



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

Лекция 11

Электрические машины

**Электрические машины** – устройства, преобразующие механическую энергию в электрическую (**генераторы**), или преобразующие электрическую энергию в механическую (**двигатели**).

Двигатели по назначению можно подразделить:

- *приводные;*
- *исполнительные.*

**Приводные** – приводят в движение те или иные устройства (с возможностью торможения реверса и регулирования частоты вращения).

**Исполнительные** – поворачивают те или иные устройства с заданной скоростью на заданные углы, т.е. отрабатывают заданный сигнал.

Принцип действия электрических машин основываются на взаимодействии магнитного поля и проводника с током (**у двигателей**) и на взаимодействии магнитного поля и вращающегося проводника (**у генераторов**).

# Принцип действия двигателя

## Иллюстрация возникновения силы Ампера

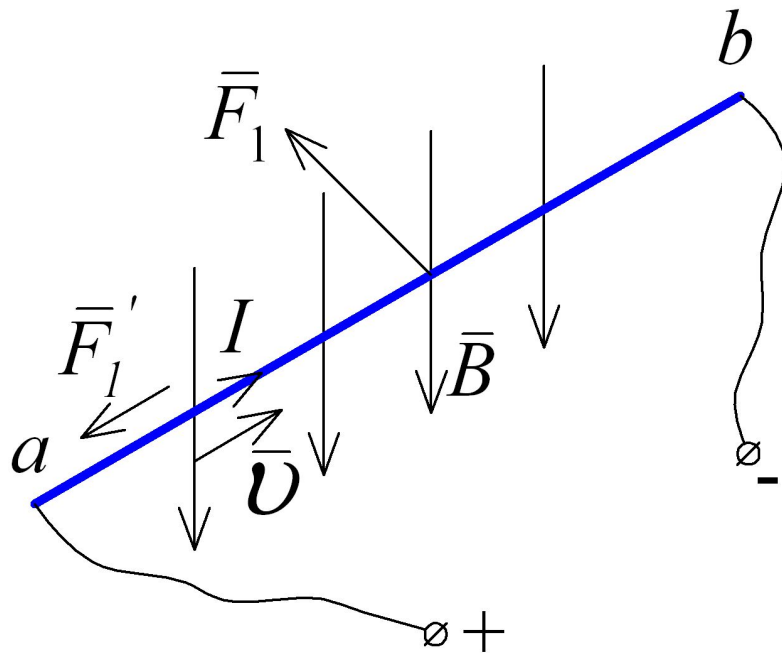


Рис. 1

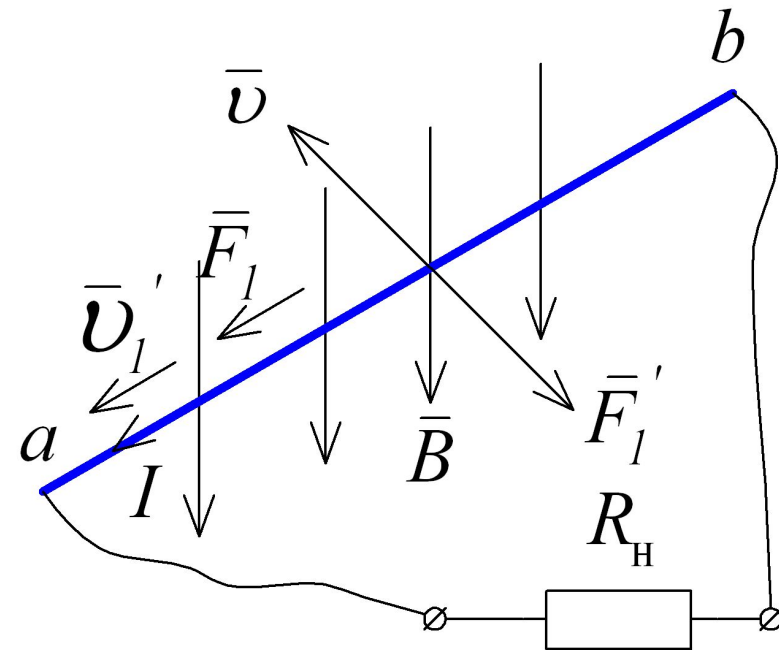


Рис. 2

$$\vec{F}_1 = \vec{B} \times \vec{I}$$

$$F_1 = B \cdot I \cdot l$$

$\vec{U}'$  - скорость зарядов в проводнике  
 $\vec{F}'$  - Сила Ампера

## Устройство электрических машин

Электрические машины состоят:

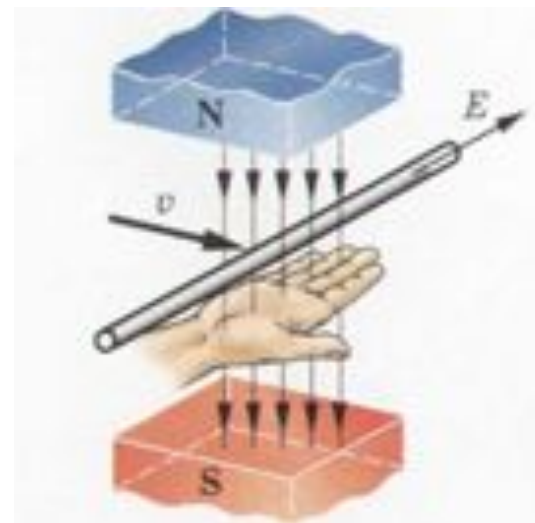
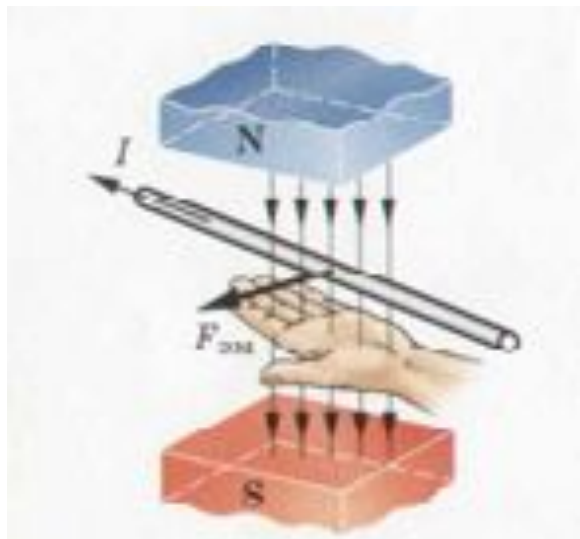
- **Статор** – неподвижная часть;
- **Ротор** – вращающаяся часть.

