

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Лекция – презентация
по курсу «Электротехника и электроника»
раздел «Электрические машины»
для студентов направления 15.03.05
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

Автор: Литвинчук И.Е.

Общие сведения о машинах постоянного тока

Машины постоянного тока широко используются в электрических установках в качестве двигателей и генераторов.

Их мощность колеблется в пределах от долей кВт до 10 МВт и выше.

Напряжение машин постоянного тока не превосходит обычно нескольких тысяч вольт. Наибольшее распространение имеют машины, напряжение которых не превышает 1 кВ.

Скорость вращения машин постоянного тока колеблется в весьма широких пределах: от нескольких десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту.

Общие сведения о машинах постоянного тока

Применение двигателей постоянного тока (ДПТ)

ДПТ широко применяются в качестве тяговых на электровозах, тепловозах, в пригородных электропоездах, метрополитене, трамвае, троллейбусе, электрокарах, морских и речных судах.

Крановые двигатели постоянного тока часто применяются в приводе различных подъемных устройств.

С помощью мощных двигателей постоянного тока (до 12 МВт) приводятся в действие прокатные станы.

Крупные двигатели постоянного тока приводят во вращение гребные винты на судах.

В подавляющем большинстве автомобилей, тракторов, самолетов и других летательных аппаратов, имеющих систему электропитания на постоянном токе, все вспомогательные устройства приводятся в действие двигателями постоянного тока.

Основное преимущество ДПТ по сравнению с асинхронными и синхронными – возможность плавного и экономичного регулирования их скорости вращения в широких пределах и отсутствие ограничивающего верхнего предела 3000 об/мин, существующего в бесколлекторных двигателях переменного тока при 50 Гц.

Общие сведения о машинах постоянного тока

Применение генераторов постоянного тока (ГПТ)

ГПТ находят применение в промышленности для питания электропривода постоянного тока, в установках проводной и радиосвязи, авто- и авиатранспорте.

Питание обмоток возбуждения синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (возбудителей).

Широко также распространены ГПТ специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, электромашинные усилители постоянного тока и пр.).

Общие сведения о машинах постоянного тока

Основные недостатки машин постоянного тока:

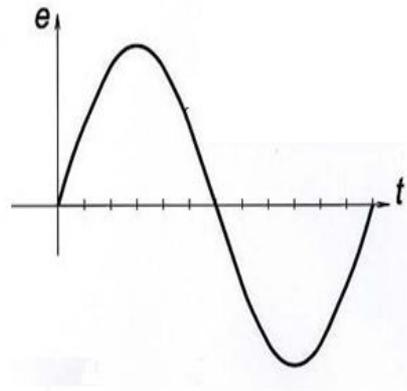
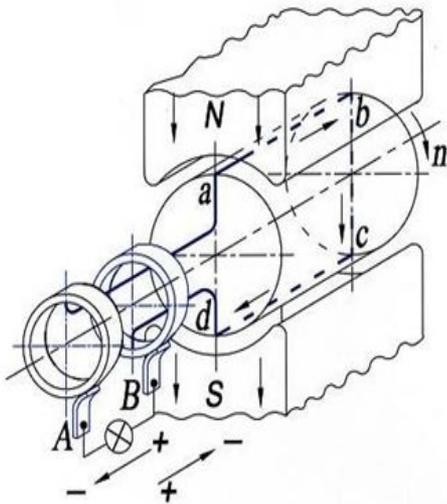
- ✓ относительно высокая стоимость (ДПТ в 2...3 раза дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели);
- ✓ более сложная технология их изготовления из-за наличия коллектора;
- ✓ несколько меньшая надежность из-за применения в основной рабочей цепи скользящих щеточных контактов, имеющих склонность к искрению;
- ✓ сравнительно быстрый износ скользящих щеточных контактов, требующих специального наблюдения в процессе эксплуатации машины.

Принцип действия простейшего ГПТ

Простейший генератор переменного тока имеет следующие компоненты: два неподвижных полюса (N и S), один виток, концы которого подсоединены к двум контактными кольцам, которые изолированы друг от друга и от вала. На кольца наложены неподвижные щетки, к которым подсоединяется нагрузка.

При вращении витка в пространстве между двумя полюсами с частотой n в витке индуцируется переменная ЭДС.

$$e_{mp}(t) = -W \frac{d\Phi}{dt} \qquad f = \frac{pn}{60}$$

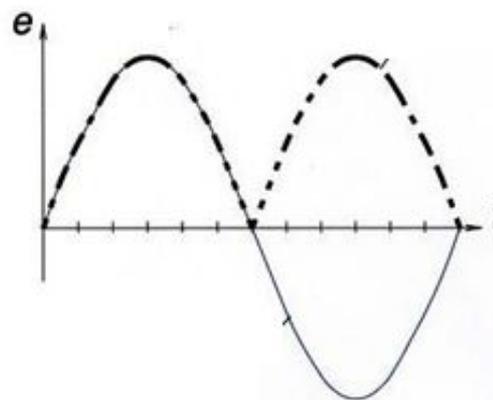
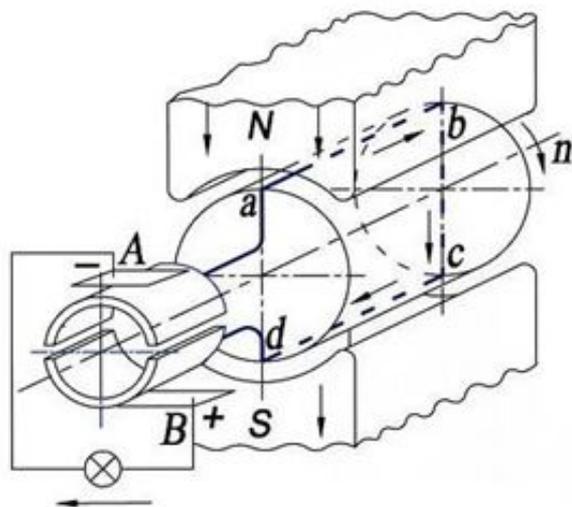


При $n = \text{const}$ изменение ЭДС во времени повторяет распределение магнитного поля под полюсом, то есть в пространстве. При наличии нагрузки и в витке и в нагрузке протекает переменный ток.

Принцип действия простейшего генератора переменного тока и форма переменной ЭДС в нагрузке

Принцип действия простейшего ГПТ

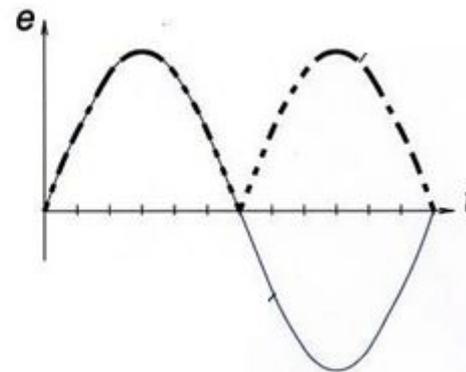
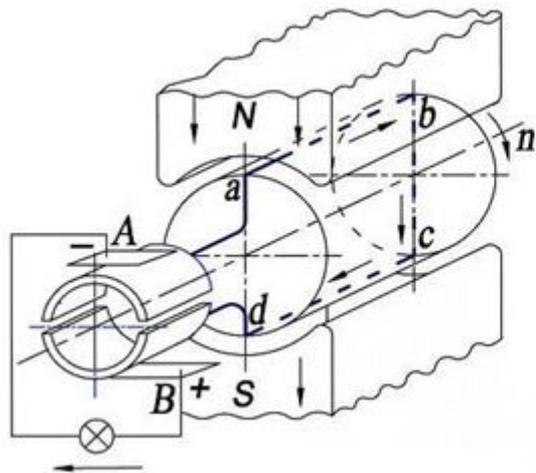
Для выпрямления $i(t)$, протекающего в нагрузке (то есть для реализации ГПТ), на валу вместо контактных колец устанавливается *коллектор*, который является *механическим выпрямителем* переменных ЭДС и тока обмотки якоря. В простейшем случае коллектор состоит из двух коллекторных пластин, которые изолированы друг от друга и от вала. Коллекторные пластины образуют цилиндр. К пластинам подсоединены концы витка якоря. На пластины наложены неподвижные щетки, к которым подсоединена нагрузка. При вращении витка (якоря) щетки скользят по поверхности цилиндра.



Принцип действия простейшего ГПТ

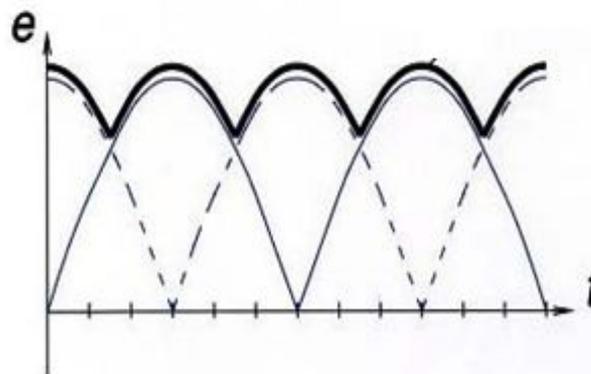
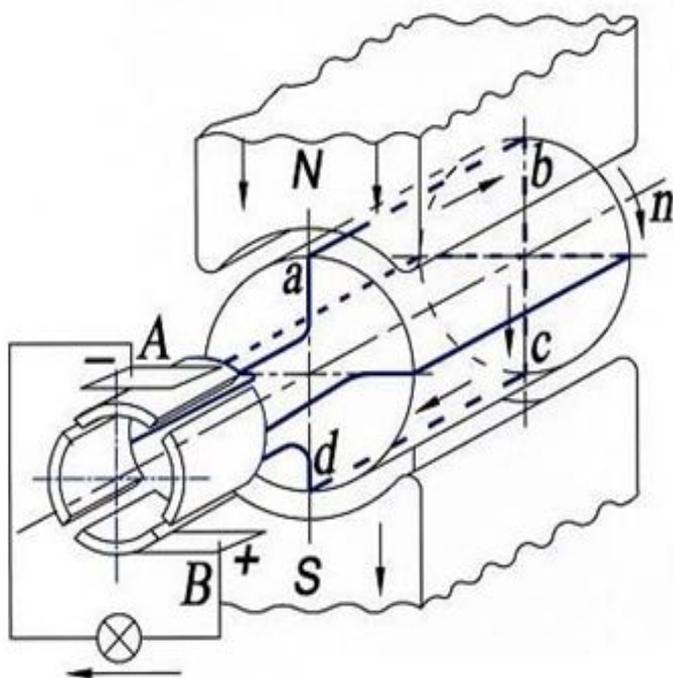
Для полного выпрямления $i(t)$, протекающего в нагрузке, необходимо щетки установить так, чтобы наводимая в витке переменная ЭДС была равна нулю в момент перехода щетки с одной пластины на другую (в этот момент виток занимает горизонтальное положение). Тогда при вращении якоря в витке будет по-прежнему наводиться переменная ЭДС, но каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно будет соединена только с тем проводником, которые находятся под полюсом данной (одной и той же) полярности.

