

2 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В машинах постоянного тока процесс преобразования энергии обусловлен потреблением или генерированием только постоянного тока. Машины постоянного тока изготавливаются преимущественно в виде коллекторных машин (содержат щетки и коллектор).

2.1 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Для анализа преобразований энергии в электрических машинах воспользуемся простейшей моделью, состоящей из проводника, находящегося в магнитном поле.

Преобразование механической энергии в электрическую (рис.2.1).

В магнитном поле с индукцией B перпендикулярно магнитным силовым линиям под действием механической силы $F_{\text{мех}}$ со скоростью v перемещается проводник, активная длина которого равна l .

При пересечении магнитных силовых линий в проводнике наводится ЭДС

$$e = Blv. \quad (2.1)$$

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки (рис. 2.2). Если концы проводника замкнуть на внешнее сопротивление (нагрузку) R_n , то по проводнику и по нагрузке будет протекать ток I .

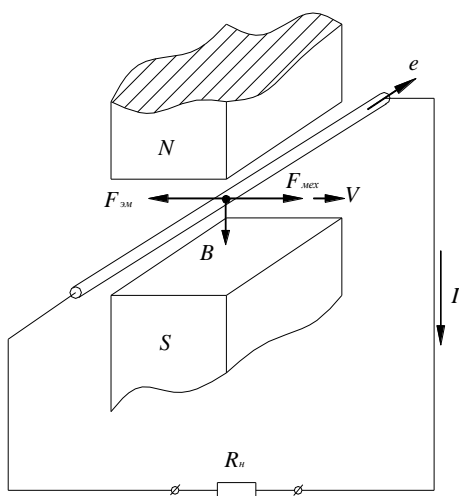


Рис. 2.1 Преобразование механической энергии в электрическую

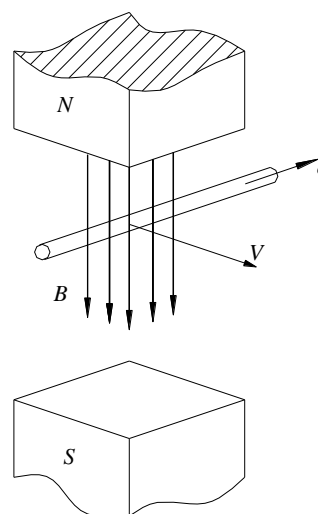


Рис. 2.2 Определение направления ЭДС – правило правой руки

Таким образом, механическая энергия (движение проводника) преобразуется в электрическую, и модель представляет собой элементарный генератор.

При взаимодействии проводника с током I и магнитного поля с индукцией B возникает электромагнитная сила

$$F_{эл} = BIl. \quad (2.2)$$

Направление электромагнитной силы $F_{эл}$ определяется по правилу левой руки (рис. 2.3).

Как видно из рис. 2.1 и 2.3, направление силы $F_{эм}$ противоположно направлению силы $F_{мех}$, приводящей проводник в движение. Таким образом, в рассматриваемом элементарном генераторе сила $F_{эм}$ является тормозящей силой по отношению к движущей силе $F_{мех}$.

Преобразование электрической энергии в механическую (рис. 2.4).

Если к проводнику с активной длиной l , находящемуся в магнитном поле с индукцией B , подвести напряжение от источника ЭДС E_0 , то в проводнике появится ток I , сонаправленный с ЭДС E_0 . На проводник с током в магнитном поле действует электромагнитная сила $F_{эм}$ и направление ее определяется по правилу левой руки (рис. 2.3). Эта сила в данном преобразовании является для проводника движущей силой и приводит проводник с током в движение со скоростью v (рис. 2.4).

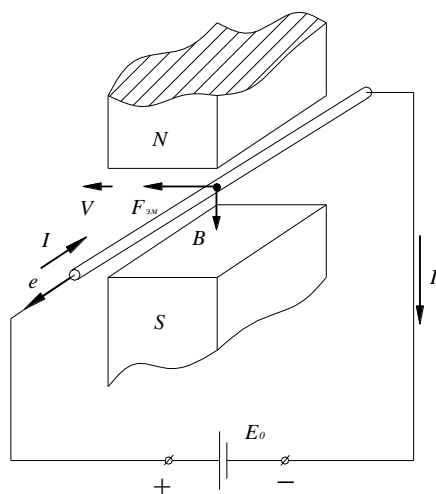


Рис. 2.4 Преобразование электрической энергии в механическую

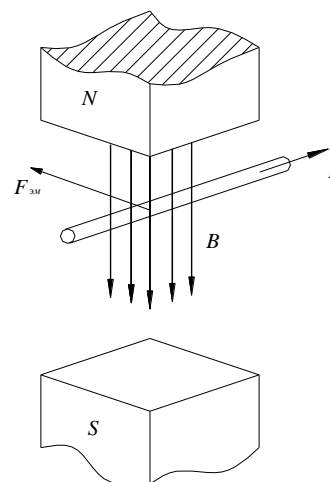


Рис. 2.3 Определение направления электромагнитной силы – правило левой руки

Таким образом электрическая энергия преобразуется в механическую, и данная модель представляет собой элементарный двигатель.

