

*Машины
постоянного тока*

Назначение и области применения МПТ



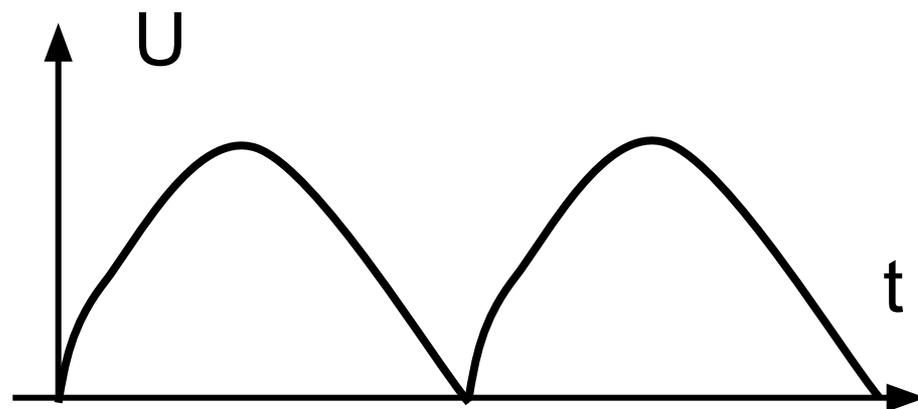
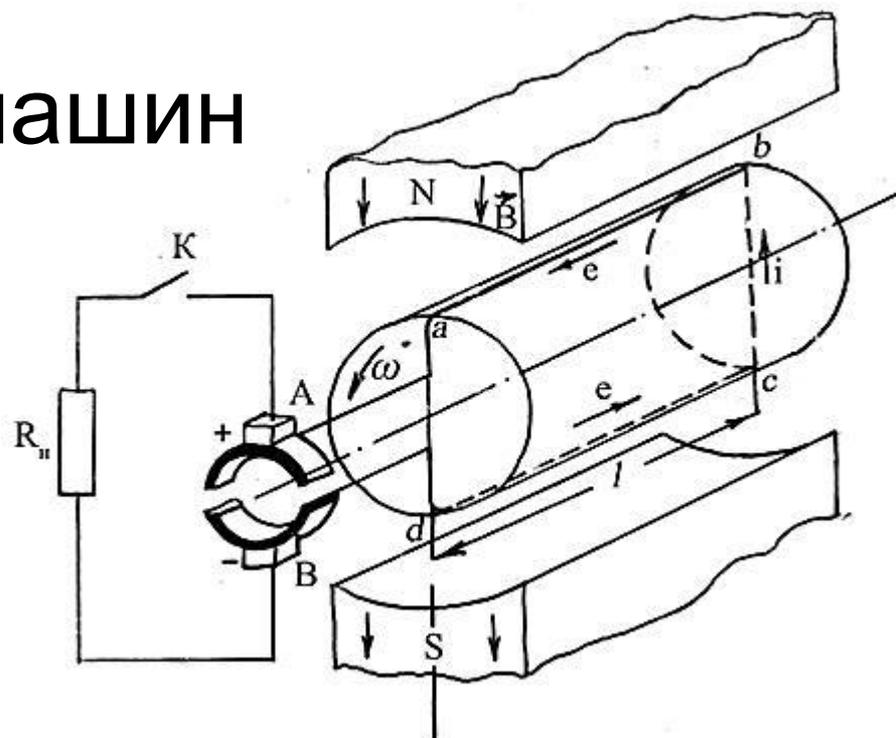
Как звенья САР; усилители электрических сигналов управления; тахогенераторы; питания электролитических ванн; зарядки аккумуляторов; высококачественной сварки; входят в состав металлургического, автомобильного, судового и самолетного электрооборудования.

Принцип действия машин постоянного тока

Возьмем устройство, состоящее из двух магнитных полюсов создающих постоянное магнитное поле, и якоря – стального цилиндра с уложенным на нем витком из электропроводного материала.

Концы витка присоединены к двум металлическим полукольцам, изолированным друг от друга и от вала.

Полукольца соприкасаются с неподвижными щетками, соединенными с внешней цепью



Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей: **неподвижной** части (**индуктора**) и **вращающейся** части (**якоря с барабанной обмоткой**).

На рисунке изображена конструктивная схема машины постоянного тока:

Якорь состоит из следующих элементов: сердечника 3, обмотки 4, уложенной в пазы сердечника, коллектора 5.

Сердечник якоря для уменьшения потерь на вихревые точки набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

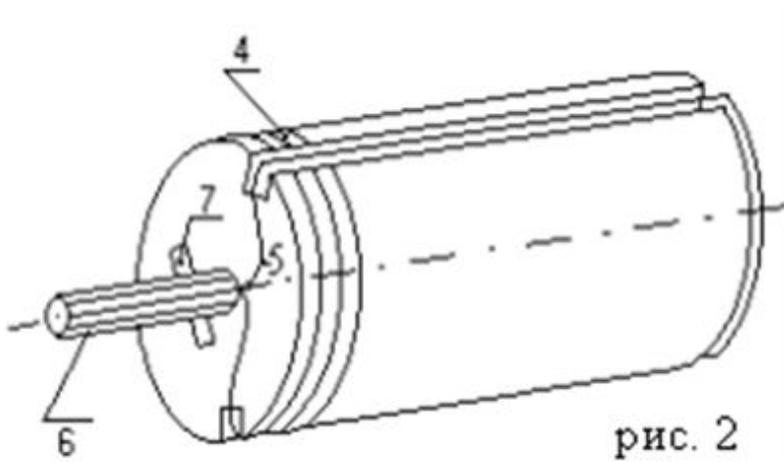
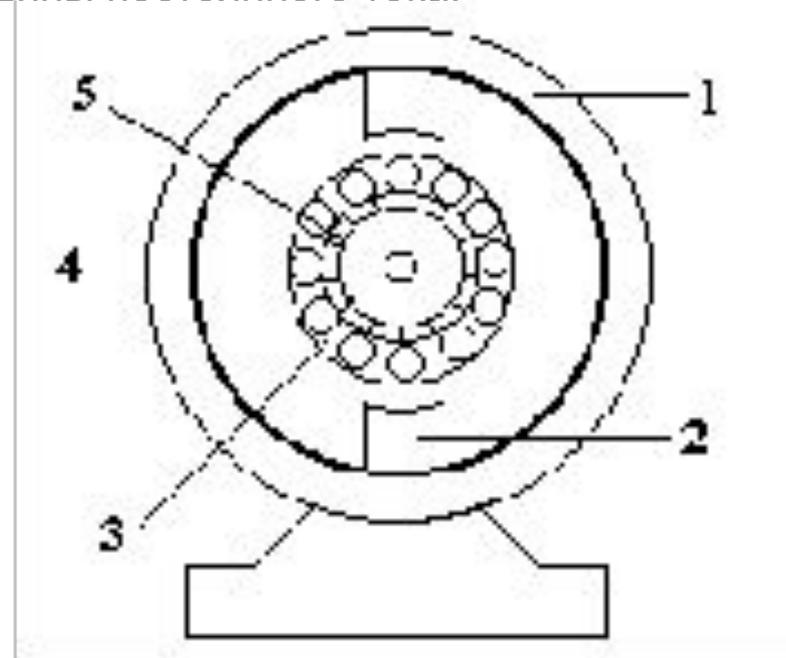
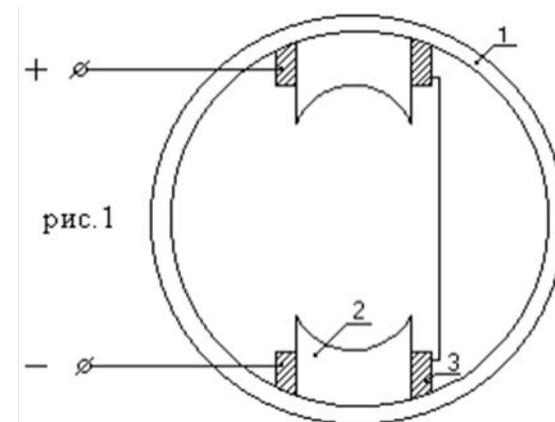
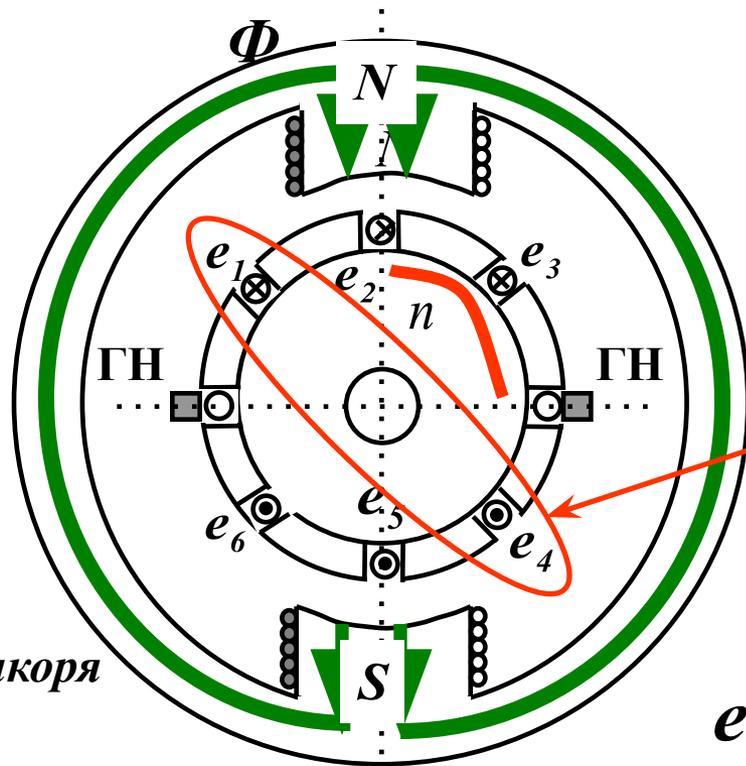


рис. 2



Принцип действия МПТ



параллельные ветви

длина проводника

$$I = \frac{I_{\text{я}}}{2a}$$

число параллельных ветвей

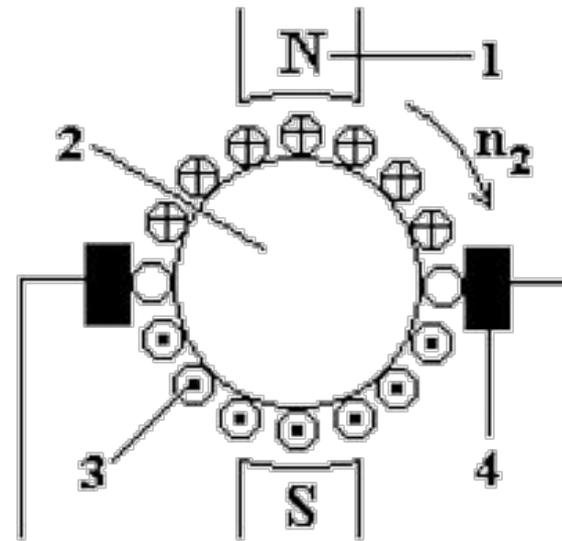
$$e = B_n \cdot l \cdot v \quad (1)$$

магнитная индукция в воздушном зазоре

Принцип действия машины постоянного тока

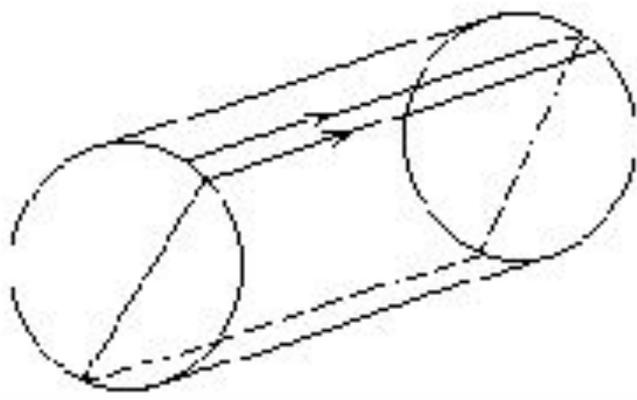
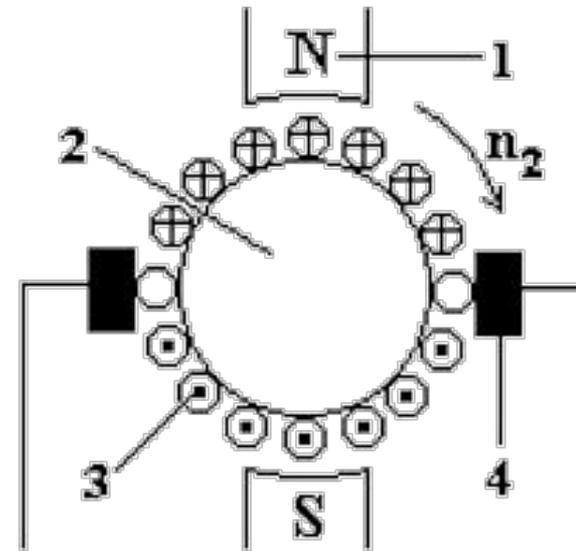
Рассмотрим работу машины постоянного тока на представленной модели:

- 1 – полюсы индуктора,
- 2 - якорь,
- 3 - проводники,
- 4 - контактные щетки.



Проводники якорной обмотки расположены на поверхности якоря. Очистим внешние поверхности проводников от изоляции и наложим на проводники неподвижные контактные щетки. Контактные щетки размещены на линии геометрической нейтрали, проведенной посередине между полюсами.

На рисунке крестиком обозначены ЭДС, направленные от нас, точками - ЭДС, направленные к нам.

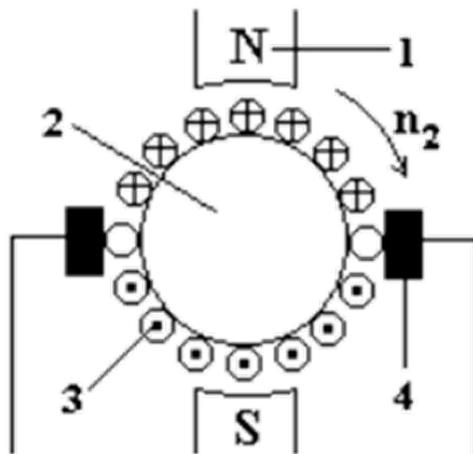
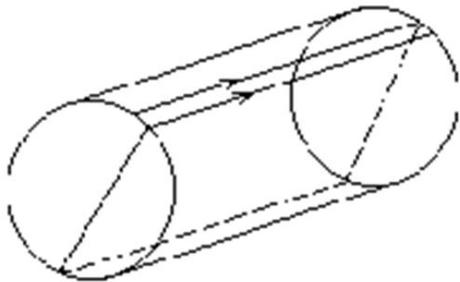


Соединим проводники между собой так, чтобы ЭДС в них складывались. Для этого соединяют последовательно конец проводника, расположенного в зоне одного полюса с концом проводника, расположенного в зоне полюса противоположной полярности.

Два проводника, соединенные последовательно, образуют один виток или одну катушку.

ЭДС проводников, расположенных в зоне одного полюса, различны по величине.

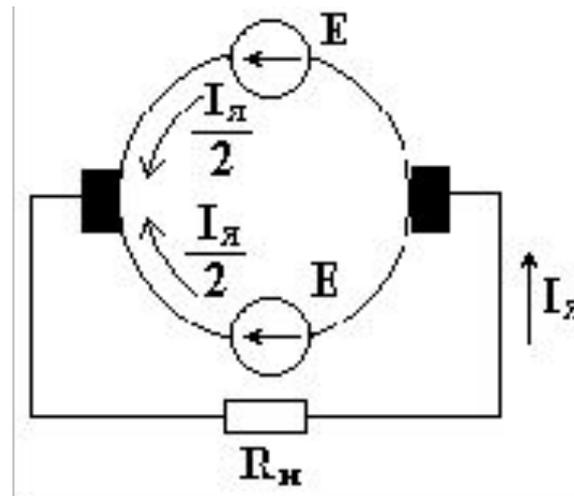
Наибольшая ЭДС индуцируется в проводнике, расположенном под серединой полюса, **ЭДС, равная нулю**, - в проводнике, расположенном на линии геометрической нейтрали.



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 параллельной ветви - противоположного направления. ЭДС, снимаемая контактными щетками, равна сумме электродвижущих сил проводников, расположенных между щетками.

На рисунке представлена схема замещения якорной обмотки:



В параллельных ветвях действуют одинаковые ЭДС, направленные встречно друг другу.

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

ЭДС якорной обмотки пропорциональна частоте вращения якоря n_2 и магнитному потоку индуктора Φ :

$$E = C_e \cdot n_2 \cdot \Phi$$

где - C_e константа.

В реальных электрических машинах постоянного тока используется специальное контактное устройство - коллектор.

Коллектор устанавливается на одном валу с сердечником якоря и состоит из отдельных изолированных друг от друга и от вала якоря медных пластин.

Каждая из пластин соединена с одним или несколькими проводниками якорной обмотки.

На коллектор накладываются неподвижные контактные щетки. С помощью контактных щеток вращающаяся якорная обмотка соединяется с сетью постоянного тока или с нагрузкой.

Принцип действия (конспект!!!!)

Принцип действия электрических машин постоянного тока (МПТ) основывается на взаимодействии постоянного магнитного поля и проводника с током, находящимся в этом поле.

Генераторы: Рамка вращается в магнитном поле постоянного магнита за счет энергии другого источника. В проводах рамки возникает э.д.с. и индукционный ток различного направления. Концы проводов рамки соединены с коллектором, с которого снимается через щетки ток постоянного направления (если включена нагрузка).

Двигатели: Через коллектор и щетки в рамку подается постоянный ток, который взаимодействует с постоянным магнитным полем машины и создает вращающий момент на валу машины.

Электрические машины постоянного тока взаимнообратимы, т.е. могут работать как режиме двигателя, так и генератора.

Преимущества МПТ

ГПТ

- Жесткая внешняя характеристика,
- Хорошие регулировочные свойства,
- Возможность использования в автоматических линиях

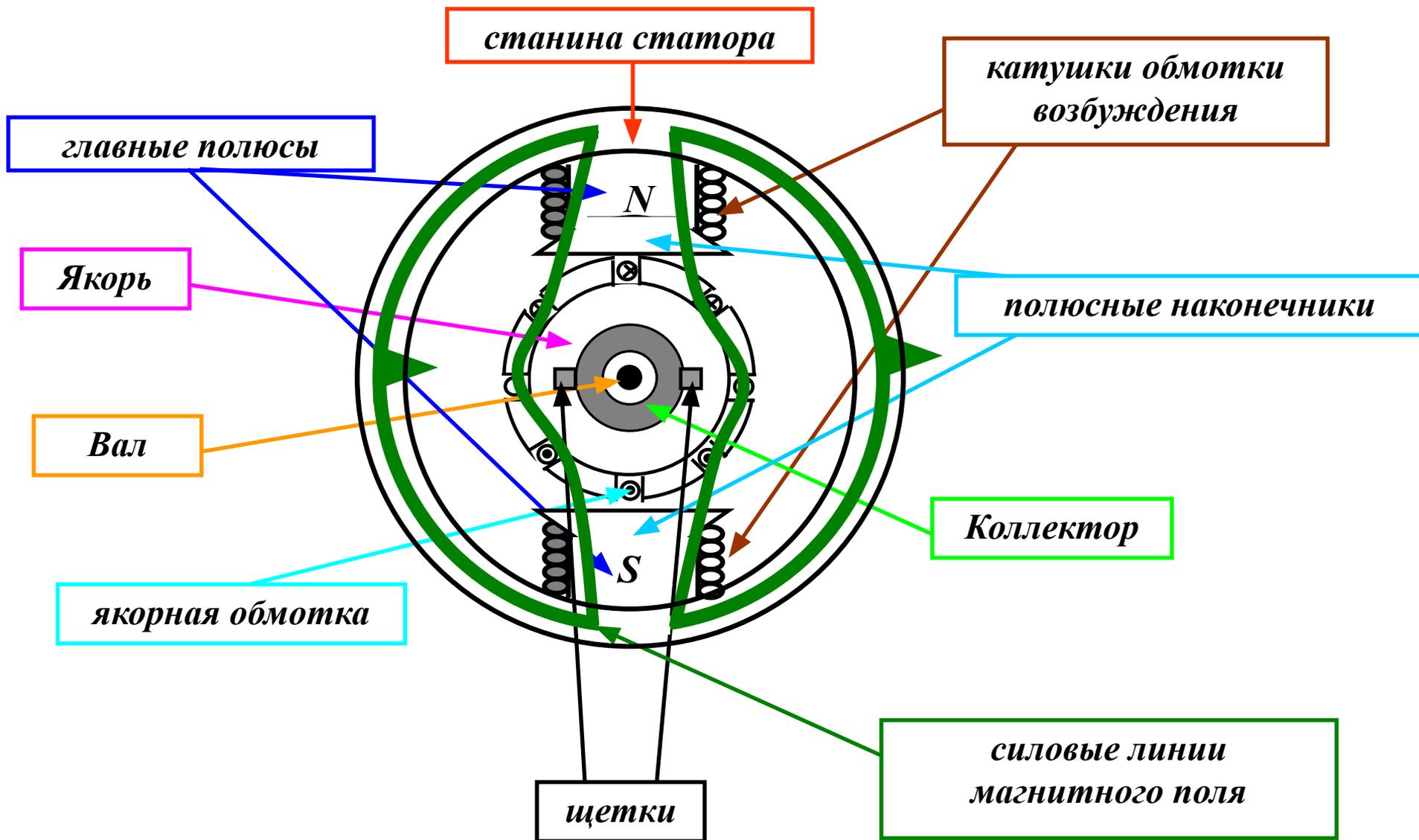
ДПТ

- Лучшие механические характеристики,
- Лучшие регулировочные свойства,
- Высокая перегрузочная способность

Общие недостатки МПТ

- Сложность конструкции,
- Невозможность работы в агрессивных средах,
- Необходимость частых ревизий,
- Меньший срок службы,
- Наличие радиопомех.