В нагрузке при этом ток будет протекать только в одном направлении от щетки В к щетке А; другими словами происходит выпрямление переменных ЭДС и тока витка в пульсирующие ЭДС и ток в нагрузке.



Принцип действия простейшего ГПТ

Для сглаживания пульсаций необходимо разместить на якоре несколько витков, равномерно распределенных по окружности и соответственно увеличить число коллекторных пластин.

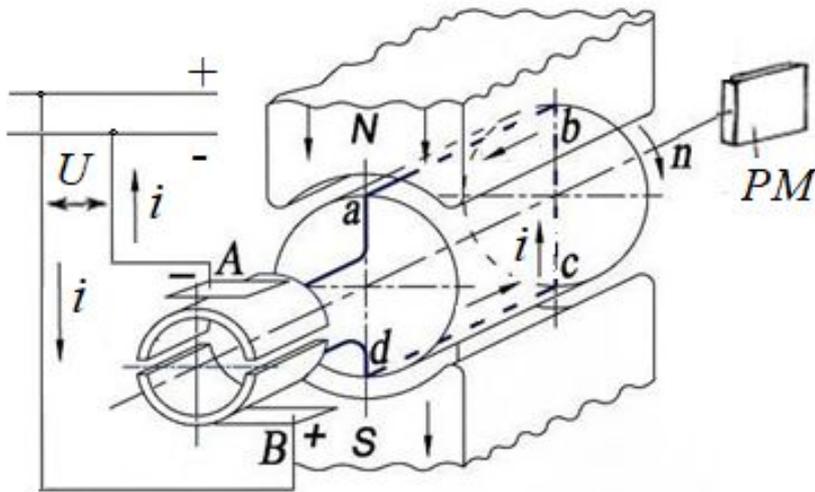


Принцип действия простейшего ДПТ

То же устройство может работать в режиме электрического двигателя, если к щеткам подвести постоянное напряжение.

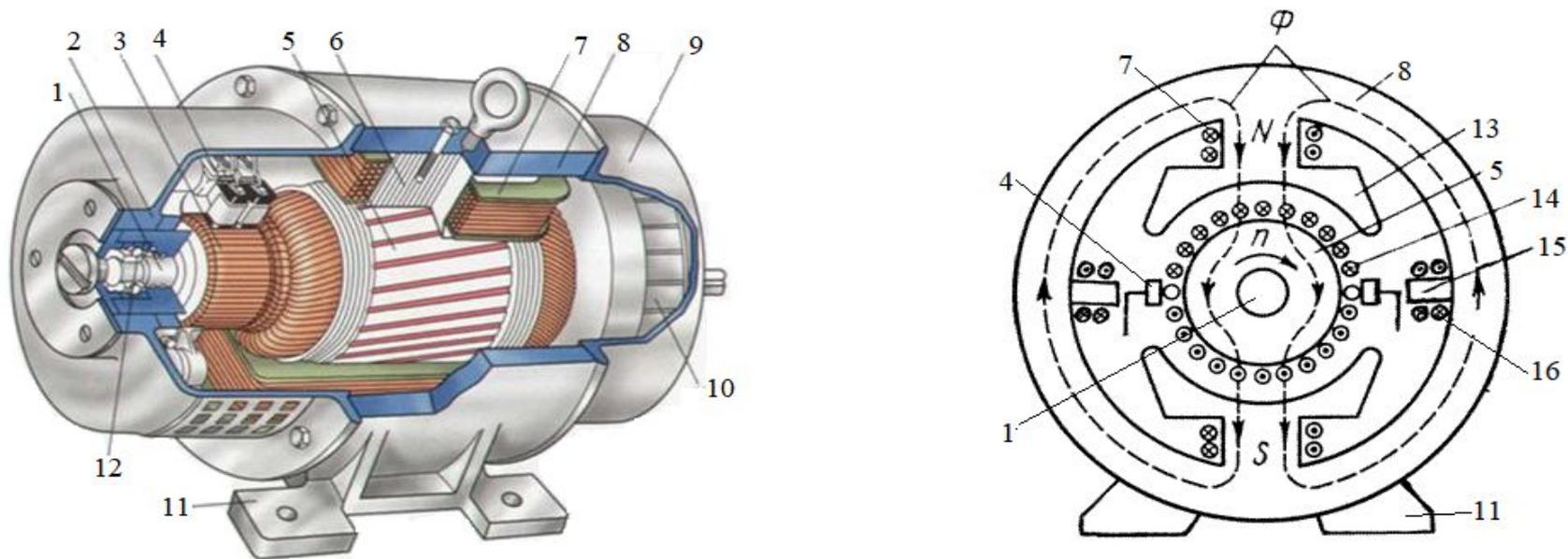
$U \rightarrow i \rightarrow F_{\text{ЭМ}}$ (направление $F_{\text{ЭМ}}$ по правилу левой руки: на верхний проводник сила действует вправо, на нижний – влево) \rightarrow эта пара сил $\rightarrow M_{\text{ВР}}$.

При переходе верхнего проводника в зону южного полюса, а нижнего – в зону северного полюса концы проводников и соединенные с ними коллекторные пластины вступают в контакт со щетками другой полярности.



Направление тока в проводниках витка изменяется на противоположное, а направление сил $F_{\text{ЭМ}}$, момента $M_{\text{ВР}}$ и тока во внешней цепи не изменяется. Виток непрерывно будет вращаться в магнитном поле и может приводить во вращение вал рабочего механизма (РМ).

Устройство машины постоянного тока



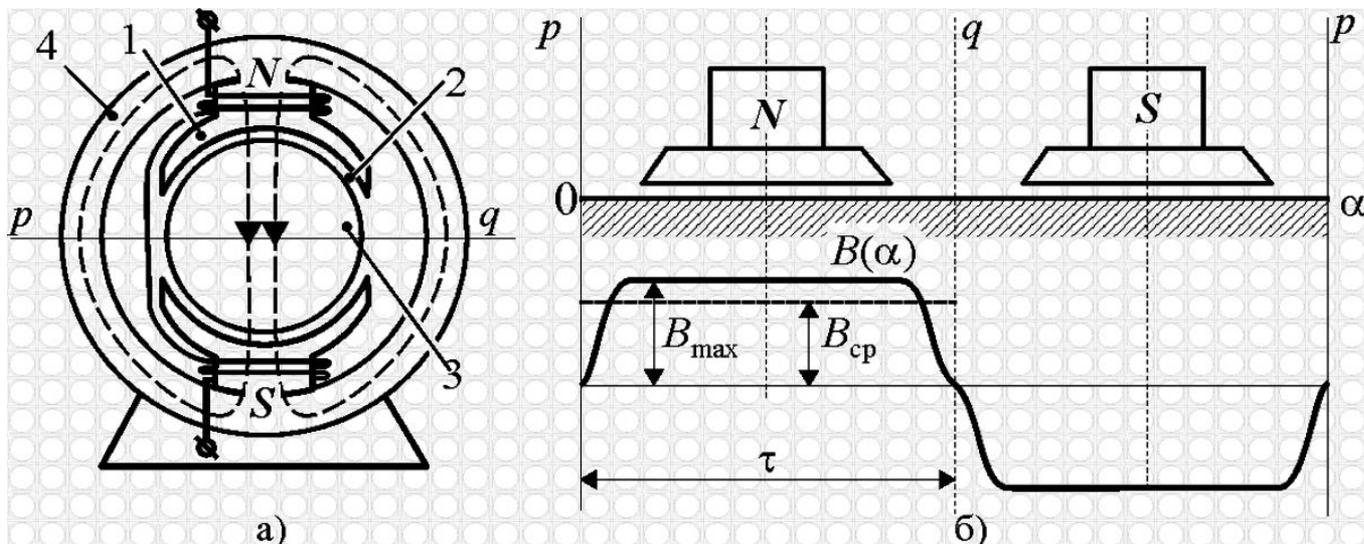
Продольный (а) и поперечный (б) разрезы МПТ

- 1 – вал; 2 – передний подшипниковый щит; 3 - коллектор;
4 –щёточный аппарат; 5 – сердечник якоря; 6 –главный полюс;
7 – обмотка возбуждения; 8 – корпус; 9 – задний подшипниковый щит;
10 – вентилятор; 11 – лапы; 12 – подшипники;
13 – полюсные наконечники главных полюсов; 14 - обмотка якоря;
15 - дополнительные полюса; 16 - обмотка дополнительных полюсов.

Магнитная и электрические цепи МПТ

Магнитная цепь главных полюсов машины предназначена для возбуждения и распределения основного магнитного потока. Она состоит из главных полюсов 1 , воздушного зазора между полюсами и якорем 2 , сердечника якоря 3 и корпуса машины или ярма 4 .

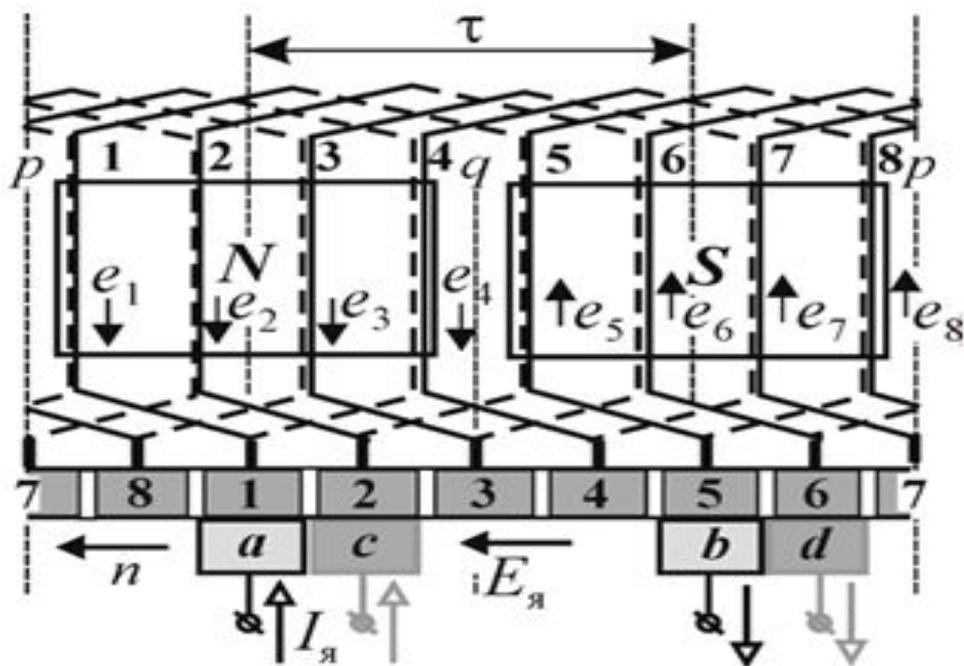
Ось симметрии pq между главными полюсами машины называется геометрической нейтралью, а дуга окружности воздушного зазора между точками её пересечения с нейтралью – *полюсным делением* τ . Полюсное деление в зависимости от решаемой задачи может измеряться в угловых или линейных единицах, а также числом пазов пакета статора или ротора.



