

Электротехника и электроника

***Электрические машины
постоянного тока***

Общие сведения о машинах постоянного тока

- Электрические машины постоянного тока (МПТ) широко применяются в качестве двигателей и генераторов. Причем одна и та же электрическая машина постоянного тока может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т. е. обладает свойством обратимости.

Режим генератора и двигателя

- В режиме генератора МПТ преобразуют механическую энергию, подводимую к их валу от первичного двигателя, в электрическую энергию постоянного напряжения и тока.
- В режиме двигателя МПТ осуществляют обратное преобразование: электрическую энергию постоянного тока преобразуют в механическую энергию, снимаемую с их вала.

Преимущества двигателей постоянного тока

- Они позволяют плавно и в широком диапазоне регулировать частоту вращения якоря простыми техническими способами и обладают улучшенными пусковыми качествами — развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе.

Применение двигателей постоянного тока

- Электродвигатели постоянного тока находят применение в качестве приводных двигателей для прокатных станов, гребных винтов кораблей, шахтных подъемных машин, в электрифицированном магистральном, городском и заводском транспорте, дорожно-строительных, ремонтно-отделочных машинах, часто являются исполнительными звеньями систем автоматического управления и регулирования и т. д.

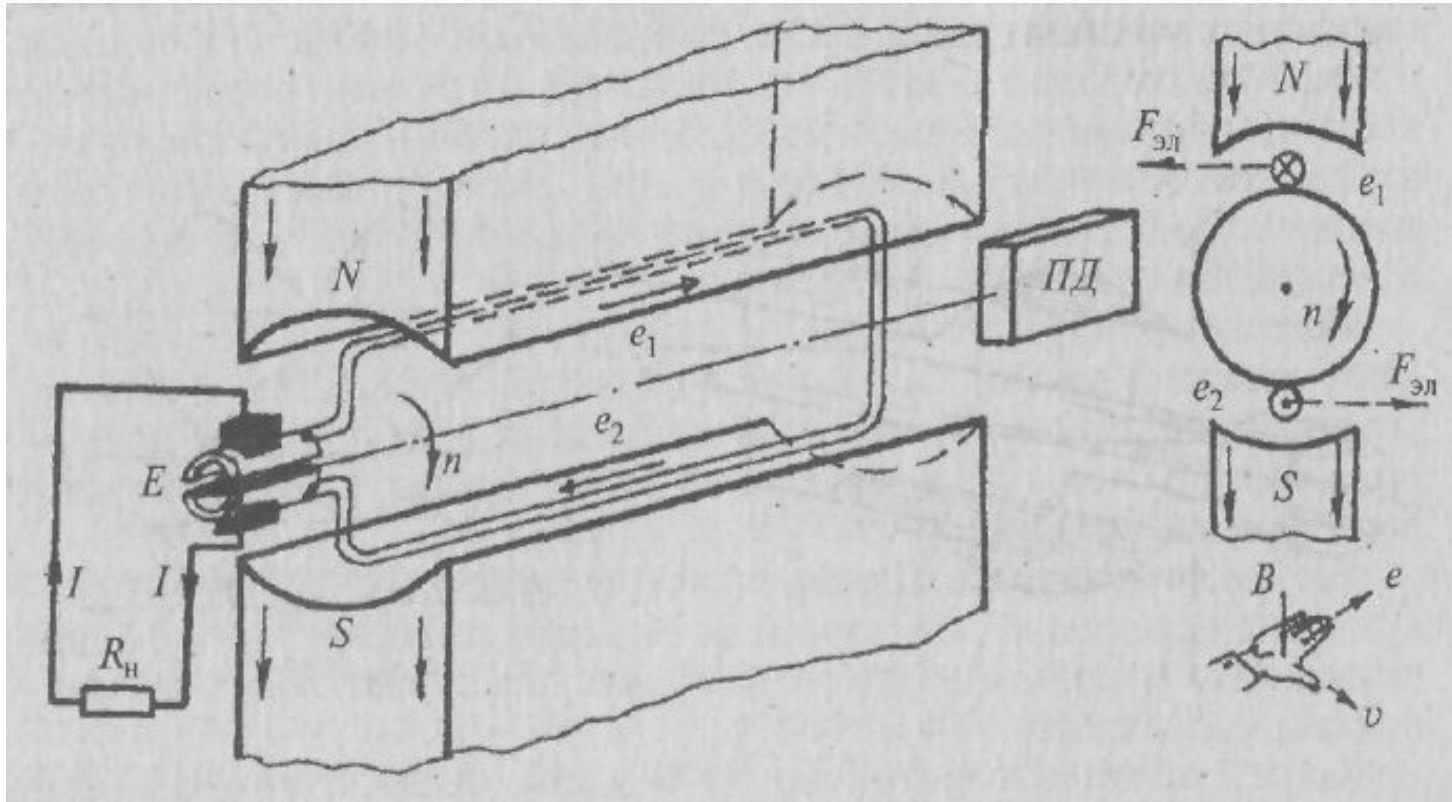
Применение генераторов постоянного тока

- Генераторы постоянного тока применяют для питания электроэнергией электролитических ванн, зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки.
- В системах автоматического регулирования специальные генераторы постоянного тока - электромашинные усилители - служат в качестве усилителей электрических сигналов управления.
- Специальные генераторы постоянного тока — тахогенераторы — применяются как датчики частоты вращения.

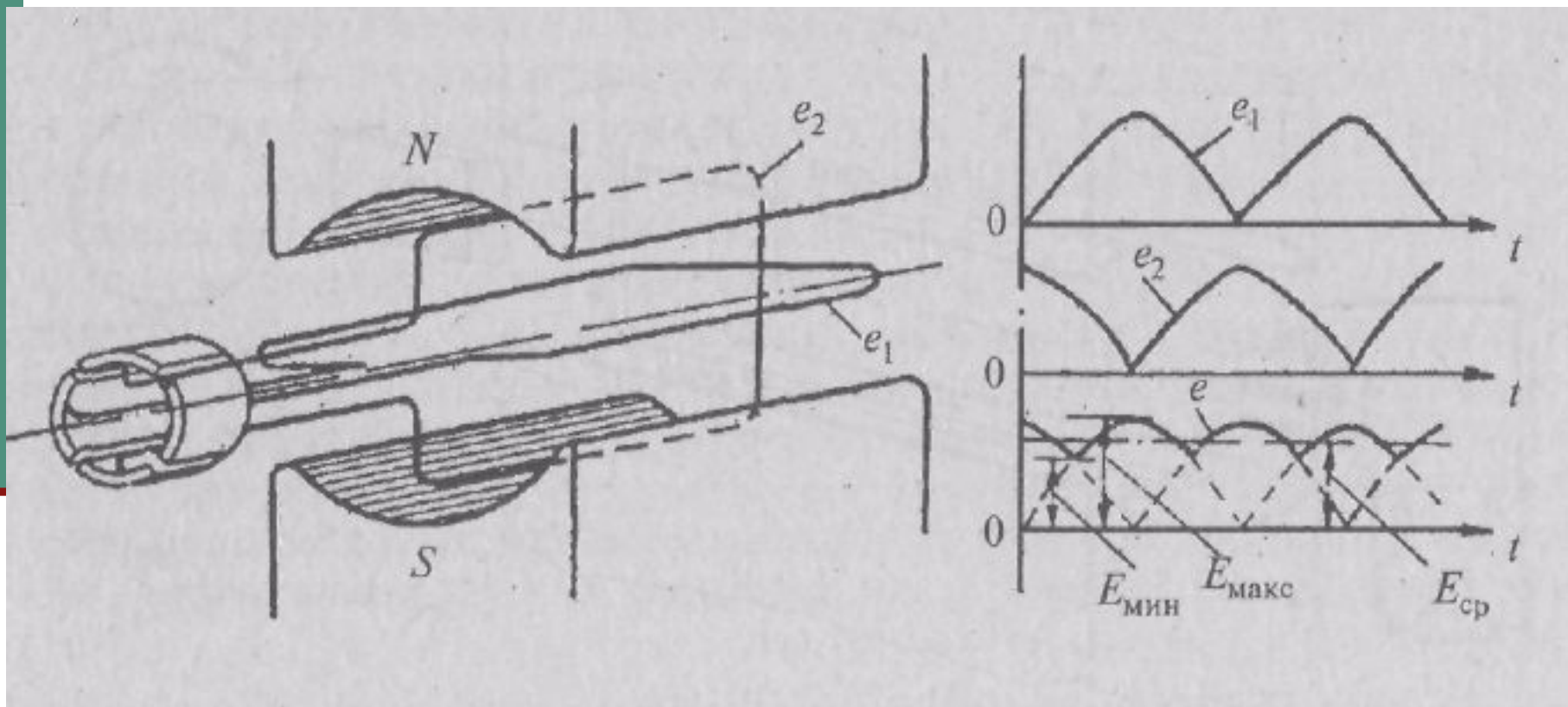
Недостатки машин постоянного тока

- При целом ряде преимуществ машины постоянного тока имеют существенный недостаток конструктивного характера, связанный с наличием и работой щеточно-коллекторного узла. Во-первых, при работе этого узла графитовые щетки истираются о пластины коллектора, и образовавшаяся графитовая пыль заполняет внутренний объем машины, оседая на изоляционных материалах и деталях. Являясь электропроводящей средой, такая пыль может нарушить режим работы изоляции. Во-вторых, при определенных неблагоприятных условиях под щетками может возникать различной интенсивности искрение, переходящее в критических случаях в круговой огонь по коллектору. Указанные факторы снижают надежность работы и требуют постоянного надзора и ухода за машиной. И, наконец, машины постоянного тока по стоимости в несколько раз дороже машин переменного тока такой же мощности.

Принцип действия генератора постоянного тока



Сглаживание пульсации ЭДС на щетках



Разновидности секций якорных обмоток

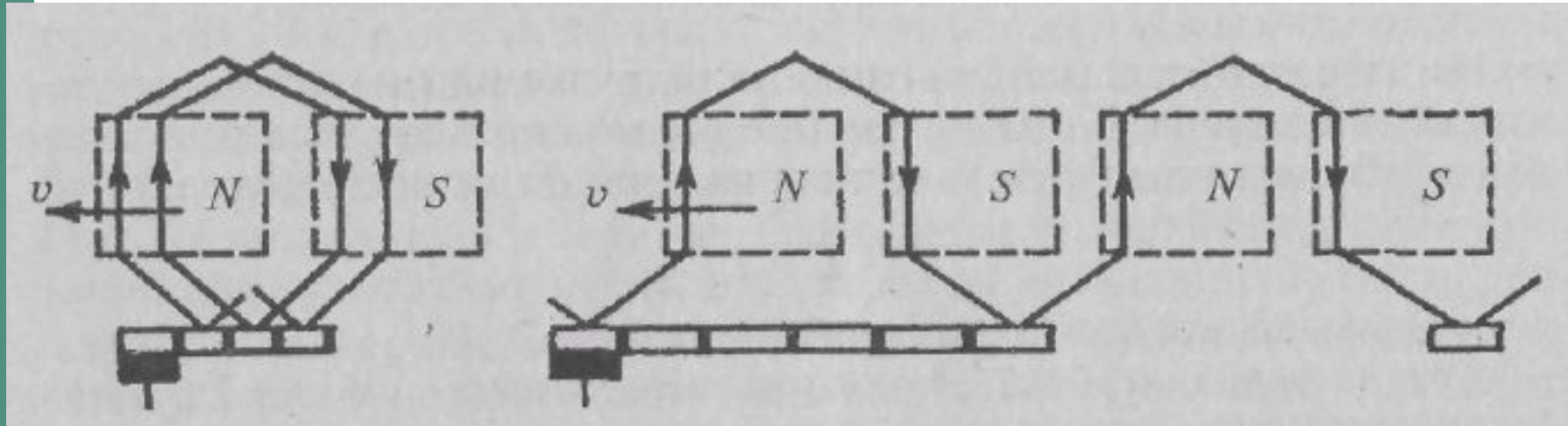
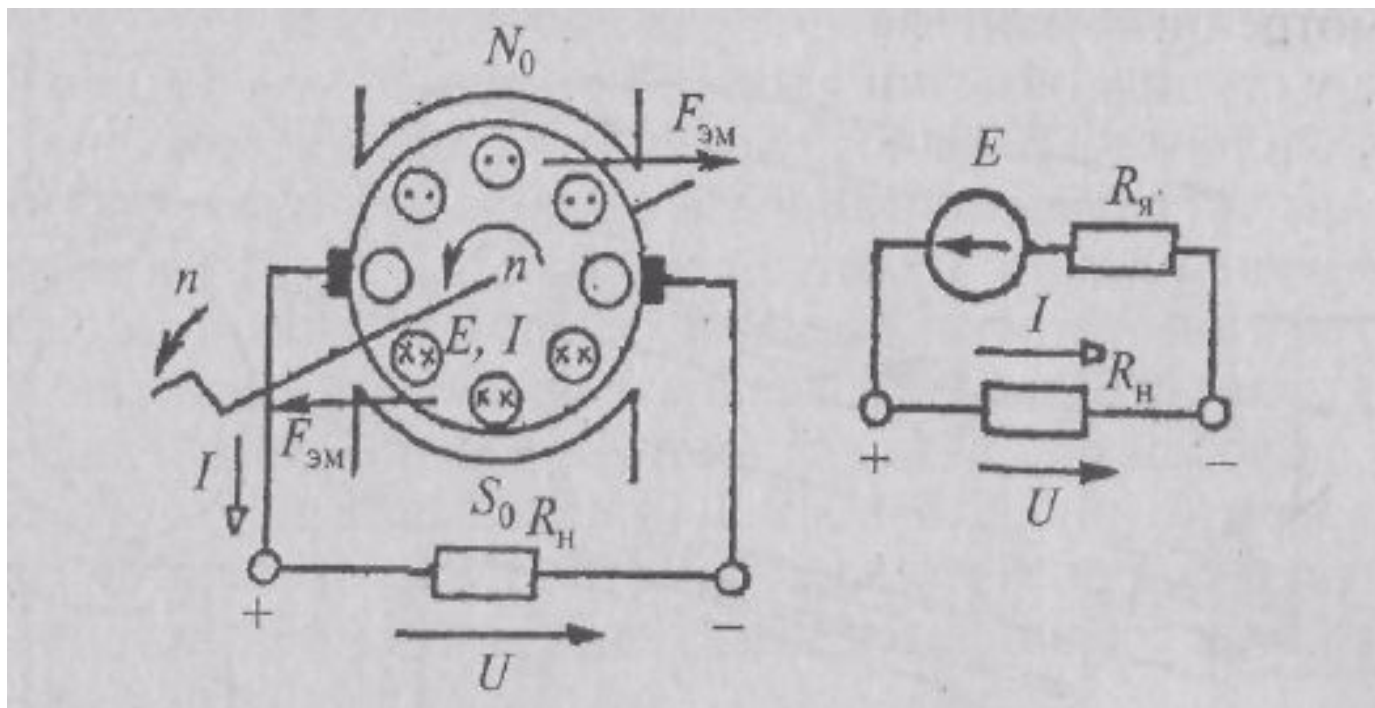


