

Лекция №8

Машины постоянного тока

© 2020 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

Электрические машины постоянного тока

двигатели

генераторы

Двигатели - металлургическая промышленность, электрический транспорт.

Генераторы - питание электролитических ванн; зарядка аккумуляторов; высококачественная сварка.

Преимущества МПТ

ГПТ

- жесткая внешняя характеристика,
- хорошие регулировочные свойства.

ДПТ

- лучшие механические характеристики,
- лучшие регулировочные свойства,
- высокая перегрузочная способность.

Диапазон мощностей: от единиц ватт (микромашины) до десятков тысяч киловатт (двигатели для прокатных станков; гребных винтов кораблей).

Наиболее распространенные серии: 2П (0,37-200 кВт) – включает и двигатели и генераторы; новая серия 4П (0,126-800 кВт) – двигатели с расширенным диапазоном регулирования частоты вращения.

Общие недостатки МПТ

- **сложность конструкции,**
- **невозможность работы в агрессивных средах,**
- **необходимость частых ревизий,**
- **меньший срок службы,**
- **наличие радиопомех.**

Причина радиопомех - коммутация тока на коллекторе.

В момент перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую в цепи возникают явления, сопровождающиеся возникновением **затухающих колебаний**.

Искрение на коллекторе повышает **интенсивность помех**.

Борьба с помехами радиоприёму от генератора заключается в **исправном содержании щёток и коллектора**: коллектор должен быть чистым, а щетки хорошо притерты.

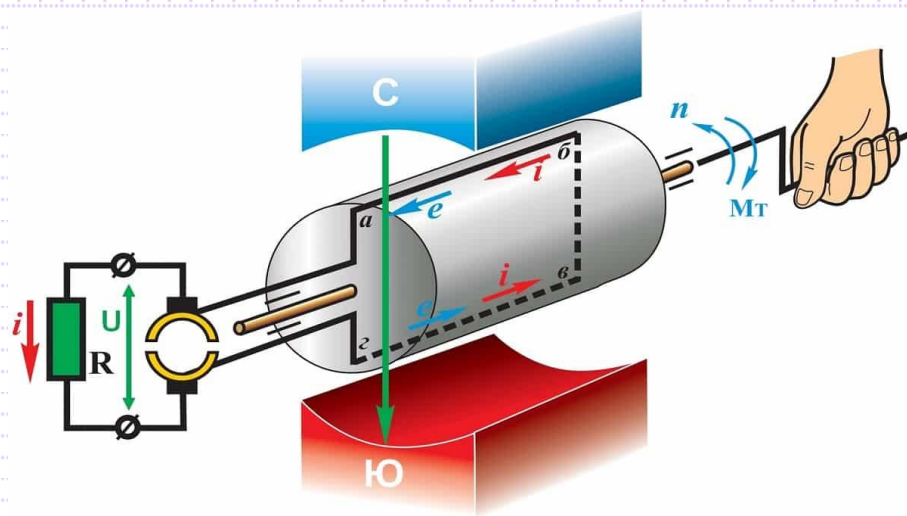
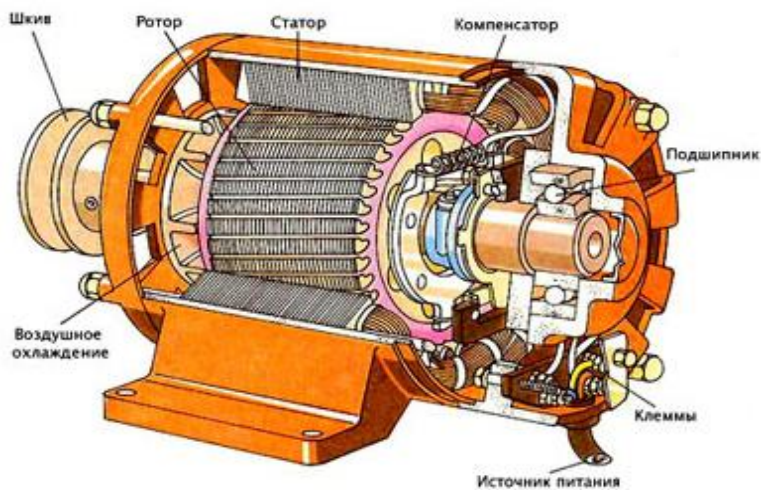
Кроме того, для подавления помех от генератора применяют **электрические фильтры, включаемые в цепь якоря**.

Генератор постоянного тока —

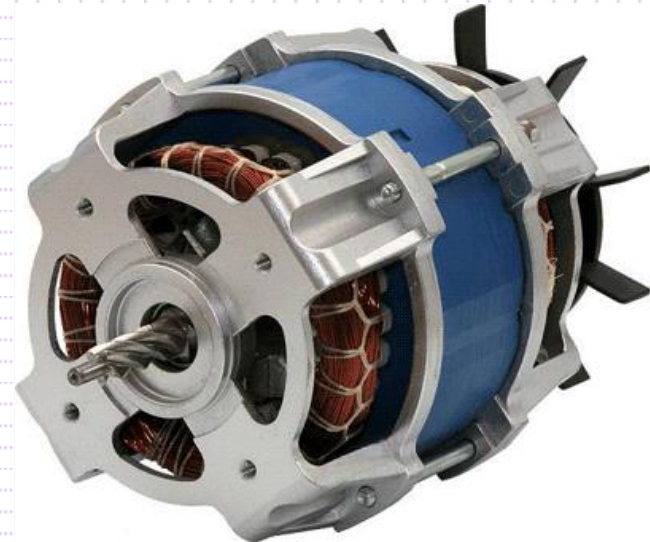
электрическая машина,

преобразующая механическую энергию,
поступающую от первичного двигателя,
в электрическую энергию

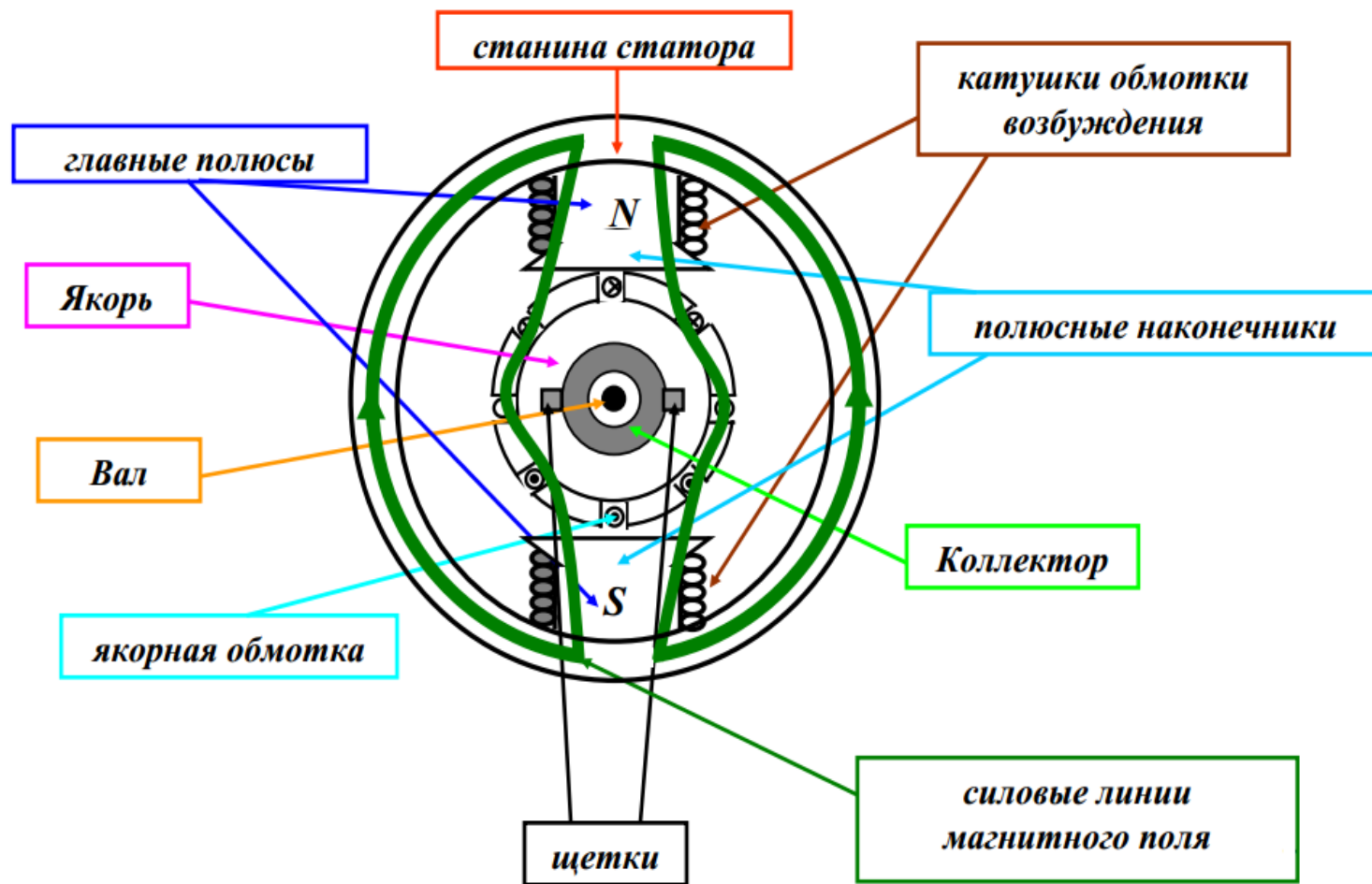
постоянного тока.