При движении проводника с током в магнитном поле со скоростью v в проводнике индуцируется ЭДС $e = Blv$, по природе аналогичная ЭДС генератора. Как видно из рис.2.4, направление ЭДС в двигателе противоположно направлению ЭДС источника, которая сонаправлена с током I . Поэтому ЭДС, наводимая в проводнике, называется противо-ЭДС; она уравнивает часть ЭДС источника тока.

Рассмотренные явления в модели электрической машины позволяют сделать следующие выводы:

1. Для любой электрической машины является обязательным наличие магнитного поля и электропроводящей среды (проводников).

2. При работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя имеет место индуктирование ЭДС в проводнике, пересекающем магнитное поле и возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник.

3. Взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, т.е. одна и та же электрическая машина может работать как в качестве двигателя, так и в качестве генератора; это свойство электрических машин называется обратимостью.

Электрические генераторы составляют основу современных электростанций, где они преобразуют механическую энергию турбин в электрическую.

Электродвигатели составляют основу электропривода где они, преобразуя электрическую энергию в механическую, приводят в движение станки, подъемные средства, транспорт, роботы и др.

Широко применяются электромашины малой мощности (до 600 Вт) в устройствах автоматики, вычислительной и бытовой техники (холодильники, пылесосы, вентиляторы и т. п.).

2.2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотренные выше явления лежат в основе работы генератора постоянного тока, упрощенная модель которого представлена на рис. 2.5, а. В магнитном поле магнита $N-S$ вращается цилиндрический сердечник, на котором в диаметральной плоскости расположен виток с двумя активными сторонами (aa' и bb'). Начало и конец витка присоединены к двум изолированным друг от друга полукольцам (A и B), образующим коллектор. Коллекторные пластины A и B скользят по неподвижным щеткам I и II , от которых отходят провода во внешнюю цепь R_n . Таким образом, магнитная система (полюсы $N-S$), щетки I и II являются неподвижной частью машины — статором, а стальной сердечник с витком ($aa'bb'$) и коллектором (A, B) образуют вращающуюся часть машины.

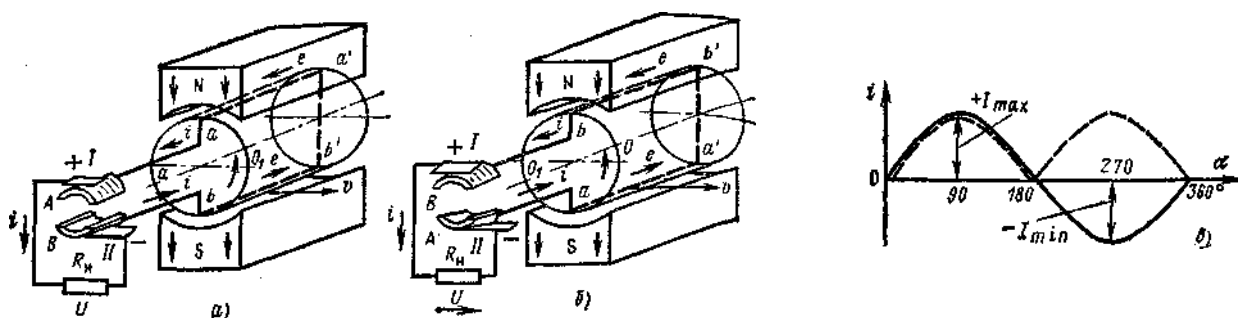


Рис. 2.5. Модель генератора постоянного тока: а — исходное положение витка обмотки якоря и пластин коллектора; б — положение витка обмотки якоря и пластин коллектора после поворота на 180° ; в — график изменения тока в витке обмотки якоря