Схема замещения цепи якоря генератора



Уравнение напряжений генератора и баланс мощностей

$$U = E - I R_{\text{я}}.$$

$$U I = E I - I^2 R_{\text{я}}.$$

Принцип действия двигателя постоянного тока

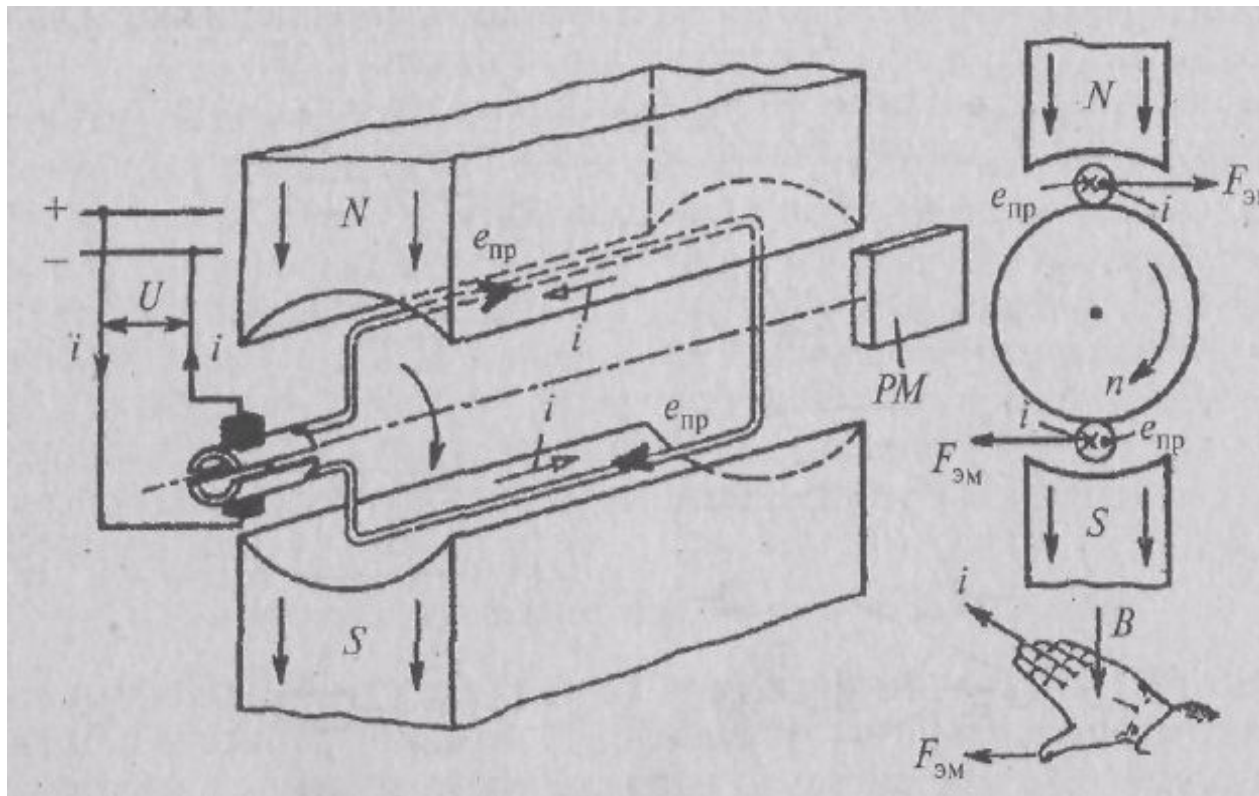
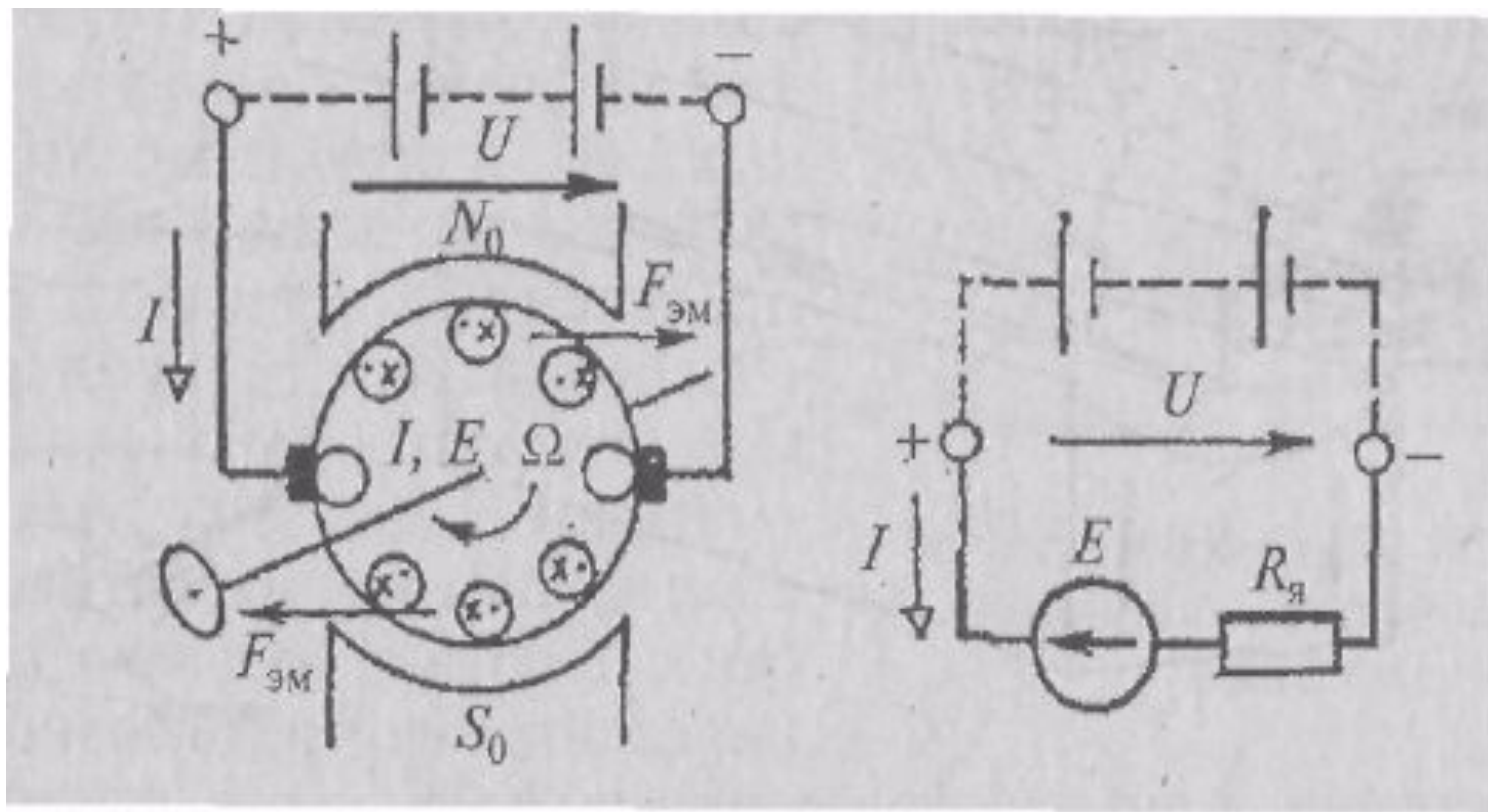


Схема замещения цепи якоря двигателя



Уравнение напряжений двигателя и баланс мощностей

$$U = E + I R_{\text{я}}.$$

$$U I = E I + I^2 R_{\text{я}}.$$

Электрическая, электромагнитная и механическая мощности двигателя

- Электрическая мощность $P=UI$, потребляемая якорем двигателя от источника электрической энергии, тратится на покрытие тепловых потерь в обмотке якоря $P_{\text{я}} = I^2 R_{\text{я}}$ и на электромагнитную мощность $P_{\text{эм}} = EI$, которая преобразовывается в механическую мощность на валу якоря $P_{\text{мех}} = M_{\text{вр}} \Omega = M_{\text{вр}} 2\pi n$.

Магнитная цепь машины

ПОСТОЯННОГО ТОКА

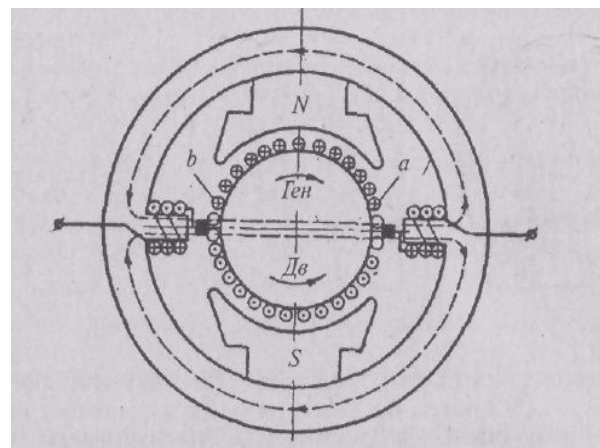
- *Магнитная* цепь машины постоянного тока предназначена для создания и распределения магнитного поля в воздушном зазоре и состоит из главных полюсов с катушками обмотки возбуждения, сердечника якоря, воздушного зазора между полюсами и якорем и ярма (станины).
- Магнитное поле создается токами обмотки возбуждения, усиливается железом полюсов, якоря и ярма, по которым проходит магнитный поток.
- Магнитная индукция B в рабочем воздушном зазоре (в зоне магнитных полюсов) имеет почти постоянное значение, что необходимо для получения примерно постоянных ЭДС в сторонах секций, находящихся под полюсами. Такое распределение магнитной индукции обеспечивается специальной формой полюсных наконечников.

Геометрические и физические нейтрالي

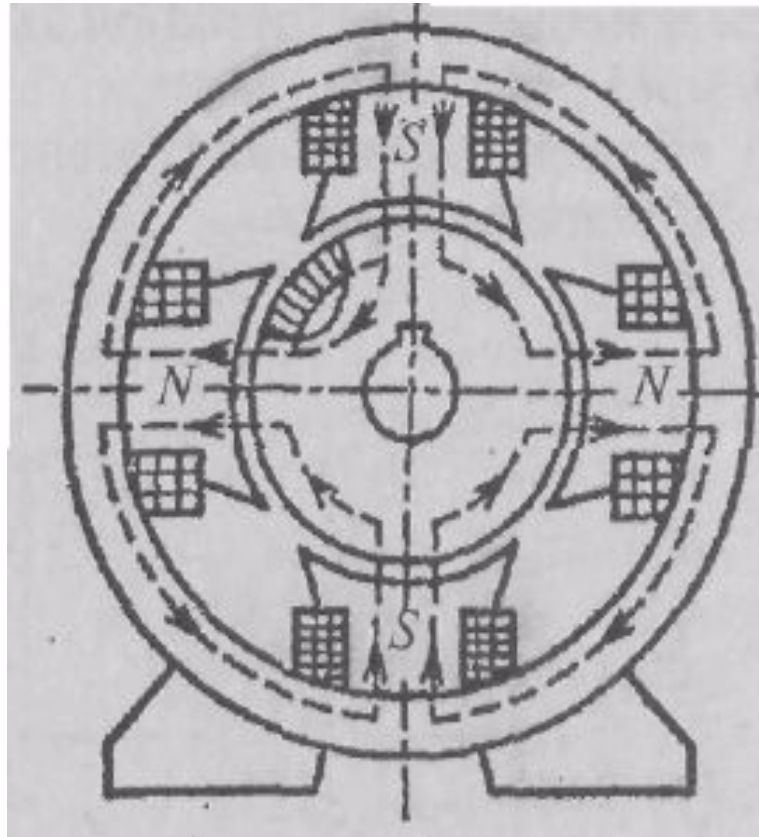
- Линии симметрии, делящие пространство между магнитными полюсами пополам, называются геометрическими нейтральными линиями или нейтралами, а линии, проходящие через точки, в которых индукция $B=0$ (строго между полюсами), — физическими нейтральными линиями машины.
- Дуга или расстояние между соседними нейтральными линиями называется полюсным делением.
- В генераторе физическая нейтраль повернута в сторону вращения якоря, а в двигателе — в обратную сторону.

Расположение и включение добавочных полюсов

- Добавочные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии между главными полюсами и крепятся болтами к ярму статора. Их обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и намотана так, что создаваемое ею магнитное поле равно



Пути магнитного потока четырёхполюсной машины



Электрическая главная и вспомогательная цепи машины

- *Электрическая* главная цепь машины состоит из обмотки якоря, коллектора и щеток. Все элементы этой цепи рассчитаны на большие токи, и именно в якоре происходит преобразование энергий.
- К вспомогательной электрической цепи может быть отнесена обмотка возбуждения, которая, как правило, рассчитана на меньшие токи, но имеет значительное число витков.