Электрические машины можно разделить по функциональным признакам:

Часть машины, в проводниках которой наводится **ЭДС вращения**, называют *якорем*,  
Часть машины, создающую магнитное поле, в котором находится якорь, называют *возбудителем*. На рисунках 1 и 2 роль якоря играет проводник *ab*.

Направление силы, действующей на проводник с током определяется правилом **левой руки**.

Направление ЭДС, возникающего в проводнике определяется правилом **правой руки**.



## Способы создания магнитного поля

Принцип действия электрических машин основываются на взаимодействии магнитного поля и проводника с током (у двигателей) и на взаимодействии магнитного поля и вращающегося проводника (у генераторов).

Магнитное поле машины может иметь одну или несколько пар полюсов (обозначают -  $p$ ).

Если  $p > 1$ , то окажется, что окружность вокруг продольной оси машины будет поделена между полюсами на  $2p$  равных частей. Дуга окружности, приходящаяся на один полюс, называется *полюсным делением*.

Полюса чередуются, поэтому одному периоду изменения магнитной индукции соответствует  $360$  электрических градусов, т.е. в окружности машины содержится  $p \cdot 360$  электрических градусов.

Следовательно,  $1$  геометрический градус =  $p$  \* электрических градусов!

Пример: число пар полюсов машины  $p=2$ , тогда окружность машины делится на  $2$  дуги, следовательно  $1^\circ = 2$  электр. $^\circ$ .

Магнитное поле электрической машины создаются:

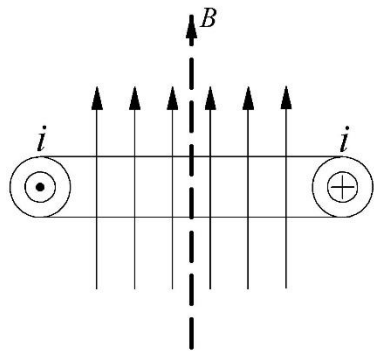
1. С помощью постоянных магнитов;
2. С помощью постоянного тока;

В обоих случаях магнитное поле неподвижно относительно оси статора.

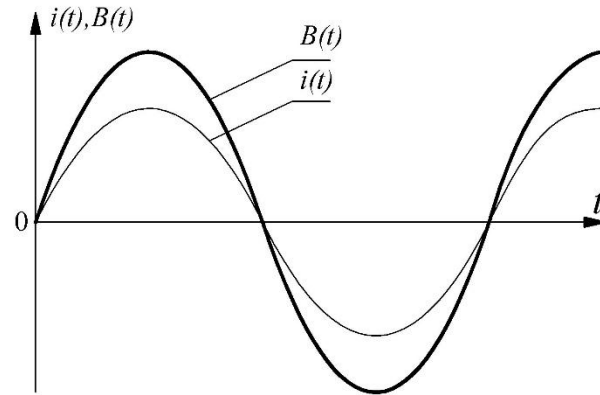
Якорь вращается в постоянном магнитном поле.

3. С помощью переменного тока. Магнитное поле вращается относительно оси статора.