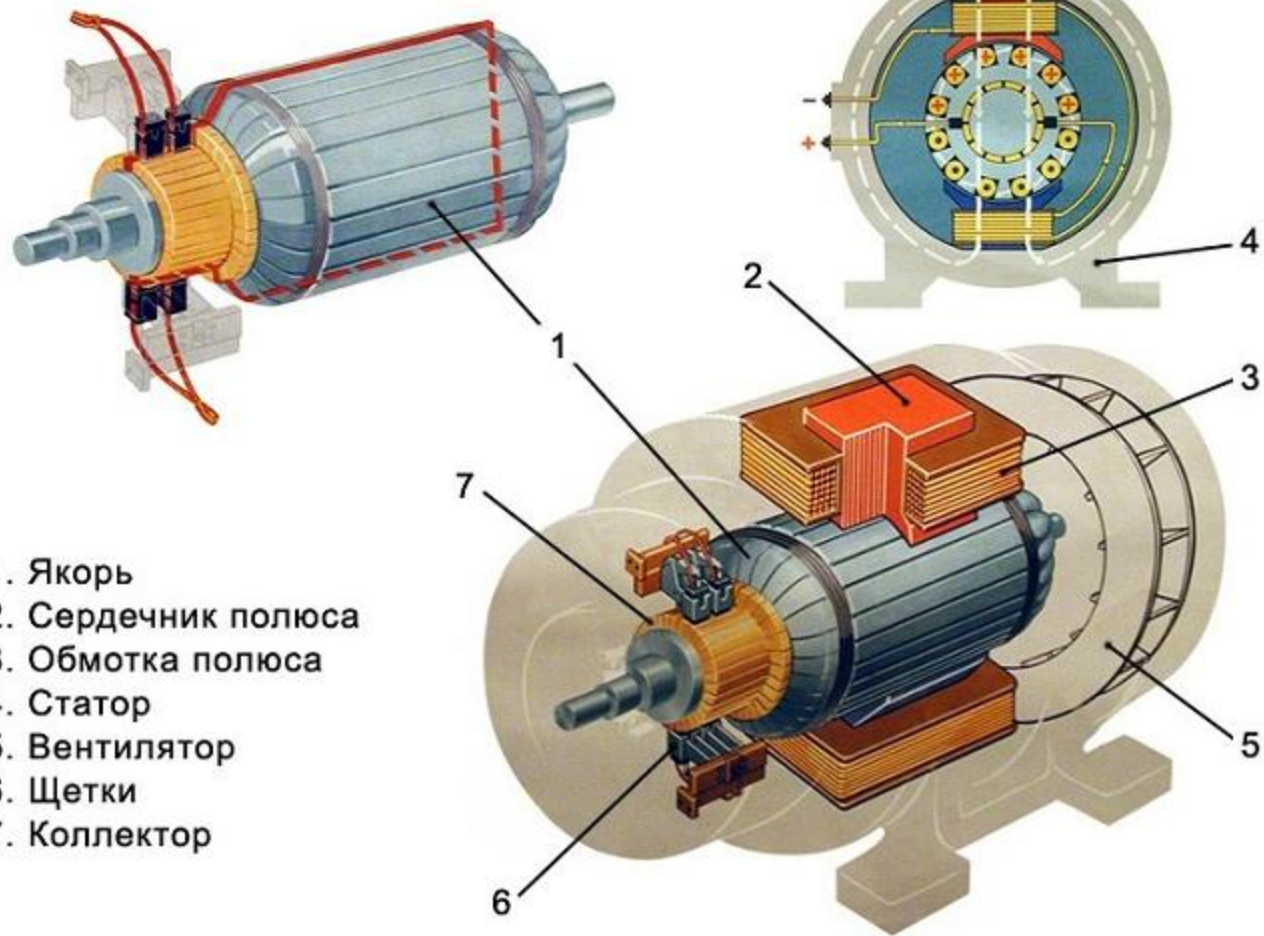
**Двигатель постоянного тока —
электрическая машина,
преобразующая электрическую
энергию постоянного тока в
механическую энергию.**



Устройство МПТ

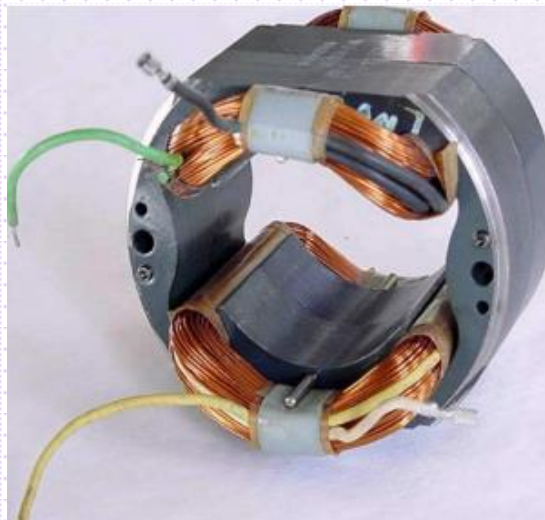


ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА



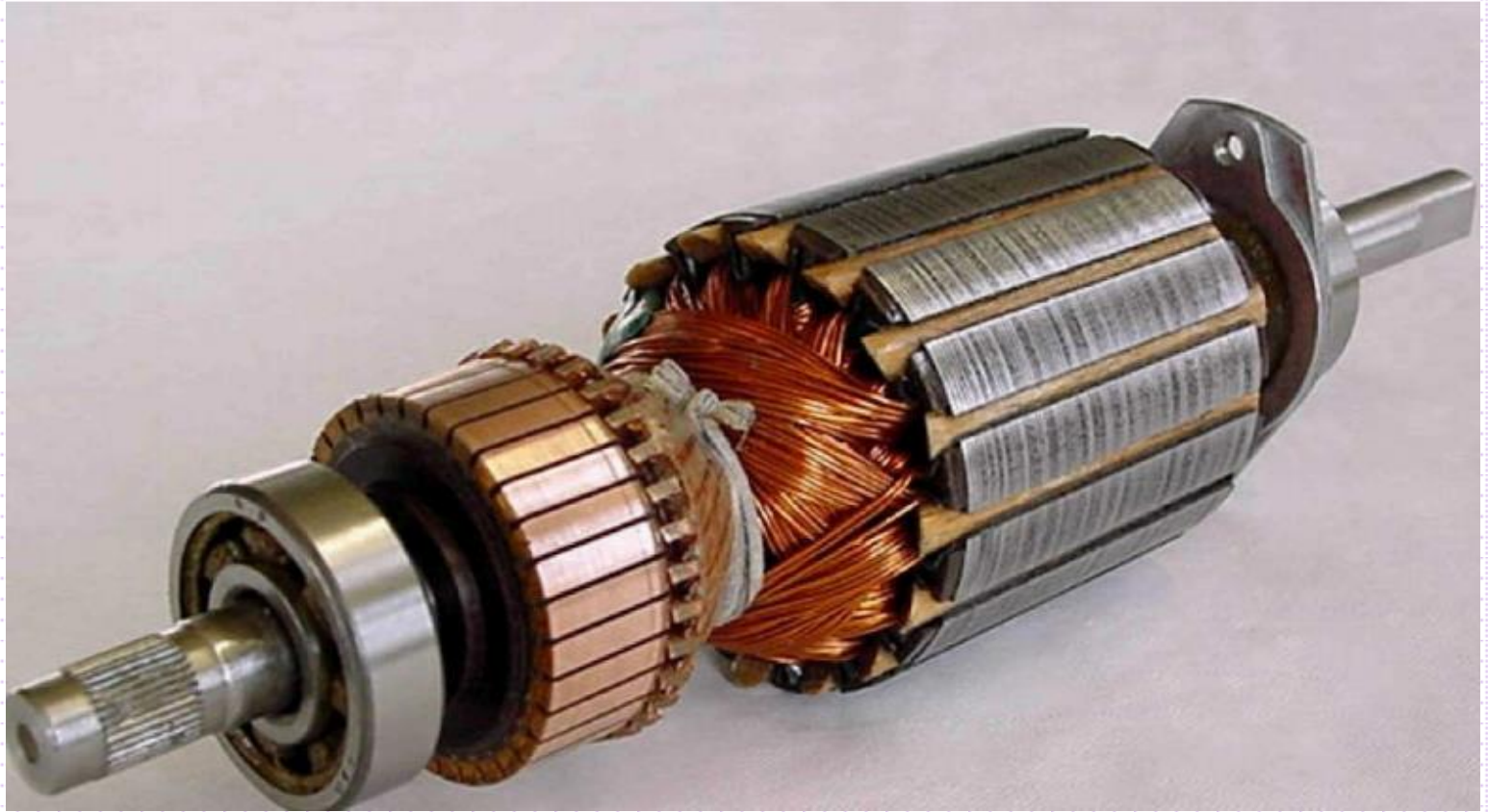
Состоит из неподвижной части – **статора**, который служит для возбуждения главного магнитного поля машины, и вращающейся части – **якоря (ротора)**.

