

- Лекция № 12
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА. НАЗНАЧЕНИЕ И
УСТРОЙСТВО

МПТ, историческая справка

- Машины постоянного тока (МПТ) по своему назначению делятся на электрические генераторы и электродвигатели. Генераторы постоянного тока (ГПТ) преобразуют механическую энергию в электрическую. Двигатели постоянного тока (ДПТ) преобразуют электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.
- Машины постоянного тока относятся к классу коллекторных машин, характерным признаком которых является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот.
-

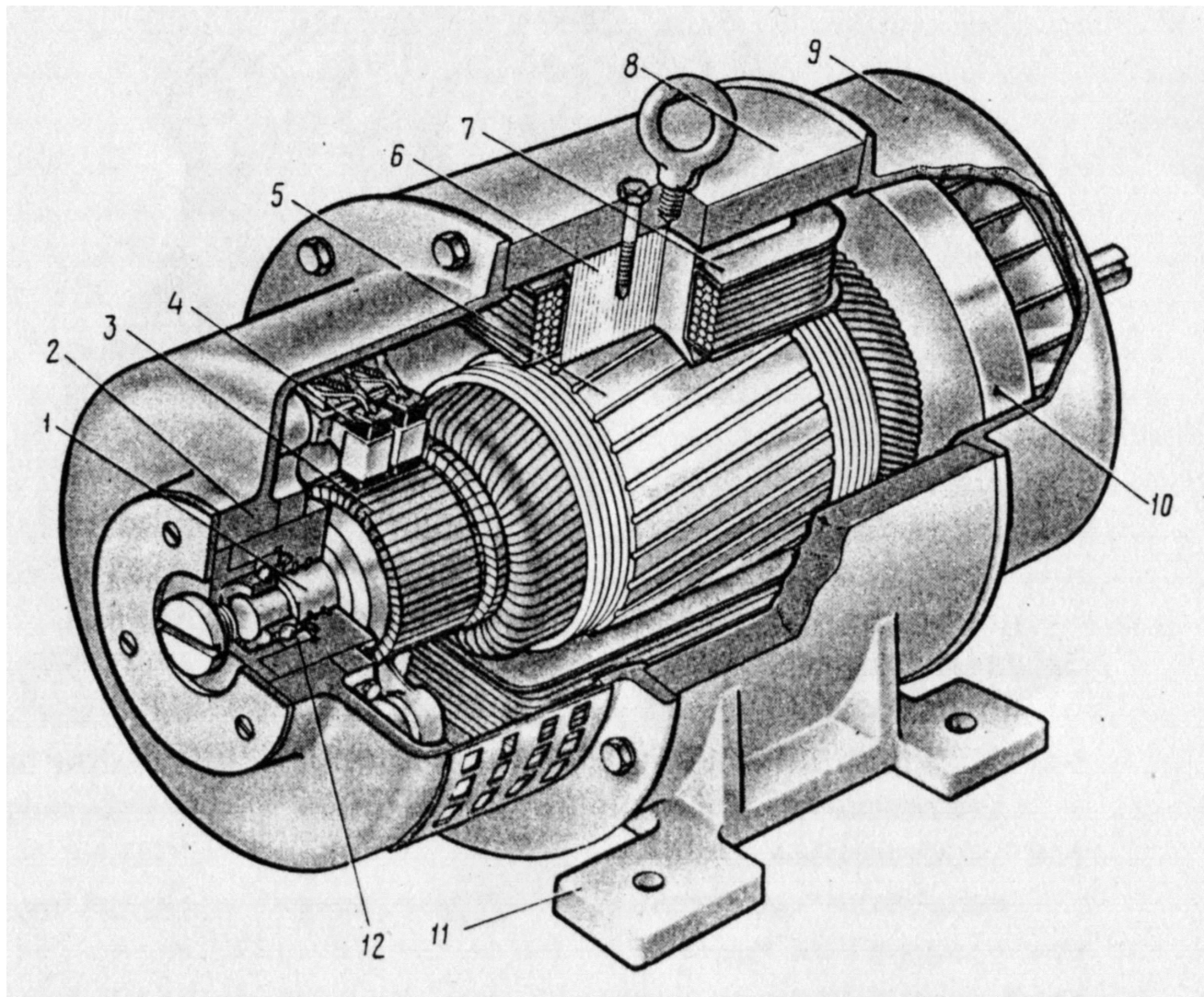
- Электрические машины были изобретены в XIX веке. В 1831 году М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции и сформулировал закон электромагнитной индукции. В следующие годы (1833 – 1834) русский академик Э.Х. Ленц дал глубокий анализ явлению электромагнитной индукции и в своем «правиле» показал, что это явление и закон Ампера (силовое действие магнитного поля на ток) представляют собой две стороны единого электромагнитного процесса. Из правила Ленца вытекает процесс обратимости электрической машины.
- В годы, непосредственно следующие за открытием Фарадея и Ленца, появляются первые модели электромагнитных генераторов постоянного тока. В 1838 г. петербургский академик Б.С. Якоби испытал первый электрический двигатель с вращательным движением, а первый генератор постоянного тока появился в 1890 году.

