

Лекция 13. Машины постоянного тока

Машины постоянного тока МПТ используют в качестве *генераторов и двигателей*. Энергия генераторов служит для питания двигателей постоянного тока, электромагнитов различного назначения, аппаратуры управления и контроля и т.д.

Двигатели постоянного тока применяют на транспорте, для металлорежущих станков, прокатных станков, подъемно-транспортных машин, экскаваторов и т.д. Они позволяют плавно регулировать скорость вращения в широком диапазоне.

Устройство машин постоянного тока. Состоит из неподвижной части – *статора*, для создания магнитного потока и вращающейся части – *ротора*.

На рис. 2.8 показан поперечный разрез магнитной цепи двухполюсной машины.

Статор состоит из станины 1 ферромагнитного материала, с главными полюсами 2 (*N* и *S*). На полюсах размещены обмотки возбуждения 3, которые питаются от источника постоянного тока. В обмотке возбуждения создается магнитное поле 8 (неподвижное).

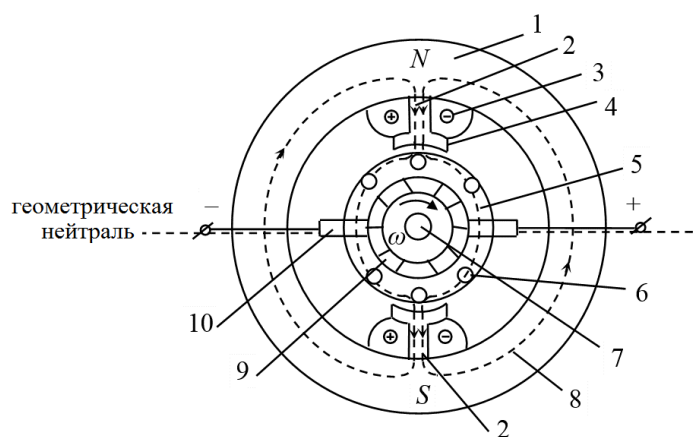


Рис. 2.8. Схема машины постоянного тока

Якорь – подвижная часть (стальной цилиндр на валу 7). На поверхности якоря расположены пазы для укладки обмоток, состоящими из витков, которые объединяются в секции. Секция своими концами присоединяется к коллекторным пластинам.

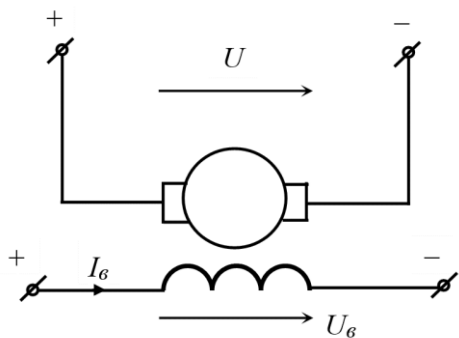


Рис. 2.9. Условное обозначение машины тока с независимым возбуждением -

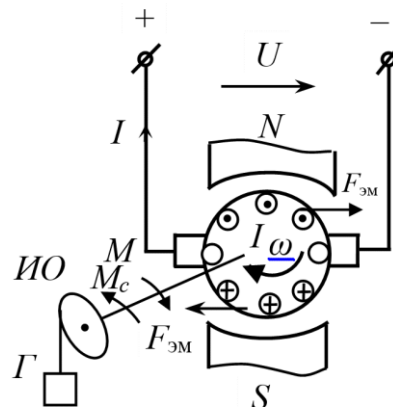


Рис. 2.10. Принцип действия постоянного двигателя постоянного тока

На якоре располагается *коллектор 9* – цилиндрическое тело из медных коллекторных пластин. Электрический контакт с вращающимся коллектором осуществляется с помощью неподвижных *электрографитовых щеток 10*, через которые происходит соединение обмоток якоря с внешней цепью.

Якорь набирают из листов электротехнической стали толщиной 0,3...0,5 мм для уменьшения потерь от вихревых токов при перемагничивании. На электрических схемах машины якорь изображают в виде окружности с двумя щетками, а обмотку возбуждения – как индуктивный элемент (рис. 2.9).

Принцип действия двигателя постоянного тока

При работе **МПТ в режиме двигателя** к обмоткам якоря и возбуждения подводится постоянное напряжение – U и U_B (рис. 2.9, 2.10).

При напряжении U_B возникает ток I_B , создающий магнитный поток машины (представлен двумя полюсами N, S). При напряжении якоря U в его цепи протекает ток I . Допустим, что направление тока I в проводниках обмотки якоря указано на рис. 3 (точка – направление тока к нам, крестик – направление тока от нас).

Проводники якоря с током находятся в неподвижном магнитном поле обмотки возбуждения (полюсы $N-S$). Поэтому на проводники действуют электромагнитные силы $F_{эм}$, приложенные к якору, которые создают электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого якорь двигателя будет вращаться.

При работе **МПТ в режиме генератора** механическая энергия от приводного двигателя ПД (рис. 2.11, а) преобразуется в электрическую, отдаваемую *нагрузке* R_H в цепи якоря.