Статор состоит из станины (литая сталь), на которой крепятся главные полюсы (для возбуждения основного магнитного потока) и дополнительные полюсы (для хорошей коммутации).

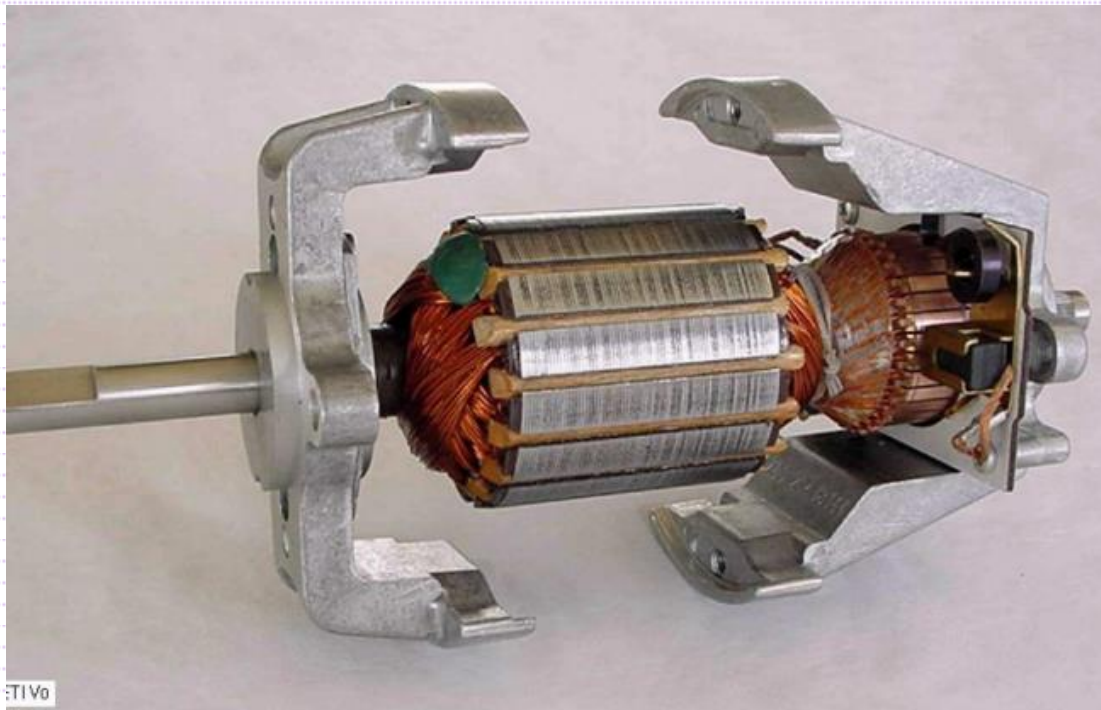


Главный полюс состоит из **сердечника** (шихтованный, укреплен болтами на станине), и **обмотки возбуждения**. Сердечник снабжается **полюсным наконечником** (для создания требуемого распределения магнитного потока). ОВ питается либо от источника постоянного тока, либо от зажимов якорной обмотки.

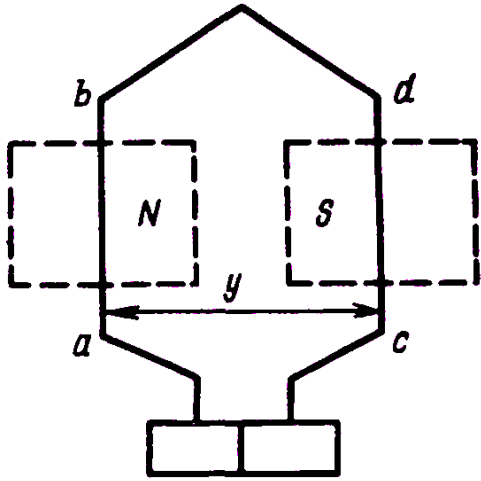
Якорь состоит из **зубчатого сердечника**, набранного из листовой стали, в пазы которого уложена **обмотка якоря** и **коллектора**, насаженного на вал якоря. **Коллектор** – это полый цилиндр, собранный из изолированных друг от друга клинообразных медных пластин.



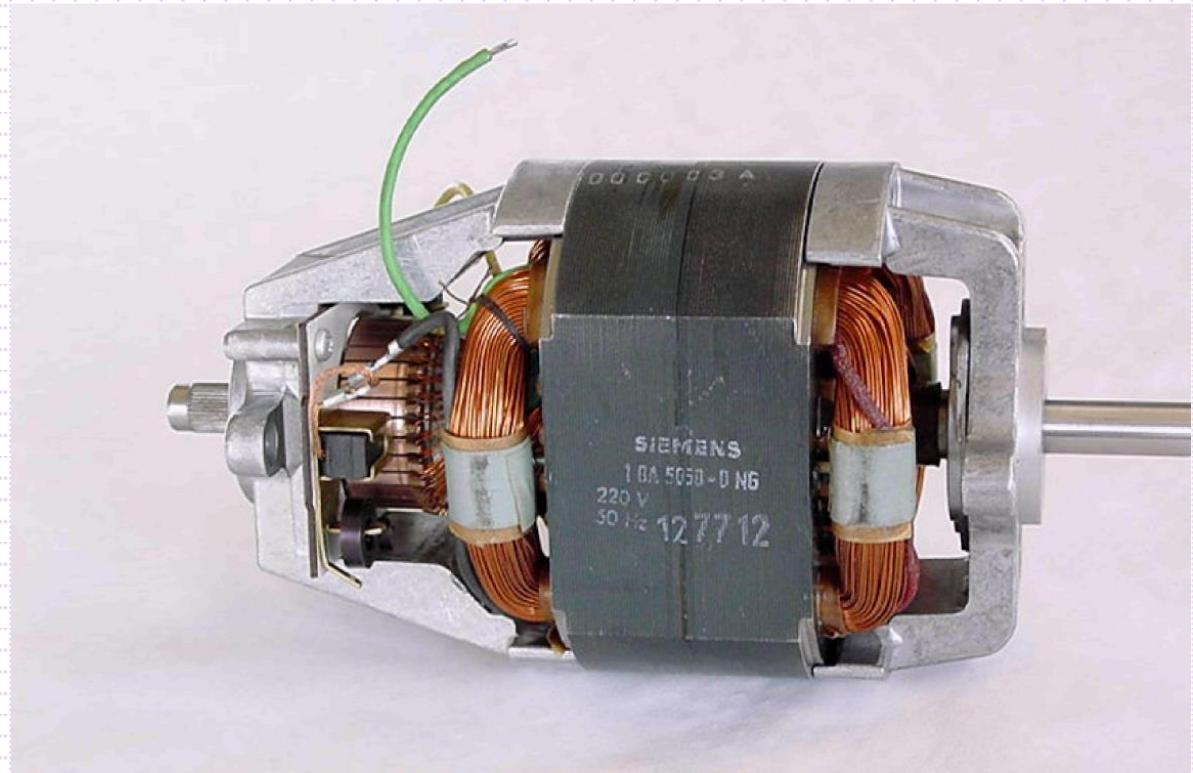
К каждой пластине коллектора присоединяются два конца секции обмотки якоря. На коллекторе, в щеткодержателях устанавливаются неподвижные щетки, через которые обмотка якоря соединяется с внешней цепью.



Секция – часть обмотки якоря, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков, присоединенных своими концами к коллекторным.



Одновитковая секция ОЯ



Применение коллектора необходимо в генераторах постоянного тока для выпрямления переменной ЭДС, индуктируемой в ОЯ, а в двигателях коллектор нужен для получения постоянного по направлению вращающего момента.

Режимы работы МПТ

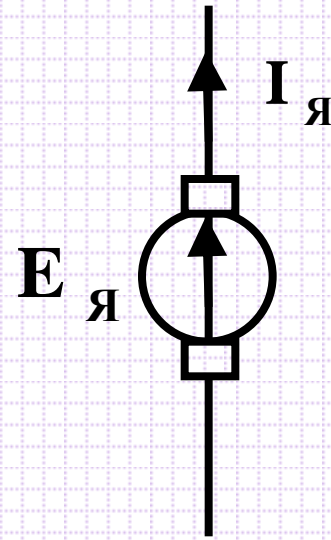
Машина работает в режиме **генератора**, если ее **вращает двигатель**, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки с приемником. При этом под действием ЭДС, индуктируемой в ОЯ, в цепи якорь-приемник возникает **ток, совпадающий с ЭДС** по направлению. Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает на валу тормозной момент, который преодолевается первичным двигателем.