- Генераторы постоянного тока входят в состав систем электропитания специального оборудования, например, в радиотехнических установках; используются для питания электролитических ванн, аппаратуры управления и контроля и т.д.
- Двигатели постоянного тока большой мощности применяют на транспорте, в системах электропривода металлорежущих станков, прокатных станов, подъемно-транспортных машин. ДПТ малой мощности широко используются в качестве исполнительных двигателей систем автоматического управления. В отличие от асинхронных двигателей ДПТ позволяют плавно регулировать частоту вращения в широком диапазоне сравнительно простыми способами, имеют большой пусковой момент.

Устройство машины постоянного тока

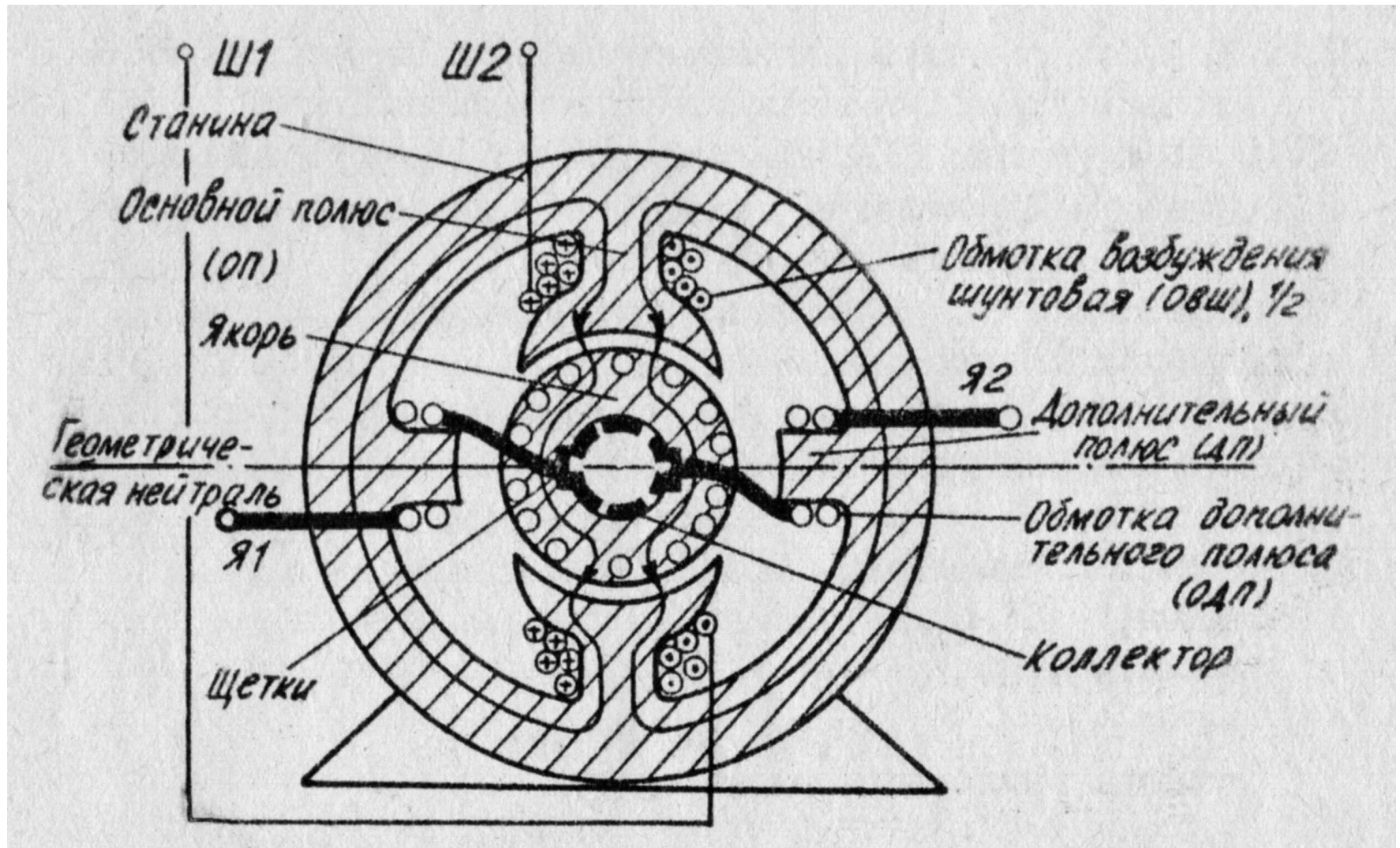
- Электрические машины постоянного тока обратимы. Это означает, что одна и та же машина может работать как генератор, и как двигатель. Но генератор и двигатель отличаются расчетными и конструктивными особенностями, поэтому МПТ проектируется и используется либо как двигатель, либо как генератор.
- На рис. 1. приведена машина постоянного тока и указаны основные элементы ее конструкции, на рис. 1. схематично показан поперечный разрез машины постоянного тока.