Приводной двигатель ПД вращает якорь с постоянной угловой частотой вращения ω . В проводниках обмотки якоря возникает ЭДС при пересечении магнитного поля (полюсы N, S), созданного обмоткой возбуждения с током I_B . Если к цепи якоря через щетки присоединена нагрузка R_H , то под действием ЭДС протекает постоянный ток якоря I . В результате взаимодействия тока якоря с магнитным полем возникают электромагнитные силы $F_{эм}$, создающие электромагнитный момент M , противодействующий моменту приводного двигателя $M_{пд}$. **Схема замещения цепи якоря МПТ в режиме генератора** (рис. 2.11, б).

Для цепи якоря по второму закону Кирхгофа :

$$E = U + IR_{я}. \quad (2.8)$$

Вывод: МПТ может работать как *генератором, так и двигателем*.

Режим электромагнитного тормоза машины можно создать в электроприводе лебедки крана для подъема груза Γ (рис. 2.10).

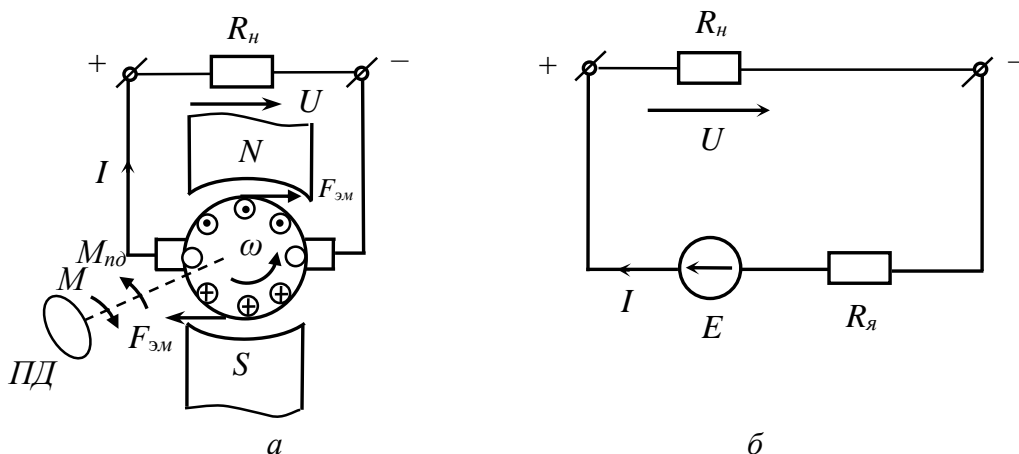


Рис. 2.11. Принцип действия генератора постоянного тока (а), схема замещения цепи якоря (б)

Если момент сопротивления, превысит вращающий момент двигателя, то груз остановится, а затем начнет вращать якорь в обратном направлении (спуск груза). Двигатель окажется в режиме *электромагнитного тормоза*. При изменении направления вращения якоря изменит направление и его ЭДС. Электромагнитный момент M при этом действует в обратном направлении вращения и, следовательно, является **тормозным**, как в генераторе.

Наводимая ЭДС совпадает с током, как в генераторе. Но *ток в цепи якоря в режиме тормоза создается напряжением сети и ЭДС якоря*:

$$U + E = IR_{я}$$

и может существенно возрасти.

В этом режиме, если ток якоря не ограничить дополнительным сопротивлением в цепи якоря, то он может в несколько раз превысить номинальный.

Способы возбуждения машин постоянного тока

Цепи обмотки возбуждения и якоря МПТ могут быть включены *независимо одна от другой, параллельно и последовательно*.

В соответствии с этим различают *генераторы и двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждений*.

В машинах *независимого возбуждения* (рис. 2.12, а) обмотку возбуждения включают на посторонний источник (аккумулятор, выпрямитель и т.д.). В машинах малой мощности (порядка десятков – сотен ватт) возбуждение создают постоянными магнитами (рис. 2.12б).

В машинах *параллельного возбуждения* обмотку возбуждения включают параллельно цепи обмотки якоря (рис. 2.12,в) и подключают к сети или нагрузке.

Параллельную обмотку можно переключить на *независимое питание от якоря*, и машина становится машиной независимого возбуждения.