ЭДС якоря

$$E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad \text{где}$$

C_E — постоянный коэффициент;

n — частота вращения якоря



Уравнение электрического состояния цепи якоря

$$E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

$R_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря

В двигательном режиме цепи якоря и возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии. Взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает вращающий момент:

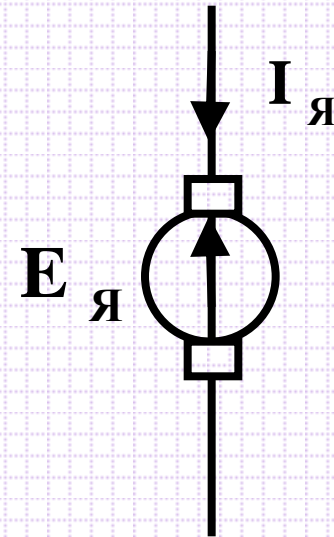
$$M_{\text{вр}} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad C_M = C_E \cdot \frac{60}{2\pi}$$

Под действием момента якорь вращается, преодолевая момент нагрузки на валу. При этом **ЭДС якоря противодействует току якоря и направлена ему навстречу.**

Напряжение, приложенное к цепи якоря

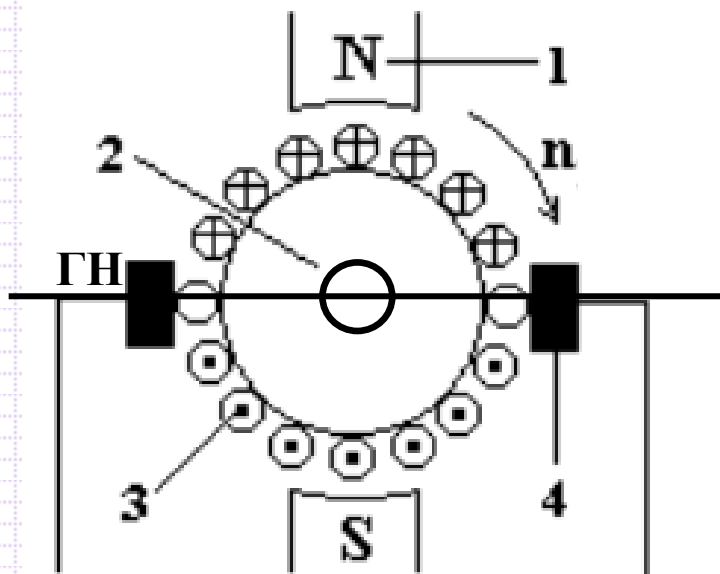
$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$$



Выпрямление переменной ЭДС

Выпрямление переменной ЭДС



ЭДС проводников, расположенных в зоне одного полюса, различны по величине. Наибольшая ЭДС индуцируется в проводнике, расположенном под серединой полюса, ЭДС, равная нулю, - в проводнике, расположенном на линии ГН.

$$e = B_n l v$$

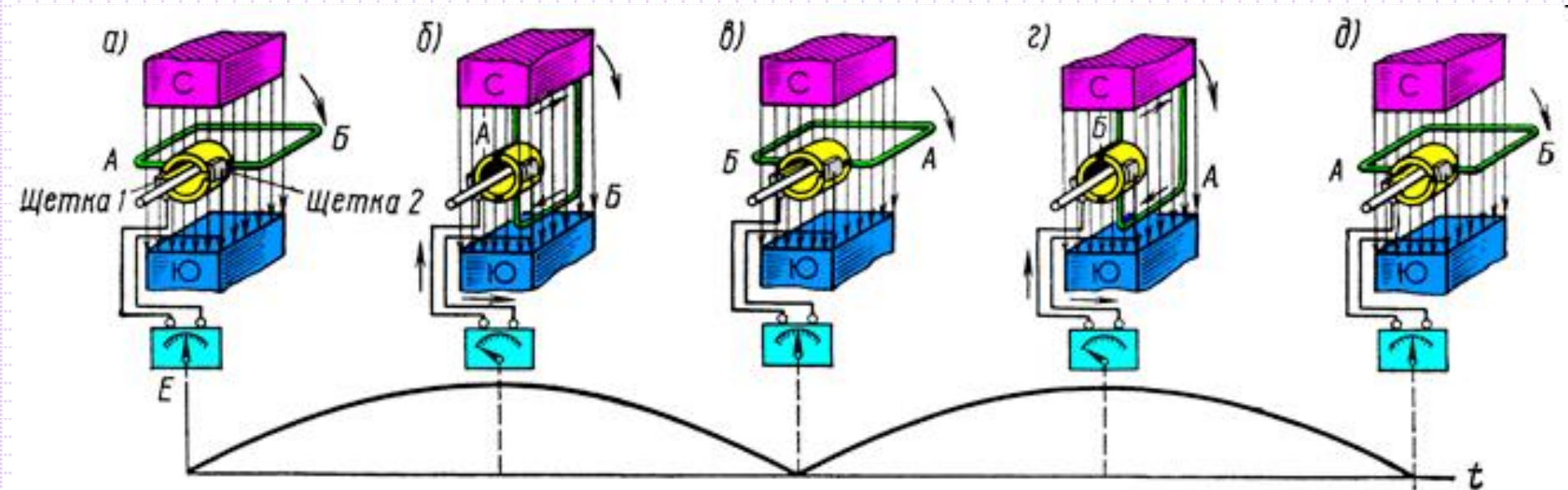
B_n — нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре;

l — активная длина проводника;

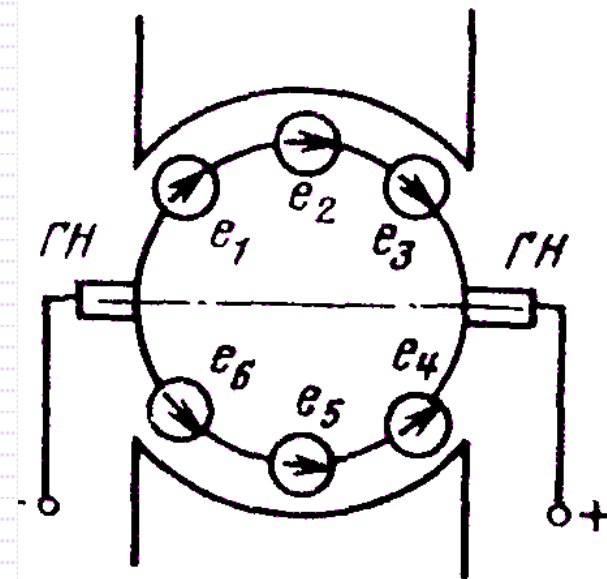
$v = \frac{\pi n D}{60}$ — линейная скорость вращения проводника

Геометрическая нейтраль – это линия, проходящая через середину межполюсного пространства и середину машины.

Физическая нейтраль – это линия, проходящая через точки окружности якоря, где магнитная индукция равна нулю.



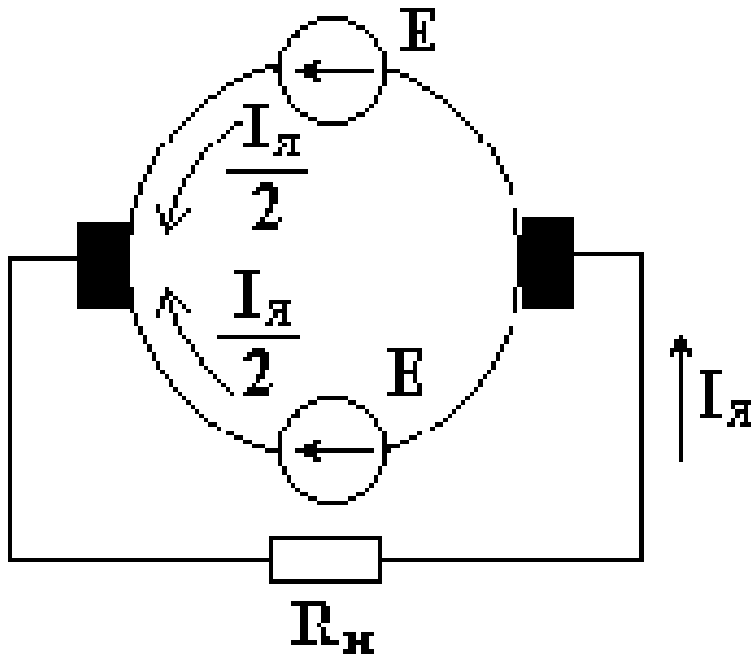
Если соединить все **проводники обмотки** по определенному правилу **последовательно**, то результирующая ЭДС якорной обмотки равна нулю, **ток в обмотке отсутствует**. Контактные щетки делят якорную обмотку на две **параллельные ветви**. В верхней параллельной ветви индуцируется ЭДС **одного направления**, в нижней - **противоположного направления**.



Если установить щетки на ГН, то между ними будут находиться проводники с одинаково направленными ЭДС, сумма которых **максимальна и постоянна**.

