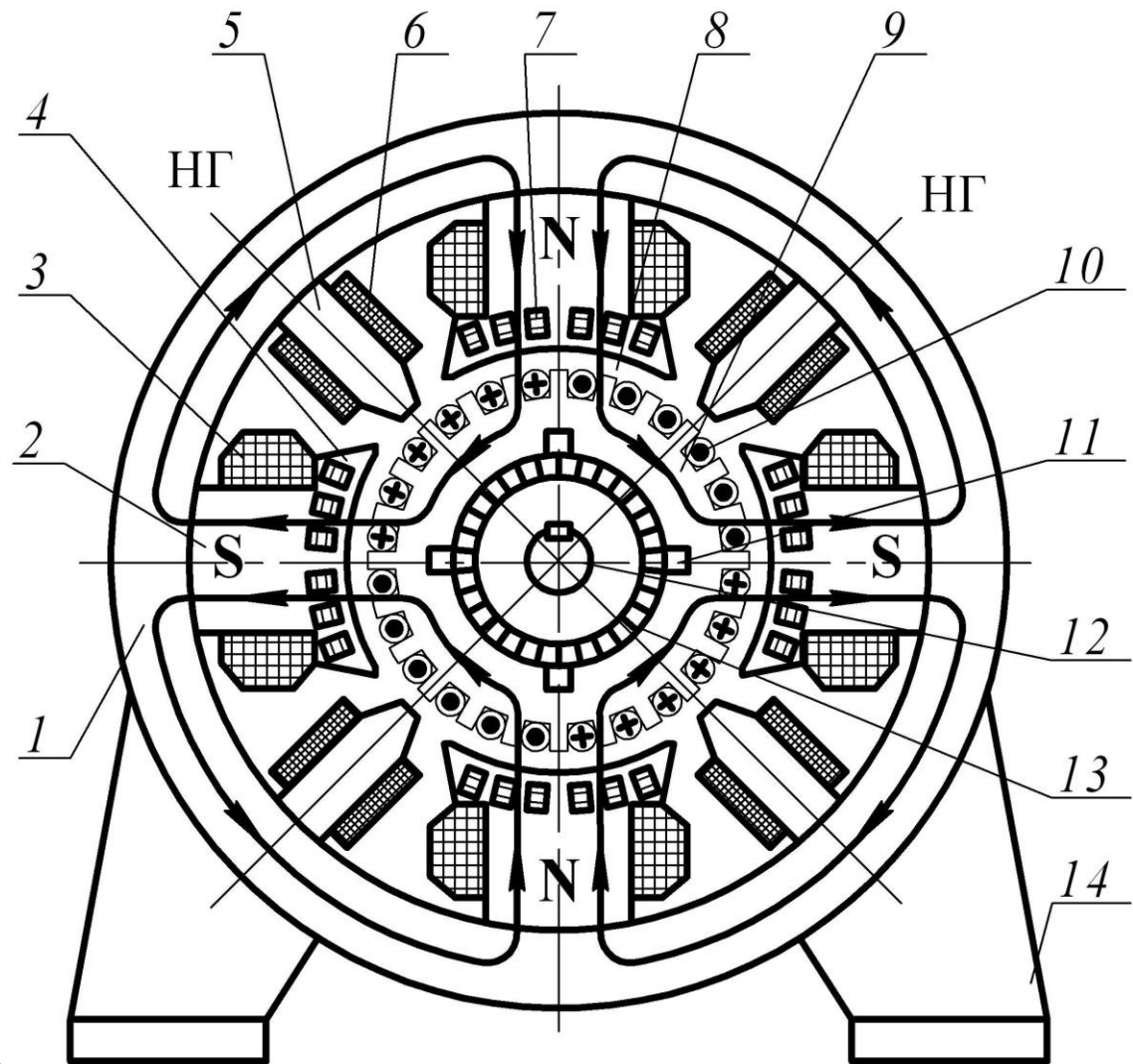


# Электрические машины постоянного тока



Разработал: к.т.н., доцент Пузаков А.В.  
кафедра ТЭРА, ОГУ

## Содержание раздела

1. Общие сведения
2. Принцип действия генератора постоянного тока
3. Устройство машины постоянного тока
4. Реакция якоря машины постоянного тока
5. Коммутация в машинах постоянного тока
6. Электродвижущая сила машины постоянного тока
7. Электромагнитный момент машины постоянного тока
8. Способы возбуждения машин постоянного тока
9. Основные характеристики генераторов постоянного тока
10. Генератор постоянного тока независимого возбуждения
11. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Условие самовозбуждения
12. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения
13. Потери и КПД машины постоянного тока
14. Двигатель параллельного возбуждения
15. Тормозные режимы двигателей постоянного тока
16. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения
17. Заключение
18. Вопросы для самоконтроля
19. Литература по разделу

**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:**

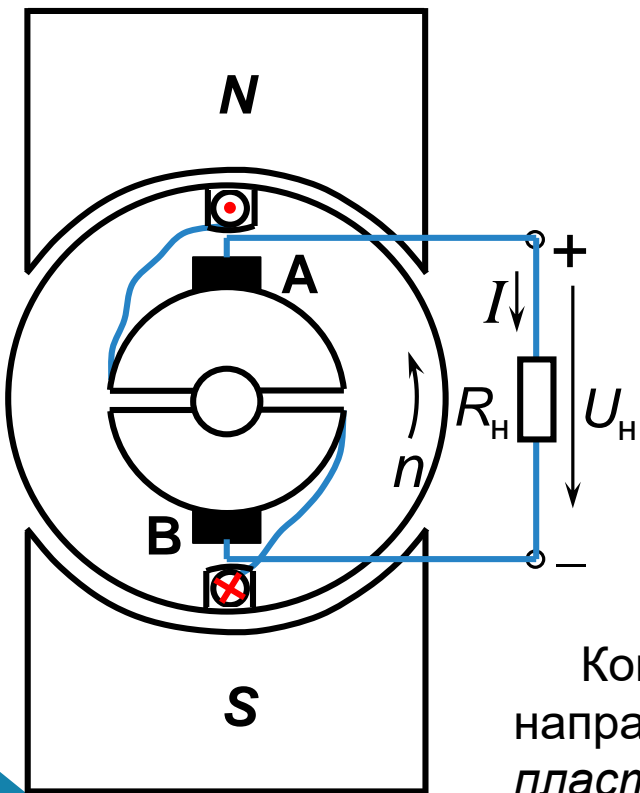
- относительно высокая стоимость;
- сложность в изготовлении;
- пониженная надежность;
- наличие радиопомех и пожароопасности.

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

# Принцип действия генератора постоянного тока

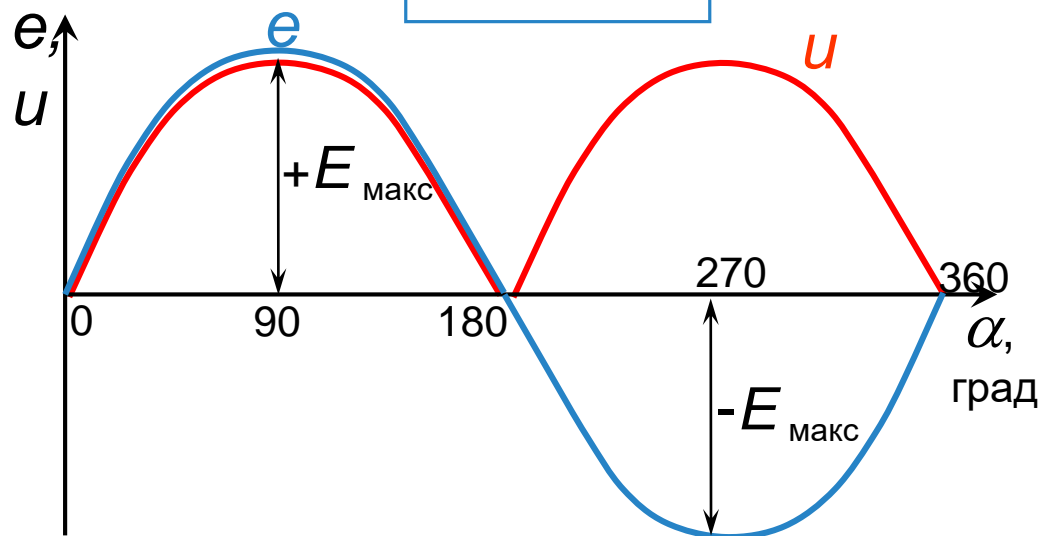
Характерным признаком коллекторных МПТ является наличие у них **коллекторно-щеточного узла** – *механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот*

Принцип действия генератора постоянного тока



При вращении якоря в витке якорной обмотки наводится ЭДС

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



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

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

# Принцип действия двигателя постоянного тока

Рассмотренная упрощенная модель МПТ может быть использована и в качестве ДПТ.

Для этого отключим нагрузку  $R$  и подведем к щеткам *напряжение от источника постоянного тока*

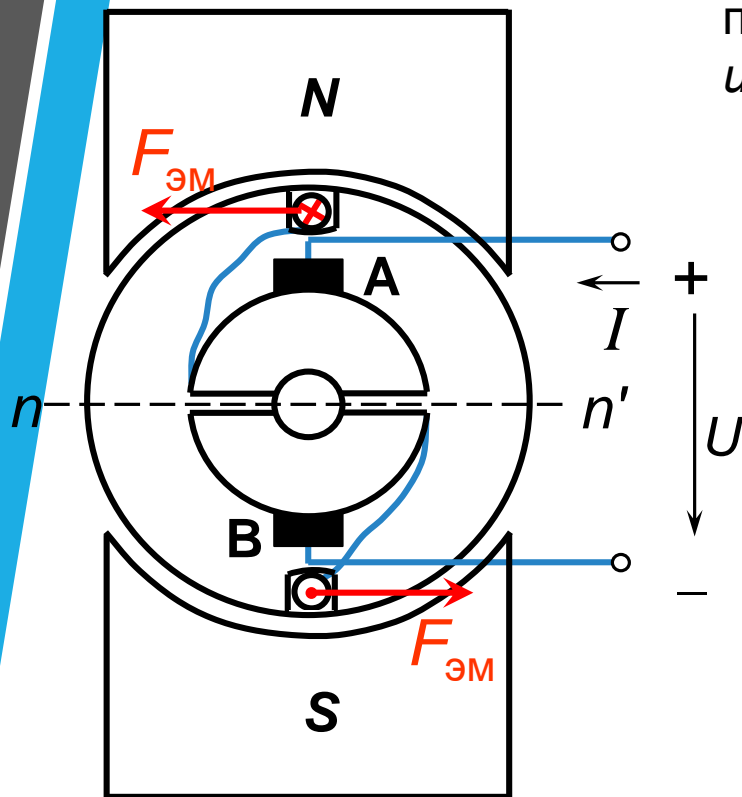
В результате взаимодействия тока  $I$  с магнитным полем появляются *электромагнитные силы  $F_{эм}$* , создающие *электромагнитный момент  $M_{эм}$* .

Одновременно с переходом каждого проводника в зону другого полюса в этих проводниках *меняется направление тока*.

Назначение коллектора в ДПТ - *изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности*.

При прохождении проводниками обмотки якоря *геометрической нейтрали  $n n'$*  электромагнитные силы  $F_{эм} = 0$ .

С увеличением числа проводников в обмотке якоря и числа пластин коллектора вращение якоря становится *устойчивым и равномерным*.



## Устройство машины постоянного тока

Магнитное поле в машинах постоянного тока создают **полюсы**, закрепленные в **станине**. Полюсы изготавливают в виде стальных сердечников, собранных из отдельных листов (только для упрощения технологии), на которых укреплены **обмотки возбуждения**.

В машинах мощностью выше 0,5 кВт между основными – главными – полюсами размещают **добавочные полюсы** для улучшения токосъема с коллектора.

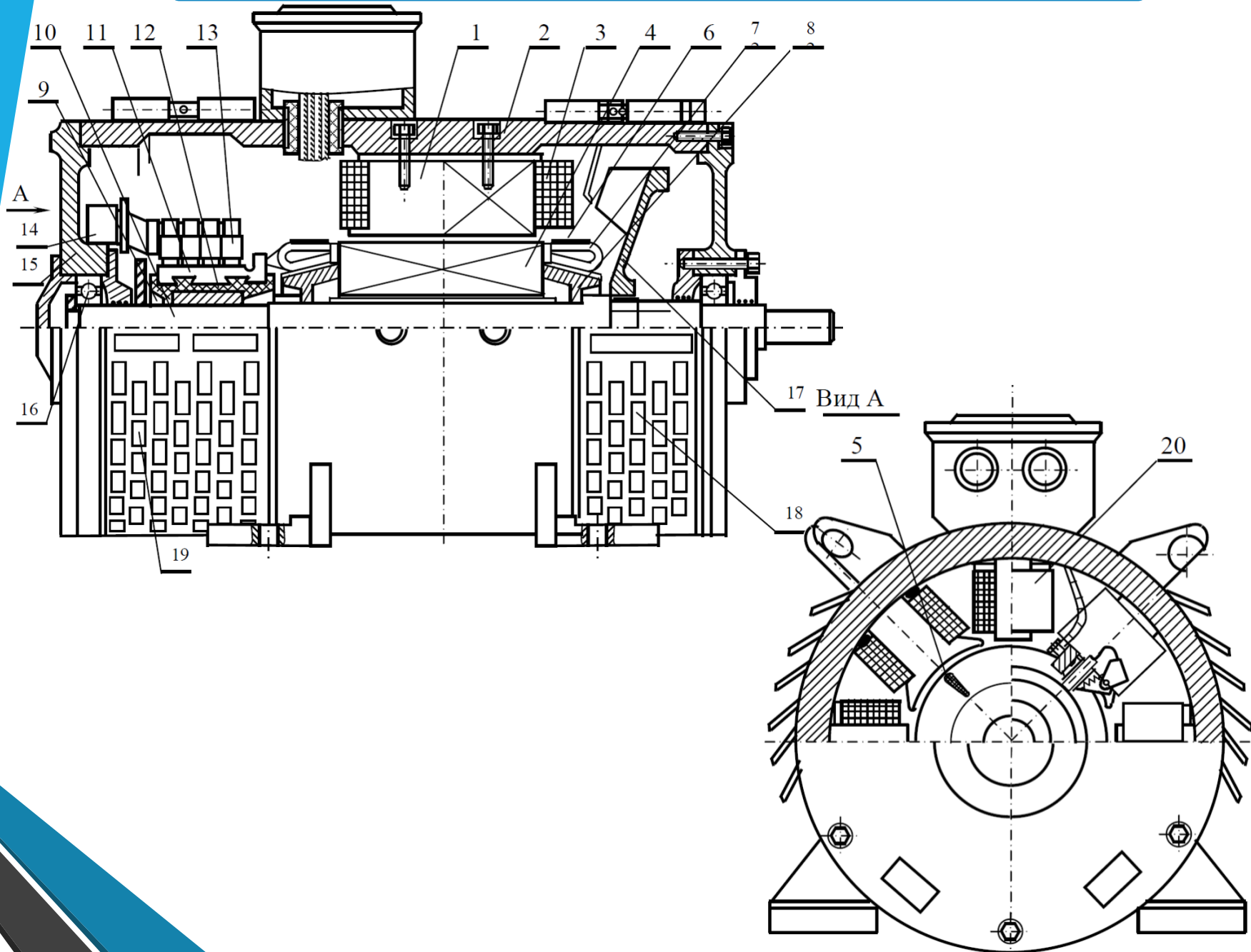
В поле полюсов помещают **якорь** - стальной цилиндр, набранный из листов электротехнической стали с выштампованными по периферии пазами для укладки обмотки.