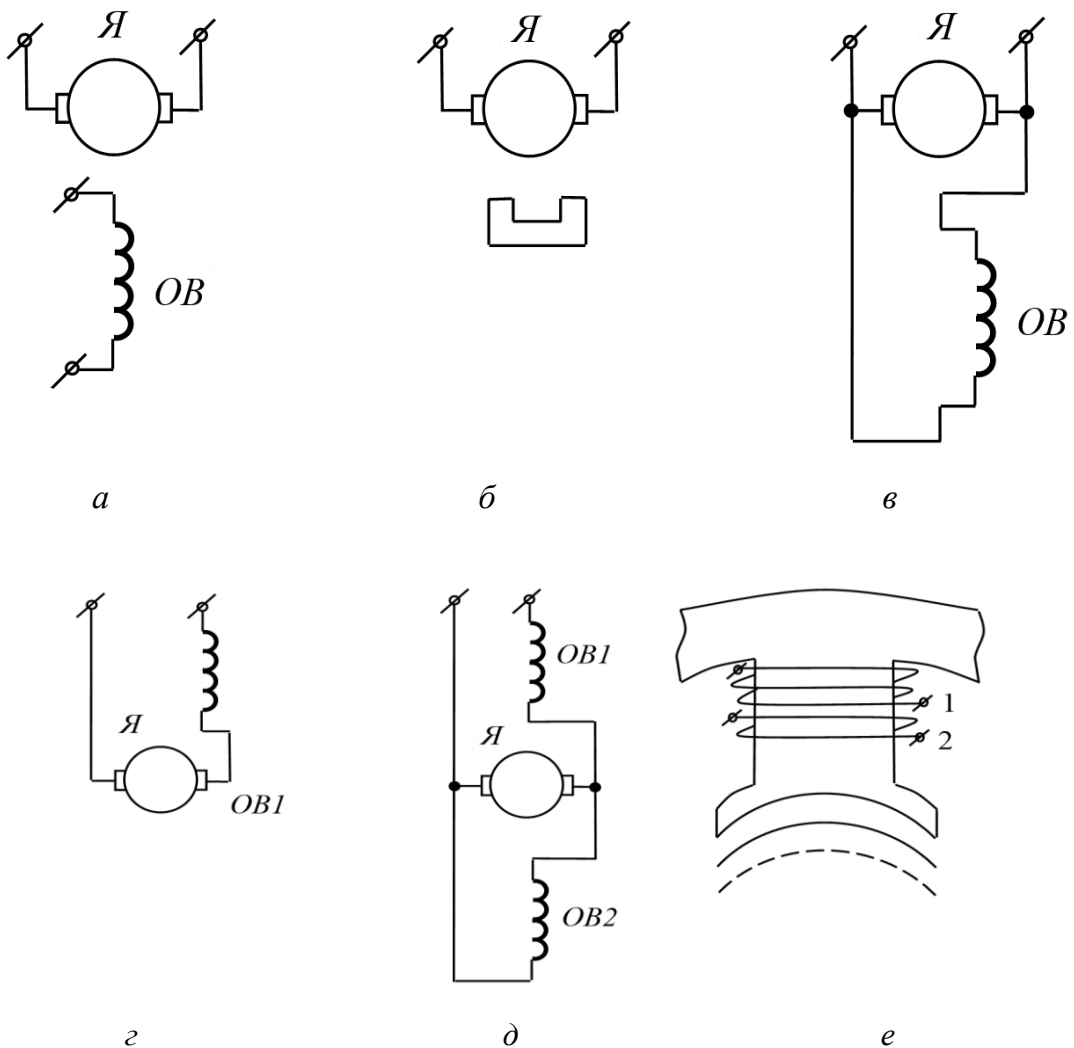


Рис. 2.12. Схемы возбуждения машин постоянного тока Я – якорь;
ОВ – обмотка возбуждения

Номинальный ток возбуждения машины с параллельным или независимым возбуждением составляет 1...5% от номинального тока якоря, причем меньшая цифра относится к более мощным машинам.

В машинах **последовательного возбуждения** (рис. 2.12, *з*) обмотка возбуждения соединена с якорем последовательно. Число витков катушек возбуждения невелико, большого сечения (сопротивление незначительно).

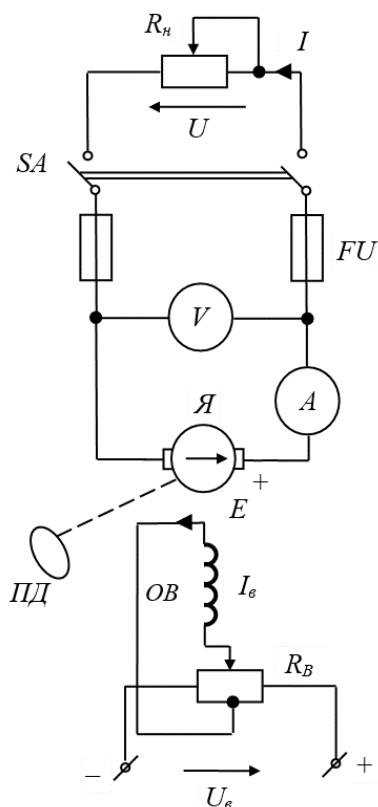
В машинах **смешанного возбуждения** (рис. 2.12, *д, е*) на основных полюсах по две катушки: одна для параллельной обмотки 1, другая – последовательной 2. Последовательная обмотка *ОВ 1* подключена последовательно с цепью якоря и параллельной обмоткой возбуждения *ОВ 2*.

Характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения

Схема генератора независимого возбуждения (рис. 2.13) включает якорь *Я* и обмотку возбуждения *ОВ*.

Якорь приводится во вращение приводным двигателем с частотой вращения $n = const$.

Характеристики холостого хода генератора (рис. 2.14, *а*) (зависимость ЭДС якоря E_0 от тока возбуждения I_B , при $I_A = 0$ и $n = n_H = const$).



E_e снимают при разомкнутом переключателе *SA*, плавно увеличивая ток возбуждения от нуля до максимального значения, которое на 10...20% выше номинального тока возбуждения. Так как магнитный поток Φ машины пропорционален току возбуждения I_B , а ЭДС E_0 – магнитному потоку, то с увеличением тока возбуждения ЭДС генератора увеличивается (рис. 2.14, *а*).

На рис. 2.14, *а* холостой ход представлен в относительных единицах: $E^* = E_0/U_H$; $I_B^* = I_B/I_{BH}$.

Наличие в магнитной цепи значительного воздушного зазора (4–7 мм), спрямляет начальный участок *б, в* (линейный характер).

Далее кривая плавно загибается (участок *в, г*) и затем рост потока и ЭДС замедляются (участок *г, д*).