Модель якоря двухполюсной машины и схема его обмотки

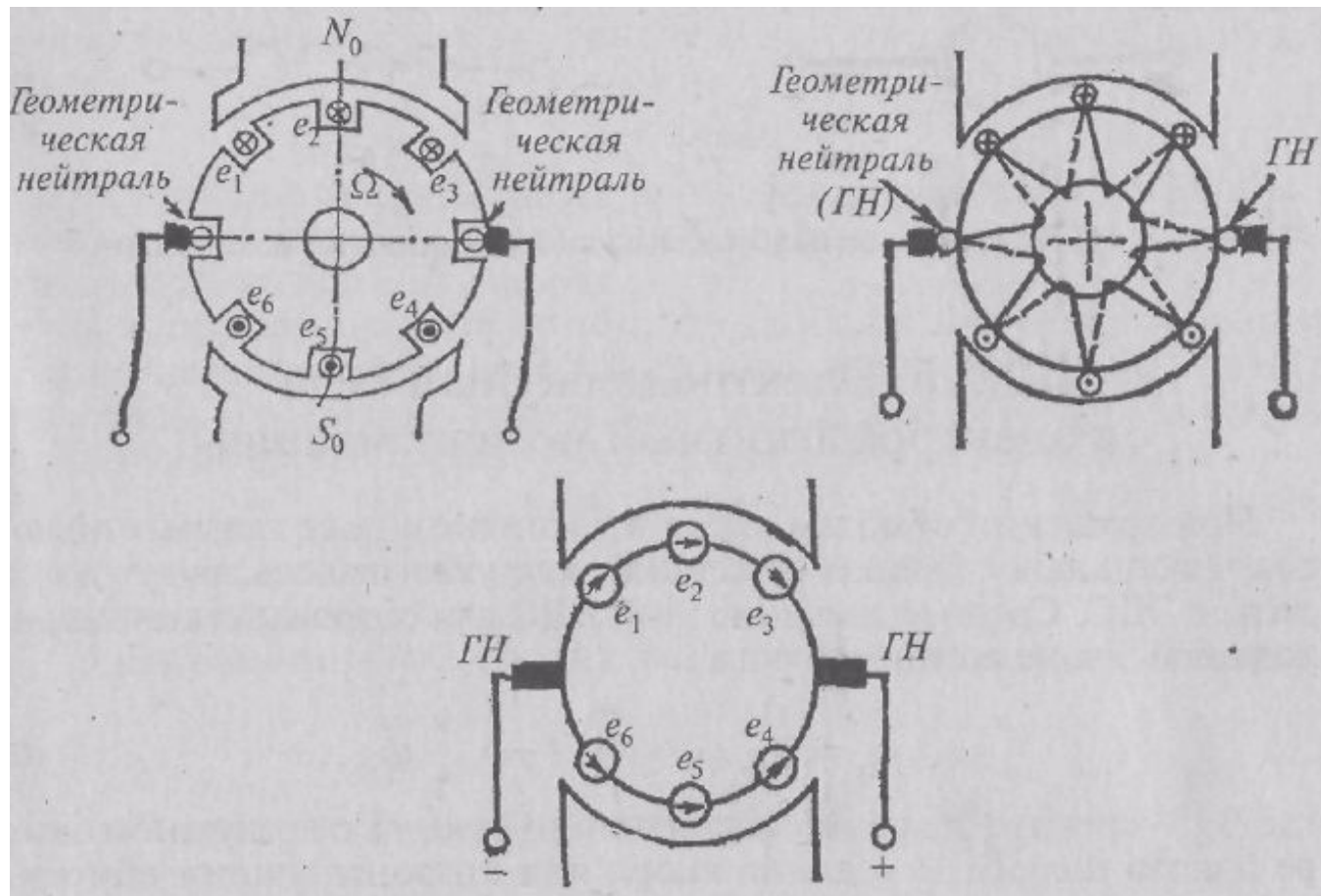
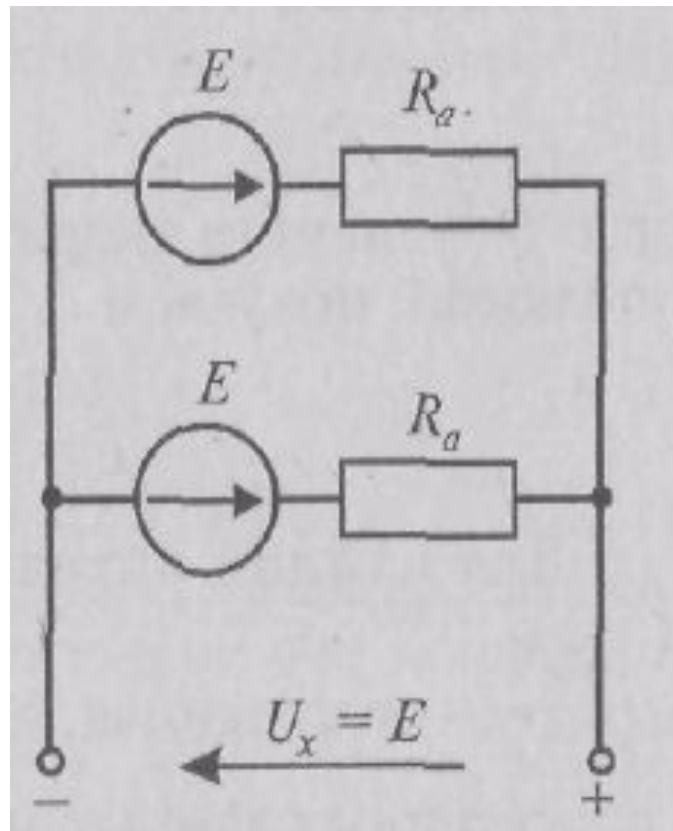
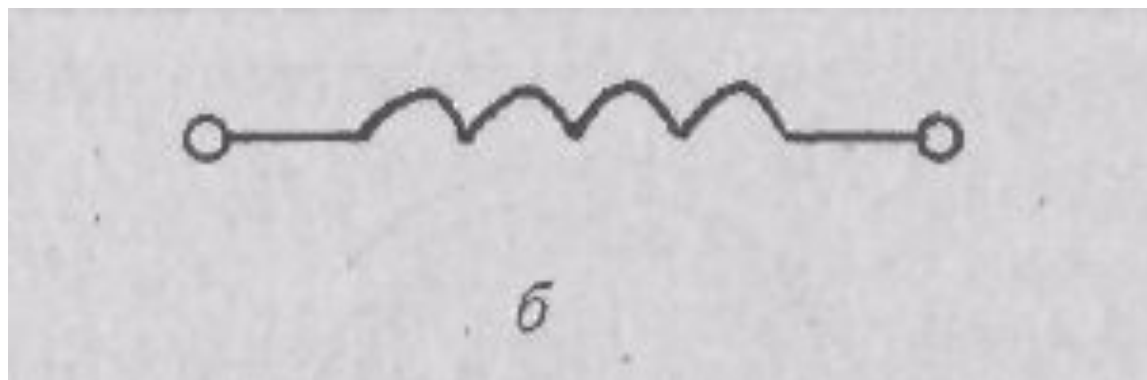
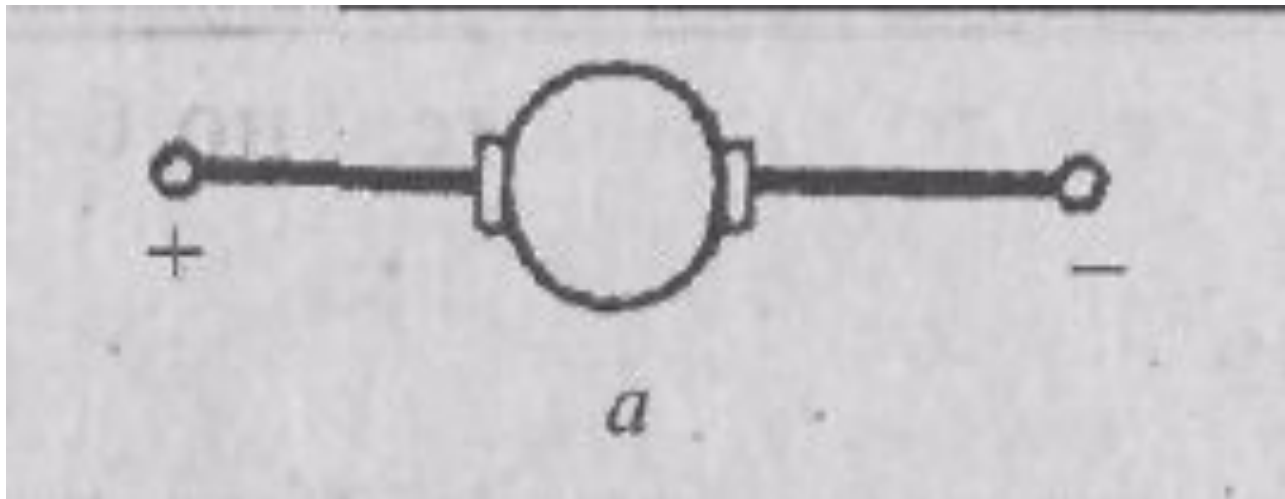


Схема замещения обмотки якоря с двумя параллельными ветвями



Графическое изображение якоря и обмотки возбуждения



Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины

$$e_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} l v = \frac{\Phi}{l\tau} l v = \frac{v}{\tau} \Phi,$$

- где $B_{\text{ср}}$ - среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре одного полюса; l — длина якоря или стороны секции обмотки якоря; v — линейная скорость пересечения линий магнитного поля или вращения якоря;
- τ - полюсное деление;
- Φ - магнитный поток одного полюса.

ЭДС машины

$$E = e_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = \frac{v}{\tau} \Phi \frac{N}{2a},$$

$$v = \pi D n / 60;$$
$$\tau = \pi D / 2p,$$

$$E = \frac{\pi D}{60} n \frac{2p}{\pi D} \frac{N}{2a} \Phi = \frac{2pN}{602a} n \Phi.$$

$$E = c_E n \Phi.$$

- $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря,
- D — диаметр якоря; n — частота вращения якоря;
- $2p$ — число пар полюсов

Электромагнитный момент

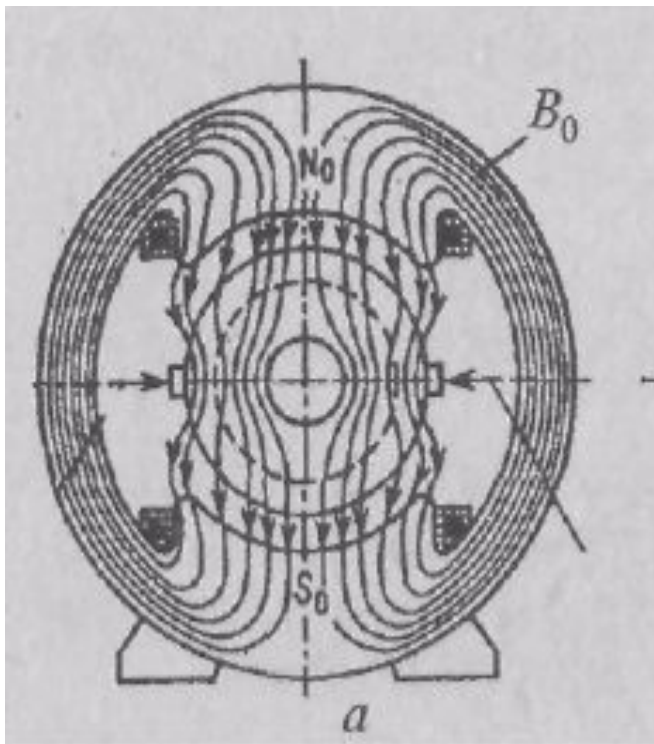
$$M = B_{\text{CP}} I_a l \frac{D}{2} N = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi,$$

$$M = F_{\text{CP}} \frac{D}{2} N.$$

$$M = c_M I_a \Phi.$$

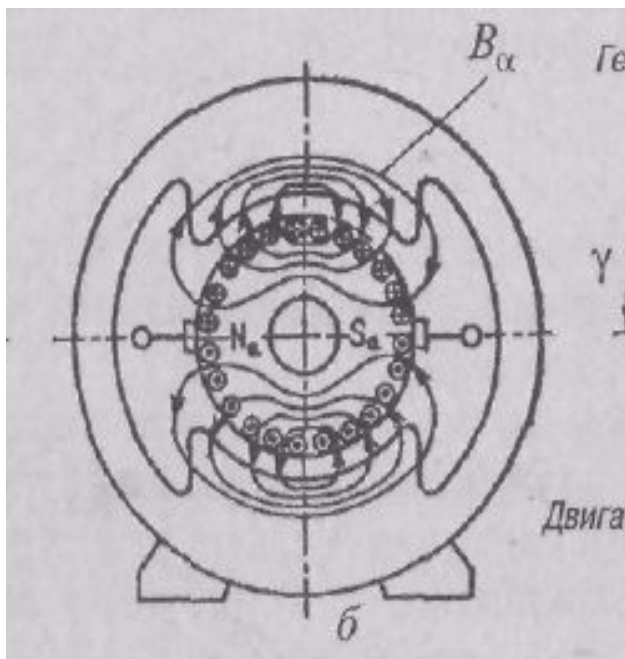
- Для генераторного режима работы машины M - это тормозящий момент.
- Для двигательного режима M - это действующий вращающий момент.

Основное магнитное поле



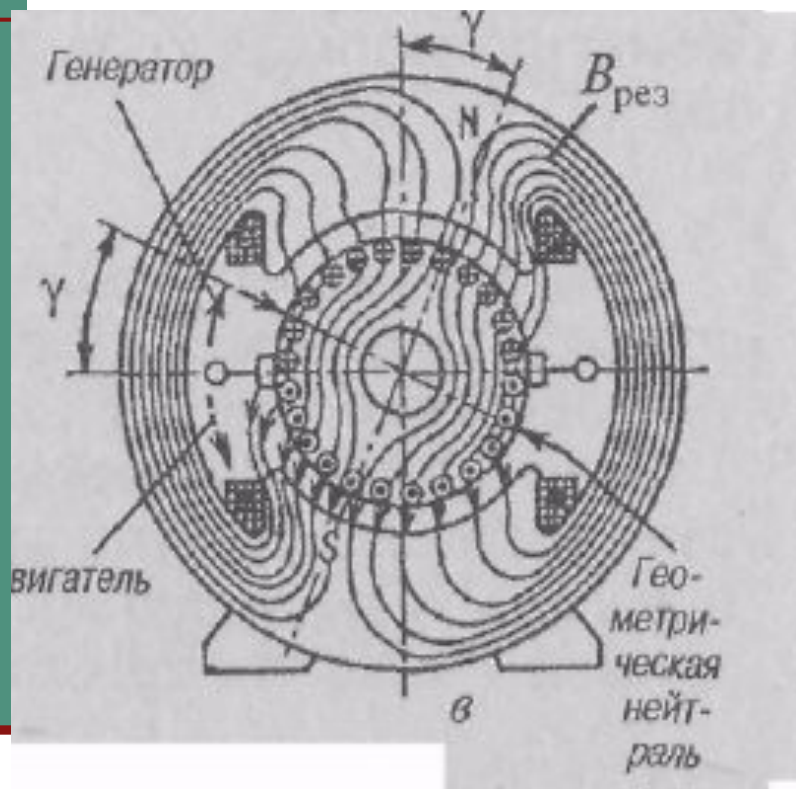
- При холостом ходе машины (отсутствует ток в обмотке якоря) ее основное магнитное поле с индукцией B_0 создается только главными полюсами. Это поле симметрично относительно оси полюсов и его ось совпадает с осью полюсов.

Магнитное поле якоря



- Когда же машина работает под нагрузкой, то по обмотке якоря проходит ток, и вокруг обмотки якоря создается свое магнитное поле, называемое полем якоря. Ось магнитного поля якоря совпадает с линией, соединяющей щетки, т. е. с геометрической нейтралью, и перпендикулярна оси главных полюсов.
- При вращении якоря распределение тока в проводниках якоря остается неизменным и поле якоря — неподвижным в пространстве. Магнитная индукция этого поля B_α пропорциональна току якоря.