**Обмотку якоря** соединяют с **коллектором** - механическим выпрямителем переменной ЭДС, наводимой в якоре, в постоянное напряжение на выходе генератора.

Коллектор состоит из медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми пластинами. Для токосъема с коллектора (скользящий контакт) установлен щеточный аппарат, состоящий из нескольких групп **щеткодержателей**, укрепленных на траверсе.

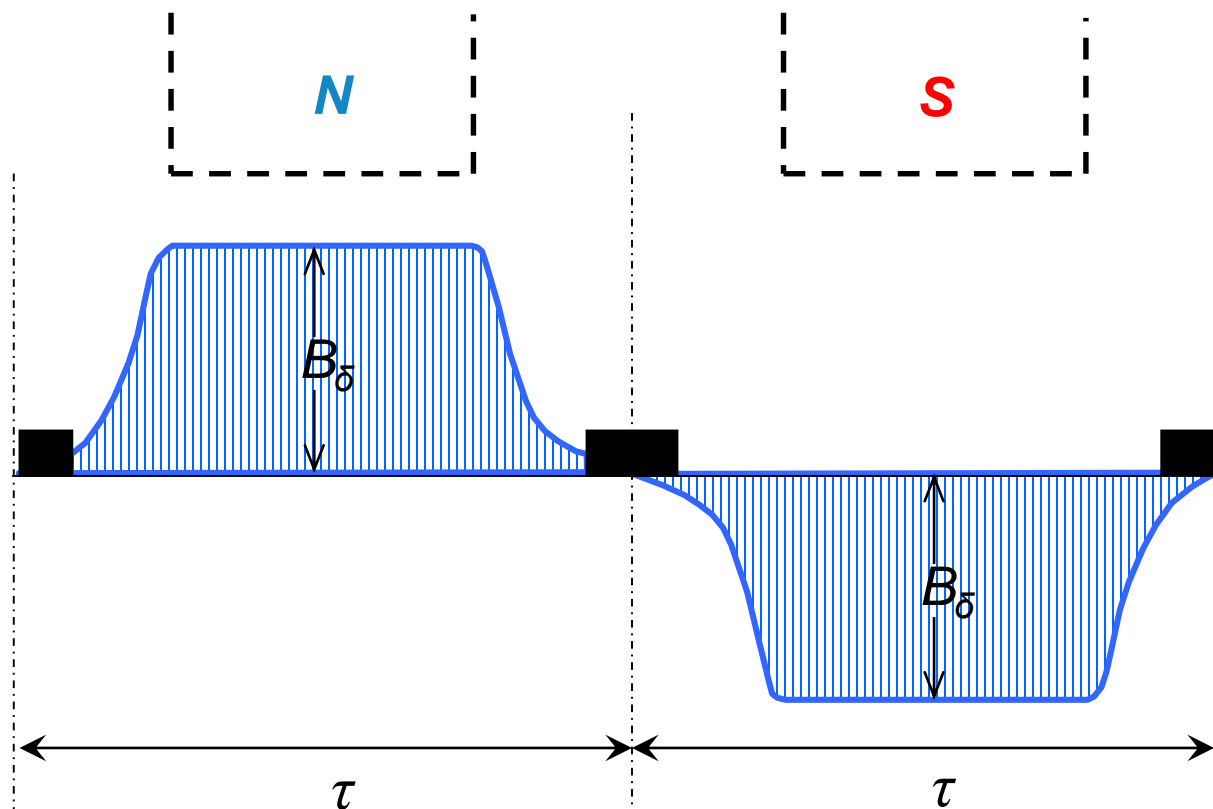
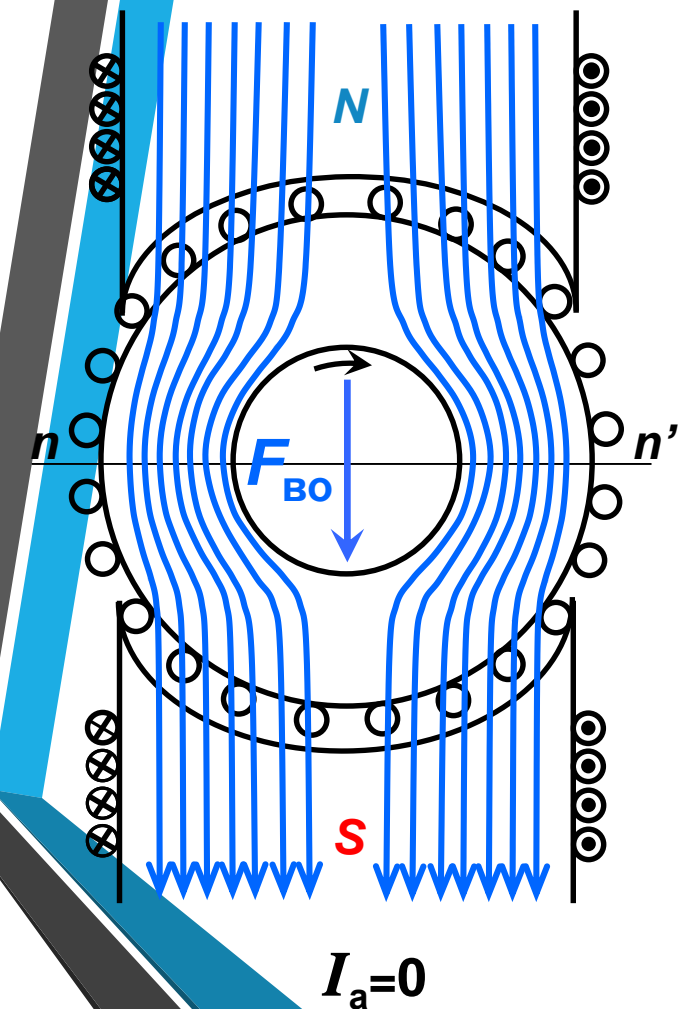
В щеткодержателях помещены **щеточки** (графитные или медно-графитные), прижатые к коллектору пружинами.

# Устройство машины постоянного тока



# Реакция якоря машины постоянного тока

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

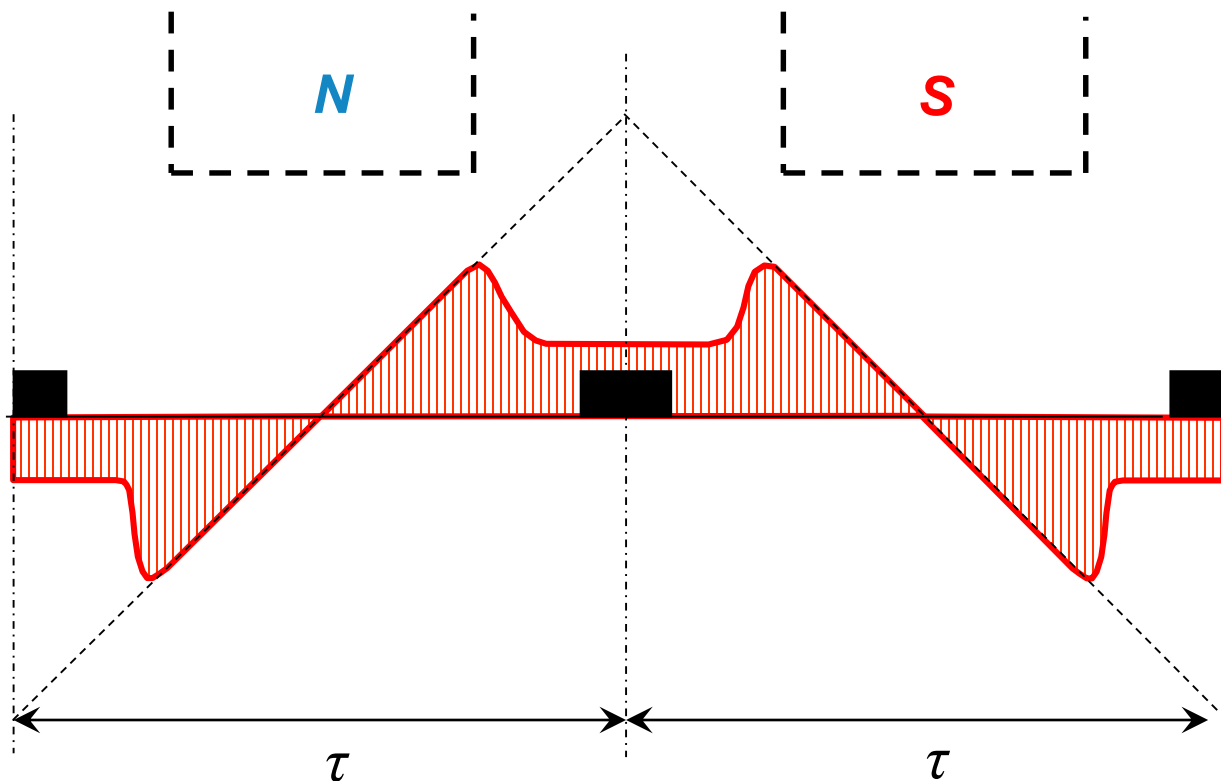
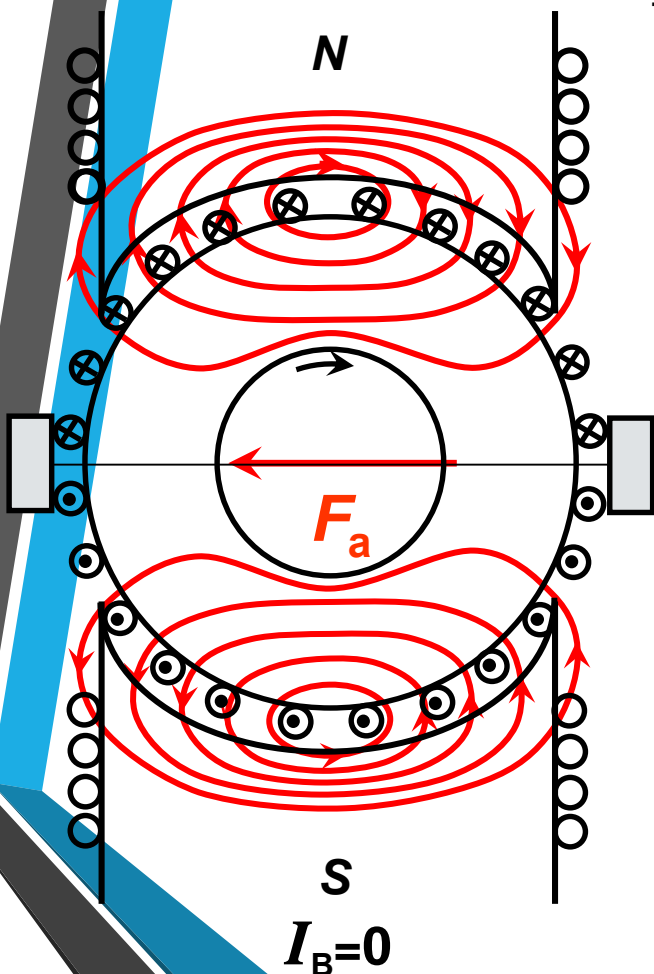


В этом случае магнитное поле *симметрично относительно оси полюсов*

# Реакция якоря машины постоянного тока

Если машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток  $I_a$ , который создает МДС якоря  $F_a$ .

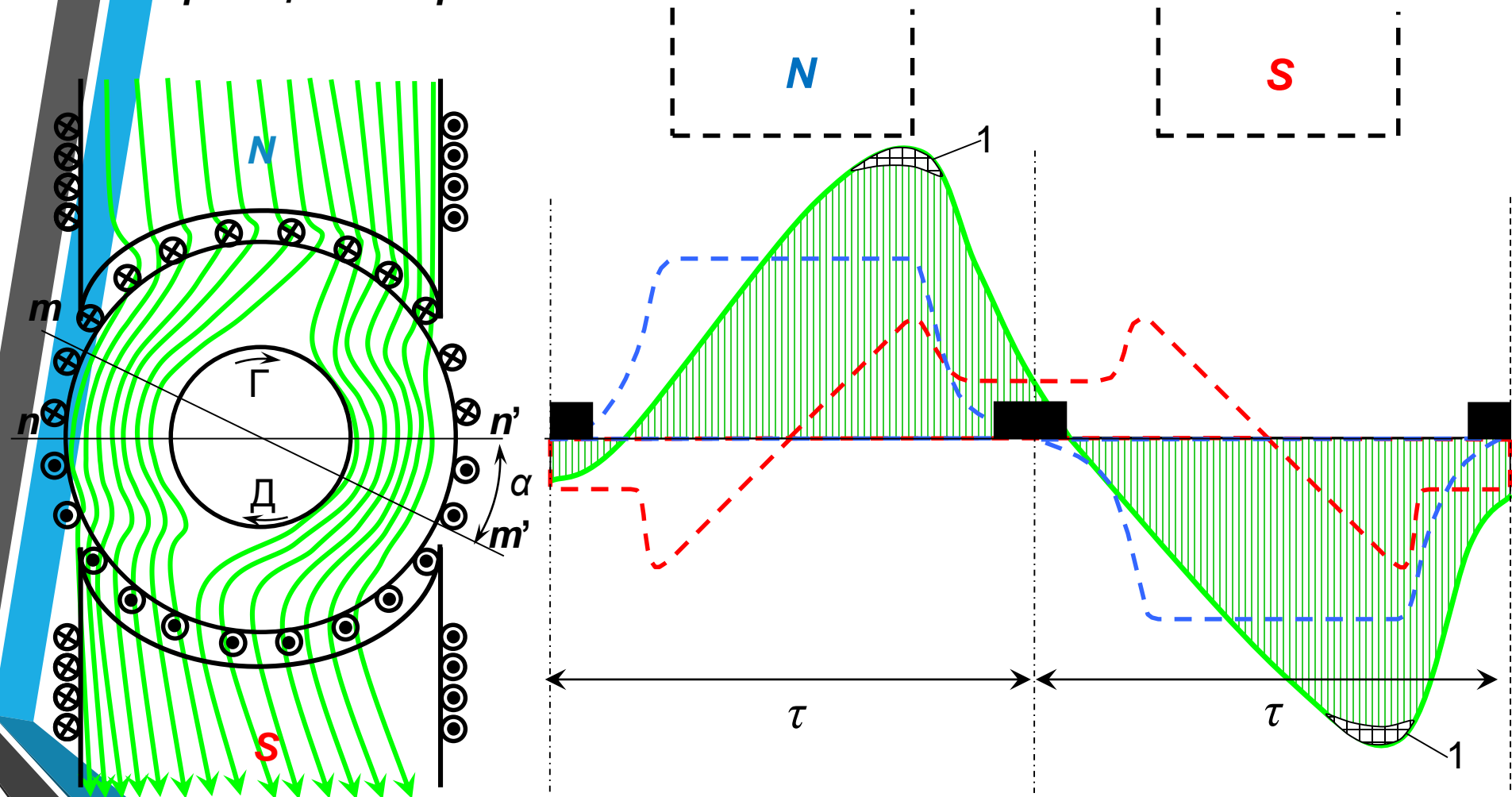
Допустим, что МДС обмотки возбуждения  $F_{в0}=0$ , тогда магнитное поле МДС якоря  $F_a$  будет иметь вид:



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

# Реакция якоря машины постоянного тока

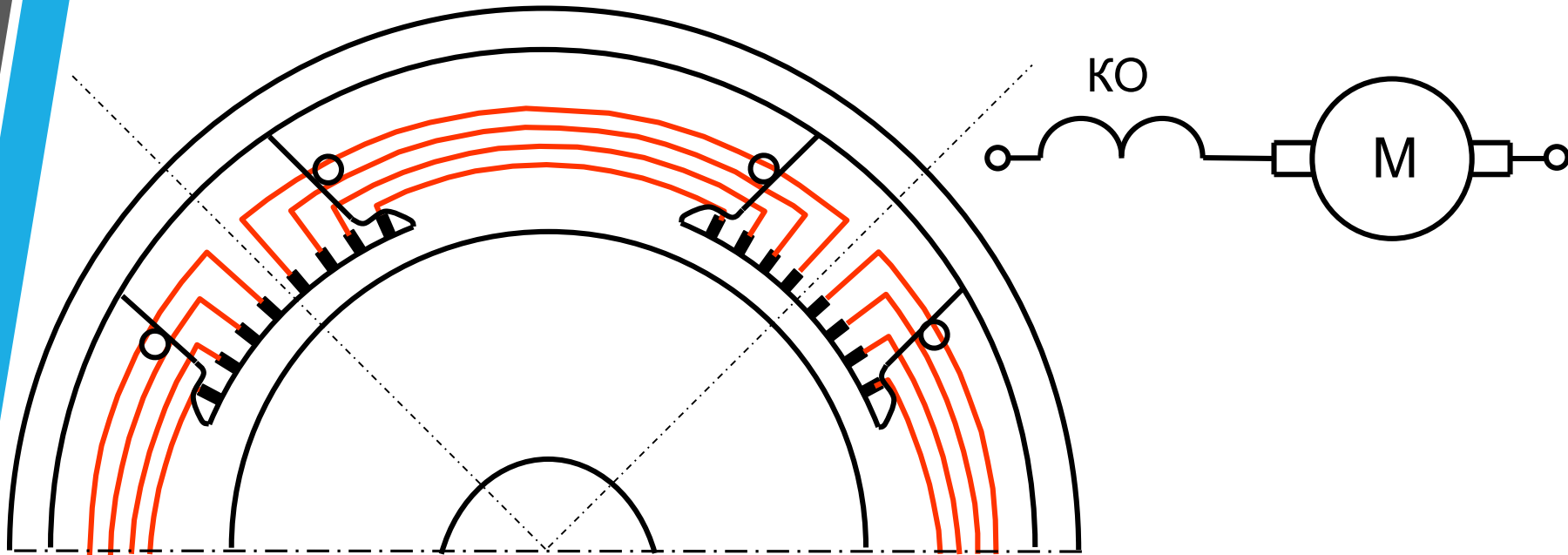
Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря.



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

## Устранение вредного влияния реакции якоря

Наиболее эффективное средство – **компенсационная обмотка** (КО), которая укладывается в пазы полюсных наконечников.



Компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы ее МДС  $F_{КО}$  была противоположна направлению МДС обмотки якоря  $F_a$ .

Такое включение обмотки обеспечивает *автоматическую компенсацию* МДС якоря при любой нагрузке машины.

*Процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с ним явления в короткозамкнутых секциях называют коммутацией машин постоянного тока.*

## Способы улучшения коммутации

а) **сдвигом щеток с геометрической нейтрали** – в МПТ небольшой мощности, не имеющих ДП.

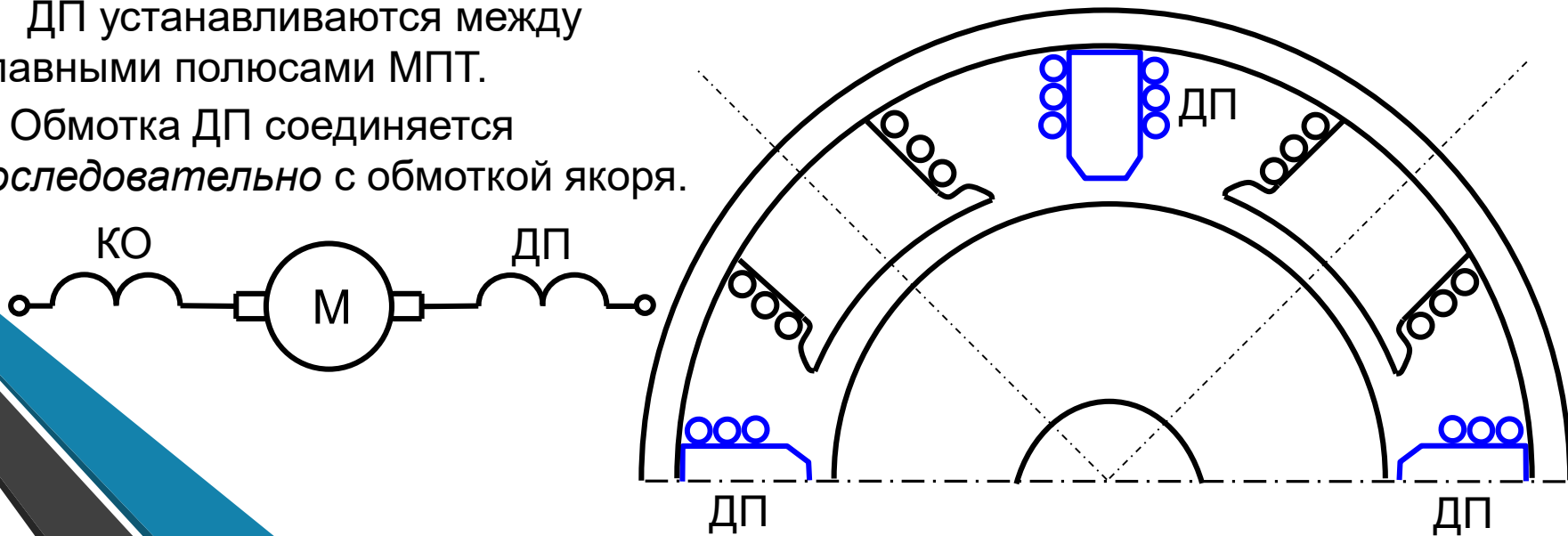
В генераторах щетки сдвигают по направлению вращения, в двигателях – против направления вращения.

**Недостаток:** требуемый угол сдвига изменяется в зависимости от нагрузки.

б) **применением добавочных полюсов**

ДП устанавливаются между главными полюсами МПТ.

Обмотка ДП соединяется последовательно с обмоткой якоря.



# Электродвижущая сила машины постоянного тока

$$E_a = E_{\text{пр}} \cdot [N / 2a] \quad , \quad \text{где } N - \text{ число пазовых проводников;}$$

$$2a - \text{ число параллельных ветвей.}$$

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

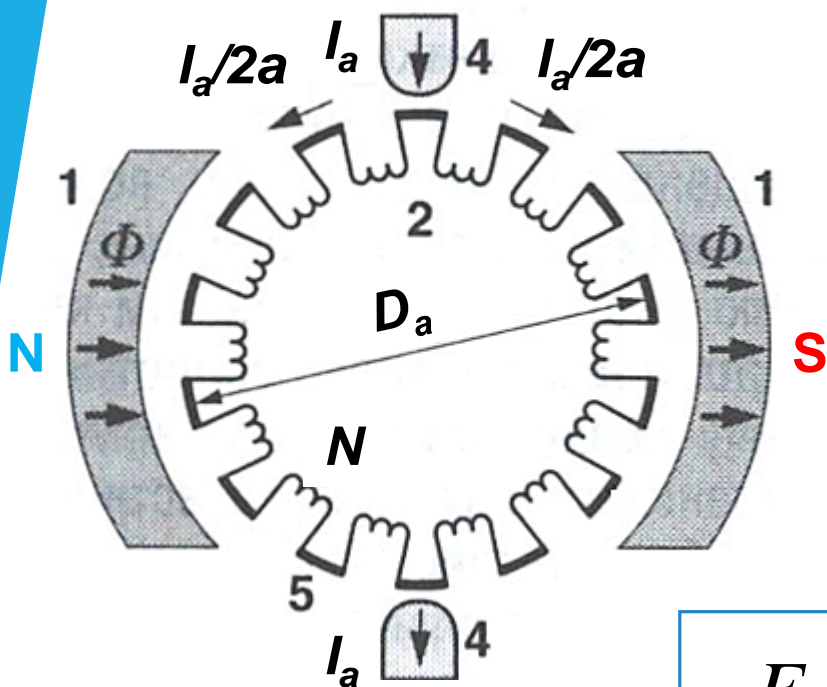
активная длина которого  $l_i$

$$v = \pi D_a n / 60 = 2 p \tau n / 60$$

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

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

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

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

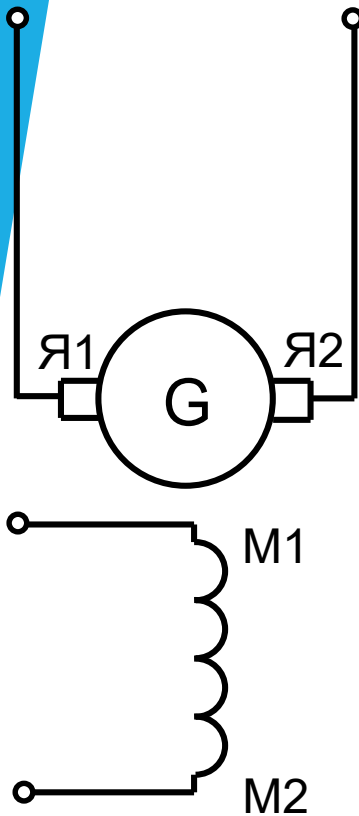
$$M = [60 / (2\pi n)] E_a I_a = 9.55 P_{\text{эм}} / n = P_{\text{эм}} / \omega$$

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

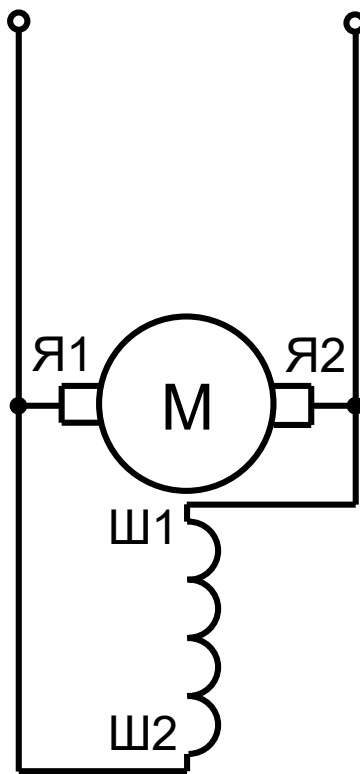
$P_{\text{эм}} = E_a I_a$  – электромагнитная мощность машины постоянного тока

# Способы возбуждения машин постоянного тока

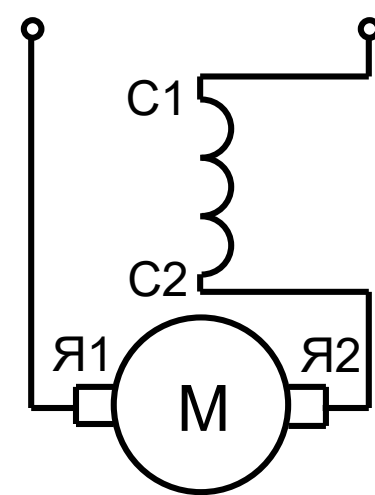
Свойства МПТ в значительной степени определяются способом включения обмотки возбуждения, то есть **способом возбуждения**.



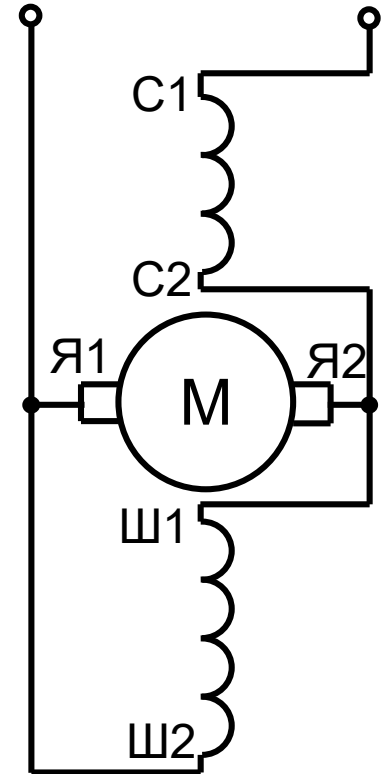
Независимое возбуждение



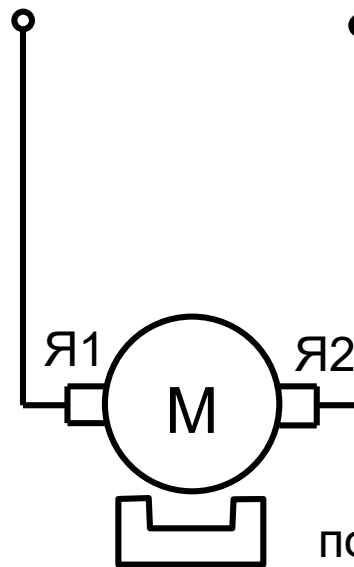
Параллельное возбуждение



Последовательное возбуждение



Смешанное возбуждение



Возбуждение от постоянных магнитов

1. **Характеристика холостого хода** – зависимость  $U_0 = f(I_B)$ ,  
при  $I = 0$  и  $n = const$ .

2. **Нагрузочная характеристика** – зависимость  $U_a = f(I_B)$ ,  
при  $I = const$  и  $n = const$ .

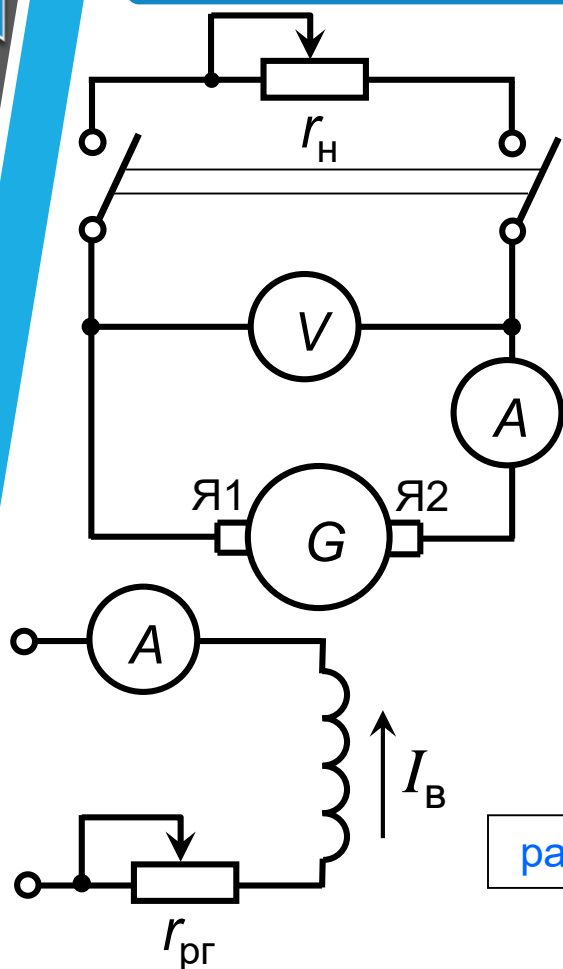
3. **Внешняя характеристика** – зависимость  $U_a = f(I_a)$ ,  
при  $r_{рг} = const$  и  $n = const$ .

$r_{рг}$  - регулировочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения.

4. **Регулировочная характеристика** – зависимость  $I_B = f(I_a)$ ,  
при  $U_a = const$  и  $n = const$ .