Рис. 2.13. Схема генератора независимого возбуждения

Номинальный режим соответствует т. *A* (на середине «колена» характеристики). При отсутствии тока возбуждения ($I_B = 0$) в якоре наводится ЭДС $E_{ост}$, (2...3% от номинального напряжения). Имеет важное значение для генераторов.

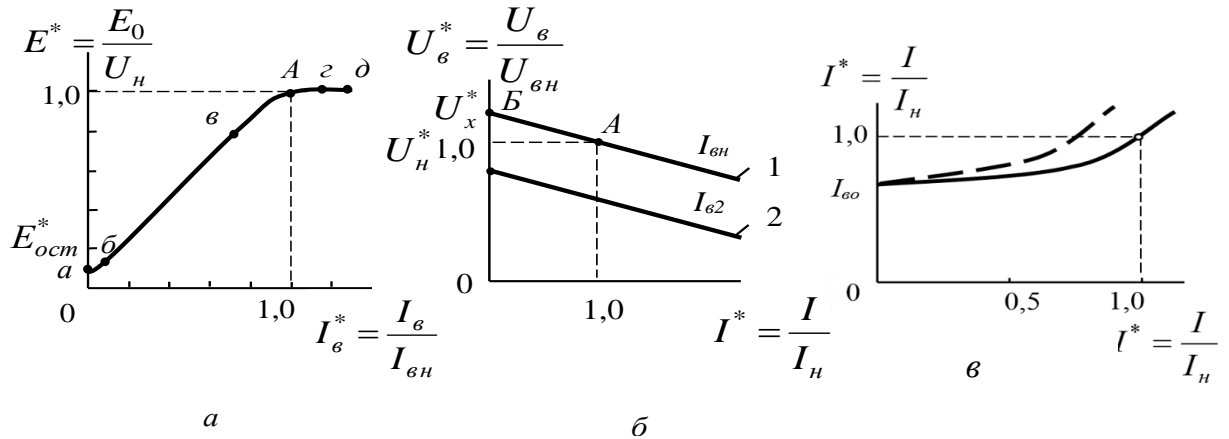


Рис. 2.14. Характеристики генератора независимого возбуждения: *a* – холостого хода; *б* – внешняя; *в* – регулирования.

Внешняя характеристика $-U(I)$ генератора независимого возбуждения (зависимость напряжения нагрузки U от тока I якоря, при $I_B = const$ и $n = const$).

При определении характеристики переключатель *SA* замкнут. Характеристика снимается при увеличении тока нагрузки I от нуля до максимального значения, с помощью сопротивления нагрузки R_H . Так как ток нагрузки равен току якоря, то напряжение нагрузки определяем из уравнения (2.8):

$$U = E - IR_{я} = c_E n \Phi - IR_{я},$$

где Φ – магнитный поток полюса; $c_E = pN/60a$ – конструктивный коэффициент; p – число пар полюсов; N – число активных проводников якоря; $2a$ – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Из этого уравнения следует, что с увеличением тока якоря напряжение нагрузки будет уменьшаться из-за падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря ($I_{я}R_{я}$) и влияния реакции якоря, рис. 2.14, б. Зависимость 1 – соответствует номинальному току возбуждения $I_{вн}$: точка *A* – номинальный режим работы генератора; точка *B* – режим холостого хода. На этом рисунке не показана точка режима короткого замыкания генератора ($R_H = 0$ и ток нагрузки (якоря) $I_{кз} = E/R_{я}$). Так как сопротивление якоря мало, то ток короткого замыкания значительно больше номинального – (10-20) I_n . Режим к.з. опасен для обмотки якоря, коллектора и щеток.

В номинальном режиме U_n отличается от U_x на 5...10%. При к.з. генератор отключается от нагрузки.

Если уменьшить ток возбуждения ($I_{в1} < I_{вн}$), поддерживая $I_{в1} = const$, то с уменьшением магнитного потока Φ , уменьшается ее ЭДС и внешняя характеристика имеет вид прямой 2 (рис. 2.14,б).

Регулировочная характеристика (рис. 2.14, в) генератора независимого возбуждения (зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (якоря) $I_{в}(I)$ при $U = const, n = const$). Из рис. 2.14, в (сплошная линия) видно, что для поддержания $U = const$ необходимо с увеличением тока нагрузки увеличивать ток возбуждения генератора.

Недостаток генераторов независимого возбуждения – наличие отдельного источника питания обмотки возбуждения.

Преимущества: хорошие эксплуатационные характеристики (регулирование напряжения, изменение знака напряжения); достаточно широкое применение: в электролизе, в регулируемом приводе экскаваторов, прокатных станков, а также в качестве тахогенераторов (для измерения скорости вращения валов электрических машин).

Характеристики генератора с параллельным возбуждением

Якорь генератора (рис. 2.15) приводится во вращение от приводного двигателя. Ток возбуждения I_B определяется ЭДС якоря – E . Пуск генератора осуществляется на холостом ходу (SA разомкнут). В начале пуска ЭДС якоря E определяется величиной *остаточного магнитного потока*.