## Способ создания переменного магнитного поля переменным током



Обмотка

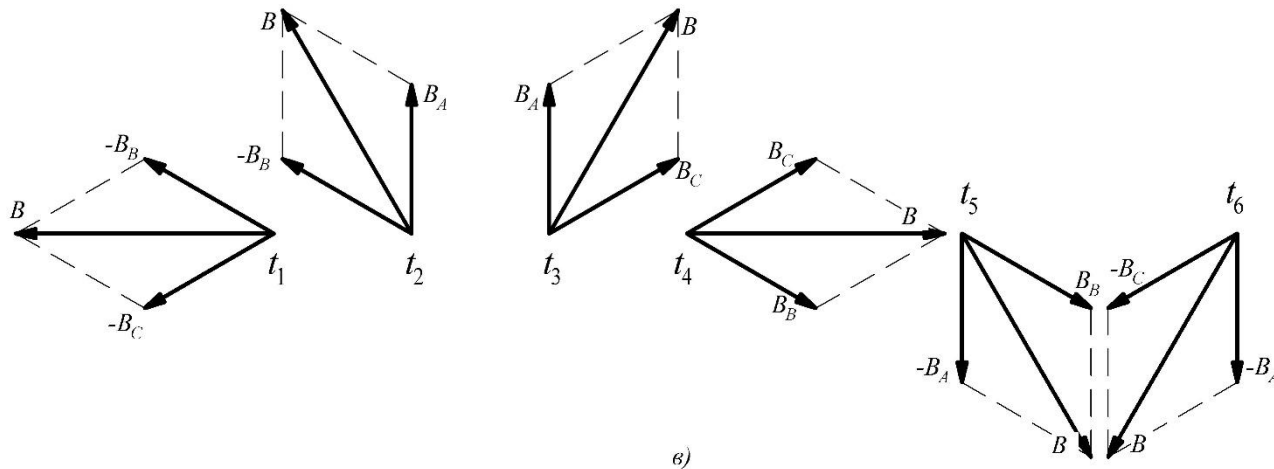
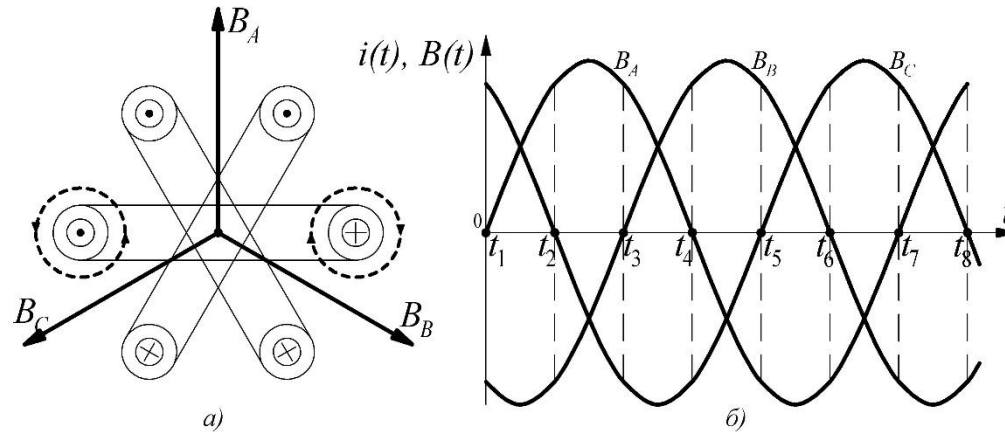


Мгновенные значения тока и созданной магнитной индукции

Появление вращающего магнитного поля трехфазной системы:

$$\begin{array}{lll}
 i_A = I_m \sin(\omega t) & \longrightarrow & B_A = B_m \sin(\omega t) & \longrightarrow & \vec{B}_A = B_m e^{j(\omega t + 0^\circ)} \\
 i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) & \longrightarrow & B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ) & \longrightarrow & \vec{B}_B = B_m e^{j(\omega t - 120^\circ)} \\
 i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ) & \longrightarrow & B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ) & \longrightarrow & \vec{B}_C = B_m e^{j(\omega t + 120^\circ)}
 \end{array}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C = -\frac{3}{2j} B_m e^{-j\omega t} = 1,5 B_m e^{-j(\omega t - 90^\circ)}$$



Магнитное поле перемещается в сторону той фазы, в которой ожидается ближайший максимум, т.е. направление вращения совпадает с чередованием тока в фазах (в нашем случае по часовой стрелке).

Если число пар магнитных полюсов  $p$ ,  
запишем общую формулу для угловой скорости вращения магнитного поля:

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad [\text{рад/сек}]$$

В инженерной практике скорость вращения измеряется в оборотах/минуту  
поэтому формула скорости принимает вид:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad [\text{об/мин}]$$

где,  $f$  – частота питающей сети

$n_0$  – синхронная частота вращения

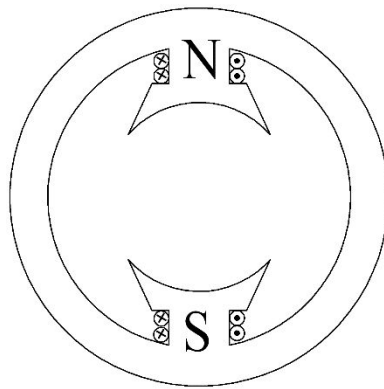
Для частоты питающей сети  $f = 50$  Гц

$n_0 = 3000$  об/мин; 1500 об/мин; 1000 об/мин;

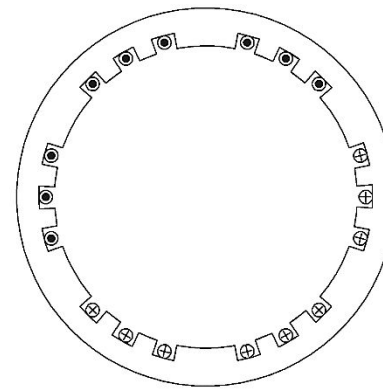


## Ротор и статор электрических машин делятся:

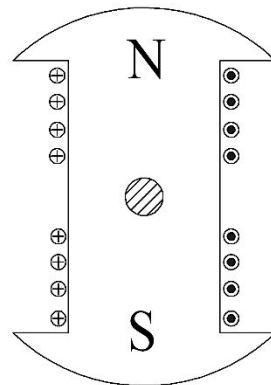
- явнополюсные - *а)* статор, *в)* ротор
- неявнополюсные - *б)* статор, *г)* ротор