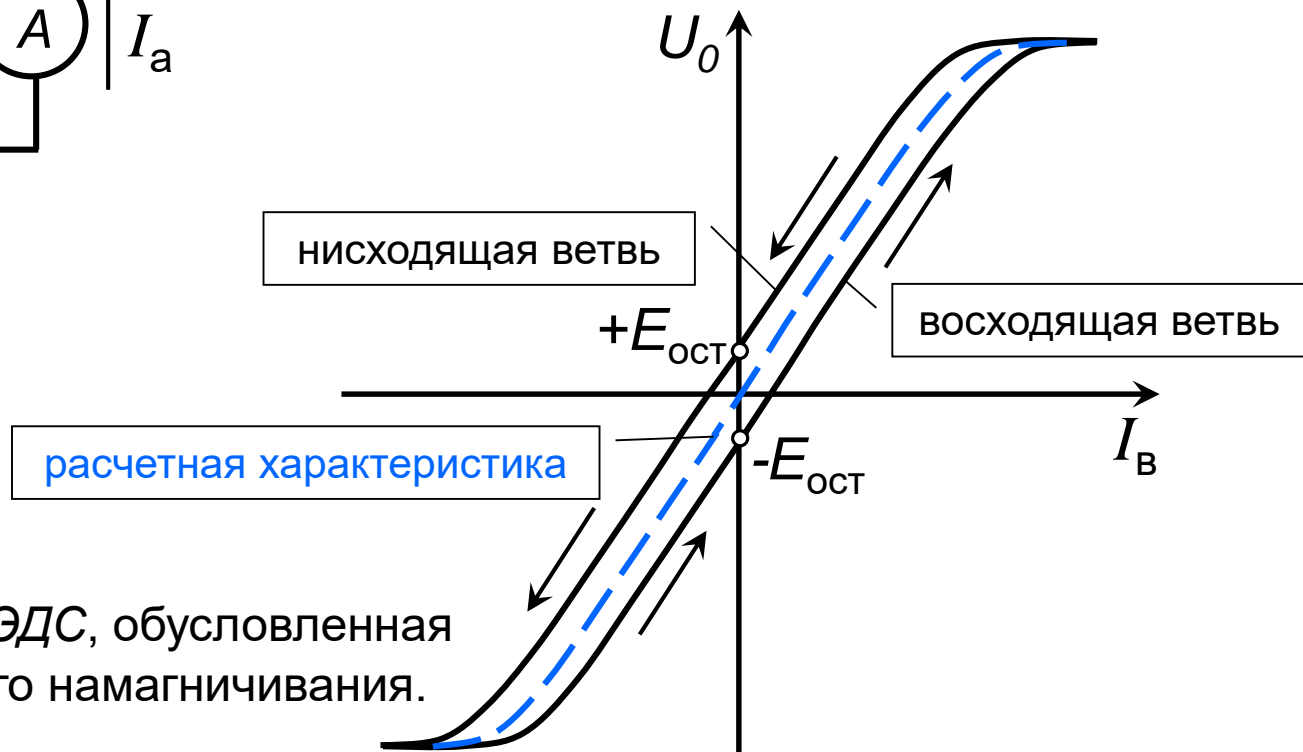
Вид перечисленных характеристик определяет рабочие свойства генераторов постоянного тока.

# Генератор постоянного тока независимого возбуждения



Обмотка возбуждения питается от внешнего, **независимого** от якорной цепи, **источника постоянного тока**.

1. **Характеристика холостого хода**  $U_0 = f(I_B)$ , при  $I_a = 0$  и  $n = const$ .

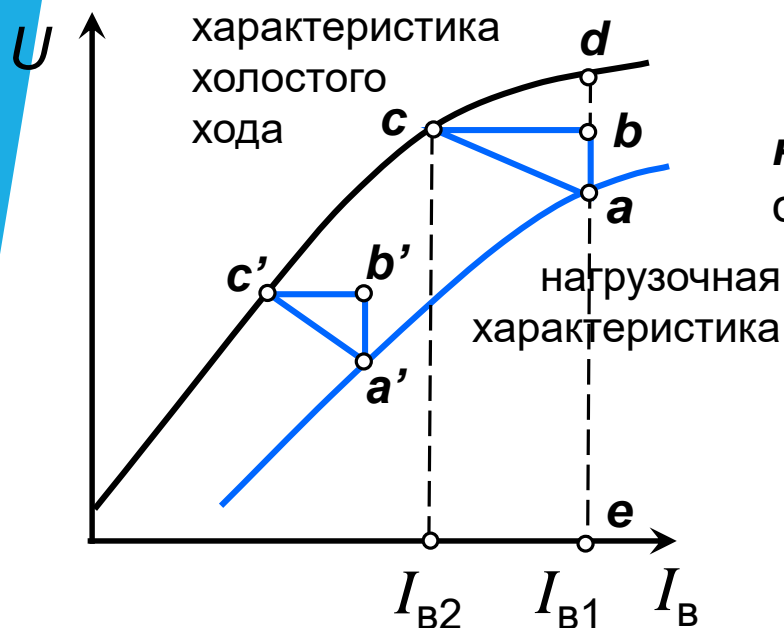


$E_{ост}$  – остаточная ЭДС, обусловленная явлением остаточного намагничивания.

Характеристика  $U_0 = f(I_B)$  повторяет в другом масштабе магнитную характеристику машины и дает возможность судить о **магнитных свойствах машины**

## 2. Нагрузочная характеристика – зависимость $U_a = f(I_B)$ ,

при  $I = const$  и  $n = const$ .



Нагрузочная характеристика проходит **ниже** характеристики холостого хода по следующим причинам:

$$U = E_a - I_a \sum r_a$$

1 – падение напряжения в обмотке якоря  $I_a \sum r_a$ ;

2 – размагничивающее воздействие реакции якоря на магнитный поток  $\Phi$  и, следовательно, снижение  $E_a$ .

Треугольник  $abc$  – **характеристический**. Его катеты выражают:

$ab$  – падение напряжения на обмотке якоря  $I_a \sum r_a$ ;

$bc$  – ток возбуждения, компенсирующий размагничивающее воздействие реакции якоря  $I_{B1} - I_{B2}$ ;

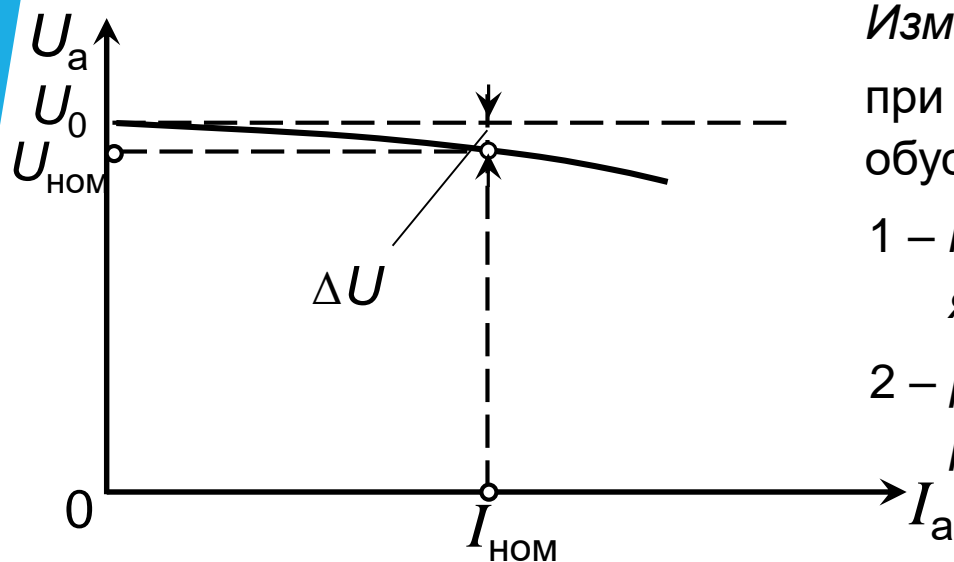
$ae$  – напряжение на выходе генератора  $U$  под нагрузкой;

$be$  – ЭДС генератора  $E_a$  под нагрузкой;

$de$  – напряжение на выходе генератора  $U_0$  в режиме холостого хода при токе возбуждения  $I_{B1}$ .

# Генератор постоянного тока независимого возбуждения

3. **Внешняя характеристика**  $U_a = f(I_a)$ , при  $I_B = const$  и  $n = const$ .

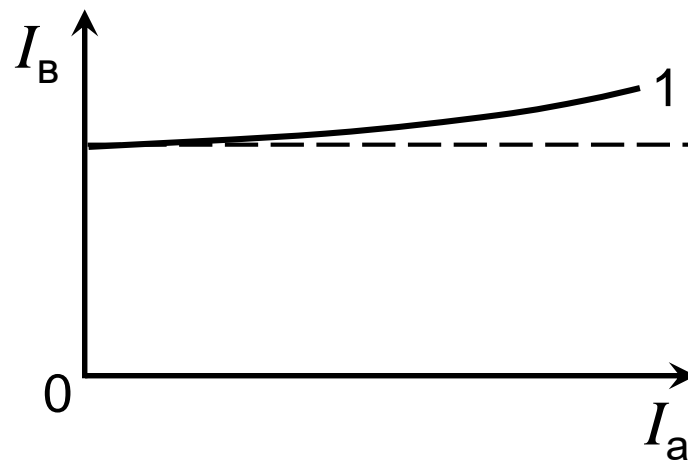


Изменение напряжения на якоре  $\Delta U$  при изменении нагрузки от 0 до  $I_{НОМ}$  обусловлено:

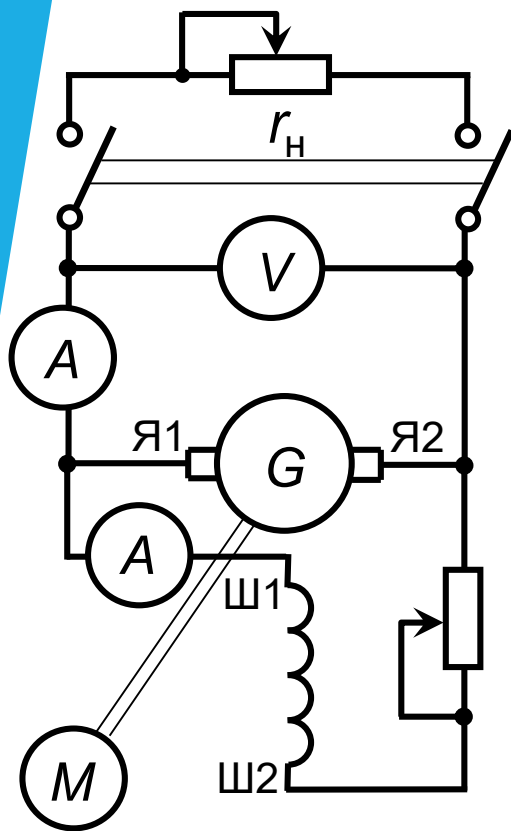
- 1 – падением напряжения в обмотке якоря  $I_a \sum r_a$ ;
- 2 – размагничивающим воздействием реакции якоря на магнитный поток.

4. **Регулировочная характеристика**  $I_B = f(I_a)$ , при  $U_a = const$  и  $n = const$ .

Эта характеристика показывает каким образом необходимо регулировать ток возбуждения  $I_B$  при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выходе генератора  $U_a$  оставалось неизменным.



# Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Условие самовозбуждения



**Принцип самовозбуждения** ГПТ параллельного возбуждения основан на способности магнитной системы длительное время сохранять небольшой магнитный *поток остаточного магнетизма*.

$$\Phi_{\text{ост}} = (2 - 3)\% \text{ от } \Phi_{\text{н}}.$$

При вращении якоря поток  $\Phi_{\text{ост}}$  индуцирует в якорной обмотке ЭДС  $E_{\text{ост}}$ , под действием которой в обмотке возбуждения возникает небольшой ток  $I_{\text{в ост}}$ . Если МДС обмотки возбуждения имеет такое же направление, что и  $\Phi_{\text{ост}}$ , то поток главных полюсов увеличивается. Это приводит к увеличению ЭДС генератора, отчего ток возбуждения вновь увеличивается.

Этот процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения, т. е.  $U_a = I_{\text{в}} r_{\text{в}}$ .

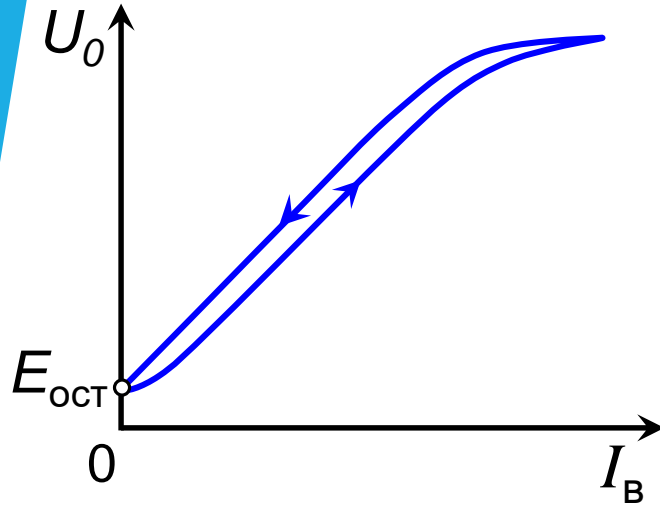
## Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Условие самовозбуждения

*Условие самовозбуждения генератора параллельного возбуждения:*

1. магнитная система должна обладать остаточным магнетизмом;
2. присоединение обмотки возбуждения должно быть таким, чтобы МДС обмотки возбуждения совпадала с остаточным потоком  $\Phi_{\text{ост}}$ ;
3. сопротивление в цепи возбуждения должно быть меньше критического, т. е.  $r_{\text{в}} < r_{\text{в кр}}$ ;
4. частота вращения якоря должна быть больше критической, то есть  $n > n_{\text{кр}}$ .

# Основные характеристики ГПТ параллельного возбуждения

1. **Характеристика холостого хода** – зависимость  $U_0 = f(I_B)$ , при  $I = 0$  и  $n = const$ .



Так как ГПТ параллельного возбуждения самовозбуждается лишь при одном направлении тока  $I_B$ , то характеристика х. х. может быть снята только для одного квадранта осей координат.

2. **Нагрузочная характеристика**  $U_a = f(I_B)$ , при  $I = const$  и  $n = const$ .  
практически не отличается от характеристики ГПТ независимого возбуждения.

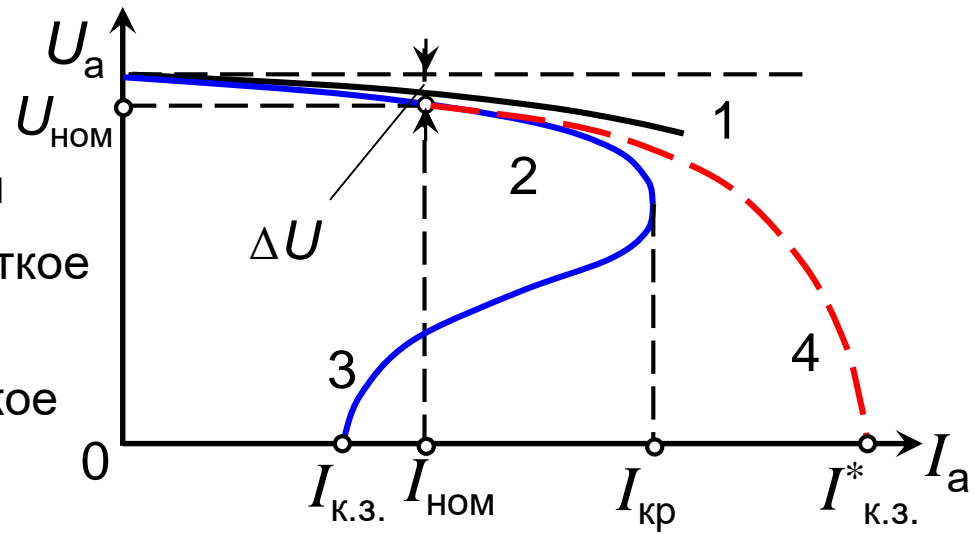
3. **Внешняя характеристика**  $U_a = f(I_a)$ , при  $r_{рг} = const$  и  $n = const$ .