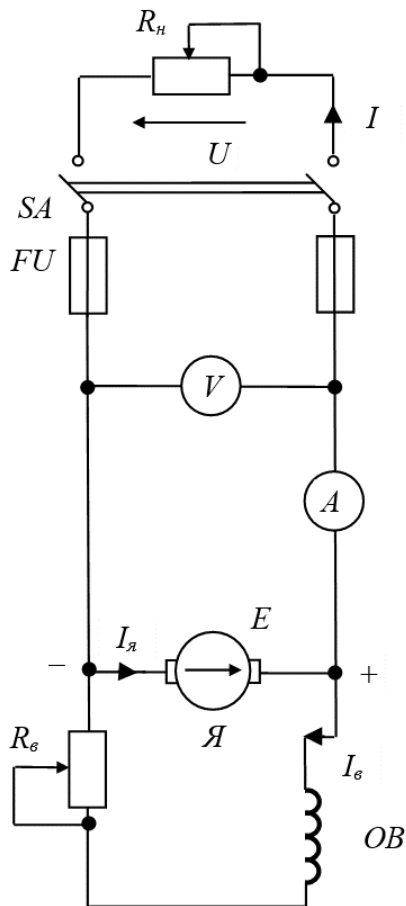


Рис. 2.15. Схема генератора параллельного возбуждения

Остаточная ЭДС определяет первоначальный ток возбуждения I_B , который создает *дополнительный магнитный поток* в обмотке возбуждения генератора, увеличивая общий поток машины.

Это увеличивает ЭДС (E_{0H}^*) и ток возбуждения (I_{B1}^*) до установившегося режима, точка A (рис. 2.16, а). Описанный процесс установившегося магнитного режима называют *процессом самовозбуждения*.

Точка A – *установившийся режим* соответствует пересечению *характеристик холостого хода* (кривая 1) генератора E_0^* (I_1^*) (рис. 2.16, а), и прямой 2 (падение напряжения на обмотке возбуждения R_B):

$$U_B^* = R_B I_{B1}^* \text{ т.е. когда } E_0^* = R_B I_{B1}^* \text{ (принимаям } R_Y I_B = 0).$$

Характеристика *холостого хода генератора* имеет такой же вид, что и для генератора с *независимым возбуждением* (рис. 2.14, а).

Номинальный режим работы (точка N , рис. 2.16, а) соответствует току возбуждения I_{BH}^* и напряжению U_H^* на зажимах генератора.

Нагрузку R_H подключают после окончания процесса самовозбуждения, через 1...2 с после замыкания SA (рис. 2.15).

Внешняя характеристика генератора $U(I)$ при $R_B = const$ и $n = const$ (рис. 2.16, б, кривая 2) отличается от подобной для генератора *независимого возбуждения* (кривая 1) более крутым спадом напряжения. Снижение напряжения при номинальной нагрузке составляет 10...18% от E_{0H}^* .

При дальнейшем увеличении тока I снижение напряжения происходит так быстро, что *ток нагрузки*, достигнув значения $I_{кр}$, начинает уменьшаться до установившегося значения $I_{ку}$ вместе с резким снижением напряжения, при $U = 0$.

Несмотря на внезапное уменьшение напряжения до нуля в якоре (некоторое время) существует достаточно большая ЭДС, вызывающая бросок тока в цепи якоря.

Увеличивается электромагнитный момент, создающий механические напряжения, опасные для вала и приводного двигателя, усиливается искрение щеток и круговой огонь на коллекторе.

Внезапное короткое замыкание опасно как для генераторов параллельного, так и независимого возбуждения. Защита генераторов должна быстро отключить цепь якоря, при токе якоря $(2 - 2,5) I_H$.

Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения $I_V^*(I^*)$, при $U = \text{const}$ по сравнению с характеристикой генератора независимого возбуждения (рис. 2.14,в) пойдет круче.

