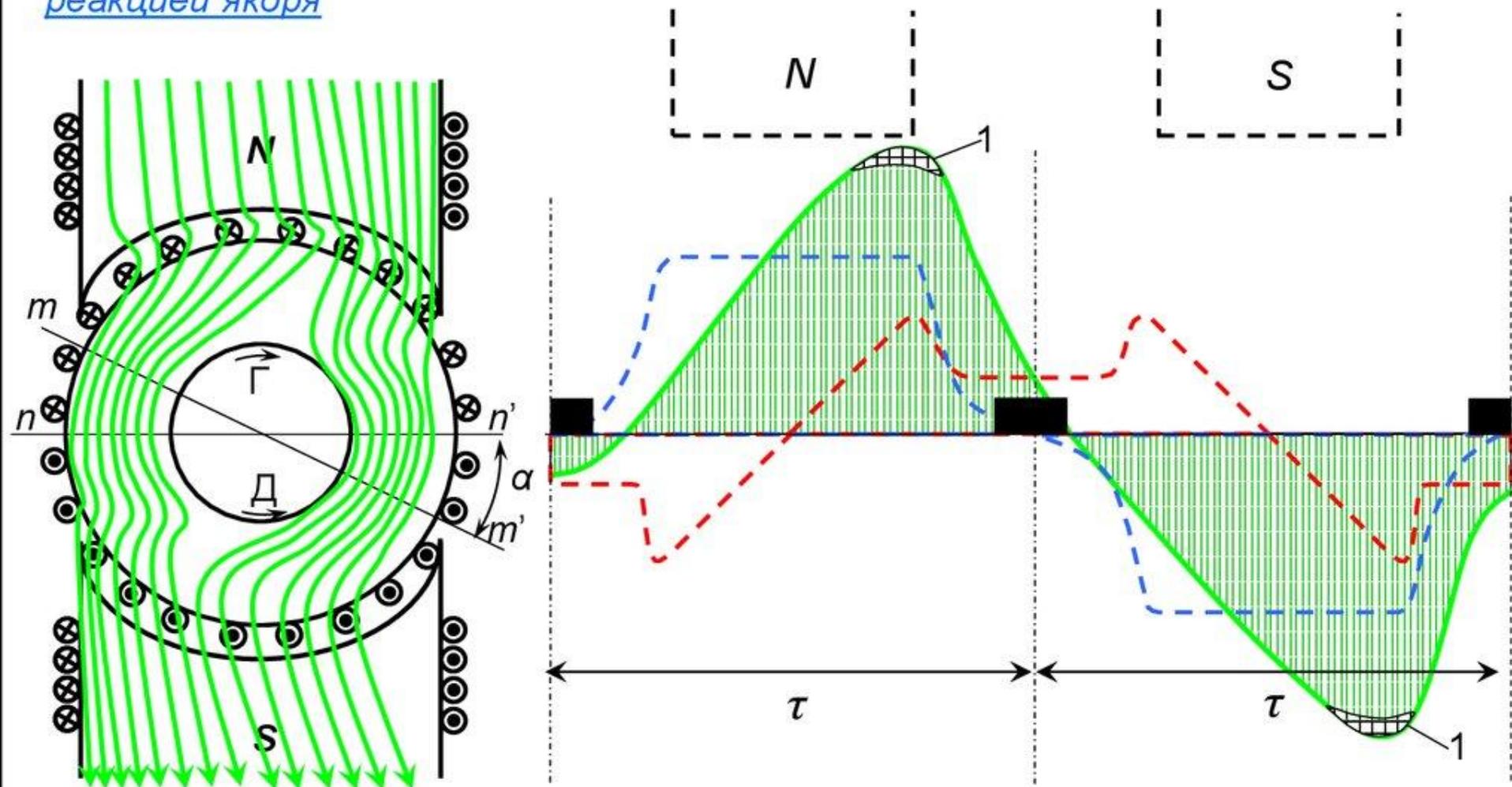
Допустим, что МДС обмотки возбуждения $F_{во}=0$, тогда магнитное поле МДС якоря F_a будет иметь вид:



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

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

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

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

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

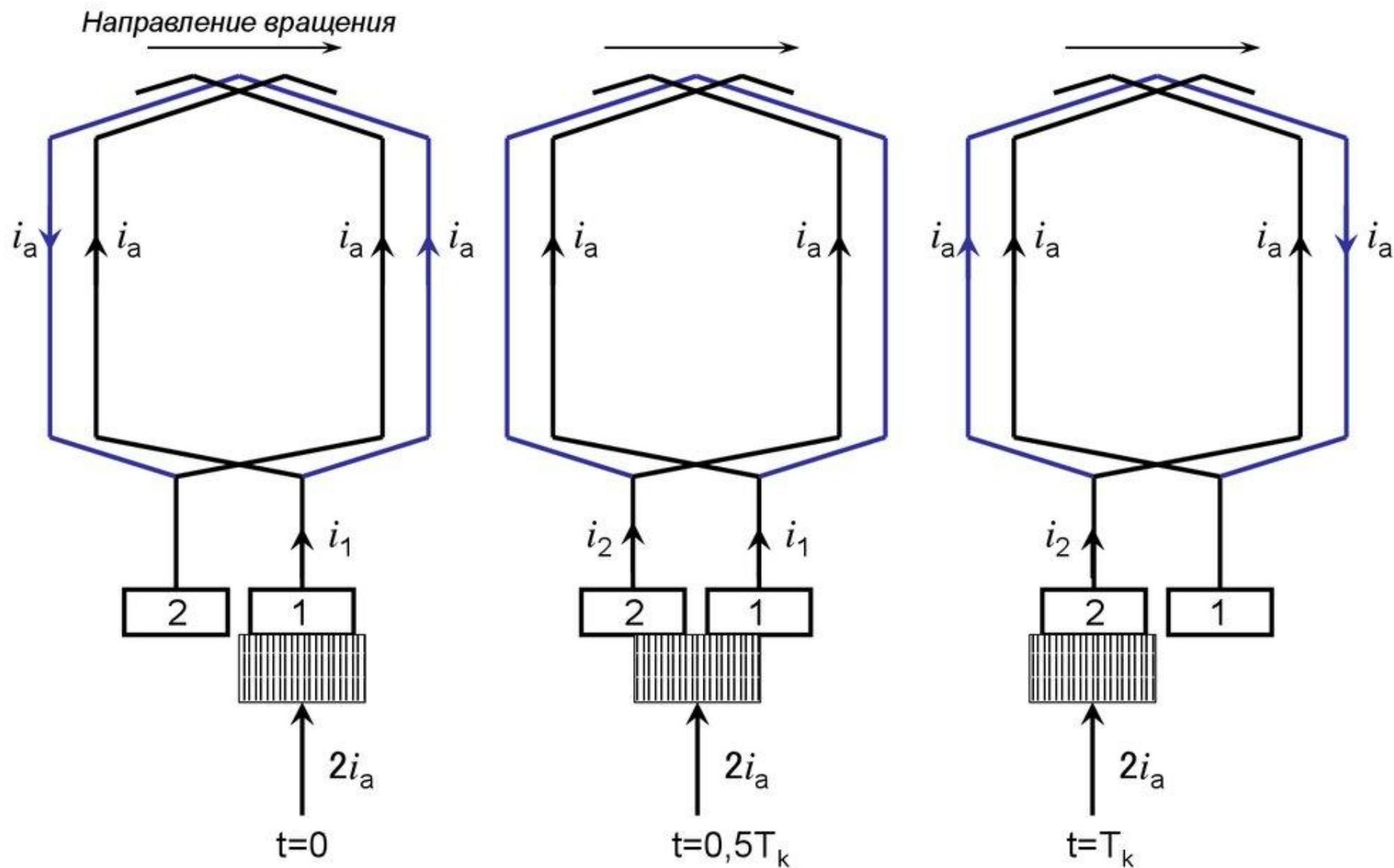
где $C_M = [pN / (2\pi a)]$ – постоянная для данной машины

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

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;

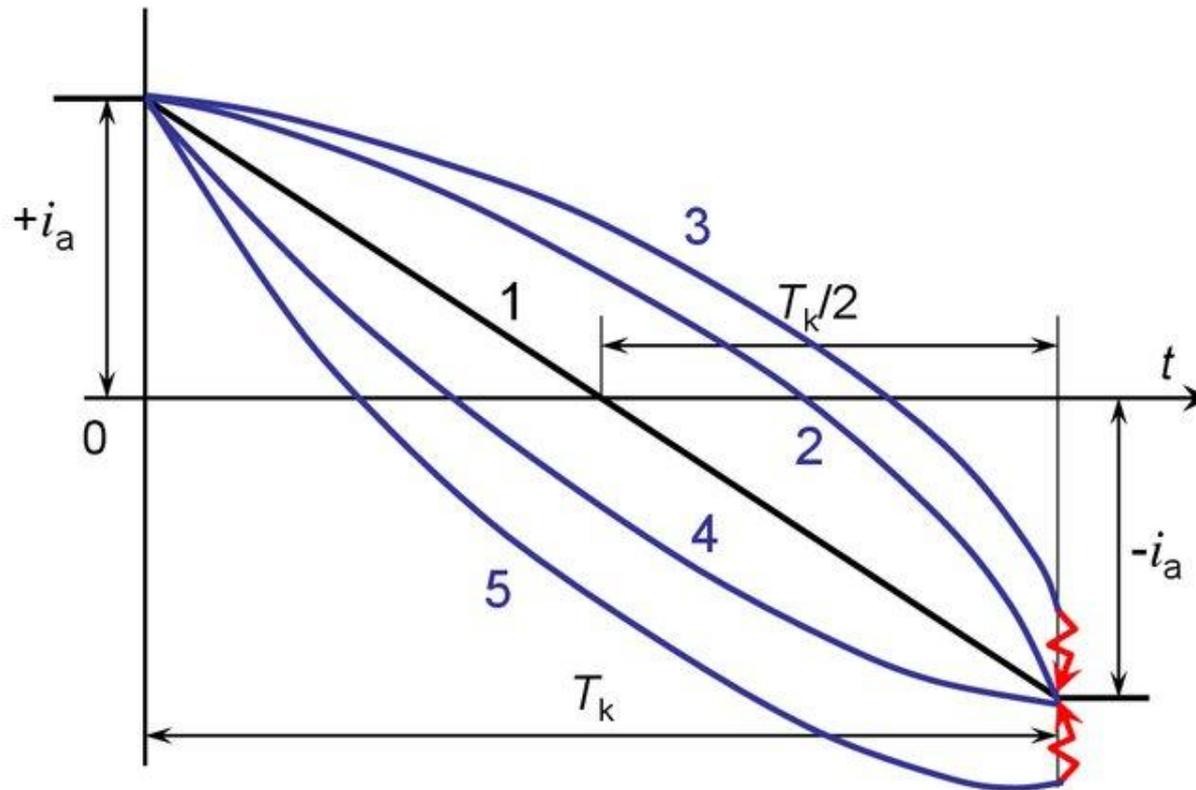
$b_{щ}$ – ширина щетки;

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