Схема замещения якорной обмотки

При подключении к ОЯ сопротивления $\frac{I_{\text{я}}}{2}$ в **параллельных ветвях** возникают одинаковые токи $\frac{I_{\text{я}}}{2}$, через сопротивление протекает ток $I_{\text{я}}$.

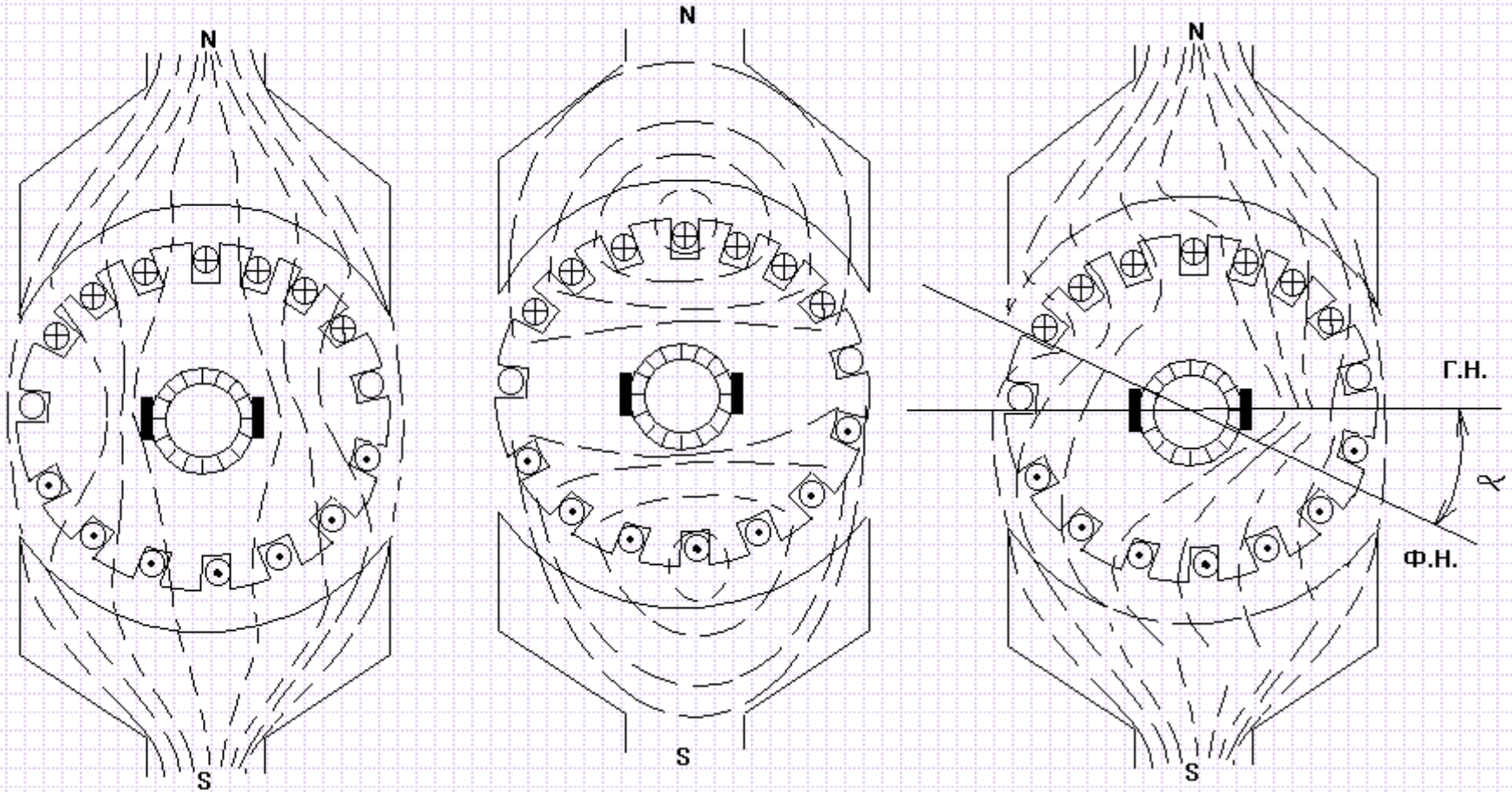


В двигателе щетки и коллектор производят **переключение направления тока** при переходе проводника из области одного полюса в область другого полюса, обеспечивая неизменное направление вращающего момента.

Реакция якоря - воздействие магнитного потока обмотки якоря на магнитный поток возбуждения. При нагрузке машины поле якоря накладывается на основное поле и искажает его.

Последствия: ФН смещается по отношению к ГН и между щетками оказываются несколько секции, направление в которых будет противоположно направлению ЭДС остальных секций.

Реакция якоря



поле возбуждения

якоря

результатирующее

- **Понижение напряжения (генератор);**
- **Изменение вращающего момента и частоты вращения (двигатель);**
- **Повышение напряжения между пластинами коллектора (30-50 В) – искрение; круговой огонь по коллектору.**

Способы устранения реакции якоря

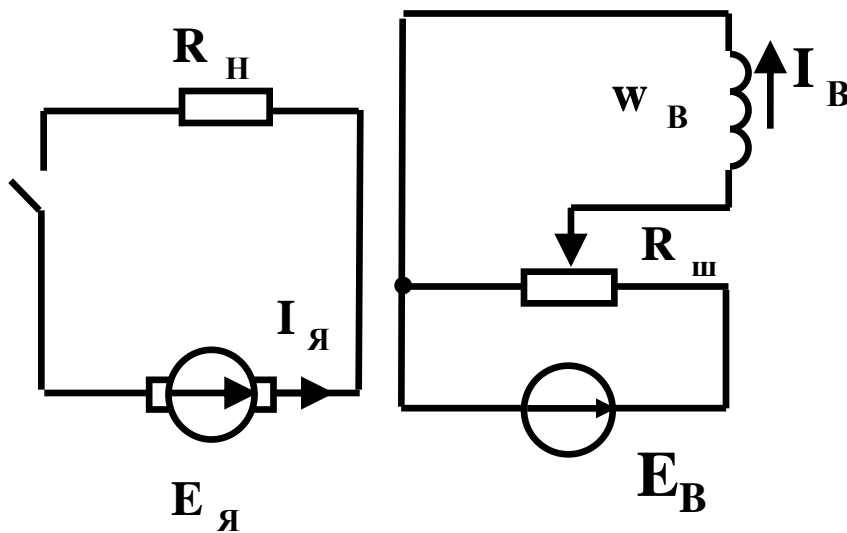
- **Настройка коммутации (под нагрузкой перемещая щетки добиваются совпадения ГН и ФН).**
- **Установка добавочных полюсов на ГН (их обмотки соединяются с ОЯ так, чтобы магнитное поле полюсов компенсировало поле якоря).**
- **Компенсационная обмотка, размещенная в полюсных наконечниках (соединяется последовательно с ОЯ).**
- **Увеличение воздушного зазора.**

Типы машин постоянного тока

- **независимого возбуждения** (ОВ подключается к постороннему источнику);
- **параллельного возбуждения** (ОВ подсоединяется параллельно ОЯ);
- **последовательного возбуждения** (ОВ подсоединяется последовательно ОЯ);
- **смешанного возбуждения** (на каждом полюсе две ОВ, которые могут включаться согласно или встречно).