Устройство МПТ



Состав машин постоянного тока

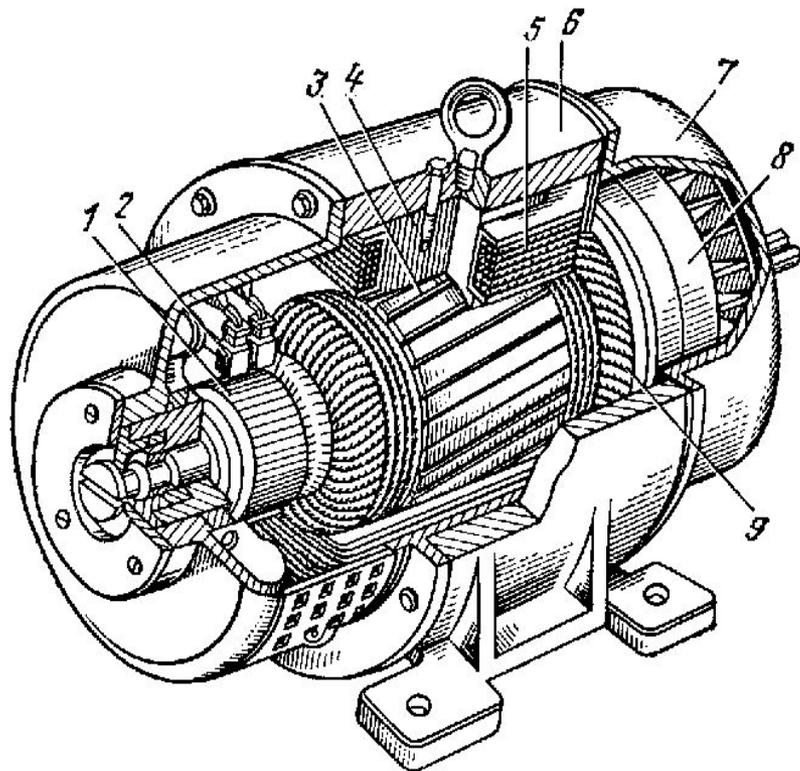
- **ИНДУКТОР**: корпус – станина, главные и вспомогательные полюса с полюсными наконечниками, обмотка возбуждения, помещенная на главные полюса.
- **ЯКОРЬ – РОТОР**: магнитопровод, обмотка якоря (секции)
- **КОЛЛЕКТОР**
- **ЩЕТКИ** (Щеточный узел)

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Устройство, принцип действия и области применения машин постоянного тока

Имеет неподвижную часть - **статор** и подвижную - **ротор**.

Рисунок 1.1 Машина постоянного тока:
1— коллектор, 2 — щетки, 3 — якорь,
4— полюс, 5 — обмотка возбуждения,
6 — корпус, 7 — подшипниковые щиты,
8 — вентилятор, 9 — обмотка якоря



Статор включает в себя корпус 6, к корпусу крепятся полюсы 4, подшипниковые щиты 7 и лапы для крепления машины к фундаменту. Корпус, являющийся частью магнитопровода, называется **станиной**. Т.к. $\Phi = \text{const}$, станина - из цельнометаллической трубы.

Сердечники полюсов - из пластин электро-технической стали, изолированных между собой. Полюсы - главные и дополнительные. **Главные** — для создания основного Φ . Для этого на полюс устанавливается катушка из обмоточного провода (обмотка возбуждения). **Дополнительные** полюсы - для улучшения коммутации.

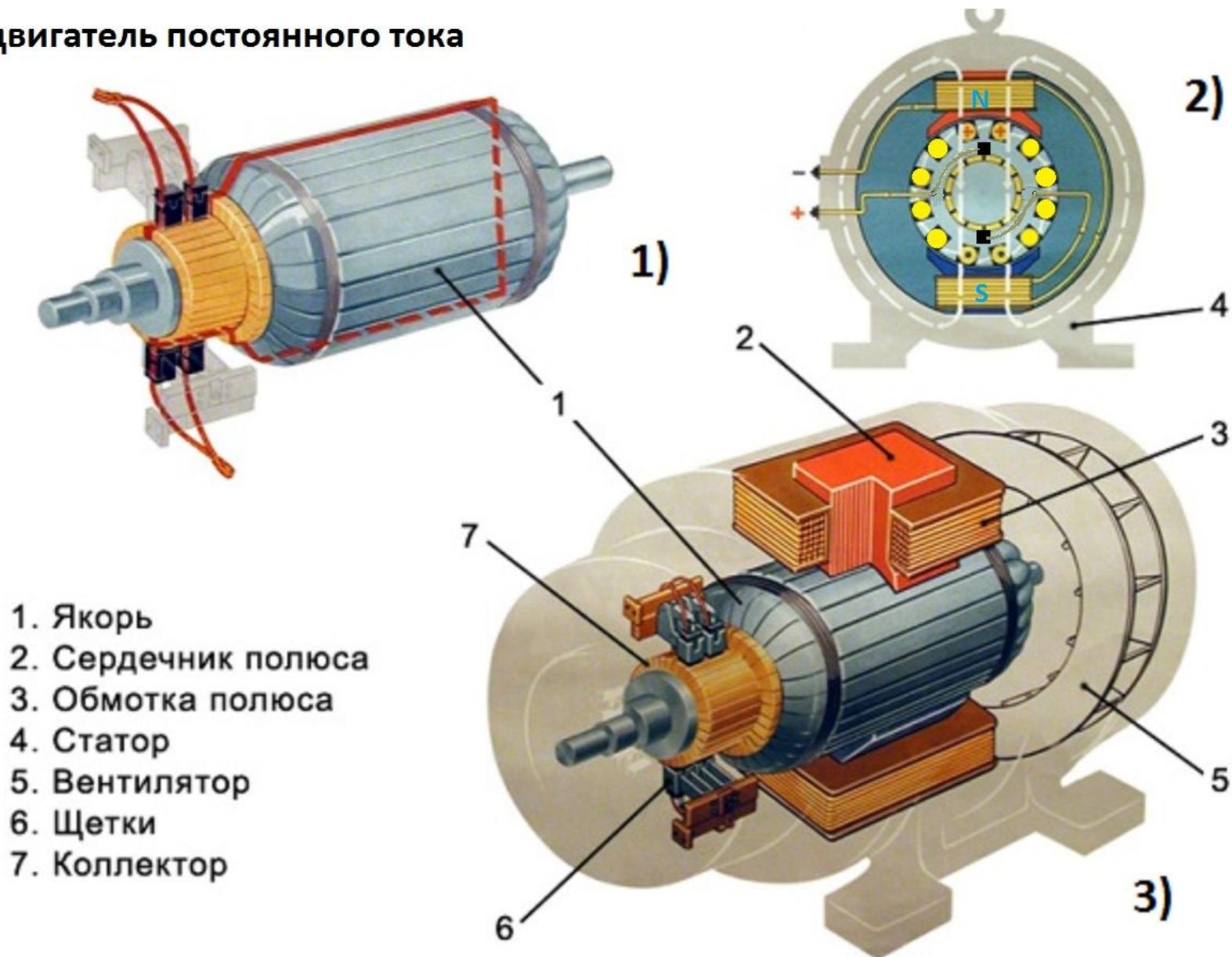
Ротор является якорем и состоит из вала, сердечника с обмоткой 9, коллектора 1 и вентилятора 8.

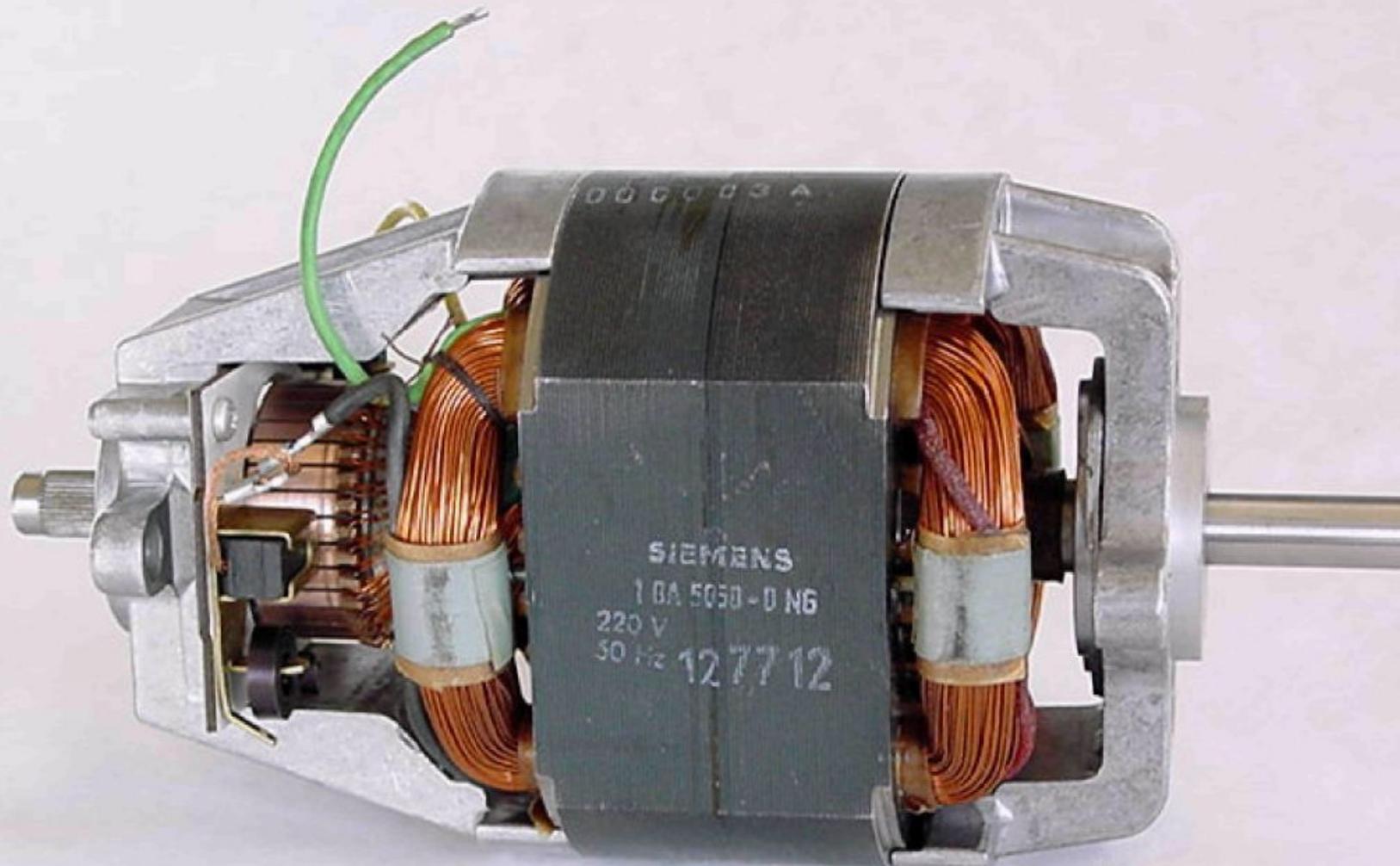
Сердечник якоря - из пластин электротехнической стали – напрессовывают на вал. В сердечнике якоря выштампованы пазы, в которых укладывается *обмотка якоря* (из обмоточного провода). Концы секции обмоток электрически соединены с коллекторными пластинами.

Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин *твердотянутой меди*, изолированных между собой и валом. Крепление пластин осуществляется корпусными шайбами с изоляционными миканитовыми прокладками или с помощью пластмассы.

- **Вал** машины устанавливается в подшипниках.
- Для охлаждения используется **система вентиляции**. В машинах малой и средней мощности обычно используют *вентилятор*, который крепится на валу машины и закрывается кожухом из металла.
- Выводы обмоток идут в клеммную коробку, которая закреплена на станине.