Магнитная и электрические цепи МПТ

Обмотка якоря состоит из секций. Каждая секция укладывается в пазы пакета якоря так, чтобы её стороны находились под соседними полюсами. На рис. *a* показана схема обмотки. $1 \div 8$ - пазы якоря и пластины коллектора.

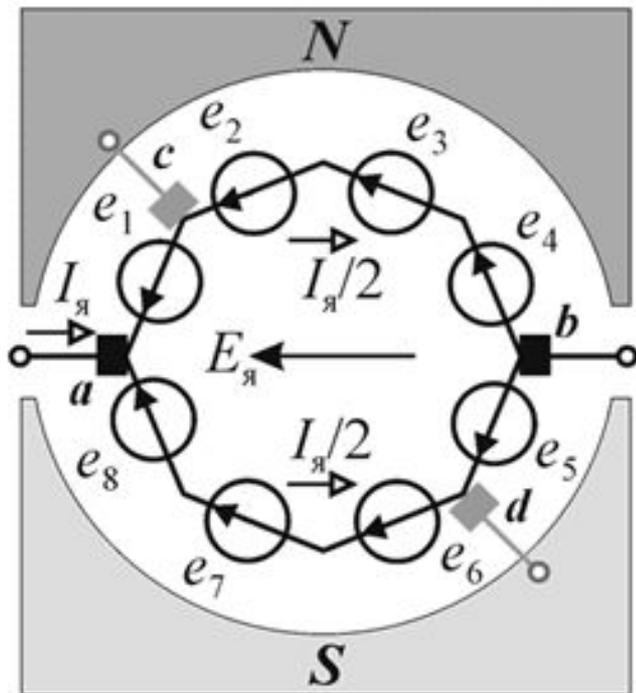
Шаг секций обмотки по пазам равен полюсному делению. В каждом пазу уложено начало одной секции (сплошная линия) и конец другой (штриховая линия) и к каждой пластине коллектора присоединены начала и концы следующих по схеме секций обмотки.



В результате образуется замкнутая в кольцо последовательная электрическая цепь, состоящая из одинаковых элементов (секций).

Магнитная и электрические цепи МПТ

Щётки машины в норме расположены на геометрической нейтрали. Они создают узлы соединения и делят последовательную кольцевую цепь обмотки на две *параллельные ветви*, по каждой из которых протекает половина тока якоря.



При вращении якоря проводники секций обмотки пересекают линии магнитного поля и в них наводятся ЭДС. Начала секций 1-4 находятся под N полюсом, а секций 5-8 – под S , поэтому в этих группах секций наводятся ЭДС противоположных знаков. Но группы секций 1-4 и 5-8 находятся в разных ветвях, поэтому по отношению к щёткам или, что то же самое, по отношению к внешней цепи их ЭДС имеют одинаковое направление и в сумме одинаковые значения. В результате образуется ЭДС якоря.

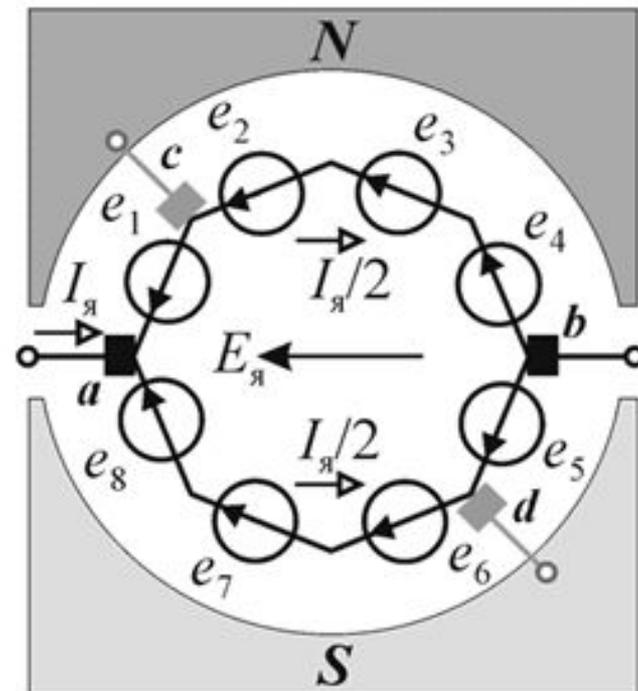
Магнитная и электрические цепи МПТ

Смещение щёток с геометрической нейтрали приводит к тому, что расположенные под разноимёнными полюсами секции оказываются в одной параллельной ветви. Например, смещение щёток из положения ab в положение cd приведёт к тому, что первая и пятая секции окажутся в ветвях с противоположным направлением ЭДС. В результате суммарная ЭДС якоря уменьшится вдвое.

Для получения ЭДС параллельной ветви нужно просуммировать ЭДС $N/2a$ проводников, входящих в параллельную ветвь.

ЭДС параллельной ветви

$$E_a = \sum_1^{N/2a} e_{\text{III}i} = \sum_{i=1}^{N/2a} B_i l v = l v \sum_{i=1}^{N/2a} B_i,$$



ЭДС обмотки якоря

При достаточно большом числе коллекторных пластин можно пренебречь незначительной пульсацией ЭДС и считать

$$\sum_1^{N/2a} B_i = \frac{N}{2a} B_{CP}.$$

где B_{CP} – среднее значение магнитной индукции полюсного деления,

$$B_{CP} = \frac{\Phi}{\tau \cdot l}.$$

v - окружная скорость якоря

$$v = \frac{\pi D}{60} n = \frac{\pi D}{2p}.$$

где D – диаметр якоря; n – скорость вращения в об/мин.

ЭДС якоря

$$E_a = \frac{pN}{a} \Phi n = C_E \Phi n.$$

где C_E - конструктивная постоянная ЭДС; Φ - магнитный поток в зазоре

Электромагнитный момент

Когда замкнута внешняя цепь, через обмотку якоря проходит ток. В генераторном режиме ток совпадает по направлению с ЭДС. На проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действует электромагнитное усилие, $F_{ЭМ} = Bl i_a$

Ток параллельной ветви обмотки якоря $i_a = \frac{I_a}{2a}$

Электромагнитный момент

$$M_{ЭМ} = \frac{N\Phi I_{Я}}{\tau 2a} \frac{D_{Я}}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{Я} = C_M \Phi I_{Я}$$

где C_M - коэффициент, определяемый параметрами машины и не зависящий от режима ее работы

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a} \approx C_E = k.$$

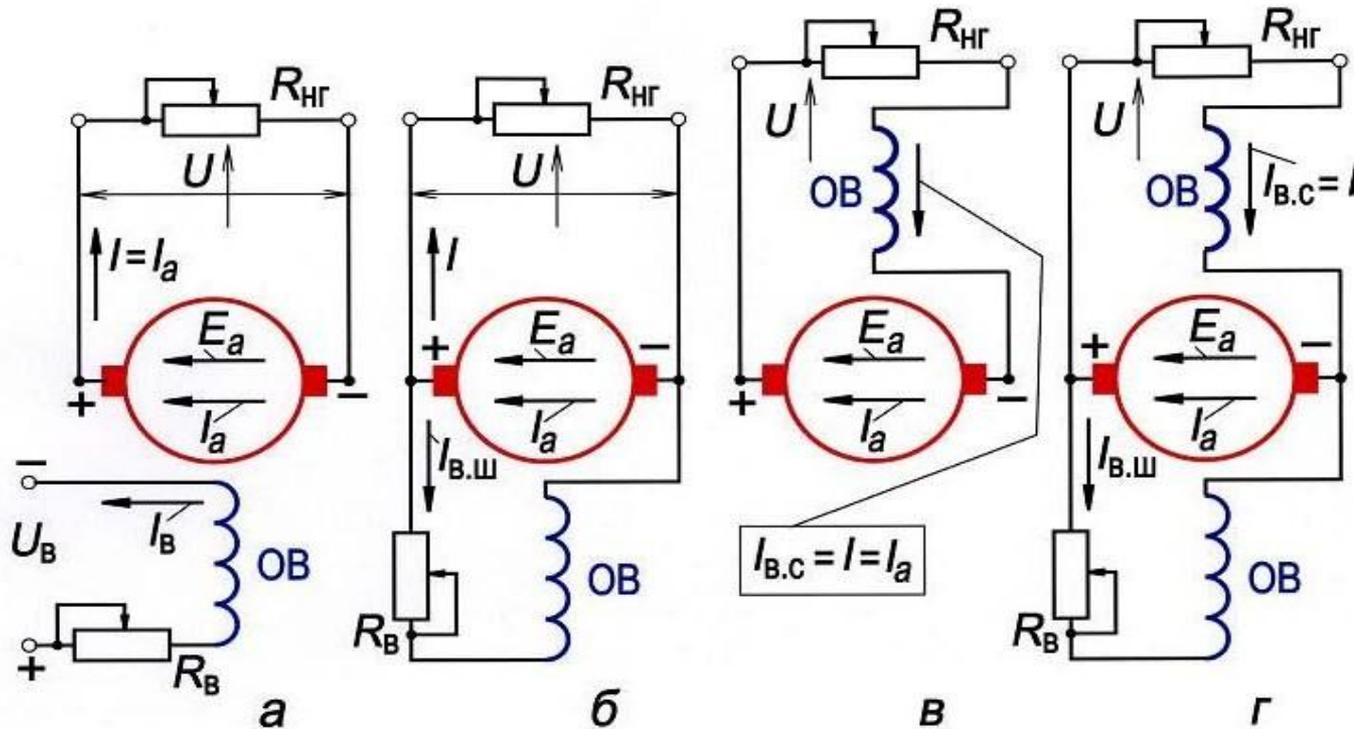
Способы возбуждения машин постоянного тока

Условное графическое изображение элемента	Название элемента
	обмотка якоря со щетками
	обмотка возбуждения главных полюсов, включенная независимо или параллельно обмотке якоря
	обмотка возбуждения, включенная последовательно с обмоткой якоря
	компенсационная обмотка
	обмотка возбуждения добавочных полюсов

Начала и концы отмоток обозначаются следующим образом:

- обмотка якоря – Я1 и Я2;
- обмотка добавочных полюсов – Д1 и Д2;
- компенсационная обмотка – К1 и К2;
- обмотка возбуждения независимая – М1 и М2;
- обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) – Ш1 и Ш2;
- обмотка возбуждения последовательная (серийная) – С1 и С2.