Реакция якоря



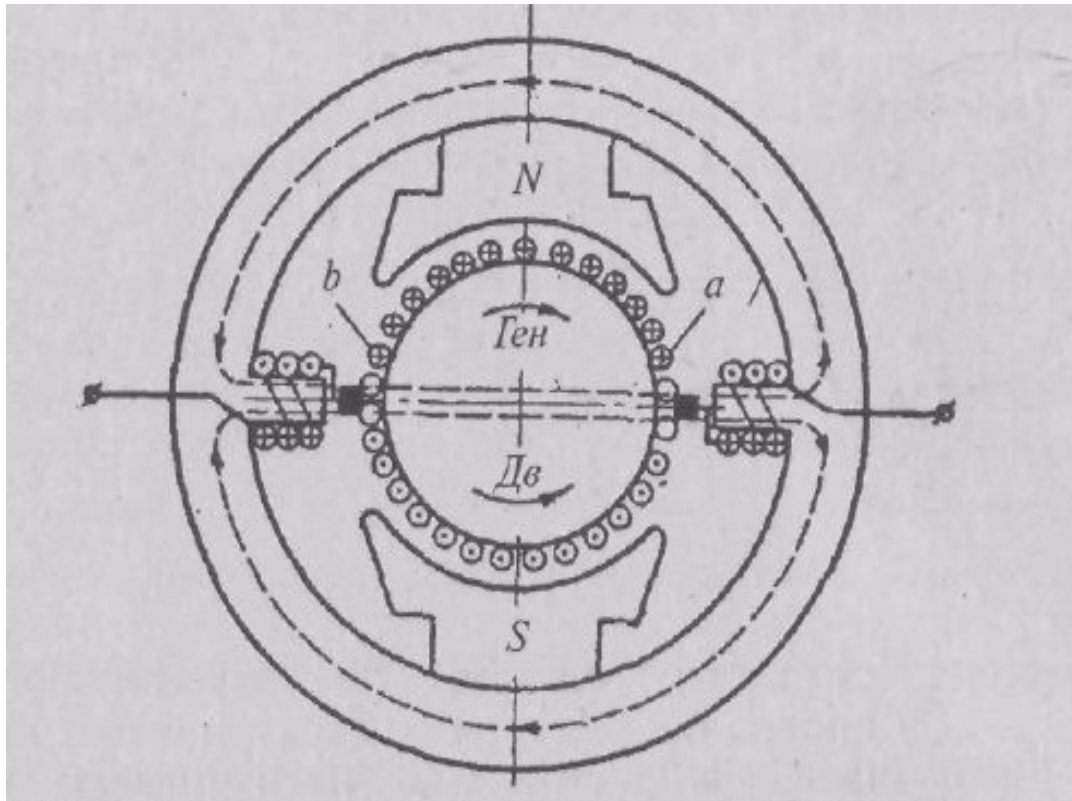
- В работающей под нагрузкой машине магнитное поле якоря накладывается на основное магнитное поле главных полюсов, и создается результирующее магнитное поле с индукцией $B_{рез}$. Это явление и называется *реакцией якоря*.

Влияние реакции якоря на качество работы машины

Негативное влияние:

- возможно повышенное искрение под щетками и обгорание коллекторных пластин,
- появление продольного размагничивающего магнитного поля.
- Наиболее действенным и распространенным средством уменьшения влияния реакции якоря на работу машины является применение добавочных полюсов.
- Магнитное поле добавочных полюсов призвано нейтрализовать магнитное поле якоря.

Расположение и включение добавочных полюсов



Расположение и включение добавочных полюсов

- Добавочные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии между главными полюсами и крепятся болтами к ярму статора.
- Их обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и намотана так, что создаваемое ею магнитное поле равно по величине и направлено против магнитного поля якоря

Функции дополнительных полюсов

Дополнительные полюсы выполняют свои функции во всех режимах работы машины:

- при изменении нагрузки одновременно изменяются ток и магнитное поле якоря, ток и поле дополнительных полюсов;
- при переходе машины из режима генератора в режим двигателя одновременно изменяется направление тока и поля якоря и направление тока и поля дополнительных полюсов и т. д.

Способы возбуждения машин постоянного тока

- Под возбуждением электрической машины постоянного тока понимают создание в ней магнитного поля, необходимого для наведения в обмотке якоря ЭДС заданной величины (генератор) или создания необходимого вращающегося момента якоря (двигатель). Основное магнитное поле в машинах создается главными полюсами и расположенными на них катушками обмотки возбуждения.

Способы подключения обмоток

Обмотка возбуждения и обмотка якоря в машинах могут быть подключены к сети различными способами:

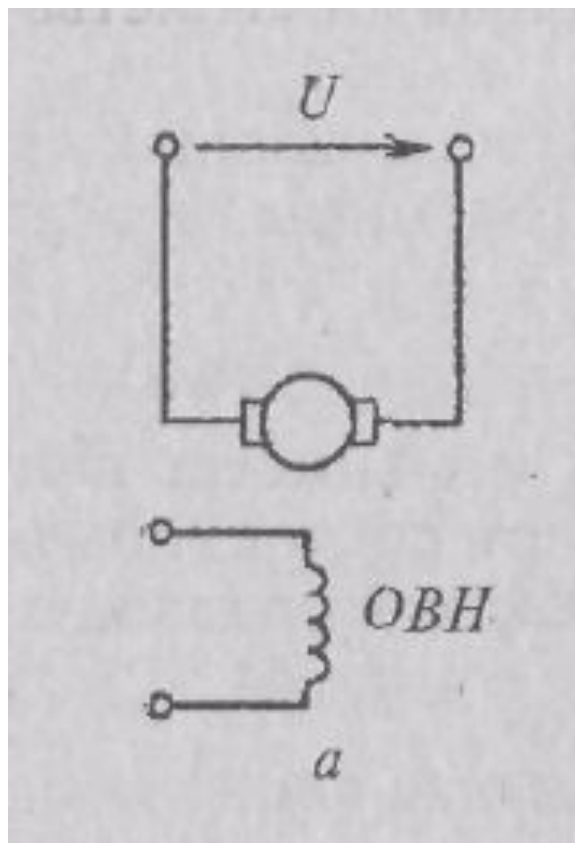
- независимо одна от другой,
- параллельно,
- Последовательно,
- параллельно-последовательно (смешанно).

В зависимости от способа соединения этих обмоток различают четыре типа машин постоянного тока,

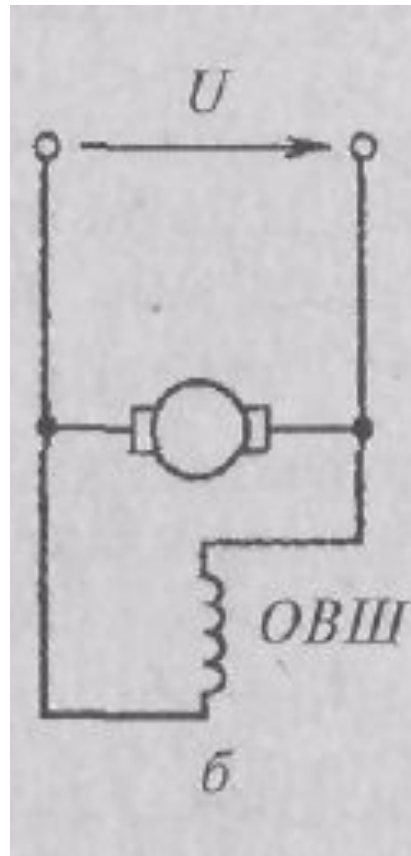
Типы машин постоянного тока

- Машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря подключаются независимо друг от друга к различным источникам
- Машины параллельного (шунтового) возбуждения, в которых обмотка возбуждения подсоединяется к щеткам и получает питание от ЭДС обмотки якоря
- Машины последовательного (сериесного) возбуждения, в которых обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря
- Машины смешанного (компаундного) возбуждения, в которых на каждом полюсном сердечнике имеется две обмотки — шунтовая и сериесная. Шунтовая обмотка возбуждения соединяется параллельно якорной обмотке, а сериесная — последовательно с ней.

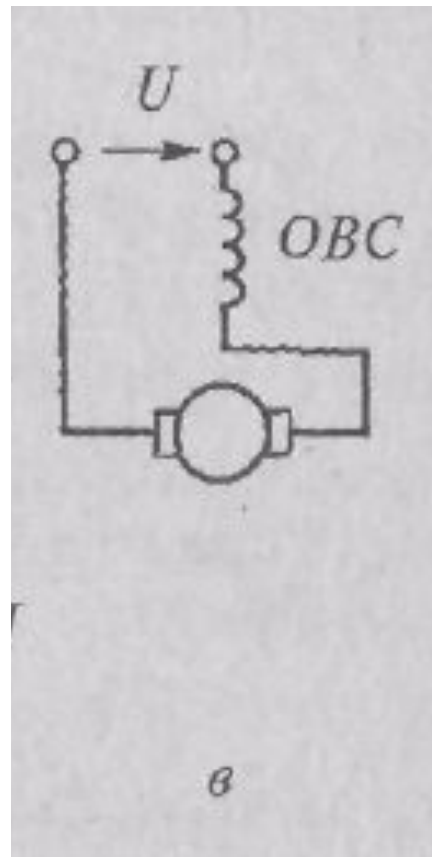
Машины независимого возбуждения



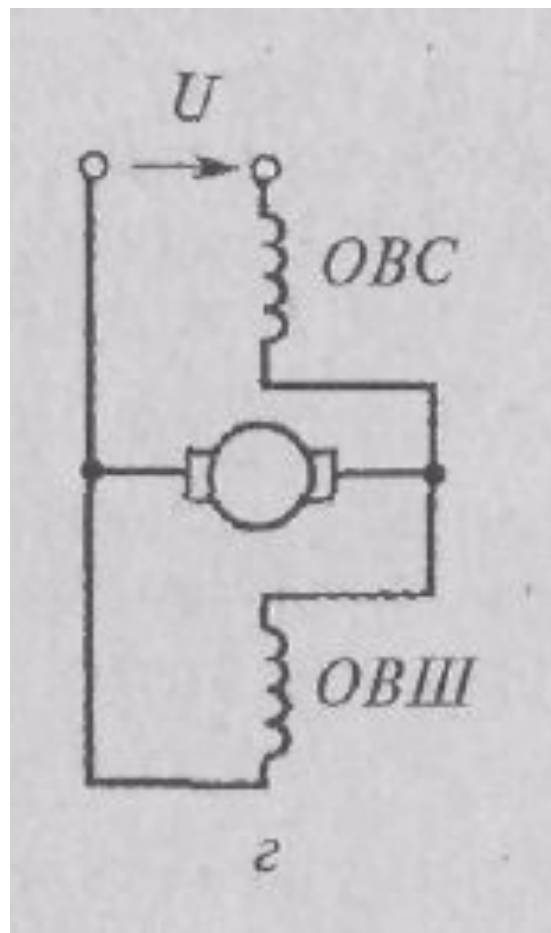
Машины параллельного (шунтового) возбуждения



Машины последовательного (сериесного) возбуждения



Машины смешанного (компаундного) возбуждения



Основные параметры генераторов

- Вырабатываемая мощность P
- Напряжение на выводах (зажимах) U
- Ток возбуждения $I_{\text{в}}$
- Ток якоря $I_{\text{я}}$ или ток нагрузки I
- Частота вращения n (обычно $n = \text{const}$)

Основные уравнения генератора

- Уравнение ЭДС

$$E = c_E n \Phi;$$

- Уравнение электрического состояния цепи якоря

$$U = E - I R_{\text{я.}}$$

Основные характеристики генераторов

- *Характеристика холостого хода (ХХХ)*
- *Внешняя характеристика*
- *Регулировочная характеристика*

Характеристика холостого хода (XXX)

- Характеристика холостого хода (XXX) показывает зависимость ЭДС генератора при холостом ходе от тока возбуждения при постоянной частоте вращения

$$E = f(I_B) \text{ при } I = 0$$

(или $I_A = 0$) и $n = n_{\text{НОМ}} = \text{const}$;

Внешняя характеристика

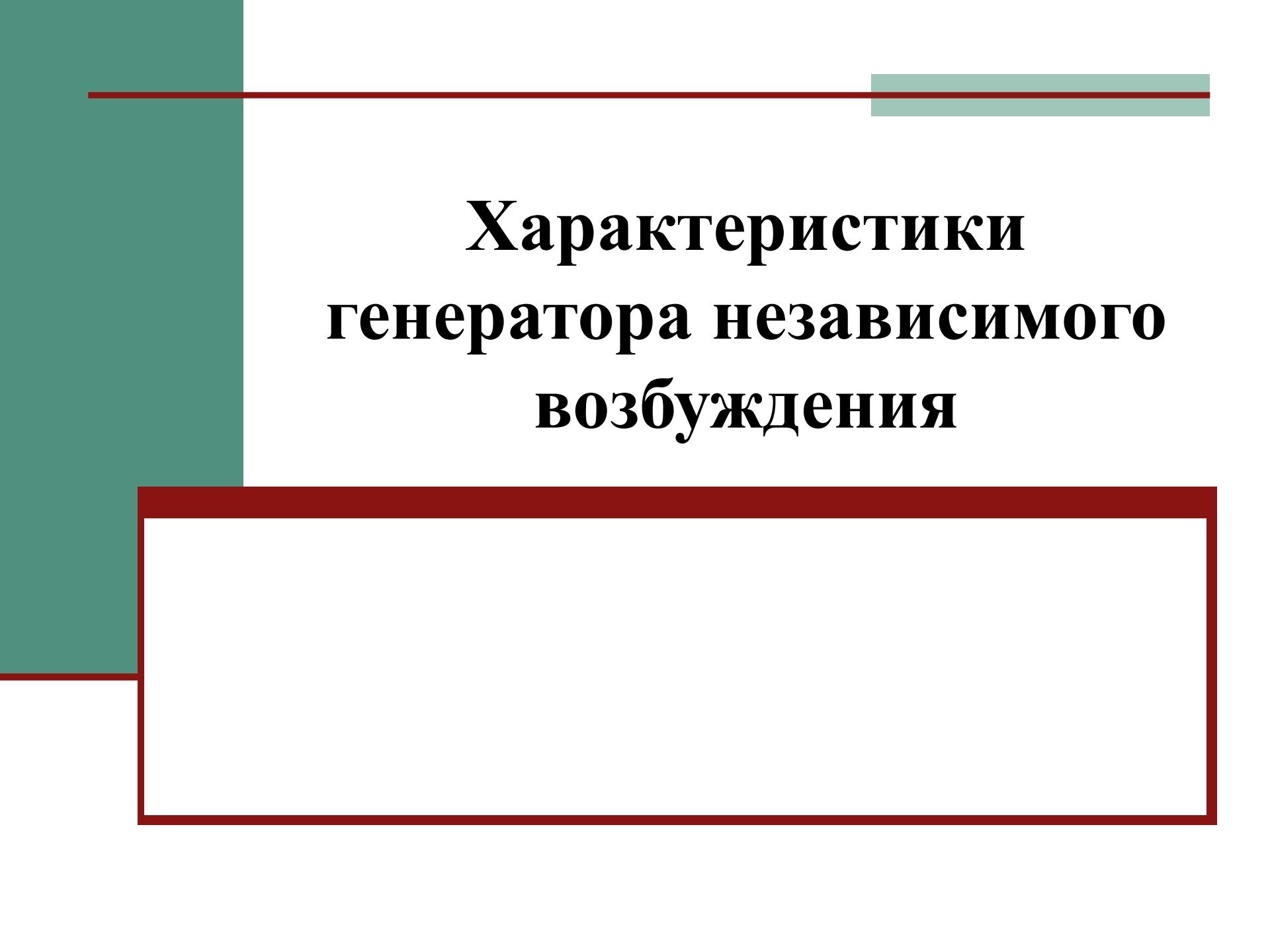
- *Внешняя характеристика* показывает зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и постоянной частоте вращения

$$U = f(I) \text{ при } R_B = \text{const и } n = n_{\text{НОМ}} = \text{const};$$