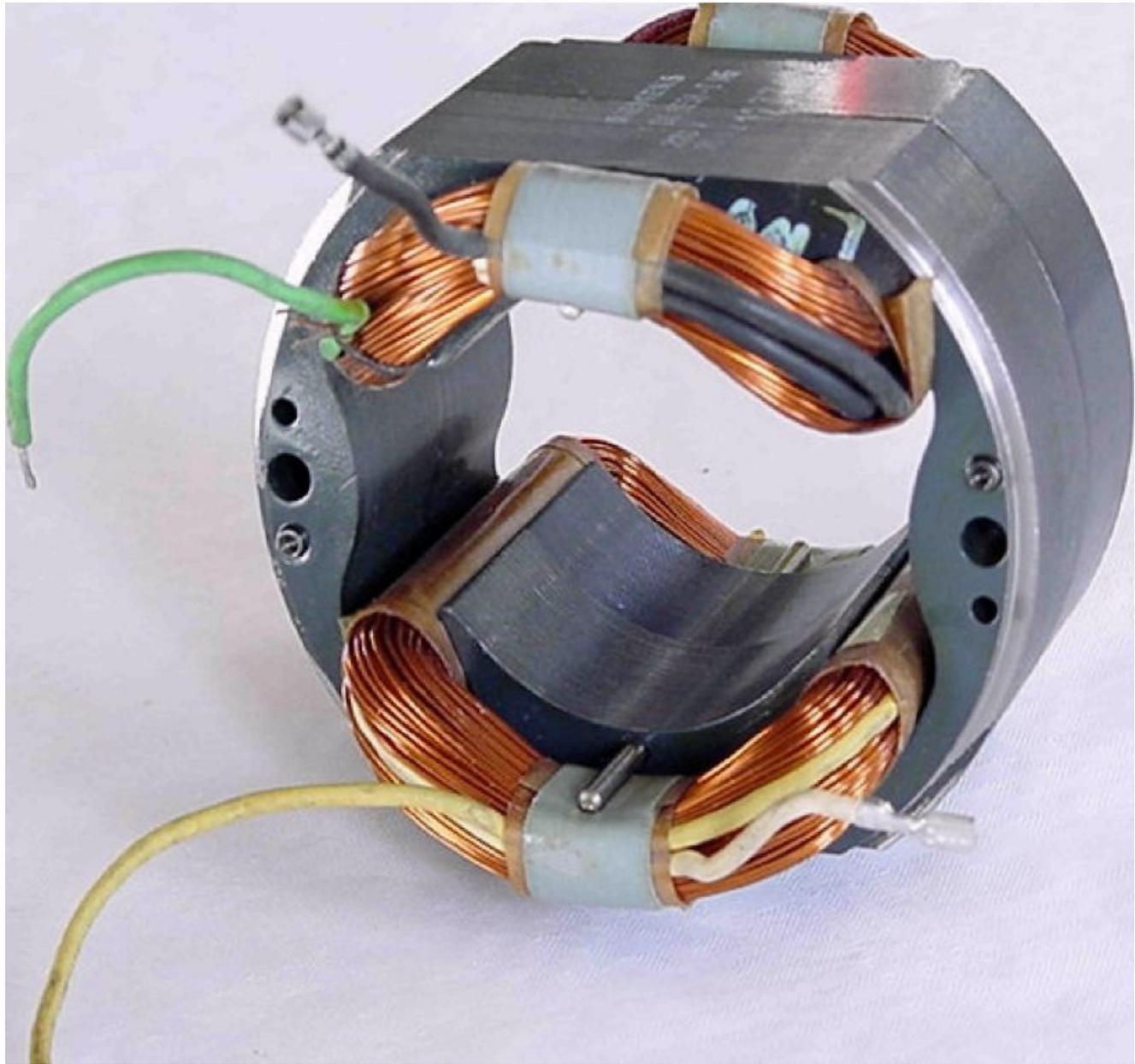
двигатель постоянного тока

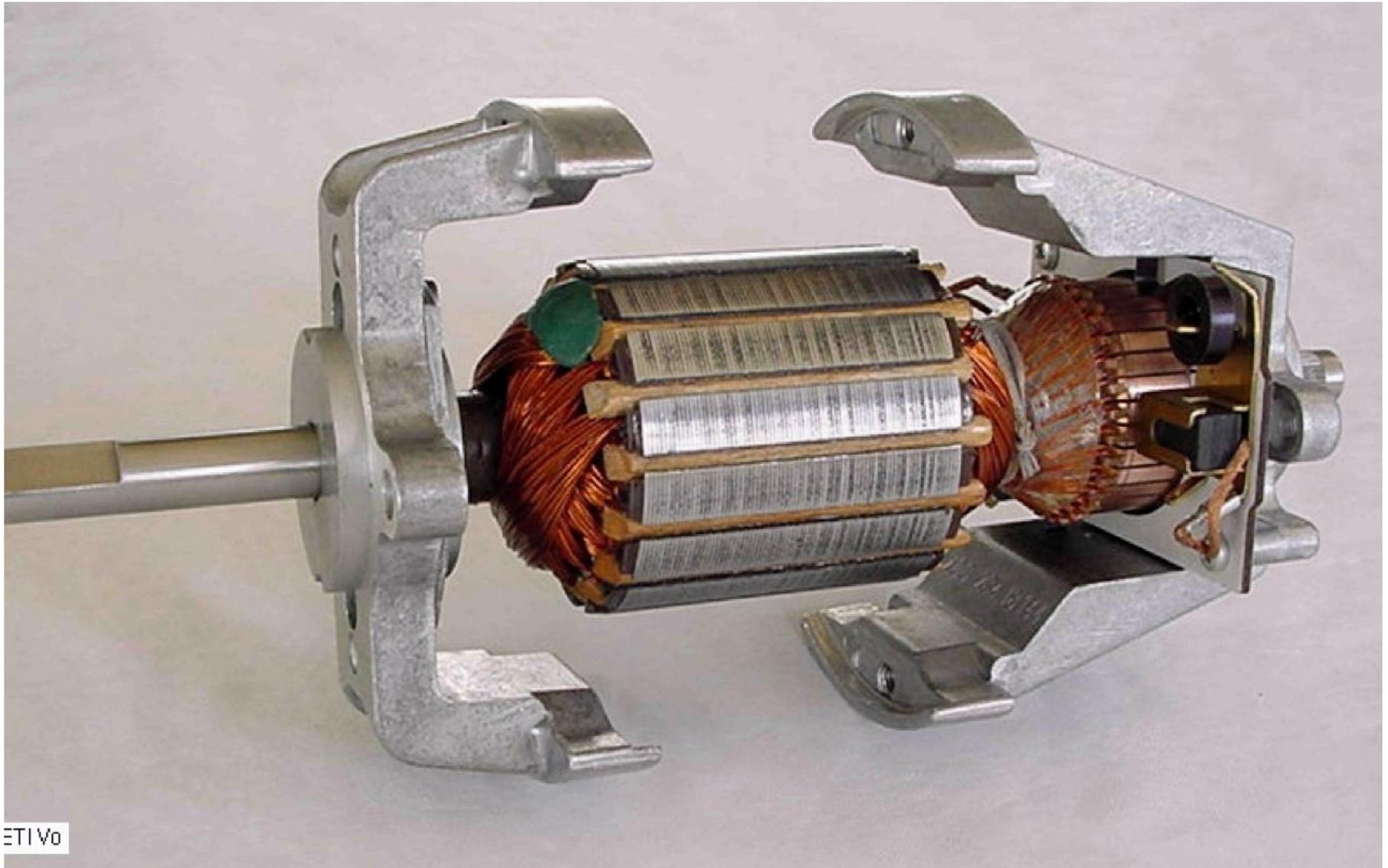


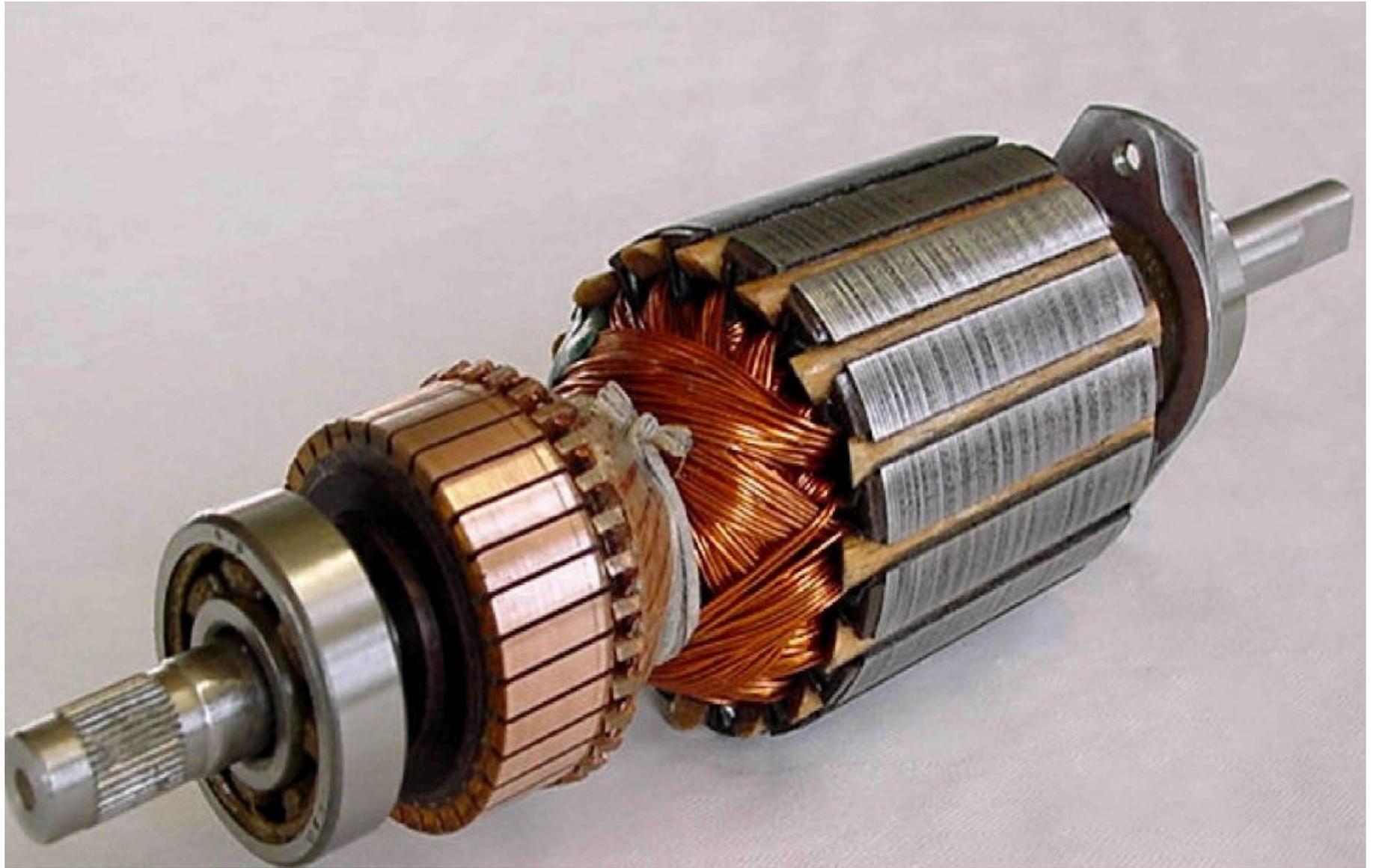


000003A

SIEMENS
1 BA 5050-D NG
220 V
50 Hz 127712







Работа электрической машины постоянного тока в режиме генератора

Любая электрическая машина обладает свойством обратимости, т.е. может работать в режиме генератора или двигателя.

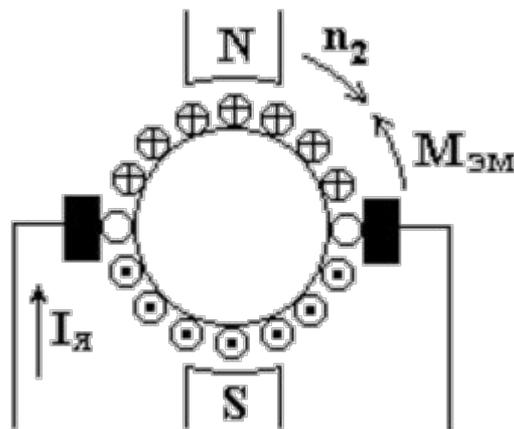
Если к зажимам приведенного во вращение якоря генератора присоединить сопротивление нагрузки, то под действием ЭДС якорной обмотки в цепи возникает ток.

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

где U - напряжение на зажимах генератора; $R_{\text{я}}$ - сопротивление обмотки якоря.

- $U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$ - основное уравнение генератора.
С появлением тока в проводниках обмотки возникнут электромагнитные силы

На рисунке схематично изображен генератор постоянного тока, показаны направления токов в проводниках якорной обмотки.



Воспользовавшись правилом левой руки, видим, что электромагнитные силы создают электромагнитный момент, препятствующий вращению якоря генератора.

Чтобы машина работала в качестве генератора, необходимо первичным двигателем вращать ее якорь, преодолевая тормозной электромагнитный момент.

- Сумма ЭДС всех проводников одной параллельной ветви обмотки якоря определяет ЭДС якоря

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n$$

- где $c_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$ - постоянный коэффициент

p – число пар полюсов,

N – число проводников обмотки якоря,

a – число пар параллельных ветвей

- Электромагнитная мощность генератора

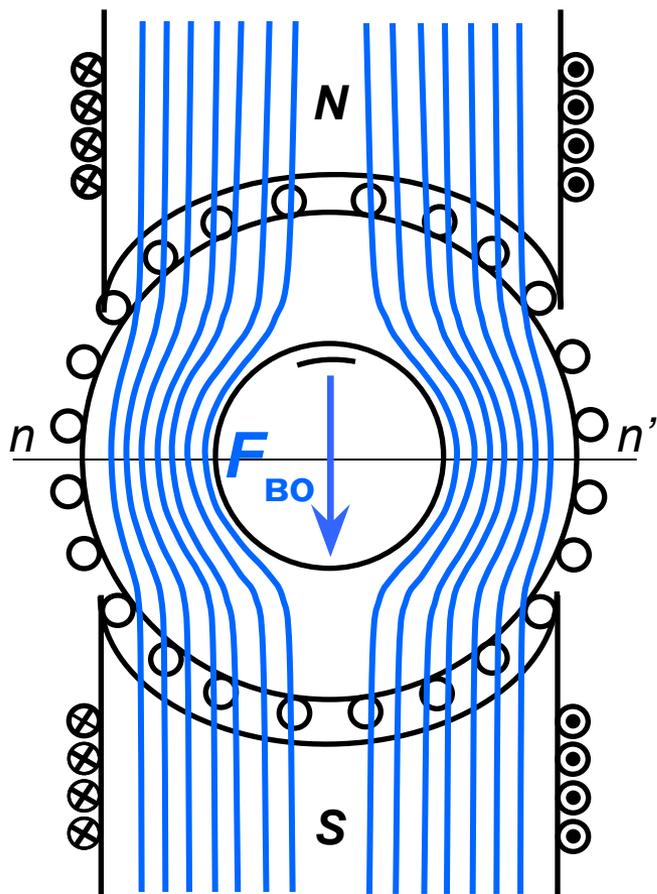
$$P_{\text{ЭМ}} = E \cdot I_{\text{я}}$$

- Мощность электрической энергии, снимаемой с его зажимов

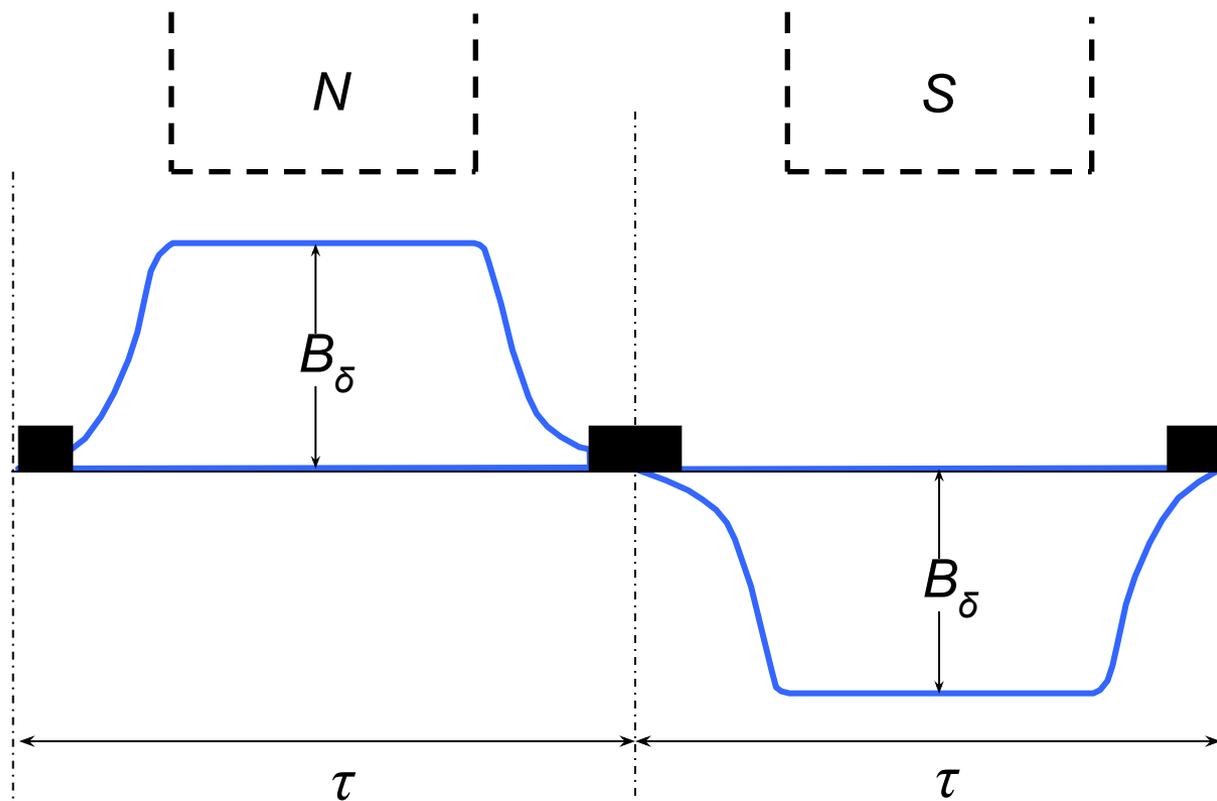
$$P_2 = U \cdot I_{\text{я}}$$

Реакция якоря машины постоянного тока

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



$$I_{\text{я}}=0$$

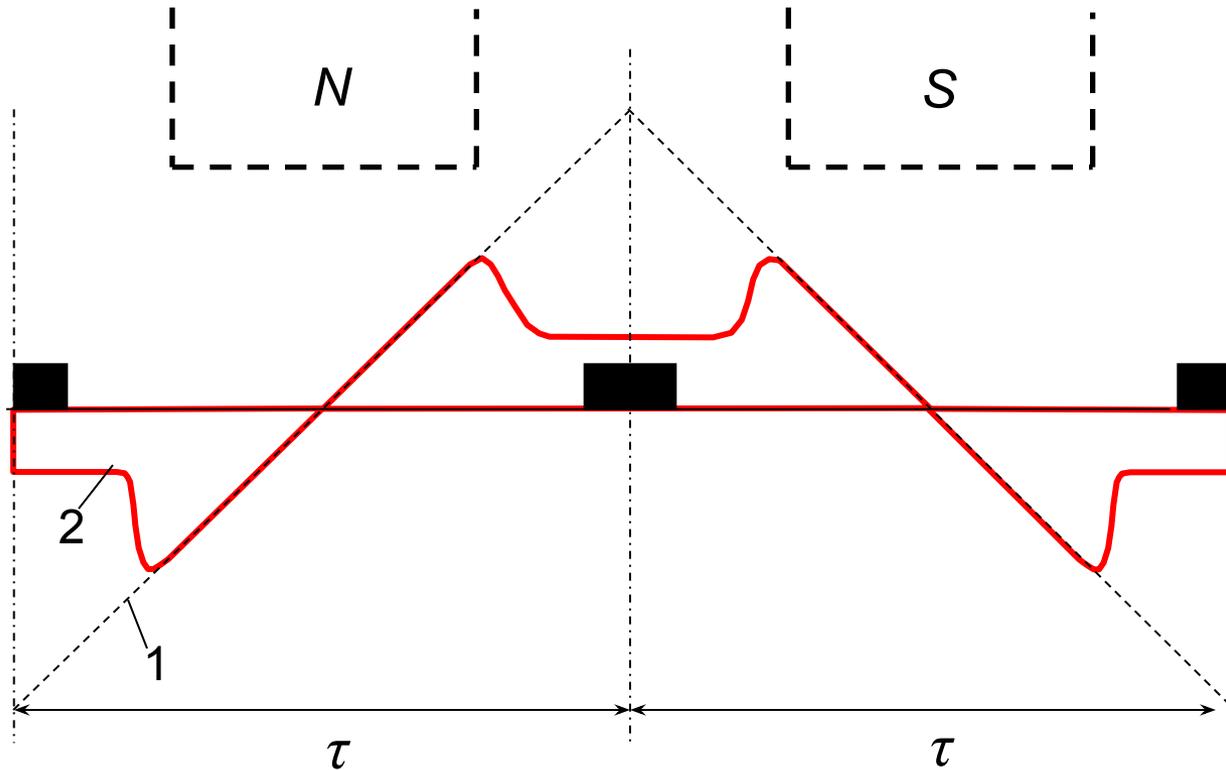
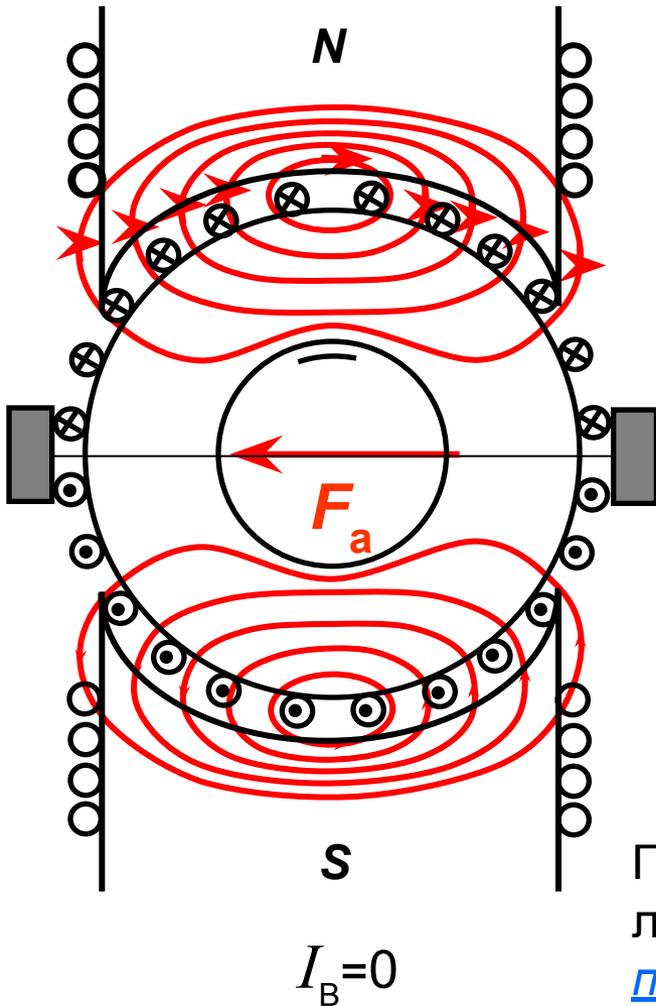


В этом случае магнитное поле симметрично относительно оси полюсов

Реакция якоря машины постоянного тока

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

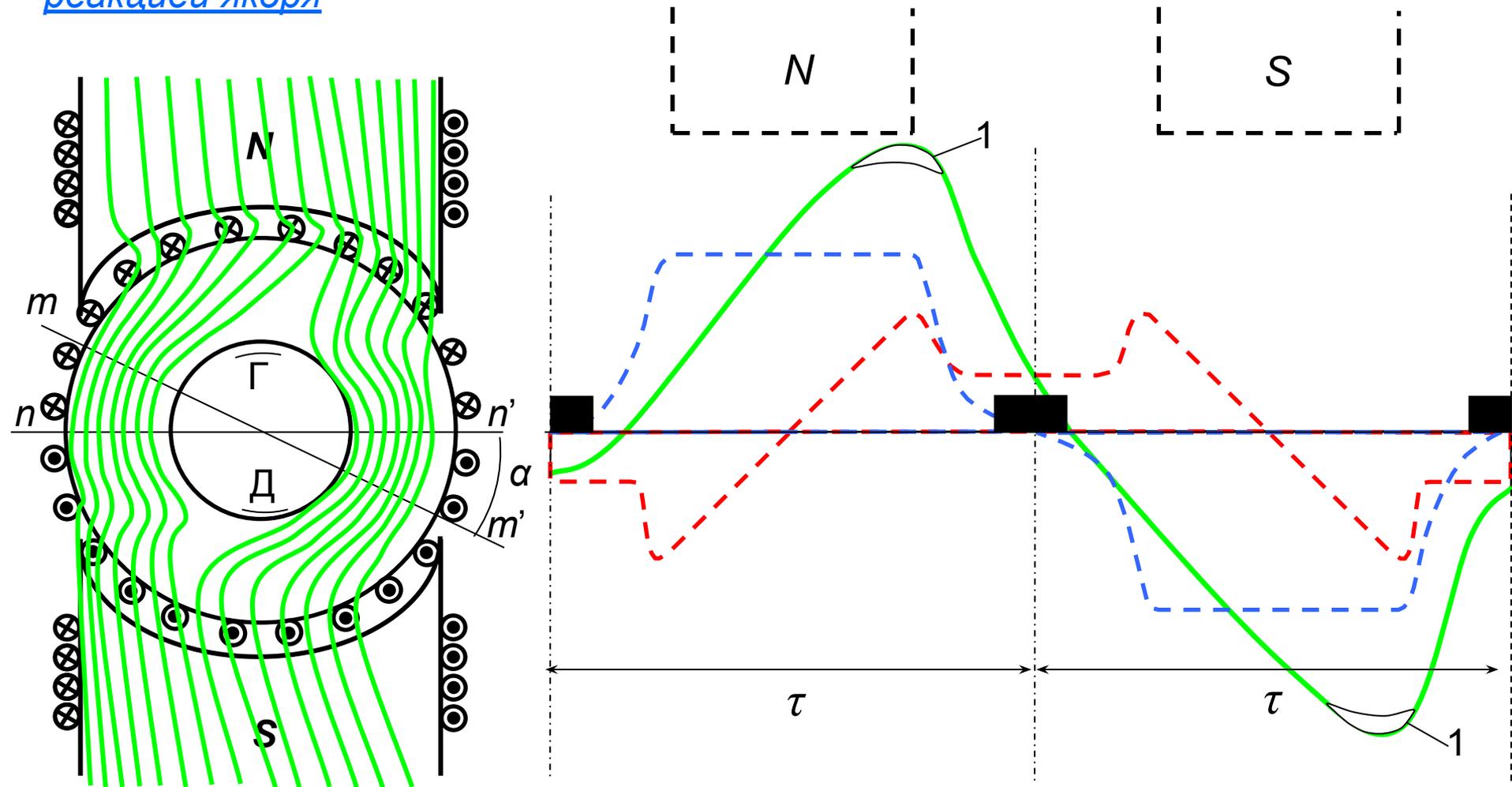
Допустим, что МДС обмотки возбуждения $F_{в0} = 0$, тогда магнитное поле МДС якоря F_a будет иметь вид:



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

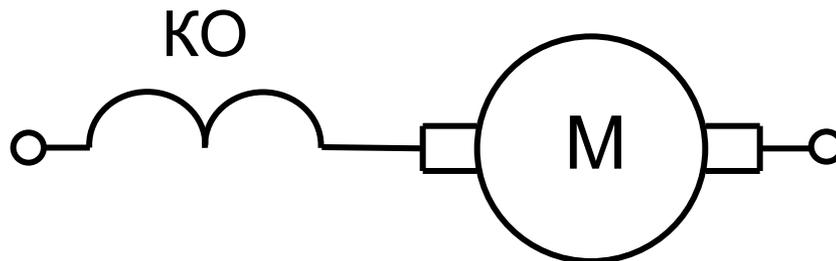
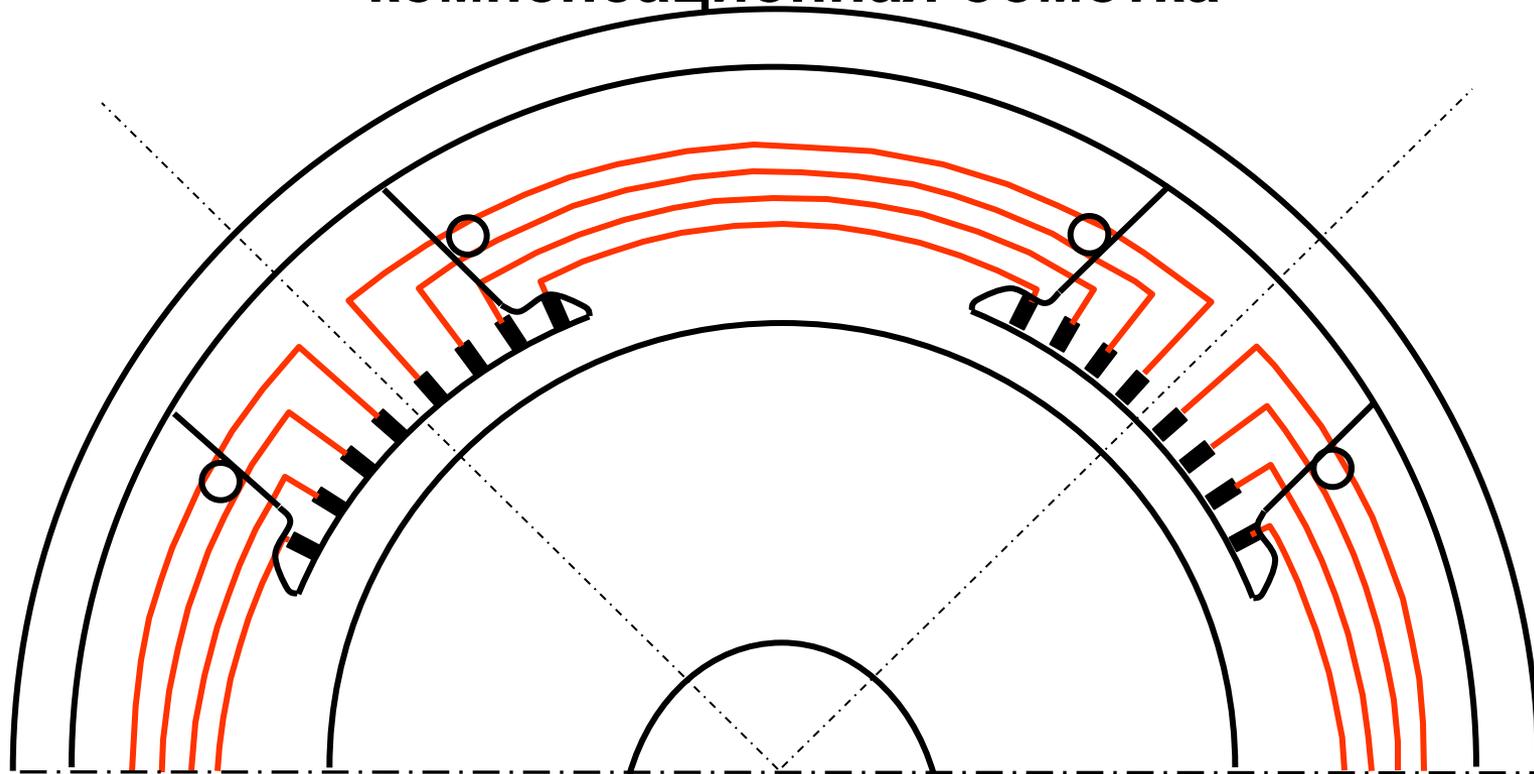
Реакция якоря машины постоянного тока

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря

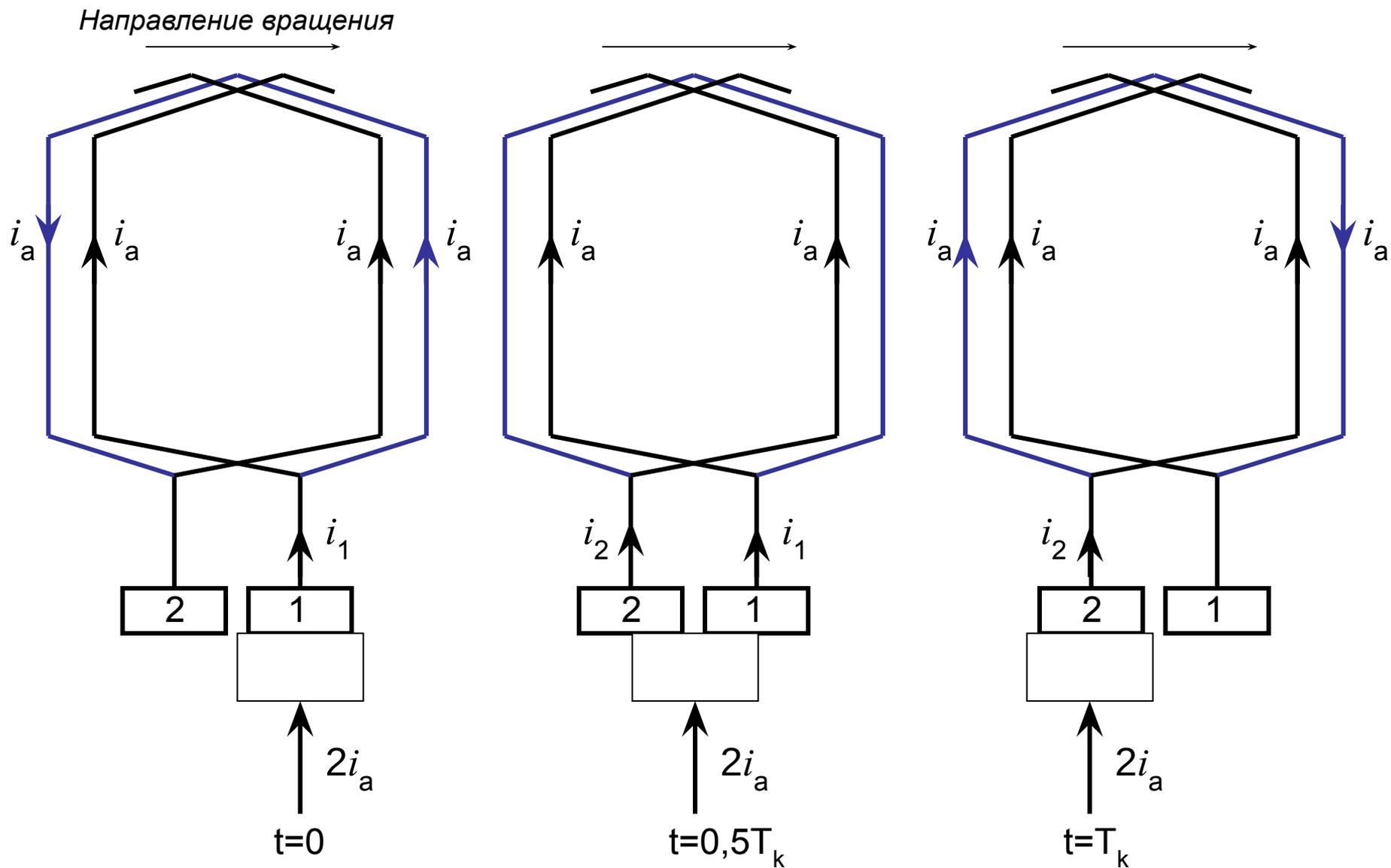


Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.

Устранение вредного влияния реакции якоря -компенсационная обмотка



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;

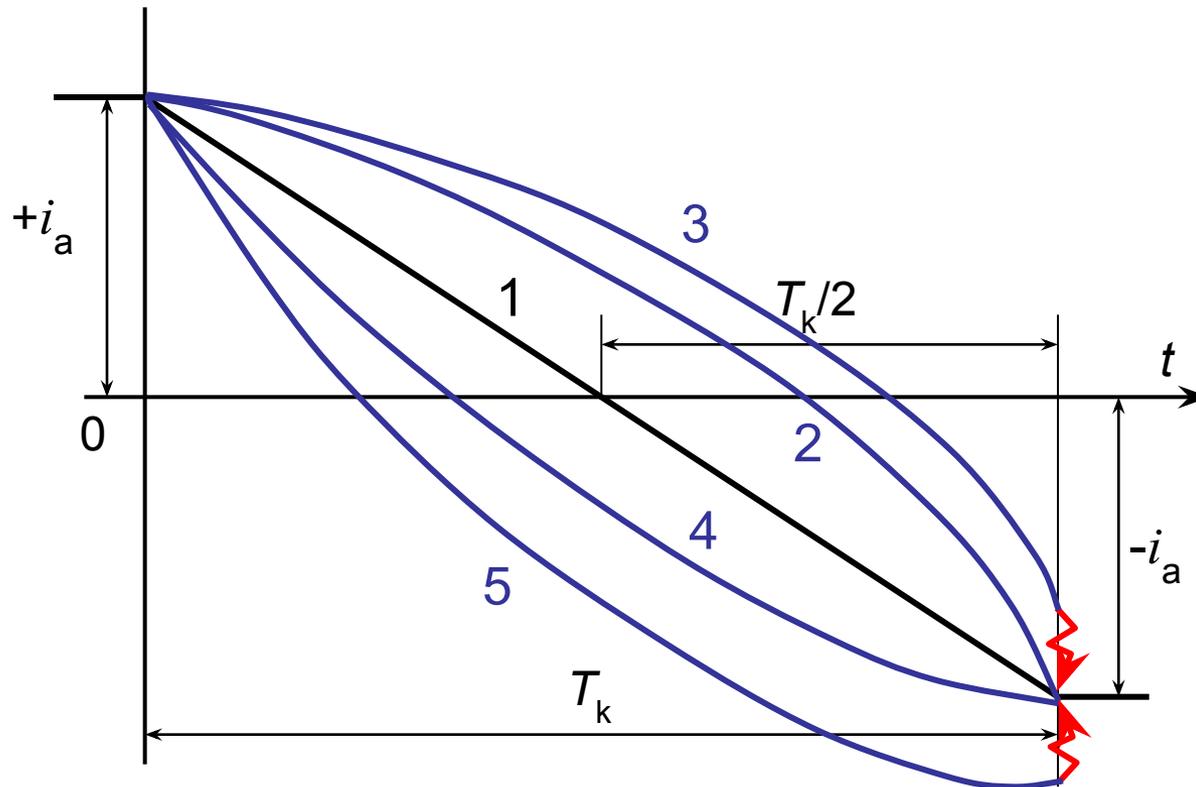
$b_{щ}$ – ширина щетки;

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

Причины, вызывающие искрение на коллекторе

Механические – слабое давление щеток на коллектор, биение коллектора, его эллиптичность или негладкая поверхность, загрязнение поверхности коллектора, выступание миканитовой изоляции над медными пластинами, неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей и т.д.

Потенциальные – появляются при возникновении напряжения между соседними коллекторными пластинами, превышающее допустимое значение. Искрение наиболее опасно, т.к. приводит к возникновению электрической дуги на коллекторе.

Коммутационные – создаются физическими процессами, происходящими в машине при переходе секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

Круговой огонь. Возникает при перегрузках, при к.з. в МПТ. Очень опасен, так как может привести к тяжелой аварии, пожару. Ставят изолирующий экран между обмоткой якоря и коллектором, воздушное дутье, барьеры между щетками разной полярности.

Способы улучшения коммутации

1. Добавочные полюса (ДП).

Предназначены для создания магнитного поля, компенсирующее реактивную ЭДС. Располагаются между главными полюсами. Применяются в МПТ мощностью >1 кВт. ДП позволяют увеличить линейную нагрузку.

2. Выбор щеток.

Для обеспечения удовлетворительной коммутации рекомендуется использовать щетки с большим сопротивлением (высокое напряжение, небольшой рабочий ток). Электрографитированные щетки в МПТ на 110-440В. МГ, УГ.

Политура коллектора – тонкая окисная пленка на поверхности коллектора, обладающая повышенным сопротивлением.

2. Способы возбуждения машин постоянного тока



Возбудить машину — означает навести в ней основной Ф. Системы возбуждения определяются схемой включения обмотки возбуждения относительно якоря, зависят от конструкции и назначения машины постоянного тока.

Обозначения:

Я1-Я2 – обмотка якоря
Ш1-Ш2 – независимая и параллельная обмотка возбуждения (шунтовая);

С1-С2 – последовательная обмотка возбуждения (серийная);

Д1-Д2 – обмотка дополнительных полюсов

магнито- электри- ческие	С электромагнитным возбуждением			
	с независимым возбуждением	с самовозбуждением		
		шунтовые	серийные	компаундные

Генераторы с независимым возбуждением. Характеристики генераторов

Магнитное поле генератора с независимым возбуждением создается током, подаваемым от постороннего источника энергии в обмотку возбуждения полюсов. Схема генератора с независимым возбуждением показана на рисунке 1:

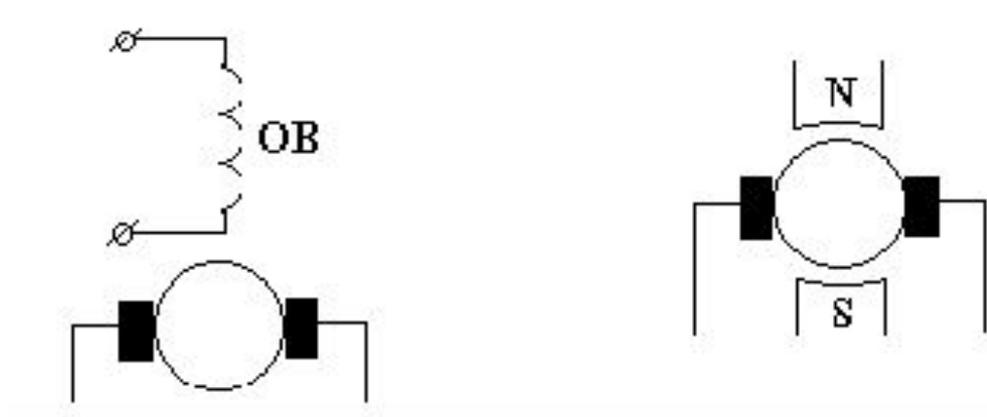


Рисунок 1

Рисунок 2

Магнитное поле генераторов с независимым возбуждением может создаваться от постоянных магнитов (рисунок 2).

При независимом возбуждении основной магнитный поток создается постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой от независимого источника.

Для промышленных целей, в основном, применяют машины постоянного тока с самовозбуждением – не требуется дополнительного источника питания.

В машинах постоянного тока со смешанным возбуждением (компаундные) параллельная и последовательная обмотки могут быть включены согласно (их МДС совпадают) и встречно (направлены противоположно друг другу).

Обмотки параллельного возбуждения имеют большое количество витков, намотанных проводом малого сечения – их омическое сопротивление большое и по ним протекает небольшой ток.

По обмоткам последовательного возбуждения проходит ток якоря. Поэтому они имеют относительно малое количество витков, выполненных проводом большого сечения.

Работа ГПТ независимого возбуждения

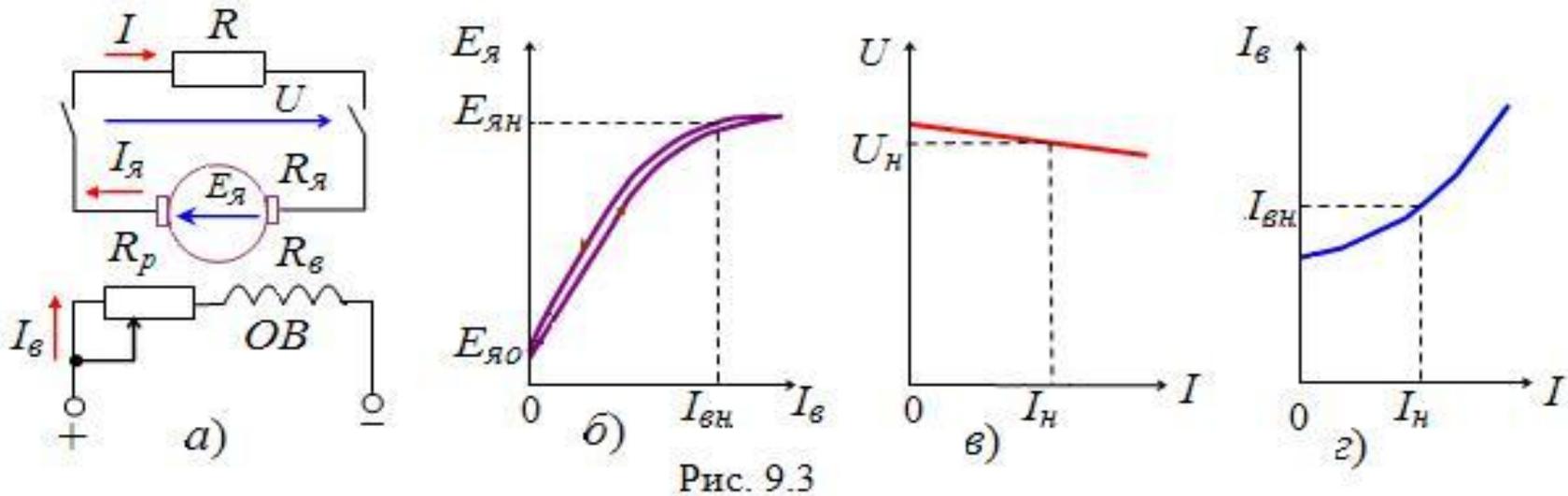
Обмотка возбуждения OB подключается к источнику постоянного тока, а к выводам обмотки приведенного во вращение якоря присоединяется нагрузка R .

Под действием ЭДС якоря в цепи нагрузки возникает ток I . Проводники с током обмотки якоря находятся в магнитном поле, созданном МДС обмотки возбуждения, поэтому в соответствии с законом Ампера возникают электромагнитные силы и электромагнитный момент $M_{эм}$, направленный противоположно моменту приводного двигателя.

Таким образом, при работе машины в режиме генератора создаётся противодействующий электромагнитный момент $M_{эм}$, который должен быть преодолен первичным двигателем.

Недостатком ГПТ независимого возбуждения - потребность в постороннем источнике постоянного напряжения для создания магнитного потока Φ_b машины.

Свойства и характеристики генератора независимого возбуждения



Свойства ГПТ определяются их основными характеристиками:
холостого хода,
внешней и
регулировочной.

Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода $E_{я} = U_x = f(I_{в})$ ($n = const; I = 0$) снимается при разомкнутой цепи приёмника и показывает, как нужно изменять ток возбуждения $I_{в}$ посредством реостата R_p , чтобы получить те или иные значения ЭДС $E_{я}$ генератора.

Поскольку магнитная цепь машины выполняется из электротехнической стали, являющейся магнитомягким материалом, то характеристика $E_{я} = f(I_{в})$ представляет узкую петлю гистерезиса.

При отсутствии тока в обмотке возбуждения ($I_{в} = 0$) в **якоре** при его вращении индуцируется небольшая ЭДС $E_{я0}$ (равная 1...3% от $U_n = 0$), обусловленная остаточным магнитным потоком $\Phi_{в0}$.

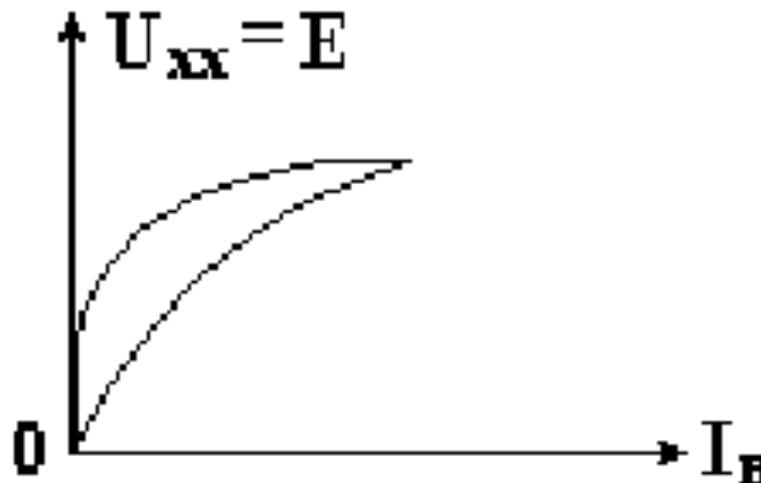
Внешняя характеристика

Внешняя характеристика $U = f(I)$ - зависимость напряжения U на выводах генератора от тока нагрузки I при $n = const$ и $I_b = const$ ($U = E_{я} + R_{я}I_{я}$).

Внешняя характеристика такого генератора жёсткая, т.к. напряжение U незначительно (на 6...10% от $E_{я}$ при $I = I_n$) уменьшается с ростом тока нагрузки I из-за падения напряжения в цепи якоря и реакции якоря - воздействия магнитного поля якоря $\Phi_{я}$, создаваемого МДС $O_{я} F_{я} = w_{я}I_{я}$, на основной магнитный поток Φ_b машины, которое вызывает искажение магнитного потока Φ_b статора и, в конечном итоге, уменьшение ЭДС $E_{я}$ якорной обмотки.

Зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения называется характеристикой холостого хода $E = U_{XX} = f(I_B)$. Характеристику холостого хода получают при разомкнутой внешней цепи ($I_A = 0$) и при постоянной частоте вращения ($n_2 = const$). Характеристика холостого хода генератора показана на рисунке:

Из-за остаточного магнитного потока ЭДС генератора не равна нулю при токе возбуждения, равном нулю. При увеличении тока возбуждения ЭДС генератора сначала возрастает пропорционально.

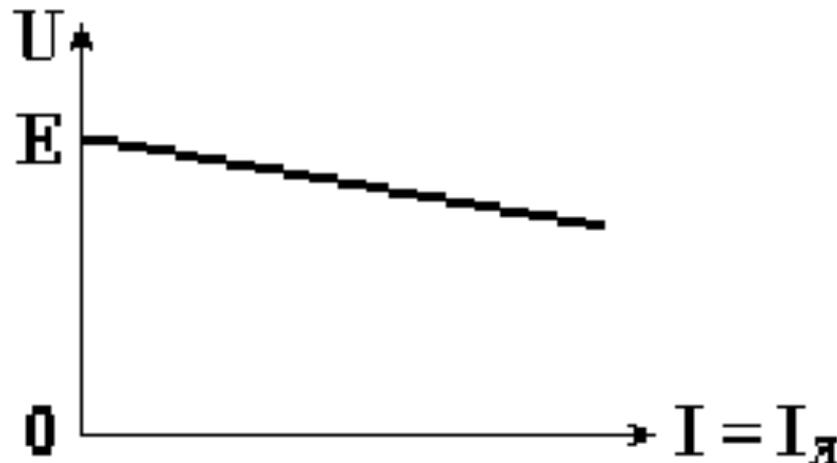


Соответствующая часть характеристики холостого хода будет прямолинейна. Но при дальнейшем увеличении тока возбуждения происходит магнитное насыщение машины, отчего кривая будет иметь изгиб. При последующем возрастании тока возбуждения ЭДС генератора почти не меняется. Если уменьшать ток возбуждения, кривая намагничивания не совпадает с кривой намагничивания из-за явления гистерезиса.

Зависимость напряжения на внешних зажимах машины от величины тока нагрузки $U = f(I)$ при токе возбуждения $I_B = \text{const}$ - называют **внешней характеристикой генератора**.

$$U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Внешняя характеристика генератора изображена на рисунке:



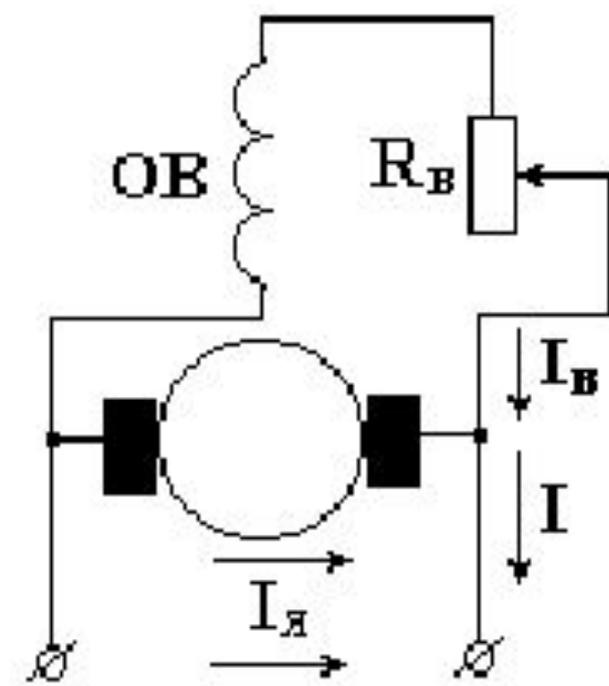
С ростом тока нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается из-за увеличения падения напряжения в якорной обмотке.

Генераторы с самовозбуждением. Принцип самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением

Недостатком генератора с независимым возбуждением является необходимость иметь отдельный источник питания. Но при определенных условиях обмотку возбуждения можно питать током якоря генератора.

Самовозбуждающиеся генераторы имеют одну из трех схем: с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

На рисунке изображен генератор с параллельным возбуждением:



Обмотка возбуждения подключена параллельно якорной обмотке. В цепь возбуждения включен реостат. Генератор работает в режиме холостого хода.

Чтобы генератор самовозбудился, необходимо выполнение определенных условий.

Первым из этих условий является наличие остаточного магнитного потока между полюсами. При вращении якоря остаточный магнитный поток индуцирует в якорной обмотке небольшую остаточную ЭДС.

Вторым условием является согласное включение обмотки возбуждения. Обмотки возбуждения и якоря должны быть соединены таким образом, чтобы ЭДС якоря создавала ток, усиливающий остаточный магнитный поток. Усиление магнитного потока приведет к увеличению ЭДС. Машина самовозбуждается и начинает устойчиво работать с каким-то током возбуждения $I_B = const$ и ЭДС $E = const$, зависящими от сопротивления R_B в цепи возбуждения.

Третьим условием является то, что сопротивление цепи возбуждения при данной частоте вращения должно быть меньше критического.

ГПТ параллельного возбуждения

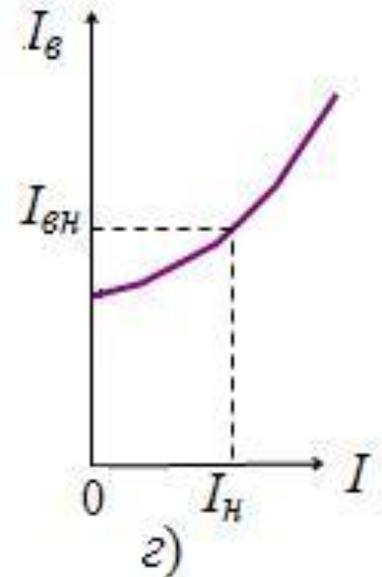
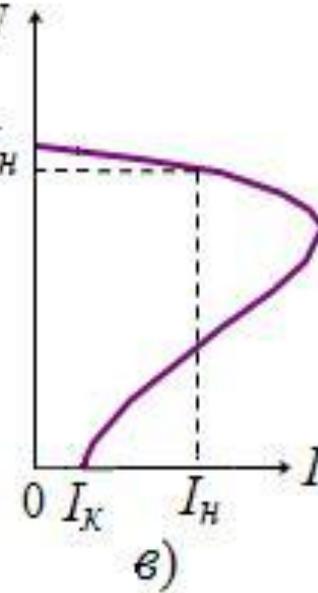
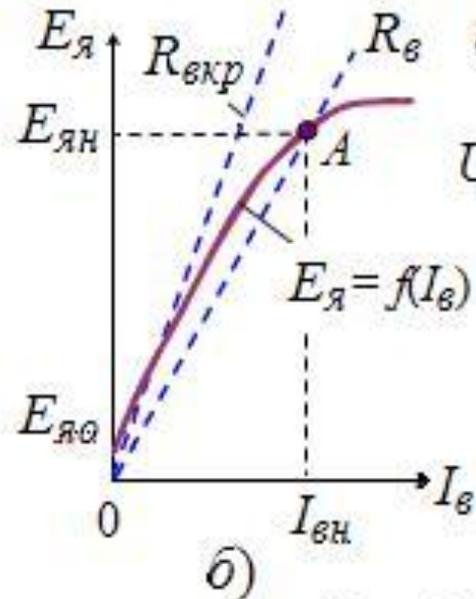
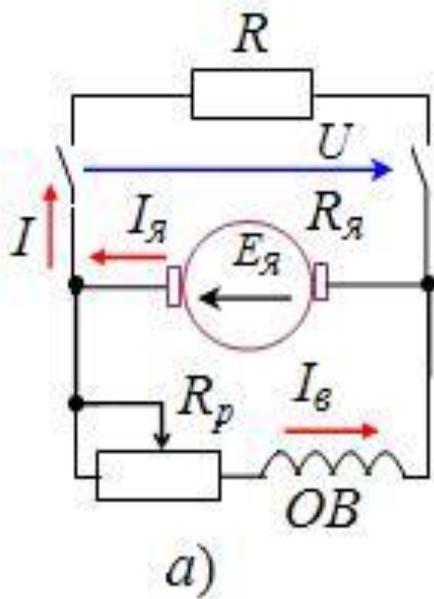


Рис. 9.4

Характеристика холостого хода ГПТ параллельного возбуждения

В этом режиме ток внешней цепи $I = 0$, а в обмотках возбуждения и якоря протекает ток, обусловленный остаточной ЭДС якоря $E_{я0}$ (рис. 9.4, б). Если OB подключена к цепи якоря таким образом, что создаваемый её МДС магнитный поток совпадает по направлению с остаточным магнитным потоком, то ЭДС якоря (соответственно магнитный поток Φ_v и ток I_v обмотки возбуждения) будет возрастать. Процесс самовозбуждения ГПТ заканчивается, когда падение напряжения в OB становится равным ЭДС якоря, т. е. $E_{я} = R_v I_v$ (точка A , рис. 9.4, б). Если увеличивать сопротивление цепи OB (посредством реостата R_p , см. рис. 9.4, а), то точка A пересечения прямой $R_v I_v$ с характеристикой $E_{я} = f(I_v)$ сместится влево (рис. 9.4, б). При достижении значения сопротивления $R_{вкр}$ цепи возбуждения, называемого критическим, напряжение U на зажимах генератора будет неустойчивым, практически не превышающим ЭДС $E_{я0}$. Поэтому сопротивление цепи возбуждения R_v генератора должно быть меньше критического значения $R_{вкр}$

У генераторов параллельного возбуждения при уменьшении сопротивления R нагрузки ток I увеличивается до определённого предела, называемого **критическим**, $I_{кр} = (1,5 \dots 2,5)I_n$. При дальнейшем уменьшении сопротивления R ток I уменьшается вследствие размагничивания машины (уменьшения тока возбуждения). При коротком замыкании машина будет полностью размагничена, поэтому ток короткого замыкания I_k обычно невелик (определяется небольшой остаточной ЭДС ($I_k = E_{я0}/R_{я}$)). Однако при внезапном коротком замыкании вследствие медленного изменения магнитного потока и ЭДС якоря ток I в переходном режиме может превысить номинальное значение в несколько раз, что может вызвать перегрев щеточно-коллекторного узла. Поэтому в цепь управления этих генераторов включают реле, которое отключает цепь якоря в случае, если ток якоря превысит установленное значение.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Внешняя характеристика ГПТ параллельного возбуждения $U = f(I)$, т. е. $U = E_{я} - R_{я}I_{я}$, где $I_{я} = I + I_{в}$ - ток якорной обмотки, отличается более резким падением напряжения (рис. 9.4, в) при увеличении тока I нагрузки (на 10...20% от $E_{я}$ при номинальном токе I_n) по сравнению с внешней характеристикой ГПТ независимого возбуждения.

Причины падения напряжения U :

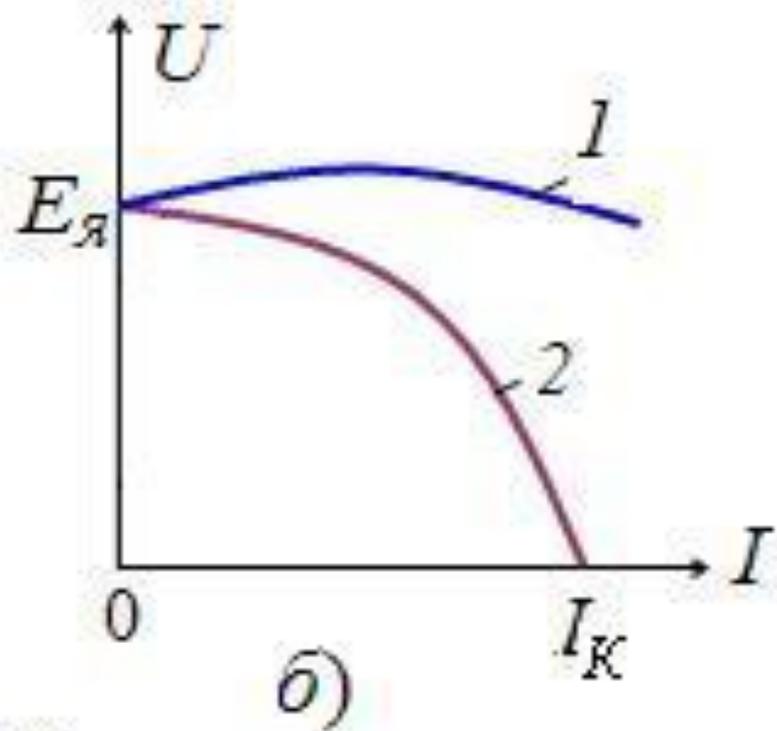
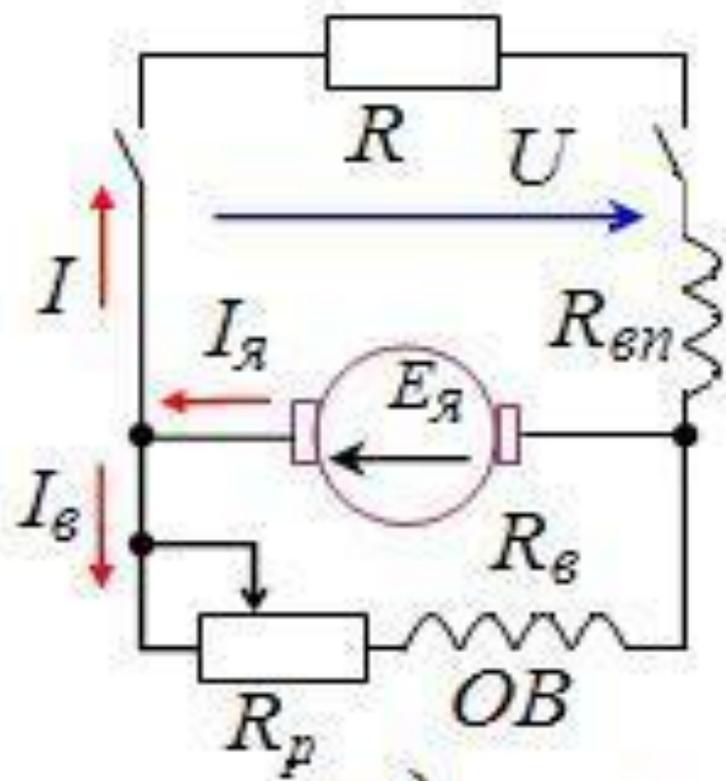
- увеличение активного падения напряжения $R_{я}I_{я}$ в цепи якоря;
- реакция якоря;
- уменьшение тока возбуждения $I_{в} = U/R_{в}$, вызванное первыми двумя причинами, приведшими к снижению напряжения U на зажимах OB .

Регулировочная характеристика ГПТ параллельного возбуждения

Регулировочная характеристика $I_{в} = f(I)$ при $n = const$ и $U = const$ имеет тот же вид ([рис. 9.4, з](#)), что и для ГПТ независимого возбуждения, однако проходит круче, т. к. чтобы скомпенсировать большие снижения напряжения, необходимо увеличить ток возбуждения в большей степени.

Генераторы смешанного возбуждения

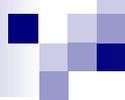
У генератора смешанного возбуждения (рис. 9.5, а) при согласном включении последовательной и параллельной обмоток их магнитные потоки складываются, и дополнительная ЭДС, обусловленная магнитным полем последовательной обмотки, компенсирует падение напряжения в обмотке якоря и уменьшение ЭДС $E_{я}$ от снижения тока возбуждения. В этом случае при изменении тока нагрузки I напряжение U остаётся практически постоянным (кривая 1, рис. 9.5, б).



a)

Рис. 9.5

б)



При встречном включении обмоток возбуждения при увеличении тока нагрузки напряжение на выходе генератора резко падает (кривая 2, рис. 9.5, б).

Такую вольт-амперную характеристику, называемую **крутопадающей**, имеют генераторы для дуговой сварки (типа ПСО-300 и ПСГ-500), обеспечивающие постоянство тока при колебаниях сопротивления цепи вследствие изменения длины дуги.



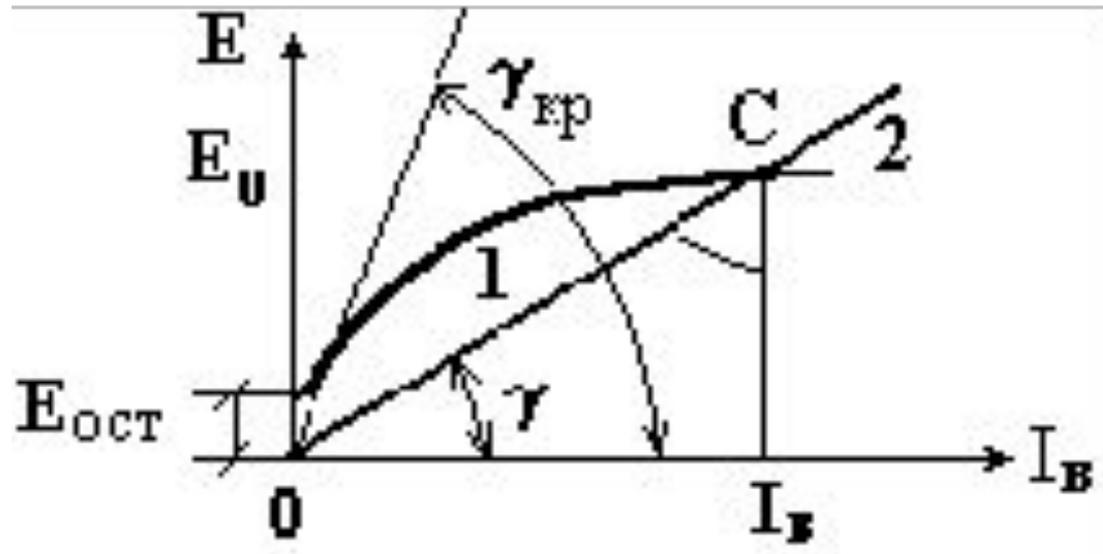
ГПТ последовательного возбуждения

не нашли широкого применения из-за непостоянства выходного напряжения.

Изобразим на рисунке характеристику холостого хода генератора $E = f(I_B)$ (кривая 1) и вольт - амперную характеристику сопротивления цепи возбуждения $U_B = R_B I_B$, где U_B - падение напряжения в цепи возбуждения.

Эта характеристика представляет собой прямую линию 2, наклоненную к оси абсцисс под углом γ ($\text{tg}\gamma \sim R_B$).

Ток обмотки возбуждения увеличивает магнитный поток полюсов при согласном включении обмотки возбуждения. ЭДС, индуцированная в якоре, возрастает, что приводит к дальнейшему увеличению тока обмотки возбуждения, магнитного потока и ЭДС. Рост ЭДС от тока возбуждения замедляется при насыщении магнитной цепи машины.



Падение напряжения в цепи возбуждения пропорционально росту тока. В точке пересечения характеристики холостого хода машины 1 с прямой 2 процесс самовозбуждения заканчивается. Машина работает в устойчивом режиме.

Генератор ПТ

- Первичный двигатель развивает вращающий момент M_1 , вращая ротор генератора с частотой n .
- Мощность механической энергии, поступающей от ПД

$$P_1 = M_1 \cdot \omega = M_1 \frac{\pi \cdot n}{30}$$

- Если к обмотке возбуждения подведено напряжение U_B , то в ней возникает ток I_B , создающий МДС $w_B I_B$. МДС $w_B I_B$ возбуждает в машине магнитный поток возбуждения Φ .
- При вращении проводников якоря в магнитном поле, возбуждаемом МДС главных полюсов машины, в них наводятся ЭДС.

Двигатель ПТ

- Если через щетки и коллектор на обмотку якоря возбужденной машины подать напряжение U , то в результате в проводниках обмотки якоря появятся токи.
- Взаимодействие проводников с током обмотки якоря и магнитного поля возбуждения Φ создает электромагнитный момент M , который определяет момент вращающий M_2 на валу двигателя.