1 – ГПТ независимого возбуждения

2 – ГПТ параллельного возбуждения

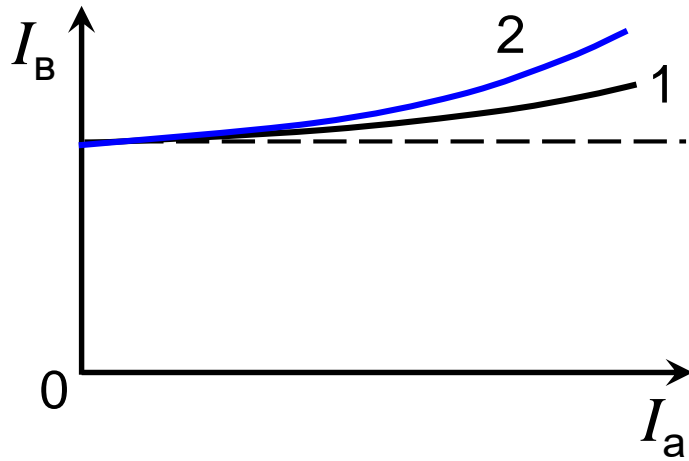
3 – «постепенное» короткое замыкание

4 – «внезапное» короткое замыкание



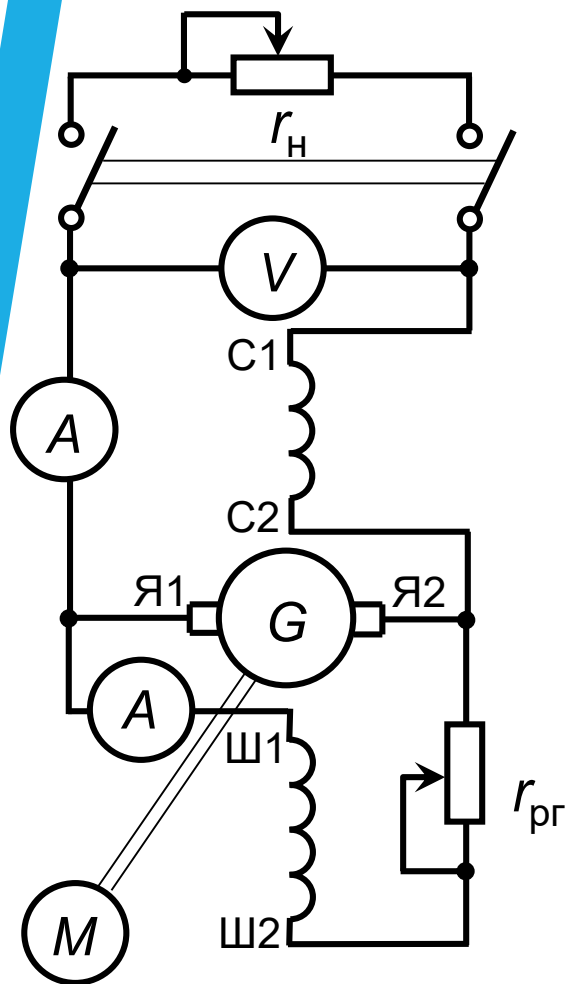
# Основные характеристики ГПТ параллельного возбуждения

4. Регулировочная характеристика  $I_B = f(I_a)$ , при  $U_a = const$  и  $n = const$ .



- 1 – ГПТ независимого возбуждения
- 2 – ГПТ параллельного возбуждения

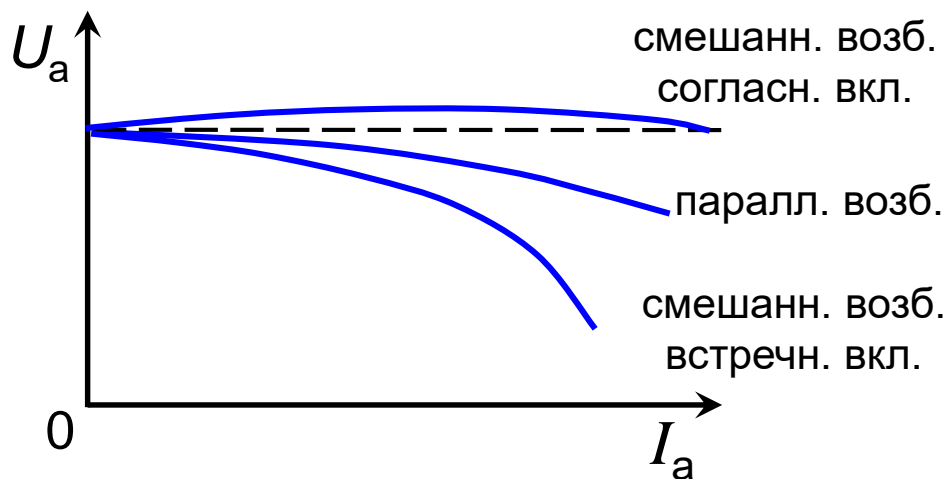
# Генератор постоянного тока смешанного возбуждения



Основной магнитный поток создается обмоткой параллельного возбуждения.

**Согласное включение** обмоток параллельного и последовательного возбуждения (направления МДС обмоток совпадают) обеспечивает более жесткую внешнюю характеристику.

МДС обмотки последовательного возбуждения компенсирует размагничивающее влияние реакции якоря и падение напряжения в якоре.

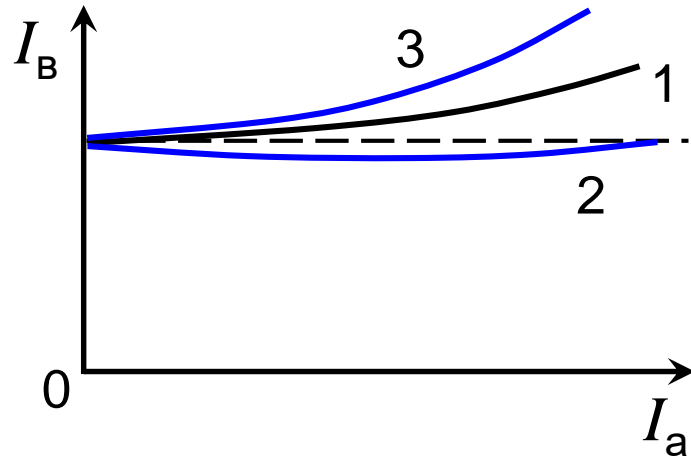


При **встречном включении** обмоток возбуждения внешняя характеристика будет более «мягкой» из-за размагничивающего влияния последовательной обмотки возбуждения.

**Встречное включение** применяют тогда, когда надо получить круто падающую внешнюю характеристику, например, у сварочных генераторов.

# Генератор постоянного тока смешанного возбуждения

Регулировочная характеристика  $I_B = f(I_a)$ , при  $U_a = const$  и  $n = const$ .



- 1 – ГПТ параллельного возбуждения;
- 2 – ГПТ смешанного возбуждения (согласное включение ОВ);
- 3 – ГПТ смешанного возбуждения (встречное включение ОВ).

## Потери и КПД машины постоянного тока

Потери в МПТ: **основные** (магнитные, электрические и механические) и **добавочные**.

**Магнитные потери**  $P_M = P_\Gamma + P_{BT}$

В процессе работы машины постоянного тока перемагничивается только сердечник якоря.

**Электрические потери**

Потери в цепи возбуждения  $P_{\text{э.в.}} = U_B \cdot I_B$

где  $U_B$  – напряжение на зажимах цепи возбуждения

Потери в цепи якоря  $P_{\text{э.а.}} = I_a^2 \cdot \sum r$

где  $\sum r$  – сопротивление в цепи якоря

Потери в контакте щеток  $P_{\text{э.щ.}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_a$

где  $\Delta U_{\text{щ}}$  – переходное падение напряжения на щетках обеих полярностей

*Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины и называются **переменными**.*

## Механические потери

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{к}} + P_{\text{п}} + P_{\text{вен}}$$

где  $P_{\text{к}}$  – потери от трения щеток о коллектор;

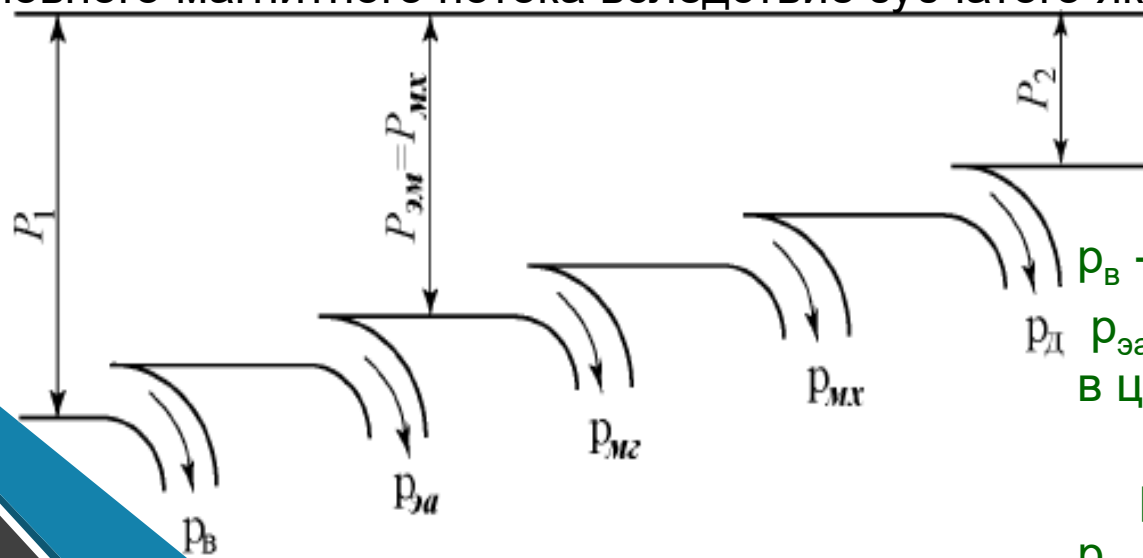
$P_{\text{п}}$  – потери от трения в подшипниках;

$P_{\text{вен}}$  – вентиляционные потери.

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения можно считать **постоянными**.

**Добавочные потери**  $P_{\text{доб}}$  складываются из:

потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнительных соединениях, потерь в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, потерь в полюсных наконечниках при пульсации основного магнитного потока вследствие зубчатого якоря и т.д.



$P_{\text{в}}$  - потери на возбуждение

$P_{\text{эа}}$  - электрические потери  
в цепи якоря

$P_{\text{мг}}$  - магнитные потери

$P_{\text{доб}}$  - добавочные потери

$P_{\text{мх}}$  - механические потери

# Коэффициент полезного действия машины постоянного тока

**Коэффициент полезного действия:**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

**Потребляемая мощность  $P_1$**

Для генератора – *механическая мощность*

$$P_{1\text{ген}} = M_1 \cdot \omega = 0.105 \cdot M_1 \cdot n$$

Для двигателя – *электрическая мощность*

$$P_{1\text{д}} = U \cdot I$$

**Полезная мощность  $P_2$**

Для генератора – *электрическая мощность*

$$P_{2\text{ген}} = U \cdot I$$

Для двигателя – *механическая мощность*

$$P_{2\text{д}} = 0.105 \cdot M_2 \cdot n$$

**Суммарная мощность потерь**

$$\sum P = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э.в}} + P_{\text{э.а}} + P_{\text{э.щ}} + P_{\text{доб}}$$

# Коэффициент полезного действия машины постоянного тока

Для генератора

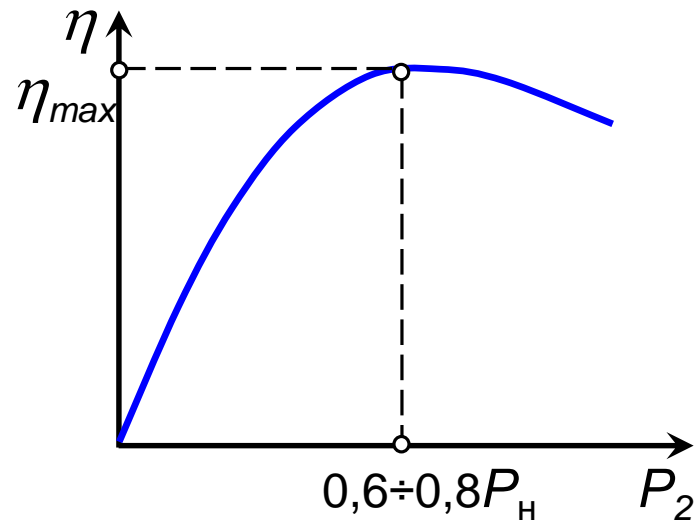
$$\eta_{\text{ген}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{U \cdot I + \sum P}$$

Для двигателя

$$\eta_{\text{д}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I - \sum P}{U \cdot I} = 1 - \frac{\sum P}{U \cdot I}$$

Для машин с мощностью от 1 до 100 кВт  
КПД - от 75% до 90%.

Для машин с мощностью более 100 кВт  
КПД - от 90% до 97%.