Регулировочная характеристика

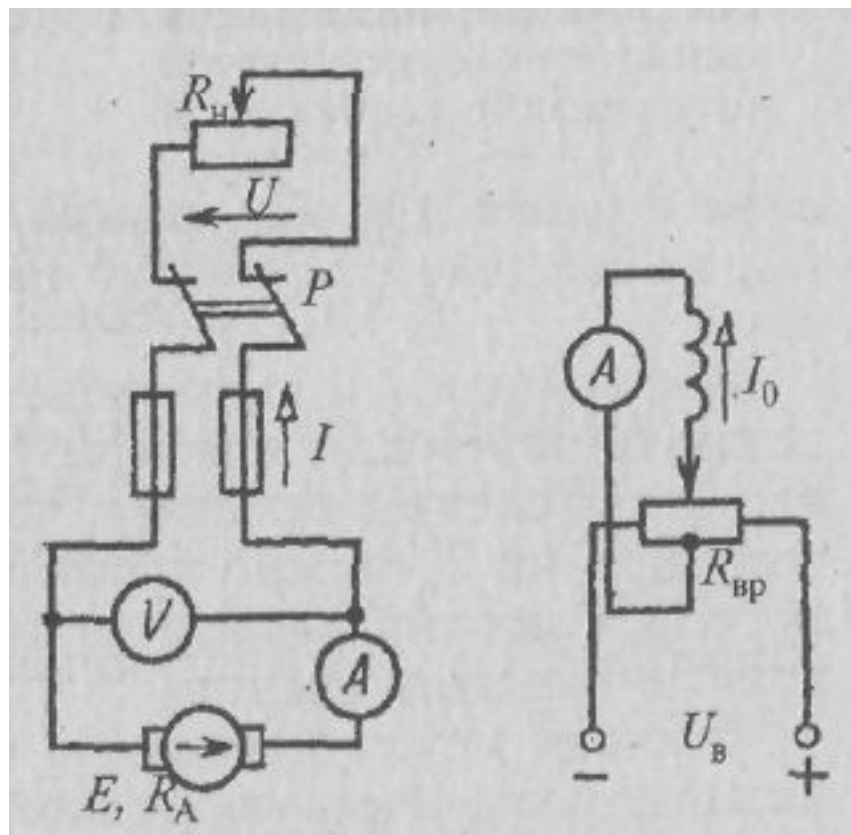
- Регулировочная характеристика показывает зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при условии поддержания постоянного напряжения на выводах генератора и постоянной частоте вращения

$$I_B = f(I) \text{ при } U = \text{const и } n = n_{\text{НОМ}} = \text{const.}$$

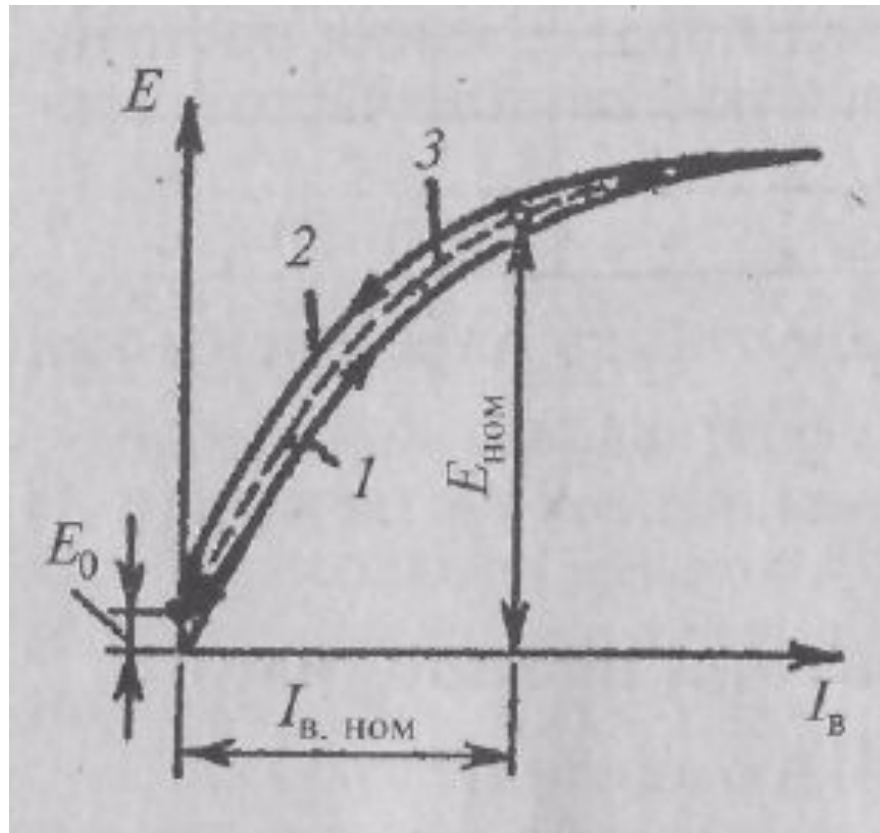


Характеристики генератора независимого возбуждения

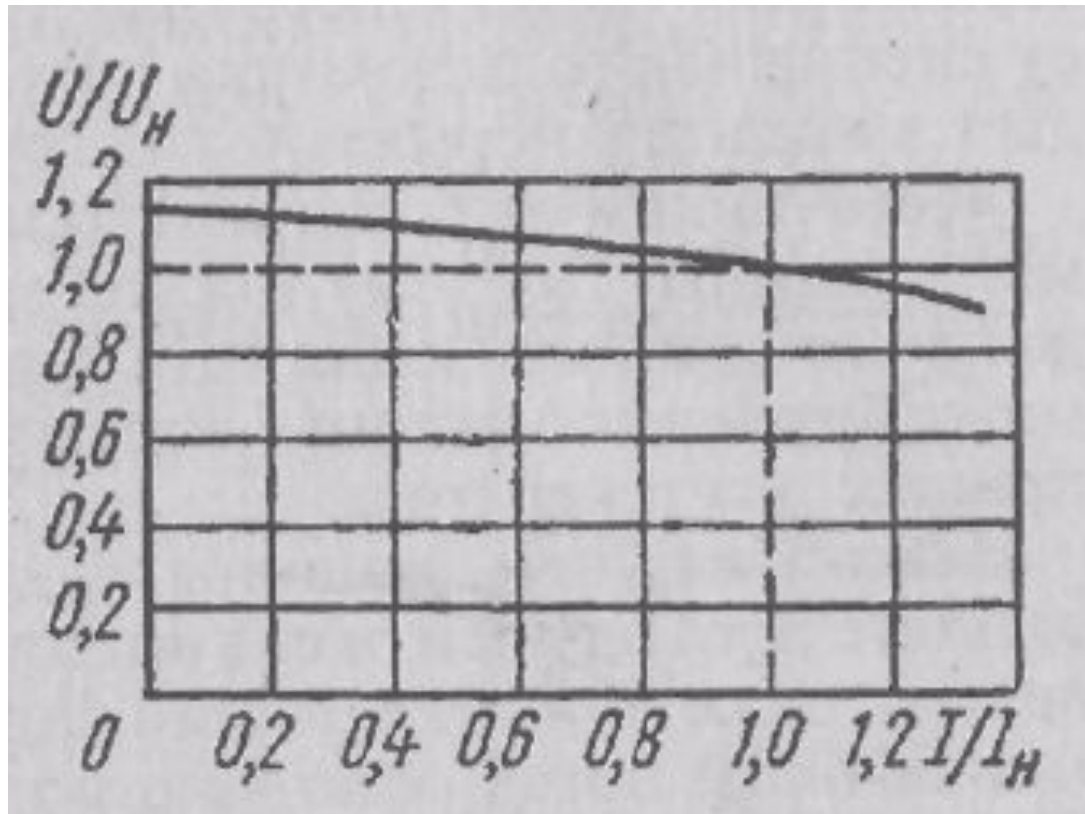
Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения



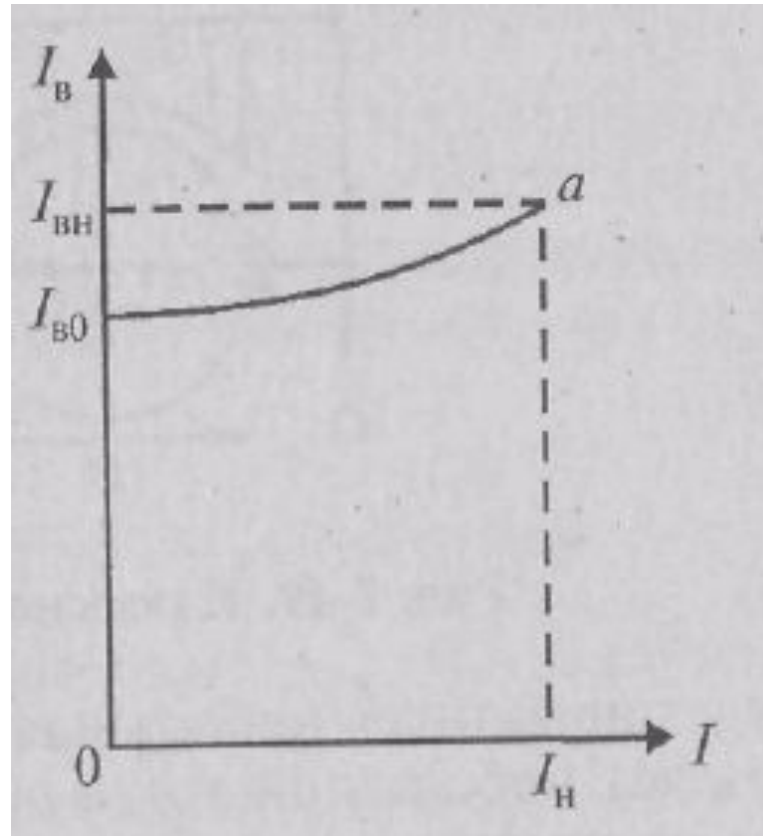
Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения



Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения



Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения



Характеристики генератора параллельного возбуждения

Самовозбуждение генератора

- При вращении якоря с номинальной частотой в магнитном поле, созданном остаточным магнитным потоком $\Phi_{\text{ост}}$, в обмотке якоря будет наводиться небольшая ЭДС, называемая остаточной $E_{\text{ост}}$
- Она создает небольшой ток в обмотке возбуждения I_V (нагрузка к якорю не подключена), который создает свой магнитный поток Φ_V и увеличивает магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{\text{ост}} + \Phi_V$, а вместе с ним увеличивает и ЭДС якорной обмотки.
- Поэтому ток возбуждения продолжает увеличиваться, магнитный поток Φ и ЭДС снова возрастают и т. д.
- В этом и заключается процесс самовозбуждения, который заканчивается, когда падение напряжения в обмотке возбуждения становится равным ЭДС якоря.

Условия для самовозбуждения генератора

- 1) наличие в магнитной системе машины остаточного магнитного потока;
- 2) правильное подключение обмотки возбуждения к якору, чтобы возбуждаемый и остаточный магнитные потоки совпадали;
- 3) сопротивление цепи возбуждения должно быть определенным и меньшим критического, так как оно определяет установившееся значение ЭДС якоря.

К пояснению самовозбуждения генератора

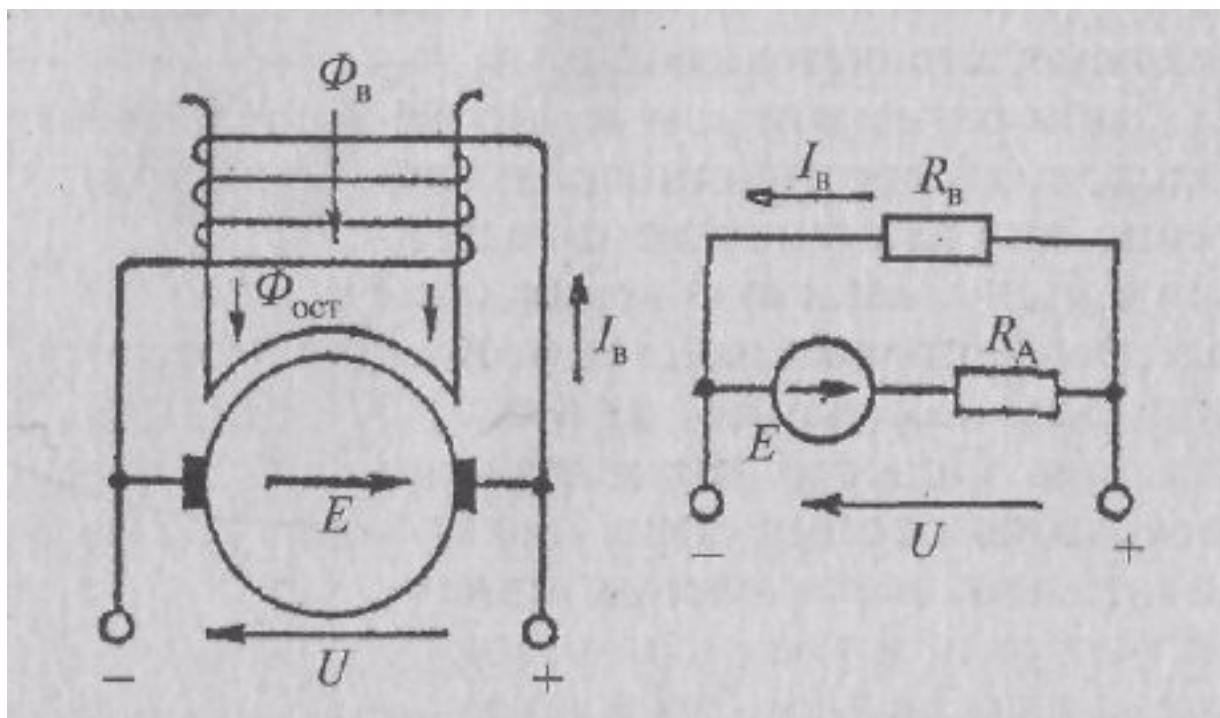
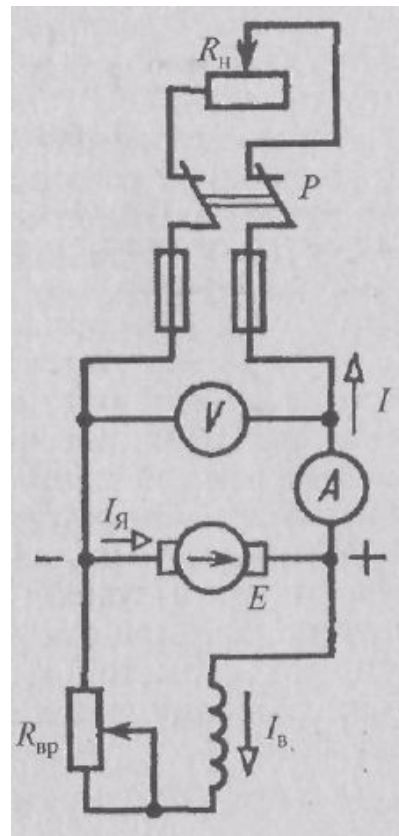