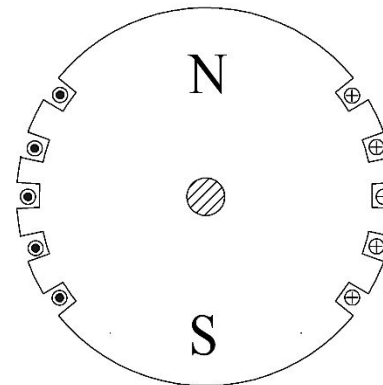
*а)*



*б)*

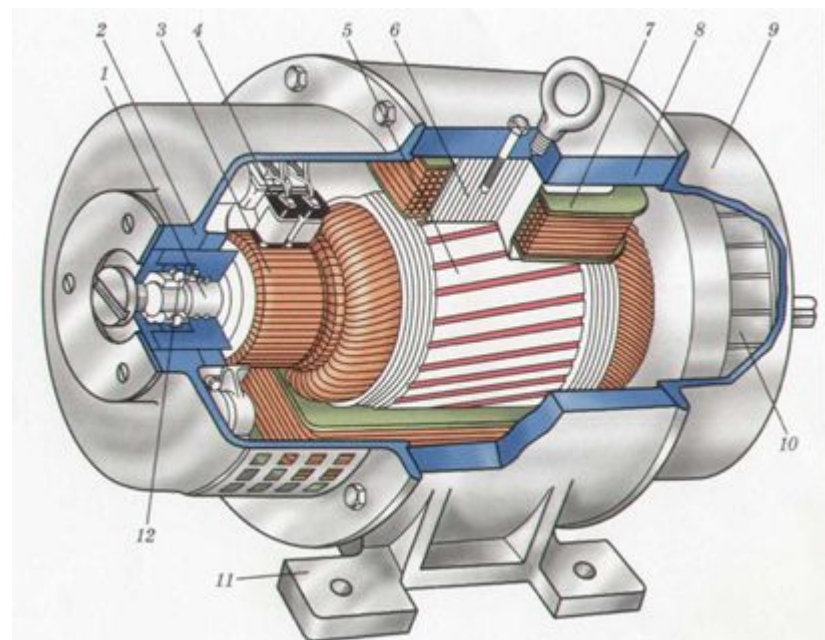
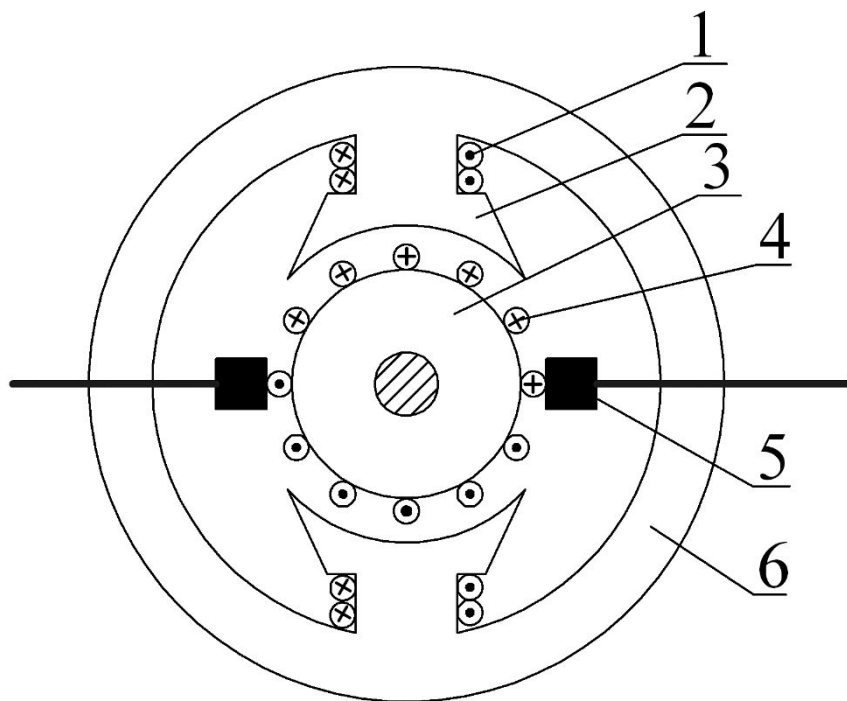


*в)*



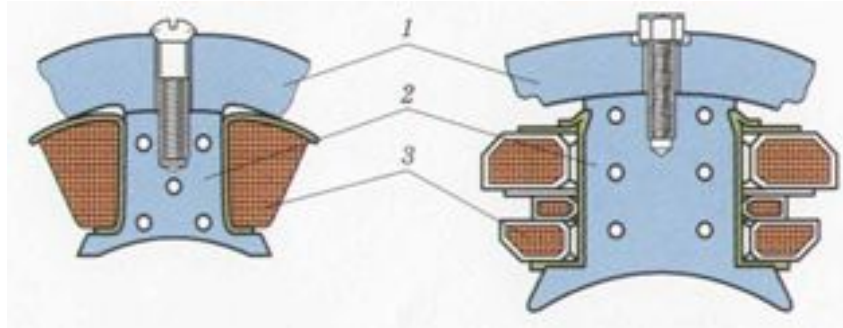
*г)*

## Машины постоянного тока (структура и составные части)

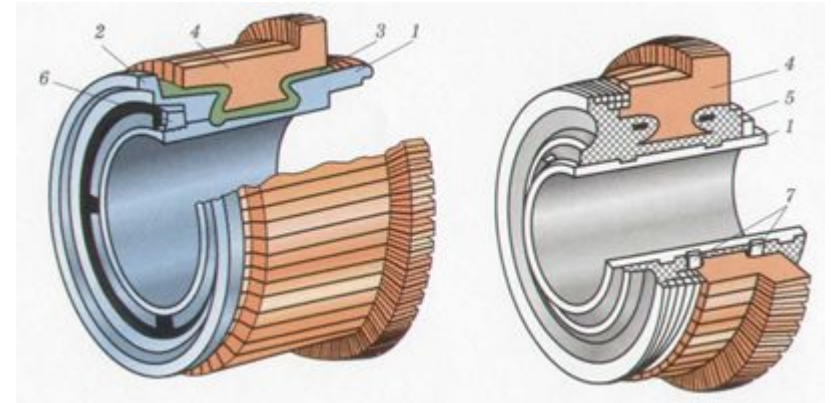


- 1 – обмотка возбуждения;
- 2 – главные полюсы;
- 3 – якорь;
- 4 – обмотка якоря;
- 5 – щетки;
- 6 – корпус (станина)