Если внешней силой (турбина, двигатель внутреннего сгорания) вращать якорь, то активные стороны витка aa' и bb' будут пересекать магнитное поле $N-S$ и в них будет наводиться ЭДС e . Поскольку активные стороны витка соединены последовательно, то ЭДС витка

$$e = 2Blv. \quad (2.3)$$

При замыкании щеток на внешнюю цепь R в витке $aa'bb'$ и в нагрузке потечет ток I и на нагрузке появится напряжение U . На рис. 2.5 ток во внешней цепи генератора направлен от щетки I к щетке II . Руководствуясь тем, что во внешней цепи ток направлен от положительного зажима к отрицательному, определяем следующую полярность щеток: щетка I имеет полярность $+$ (плюс), а

щетка II имеет — (минус). В приведенной формуле (2.3) постоянными являются длина проводника l и скорость движения v , следовательно, ЭДС проводника пропорциональна магнитной индукции B . Таким образом, форма кривой ЭДС определяется исключительно характером распределения магнитной индукции B в воздушном зазоре между полюсами N , S и поверхностью якоря. Магнитная индукция B в разных точках указанного зазора неодинакова: под серединой полюса индукция B имеет наибольшее значение (B_{max}), а в точках O , O_1 , (рис. 2.5) равна нулю ($B = 0$). Допустим, что магнитная индукция в воздушном зазоре распределена синусоидально, следовательно, ЭДС обмотки якоря

$$e = 2B_{max}lv\sin\alpha \quad (2.4)$$

где α — угол поворота витка обмотки якоря.

Из (2.4) следует, что ЭДС, наведенная в витке обмотки якоря, является переменной (в данном случае синусоидальной), и также синусоидальным будет ток внутренней цепи машины.

Обратимся к рис. 2.5,б. После поворота витка на 180° относительно положения, показанного на рис. 2.5, а, направление тока в витке $aa'b'b$ изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи остаются неизменными. Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке $aa'b'b$ меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками, причем, как видно из рис. 2.5, а и б, под щеткой I всегда находится коллекторная пластина, соединенная с проводником, который расположен под северным полюсом N , а под щеткой II — коллекторная пластина, соединенная с проводником, который расположен над южным полюсом S , в результате полярность щеток остается неизменной.

Таким образом, с помощью коллектора и щеток в генераторе постоянного тока происходит преобразование переменного тока в обмотке якоря в пульсирующий ток во внешней цепи машины; другими словами, коллектор и щетка являются механическим вентилям. Пульсации тока и ЭДС во

внешней цепи можно значительно ослабить, если обмотку якоря выполнить из нескольких витков, соответственно увеличив число коллекторных пластин. Уже при 16 витках в обмотке пульсации тока становятся практически незаметными и ток в нагрузке генератора можно считать постоянным.

В процессе работы машины постоянного тока в каждом проводнике обмотки якоря наводится ЭДС, определяемая в соответствии с (2.3). Чтобы определить ЭДС якорной обмотки, нужно учесть соединение проводников в обмотку, т.е.

$$E_{\text{я}} = e_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = B_{\text{ср}} l v \frac{N}{2a}, \quad (2.5)$$

где N – количество проводников в обмотке,

$2a$ – число параллельных ветвей,

$\frac{N}{2a}$ – количество проводников, включенных последовательно.

Если учесть линейную скорость $\left(v = \frac{\pi D n}{60} \right)$, полюсное деление $\left(\tau = \frac{\pi D}{2p} \right)$,

магнитный поток $(\Phi = B l \tau)$, то ЭДС можно определить как

$$E_{\text{я}} = \frac{pN}{60a} \Phi n = c_e \Phi n, \quad (2.6)$$

где $c_e = \frac{\pi N}{60a}$ – постоянная машины, зависит только от конструкции машины (числа пар полюсов, количества проводников и особенностей соединения обмотки).

Нетрудно заметить, что полученное выражение ЭДС обмотки якоря (2.6) является, по существу, ЭДС холостого хода генератора (при отключенной нагрузке R). При подключении к генератору нагрузки в цепи якоря возникает ток $I_{\text{я}}$, а на выводах генератора устанавливается напряжение U , определяемое уравнением ЭДС для цепи якоря генератора:

$$U = E - I_{\text{я}}(\Sigma r_{\text{я}}), \quad (2.7)$$

где $\Sigma r_{\text{я}}$ — сумма сопротивлений всех участков цепи якоря.