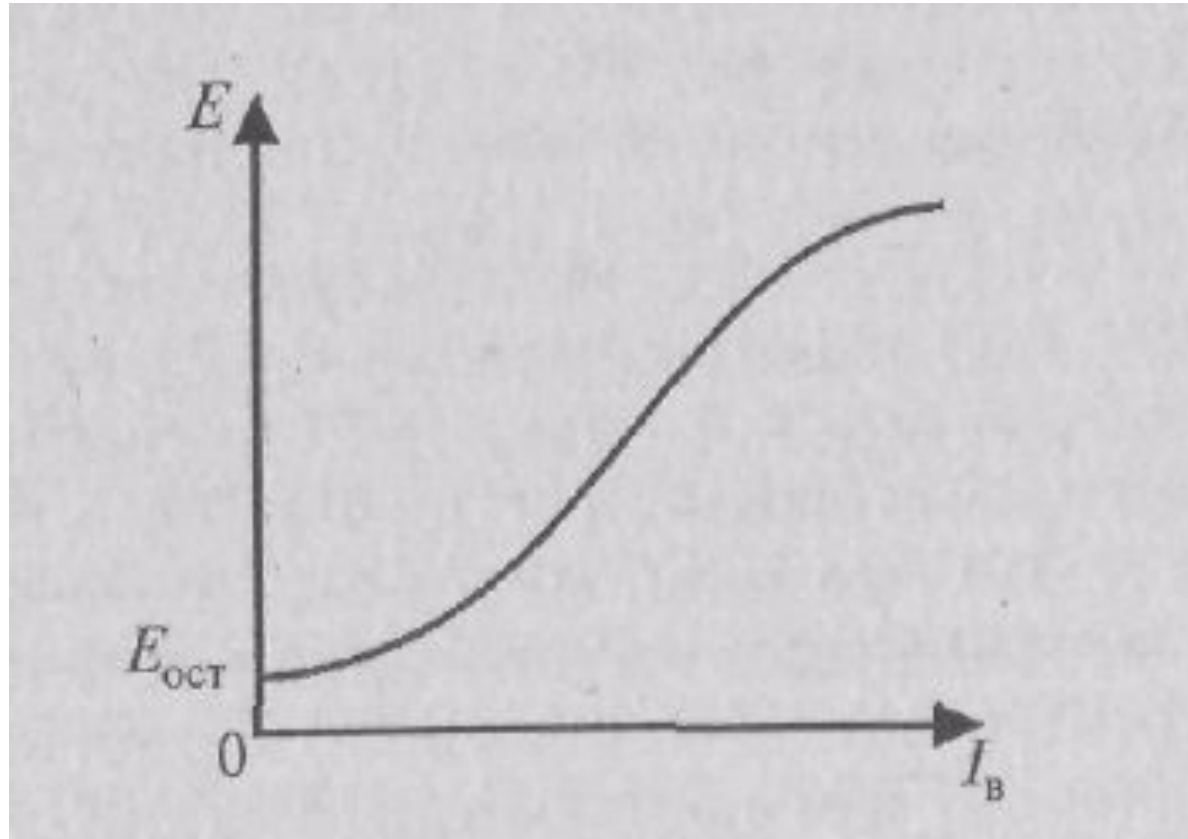
Схема для снятия характеристик генератора параллельного возбуждения



Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

- Характеристика холостого хода $E=f(I_B)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ снимается при отключенной нагрузке, т. е. при разомкнутом рубильнике P .
- Якорь приводится во вращение сторонним приводом с постоянной скоростью $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$, а регулирование тока возбуждения осуществляется реостатом $R_{\text{вР}}$ от 0 до $I_{\text{ВМАХ}}$ и обратно в такой же последовательности, что и при снятии аналогичной характеристики для генератора независимого возбуждения.
- Так как в этом случае $I_B = I_{\text{я}}$ и обычно не превышает 3 % от номинального тока генератора, то напряжение на зажимах генератора $U = E$, что и регистрируется вольтметром.

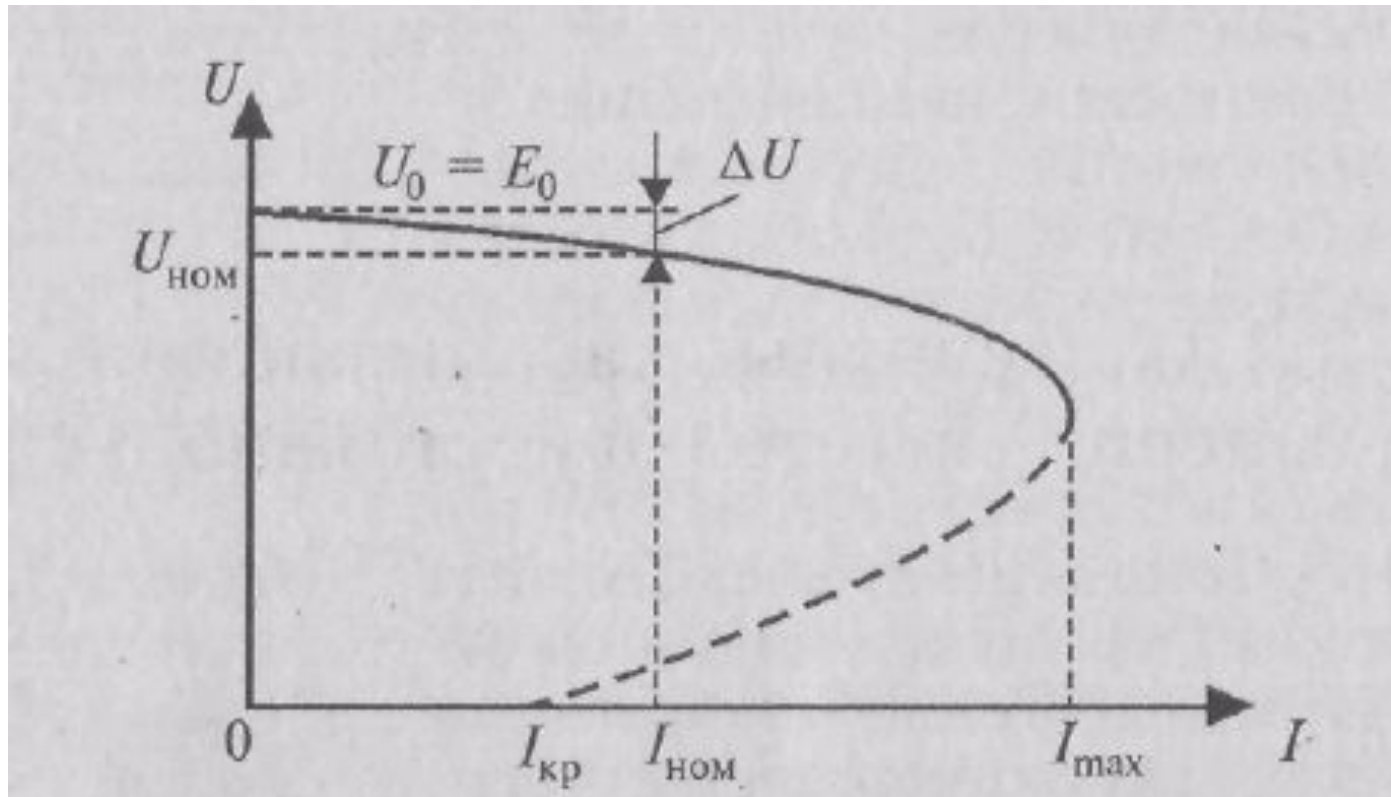
Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения



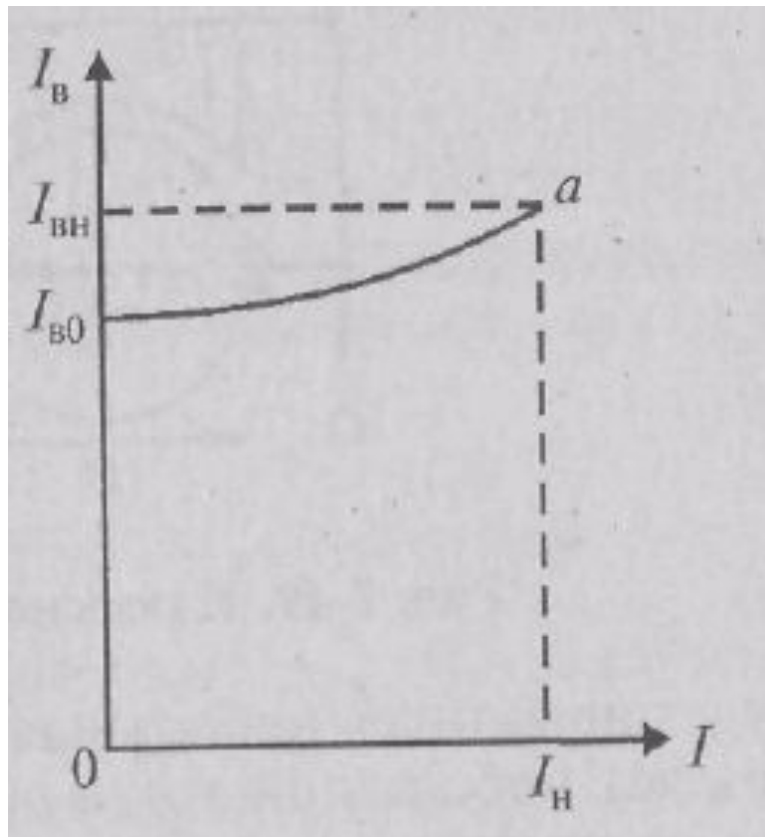
Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

- Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения $U = f(I)$ при $R_{BP} = \text{const}$ и $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ снимается при замкнутом рубильнике P и подключенной нагрузке R_H .
- Первая точка этой зависимости снимается при $I = 0$ (рубильник P разомкнут, и нагрузка R_H отключена) и таком токе возбуждения, устанавливаемым с помощью R_{BP} , при котором $U = 1,15 U_H$.
- В дальнейшем реостат R_{BP} не трогается, а значение тока I регулируется изменением сопротивления нагрузки R_H .

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения



Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения



Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения

$I_{\text{в}} = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$ аналогична регулировочной характеристике генератора независимого возбуждения, но идет несколько круче вследствие более значительного уменьшения напряжения генератора.

Основные характеристики и уравнения двигателей постоянного тока

Основные характеристики двигателей

- Механическая
- Пусковая
- Рабочая
- Регулировочная
- Скоростная

Механическая характеристика

- Механическая характеристика
 $n = f(M)$ — зависимость частоты вращения n от момента на валу двигателя M при $U = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$.
- Эту характеристику важно знать специалистам, занимающимся выбором и эксплуатацией двигателей.

Основные уравнения двигателей постоянного тока

$$E = c_E n \Phi.$$

$$U = E + I R_{\text{я}}.$$

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi.$$

Пуск электрических двигателей в ход

- В первый момент при пуске двигателя в ход его якорь неподвижен, т. е. находится в покое и $n = 0$. Поэтому для этого момента времени противо-ЭДС, наводимая в обмотке якоря, равняется нулю

$$E = c_e n \Phi = 0.$$

- Ток якоря в момент пуска двигателя, т. е. пусковой ток I_{Π} двигателя

$$I = I_{\Pi} = \frac{U - 0}{R_{\text{я}}}.$$

Пусковой ток двигателя

- При включении двигателя на постоянное напряжение U в несколько вольт пусковой ток I_p может приобрести такое значение, которое окажется значительно больше номинального тока (в десятки раз) и недопустимым для дальнейшей нормальной эксплуатации двигателя.

Ограничение пускового тока

- Наиболее распространенным способом ограничения пускового тока I_n на время пуска двигателя — это включение на время пуска последовательно с обмоткой якоря специального пускового реостата с сопротивлением R_n , который после окончания процесса пуска должен быть выведен из цепи якоря.
- Сопротивление R_n выбирается по допустимому значению пускового тока.

Допустимое значение пускового тока

- $I_{п доп}$, которое может превышать номинальное значение тока якоря в 1,6-2,5 раз,

$$I_{п доп} = \frac{U}{R_{я} + R_{п}} = (1,6 - 2,5) I_{я ном}.$$

Механическая характеристика двигателя

$$U = E + I R_{\text{я}};$$

$$U = c_E n \Phi + I R_{\text{я}};$$

$$U = c_E n \Phi + \frac{M}{c_M \Phi} R_{\text{я}};$$

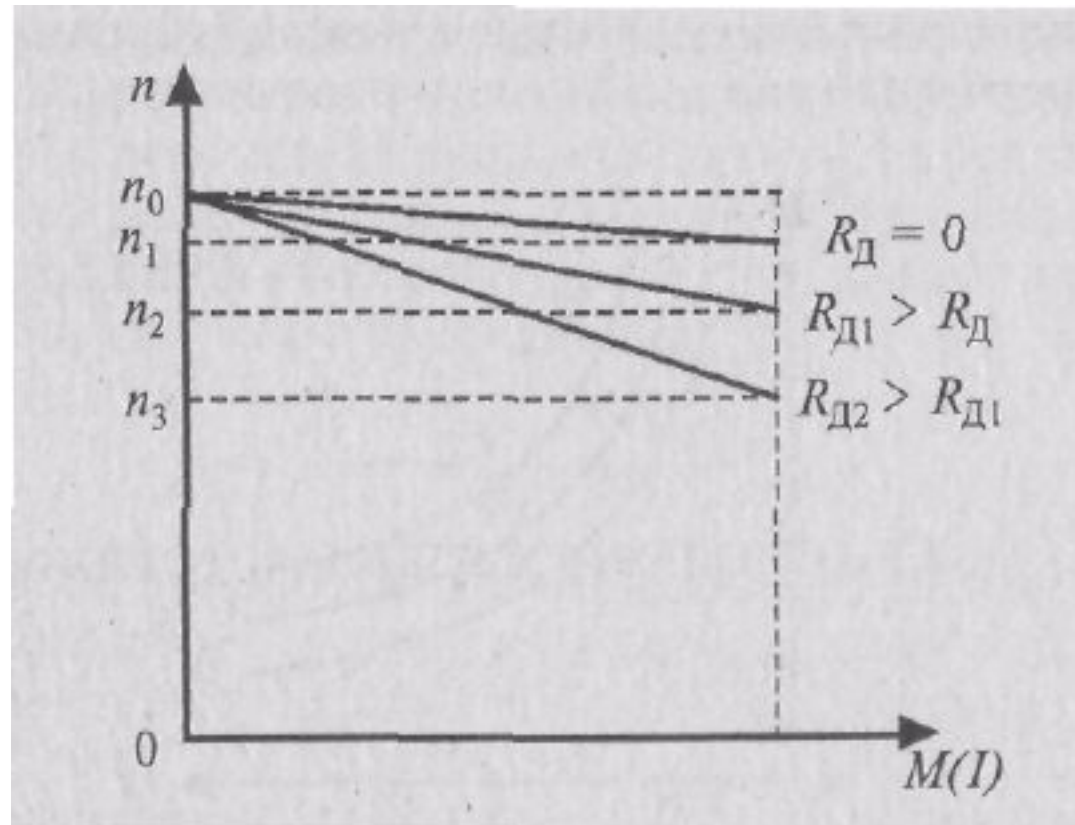
$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M.$$