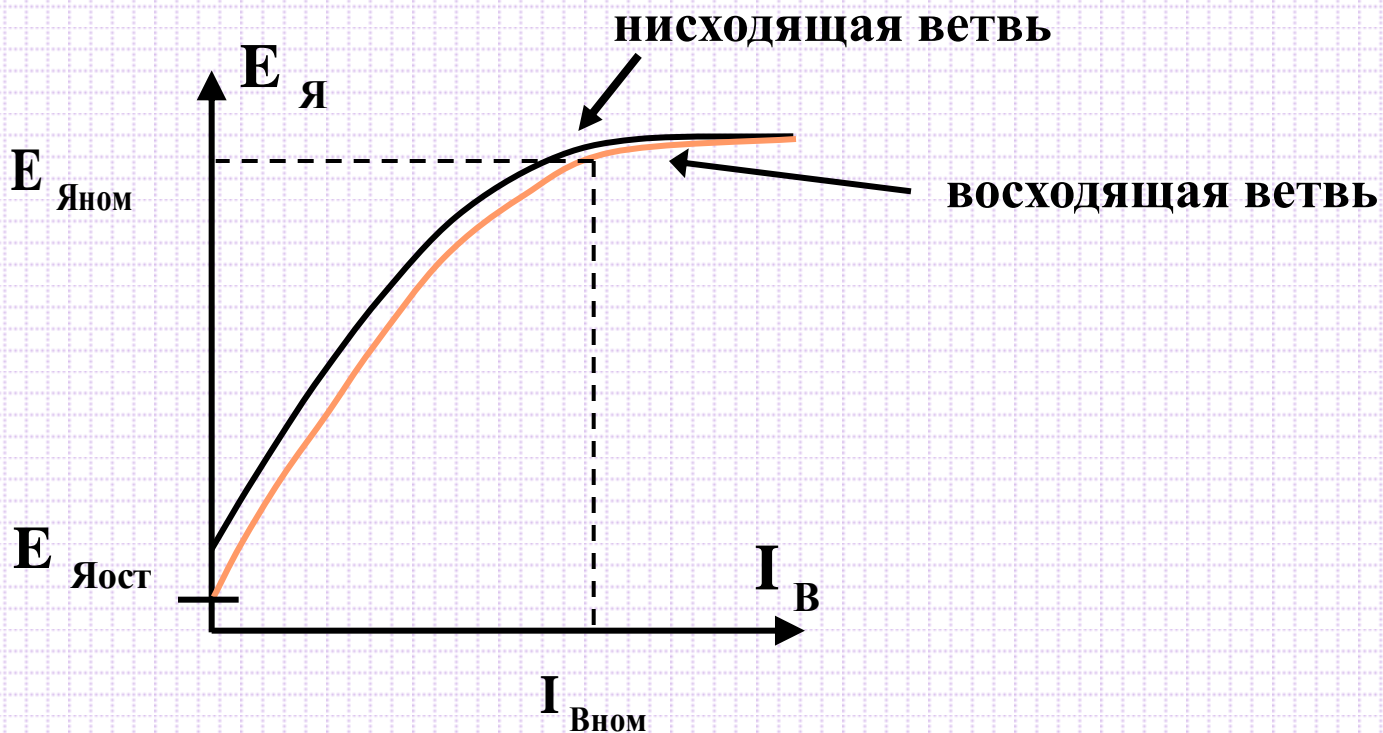
Генераторы постоянного тока

1. Генератор независимого возбуждения



Ток возбуждения не зависит от нагрузки, следовательно можно регулировать магнитный поток в широких пределах ($R_{\text{ш}}$)

Характеристика холостого хода



Снимается при разомкнутой цепи якоря ($I_{\text{я}}=0$) и постоянной частоте вращения n

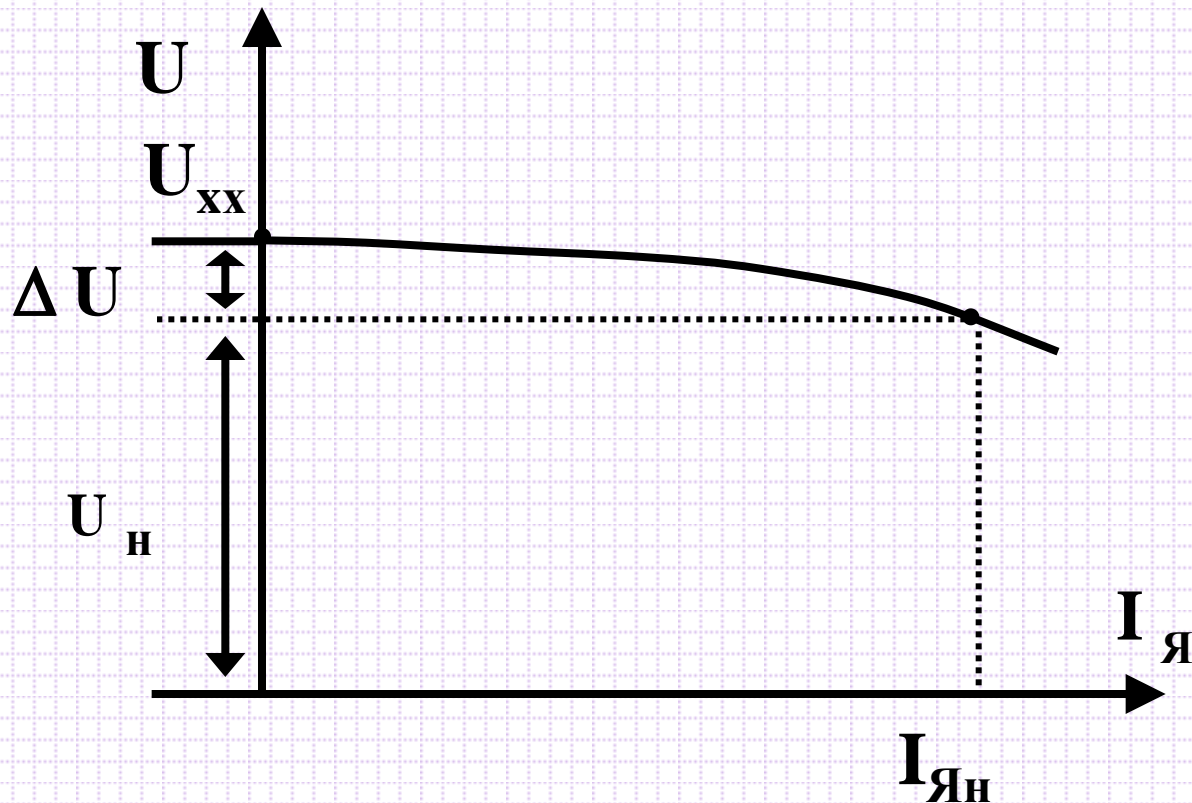
Внешняя характеристика $U(I_{\text{я}})$

Снимается при номинальном токе возбуждения и постоянной частоте вращения n

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

Напряжение на зажимах цепи якоря меньше ЭДС из-за падения напряжения на активном сопротивлении $R_{\text{я}}$.
Характеристика нелинейна из-за реакции якоря.

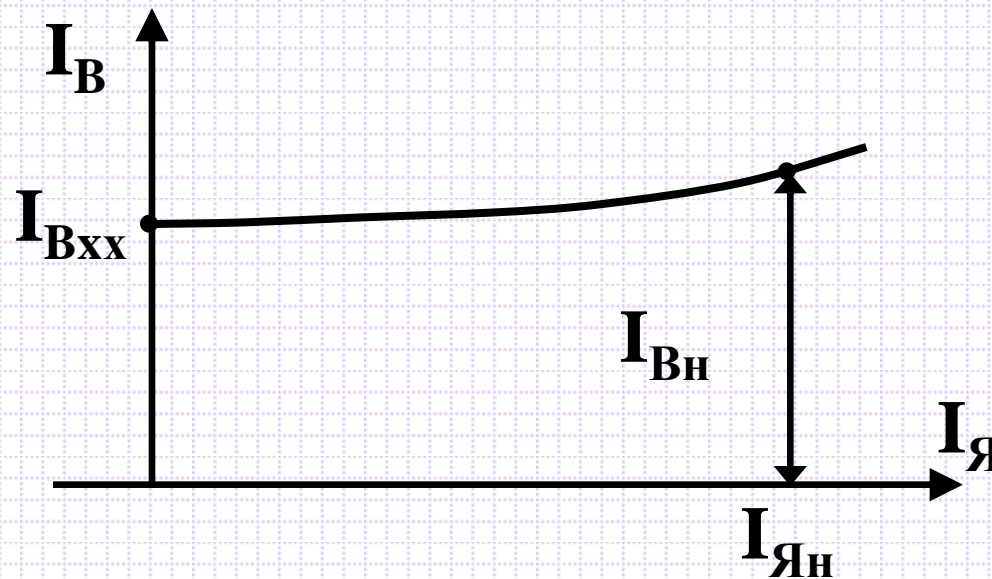
$$\Delta U = \frac{U_{\text{хх}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100 \% - \text{номинальное изменение напряжения (5-10\%)}$$



Если увеличивать ток якоря выше номинального, то ОЯ, щетки и коллектор начнут перегреваться, а под щетками начнется сильное искрение.

Регулировочная характеристика $I_B(I_A)$

Снимается при постоянном напряжении и частоте вращения

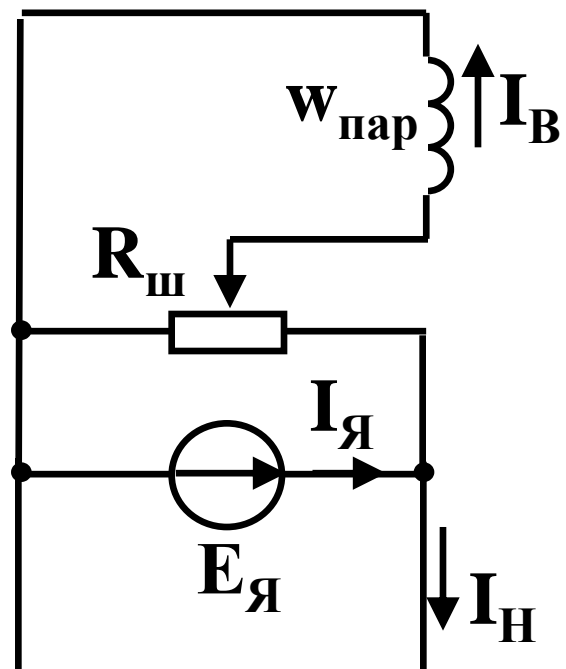


2. Генератор параллельного возбуждения

Часть тока якоря служит для возбуждения главного магнитного поля машины. Применяются наиболее часто. Напряжение мало изменяется из-за колебаний нагрузки.

$$I_{\text{в}} \ll I_{\text{я}}$$

ОВ имеет большее число витков тонкого провода и обладает значительным сопротивлением



Самовозбуждение

$$\Phi_{\text{ост}} \Rightarrow E_{\text{яост}} \Rightarrow I_{\text{в}} \Rightarrow I_{\text{в}} W_{\text{пар}}$$

МДС должна быть направлена согласно по отношению к $\Phi_{\text{ост}}$, т.е. подмагничивать его. При таком соединении $I_{\text{в}}$ усиливает магнитное поле машины.