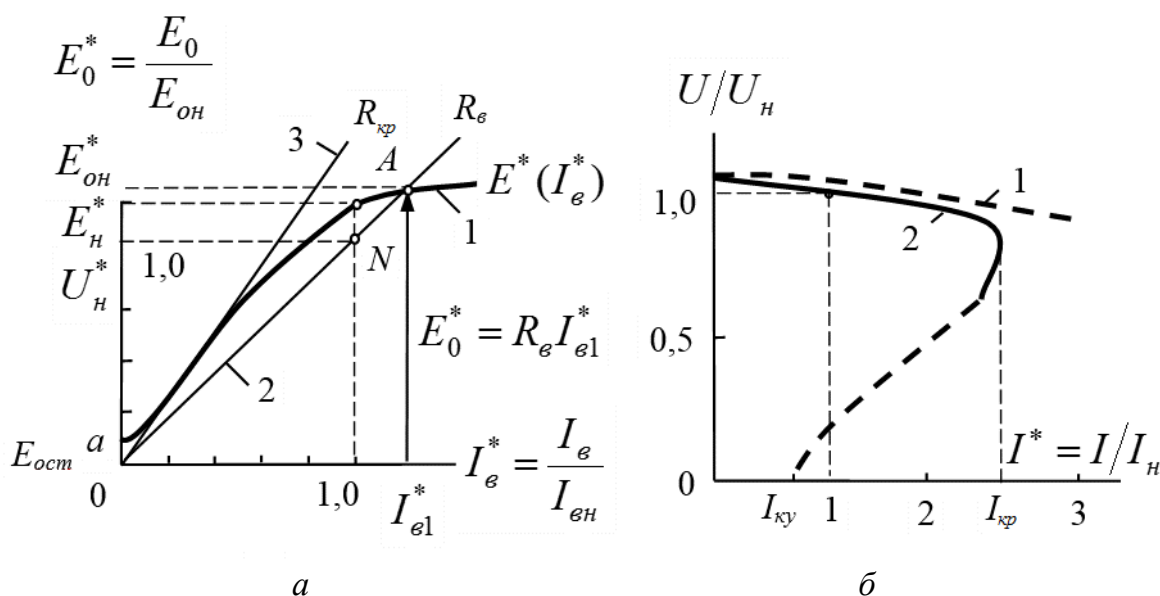


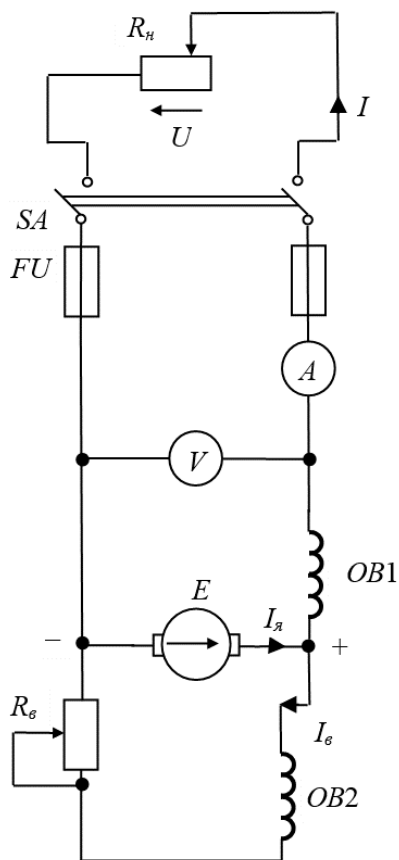
Рис. 2.16. Характеристики генератора с параллельным возбуждением: *а* – холостого хода; *б* – внешняя характеристика

Для компенсации снижения напряжения, необходимо увеличить в большей степени ток возбуждения. На рис. 2.14,в эта характеристика представлена пунктиром. В генераторах параллельного возбуждения напряжение регулируется в узких пределах и без изменения знака.

Их достоинство – для обмотки возбуждения не требуется отдельный источник питания.

Характеристики генератора постоянного тока смешанного возбуждения

Генератор (рис. 2.17) имеет две обмотки возбуждения: *параллельную* OB ; *последовательную* $OB1$. Характеристики холостого хода генераторов смешанного $E_{OH}^*(I_B^*)$ и *параллельного* возбуждения (рис. 2.16, а, кривая 1) одинаковы.

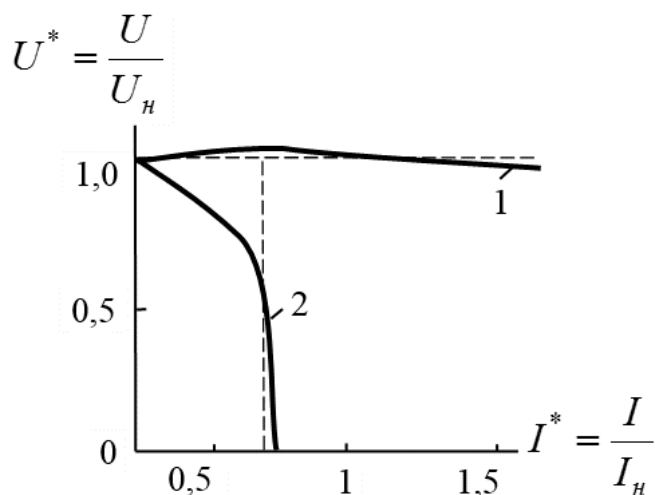


Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения.

Применение вспомогательной (последовательной) и параллельной обмоток (рис. 2.17) позволяет **увеличить магнитный поток при росте тока нагрузки.**

Внешняя характеристика генератора (кривая 1, рис. 2.18), *напряжение генератора почти не изменяется с изменением нагрузки.* При этом соединение *последовательной обмотки с обмоткой якоря должно быть таким, чтобы их магнитные потоки складывались (согласное включение).*

Рис. 2.17. Схема генератора смешанного возбуждения



При *встречном включении* этих обмоток их магнитные потоки **вычитаются**, и напряжение генератора при нагрузке резко падает (кривая 2, рис. 2.18). Такая характеристика важна (в аппаратах электродуговой сварки) при необходимости постоянства тока в нагрузке (дуге), когда меняется напряжение при изменении длины дуги.

Рис. 2.18. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения

Генератор последовательного возбуждения (в схеме рис. 2.17 *обмотка параллельного возбуждения* $OB2$ *отсутствует*) возбуждается только при подключении нагрузки.

С ростом тока нагрузки сначала растут *магнитный поток*, ЭДС и *напряжение* U . Затем, с насыщением магнитной цепи, рост потока прекращается, из-за увеличения внутреннего падения напряжения, напряжение нагрузки U падает. Подобная зависимость *напряжения от тока нагрузки* не позволяет применять эти генераторы для питания большинства потребителей.