Уравнение механической характеристики

- Для двигателя параллельного возбуждения при $U = \text{const}$ ток возбуждения тоже $I_B = \text{const}$ и, следовательно, $\Phi = \text{const}$.
- Тогда в режиме холостого хода при $M = 0$ и $n_x = U/c_e \Phi$ уравнение механической характеристики принимает вид прямой линии

$$n = n_x - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M.$$

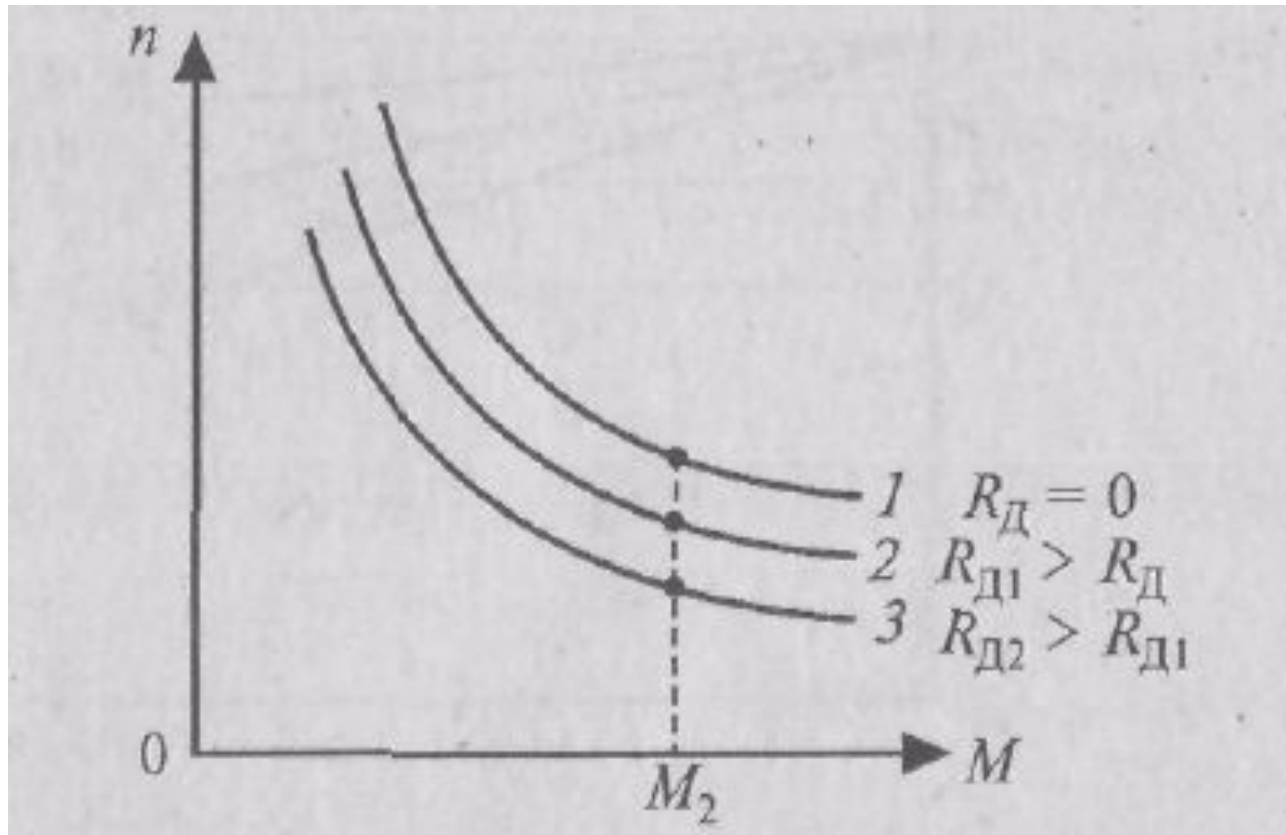
Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения



Уравнение механической характеристики для двигателя последовательного возбуждения

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M =$$
$$= \frac{Uk}{c_E \sqrt{M}} - \frac{R_{\text{я}} k^2}{c_E c_M M} M \approx \frac{C}{\sqrt{M}}.$$

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения



Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения

- Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения располагается между характеристиками двигателя с параллельным возбуждением и двигателя с последовательным возбуждением.

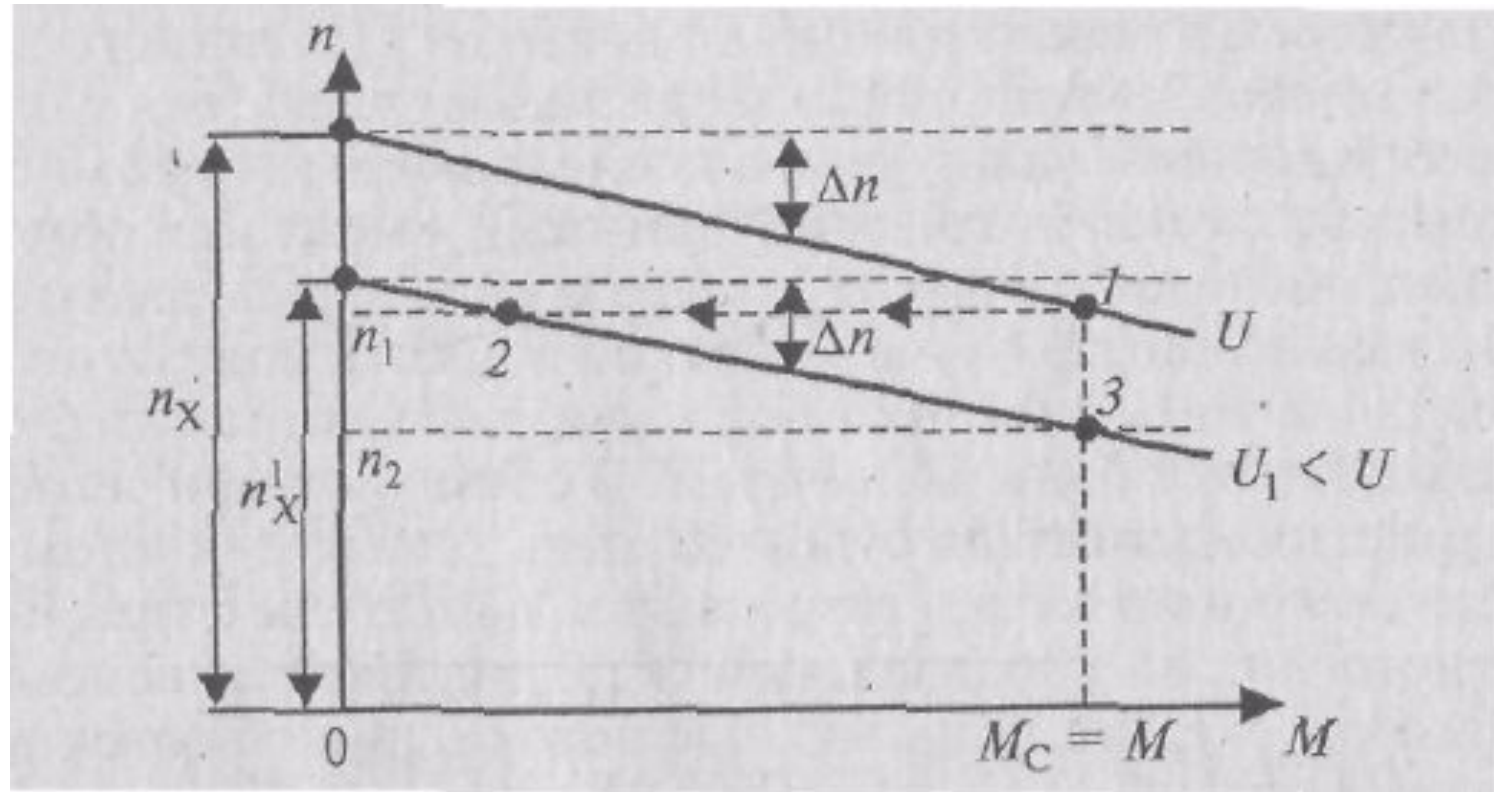
Способы регулирования скорости вращения двигателя

- изменением подводимого к двигателю напряжения U ;
- изменением магнитного потока Φ за счет изменения тока в обмотке возбуждения I_B , так как $\Phi = f(I_B)$;
- изменением сопротивления цепи якоря путем включения последовательно с $R_{\text{я}}$ регулировочного дополнительного реостата $R_{\text{д}}$, так что общее сопротивление цепи якоря становится равным $R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$.

Уравнение для частоты вращения

$$n = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c_E \dot{\Phi}(I_B)}.$$

Регулирование частоты вращения изменением подводимого к двигателю напряжения



Реостатное регулирование скорости двигателя

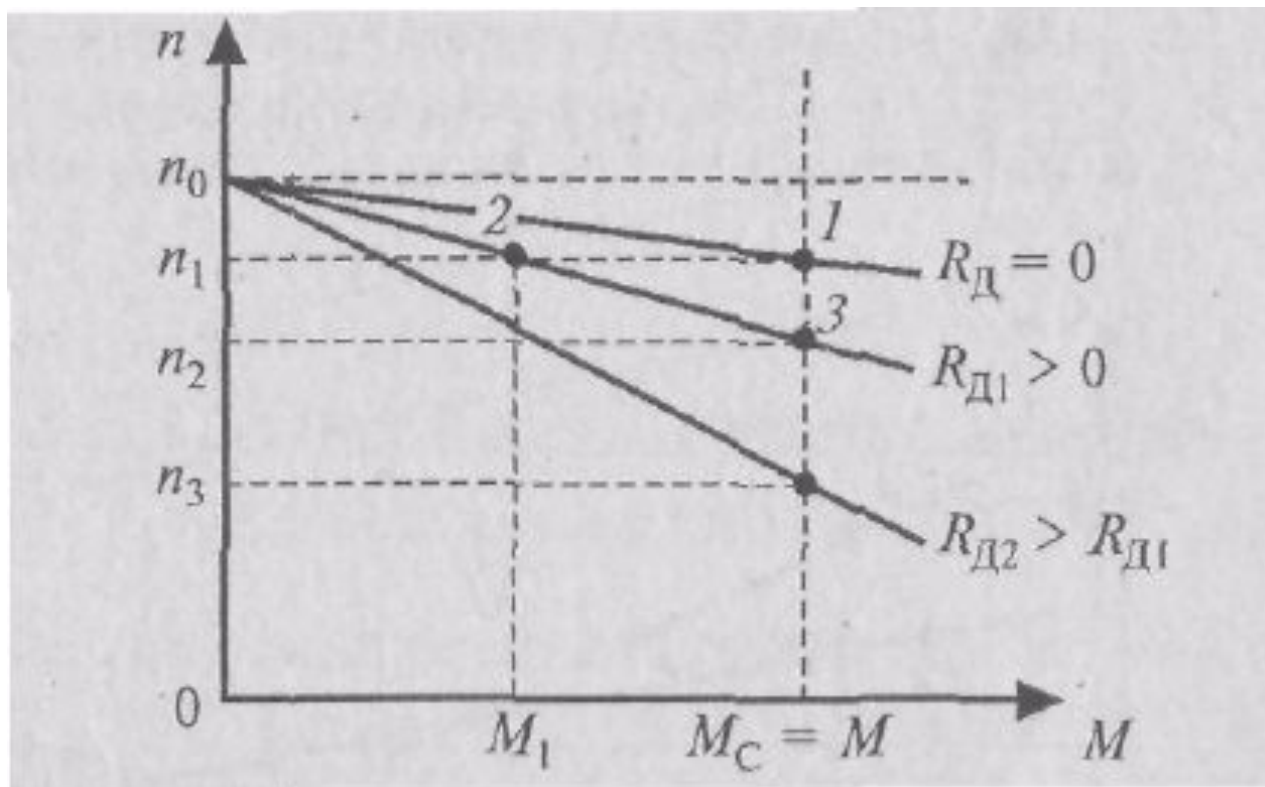
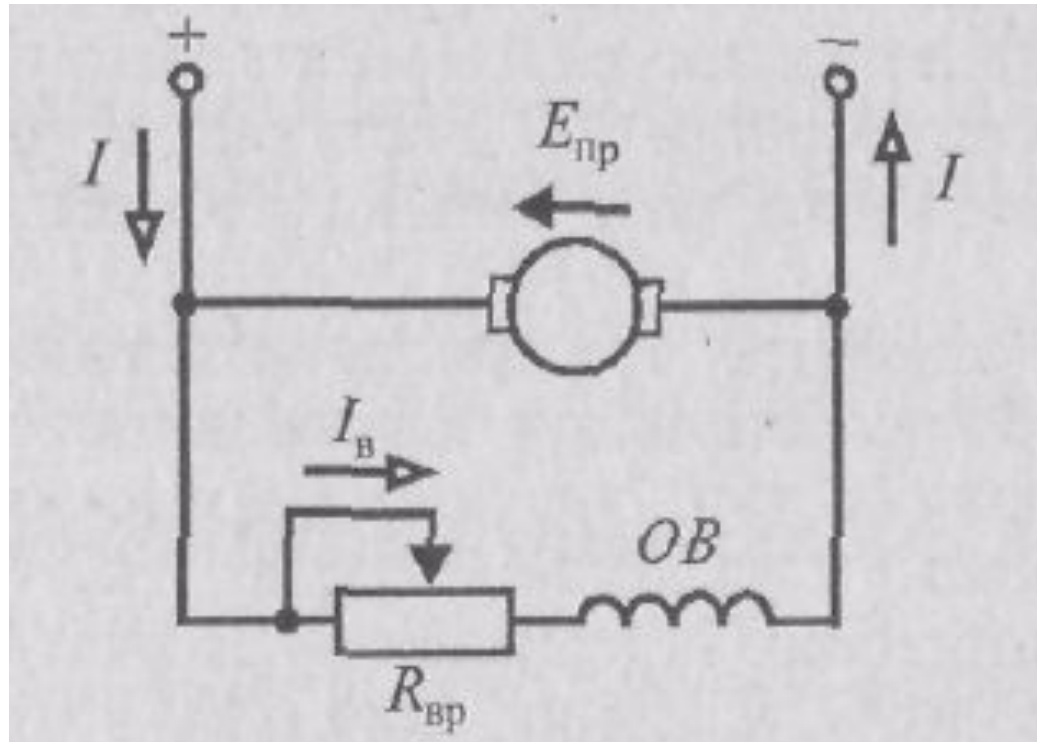
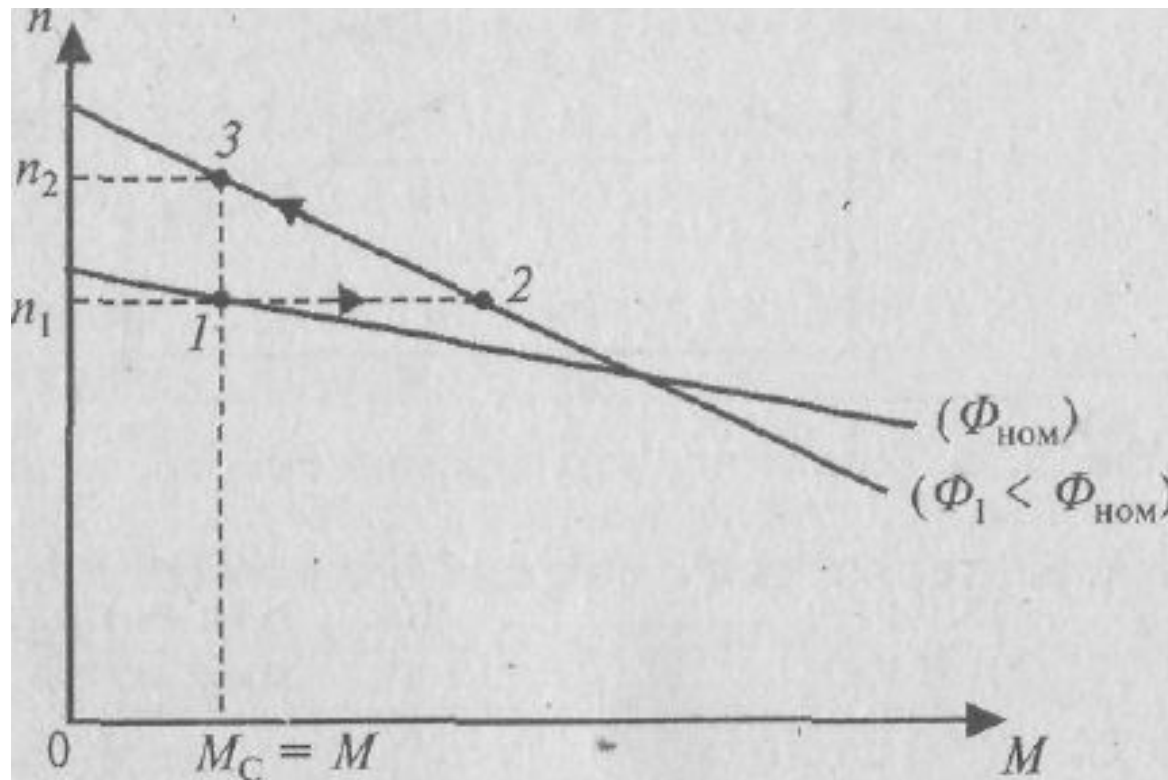