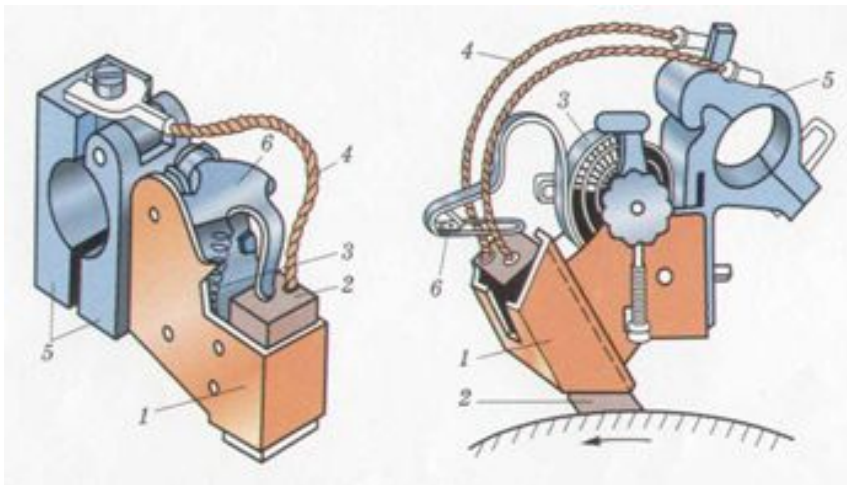
## Элементы конструкции машин постоянного тока



- 1 – станина;
- 2 – сердечник;
- 3 – полюсная катушка.

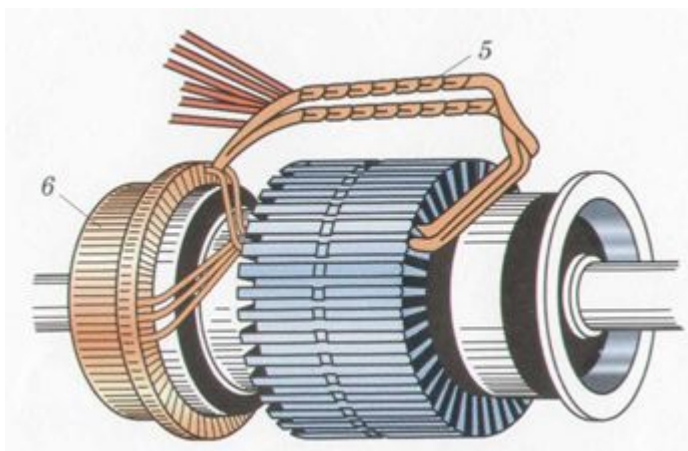
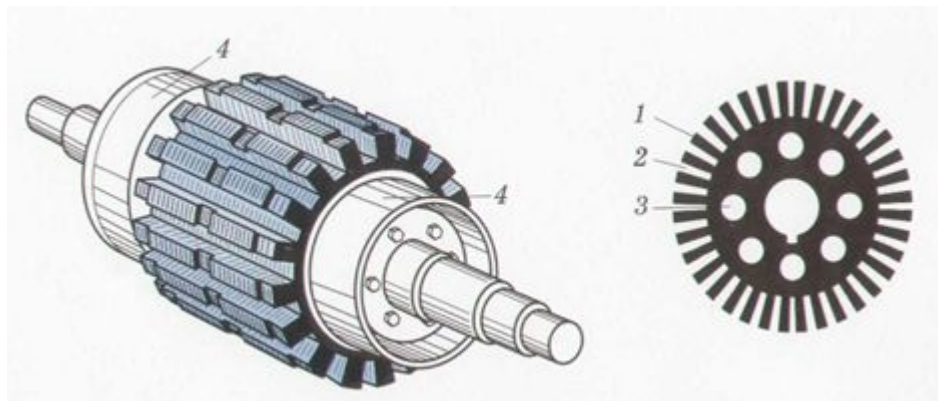


- 1, 2 – втулки;
- 4 – коллекторная пластина;
- 5 – изолятор.



- 1 – обойма;
- 2 – щетка;
- 3 – пружина;
- 4 - гибкий проводник.