Характеристики двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

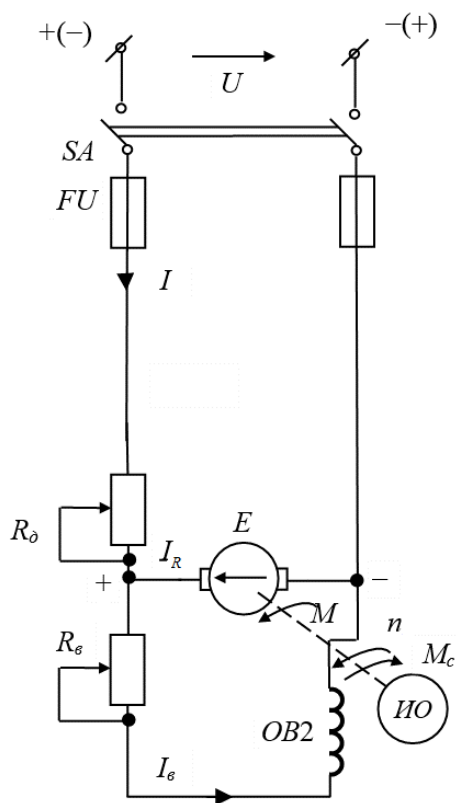


Рис. 2.19. Схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Цепи якоря двигателя и параллельной обмотки возбуждения (рис. 2.19) получают питание постоянного тока напряжением U . В цепи якоря включен R_d (реостат) для ограничения тока при пуске и регулировании скорости вращения якоря. В цепи обмотки возбуждения переменный резистор R_b для регулирования тока возбуждения I_b , и *магнитного потока* двигателя Φ . Якорь связан с исполнительным органом *ИО* (насос и т.д.).

Пуск двигателя. На якорь и обмотку возбуждения подается напряжение источника, протекают токи возбуждения I_b и якоря $I (I \cong I_a \gg I_b)$. Ток возбуждения создает магнитный поток Φ , взаимодействие которого с током якоря создает электромагнитный момент двигателя M . Якорь двигателя начинает вращаться. Пусковые свойства двигателя тем лучше, чем больше его пусковой момент при пусковом токе, не превышающем $(2,0 - 2,5) I$.

При прямом пуске двигателя сопротивление R_d равно нулю и в первый момент пуска (якорь не вращается, $n = 0$) все напряжение источника U приложено к цепи якоря, а противо-ЭДС $E = 0$. Тогда пусковой ток якоря:

$$I_n = \frac{U - E}{R_a} \cong (20 - 30)I,$$

так как у двигателей средней и большой мощности (более 10 кВт) R_a составляет 0,01...0,1 Ом.

Большой пусковой ток создает *большой пусковой электромагнитный момент* ($M_n = c_M \Phi I_n$) и *искрение на коллекторе двигателя*.

На практике *прямой пуск* применяют для двигателей менее 0,5 кВт с большим сопротивлением якоря.

Реостатный пуск. Для ограничения пускового тока сопротивление R_d рассчитывают, исходя из допустимого тока якоря $I_{п.доп}$:

$$I_{п.доп} = \frac{U}{R_я + R_d} \ll (2 - 2,5)I_{я.ном}.$$

По мере разгона якоря, *скорость вращения увеличивается*, в обмотках якоря *возникает противоЭДС* и *ток якоря уменьшается*. При этом R_d постепенно уменьшают до нуля.

Пуск при пониженном напряжении осуществляют *плавным увеличением напряжения* (от источника) якоря (от нуля до номинального значения).

Свойство саморегулирования. Двигатели постоянного тока обладают свойством автоматически создавать вращающий момент M , равный моменту статического сопротивления на валу M_c (свойство *саморегулирования*).

Реверсирование двигателя – изменение направления вращения якоря двигателя. Достаточно *переключить концы обмоток якоря*, оставив неизменным направление тока в обмотке возбуждения или наоборот.

Основные характеристики двигателей – электромеханическая и механическая.

Электромеханическая характеристика – зависимость скорости вращения якоря двигателя от его тока $n(I)$:

$$n = \frac{U - IR_я}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{IR_я}{c_E \Phi}.$$

Механическая характеристика – зависимость скорости вращения якоря двигателя от момента на валу $n(M)$:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{IR_я}{c_E c_M \Phi^2}.$$

Регулирование скорости вращения якоря двигателя изменением R_d в цепи якоря по уравнению механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M(R_я + R_d)}{c_E c_M}.$$

Сопротивление R_d можно изменять плавно или дискретно. Данный метод регулирования неэкономичен, так как в цепи якоря имеются дополнительные потери электрической энергии $I^2 R_d$.

При регулировании частоты вращения якоря двигателя изменением магнитного потока в схеме ($U = const, R_d = 0$) увеличивают сопротивление R_d , так чтобы ток возбуждения I_B был меньше номинального I_{BH} . Тогда магнитный поток будет уменьшаться и становится меньше Φ_H . Увеличение тока ($I_B > I_{BH}$) нецелесообразно (магнитный поток увеличивается незначительно, на 5...7% от номинального).

С уменьшением магнитного потока двигателя скорость вращения якоря увеличивается выше номинальной. Данный способ экономичен, так как ток цепи возбуждения составляет (1...5%) I_{BH} и потери мощности в R_B малы.

При регулировании скорости вращения якоря двигателя изменением напряжения якоря его цепь присоединяется к управляемому тиристорному выпрямителю UB (рис. 2.20). Вход выпрямителя присоединяется к трехфазной сети переменного тока. Для сглаживания пульсаций в цепь якоря включен дроссель L_p .