Способы возбуждения ГПТ

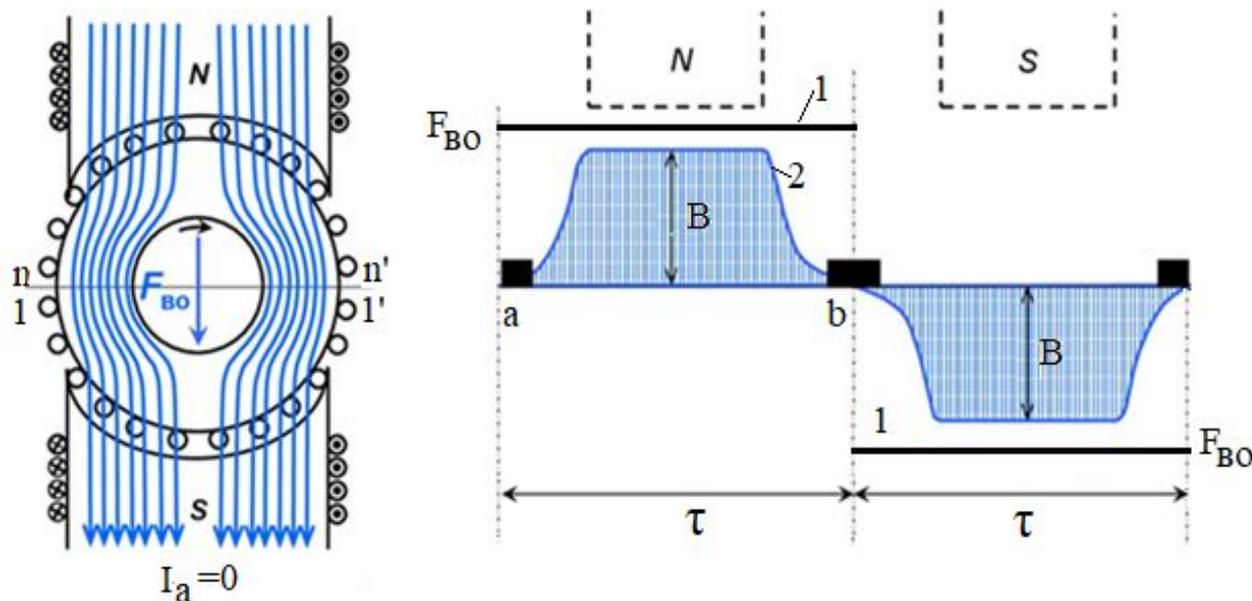


Схемы генераторов независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения (в двигателе противо-ЭДС E_a действует навстречу току якоря I_a)

Реакция якоря в машине постоянного тока

Влияние поля якоря на поле возбуждения называется *реакцией якоря*.

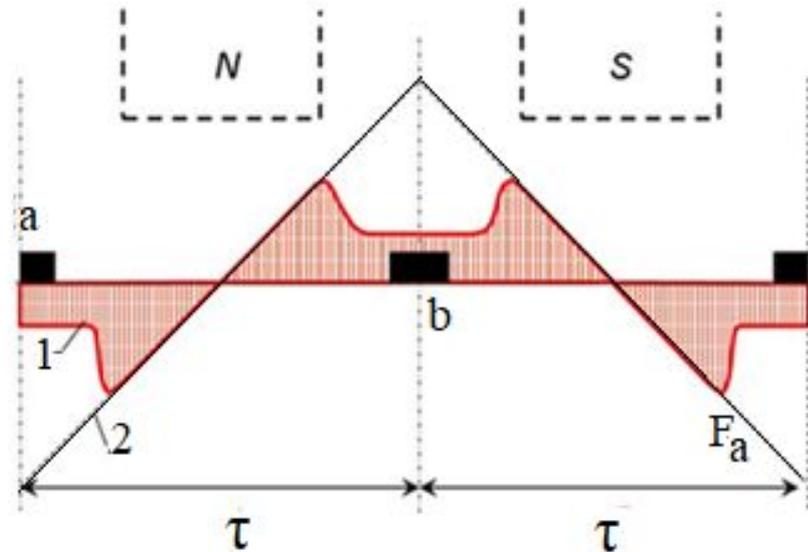
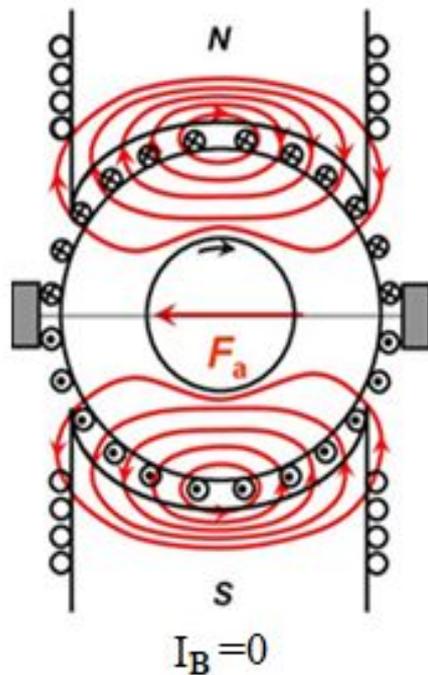
При работе ГПТ в режиме холостого хода существует только магнитное поле главных полюсов, которое создается при протекании по **обмотке возбуждения** постоянного тока. При этом условные щетки расположены на линии геометрической нейтрали 1-1'.



Картина магнитного поля обмотки возбуждения и распределение в пространстве магнитного поля (2) и МДС обмотки возбуждения (1)

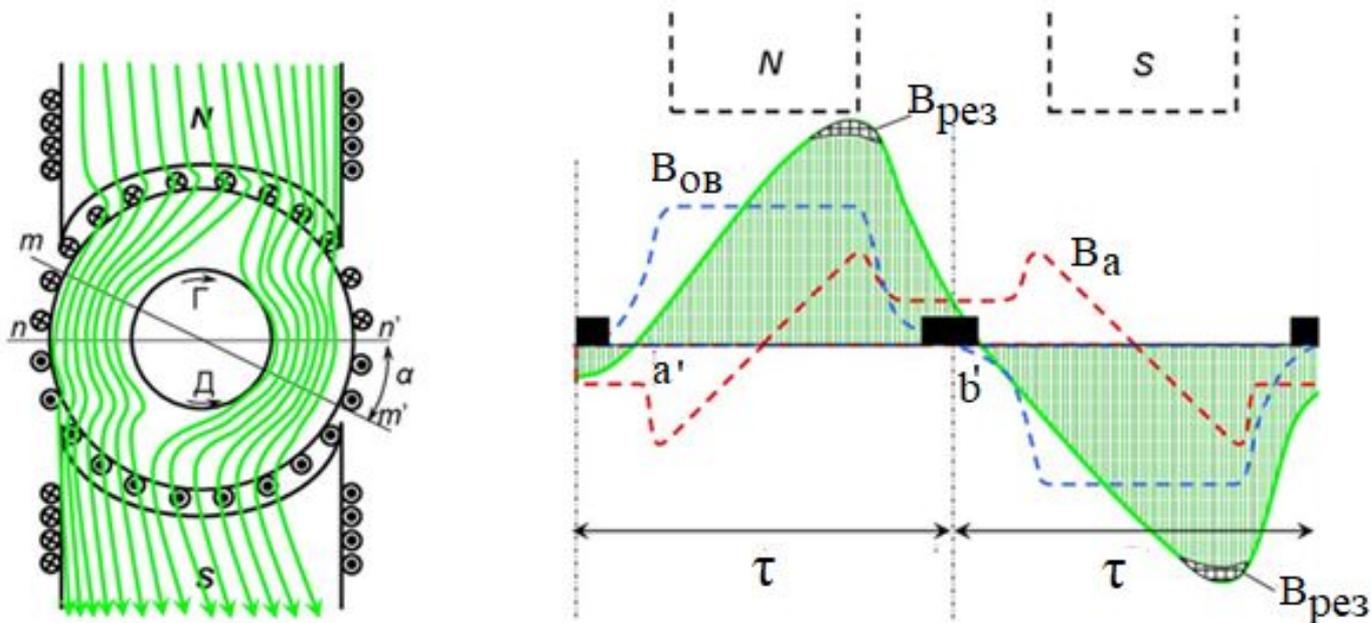
Реакция якоря в машине постоянного тока

Картина магнитного поля **обмотки якоря** и распределение в пространстве магнитного поля обмотки якоря (кривая 1) и МДС обмотки якоря (кривая 2) при нагрузке.



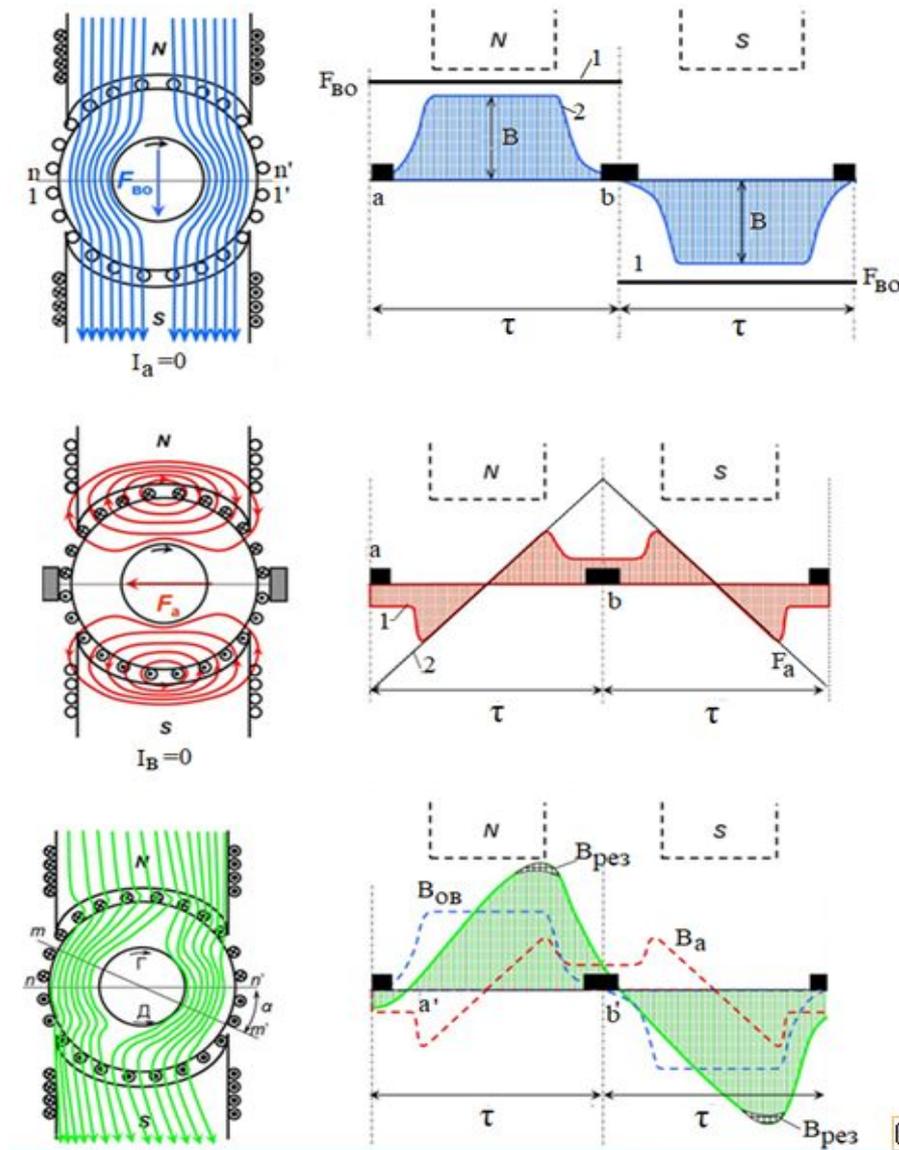
Реакция якоря в машине постоянного тока

Результирующее поле определено методом *суперпозиции*, т.е. алгебраическим суммированием соответствующих ординат поля возбуждения и поля якоря.