2.3 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если к щеткам машины, показанной на рис. 2.6, *а*, подключить источник энергии постоянного тока, то через щетки, коллектор и по витку обмотки якоря *aa'b'b* потечет ток $I_{\text{я}}$. При взаимодействии магнитного поля $N-S$ с проводниками, по которым протекает ток, возникнет электромагнитная сила $F_{\text{эм}} = B I_{\text{я}}$ (направление ее определяется по правилу левой руки — см. рис. 2.3) и виток обмотки якоря *aa'b'b* под действием $F_{\text{эм}}$ начнет поворачиваться.

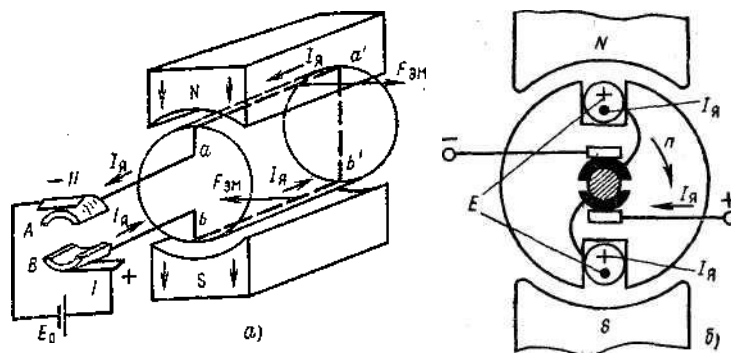


Рис. 2.6 Модель двигателя постоянного тока (а) и противо-ЭДС в витке обмотки якоря (б)

После поворота якоря на 180° проводники якоря поменяются местами, но электромагнитные силы не изменят своего направления. Объясняется это тем, что благодаря коллектору одновременно с переходом проводника обмотки якоря из зоны действия одного полюса в зону действия другого полюса в нем меняется и направление тока.

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока — изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны полюса одной полярности в зону полюса другой полярности. Рассмотренная упрощенная модель двигателя постоянного тока не обеспечивает устойчивой работы машины, так как на геометрической нейтрали $B=0$, следовательно, и $F_{\text{эм}} = 0$. Чтобы вращение якоря двигателя было равномерным и устойчивым, число проводников в обмотке якоря и число пластин коллектора необходимо увеличить.

Электромагнитный момент машины постоянного тока.

В реальном двигателе постоянного тока на каждый проводник обмотки якоря действует электромагнитная сила

$$F_{эм} = \frac{Bl I_{я}}{2a}. \quad (2.8)$$

где $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря.

Совокупность всех сил, действующих на проводники с током обмотки якоря, создает электромагнитный момент, который приводит якорь во вращение:

$$M = F_{эм} \frac{D}{2} N = Bl \frac{I_{я}}{2a} \frac{D}{2} N, \quad (2.9)$$

где D — диаметр якоря; N — число активных проводников в обмотке якоря.

Учитывая, что $\pi D = 2p\tau$ и подставив в уравнение (2.9) $D = 2p\tau/\pi$, получим

$$M = Bl \tau \frac{I_{я}}{2a} \frac{2p}{2\pi} N.$$

Произведение $Bl \tau$ представляет собой основной магнитный поток двигателя Φ . Сделав необходимые преобразования, получим выражение электромагнитного вращающего момента, Н-м в окончательном виде:

$$M = c_M \Phi I_{я}, \quad (2.10)$$

где $c_M = pN/2\pi a$ — коэффициент, значение которого для данной машины постоянно.

В процессе работы двигателя якорь вращается в магнитном поле с частотой вращения n . При этом в его обмотке наводится ЭДС E , направление которой определяется по правилу правой руки (рис. 2.6,б). По своей природе ЭДС E аналогична ЭДС обмотки якоря генератора (2.6). В двигателе E направлена в сторону, противоположную току якоря $I_{я}$ и поэтому ее называют противо-ЭДС.

Следует заметить, что если созданный указанным образом электромагнитный момент в двигателе является вращающим, то, возникнув в генераторе, он окажется тормозящим (нагружающим), поскольку он направлен встречно и противодействует вращающему моменту первичного двигателя. Подставив в (2.10) $\Phi = E/c_e n$, получим еще одно выражение электромагнитного момента:

$$M = \frac{60}{2\pi n} EI_{\text{я}} = 9,55 \frac{P_{\text{эм}}}{n} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega}. \quad (2.11)$$

где $\omega = 2\pi n/60$ – угловая скорость двигателя; $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность двигателя постоянного тока, которая определяется

$$P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}} \quad (2.12)$$

Из (2.11) следует, что *в двигателях равной мощности электромагнитный момент больше у двигателя, работающего с меньшей частотой вращения.*

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения,

$$U = E + I_{\text{я}}(\sum r_{\text{я}}), \quad (2.13)$$

т. е. подведенное к двигателю напряжение U уравнивается противо-ЭДС обмотки якоря E и падением напряжения в цепи якоря.