Рис. 1. Устройство машины постоянного тока



- Конструктивно генератор и двигатель выполняются одинаково и состоят из двух основных частей (рис. 1, 2): неподвижного статора, создающего основное магнитное поле машины, и вращающегося якоря. В обмотке якоря механическая энергия преобразуется в электрическую (генератор) или электрическая – в механическую (двигатель).
- Статор 8 (см. рис. 1.) МПТ называют также станиной. Станина изготавливается из магнитопроводящего материала (обычно литая сталь). На ней укреплены главные (основные) полюса 6 (см. рис. 1 и 2) и дополнительные полюса (см. рис. 2). Станина и главные полюса составляют магнитопровод МПТ, по которому замыкается главный магнитный поток Φ , создаваемый главными полюсами. Главный полюс состоит сердечника 6 и полюсной катушки 7 на которой размещается обмотки возбуждения, через выводы которой Ш1, Ш2 (см. рис. 2) подводится ток возбуждения I_B .

Рис. 2. Поперечный разрез машины постоянного тока



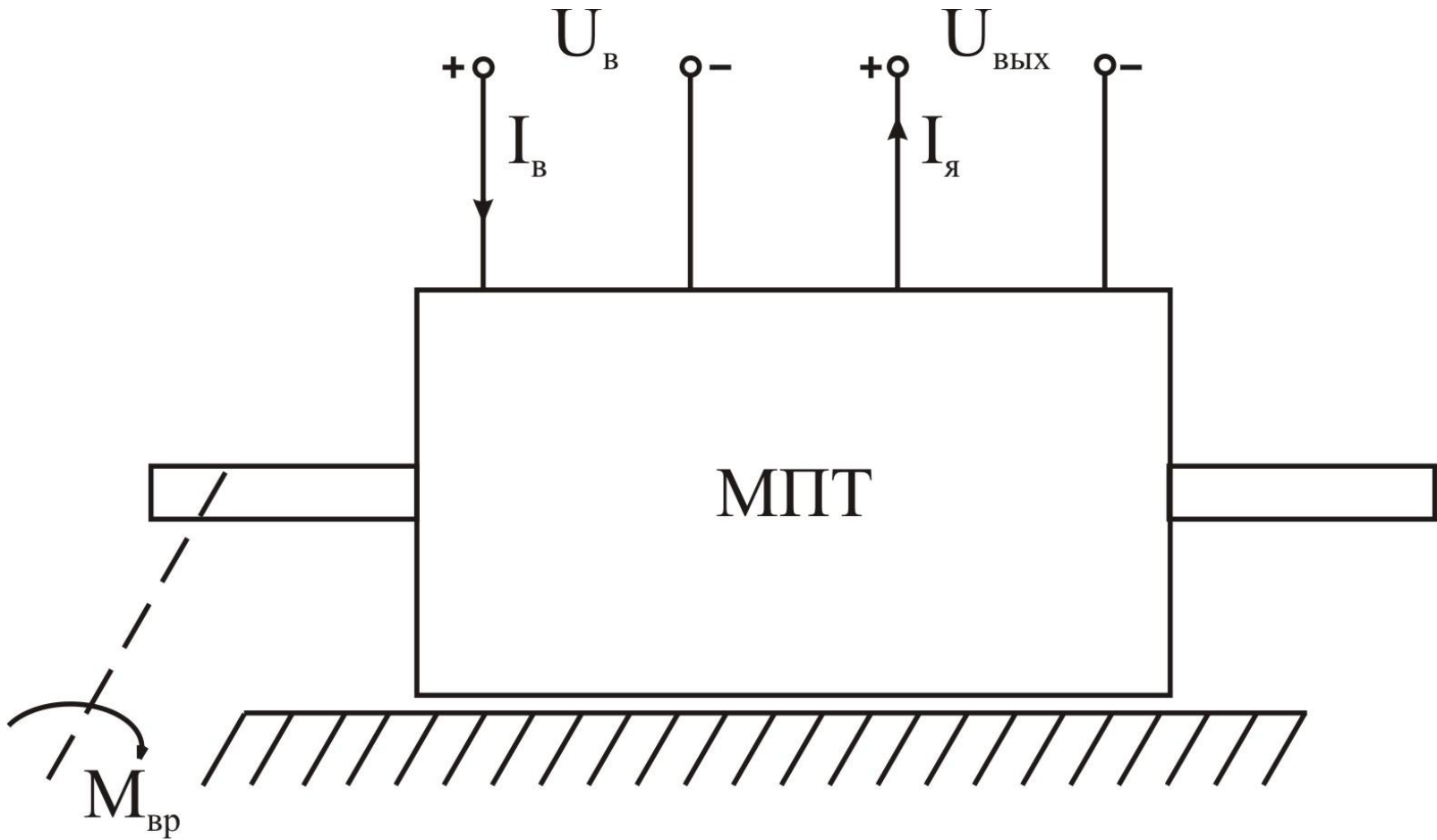
- Дополнительные полюса устанавливаются в машинах повышенной мощности (более 1кВт). Дополнительные полюса располагаются между главными (см. рис. 2), их число соответствует количеству главных полюсов или же вдвое меньше. Обмотка возбуждения дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря. Дополнительное магнитное поле, создаваемое ими, служит для улучшения коммутации.
- Сердечники главных и дополнительных полюсов изготавливаются сплошными или из отдельных пластин электротехнической стали.
- Якорь машины состоит из сердечника 5 с обмоткой, коллектора 3, которые крепятся на одном валу 1 (см. рис. 1, 2). В современных машинах применяется якорь барабанного типа. Сердечник якоря набирается из изолированных пластин электротехнической стали. На внешней поверхности якоря нарезаются пазы, в которые укладывается якорная обмотка. Обмотка якоря выполняется из медного изолированного провода в виде секций.