Схема двигателя параллельного возбуждения с регулированием тока возбуждения и магнитного потока



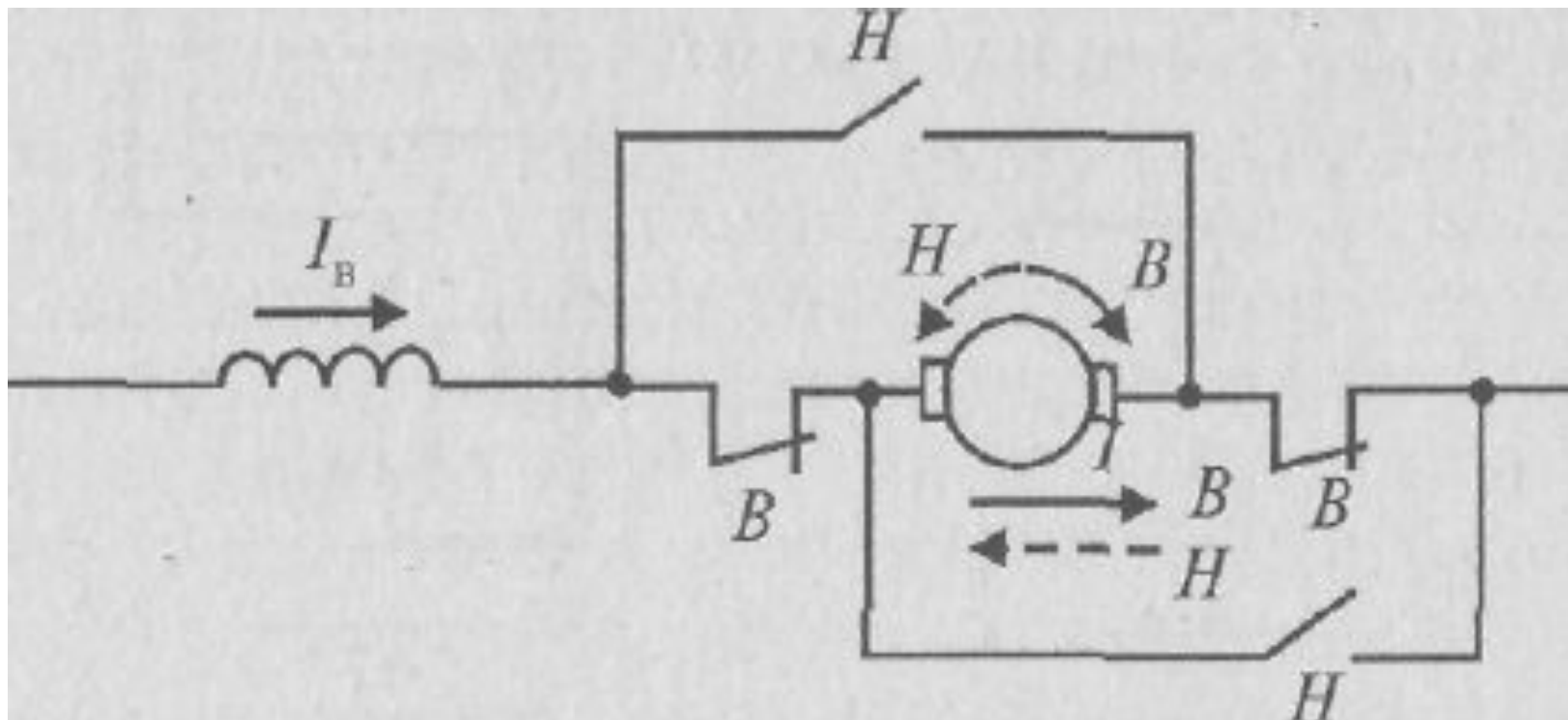
Регулирование числа оборотов двигателя изменением магнитного потока



Изменение направления вращения двигателя

- Для изменения направления вращения двигателя — реверсирования — надо изменить или направление магнитного потока или направление тока в обмотке якоря, соответствующим переключением концов этих обмоток.
- Такое переключение производится специальным аппаратом-реверсором, имеющим по две пары контактов В «вперед» и Н «назад».
- Чтобы не перемагничивать машину, обычно меняют направление тока якоря.

Схема для реверсирования двигателя последовательного возбуждения



Электрическое торможение двигателя

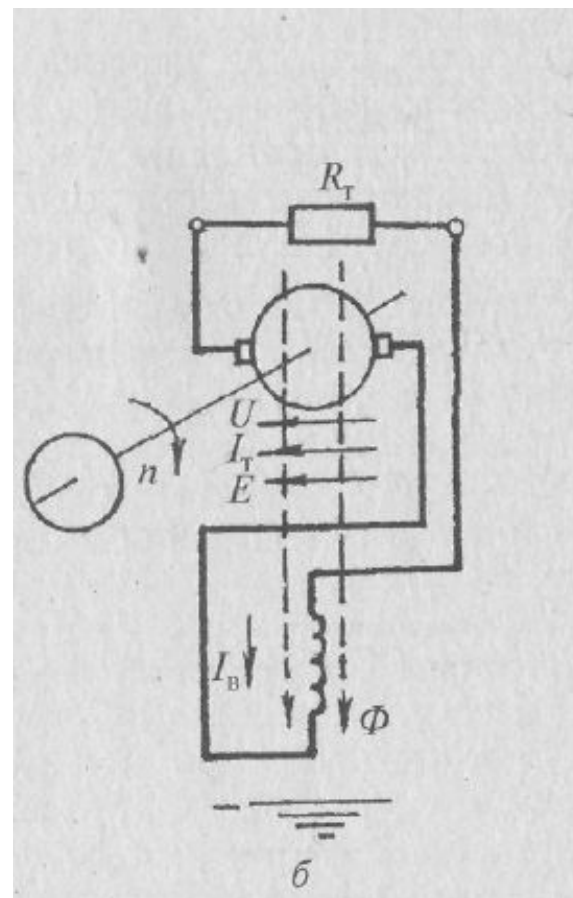
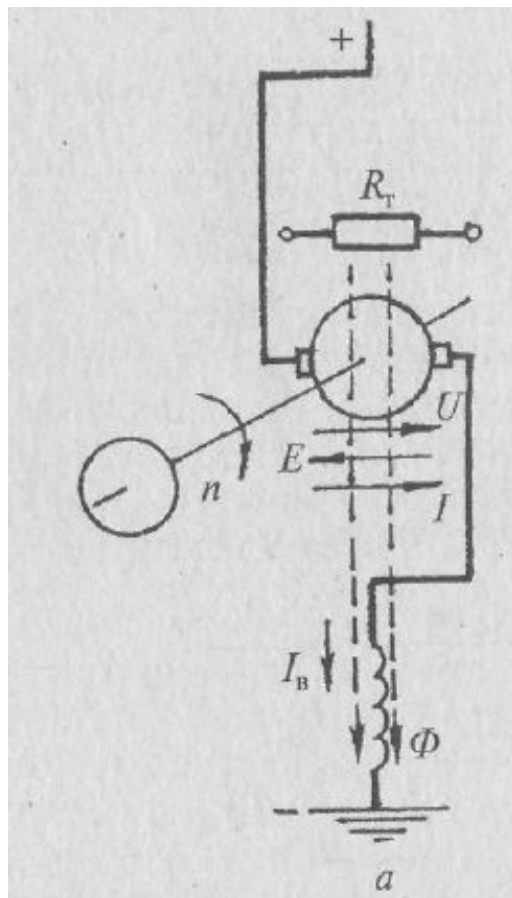
- Электрическое торможение основано на создании в двигателе тормозного момента, по направлению противоположного вращающемуся моменту, а при отключении двигателя - моменту инерции.

Виды электрического торможения

Применяются три вида электрического торможения:

- динамическое (реостатное),
- рекуперативное (торможение с отдачей электроэнергии в сеть),
- торможение противовключением.

Схема переключения двигателя последовательного возбуждения для динамического торможения



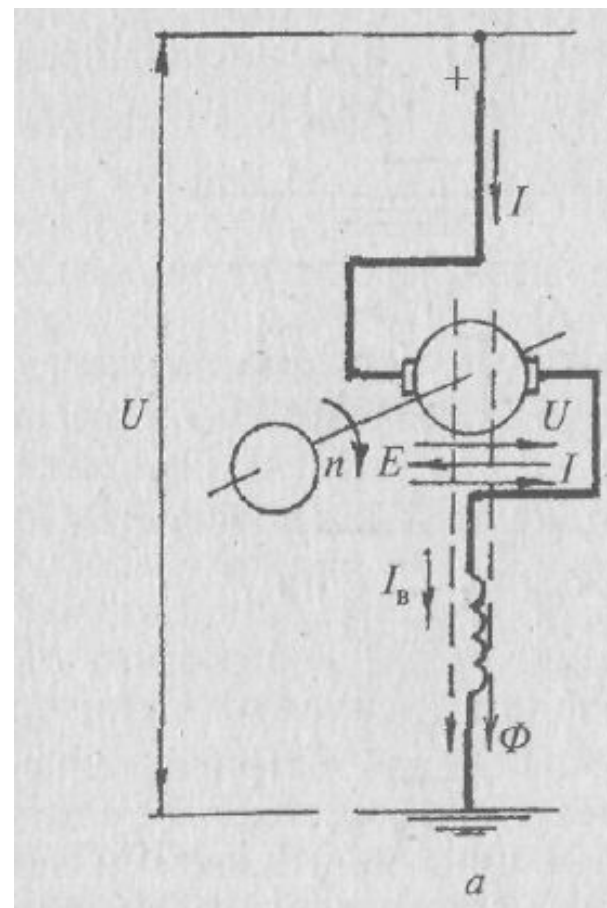
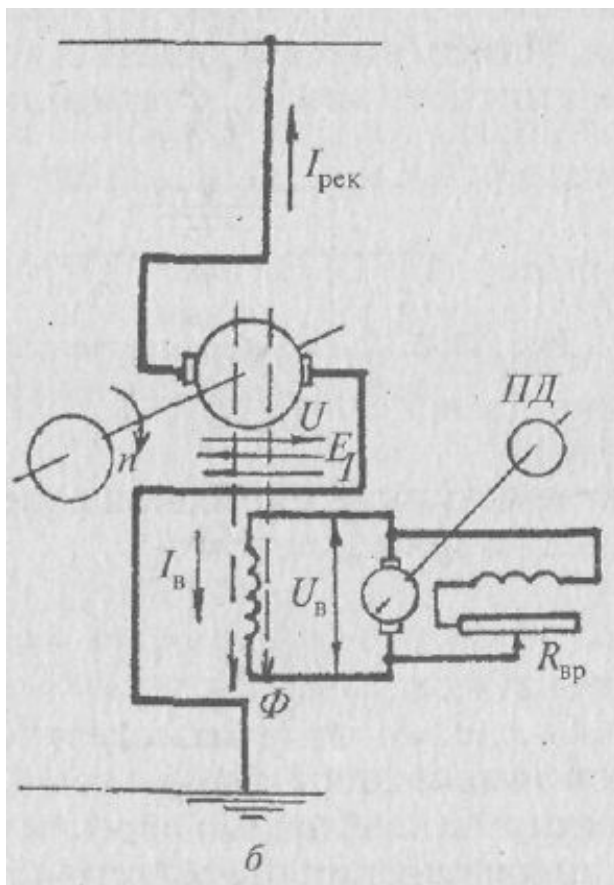
Генераторный тормозной ток

$$I_T = \frac{E}{R_{\text{я}} + R_T}.$$

Рекуперативное торможение

- *Рекуперативное* торможение основано на переходе двигателя в генераторный режим.
- Оно отличается от динамического тем, что электрическая энергия, преобразованная при торможении из механической, не гасится бесполезно в тормозном реостате, нагревая его, а отдается обратно в сеть.

Схема переключения двигателя последовательного возбуждения для рекуперативного торможения



Условия замены двигателя последовательного возбуждения генератором

- противо-ЭДС машины E , сохраняя свое направление, должна стать по значению больше напряжения сети U , т. е. $E > U$ (только тогда ток якоря изменит свое направление и станет рекуперативным генераторным током);
- при переходе к торможению ток в обмотке возбуждения не должен менять своего направления, чтобы машина не размагнитилась.

Торможение противовключением

- Торможение противовключением осуществляется переключением концов обмотки якоря.
- Изменение направления тока $I_{\text{я}}$ при неизменном направлении магнитного потока Φ приводит к изменению направления момента машины M , который вместо движущегося становится тормозным.
- Таким образом, якорь двигателя затормаживается.



Схема включения двигателя последовательного возбуждения при торможении противовключением