- Мощность, подводимой к двигателю электрической энергии

$$P_1 = U \cdot I_{я}$$

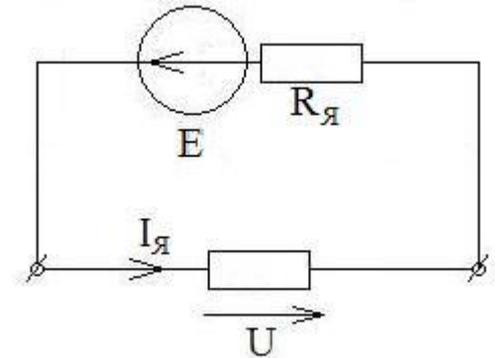
- Мощность механической энергии, снимаемой с вала двигателя

$$P_2 = M_2 \cdot \omega$$

Уравнения электрического состояния МПТ

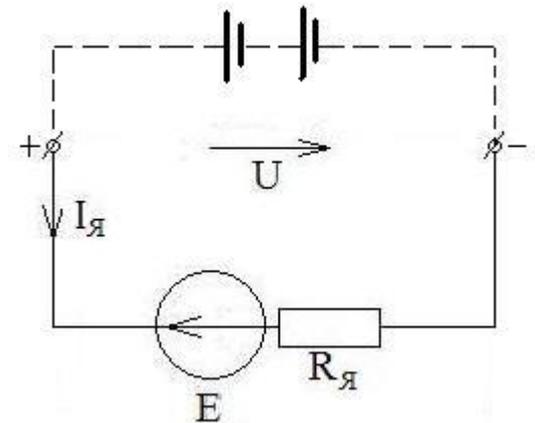
- в режиме генератора

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$



- в режиме двигателя

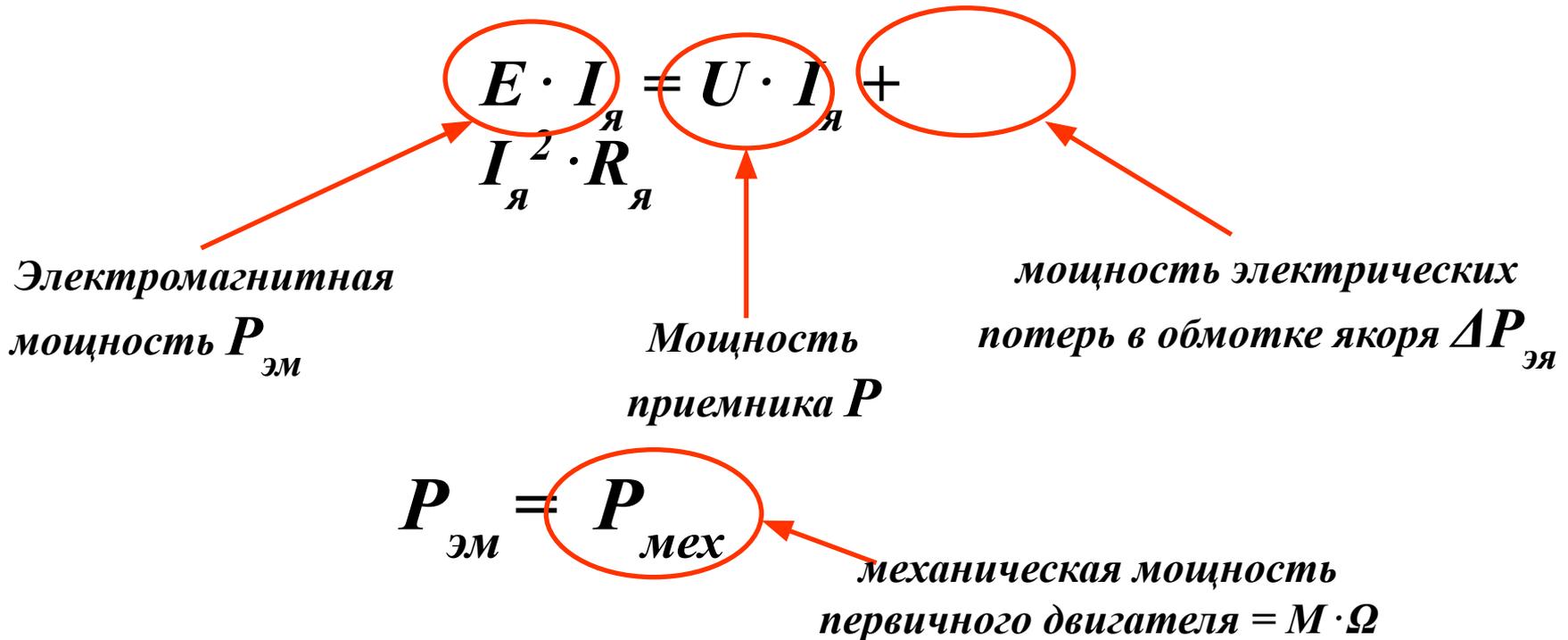
$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$



Уравнение электрического состояния цепи якоря генератора

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

Уравнение баланса мощностей цепи якоря генератора



**Напряжение приложенное к зажимам
якоря двигателя**

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

Ток якоря двигателя

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

Уравнение баланса мощностей цепи якоря двигателя

$$U \cdot I_{я} = E \cdot I_{я} + I_{я}^2 \cdot R_{я}$$

Электрическая
мощность P

Электромагнитная
мощность $P_{эм}$

мощность электрических
потерь в обмотке якоря $\Delta P_{эя}$

$$P_{эм} = P_{мех}$$

механическая мощность
на валу двигателя = $M \cdot \Omega$

3. Принцип работы двигателей

ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основа работы ДПТ - закон Ампера. Для создания вращающего момента постоянное напряжение U подводится одновременно к обмотке возбуждения ОВ (создающей магнитный поток Φ_v машины), и (посредством неподвижных щёток) к коллектору.

Щёточно-коллекторный узел выполняет роль механического переключателя тока, обеспечивая неизменность направления токов в проводниках ОЯ, проходящих под соответствующим магнитным полюсом (N или S) индуктора, и изменение направления токов в этих проводниках при пересечении ими геометрической нейтрали машины.

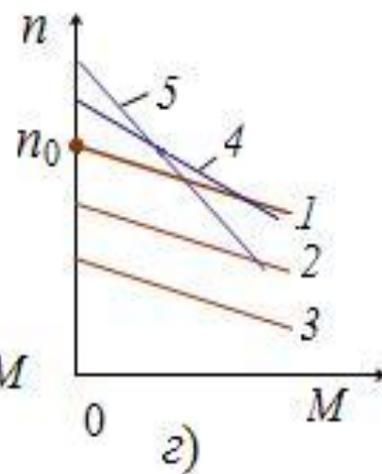
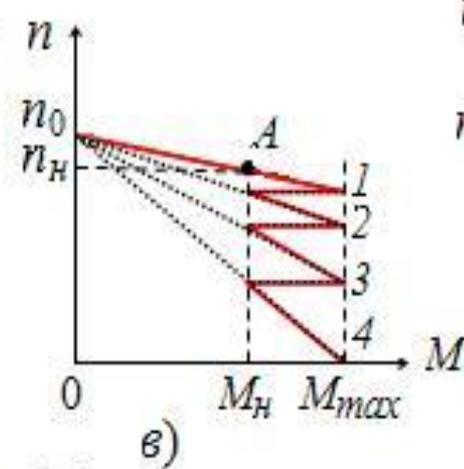
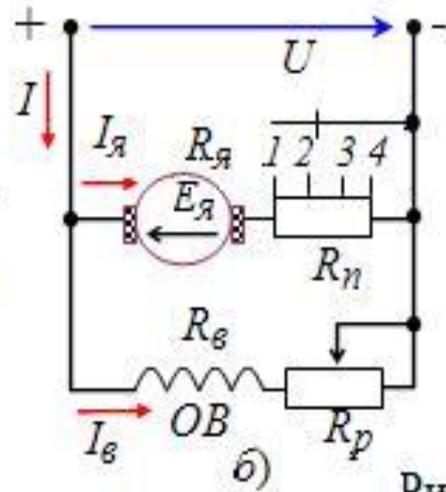
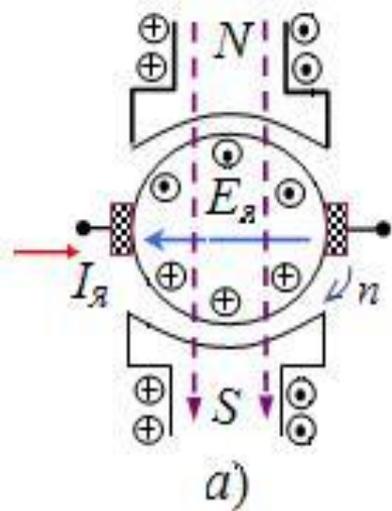


Рис. 9.6

Вращающий электромагнитный момент двигателей постоянного тока

В результате взаимодействия тока якоря I_a с магнитным потоком Φ_v возникает электромагнитный момент

$$M = F_1 N d / 2,$$

$$F_1 = B c p l I_1$$

После преобразования получим

$$M = (pN/2a) I_a \Phi_v = C_m I_a \Phi_v,$$

Вращающий электромагнитный момент прямо пропорционален произведению магнитного потока Φ_v на ток якоря I_a .

ПротивоЭДС

Если вращающий момент M больше момента сопротивления M_c механизма на валу, т. е. $M > M_c$, то якорь начинает вращаться.

При вращении якоря его проводники пересекают магнитный поток Φ_v и согласно закону электромагнитной индукции в них индуцируется ЭДС. Суммарную ЭДС всех проводников якорной обмотки называют противоЭДС, т.к. направление ЭДС противоположно направлению тока якоря I_a .

Уравнение электрического равновесия для якорной обмотки:

$$U = E_a + U_a I_a$$

Классификация двигателей по способу возбуждения

Двигатели постоянного тока классифицируют по способу возбуждения:

независимое,

параллельное (шунтовое),

последовательное (сериесное) и

смешанное (сериесно-шунтовое или компаундное).

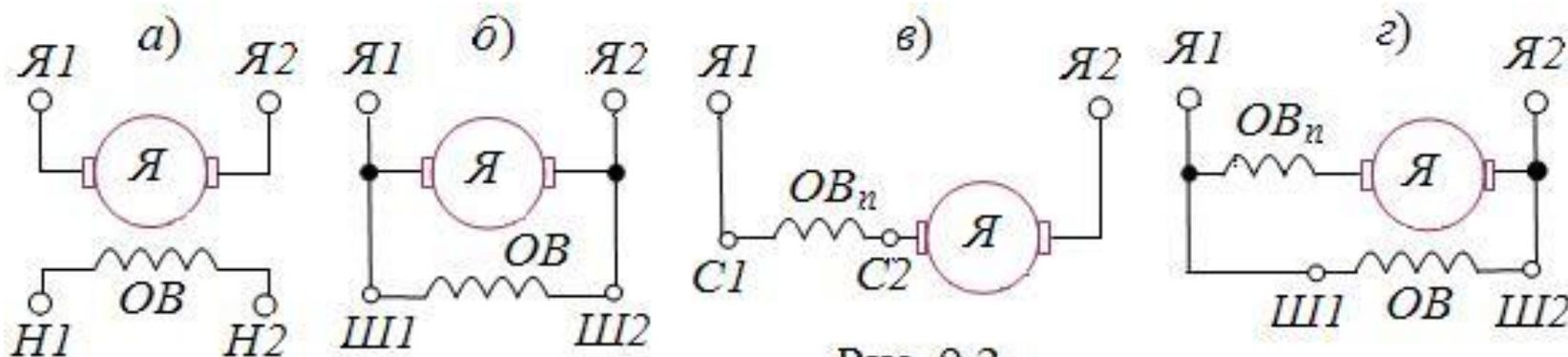


Рис. 9.2

Двигатели параллельного возбуждения

Обмотка возбуждения ОВ подключена параллельно с обмоткой якоря к сети. В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный реостат R_p , а в цепь якоря - пусковой реостат R_n .

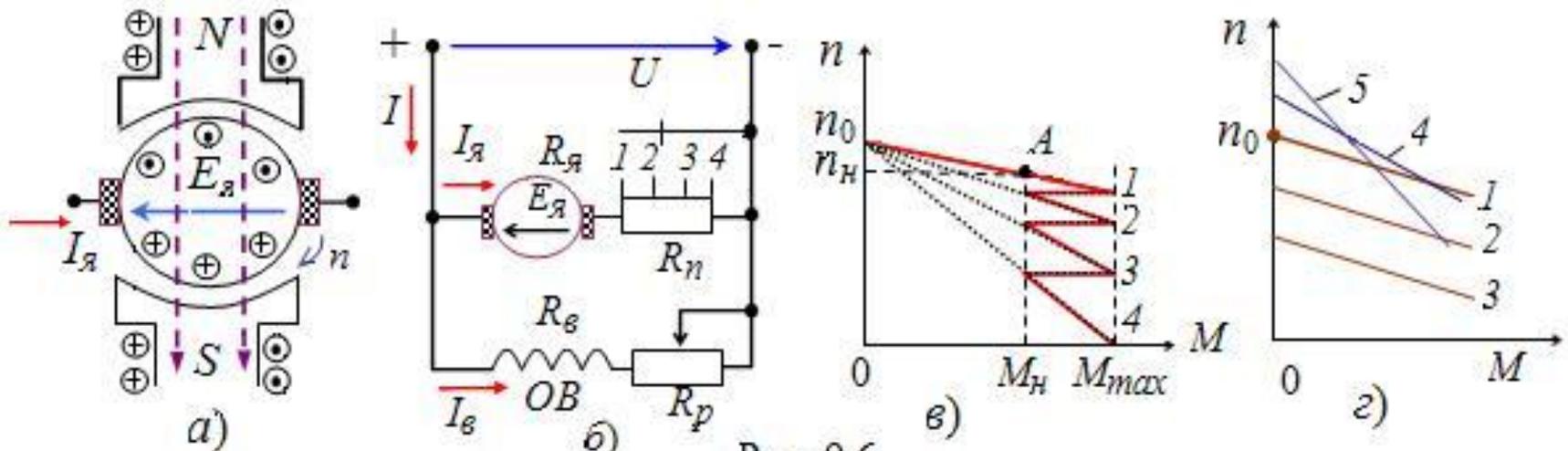
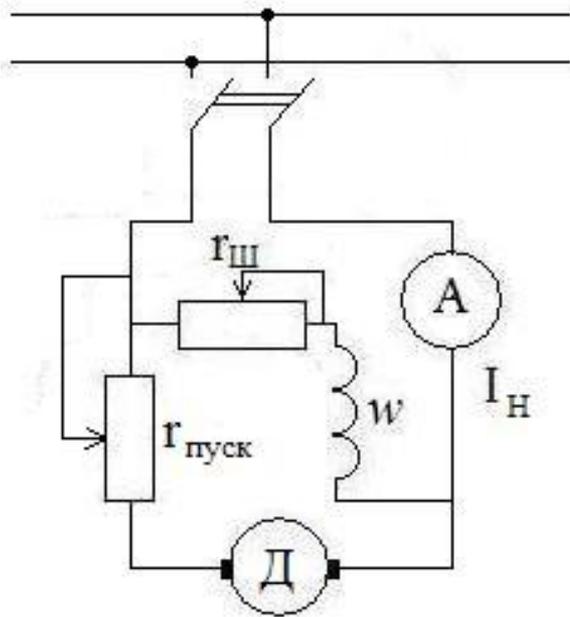


Рис. 9.6

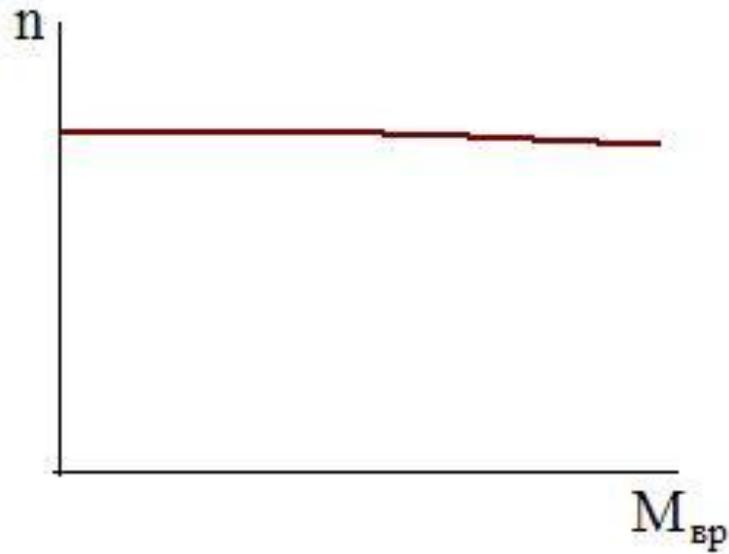
Двигатель параллельного возбуждения



$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}} \quad E = c_e \cdot \Phi \cdot n$$

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c_e \cdot \Phi}$$

- Частоту вращения можно регулировать путем изменения потока Φ или напряжения U .



$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \cdot \Phi}$$

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$$

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi^2} \cdot M$$

- Изменение нагрузки на валу двигателя от холостого хода до номинальной вызывает у большинства ДПТ ПВ изменение частоты вращения на 3-8%. Такая механическая характеристика называется жесткой.

- При регулировании Φ изменением I_B (реостатом $r_{щ}$) уменьшение Φ понижает ЭДС и вращающий момент M .

- Согласно
$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}$$

уменьшение ЭДС вызывает увеличение $I_{я}$ и возрастание вращающего момента M , в результате чего восстанавливается равновесие моментов при повышенной частоте и возросшем токе якоря. С ростом нагрузки на валу уменьшается влияние тока возбуждения на скорость двигателя.

В ДПТ параллельного возбуждения ток возбуждения не зависит от тока якоря I_a .

$$I_e = U / (R_e + R_p),$$

Ток якоря

$$I_a = (U - E_a) / R_a = (U - C_e \Phi \omega) / R_a,$$

В начальный момент пуска ДПТ частота вращения якоря $n = 0$, поэтому противоЭДС $E_a = 0$.

■ Чтобы ограничить недопустимо большой пусковой ток в обмотке якоря и, как следствие, возникающий рывок или удар на валу и искрение в контактах щётки -коллектор, последовательно с якорем включают пусковой реостат R_n .

Сопротивление R_n рассчитывают из условия, чтобы пусковой ток

$$I_{яп} = U / (R_{я} + R_n) < (2 \dots 2,5) I_{ян},$$

При этом двигатель развивает достаточно большой пусковой момент

$$M_n = (2 \dots 4) M_n$$

Это обеспечивает быстрый разгон ДПТ. По мере разгона двигателя ЭДС якоря $E_{я}$ увеличивается и сопротивление пускового реостата необходимо уменьшить до нуля, т. е. при $n = n_n$, $R_n = 0$.

Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Электромеханические свойства ДПТ определяются его **скоростной** $n(I_a)$ или **механической** $n(M)$ характеристиками.

Скоростная характеристика представляет зависимость частоты вращения n от тока якоря I_a при $U = const$ и $I_f = const$.

Уравнение **естественной скоростной** характеристики

$$n = (U - R_a I_a) / (C_E \Phi) = (U / C_E \Phi) - (R_a / C_E \Phi) I_a$$

Механические характеристика двигателя параллельного возбуждения

Механическая характеристика $n(M)$ представляет зависимость частоты вращения якоря n от развиваемого ДПТ момента $M = M_c$ при условии постоянства напряжения U сети и сопротивлений в цепи якоря и в цепи возбуждения.

$$n = (U/C_E \Phi_v) - (R_{\Sigma} / C_E C_M \Phi_v^2) M = n_0 - \Delta n,$$

где $n_0 = U/C_E \Phi_v$ – частота вращения якоря при "идеальном" холостом ходе ($M_c = 0$); сопротивления $R_n = 0$ и $R_p = 0$; напряжение на якоре $U = U_n$ и магнитный поток двигателя $\Phi_v = \Phi_{vн}$.

Если сопротивление пускового реостата $R_n > 0$ ($R_p = 0$), получают искусственные, т.н. реостатные механические характеристики 2...4

Пуск двигателя параллельного возбуждения

Прямой пуск двигателя ($R_n = 0$) применяют только для двигателей малой мощности (до 1 кВт), у которых сопротивление якорной цепи относительно велико и обмотка якоря не успевает нагреться.

Пуск двигателя с использованием пускового реостата называют **реостатным**.

Перед пуском для получения максимального пускового момента при допустимом пусковом токе регулировочный реостат в обмотке возбуждения полностью выводят ($R_p = 0$) (при этом магнитный поток Φ_v имеет максимальное значение), а рукоятку переключателя пускового реостата устанавливают в положение, при котором сопротивление R_n имеет максимальное значение. В начальный период пуск осуществляется по реостатной характеристике 4 при этом двигатель развивает максимальный пусковой момент.

По мере разгона сопротивление пускового реостата R_n ступенчато уменьшают; разгон двигателя осуществляется по отдельным отрезкам реостатных характеристик 4, 3 и 2.

При полностью выведенном сопротивлении R_n и достижении значения $M = M_n$ частота вращения n якоря устанавливается на естественной механической характеристике 1 (точка А).

При пуске двигателей большой мощности использование пускового реостата (громоздкость и значительные потери энергии) становится неэффективным. В этом случае применяют безреостатный пуск при пониженном напряжении, подводимом к цепи якоря. Получаемые (при условии, что $R_n = 0$ и $R_p = 0$) искусственные механические характеристики имеют вид 2 и 3 (рис. 9.6, з) и проходят параллельно естественной 1 и тем ниже, чем меньше величина напряжения U .

Регулировочный реостат R_p позволяет изменять ток возбуждения I_v двигателя и его магнитный поток Φ_v . При этом будет изменяться и частота вращения n . При номинальном напряжении на якоре ($R_p = 0$) и уменьшении магнитного потока ($R_p > 0$) механические характеристики имеют вид 4 и 5 (рис. 9.6, з) и проходят тем выше естественной 1 и круче её, чем меньше магнитный поток.