- Коллектор 3, к которому присоединяется обмотка якоря, состоит из отдельных медных пластин, изолированных друг от друга. Коллектор у генераторов предназначен для выпрямления переменного тока якоря в постоянный для внешней цепи, у двигателей — для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря при его вращении. С одной стороны к пластинам коллектора припаиваются секции обмотки якоря. При вращении коллектора по нему скользят щетки 4, закрепляемые в специальных щеткодержателях. В МПТ используются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки. Щетки 7 отводят или подводят ток через коллектор к якорной обмотке с помощью специального гибкого кабеля.
- Машины постоянного тока обычно имеют принудительное воздушное охлаждение, осуществляемое вентилятором, насаженным на вал якоря.

Схемы включения машин постоянного тока

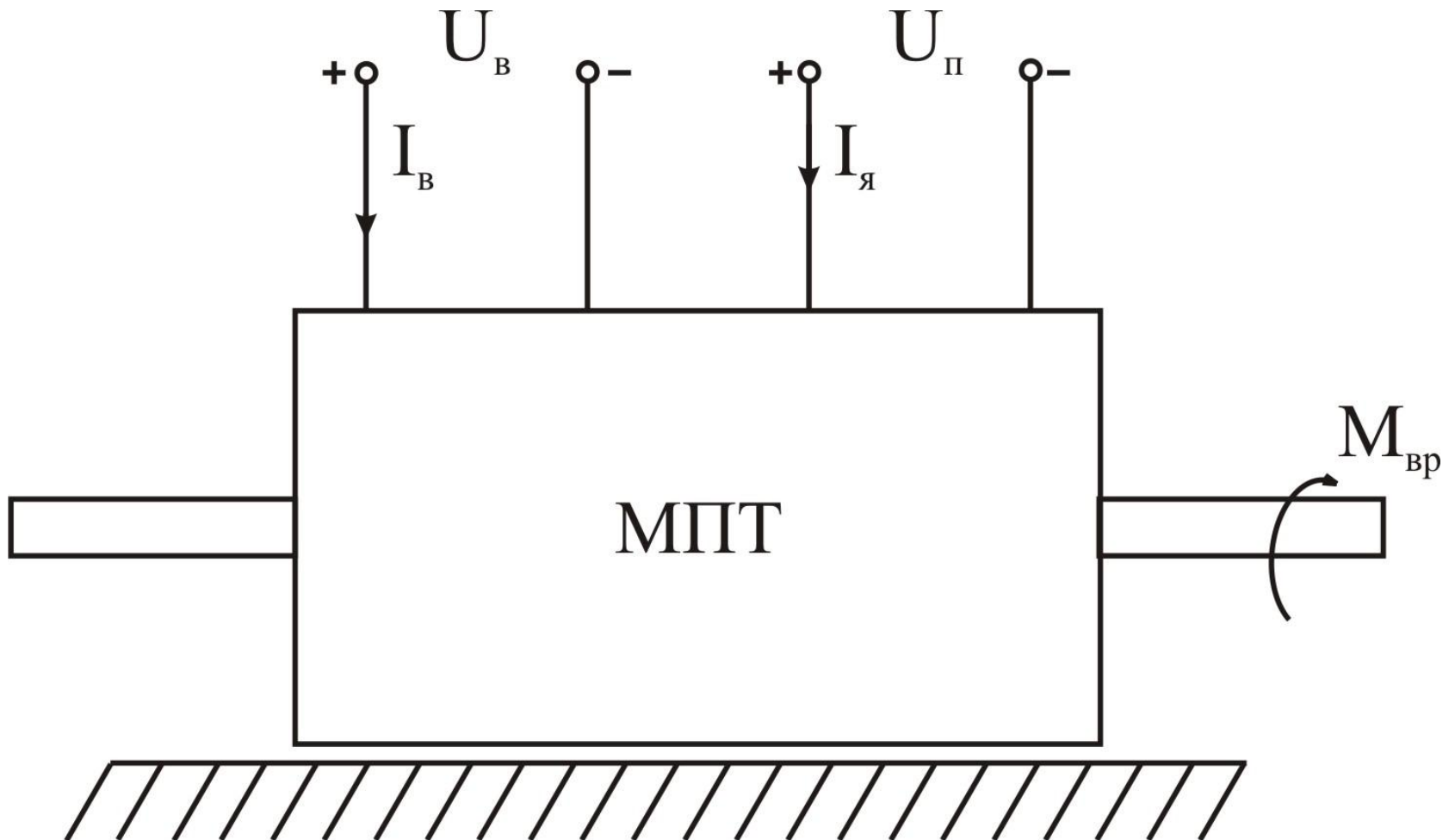
- Как и все электрические машины, машина постоянного тока обратима. Она работает в режиме генератора, если ее якорь вращается первичным двигателем (рис. 1.3), который создает вращающий момент $M_{вр}$, главное магнитное поле возбуждено током возбуждения $I_{в}$ от источника напряжения возбуждения $U_{в}$. По закону электромагнитной индукции в обмотке якоря индуцируется ЭДС $E_{я}$, которая через щетки подается на нагрузку с выходных клемм генератора в виде напряжения $U_{вых}$ (см. рис. 1.3).