2.3 УСТРОЙСТВО КОЛЛЕКТОРНОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коллекторная машина постоянного тока состоит из двух основных частей: статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть), которые разделяются воздушным зазором (рис. 2.7).

Статор машины (рис. 2.8) состоит из станины 1, на внутренней поверхности которой расположены главные полюсы 2 с обмоткой возбуждения 3. В торцевой части статора расположены щеточные устройства 8.

В машинах большой мощности, кроме главных полюсов, устанавливаются добавочные полюсы.

Станина является корпусом машины, к ней крепятся основные части статора. Станина изготавливается из стали, алюминия или чугуна.

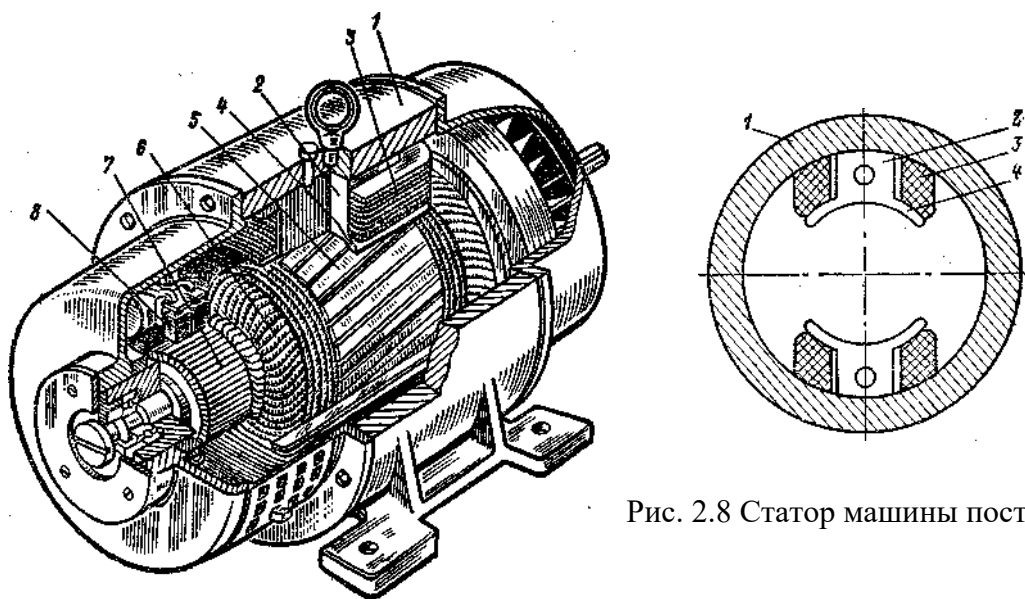


Рис. 2.8 Статор машины постоянного тока

Рис. 2.7 Устройство машины постоянного тока

Главные полюсы. Главные полюсы состоят из сердечников 2 и обмотки возбуждения 3. Сердечник полюса может быть литым, но чаще его набирают из штампованных листов электротехнической стали, собирая их в пакет, который стягивается затем шпильками.

В нижней части сердечника полюса находится полюсный наконечник 4, который обеспечивает нужное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Полюсные наконечники иногда выполняют отдельно и крепят к сердечникам полюсов.

Обмотка возбуждения 3 применяется в машинах с электромагнитным возбуждением. Она служит для создания магнитного потока и выполняется в виде отдельных катушек (для каждого из полюсов машины).

Якорь коллекторной машины постоянного тока состоит из сердечника 5 с обмоткой якоря 6 и коллектора 7, закрепленных на валу.

Сердечник якоря 5 представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм (рис. 2.9). Обычно листы покрывают с двух сторон лаком и собирают в общий пакет, который удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. Такая конструкция якоря позволяет уменьшить потери энергии от вихревых токов, возникающих при вращении якоря в магнитном поле. В листах

сердечника якоря при штамповке выполняются отверстия (рис. 2.9), и после сборки листов в пакет в сердечнике якоря образуются продольные пазы различной формы, в которые укладывают обмотку якоря. Часто пазы якоря выполняют со скосом, что ослабляет пульсацию магнитной индукции в воздушном зазоре и способствует уменьшению вибрации и шума в работающей машине.