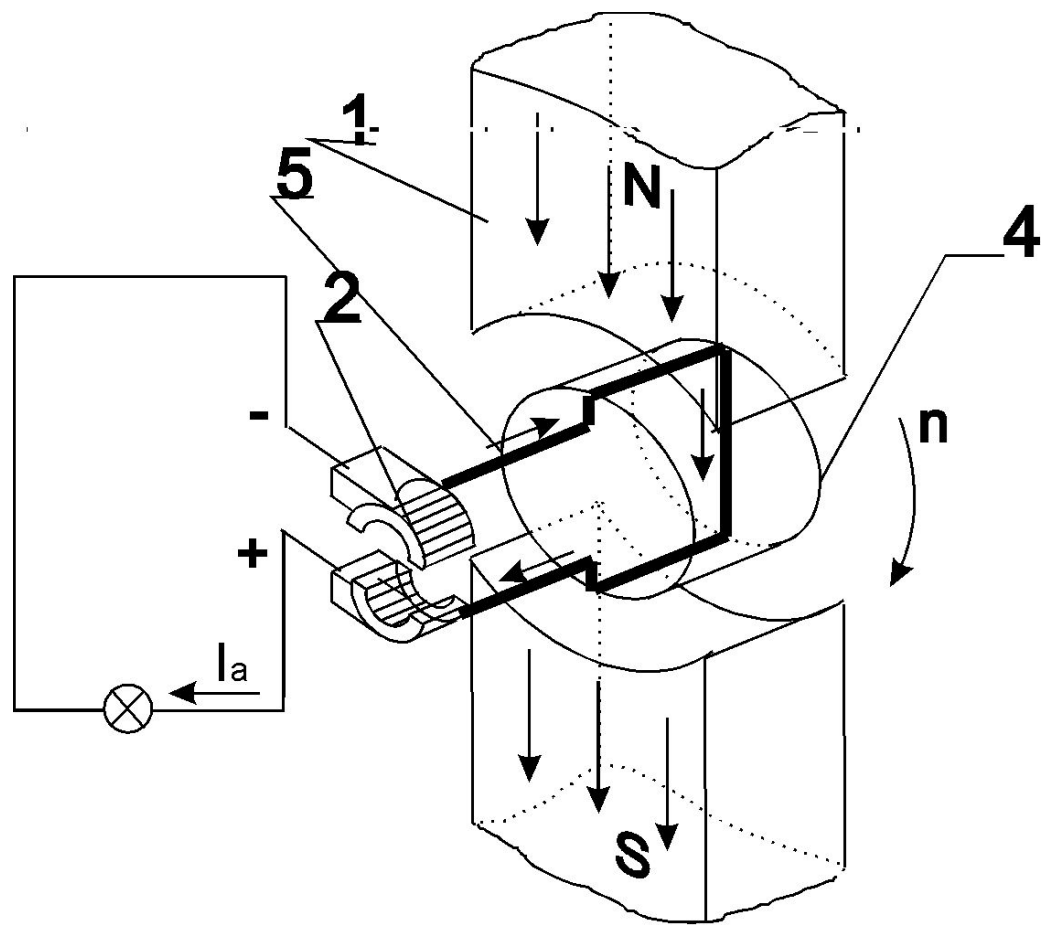
## Элементы конструкции машин постоянного тока (ротор)



- 1 – зубец;
- 2 – паз;
- 3 – вентиляционное отверстие;
- 4 – нажимные шайбы (хомуты);
- 5 – обмотка якоря;
- 6 – коллектор.

# Генератор постоянного тока

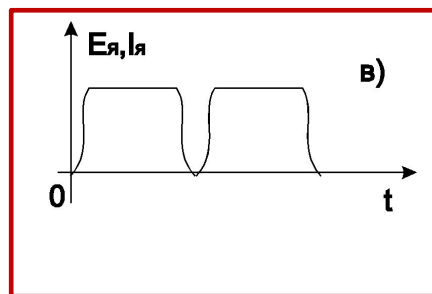
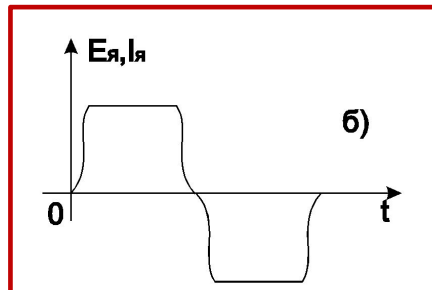
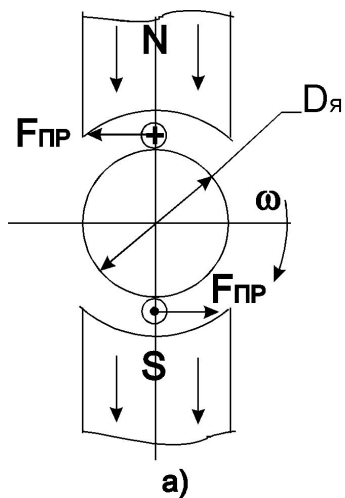
## Принцип действия



- 1 - полюса статора;
- 2 - коллектор;
- 3 - щётки;
- 4 - ротор;
- 5 - обмотка ротора.

# Генератор постоянного тока

## Принцип действия



Парой полюсов создаётся основной магнитный поток машины.

Обмотка ротора связана с внешней сетью с помощью коллектора и щёток.

В обмотках ротора создается переменный ЭДС.

Коллекторно-щеточный узел выпрямляет переменный ЭДС.

Величина мгновенного ЭДС определяется  $B$ , длиной проводника  $l$  и линейной скоростью  $v$ .

$$e = 2B \cdot l \cdot v$$

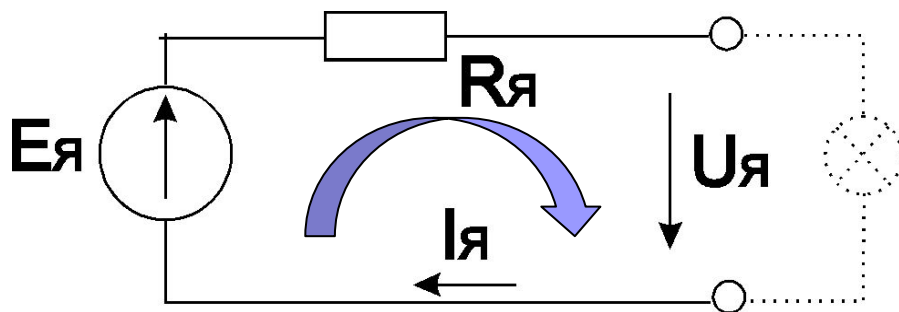
Так как  $f = n \cdot p$  и  $v = \omega \cdot r$

$$E_{я} = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

$C_e$  – электрическая постоянная машины  $C_e = \frac{N \cdot p}{60 \cdot a}$

## Генератор постоянного тока

Схема замещения якорной цепи генератора:



$E_{\text{я}}$  – ЭДС якоря генератора;  
 $R_{\text{я}}$  – сопротивление обмотки якоря;  
 $I_{\text{я}}$  – ток якоря;  
 $U_{\text{я}}$  – напряжение на зажимах якоря.