Рис. 3. Схема включения МПТ в режиме ГПТ



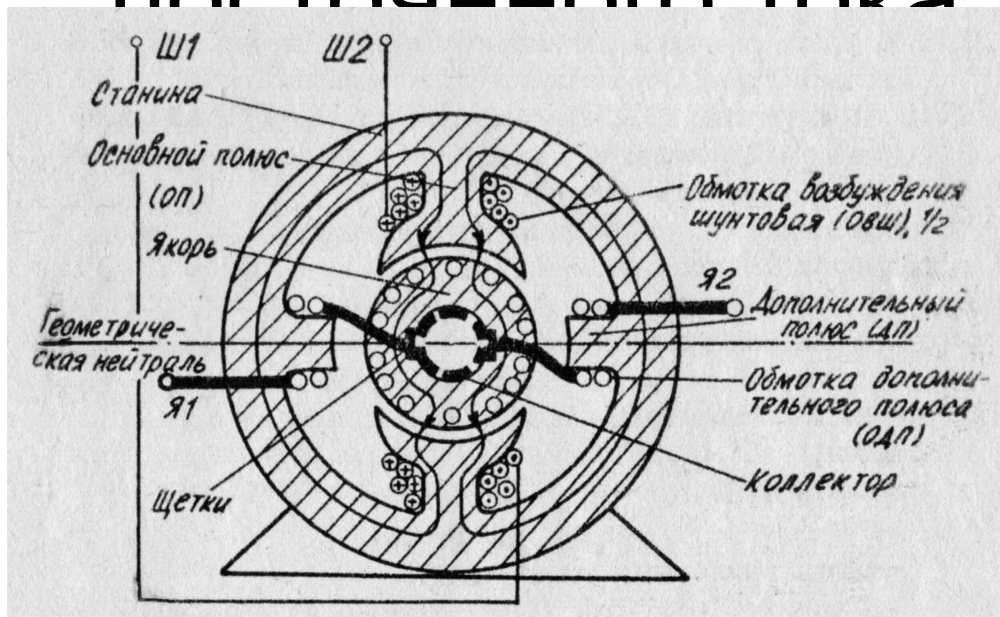
- В двигательном режиме (рис. 4) также возбуждено главное магнитное поле, а на якорную обмотку через щетки подводится напряжение питания U_p . В соответствии с законом Ампера взаимодействие тока якоря I_a с главным магнитным током создает на валу МПТ вращающий момент $M_{вр}$. Под действием $M_{вр}$ вращающийся якорь преодолевает момент нагрузки на валу и обеспечивает вращение вала с требуемой частотой n [об/мин].
- Все рабочие характеристики машин постоянного тока при работе как в режиме генератора, так и в режиме двигателя зависят от способа подключения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным, и наконец, цепи могут быть независимы одна от другой.

Рис. 4. Схема включения МПТ в режиме ДПТ



Принцип действия двигателя

постоянного тока



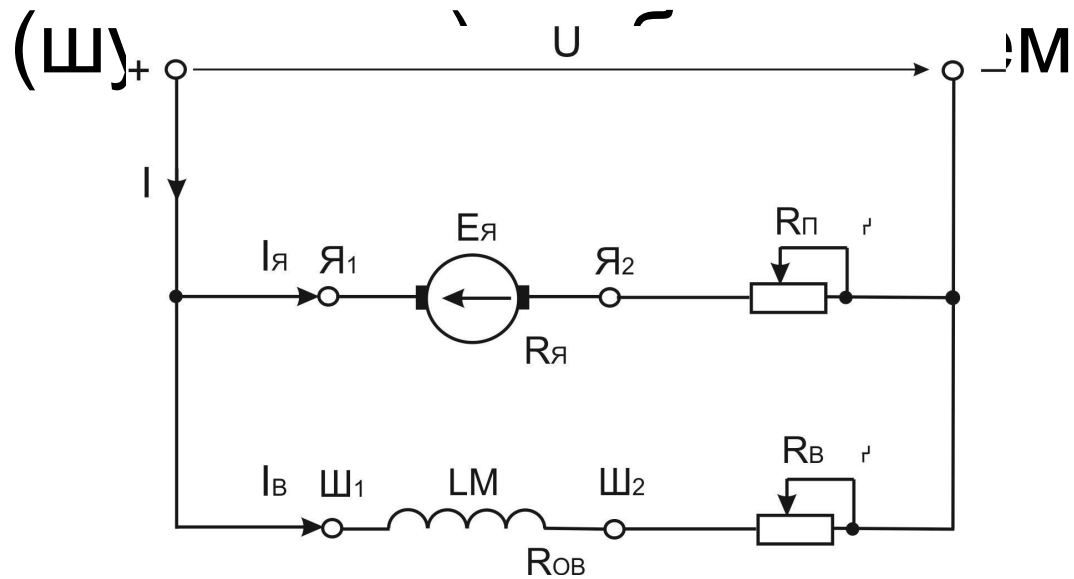
- Для включения МПТ в режим двигателя на обмотку возбуждения Ш1, Ш2 подается напряжение U_B . Возникающий при этом ток в обмотке возбуждения I_B создаёт главный магнитный поток.