Картина результирующего магнитного поля машины в режиме генератора и распределение результирующего магнитного поля в пространстве

Реакция якоря в машине постоянного тока



Реакция якоря в машине постоянного тока

Примечание:

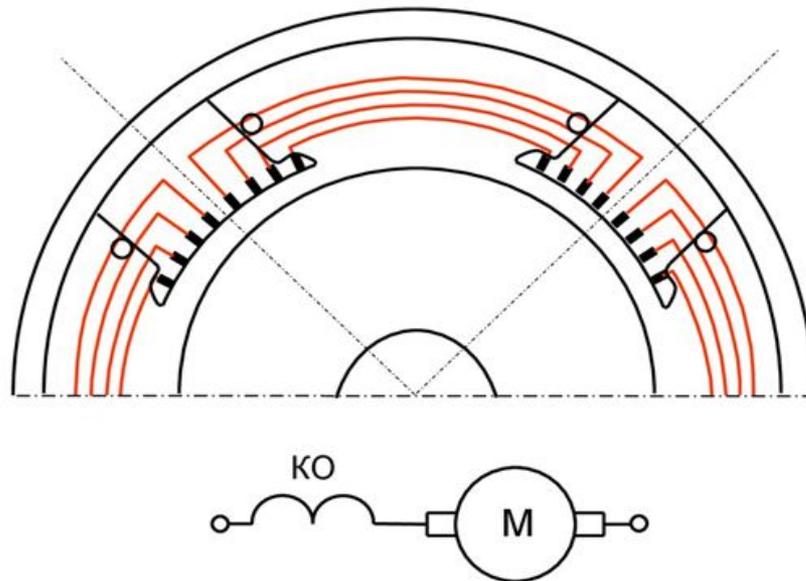
Физическая нейтраль — линия, проходящая через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком ЭДС равна нулю, поворачивается на угол α по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания — у двигателей).

При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической нейтралью.

Устранение вредного влияния реакции якоря

Меры устранения вредного влияния реакции якоря:

- **Компенсационная обмотка** укладывается в пазы полюсных наконечников и включается последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы МДС компенсационной обмотки F_K была противоположна по направлению МДС обмотки якоря F_a . Компенсационную обмотку делают распределенной по поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов машины.



Устранение вредного влияния реакции якоря

- Увеличение воздушного зазора под главными полюсами

Некоторое увеличение воздушного зазора под главными полюсами, особенно на их краях, значительно ослабляет действие реакции якоря. Однако не следует забывать, что увеличение воздушного зазора ведет к необходимости повышения МДС обмотки главных полюсов, а следовательно, и к увеличению размеров полюсных катушек, полюсов и габаритов машины в целом.

- Сердечники главных полюсов делают из листовой анизотропной (холоднокатаной) стали (обычно применяют сталь марки 3411). Эта сталь в направлении проката обладает повышенной магнитной проницаемостью, а «поперек проката» - небольшой магнитной проницаемостью. Штамповать пластины полюсов из такой стали следует так, чтобы ось полюса совпадала с направлением проката листа стали.

Коммутация в МПТ

Процесс изменения тока в секциях обмотки якоря при переходе их из одной параллельной ветви в другую называют *коммутацией*. В более широком смысле под коммутацией понимают все явления и процессы, возникающие под щетками при работе коллекторных электрических машин.

Если щетки искрят, то это значит, что машина имеет *плохую коммутацию*; если искрение отсутствует, то коммутацию называют *хорошей*.

Качество коммутации (интенсивность искрения) в значительной степени определяет работоспособность машины и ее надежность в эксплуатации.

Коммутация в МПТ

Причины искрения щеток

Искрение может вызываться большим количеством причин, которые обычно разбивают на две группы - механические и электромагнитные.

Механические причины следующие: биение коллектора, его эллиптичность, шероховатость рабочей поверхности коллектора, наличие выступающих коллекторных пластин и изоляционных прокладок, вибрация щеткодержателей и т. п. Эти причины приводят к вибрации щеток, в связи с чем возможен кратковременный разрыв контакта между щеткой и коллекторными пластинами и возникновение кратковременной электрической дуги. Особенно трудно обеспечить устойчивую работу щеток при больших окружных скоростях коллектора - примерно 50 м/с и выше, что связано с особыми свойствами щеточного контакта.

Коммутация в МПТ

Электромагнитные причины приводят к тому, что даже в случае идеального состояния щеточного контакта при выходе коллекторной пластины из-под щетки происходит разрыв электрической цепи, по которой проходит ток, и возникает короткая электрическая дуга, повреждающая сбегаящие части щетки и коллекторных пластин. Искрение, вызванное электромагнитными причинами, повреждает поверхность коллектора и приводит к вибрации щеток, т. е. способствует возникновению искрения по механическим причинам. Неустойчивость щеточного контакта, обусловленная механическими причинами, существенно влияет на электромагнитные процессы, происходящие в коммутируемых секциях. Поэтому, как правило, искрение щеток на коллекторе - это результат совместного действия многих причин.

Коммутация в МПТ

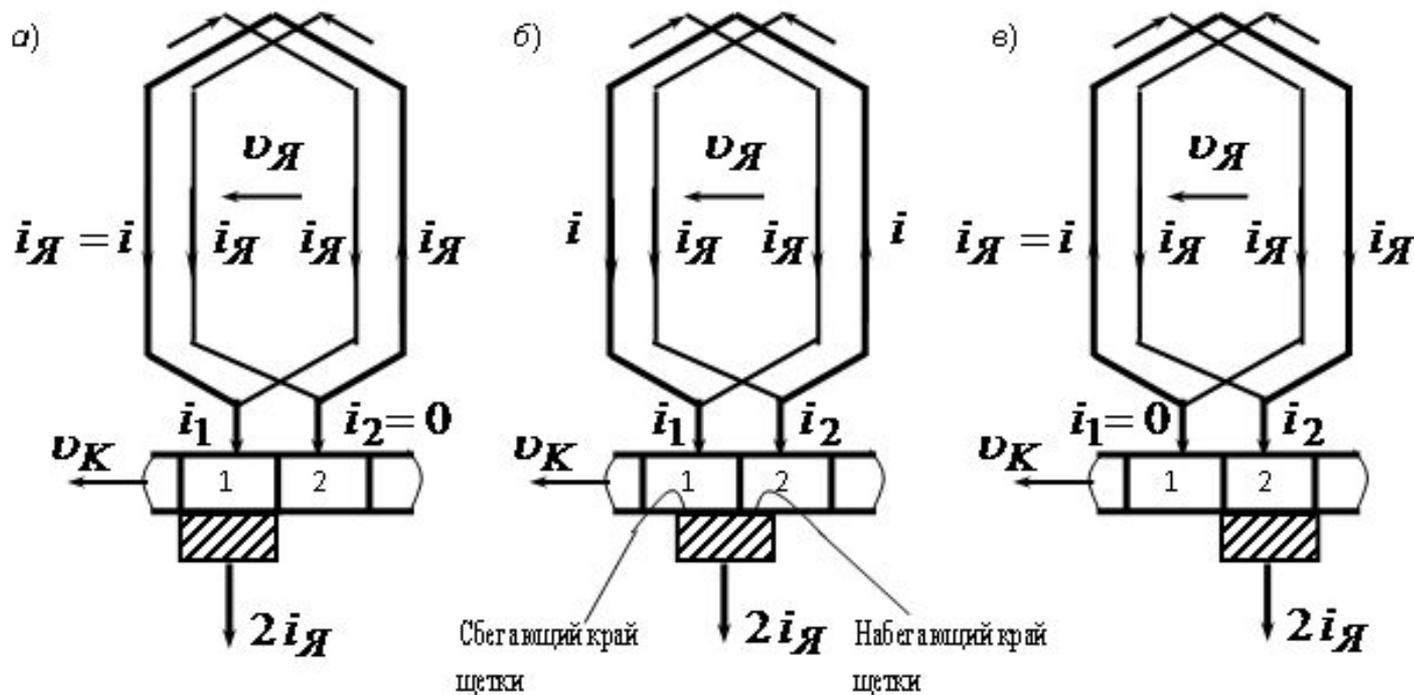
Качество коммутации оценивается *степенью искрения (классом коммутации)* под сбегающим краем щетки, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении.

Степени искрения и их характеристики, согласно ГОСТу

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
$1\frac{1}{4}$	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
$1\frac{1}{2}$	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратко-временных толчках нагрузки и перегрузках	Появление следов почернения на коллекторе, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

Коммутация в МПТ

Процесс коммутации



Коммутация в МПТ. Процесс коммутации

Характер изменения тока i в процессе коммутации может быть различным, в зависимости от величин и направлений наводимых в кз секции ЭДС.

ЭДС самоиндукции, наводимая в секции

$$e_L = -L \frac{di}{dt},$$

где L - индуктивность секции.

ЭДС взаимоиנדукции, обусловленные одновременными процессами коммутации в соседних магнитосвязанных с нею секциях

$$e_M = -M \frac{di}{dt},$$

где M – взаимоиנדуктивность между витками разных секций, расположенных в одном пазу.