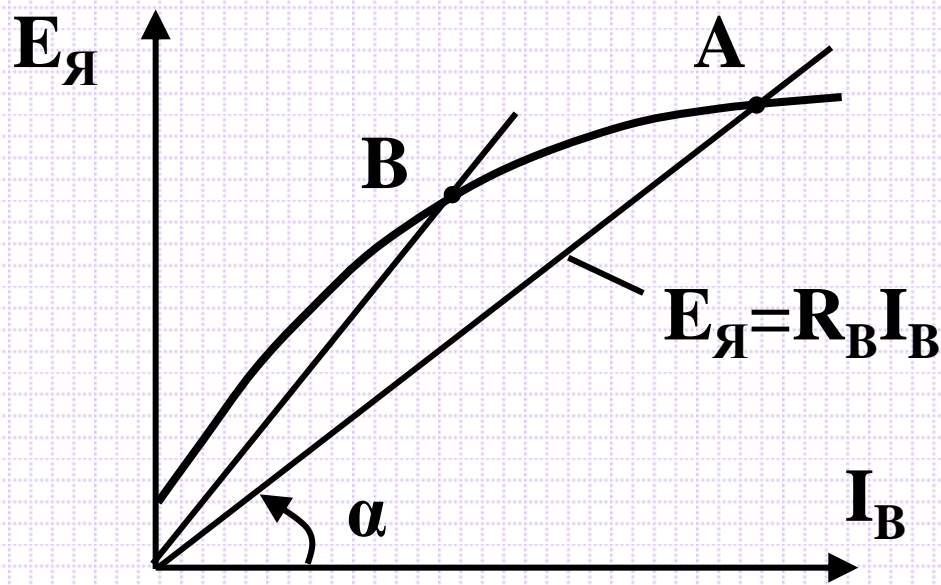
$$\Phi \uparrow \Rightarrow E_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow I_{\text{в}} \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$$

Увеличение тока возбуждения и потока ограничивается насыщением магнитной цепи.

Условия самовозбуждения

- **наличие остаточного магнитного потока;**
- **согласное включение ОВ и ОЯ;**
- **сопротивление ОВ должно быть меньше критического.**

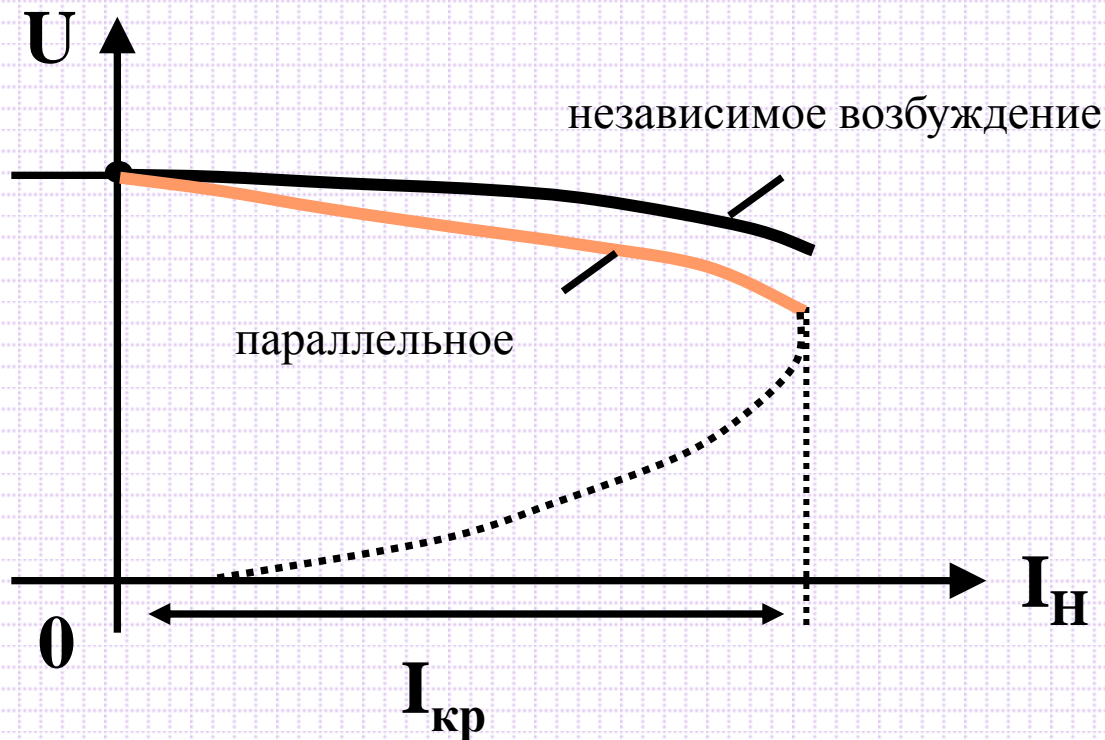
Характеристика холостого хода



Установившийся ток возбуждения определяется из условия:

$$E_{я} = R_{в} I_{в}$$

Внешняя характеристика



Ток якоря, при котором машина переходит в условия саморазмагничивания, называется критическим. Его значение больше номинального в 2-2,5 раза.

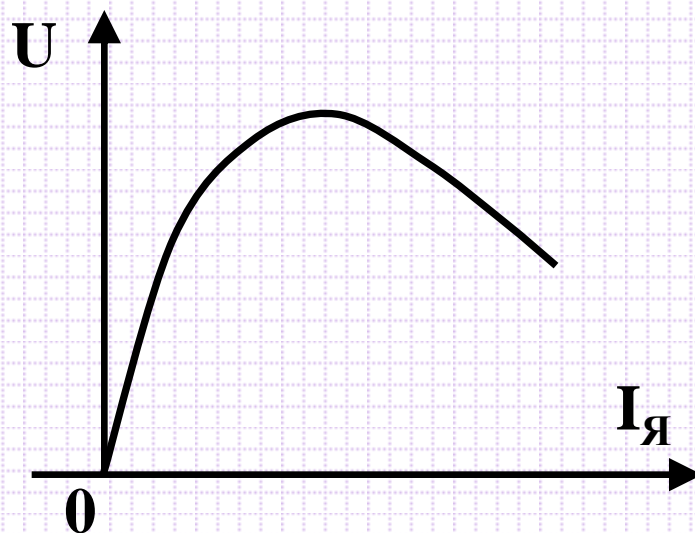
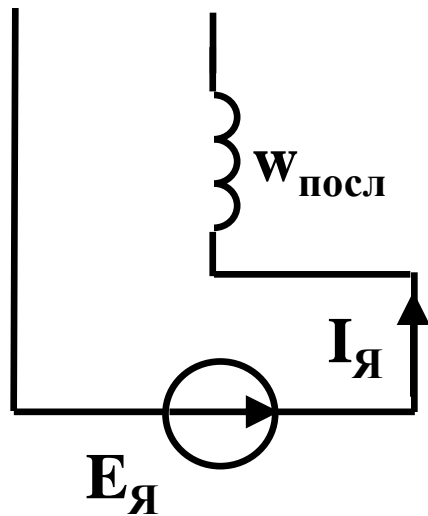
Причины падения напряжения

- Увеличение падения напряжения в ОЯ.
- Реакция якоря.
- Уменьшение силы тока возбуждения.