- На якорную обмотку через щётки подводится напряжение питания $U_{\text{п}}$. В двигателе происходит преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию, отдаваемую рабочему механизму. В основе принципа действия двигателя лежит взаимодействие магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и тока, протекающего по виткам обмотки якоря. В соответствии с законом Ампера при воздействии на эти витки с током якоря $I_{\text{Я}}$ магнитного потока Φ возникают электромагнитные силы F , под действием которых якорь начинает вращаться в направлении, которое определяется по правилу левой руки. Обмотка якоря состоит из большого числа витков, каждый из которых соединяется с соответствующими пластинами коллектора. При вращении якоря происходит смена сторон витка, попадающих под воздействие магнитного потока Φ . При этом изменяется направление тока в витке, но благодаря наличию коллектора электромагнитные силы F действует в одном и том же направлении и создают на якоре электромагнитный момент M , который для двигателя является вращающим моментом.

способы возбуждения (создания основного магнитного потока)

- По способу возбуждения (создания основного магнитного потока) двигатели постоянного тока различаются:
 - а) параллельного возбуждения (шунтовые);
 - б) последовательного возбуждения (сериесные);
 - в) смешанного возбуждения (компаундные).
- Шунтовые обмотки наматываются относительно тонким проводом (по сравнению с обмоткой якоря) и с большим числом витков, в связи с чем, ток возбуждения мал и составляет $I_B = (0,01 \dots 0,1) \cdot I_{НОМ}$, где $I_{НОМ}$ – номинальный ток двигателя.
- Сериесные обмотки включаются последовательно с обмоткой якоря и рассчитываются на полный ток двигателя.
- Наиболее распространенная схема включения ДПТ с параллельным возбуждением .

Электрическая схема ДПТ с параллельным



- На схеме обозначено: U – напряжение питания; I – ток, потребляемый из сети; $I_{Я}$ – ток якорной обмотки; $I_{В}$ – ток обмотки возбуждения; $E_{Я}$ – ЭДС якорной обмотки; $R_{Я}$ – сопротивление якорной обмотки; $R_{ОВ}$ – сопротивление обмотки возбуждения; $R_{П}$ – пусковой реостат в цепи якоря; $R_{В}$ – регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения; Я1, Я2 – зажимы якорной обмотки; Ш1, Ш2 – зажимы обмотки возбуждения (шунтовой).

Пуск ДПТ

- В момент пуска ток в цепи якоря определяется по закону Ома

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

- Так как сопротивление $R_{\text{Я}}$ невелико, ток якоря может в 50...70 раз превышать номинальный ток двигателя, что недопустимо, поскольку приведет к сильному искрению и разрушению коллектора. Кроме того, при таком токе возникает недопустимо большой момент двигателя, а при частых пусках возможен перегрев обмотки якоря.
- Для уменьшения пускового тока в цепь якоря последовательно включается пусковой реостат $R_{\text{П}}$. По мере увеличения частоты вращения сопротивление реостата $R_{\text{П}}$ уменьшают до нуля. Если пуск двигателя автоматизирован, то пусковой реостат выполняют из нескольких ступеней, которые выключают последовательно по мере увеличения частоты вращения. При такой схеме пуска пусковой ток якоря определяется соотношением

$$I_{\text{ЯП}} = \frac{U}{R_{\text{Я}} + R_{\text{П}}}$$

- Обычно величину сопротивления R_{Π} рассчитывают из соотношения
- $$I_{ЯП} \leq (1,8...2,5) \cdot I_{ЯН}$$
- Чтобы при сравнительно небольшом пусковом токе получить большой пусковой момент, пуск двигателя осуществляют с наибольшим магнитным потоком Φ_{max} . В ДПТ магнитный поток Φ создаётся током I_B обмотки возбуждения. Из схемы по закону Ома

$$I_B = \frac{U}{R_{OB} + R_B}$$

- Для обеспечения Φ_{max} реостат R_B переводится в нулевое положение ($R_B = 0$). Тогда в обмотке возбуждения в момент пуска возникает максимально допустимый, т.е. номинальный ток возбуждения

$$I_{Bmax} = I_{BH} = U / R_{OB}$$

Рабочий режим ДПТ

- После пуска обмотка якоря вращается с частотой n (об/мин) в магнитном поле Φ и в ней индуцируется ЭДС $E_{\text{я}}$, направленная встречно напряжению питания U

- ,
$$\Phi_{\text{я}} \neq C_E \cdot \dots$$

- где C_E – электрическая постоянная ДПТ.
- Для схемы замещения якорной цепи можно записать уравнение по II закону Кирхгофа при $R_n=0$:

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

- Следовательно, после пуска ток в якорной цепи определяется соотношением

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

Вращающий момент ДПТ

- На валу ДПТ в результате взаимодействия проводников обмотки якоря с током $I_{\text{я}}$ и магнитного потока Φ возникает вращающий момент

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

-
- Где c_M – механическая постоянная ДПТ.
- Производственный механизм, приводимый в движение двигателем, создаёт момент сопротивления M_C , действующий навстречу моменту двигателя M . При достижении равенства $M = M_C$ двигатель работает в установившемся режиме с частотой вращения $n = \text{const}$.
-
- Двигатели постоянного тока обладают свойством саморегулирования:
- при изменении нагрузки автоматически устанавливается новое значение скорости, при которой двигатель работает устойчиво. Роль регулятора играет противо-ЭДС, возникающая в обмотке якоря.