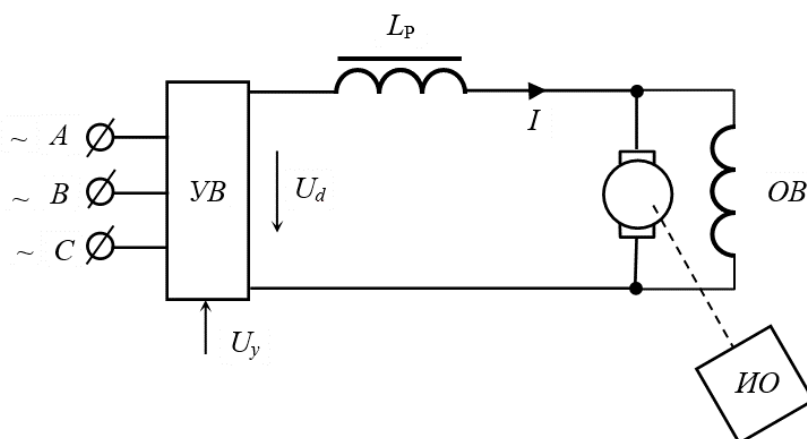


Рис. 2.20. Схема регулирования скорости вращения двигателя изменением напряжения якоря

С уменьшением напряжения якоря скорость вращения его уменьшается. Регулирование скорости вращения данным способом экономично, так как потери энергии в цепи якоря малы из-за его малого сопротивления.

Электрическое торможение двигателя. Во многих случаях требуется быстрый останов электродвигателя. Для этого его переводят или в режим электромагнитного тормоза или в режим генератора. Применяются *три вида торможения*: *противовключением, генераторное динамическое и генераторное рекуперативное.*

При **противовключении** (режим электромагнитного тормоза) направление тока в цепи вращающегося якоря изменяют на обратное (путем переключения

полярности напряжения якоря) и оно совпадает с направлением ЭДС. Для ограничения тока при повторном включении в цепь якоря включают реостат со специально рассчитанным сопротивлением R_d .

Торможение при повторном включении иногда применяют для медленного опускания груза в лебедках подъемных кранов и для ускорения реверса.

При генераторном динамическом торможении якорь от сети отключают и замыкают его на дополнительный резистор (цепь возбуждения остается включенной в сеть). Ток якоря под действием затухающей ЭДС изменит направление и момент двигателя будет отрицательным. Генераторный электромагнитный момент тормозит вращение якоря. Динамическое торможение широко применяется в электродвигателях.

Генераторное рекуперативное торможение возникает при приложении к валу двигателя момента в сторону вращения якоря. Тогда скорость вращения якоря и ЭДС E начнут возрастать. При $E > U$ ток якоря и момент изменят направление и машина перейдет в режим генератора с рекуперацией энергии в сеть. Рекуперативное торможение применяется при торможении электропоезда, идущего под уклон, а также в подъемных механизмах кранов.

Двигатели параллельного и независимого возбуждения с постоянным магнитным потоком имеют «жесткую» естественную механическую характеристику: скорость их вращения почти не зависит от момента нагрузки на валу. Поэтому они применяются для привода металлорежущих станков, экскаваторов и буровых станков.

Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Токи якоря I и возбуждения I_b в этом двигателе (рис. 2.21) равны ($I = I_b$). Так как ток электродвигателя зависит от нагрузки на его валу, то магнитный поток полюсов и скорость вращения якоря двигателя изменяются с изменением момента.

Естественная **механическая характеристика** двигателя ($R_d = 0$):

$$n = \frac{U}{c_E \sqrt{\alpha M / c_M}} - \frac{R_a + R_b}{c_E \alpha}$$

где α – коэффициент, определяемый по линейной части кривой намагничивания двигателя; R_b – активное сопротивление обмотки возбуждения.

При холостом ходе или небольшом моменте сопротивления **ток и магнитный поток** двигателя **уменьшаются**, а его **скорость сильно возрастает** (двигатель идет «вразнос»). Поэтому **пуск и работа** таких двигателей **в холостую недопустимы**.

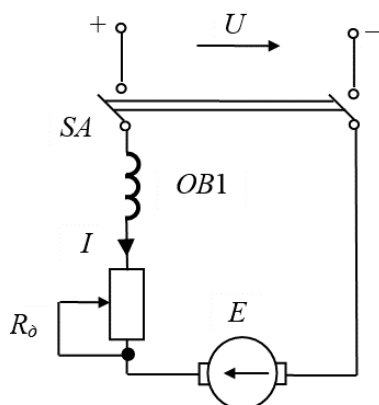


Рис. 2.21. Схема двигателя последовательного возбуждения

Регулирование скорости вращения якоря двигателя последовательного возбуждения осуществляется реостатным и безреостатным изменениями напряжения и магнитного потока возбуждения.

Изменение напряжения к двигателю, осуществляют с помощью сопротивления (реостата R_d) в цепи якоря. Такое регулирование неэкономично из-за потерь энергии в сопротивлении (рис. 2.21).

Изменение магнитного потока полюсов осуществляется шунтированием обмотки возбуждения добавочным сопротивлением.

Электрическое торможение. В этих двигателях можно реализовать динамическое торможение и торможение противовключением. Для динамического торможения двигатель отключают от сети, замыкают цепь якоря на реостат и двигатель оказывается в режиме генератора последовательного возбуждения.

Режим электромагнитного тормоза наступает при переключении направления тока во вращающемся якоре (или в обмотке возбуждения) на обратное. В цепь якоря вводят добавочное сопротивление для ограничения тока.

Двигатель последовательного возбуждения широко применяется в электрическом транспорте, электровозах. Двигатель должен развивать максимальный момент при трогании с места и малых скоростях движения транспорта.