Поле реакции якоря и внешнее поле индуктора, действуя совместно, образуют в зоне коммутируемых секций результирующее (коммутирующее) поле. Индуцируемая этим полем в коммутируемой секции ЭДС называется коммутирующей - e_k

Если поток главных полюсов изменяется во времени, то в коммутируемой секции индуцируется ЭДС трансформации (пульсации):

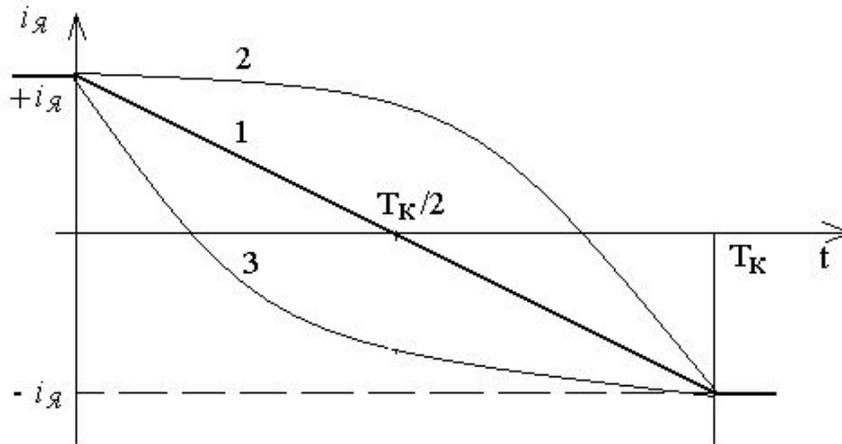
$$e_{TP} = -w \frac{d\Phi_\delta}{dt}.$$

Коммутация в МПТ. Процесс коммутации

Суммарная ЭДС, действующих в короткозамкнутой секции

$$\sum e = e_L + e_M + e_K + e_{TP}$$

Виды коммутации



1 - прямолинейная;

2 - замедленная ;

3 - ускоренная

Прямолинейная коммутация - в коммутирующей секции $i \sim t$. Это идеальный случай коммутации. Он характерен тем, что в коммутирующей секции никакого добавочного тока коммутации не возникает, и в любой момент времени плотности тока под обеими частями щеток одинаковы. Причин к искрообразованию нет, поскольку ни одна часть щеток не перегружается током.

$$e_{TP} = e_M = 0, \quad e_K = -e_L = 0$$

Коммутация в МПТ. Процесс коммутации

Замедленная коммутация, при которой изменение тока в начале коммутации происходит медленно и ускоряется к концу. Величина тока на сбегающем крае щетки в этом случае сохраняется большой вплоть до конца коммутации, вследствие чего и плотность тока под этим краем щетки к концу коммутации становится большой. При замедленной коммутации возникают благоприятные условия для искрения под сбегающим краем щетки.

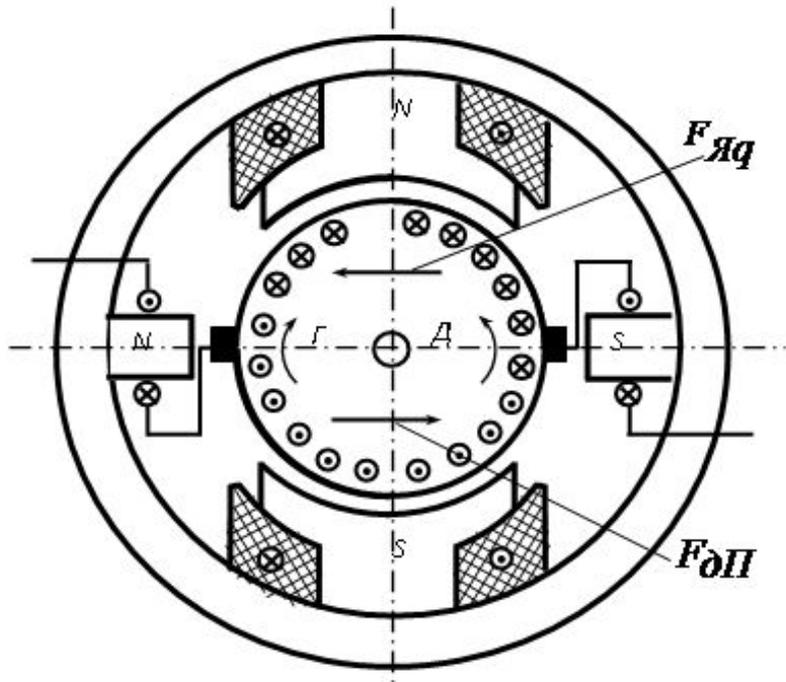
Ускоренная коммутация, при которой токи изменяются быстро в начале коммутации. При этом существует некоторая тенденция к искрению под набегающим краем щетки.

Таким образом, замедленная коммутация является неблагоприятной и нежелательной, а слегка ускоренная — благоприятной. На практике стремятся достичь именно такой коммутации.

Способы улучшения коммутации

1) Основным способом улучшения коммутации в современных машинах постоянного тока является создание коммутирующего магнитного поля с помощью **добавочных полюсов**.

Обмотки добавочных полюсов включают так, чтобы за главным полюсом данной полярности по направлению вращения якоря в режиме генератора следовал добавочный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – добавочный полюс той же полярности.



Добавочные полюсы применяют в машинах мощностью более 0,3 кВт. Обычно число добавочных полюсов равно числу главных. В машинах мощностью до 2 кВт иногда делают половинное число добавочных полюсов.

Способы улучшения коммутации

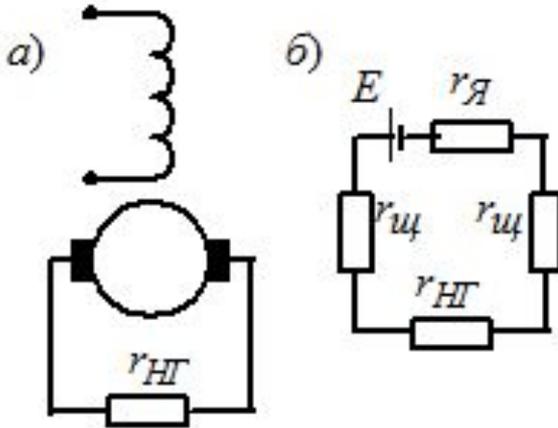
2) В машинах мощностью несколько десятков кВт добавочные полюсы не ставят. Коммутирующее поле при этом можно создать путем сдвига щеток с геометрической нейтрали, благодаря чему в зоне коммутации начинает действовать поле главных полюсов. Чтобы индуктируемая этим полем ЭДС в коммутируемой секции имела правильное направление, поле главных полюсов в зоне коммутации должно быть направлено против поля реакции якоря. Для этого в генераторе щетки необходимо повернуть в сторону вращения, а в двигателе – наоборот.

3) Важную роль в процессе коммутации играют щетки, которые по своей физической природе являются нелинейными сопротивлениями. При быстром \uparrow плотности тока под сбегающим краем щетки сопротивление щетки резко \uparrow , что ведет к \downarrow остаточного тока или полному его устранению даже в том случае, когда коммутация является неидеальной. В электрических машинах большой и средней мощности применяют электрографитированные щетки с большим падением напряжения в скользящем контакте (2,4...3,5 В на пару щеток). Такие щетки получают в электропечах путем нагревания заготовок из угля и кокса до температуры 2000-2500°C, при этом они принимают структуру графита.

Генераторы постоянного тока (ГПТ)

Уравнение напряжений

$$r_{\text{НГ}}I + 2r_{\text{щ}}I_{\text{Я}} + r_{\text{Я}}I_{\text{Я}} = E$$



$$U = E - R_{\text{Я}}I_{\text{Я}}.$$

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

$$E = C_e n \Phi$$

ГПТ

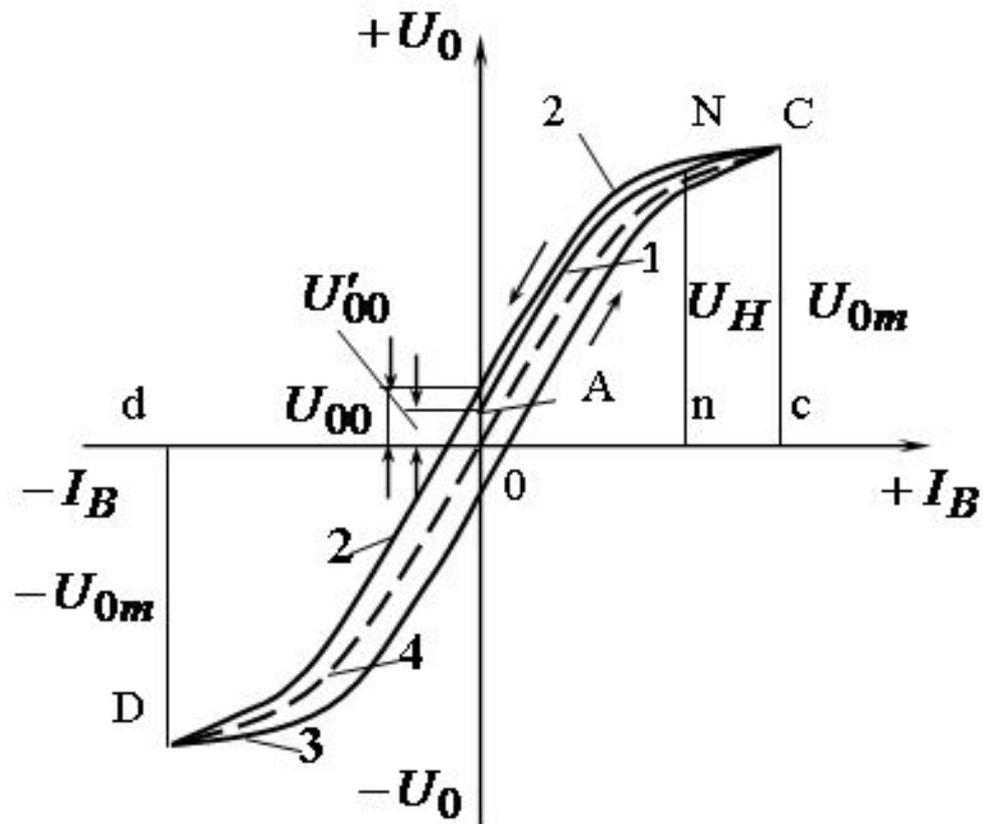
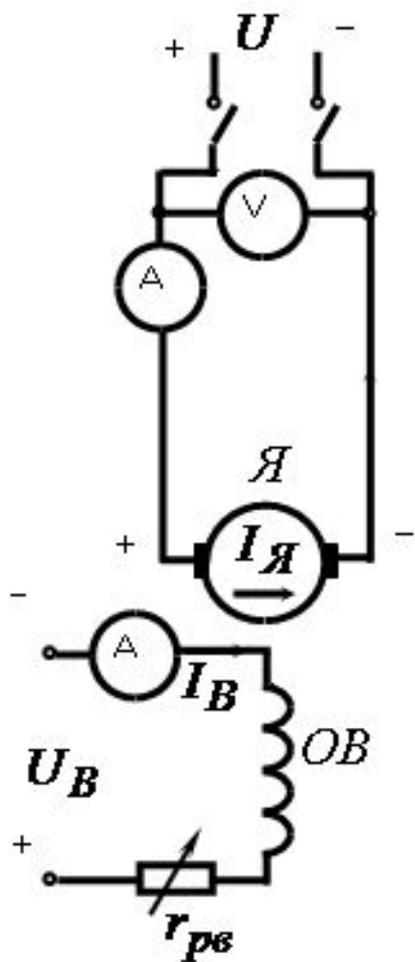
Свойства генераторов анализируют по характеристикам – зависимостям между основными величинами, определяющими работу генераторов. К таким величинам относят: напряжение на зажимах, ток возбуждения, ток якоря или нагрузки, частоту вращения n .