$$E_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + U_{\text{я}}$$

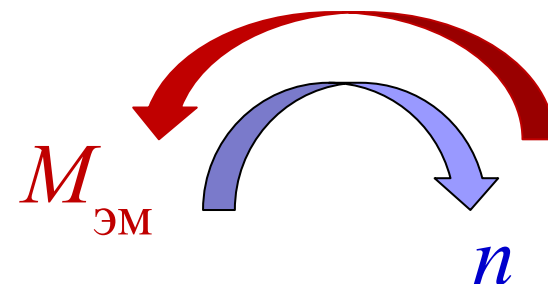
По второму закону Кирхгофа для якорной цепи можно записать уравнение:

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Так как в обмотке течёт ток, то возникает **сила Ампера**  $F_{\text{пр}}$  и **МОМЕНТ** который направлен навстречу вращения

$$F_{\text{пр}} = B \cdot I_{\text{я}} \cdot l$$

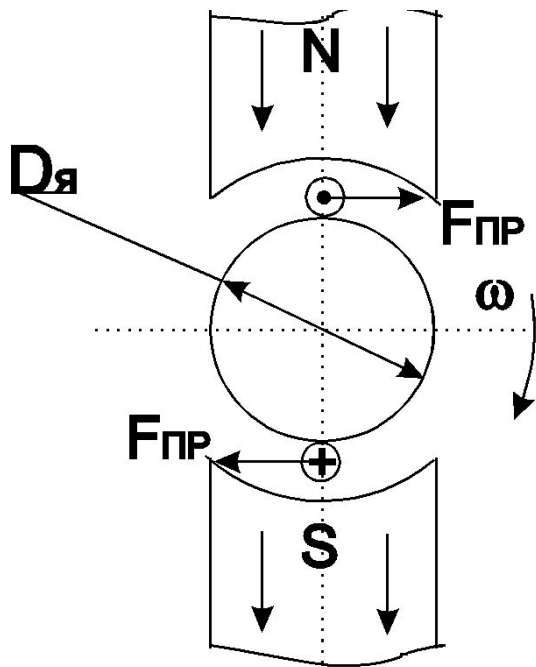
$$M_{\text{эм}} = 2F_{\text{пр}} \frac{D_{\text{я}}}{2} = F_{\text{пр}} D_{\text{я}} = B \cdot I_{\text{я}} \cdot l \cdot D_{\text{я}}$$





# Двигатель постоянного тока

## Принцип действия



Парой полюсов создаётся основной магнитный поток машины.

Обмотка ротора связана с внешней сетью с помощью коллектора и щёток.

В обмотках ротора (якоря) создается переменный ЭДС.

Так как в обмотке течёт ток, то возникает сила Ампера  $F_{\text{пр}}$

$$F_{\text{пр}} = B \cdot I_{\text{я}} \cdot l$$

Величина мгновенного ЭДС определяется  $B$ , длиной проводника  $l$  и линейной скоростью  $v$ . Против-ЭДС направлен навстречу току

$$E_{\text{я}} = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

$$C_e = \frac{N \cdot p}{60 \cdot a}$$

$N$  – число активных проводников,  $a$  – число параллельных проводников



## Классификация генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока классифицируются по способу создания магнитного потока и соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Они бывают двух типов.

С независимым возбуждением:

- питание обмотки возбуждения от независимого источника;
- с постоянными магнитами.

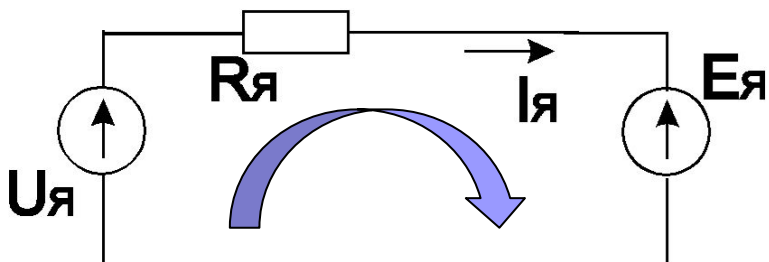
С самовозбуждением:

- параллельным возбуждением;
- последовательным возбуждением;
- смешанным возбуждением.

# Двигатель постоянного тока

## Принцип действия

Схема замещения якоря двигателя



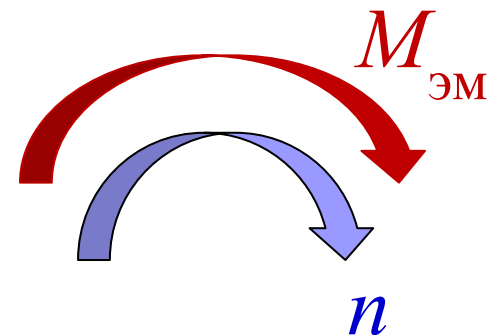
По второму закону Кирхгофа для якорной цепи можем написать уравнение:

$$U_{\text{я}} = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

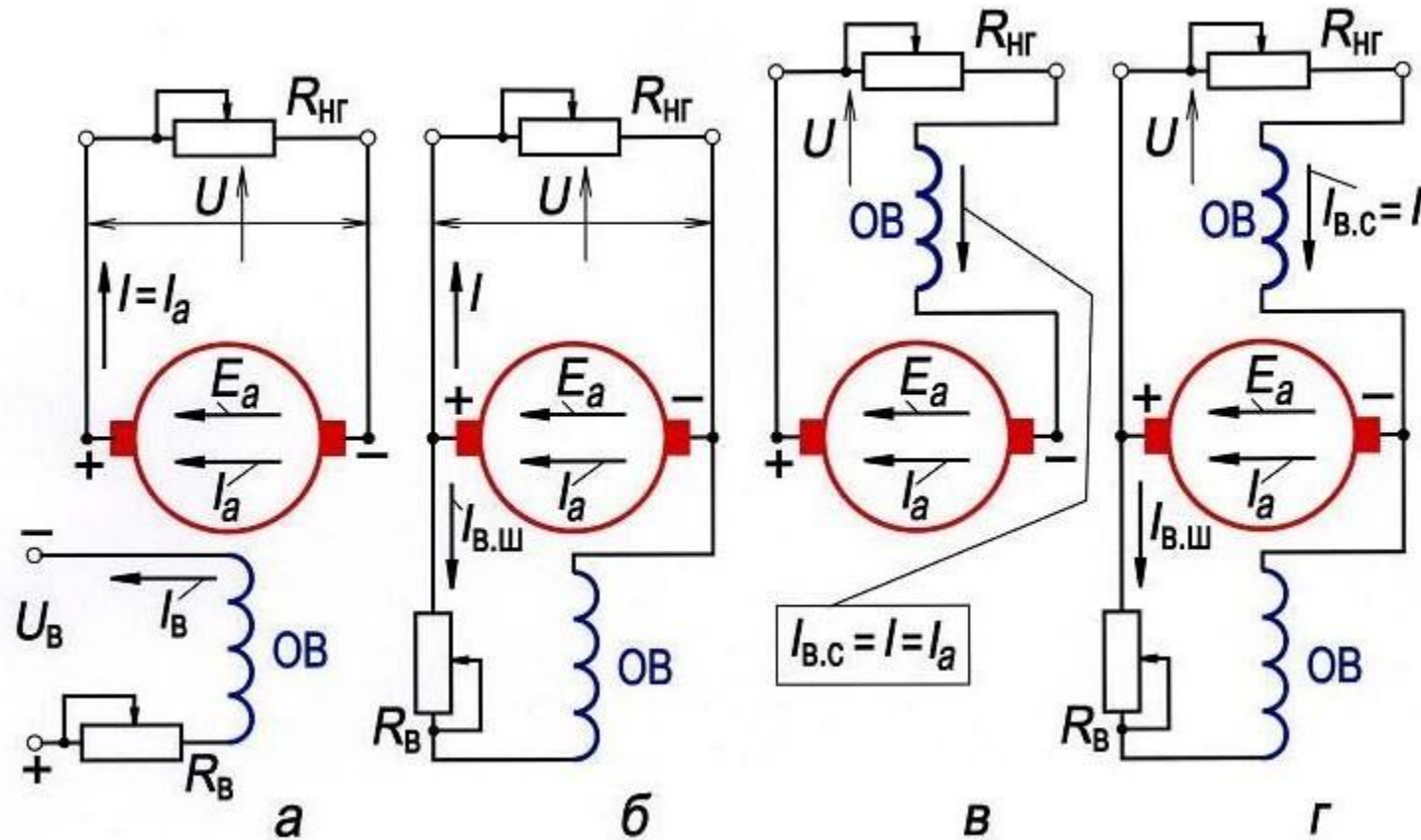
Электромагнитный момент развиваемый силой Ампера  $F_{\text{пр}}$  определяется

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}}{\omega} = \frac{C_e \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}}{2\pi f} = C_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$$

$C_m$  – магнитная постоянная машины

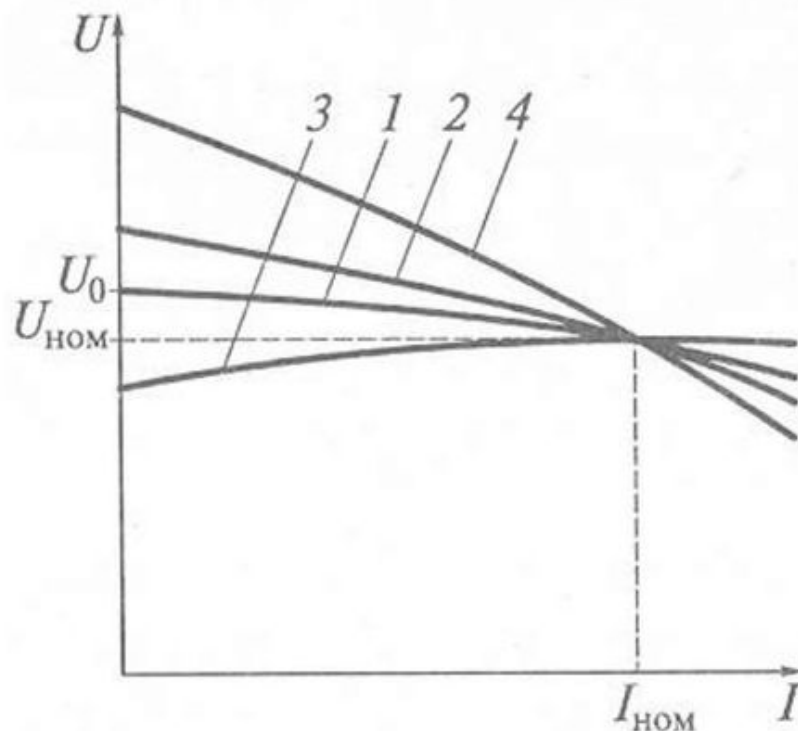


## Классификация генераторов постоянного тока



- а. Генератор с независимым возбуждением;
- б. Генератор с параллельным возбуждением;
- в. Генератор с последовательным возбуждением;
- г. Генератор со смешанным возбуждением;

Внешние характеристики генераторов постоянного тока  
Внешняя характеристика генератора – зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки  $U_H = f(I_H)$



Внешние характеристики генератора постоянного тока с независимым (1), параллельным (2), смешанным согласным (3) и смешанным встречным (4) возбуждением