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}$$

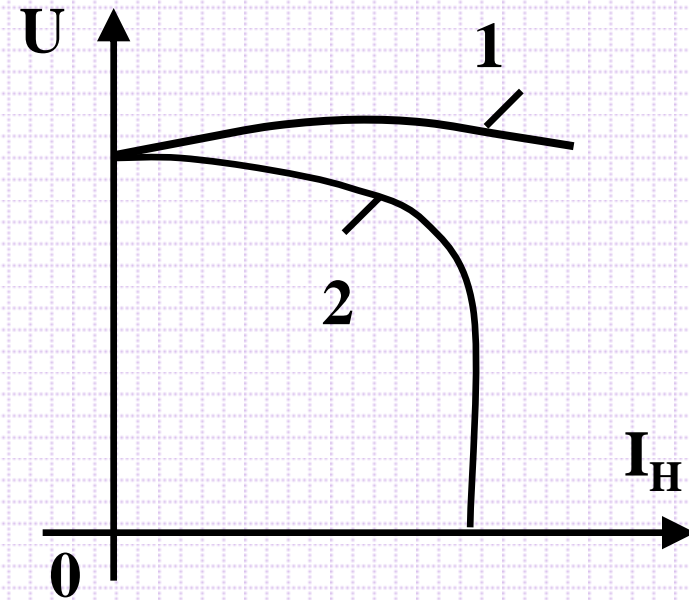
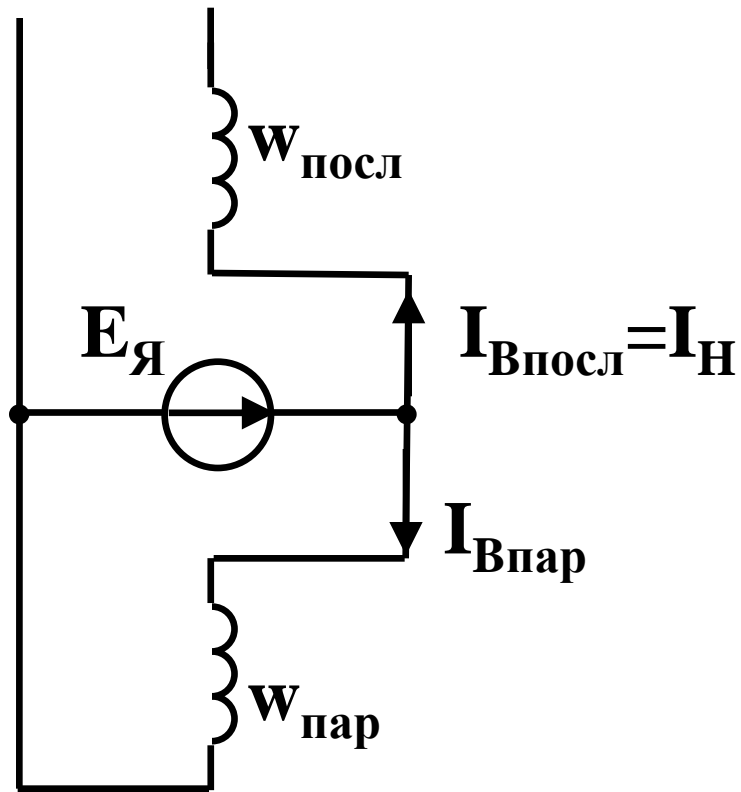
Регулировочная характеристика как у генератора независимого возбуждения.

3. Генератор последовательного возбуждения



Ток нагрузки является током возбуждения. При ХХ ЭДС индуктируется только $\Phi_{\text{ост}}$, поэтому нельзя снять характеристику ХХ и регулировочную.

4. Генератор смешанного возбуждения



- 1- согласное включение
- 2- встречное включение
(электродуговая сварка)

Если обмотки возбуждения включить **согласно**, их магнитные потоки будут складываться. В этом случае ЭДС от $\Phi_{\text{посл}}$ компенсирует падение напряжения в ОЯ и уменьшение ЭДС от снижения тока возбуждения. При **встречном** включении напряжение резко падает.

Пуск двигателя

- **прямой**, при котором ОЯ подключается прямо к сети;
- **реостатный** с помощью пускового реостата, который включается последовательно в цепь якоря;
- **при пониженном напряжении**, подводимом к якорю.

Прямой пуск

$E_{я} = 0, n = 0, I_{пуск} = (10-30)\% I_{ном.}$

Такой ток вызывает искрение на коллекторе, большой пусковой момент, удар по валу.

Прямой пуск – для двигателей до 1 кВт, у которых сопротивление якоря относительно велико, а время разгона меньше 1 сек. В этом случае обмотка якоря не успевает нагреться, и толчок момента оказывается сравнительно небольшим.

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я}}$$

$$I_{пуск} = \frac{U_{н}}{R_{я}} \approx (10 \div 30\%) I_{н}$$

Реостатный пуск

В цепь якоря включают пусковой реостат, сопротивление которого выбирают с таким расчетом, чтобы пусковой ток не превышал $(2-2,5)I_{ном}$.

По мере увеличения частоты вращения двигателя пусковой реостат выводят.

Пуск при пониженном напряжении

Пониженное напряжение подводится к якорю от источника с регулируемым напряжением, например в системах генератор-двигатель.

Применяется для двигателей большой мощности, т.к. пусковой реостат в таких двигателях вызывает значительные потери энергии.

Среди всех электродвигателей ДПТ имеют лучшие пусковые качества.

$$I_{\text{пуск}} = (2 \div 2,5) I_{\text{НОМ}}$$

$$M_{\text{пуск}} = (2,5 \div 4) M_{\text{НОМ}}$$

Способы регулирования частоты вращения

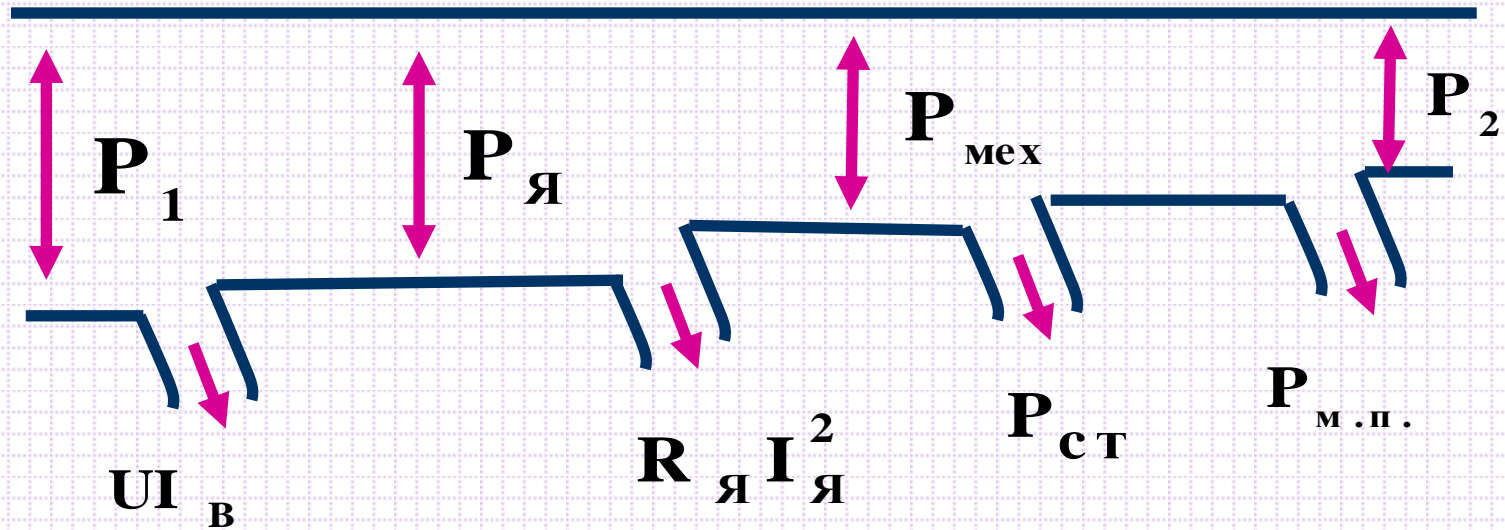
- **реостатный** — изменение суммарного сопротивления цепи якоря;
- **полюсной** — изменение магнитного потока полюсов;
- **якорный** — изменение напряжения, подводимого к якорю

Особенности применения ДПТ

- Двигатели независимого и параллельного возбуждения – «жесткая» характеристика (станки, прокатные станы, вентиляторы и т.д.).
- Двигатели последовательного возбуждения – «мягкая» характеристика. Применяются в устройствах, где требуются большие пусковые моменты, и наблюдаются частые перегрузки по моменту (трамваи, троллейбусы, электровозы).

Потери энергии в МПТ

Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения



P_1 – мощность, подведенная из сети;

UI_B – мощность потерь в ОБ (несколько %);

$P_{я}$ – мощность, передаваемая в ОЯ;

$R_{я} I_{я}^2$ – электрические потери в ОЯ;

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ЭМ}} = E_{я} I_{я} = M_{\text{вр}} \cdot \Omega -$$

механическая мощность,

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}, [\text{рад} / \text{с}] -$$

механическая угловая скорость вращения якоря;

$P_{ст}$ – мощность потерь на гистерезис и вихревые токи в якоре (потери в стали);

$P_{м.п.}$ – механические потери на трение в подшипниках, щеток на коллекторе.

Уравнение баланса мощностей цепи якоря двигателя

$$UI_{я} = E_{я}I_{я} + I_{я}^2 R_{я}$$

Электрическая
мощность

Электромагнитная
мощность

Потери в меди

Способы торможения

Рекуперативное торможение

РТ происходит, когда у машины, подключенной к сети, частота вращения превысит частоту вращения при идеальном ХХ

При этом $E_{\text{я}} > U$  $I_{\text{я}}$ и M изменяют направление



будет создаваться тормозной момент

Машина начинает работать генератором параллельно с сетью, в которую она отдает энергию.

РТ не приводит к остановке якоря, а лишь ограничивает частоту вращения.

Торможение противовключением

Обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположном направлении.

Торможение осуществляется путем изменения полярности подводимого к якорю напряжения.

Так как после переключения полярность напряжения изменилась, то $I_{я}$ может приобрести недопустимо большое значение, и для его ограничения в цепь якоря включают резистор с сопротивлением в 2 раза превышающем максимальное сопротивление пускового реостата.