Изменения направления вращения

- Вращающий момент в двигателе возникает в результате взаимодействия тока в якорной обмотке и магнитного потока.

$$M \neq C_M \cdot \cdot$$

- Из этого выражения видно, что величина и направление вращающего момента определяются величиной и направлением тока якоря и тока возбуждения, так как $\Phi = f(I_B)$. Отсюда следует два способа изменения направления вращения якоря ДПТ:
 - 1.Изменением направления тока $I_{\text{я}}$. Для этого достаточно поменять подключение зажимов якорной обмотки Я1 и Я2 .
 - 2.Изменением направления магнитного потока Φ . Для этого необходимо изменить направление тока $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения, поменяв местами зажимы Ш1 и Ш2 обмотки возбуждения.
- .

Номинальные технические параметры двигателя постоянного тока

- В техническом паспорте ДПТ и в справочной литературе приводятся технические параметры двигателя для номинального режима:
- $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение питания, которое следует подводить к двигателю. Обмотка возбуждения (шунтовая) обычно рассчитана на то же номинальное напряжение;
- $P_{2НОМ}$ – номинальная мощность, развиваемая двигателем на валу при полной нагрузке;
- $I_{НОМ}$ – номинальный ток, потребляемый двигателем из сети при нагрузке $P_{2НОМ}$ и напряжении $U_{НОМ}$;
- $n_{НОМ}$ (об/мин) – номинальная частота вращения;
- $\eta_{НОМ}$ – КПД двигателя при номинальной нагрузке.
-

- Пользуясь номинальными данными можно определить номинальную мощность, потребляемую двигателем из сети,

- $$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} ,$$

- и номинальный момент, развиваемый на валу:

- $$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} , \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

- Ток, потребляемый двигателем из сети, в соответствии со схемой определяется по I закону Кирхгофа

- $$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}} .$$

- Ток возбуждения $I_{\text{в}}$ при номинальной нагрузке мал и при расчетах принимают .

$$I_{\text{яном}} \approx I_{\text{ном}}$$

Механические характеристики двигателя постоянного тока

- Механическая характеристика $n = f(M)$ определяет зависимость частоты вращения двигателя от развиваемого им момента. Из основного уравнения для цепи якоря следует, что частота вращения определяется выражением

$$\Phi = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = c_E \cdot n \cdot \Phi + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}$$

- следует, что частота вращения определяется выражением

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

- которое называется электромеханической характеристикой $n = f(I_{\text{я}})$.

- В установившемся режиме ($M = M_C$) ток, потребляемый двигателем, определяется моментом нагрузки на валу

$$I_{\text{я}} = \frac{M_C}{\Phi}$$

- На основе приведённых соотношений можно получить уравнение механической характеристики

$$M = \frac{U}{\Phi_E \cdot c_M} - \frac{R_{\text{Я}}}{c \cdot \Phi^2}.$$

- Механическая характеристика при номинальных параметрах $U = U_{\text{НОМ}}$, $\Phi = \Phi_{\text{НОМ}}$ и сопротивлениях реостатов $R_n = 0$, $R_B = 0$ называется естественной, при других параметрах — искусственной.
- Естественная механическая характеристика может быть построена расчетным путём по параметрам двух режимов: холостого хода и номинального режима.

- При работе вхолостую ($M_C = 0$) частота вращения n_0 определяется соотношением

$$n_0 = \frac{U_{\Theta M}}{\Phi_E} ,$$

- в котором $\Phi_E \cdot \Phi$ определяется по параметрам номинального режима

$$\Phi_E \cdot \Phi = \frac{U_{\Theta M} - I_{\text{НОМ}} \cdot R_{\text{Я}}}{n_{\Theta M}}$$