Основные характеристики генераторов:

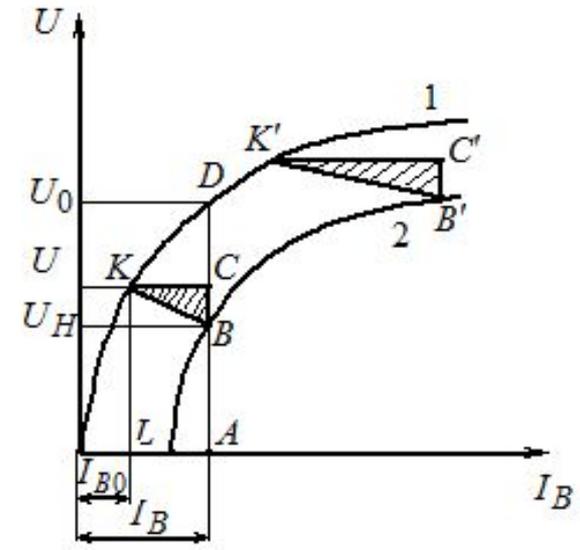
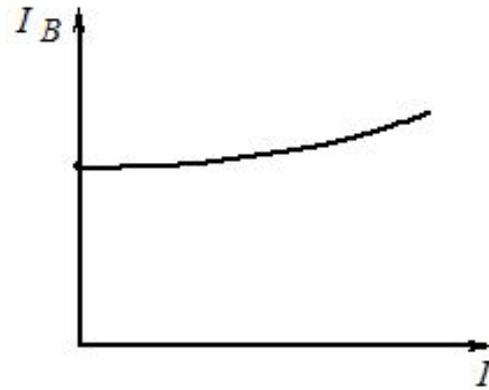
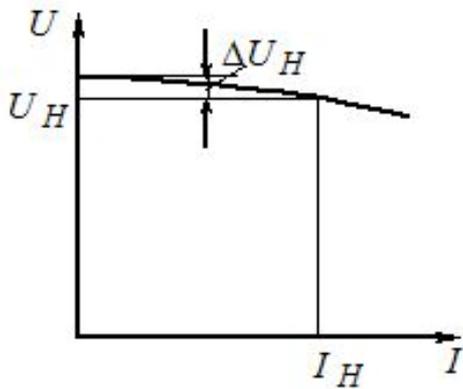
- 1) характеристика холостого хода - зависимость напряжения или ЭДС якоря E от тока возбуждения при холостом ходе и постоянной частоте вращения;
- 2) характеристика короткого замыкания - зависимость тока якоря от тока возбуждения генератора которую снимают при замыкании выходных зажимов цепи якоря накоротко и постоянной частоте вращения;
- 3) внешняя характеристика - зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при неизменном значении тока возбуждения и частоты вращения;
- 4) регулировочная характеристика - закон изменения тока возбуждения, для поддержания величины напряжения на зажимах машины неизменным при изменении нагрузки,
- 5) нагрузочная характеристика аналогична характеристике холостого хода, но при некотором токе в якоре, неизменном на протяжении опыта .

ГПТ независимого возбуждения (ГПТ НВ)

Характеристика холостого хода



ГПТ независимого возбуждения (ГПТ НВ)



Внешняя, регулировочная и нагрузочная характеристики
ГПТ НВ

ДВИГАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МПТ

Уравнение напряжения и тока

В двигателях направление действия ЭДС якоря E противоположно направлению тока якоря, и поэтому E называют также противоэлектродвижущей силой якоря.

Напряжение для цепи якоря двигателя

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

В режиме двигателя всегда $U > E$.

Ток якоря

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

$$E = C_e n \Phi.$$

Уравнение электромеханической характеристики двигателя

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

Уравнение механической характеристики двигателя

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} M}{C_e C_m \Phi^2}.$$

ДВИГАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МПТ

Пуск двигателей постоянного тока

При пуске двигателей в ход необходимо:

1. Обеспечить надлежащий пусковой момент и условия для достижения необходимой скорости вращения.
2. Предотвратить возникновение чрезмерного пускового тока, опасного для двигателя.

При этом операция пуска должна быть экономичной по затрате энергии, а пусковая аппаратура – по возможности дешевой и надежной.

Возможны три способа пуска двигателей в ход:

1. Прямой пуск, когда цепь якоря непосредственно подключают к сети.
2. Пуск с помощью пусковых реостатов или пусковых сопротивлений (реостатный пуск), включаемых последовательно в цепь якоря.
3. Пуск при пониженном напряжении цепи якоря.

ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Естественные электромеханическая и механическая характеристики

Характеристики называются естественными, если в цепи якоря отсутствует дополнительное сопротивление.

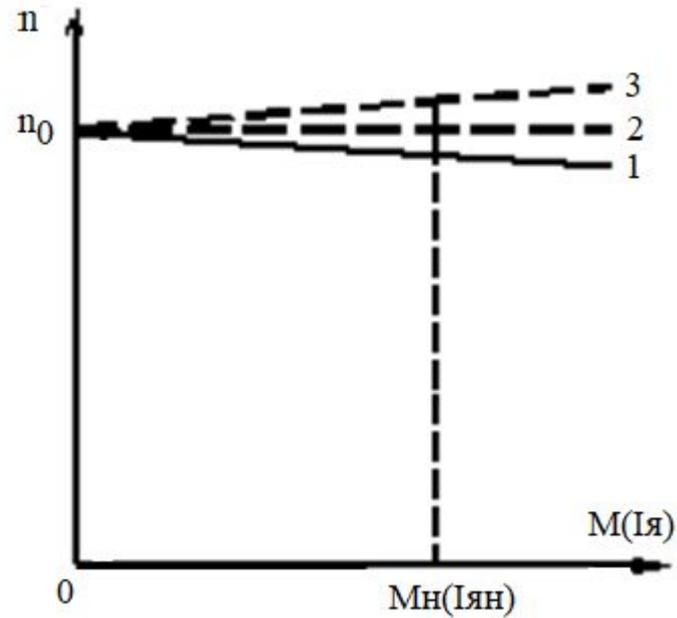
При установке щеток на геометрической нейтрали с \uparrow тока $I_{\text{я}}$ магнитный поток Φ несколько \downarrow , вследствие действия поперечной реакции якоря \rightarrow частота вращения $n \uparrow$. Падение напряжения вызовет \downarrow частоты вращения.

Таким образом, возможны три вида характеристики:

- 1 – преобладает влияние падения напряжения в ОЯ;
- 2 – при взаимной компенсации влияния падения напряжения в ОЯ и уменьшения Φ_{δ} ;
- 3 – преобладает влияние уменьшения Φ . (неприемлема по условиям устойчивости работы).

Ввиду того, что изменение Φ относительно мало, механические характеристики двигателя параллельного возбуждения, при совпадают по виду с характеристиками.

ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)



Механическая / электромеханическая характеристика
ДПТ НВ (ДПТ ПВ)

ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Регулирование частоты вращения

Регулировать частоту вращения можно:

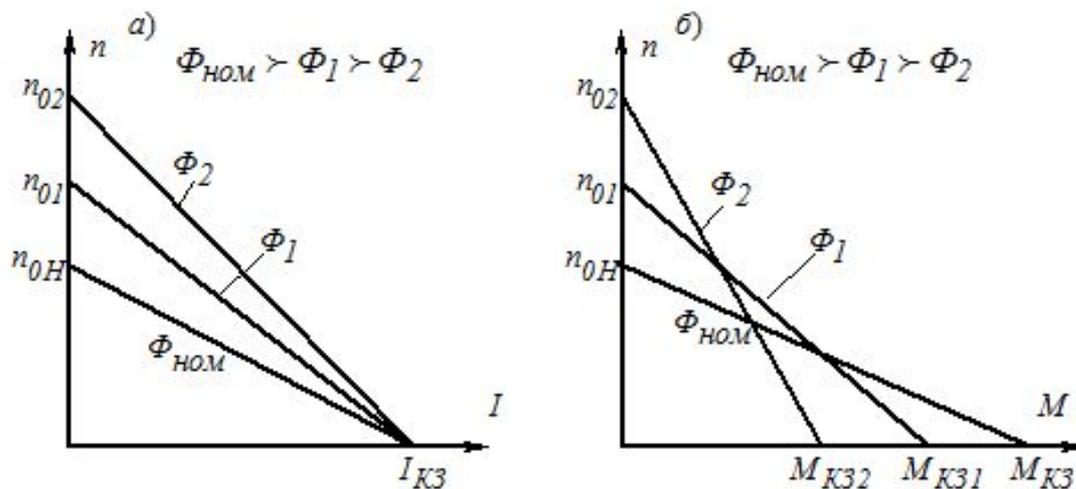
- ✓ изменением магнитного потока,
- ✓ изменением сопротивления цепи якоря,
- ✓ изменением величины питающего напряжения

ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока

Регулирование частоты изменением магнитного потока применяют широко вследствие его простоты и экономичности, так как регулирование осуществляют в относительно маломощной цепи возбуждения. Магнитный поток изменяют в сторону уменьшения, потому что в номинальном режиме магнитная цепь машины близка к насыщению, и при увеличении магнитного потока значительно возрастает ток и увеличиваются потери и нагрев двигателя. Регулируют ток возбуждения с помощью реостата в цепи возбуждения .

↓ магнитного потока → к ↑ частоты вращения идеального холостого хода.