Регулирования частоты вращения и реверсирование двигателя параллельного возбуждения

Частоту вращения якоря

$$n = U / (C_E \Phi_e) - ((R_{я} + R_n) / (C_E C_M \Phi_e^2)) M = n_0 - \Delta n$$

можно регулировать тремя способами:

- **реостатным** – изменением сопротивления цепи якоря
 $(R_{я} + R_n = var);$

- **полюсным** – изменением магнитного потока полюсов
 $(R_e + R_p = var);$

- **якорным** – изменением напряжения, подводимого к якорю
 $(U = var).$



Реверсирование двигателей можно обеспечить изменением направления тока

или в обмотке якоря,

или в обмотке возбуждения.

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя представляют собой

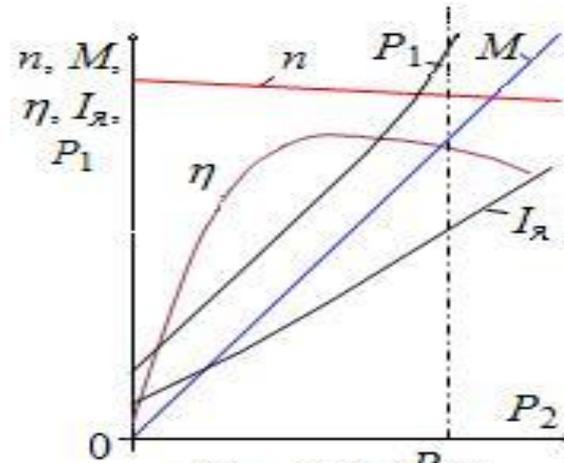


Рис. 9.7 $P_{2н}$

зависимости потребляемой мощности P_1 , тока $I_{я}$, частоты вращения n , момента M и КПД η от отдаваемой мощности P_2 на валу двигателя при $U = const$ и $I_b = const$.

Характеристики $n = f(P2)$ и $M = f(P2)$ являются практически линейными, а зависимости $P1 = f(P2)$, $I_{я} = f(P2)$ и $\eta = f(P2)$ имеют характер, общий для всех электрических машин.

Механические и рабочие характеристики **двигателей независимого возбуждения** аналогичны характеристикам ДПТ параллельного возбуждения, т. к. у них ток возбуждения $I_{в}$ также не зависит от тока якоря $I_{я}$.

Свойства и характеристики двигателей последовательного возбуждения

В этих двигателях (рис. 9.8, а) ток возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{я}} = I$, поэтому магнитный поток $\Phi_{\text{в}}$ является функцией тока якоря $I_{\text{я}}$.

$$n = \frac{U}{C_E \Phi_{\text{в}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{сн}}}{C_E \Phi_{\text{в}}} I_{\text{я}} = \frac{U}{C_E \Phi_{\text{в}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{сн}}}{\sqrt{C_M k_{\text{ф}} C_E \Phi_{\text{в}}}} \sqrt{M}; \quad M \approx C_M k_{\text{ф}} I_{\text{я}}^2.$$

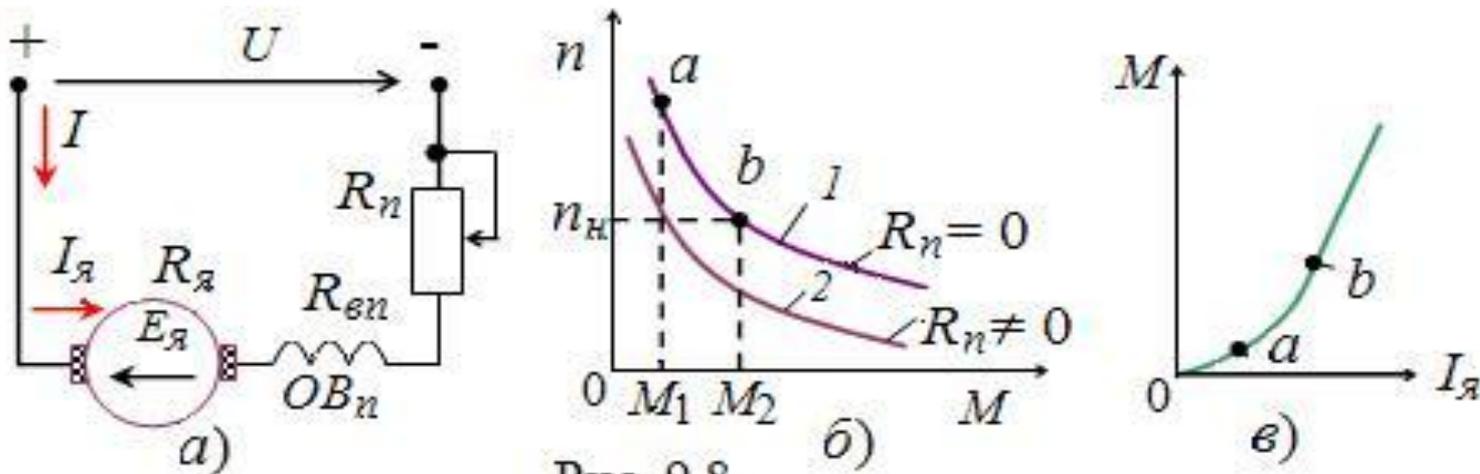
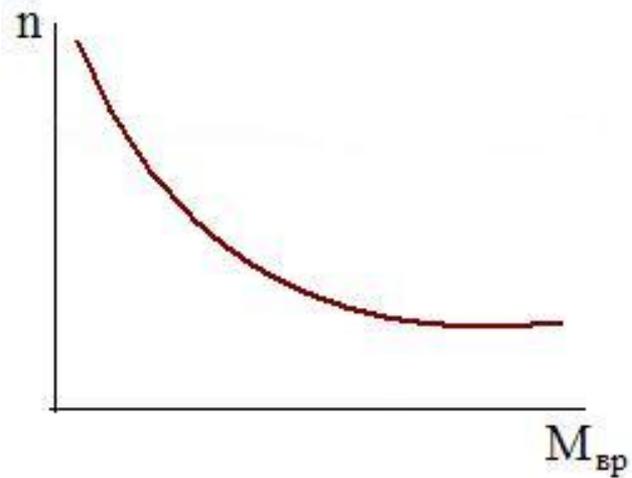


Рис. 9.8



$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c_e \cdot \Phi}$$

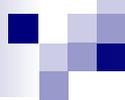
$$M = c_M \cdot \frac{I_{я} w_B}{R_M} \cdot I_{я}$$

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{я}}{c_e c_M \Phi^2} \cdot M$$

- При увеличении нагрузки двигателя возрастают падение напряжения в сопротивлении якоря и магнитный поток. Снижается скорость. Механическая характеристика получается мягкой.

При небольших нагрузках ($M < M_n / 4$) частота вращения резко возрастает, как говорят - двигатель идёт в "разнос", что опасно с точки зрения механической прочности якоря. В виду этого нельзя допускать работу ДПТ последовательного возбуждения при ХХ и при малых нагрузках.

При пуске с реостатом R_n , ограничивающим пусковой ток и момент до допустимых значений I_n и M_n , характеристика $n = f(M)$ проходит ниже характеристики I (см. кривую 2, рис. 9.8, б).



Несмотря на указанные недостатки, ДПТ последовательного возбуждения широко применяются в различных электрических приводах, особенно там, где имеет место изменение нагрузочного момента M_c в широких пределах и тяжелые условия пуска (грузоподъемные и поворотные механизмы, тяговый привод и др.).

- Иногда желательна промежуточная форма механической характеристики между мягкой и жесткой. Такой характеристикой обладает двигатель смешанного возбуждения. В этом двигателе одна из обмоток является основной, дающей не менее 70% намагничивающей силы, вторая дополнительной. Двигатель имеет мягкую механическую характеристику.

Свойства и характеристики двигателей смешанного возбуждения

В двигателях смешанного возбуждения магнитный поток создаётся в результате совместного действия МДС двух обмоток - параллельной и последовательной

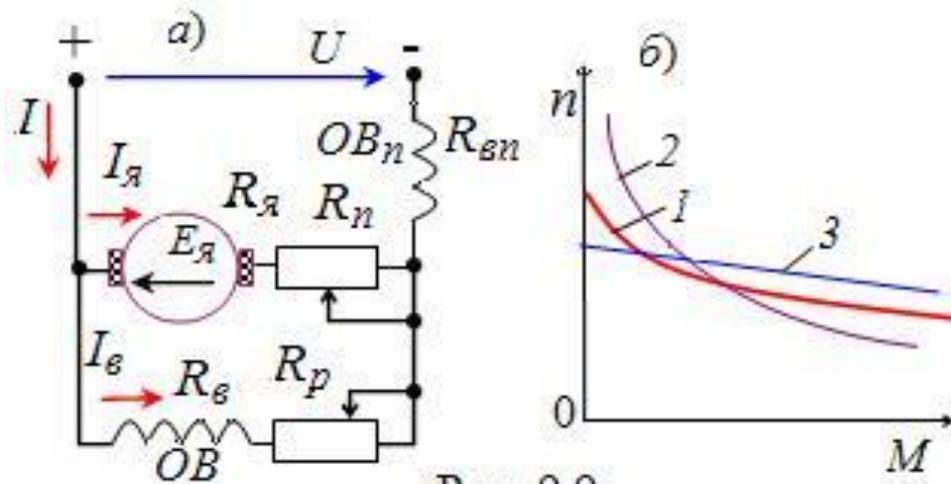


Рис. 9.9

Поэтому механическая характеристика 1 (рис. 9.9, б) ДПТ смешанного возбуждения располагается между характеристиками ДПТ последовательного (кривая 2) и параллельного (кривая 3) возбуждения. В зависимости от соотношения МДС последовательной и параллельной обмоток возбуждения характеристики $n = f(M)$ и $M = f(Iя)$ ДПТ смешанного возбуждения при номинальном режиме можно приблизить к характеристике 2 (при малой МДС параллельной обмотки) или к характеристике 3 (при малой МДС последовательной обмотки).

Одним из достоинств ДПТ смешанного возбуждения является то, что он, обладая мягкой механической характеристикой при небольших нагрузках на валу, может работать при холостом ходе, т. к. его частота вращения n_0 при ХХ имеет

11. Пуск двигателей постоянного тока

Из уравнения равновесия ЭДС двигателя (2.52) ток якоря равен:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{д}}}{r_{\text{я}}}. \quad (2.81)$$

В момент пуска частота вращения и ЭДС двигателя $E_{\text{д}} = C_e \Phi n$ будут равны нулю. Сопротивление якоря обычно мало, и при пуске ток якоря мощных двигателей $I_{\text{я}} = U / r_{\text{я}}$ превышает номинальный ток в 10-20 раз. Большой пусковой ток:

- вызывает значительные динамические усилия в двигателе, что может привести к его разрушению;
- ухудшает условия коммутации, возможен круговой огонь по коллектору;
- вызывает значительное падение напряжения в линии, что отрицательно влияет на работу других электропотребителей.
- Прямой пуск возможен только для двигателей малой мощности до 1 кВт. В остальных случаях нужно применять специальные способы пуска двигателей:
 - реостатный пуск;
 - пуск при пониженном напряжении.

Схема пуска двигателя с помощью пусковых реостатов приведена на рис. 2.56, а. (б – скоростные характеристики)

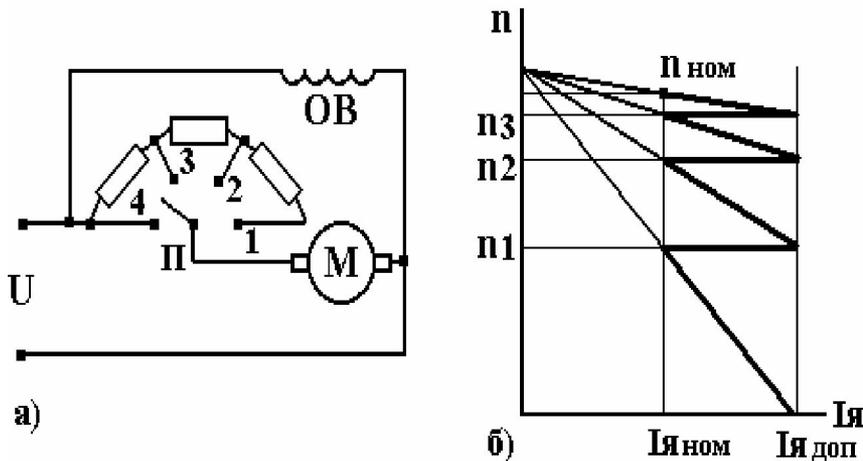


Рис. 2.56 Реостатный пуск двигателя постоянного тока

Двигатель разгоняется до частоты вращения n_2 , и снова происходит переключение переключателя в положение 3. Положению переключателя 4 соответствует естественная характеристика (прямая 4), а частота вращения — номинальной. Недостаток этого способа — большие потери в пусковом реостате.

Двигатель начинает разгон когда переключатель - в положении 1 (в цепь двигателя включены все секции пускового реостата – соответствует прямой 1 (рис. Б)). Как видно, наклон характеристики наибольший. Суммарное сопротивление пускового реостата определится по формуле:

$$r_{\text{де}} = \frac{U}{I_{\text{ядоп}}} - r_{\text{я}}, \quad (2.82),$$

— допустимый ток якоря. Обычно он превышает номинальный не более, в 2-3 раза.

Когда частота вращения достигнет значения n_1 , переключатель переводится в положение 2 (соответствует меньшему наклону скоростной характеристики (прямая 2).

Поэтому в двигателях большой мощности применяют пуск при пониженном напряжении.

Для этого **необходим регулятор напряжения:**

регулируемые автотрансформаторы с выпрямительным блоком,
генераторы постоянного тока,

тиристорные регуляторы,

широотно-импульсные преобразователи,

переключение с последовательного соединения двигателей на параллельное.

При снижении напряжения скоростные характеристики смещаются вниз (рис. 2.48 – показано ниже), и пусковой ток уменьшается.

12. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Для двигателя параллельного возбуждения частота вращения:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi}$$

Частоту вращения можно **регулировать** изменением напряжения U , сопротивления якоря $r_{\text{я}}$ или магнитного потока Φ .

•Регулирование частоты изменением напряжения.

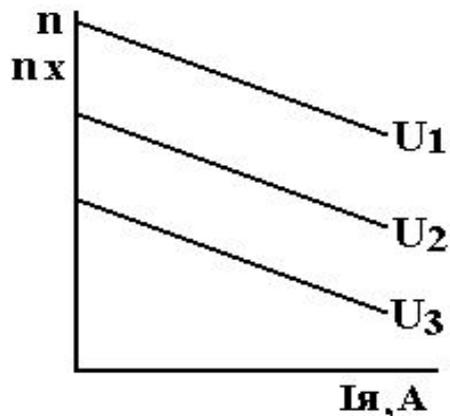


Рис. 2.48 Скоростные характеристики при изменении напряжения в цепи якоря $U_1 > U_2 > U_3$

Изменение напряжения необходимо осуществлять только в цепи якоря. Ток возбуждения и магнитный поток должен оставаться постоянным. Скоростные характеристики при этом параллельны и смещены относительно друг друга только по высоте. Диапазон регулирования ограничен «сверху» условиями коммутации, «снизу» — нагревом двигателя (при снижении напряжения нужно увеличивать ток якоря. При этом $n_{\text{max}} / n_{\text{min}} \leq 20$. Для регулирования этим способом, необходим источник регулируемого напряжения.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления якорной цепи:

$$n = n_x - \frac{I_{\text{я}} (r_{\text{я}} + r_{\text{д}})}{C_e \Phi}$$

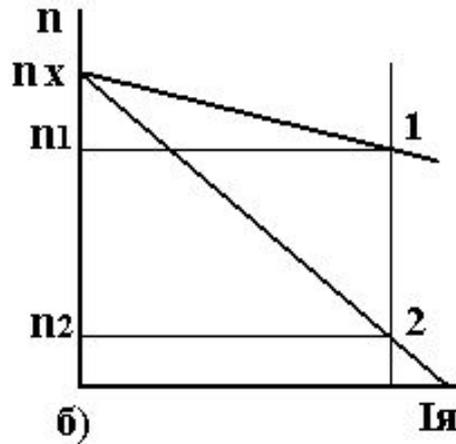
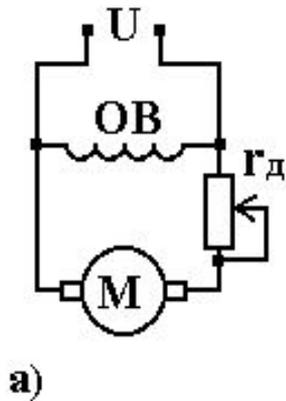


Рис. 2.53 Регулирование частоты вращения изменением сопротивления якорной цепи:
а – схема; б – скоростные характеристики

Частота вращения холостого хода не изменяется, а изменяется только наклон скоростной характеристики (рис.2.53: 1 — естественная, 2 — с дополнительным сопротивлением в цепи якоря). Регулирование возможно только в сторону уменьшения частоты вращения. Диапазон . Он ограничен сверху ≤ 4 естественной характеристикой, снизу — устойчивостью работы.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока.

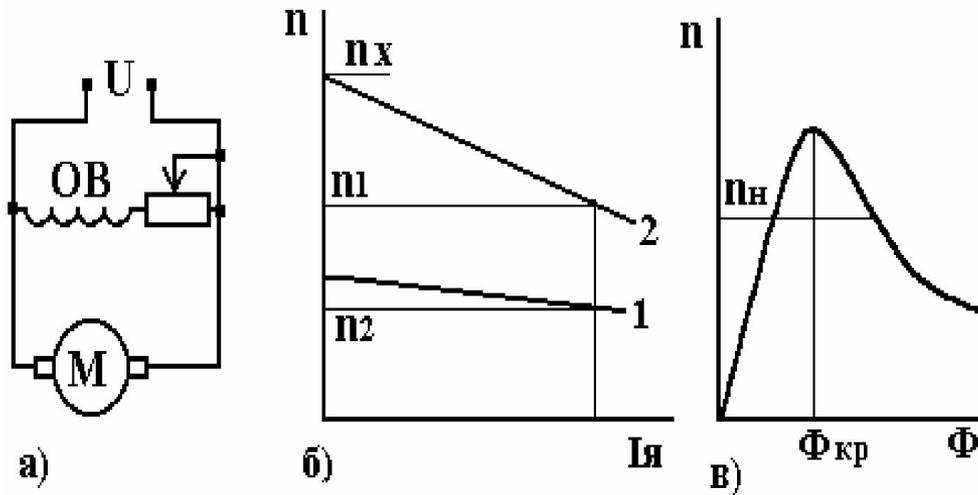


Рис. 2.54 Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока: а — схема; б — скоростные характеристики (1 — естественная; 2 — искусственная);

Магнитный поток при этом уменьшают.

Диапазон регулирования, $n_{\max} / n_{\min} = 3 \dots 4$ ограничен "снизу" насыщением стали; "сверху" — неустойчивой работой двигателя.

При изменении сопротивления реостата в цепи обмотки возбуждения будет меняться ток возбуждения и магнитный поток. При это будет меняться частота вращения. Меняется как частота вращения холостого хода, так и наклон характеристики. Значение наибольшего магнитного потока ограничено насыщением стали машины. Поэтому регулирование осуществляется в сторону увеличения частоты вращения.

25. Торможение двигателей постоянного тока

Для того остановить рабочую машину, наряду с механическими, применяют электрические способы торможения. В этом случае торможение осуществляется электромагнитным полем. Различают следующие виды электрического торможения: **рекуперативное, динамическое, противовключением.**

- **Рекуперативное** — торможение, при котором машина работает генератором с отдачей энергии в сеть. Оно наиболее экономично, но не всегда осуществимо в реальных условиях, потому что частота вращения должна быть выше, чем в режиме холостого хода
- **Динамическое** — это генераторное торможение, при котором кинетическая энергия рабочей машины и самого двигателя гасится на специальном сопротивлении.

При переключателе Π в положении 2 машина работает двигателем с частотой вращения якоря и током якоря на естественной характеристике 1. Для торможения переключатель переводят в положение 1. Якорь двигателя продолжает вращаться, обмотка возбуждения от сети не отключена и наводит магнитный поток, следовательно, машина начинает работать генератором.