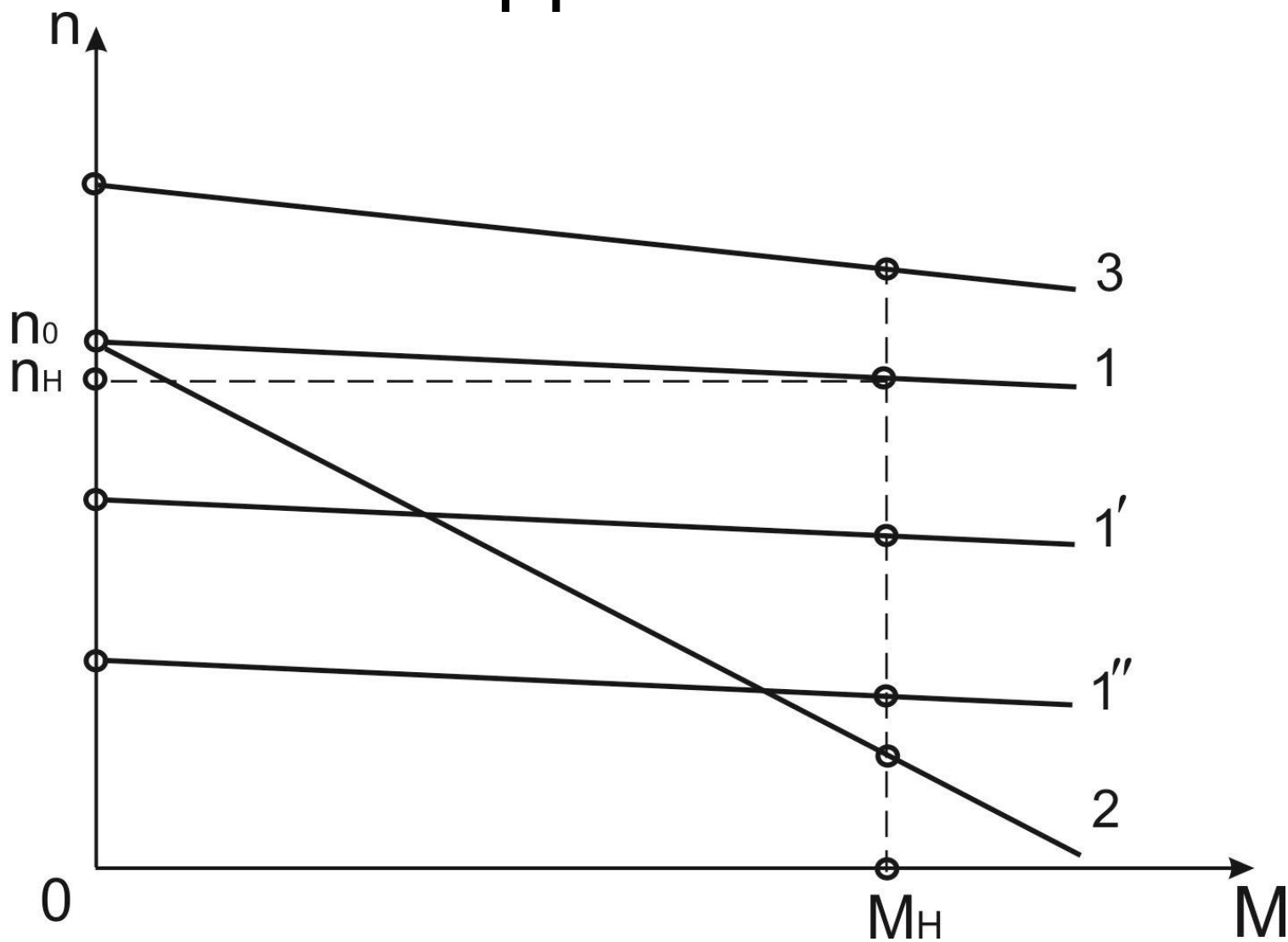
- Величина сопротивления якорной обмотки с достаточной точностью определяется из выражения

$$R_{\text{Я}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{НОМ}}) \cdot \frac{U_{\Theta M}}{I_{\Theta M}}$$

- Для номинального режима частота вращения известна: $n = n_{\text{НОМ}}$, а номинальный момент $M_{\text{НОМ}}$ определяется выражением

$$M_{\Theta M} = \frac{9550 \cdot P_{\Theta M}}{n_{\Theta M}}$$

Механические характеристики ДПТ



Способы регулирования частоты вращения

- Изменение частоты вращения ДПТ при изменении нагрузки определяется соотношением

$$\Delta n = \frac{n_{\Phi M} - n_H}{n_{\Phi M}}$$

- При неизменном напряжении питания $U = U_{\text{НОМ}}$ величина магнитного потока не зависит от нагрузки ($\Phi = \text{const}$). Поэтому изменение частоты вращения Δn определяется только падением напряжения в обмотке якоря

$$U_{\text{Я}} = I_{\text{Я}} \cdot R_{\text{Я}}$$

- Механическая характеристика двигателя описывается уравнением

$$M = \frac{U}{\Phi_E} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E \cdot \Phi_M^2}$$

- Из этого уравнения следует, что при заданной постоянной нагрузке ($M = M_C = \text{const}$) частота вращения n пропорциональна подводимому к двигателю напряжению питания U и обратно пропорциональна магнитному потоку Φ . Отсюда следуют три способа регулирования частоты вращения ДПТ:
 - 1. Изменением напряжения питания;
 - 2. Изменением сопротивления в цепях якоря;
 - 3. Изменением магнитного потока.
- Для ДПТ с параллельным возбуждением применяют второй и третий способы регулирования частоты вращения.

- При втором способе (реостатном регулировании) уменьшение частоты вращения достигается увеличением сопротивления в цепи якоря за счёт сопротивления пускового реостата R_{Π} . Искусственные реостатные характеристики описываются уравнением

$$M = \frac{U_{\Theta M}}{c_E \cdot \Phi_M} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\Pi}}{c \cdot c \cdot \Phi^2}$$

- Они представляют собой прямые линии, проходящие через точку n_0 и имеют больший наклон, чем естественная характеристика. На рис. показана одна из искусственных реостатных характеристик (хар. 2).
- Регулирование третьим способом позволяет увеличить частоту вращения за счёт уменьшения магнитного потока Φ . Для этого уменьшают ток возбуждения введением в цепь обмотки возбуждения регулировочного реостата $R_{\text{в}}$. Каждому значению магнитного потока соответствует своя искусственная механическая характеристика, одна из которых приведена на рис. (характеристика 3).