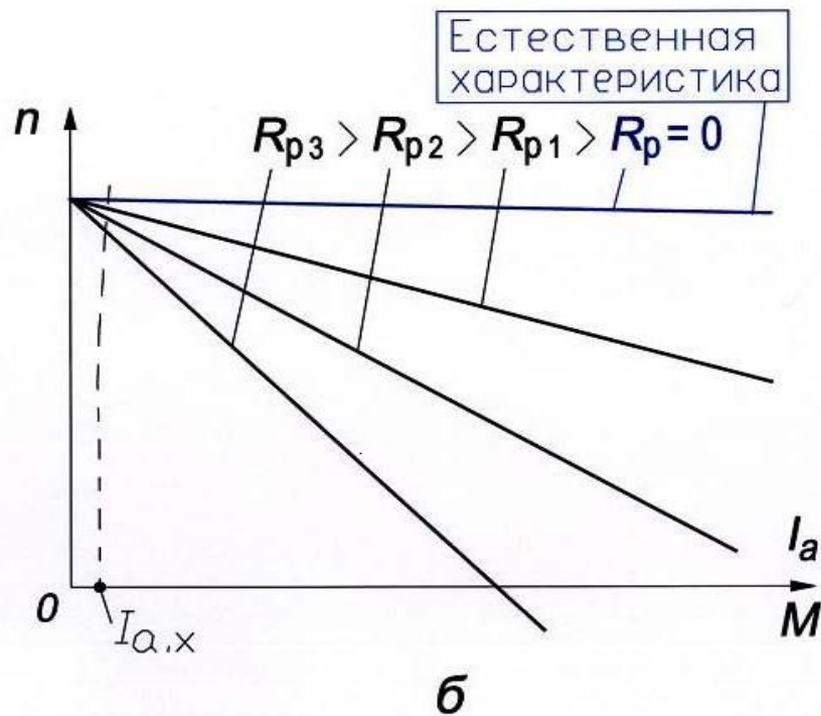
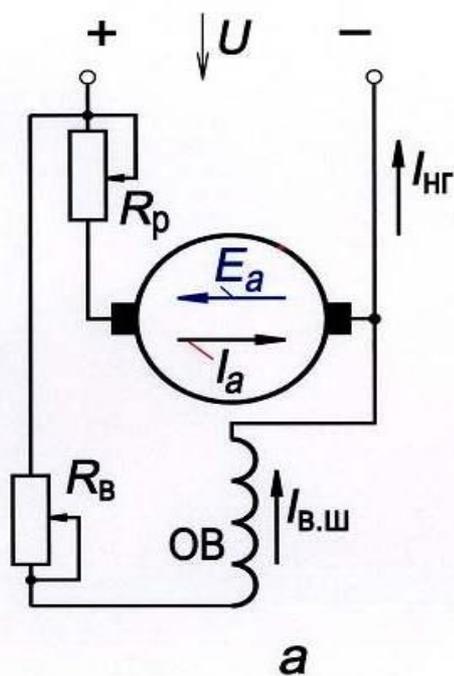


ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Регулирование частоты вращения
введением сопротивления в цепь якоря

$$n = \frac{U - (R_{\text{Я}} + R_{\text{РЯ}})I_{\text{Я}}}{C_e \Phi},$$

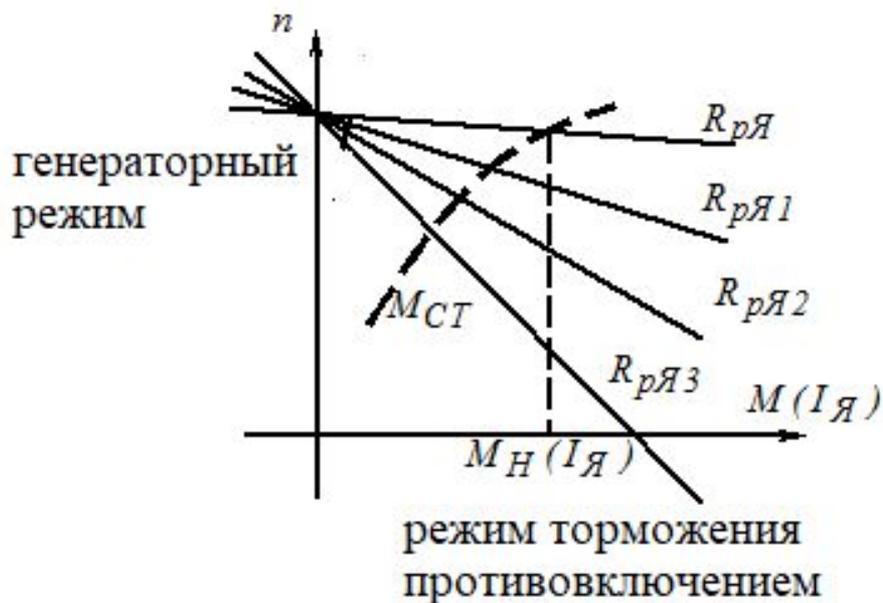
$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_{\text{Я}} + R_{\text{РЯ}})M}{C_e C_M \Phi}$$



ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Продолжения характеристик под осью абсцисс соответствуют торможению двигателя методом противовключения. В этом случае, $n < 0$ ЭДС E меняет знак на противоположный, вследствие чего

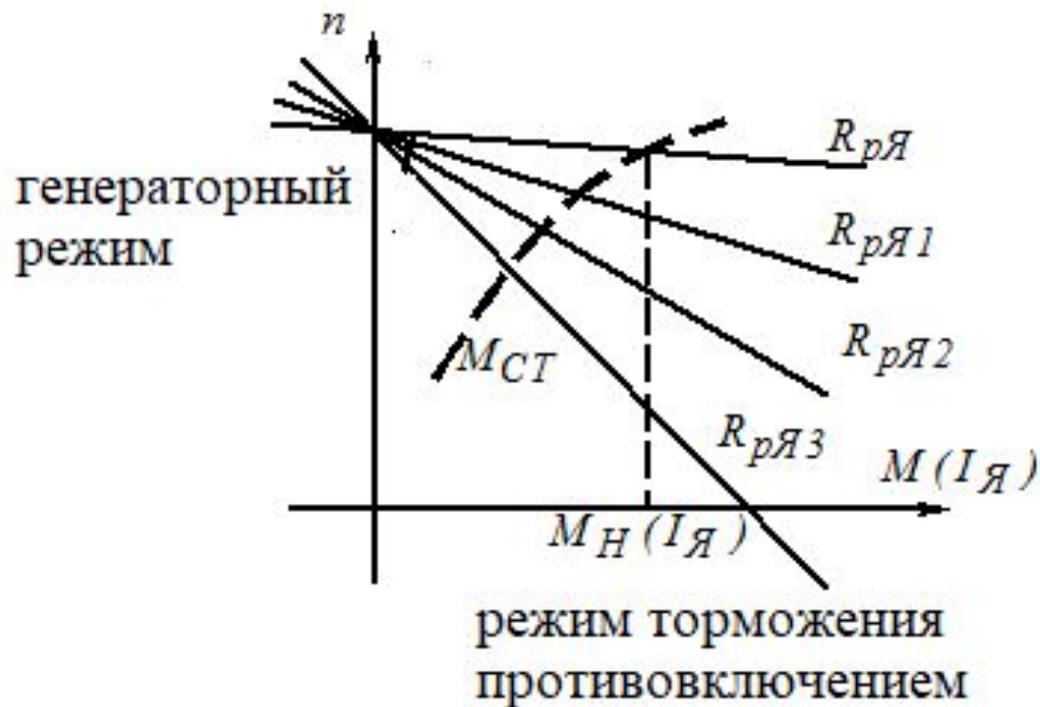
$$I_{\text{Я}} = \frac{U + E}{R_{\text{Я}} + R_{\text{рЯ}}}$$



Момент двигателя M действует против направления вращения механизма и является поэтому тормозящим. Двигатель развивает значительный момент и поэтому торможение является весьма эффективным. Токи, достигающие при этом опасных для целостности машины значений, следует ограничивать.

ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

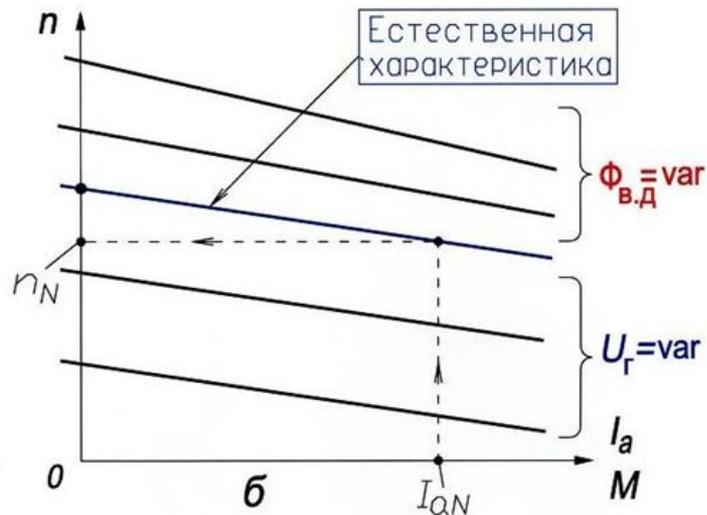
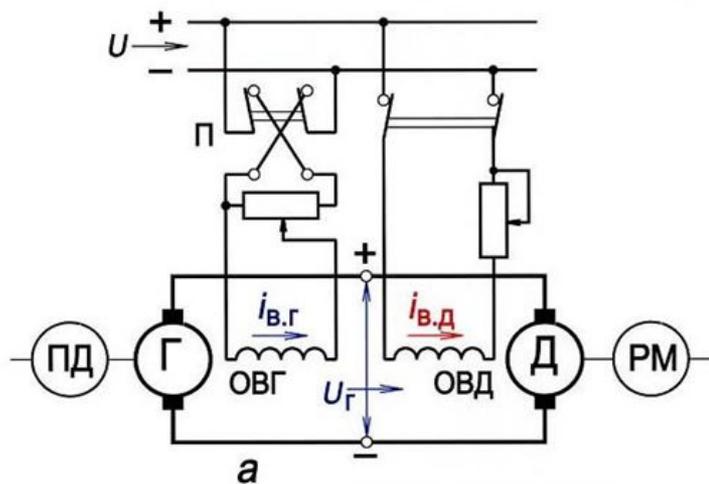
Если в режиме холостого хода с помощью приложенного извне момента увеличивать частоту вращения, то сначала достигается режим $I_{\text{я}}=0$, а затем $I_{\text{я}}$ изменит направление и машина перейдет в режим генератора (участки характеристик на рис. слева от оси ординат).



ДПТ НВ и ДПТ ПВ (параллельного возбуждения)

Регулирование частоты вращения изменением напряжения якоря

Регулирование скорости изменением напряжения якоря может осуществляться с помощью агрегата “генератор – двигатель” (Г – Д)



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. - СПб.: Питер, 2006. – 320 с.
- Марков, А. В. Элементы и устройства систем управления: практ. для студ. спец. 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах». В 2-х ч. Ч. 1 / А. В. Марков, А. С. Шмарловский. – Минск: БГУИР, 2010. – 102 с.: ил.
- Галян Э.Т. Г 17 Коллекторные электрические машины постоянного тока [электронное издание]: презентация лекции / Э.Т. Галян. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 17 с.: ил.
- Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока: Учебное пособие для вузов– М.:МГАУ, кафедра Электроснабжение и Электрические машины, 2009 - 217 с.
- Прохоров С.Г., Хуснутдинов Р.А. Практикум по электрическим машинам и аппаратам: Учебное пособие: Для студентов очного и заочного обучения. Казань: Изд-во Казан, гос. техн. ун-та, 2005. -90 с.
- Копылов И.П. Электрические машины. – М.: ВШ, 2002 – 607с.
- Кацман М.М. Электрические машины. – М.: ВШ, 2001 – 463 с.:ил.
- Брускин Д.Э. и др. Электрические машины и микромашины. – М.:ВШ, 1990 – 528с.:ил.

Спасибо за внимание!