## Двигатели постоянного тока

**Уравнение напряжения** для якорной цепи двигателя, работающего с постоянной частотой вращения

$$U = E_a + I_a \sum r_a.$$

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 \sum r_a.$$

$UI_a$  - мощность в цепи обмотки якоря

$I_a^2 \sum r_a$  - мощность электрических потерь в цепи якоря

$E_a I_a = P_{эм} = M\omega$  - электромагнитная мощность двигателя

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum r_a. \quad \text{- уравнение мощностей}$$

Подставим в уравнение напряжений  $E_a = c_E \Phi n$  и выразим  $n$

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E \Phi}$$

# Пуск двигателя постоянного тока

Из уравнения напряжений

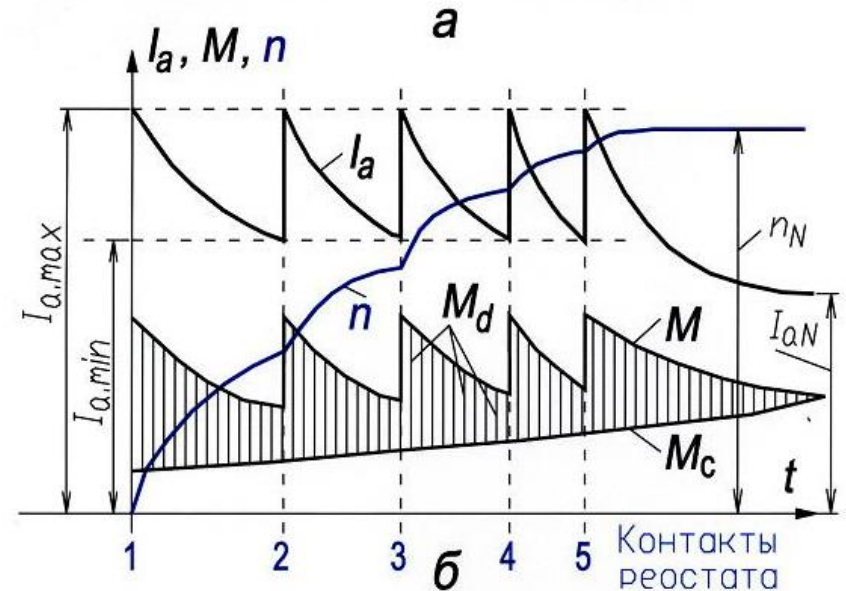
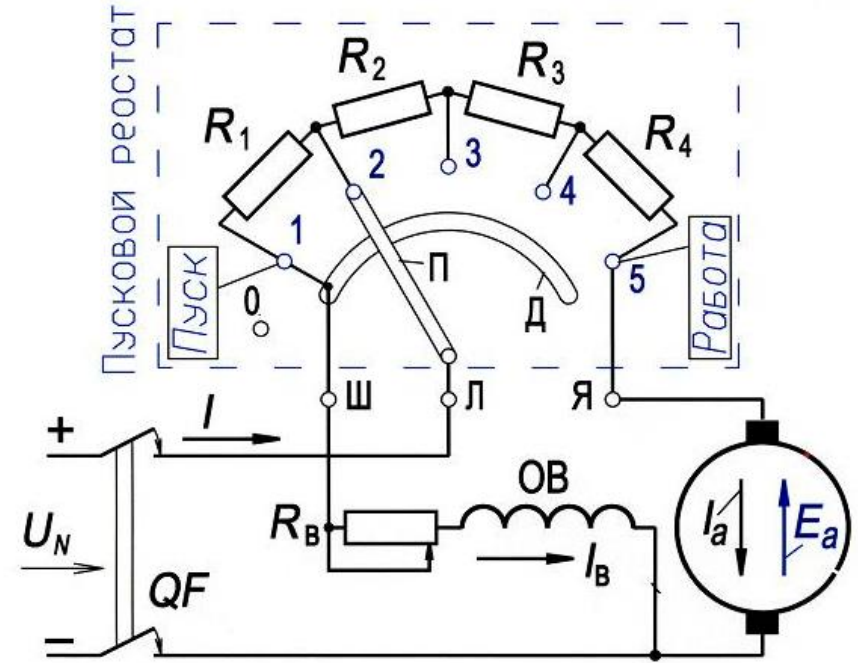
$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r_a}$$

В начальный момент пуска  $n = 0 \Rightarrow E_a = 0$  и  $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r_a}$

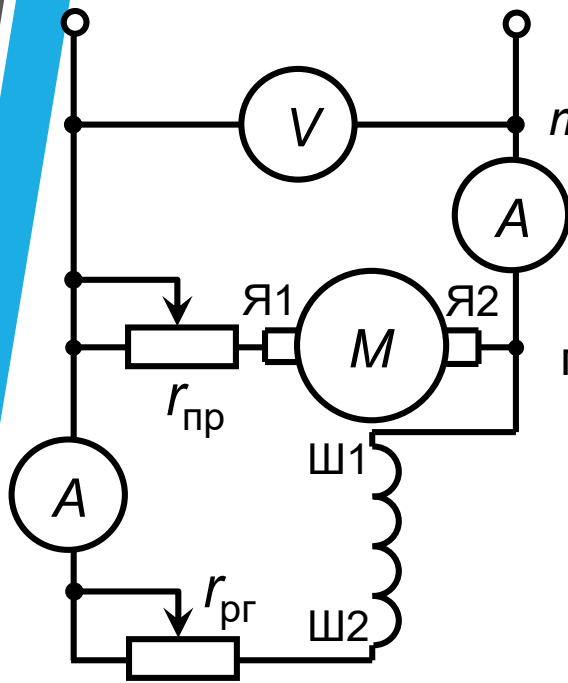
$$I_{\text{пуск}} = (10 \dots 20) I_{a_{\text{НОМ}}}$$

В цепь якоря включают **пусковой реостат**  $r_{\text{пр}}$

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r_a + r_{\text{пр}}} \approx (2 \div 3) I_{a_{\text{НОМ}}}$$



# Двигатель параллельного возбуждения



Характерная особенность этого двигателя:

ток в обмотке возбуждения не зависит от нагрузки.

**Рабочие характеристики:**

зависимости от полезной мощности

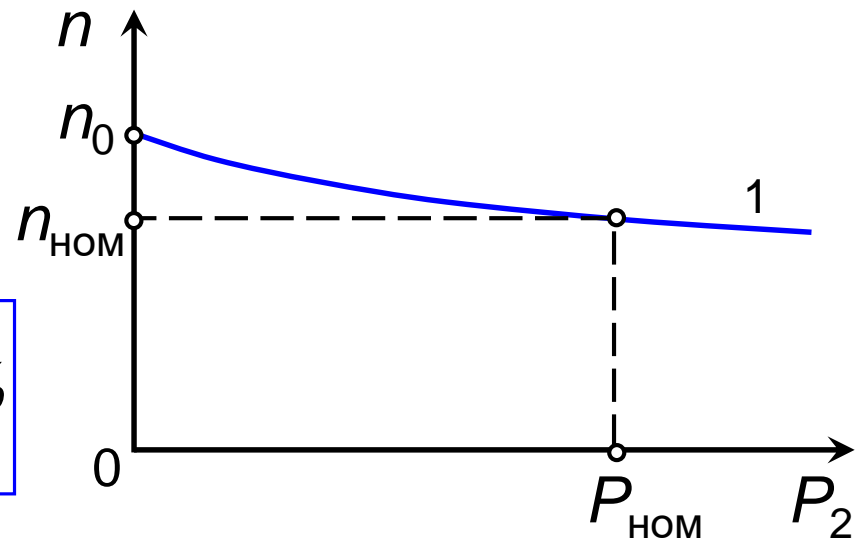
при  $U = const$   
и  $I_B = const$

- частоты вращения  $n = f(P_2)$ ,
- полезного момента  $M_2 = f(P_2)$ ,
- вращающего момента  $M = f(P_2)$ ,
- тока якоря  $I_a = f(P_2)$

**Скоростная характеристика**  $n = f(P_2)$ ,

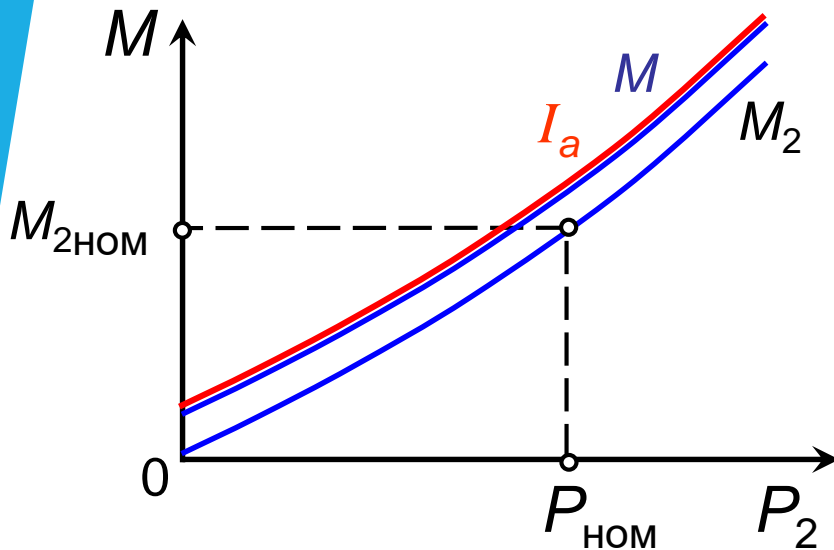
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E \Phi}$$

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%$$



# Двигатель параллельного возбуждения

Зависимость **полезного момента** от полезной мощности  $M_2 = f(P_2)$



$$M_2 = 9,55 P_2 / n$$

**Вращающий момент**  $M = f(P_2)$

$$M = M_0 + M_2$$

**Ток якоря**  $I_a = f(P_2)$

При  $\Phi = \text{const}$  график  $I_a = f(P_2)$  совпадает с графиком  $M = f(P_2)$ ,

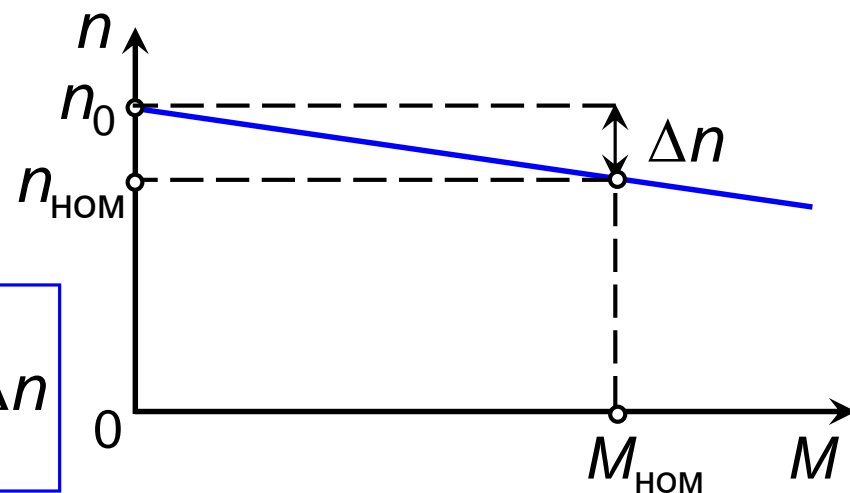
т. к.  $M = c_M \Phi I_a$

**Механическая характеристика**  $n = f(M)$ ,

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{I_a \sum r_a}{c_E \Phi}$$

подставим  $I_a = M / c_M \Phi$

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum r_a}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$



# Регулирование частоты вращения ДПТ параллельного возбуждения

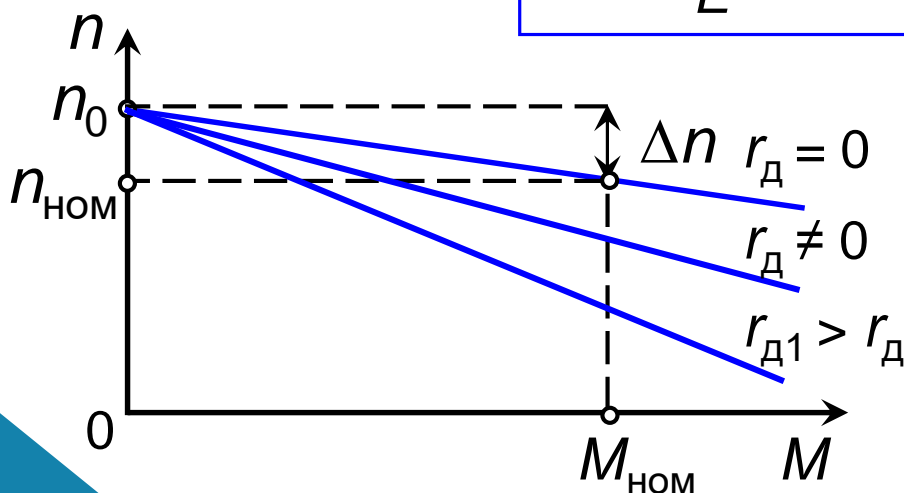
$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E \Phi}$$

Регулировать частоту вращения можно:

- 1) изменением сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением основного магнитного потока  $\Phi$ ;
- 3) изменением напряжения в цепи якоря.

## 1) Введение дополнительного сопротивления в цепь якоря

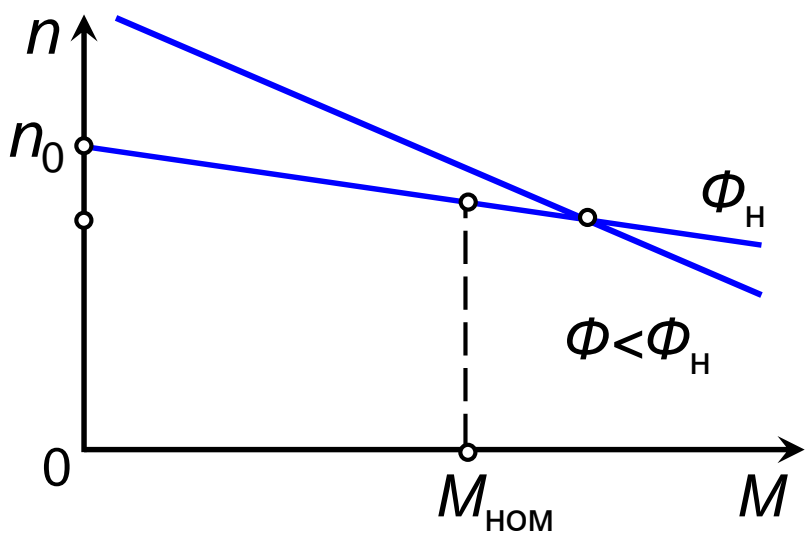
$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$



$$n_0 = \text{const}, \quad \Delta n \uparrow$$

# Регулирование частоты вращения ДПТ параллельного возбуждения

## 2) Изменение основного магнитного потока $\Phi$



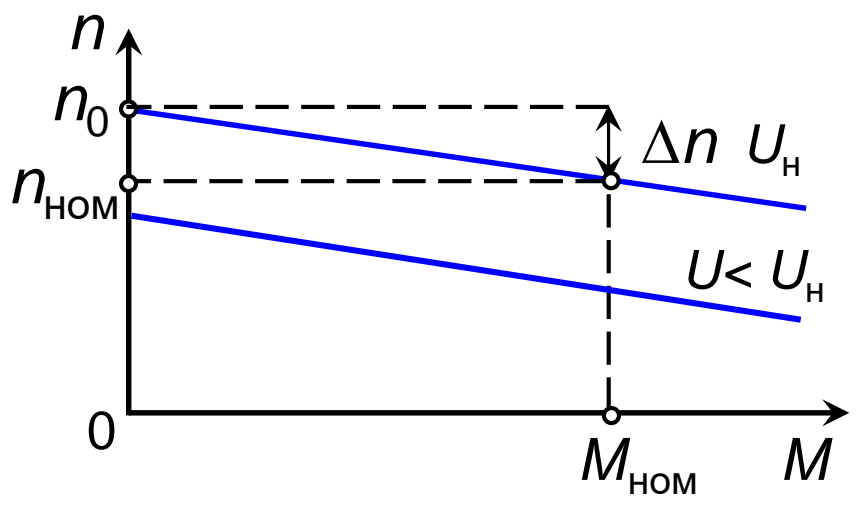
$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum r_a}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

При ослаблении  $\Phi$   
 $n_0 \uparrow, \quad \Delta n \uparrow$

## 3) Изменение напряжения в цепи якоря $U$

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum r_a}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

При снижении  $U$   
 $n_0 \downarrow, \quad \Delta n = const$



**Тормозные режимы** - это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины. В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима:

1. рекуперативное торможение;
2. торможение противовключением;
3. динамическое торможение.

Торможение с отдачей энергии в сеть (**рекуперативное**) или достигается если якорь двигателя вращать от некоторого постороннего источника со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода

В этом случае ЭДС двигателя будет больше приложенного напряжения, в результате чего ток в якоре двигателя и момент изменят свой знак:

$$M = -C_e \Phi I,$$

$$\omega = \frac{U}{C_e \Phi} + \frac{M \cdot R}{C_e^2 \cdot \Phi^2}$$

**Торможение противовключением** может быть получено двумя способами:

- изменением полярности на обмотке якоря или обмотке возбуждения;
- включением в цепь якоря сопротивления  $R_{пр}$ .

**1 способ:** Вследствие механической инерции скорость двигателя и ЭДС в начальный момент сохраняются неизменными, а ток будет равен:

$$I = \frac{-U - E}{R_a - R_{пр}}, \quad \omega = - \left( \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M(R_a + R_{пр})}{C_e^2 \Phi^2} \right).$$

Торможение противовключением **по второму способу** может происходить, например, в режиме тормозного спуска в приводе подъемника, когда двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза.

$$I = \frac{U + E}{R_a + R_{пр}}, \quad \omega = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M(R_a + R_{пр})}{C_e^2 \Phi^2}.$$

## Динамическое торможение

**Динамическое торможение** осуществляется отключением обмотки якоря от сети и замыканием ее на резистор  $R_{д.т.}$ . Обмотка возбуждения остается присоединенной к сети.