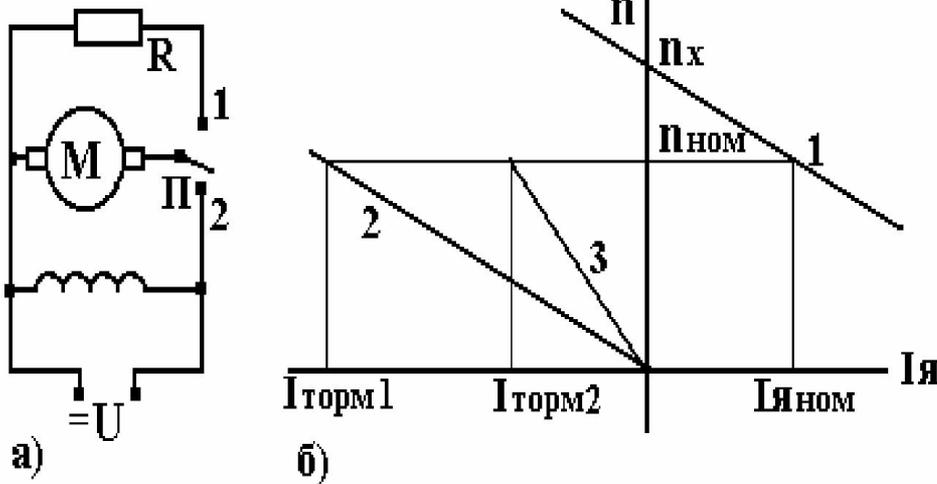


Рис. 2.59 Динамическое торможение : а — схема, б — скоростные характеристики (1 — естественная, 2 — тормозная при $R=0$, 3 — тормозная при $R>0$)

Если $R>0$, наклон скоростной характеристики увеличивается (тормозная характеристика 3), и ток торможения уменьшается до $I_{Т2}$. По мере остановки двигателя ток $\rightarrow 0$.

При переключателе Π в положении 2 машина работает двигателем с частотой вращения якоря и током якоря на естественной характеристике 1. Для торможения переключатель переводят в положение 1. Якорь двигателя продолжает вращаться, обмотка возбуждения от сети не отключена и наводит магнитный поток, следовательно, машина начинает работать генератором. Если $R=0$, ток якоря в первый момент в несколько раз больше номинального и равен $I_{Т1}$, что соответствует тормозной характеристике 2 (характеристики 1 и 2 параллельны).

Торможение противовключением. Схема включения приведена на рис. 2.60,а

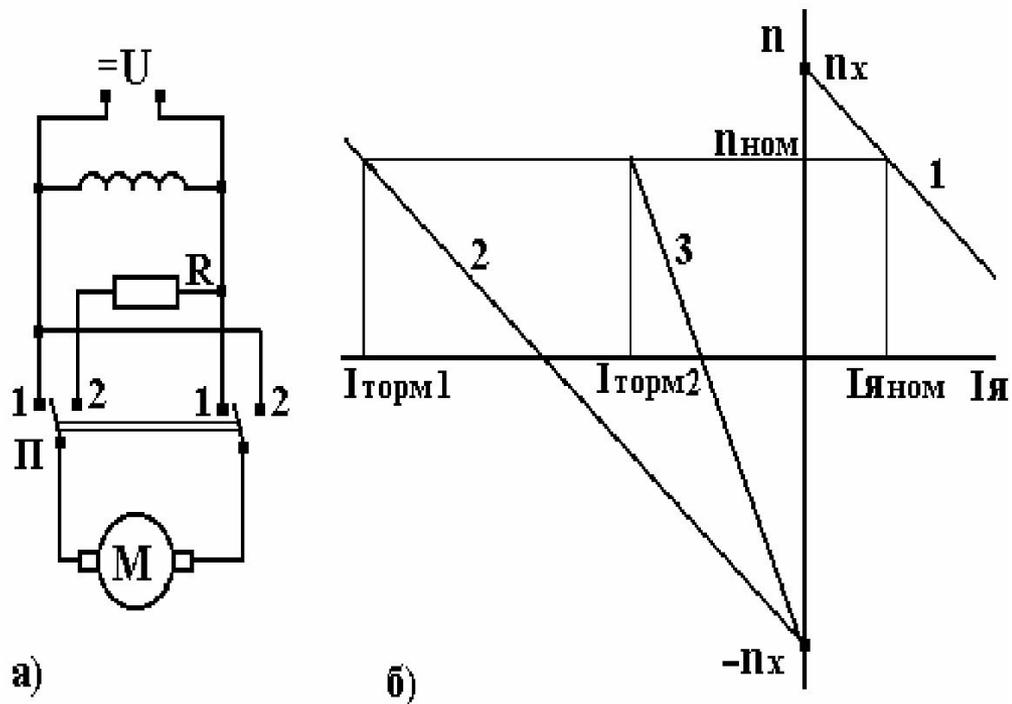


Рис. 2.60 Торможение противовключением: а — схема, б — скоростные характеристики (1 — естественная, 2 — тормозная при $R=0$, 3 — тормозная при $R>0$)

При переводе переключателя Π из положения 1 в 2, ток якоря изменится на противоположный. Согласно правилу левой руки, момент также изменится на противоположный, т.е. будет тормозить якорь. При $R = 0$ ток якоря в первый момент торможения I_{T1} будет приблизительно в 2 раза больше, чем при динамическом торможении. При $R \neq 0$ ток торможения будет I_{T2} . Тормозной момент по мере торможения будет уменьшаться пропорционально току. При $n = 0$ момент не равен 0, и если двигатель не отключить, он раскрутит якорь двигателя в обратную сторону.

Практическое задание

- Паспортные данные электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

тип двигателя 2ПФ315L

$$P_{\text{НОМ}} = 2,4 \text{ кВт}$$

$$U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$$

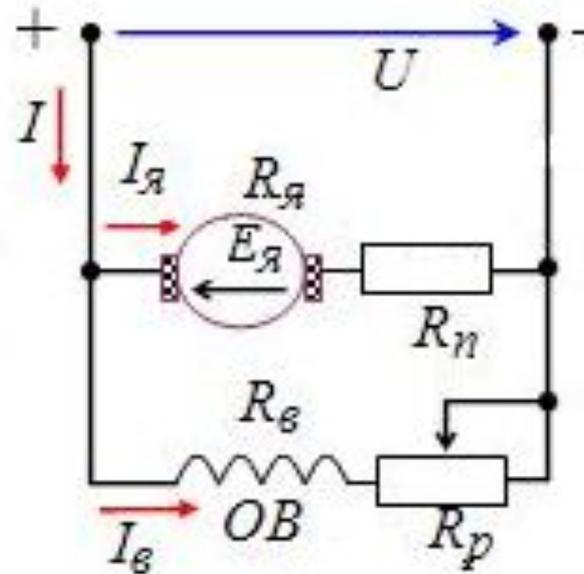
$$n_{\text{НОМ}} = 1500 \text{ об/мин}$$

$$\eta_{\text{НОМ}} = 80,8\%$$

$$R_{\text{я}} = 0,83 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{в}} = 440 \text{ Ом}$$

Электродвигатель работает с номинальным током возбуждения.



1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику двигателя. Определить частоту вращения его при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{ном}}$.
2. Определить пусковой ток якоря при прямом включении двигателя на номинальное напряжение.
3. Рассчитать величину добавочного сопротивления в цепи якоря, обеспечивающую пуск двигателя при токе якоря $2,5 I_{\text{я ном}}$.
4. Построить искусственную механическую характеристику при включении последовательно с обмоткой якоря добавочного сопротивления $R_p = 2R_{\text{я}}$.
5. Определить по искусственной механической характеристике частоту вращения ротора при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{ном}}$.

Механическими потерями в двигателе пренебречь.

1. Расчет и построение естественной механической характеристики

Номинальная мощность, потребляемая из сети

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \eta_{\text{НОМ}} = 2400 / 0,808 = 2970 \text{ Вт}$$

Номинальный момент

$$M_{\text{НОМ}} = 9,555 \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,555 \frac{2400}{1500} = 15,29 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальный ток, потребляемый из сети

$$I_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} / U_{\text{НОМ}} = 2970 / 220 = 13,5 \text{ А}$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{\text{В НОМ}} = U_{\text{НОМ}} / R_{\text{В}} = 220 / 440 = 0,5 \text{ А}$$

Номинальный ток якоря

$$I_{\text{Я НОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{В НОМ}} = 13,5 - 0,5 = 13 \text{ А}$$

Номинальная противо-ЭДС

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - R_{\text{Я}} I_{\text{Я НОМ}} = 220 - 0,83 \cdot 13 = 209,2 \text{ В}$$

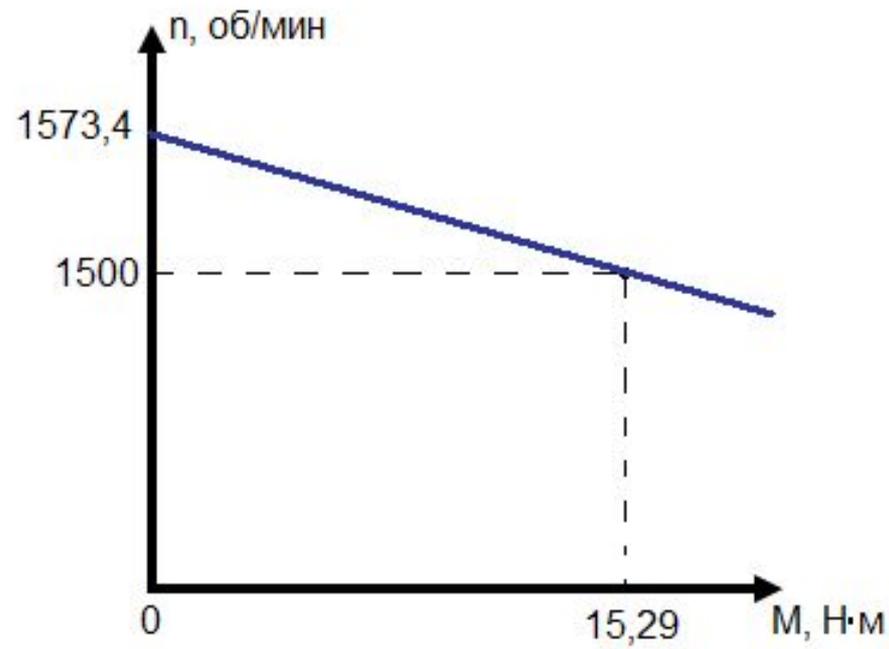
Механическая характеристика $n(M)$ – прямая линия, ее можно построить по двум точкам:

точке, характеризующей режим идеального холостого хода, с координатами $n_x, M=0$

и точке номинального режима с координатами $n_{\text{НОМ}}=1500$ об/мин, $M_{\text{НОМ}}=15,29$ Н·м.

Из четырех точек неизвестна n_x .

$$n_x = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} I_{\text{яНОМ}}} = 1500 \frac{220}{220 - 0,83 \cdot 13} = 1573,4 \text{ об/мин}$$



Частота вращения ротора при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{НОМ}}$

$$n(0,5 M_{\text{НОМ}}) = (n_x + n_{\text{НОМ}}) / 2 = (1573,4 + 1500) / 2 = 1536,7 \text{ об/мин}$$

2. При прямом пуске двигателя без пускового реостата

в первый момент $n=0$, $E_{пр} = C_E n \Phi = 0$

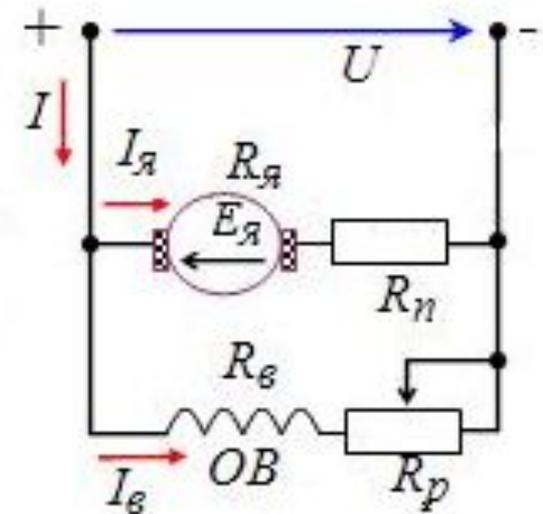
Пусковой ток якоря

$$I_{я п} = U_{НОМ} / R_{я} = 220 / 0,83 = 265,1 \text{ А}$$

3. При пуске с пусковым реостатом

$$I_{я п} = U_{НОМ} / (R_{я} + R_{п})$$

По условию $I_{я п} = 2,5 I_{я НОМ} = 2,5 \cdot 13 = 32,5 \text{ А}$



$$R_{п} = \frac{U_{НОМ}}{I_{я п}} - R_{я НОМ} = \frac{220}{32,5} - 0,83 = 5,94 \text{ Ом}$$

4. Расчет и построение искусственной механической характеристики

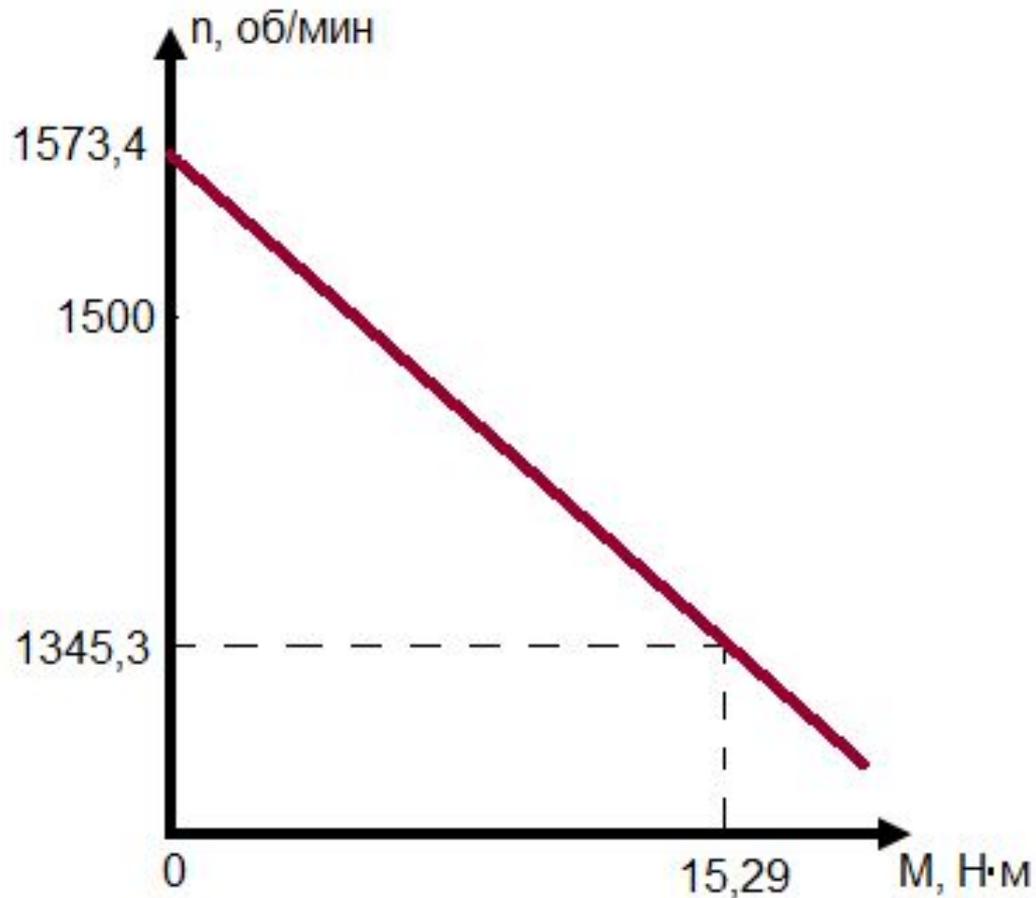
По условию $R_p = 2R_{я\text{ ном}}$, следовательно

$$R_{я} = R_{я\text{ ном}} + R_p = 3R_{я\text{ ном}} = 3 \cdot 0,83 = 2,49 \text{ Ом.}$$

Значения режима холостого хода $n_x = 1573,4$ об/мин, $M=0$.

При номинальном режиме работы $M_{\text{ном}} = 15,29 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}} - R_{я} I_{я\text{ ном}}}{U_{\text{ном}} - R_{я\text{ ном}} I_{я\text{ ном}}} = 1500 \frac{220 - 2,49 \cdot 13}{220 - 0,83 \cdot 13} = 1345,3 \text{ об/мин}$$



5. Частота вращения ротора при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{НОМ}}$

$$n(0,5 M_{\text{НОМ}}) = (n_x + n_{\text{НОМ}}) / 2 = (1573,4 + 1345,3) / 2 = 1459,35 \text{ об/мин}$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику двигателя. Определить частоту вращения его при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{ном}}$.
2. Определить пусковой ток якоря при прямом включении двигателя на номинальное напряжение.
3. Рассчитать величину добавочного сопротивления в цепи якоря, обеспечивающую пуск двигателя при токе якоря $2,5 I_{\text{я ном}}$.
4. Построить искусственную механическую характеристику при включении последовательно с обмоткой якоря добавочного сопротивления $R_{\text{д}} = 2R_{\text{я}}$.
5. Определить по искусственной механической характеристике частоту вращения ротора при моменте на валу, равном $0,5M_{\text{ном}}$.

Механическими потерями в двигателе пренебречь.

Двигатели постоянного тока серий 2ПН и 2ПФ.

№ вар	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{б}}$, Ом
1	2ПН225М	7.5	220	1500	77.0	0.35	82.4
2	2ПН225М	11	220	600	79.5	0.202	62.2
3	2ПН225М	15	220	750	80.5	0.146	62.2
4	2ПН225М	22	220	1000	82.0	0.086	62.6
5	2ПН225М	37	220	1500	86.5	0.037	45.8
6	2ПН225М	37	440	1500	86.5	0.168	43.0
7	2ПН250М	15	220	530	80.0	0.142	37.9
8	2ПН250М	18	220	630	80.5	0.11	37.9
9	2ПН250М	18	440	600	80.5	0.57	37.9
10	2ПН250М	22	220	750	81.0	0.074	37.9
11	2ПН250М	22	440	850	81.0	0.235	28.7
12	2ПН250М	37	220	1060	85.0	0.035	28.7
13	2ПН250М	37	440	1060	85.0	0.152	28.7
14	2ПН250М	50	440	1500	87.0	0.11	29,8
15	2ПН250М	55	220	1500	87.0	0.0185	26.8

№ вар	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{б}}$, Ом
16	2ПН250М	55	440	1700	87.0	0.059	20.2
17	2ПН280М	22	220	530	83.0	0.062	39.6
18	2ПН280М	30	220	600	84.5	0.046	23.0
19	2ПН280М	30	440	600	84.5	0.185	30.0
20	2ПН280М	45	220	750	86.0	0.034	28.0
21	2ПН280М	45	440	750	86.5	0.137	30.0
22	2ПН280М	75	220	1000	88.5	0.016	22.8
23	2ПН280М	75	440	1180	88.5	0.045	25.0
24	2ПН280М	90	440	1500	89.0	0.062	30.0
25	2ПН280М	110	220	1500	89.5	0.0075	22.8
26	2ПН280М	110	440	1500	89.5	0.034	30.0
27	2ПН315М	45	220	600	85.5	0.03	34.1
28	2ПН315М	45	440	600	85.5	0.12	25.6
29	2ПН315М	55	440	750	87.0	0.068	18.8
30	2ПН315М	100	440	1000	88.0	0.04	25.6

№ вар	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{б}}$, Ом
31	2ПН315М	110	220	1000	89.0	0.0082	18.8
32	2ПН315М	160	220	1500	90.0	0.004	25.6
33	2ПН315М	160	440	1900	90.0	0.0116	25.6
34	2ПФ225L	15	220	500	77.5	0.196	39,5
35	2ПФ225L	15	440	600	83.0	0.161	52.3
36	2ПФ225L	18.5	440	750	83.0	0.473	49.1
37	2ПФ225L	22	220	750	83.2	0.095	52.3
38	2ПФ225L	30	220	1060	85.0	0.049	39.6
39	2ПФ225L	30	440	1060	85.0	0.196	39.6
40	2ПФ250L	22	220	500	78.0	0.122	33.4
41	2ПФ250L	26.5	440	600	81.5	0.38	34.7
42	2ПФ250L	30	220	750	84.3	0.05	33.4
43	2ПФ250L	30	440	750	84.3	0.261	33.4
44	2ПФ250L	37	22	750	83.3	0.051	33.4
45	2ПФ250L	45	220	1000	86.0	0.03	25.1

№ вар	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{б}}$, Ом
46	2ПФ250L	45	440	1000	86.0	0.122	33.4
47	2ПФ250L	71	440	1500	88.5	0.65	31.2
48	2ПФ250L	75	220	1500	89.5	0.013	23.5
49	2ПФ280L	37	220	500	83.2	0.05	26.7
50	2ПФ280L	37	440	500	83.2	0.2	19.7
51	2ПФ280L	45	220	600	85.5	0.037	25.2
52	2ПФ280L	45	440	600	85.5	0.15	19.7
53	2ПФ280L	55	220	750	87.5	0.025	25.2
54	2ПФ280L	55	440	750	87.5	0.099	26.7
55	2ПФ280L	85	440	1000	88.7	0.05	19.7
56	2ПФ280L	45	440	500	86,0,	0.162	25.0
57	2ПФ315L	55	220	600	87.0	0.029	34.0
58	2ПФ315L	75	220	750	88.5	0.014	18.8
59	2ПФ315L	100	440	1000	88.0	0.04	25.6
60	2ПФ315L	110	220	1000	89.0	0.008	18.8