Вследствие того, что ЭДС двигателя сохраняет при торможении тот же знак, как и в двигательном режиме, а напряжение извне к якорю не прикладывается, ток якоря определяется по выражению:

$$I = - \frac{E}{R_a + R_m},$$
$$\omega = - \frac{M(R_a + R_m)}{C_e^2 \Phi^2}.$$

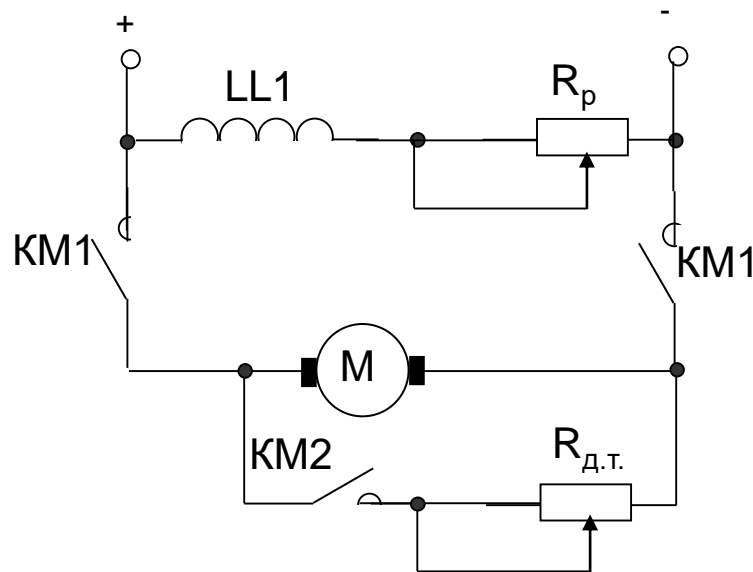
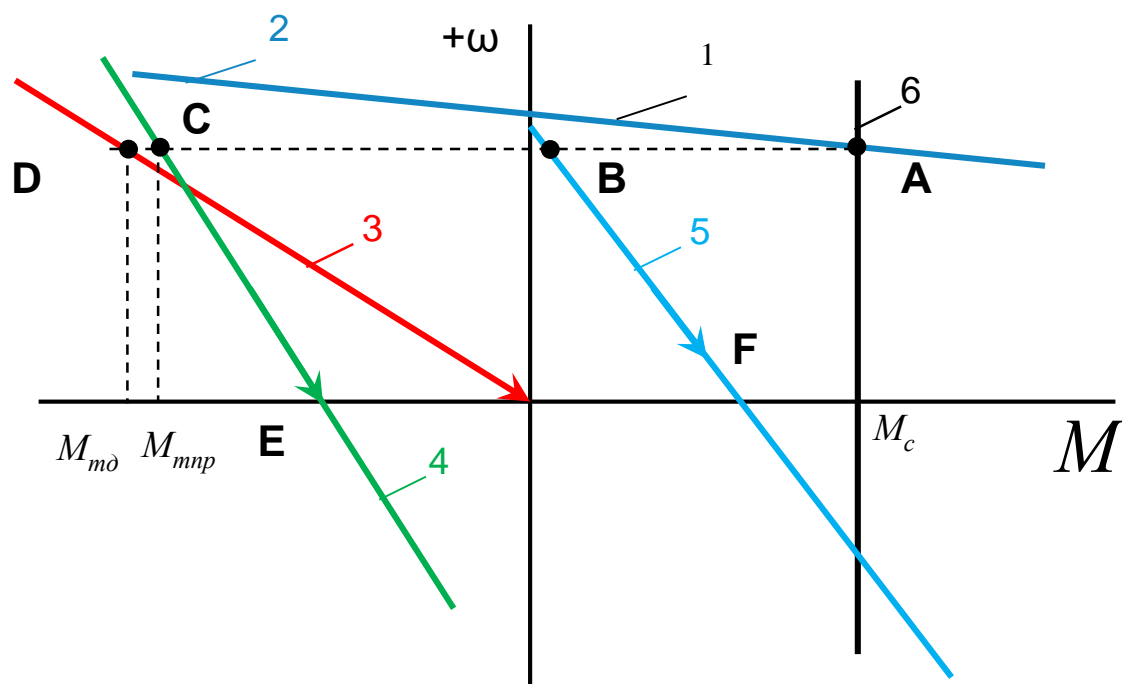


Схема управления динамическим торможением двигателя постоянного тока

# Тормозные характеристики двигателей постоянного тока

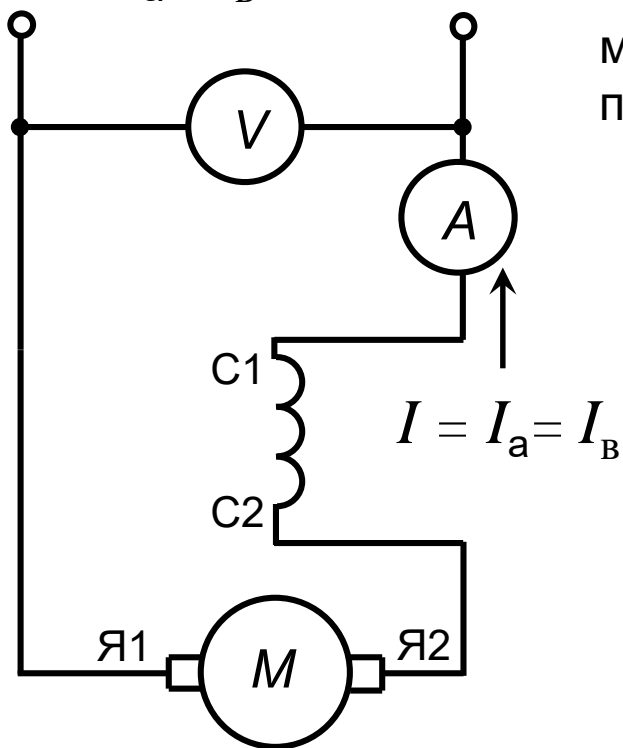


- 1 - механическая характеристика ДПТ в двигательном режиме;
- 2 – механическая характеристика при рекуперативном торможении;
- 3 – механическая характеристика при динамическом торможении;
- 4 – противовключение сменой полярности;
- 5 – противовключение введением  $R_{пр}$ ;
- 6 – механическая характеристика рабочей машины

# Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена **последовательно** в цепь якоря, поэтому магнитный поток  $\Phi$  в нем зависит от тока нагрузки

$$I = I_a = I_B$$



При небольших нагрузках магнитная система машины *не насыщена* и зависимость магнитного потока от тока нагрузки прямо пропорциональна:

$$\Phi = k_\phi I_a$$

В этом случае электромагнитный момент:

$$M = c_M \Phi I_a = c_M k_\phi I_a I_a$$

$$M = c'_M I_a^2$$

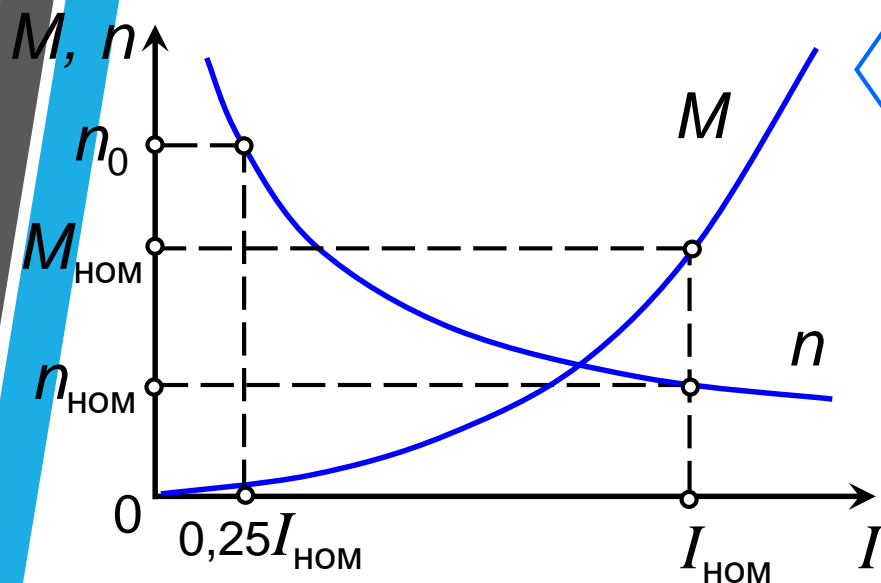
Частота вращения:

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E \Phi} = \frac{U - I_a \sum r_a}{c_E k_\phi I_a}$$

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a}{c'_E I_a}$$

# Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Таким образом, *вращающий момент* двигателя последовательного возбуждения при ненасыщенном состоянии магнитной системы пропорционален *квадрату тока*, а *частота вращения* обратно пропорциональна *току нагрузки*.



**Рабочие характеристики** ДПТ последовательного возбуждения:  
 $M = f(I)$  и  $n = f(I)$ .

При больших нагрузках ( $I > I_{НОМ}$ ) наступает *насыщение магнитной системы*. При этом магнитный поток при дальнейшем изменении нагрузки не изменяется ( $\Phi - const$ ) и характеристики приобретают почти *прямолинейный характер*.

Характеристика  $n = f(I)$  - «*мягкая*», т.е. частота вращения значительно изменяется при изменении нагрузки.

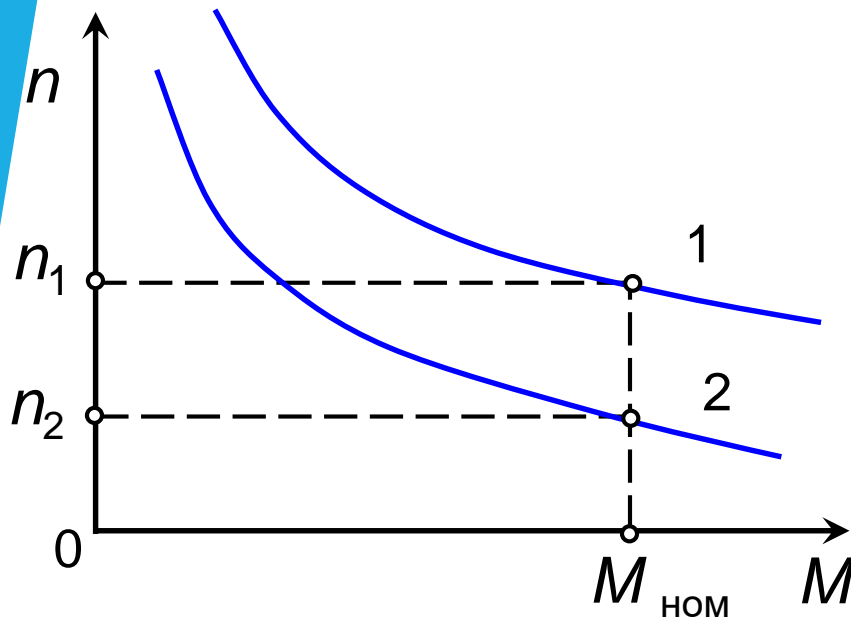
При *уменьшении нагрузки* частота вращения *резко увеличивается*, и при токе нагрузки менее  $0,25 I_{НОМ}$  частота вращения может достичь опасных пределов (двигатель «*пойдет в разнос*»).

# Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Механическая характеристика

$$n = f(M)$$

1 – естественная;  
2 – искусственная.



Резко падающие механические характеристики обеспечивают двигателю последовательного возбуждения *устойчивую работу при любой механической нагрузке*

Свойство этих двигателей развивать *большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки*, имеет важное значение при пуске и перегрузках.

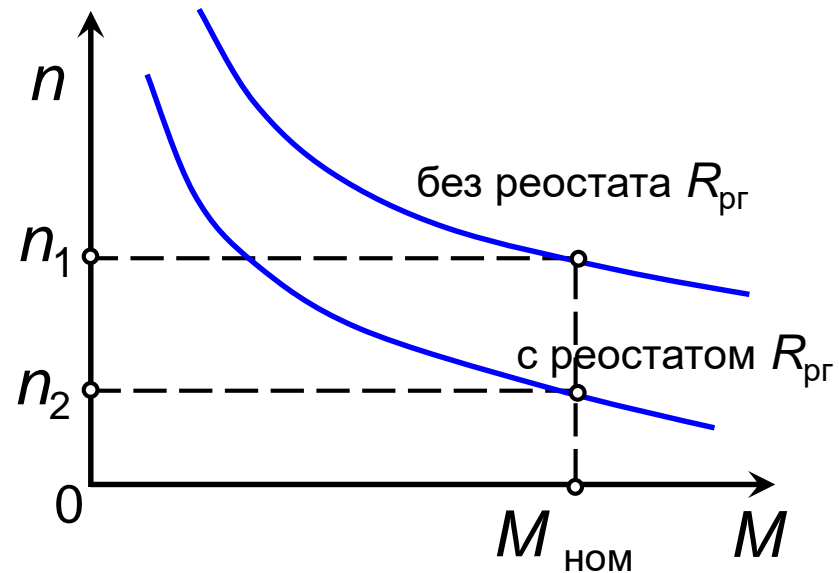
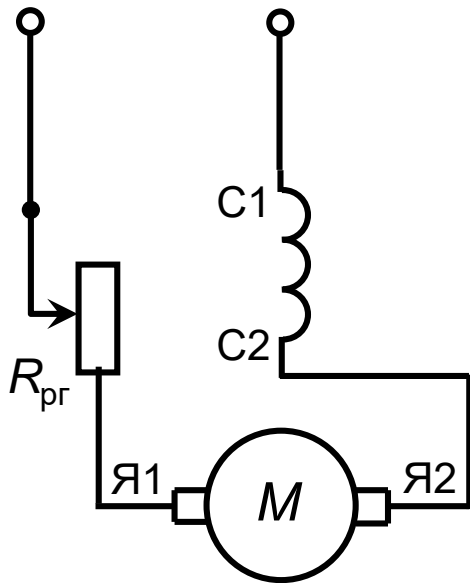
Это свойство обуславливает их *широкое применение* в качестве **тяговых двигателей** на транспорте, в качестве **крановых двигателей** в подъемных установках и других случаях электропривода с *тяжелыми условиями пуска* и сочетания *значительных нагрузок на вал с малой частотой вращения*.

# Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

## Регулирование частоты вращения:

- 1) изменением напряжения.
- 2) изменением магнитного потока обмотки возбуждения;

### 1.а – включением в цепь якоря регулировочного реостата $R_{\text{рг}}$



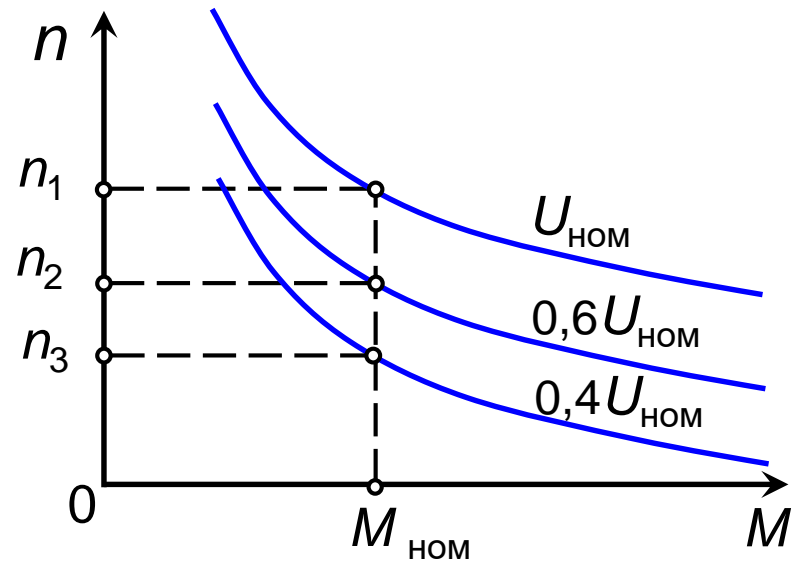
С увеличением реостата  $R_{\text{рг}}$  уменьшается напряжение на двигателе и, следовательно, *снижается частота вращения.*

Этот способ применяется только в двигателях *небольшой мощности* из-за больших потерь энергии в реостате  $R_{\text{рг}}$

## Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

**1.б** – частоту вращения можно регулировать *изменением напряжения  $U$ , подводимого к двигателю, посредством источника питания с регулируемым напряжением.*

При уменьшении напряжения  $U$  на двигателе, его механические характеристики *смещаются вниз не меняя своей кривизны.*



**1.в** – при совместной работе *нескольких одностипных двигателей частоту вращения можно регулировать изменением схемы их включения:*

- при **параллельном включении** двигателей каждый из них работает под полным напряжением сети;
- при **последовательном включении** двух двигателей на каждый двигатель приходится половина напряжения сети.

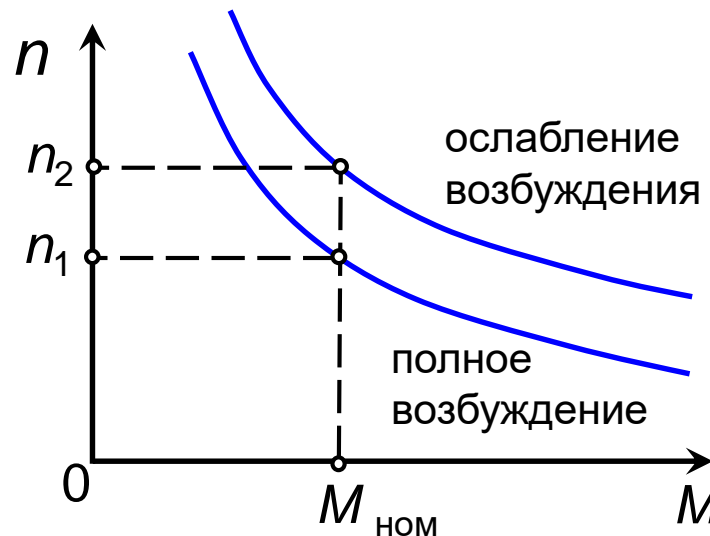
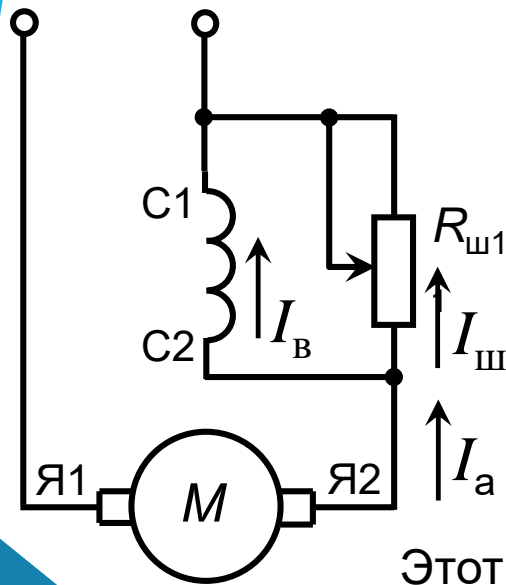
Этот способ регулирования частоты вращения применяется, например, на трамваях, где установлено несколько одинаковых тяговых двигателей.

# Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

2. Регулировать частоту вращения *изменением магнитного потока* можно тремя способами:

- шунтированием обмотки возбуждения реостатом;
- секционированием обмотки возбуждения;
- шунтированием обмотки якоря.

**2.а – шунтирование обмотки возбуждения** реостатом  $R_{ш1}$  и уменьшение сопротивления этого реостата ведет к снижению тока возбуждения  $I_B = I_a - I_{ш}$  и, следовательно, к *росту частоты вращения*

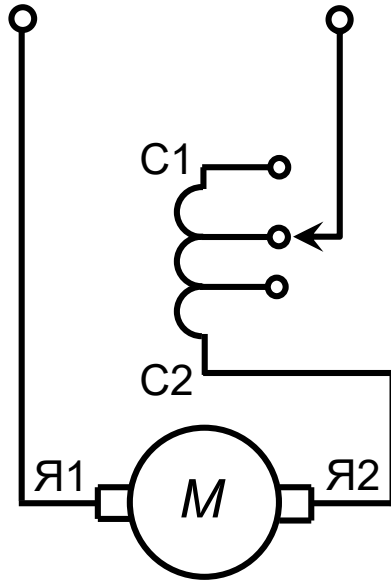


Этот способ *экономичнее* предыдущего и применяется чаще и оценивается **коэффициентом ослабления поля**

$$\beta = \frac{I_B}{I_a} \times 100\%$$

Резистор  $R_{ш}$  выбирается таким, чтобы  $\beta < 50\%$ .

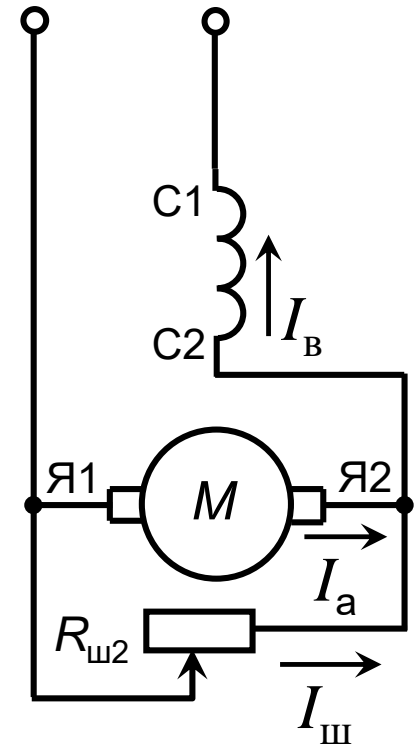
## Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения



**2.б** – при **секционировании обмотки возбуждения** отключение части витков обмотки сопровождается **ростом частоты вращения**.

**2.в** – при **шунтировании обмотки якоря** реостатом  $R_{ш2}$  увеличивается ток возбуждения  $I_B = I_a + I_{ш}$ , что приводит к **снижению частоты вращения**.

Этот способ регулирования, хотя и обеспечивает **глубокую регулировку** частоты вращения (вплоть до остановки), но он **неэкономичен** (из-за значительных потерь в реостате  $R_{ш2}$ ) и применяется редко.



## Заключение

В роли индуктора в машинах постоянного тока (МПТ) выступает статор с полюсами, на которых расположена обмотка возбуждения. На неё подаётся постоянный ток, в результате чего вокруг неё создаётся постоянное магнитное поле. Обмотка якоря состоит из проводников, запитанных через коллектор. В результате на них действуют пары сил Ампера, которые вызывают вращающий момент.

Направление сил определяется по правилу "левой руки". Однако этот вращающий момент способен повернуть якорь только на 180 градусов, после чего он остановится. Чтобы это предотвратить, используется щёточно-коллекторный узел, выполняющий роль переключателя полярности.

Ток, протекающий по обмотке якоря, создает собственное магнитное поле, взаимодействие которого с основным магнитным полем получило название реакция якоря. Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов и нарушает коммутацию.

Для компенсации вредного влияния реакции якоря используют компенсационную обмотку, размещаемую в наконечниках главных полюсов, или добавочные полюса, расположенные между основными.

## Заключение

ЭДС машин постоянного тока пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря, а вращающий момент – магнитному потоку и току якоря.

Различают четыре способа возбуждения машин постоянного тока, отличающихся взаимным включением обмотки якоря и обмотки возбуждения: параллельный, последовательный, смешанный и независимый, реализуемый с помощью постоянных магнитов.

Основными характеристиками генераторов постоянного тока (ГПТ) являются: характеристика холостого хода, нагрузочная, внешняя и регулировочная. Принцип самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения основан на способности магнитной системы длительное время сохранять небольшой магнитный поток остаточного магнетизма.

В ГПТ смешанного возбуждения согласное включение обмоток параллельного и последовательного возбуждения (направления МДС обмоток совпадают) обеспечивает более жесткую внешнюю характеристику. Встречное включение применяют для получения круто падающей внешней характеристики.

Потери в МПТ подразделяют на основные (магнитные, электрические и механические) и добавочные. Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины и называются переменными. Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения можно считать постоянными.

## Заключение

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока (ДПТ) пропорциональна приложенному к якоря напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку.

Сопротивление обмотки якоря ДПТ крайне невелико, поэтому в первоначальный момент пуска, когда ЭДС равна нулю, ток в двигателе достигает опасных значений. Для пуска ДПТ применяют пусковой реостат, постепенное выключение секций которого обеспечивает плавное нарастание частоты вращения.

Характерной особенностью ДПТ параллельного возбуждения является то, что ток в обмотке возбуждения не зависит от нагрузки. Механическая характеристика такого двигателя является жесткой. Регулировать скорость вращения ДПТ параллельного возбуждения можно тремя способами: изменением сопротивления в цепи якоря, изменением основного магнитного потока и изменением напряжения в цепи якоря.

Тормозные режимы ДПТ – это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую. Различают три тормозных режима: рекуперативное торможение; торможение противовключением; динамическое торможение.

## Заключение

Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное) или достигается если якорь двигателя вращать от некоторого постороннего источника со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода.

Торможение противовключением может быть получено двумя способами: изменением полярности на обмотке якоря или обмотке возбуждения; включением в цепь якоря сопротивления.

Динамическое торможение осуществляется отключением обмотки якоря от сети и замыканием ее на резистор. Обмотка возбуждения остается присоединенной к сети.

В ДПТ последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря, поэтому магнитный поток в нем зависит от тока нагрузки. Таким образом, вращающий момент двигателя последовательного возбуждения при ненасыщенном состоянии магнитной системы пропорционален квадрату тока, а частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки.

Механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения мягкая. При уменьшении нагрузки частота вращения резко увеличивается, и при токе нагрузки менее  $0,25 I_{ном}$  частота вращения может достичь опасных пределов (двигатель «пойдет в разнос»).

## Заключение

Свойство ДПТ последовательного возбуждения развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет важное значение при пуске и перегрузках.

Это свойство обуславливает их широкое применение в качестве тяговых двигателей на транспорте, в качестве крановых двигателей в подъемных установках и других случаях электропривода с тяжелыми условиями пуска и сочетания значительных нагрузок на вал с малой частотой вращения.

Регулировать скорость вращения ДПТ последовательного возбуждения можно двумя способами: изменением основного магнитного потока и изменением напряжения.

## Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные элементы конструкции машины постоянного тока? Перечислите, какие обмотки могут быть в машине, их расположение и назначение. Как устроен коллектор?
2. Что называется геометрической и физической нейтралью машины? Как понимать выражение «щетki стоят на геометрической нейтрали»? Где на коллекторе находится геометрическая нейтраль?
3. Что понимается под реакцией якоря? Как распределяется вдоль воздушного зазора по окружности МДС якоря при нагрузке машины?
4. Какими мерами можно ослабить или вообще ликвидировать влияние реакции якоря на неблагоприятное распределение напряжения по коллектору или вообще на работу машины при нагрузке?
5. Как устроена и каким образом включается компенсационная обмотка? Изобразите ее схему, например, для двухполюсной машины.
6. Изобразите характеристики холостого хода и нагрузочную генератора с независимым возбуждением. Между этими характеристиками впишите характеристический треугольник. Объясните физический смысл катетов этого треугольника.
7. «Коммутация» буквально означает «переключение». Какой процесс коммутации (переключения) постоянно происходит при работе машины постоянного тока (что, из какой в какую цепь и когда переключается?).

## Вопросы для самоконтроля

8. Где размещаются дополнительные полюса? Определите необходимую полярность дополнительных полюсов у генератора и двигателя. Как включается обмотка дополнительных полюсов? Не нарушится ли необходимая полярность дополнительных полюсов при использовании генератора двигателем или при изменении направления вращения?
9. Почему под дополнительными полюсами по сравнению с главными делают увеличенный воздушный зазор? С какой целью этот зазор частично, в виде немагнитных прокладок, переносят к месту крепления полюсов к станине?
10. Сформулируйте условия самовозбуждения генераторов с параллельным возбуждением.
11. Что дает дополнительная последовательная обмотка возбуждения генератора со смешанным возбуждением? Как и почему изменяется внешняя характеристика генератора, если последовательную обмотку включить в магнитном отношении навстречу основной параллельной обмотке?
12. Напишите и поясните все основные соотношения для напряжений и токов в цепи якоря, а также скорости вращения и вращательного момента машины постоянного тока в двигательном режиме.

## Вопросы для самоконтроля

13. Изобразите энергетические диаграммы для якоря в генераторном и двигательном режимах машины. Объясните их, сопровождая необходимыми соотношениями.
14. Как пускаются в ход двигатели постоянного тока? Изобразите принципиальную схему пуска двигателя параллельного возбуждения. Каково назначение пускового реостата? В каком положении должен находиться регулировочный реостат в цепи возбуждения? Почему нельзя цепь возбуждения подключить к выводам якоря двигателя, а рекомендуется подключить так, чтобы она была под полным напряжением питающей сети?
15. Как можно регулировать скорость вращения двигателей параллельного и последовательного возбуждения? Поясните необходимыми соотношениями, изобразите характеристики двигателей.
16. Как осуществить реверсирование электродвигателя постоянного тока?
17. Какое влияние на работу двигателя с параллельным и смешанным возбуждением оказывает обрыв цепи возбуждения?
18. Как происходит процесс саморегулирования двигателей постоянного тока при изменении момента нагрузки на валу?

## Вопросы для самоконтроля

19. Почему при уменьшении тока возбуждения электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением частота вращения его якоря возрастает?
20. Почему полюса и станину машины постоянного тока выполняют из толстой листовой стали, а якорь набирают из тонких дисков?
21. Объясните принцип работы генератора постоянного тока. Какова роль электромагнитного момента и ЭДС в этом случае?
22. Сравните механические характеристики ДПТ параллельного, последовательного и смешанного (с согласным включением обмоток) возбуждений. Двигатели какого способа возбуждения обладают «жесткими» характеристиками?
23. Какие требования предъявляются к пуску ДПТ последовательного возбуждения?
24. Почему пусковой ток двигателя постоянного тока без пускового реостата значительно превышает номинальный ток?
25. Перечислите причины, вызывающие искрение на коллекторе.
26. Что такое «круговой огонь на коллекторе»?
27. Почему не допускают работу двигателя последовательного возбуждения в режиме, близком к режиму холостого хода?

1. Касаткин, А.С. Электротехника: учеб. для студентов неэлектротехн. специальностей вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 544 с.
2. Хернер, А. Автомобильная электрика и электроника /А. Хернер, Х-Ю. Риль; перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». – М.: ООО «Издательство «За рулём», 2013. – 624 с.
3. Wyatt, D. Aircraft Electrical and Electronic Systems / D. Wyatt, M. Tooley. – Second Edition – NY, Routledge, 2018. – 439 p.
4. Bell, J.A. Modern Diesel Technology: Electricity & Electronics / J.A. Bell - Second Edition – NY, Delmar, 2014. – 546 p.