Рис. 2.9 Лист сердечника якоря

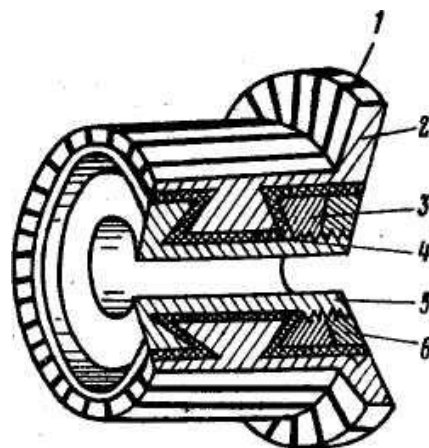


Рис. 2.10 Устройство коллектора

Обмотку якоря 6 (рис. 2.7) изготавливают из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения. Выполняется обмотка в виде отдельных секций, которые закладываются в пазы сердечника якоря; концы секций припаиваются к пластинам коллектора. Для закрепления секций в пазах сердечника применяются специальные клинья (деревянные, гетинаксовые или текстолитовые). В некоторых конструкциях машин обмотку в пазах не заклинивают, а покрывают сверху бандажом, который выполняется из стальной или бронзовой проволоки, иногда из стеклоленты, шпагата (в машинах малой мощности).

Коллектор (рис. 2.10) состоит из пластин 2, изготовленных из холоднокатаной меди клинообразного профиля. Пластины коллектора изолируют друг от друга прокладками 1 из коллекторного миканита. Основанием коллектора служит втулка 5, на которой закрепляют пластины с помощью нажимной шайбы 3 и гайки 6. Пластины изолируют от втулки, шайбы и гайки миканитовой манжетой 4. Чтобы при срабатывании коллектора миканитовые прокладки не высту-

пали над пластинами коллектора, между последними фрезеруют дорожки на глубину 1,5 мм.

По окончании сборки коллектор жестко закрепляется на валу машины. Для присоединения секции обмотки якоря к коллектору у пластин делаются выступы. В них профрезировывают прорезы (шлицы), в которые укладывают, а затем запаивают концы секций обмотки якоря.

Щеточное устройство позволяет осуществить электрический контакт внешней цепи машины с коллектором и припаянной к его пластинам обмоткой якоря. Щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях, при вращении коллектора скользят по его цилиндрической поверхности, к которой они прижимаются пружинами.

Щетки выполняются различными по структуре, и в зависимости от состава, способа изготовления и физических свойств они маркируются, подразделяясь при этом на шесть основных групп: угольно-графитовые, графитовые, электрографитированные, медно-графитовые, бронзово-графитовые и серебряно-графитовые. Для каждой машины следует применять только щетки установленной марки, которая выбирается заводом изготовителем исходя из условий работы машины.

2.4 СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Необходимым условием работы электрической машины является наличие магнитного поля. В большей части машин постоянного тока это поле создается обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током, — это так называемое электромагнитное возбуждение. В зависимости от характера подключения обмотки возбуждения, условно обозначаемой в данном случае *ОВ*, к источнику постоянного тока машины постоянного тока делятся на машины с независимым возбуждением и самовозбуждением.

В машинах с независимым возбуждением обмотка возбуждения OB питается постоянным током от постороннего источника энергии и электрически разобщена с обмоткой якоря (рис. 2.11,а).

В машинах с самовозбуждением обмотка возбуждения электрически соединена с обмоткой якоря (рис. 2.11,б, в, г), а в зависимости от схемы соединения якоря и обмотки возбуждения эти машины можно классифицировать следующим образом:

- машины параллельного возбуждения (шунтовые), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены параллельно (рис. 2.11,б);
- машины последовательного возбуждения (сериесные), в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 2.11,в);
- машины смешанного возбуждения (компаундные), в которых имеются две обмотки возбуждения: одна из них — $OB1$ включена параллельно, а другая — $OB2$ — последовательно с обмоткой якоря (рис. 2.11,г).

Обмотки независимого и параллельного возбуждения изготавливаются из провода малого сечения и содержат большое число витков, а обмотка последовательного возбуждения изготавливается из провода большого сечения и содержит малое число витков.

В последнее время довольно широкое распространение получили машины с возбуждением постоянными магнитами (рис. 2.11,д). При выборе электрической мощности машины постоянного тока необходимо иметь в виду, что свойства электрических машин постоянного тока в значительной степени определяются способом возбуждения, а для машин с электромагнитным возбуждением — способом включения обмотки возбуждения.

Начала и концы обмоток машин постоянного тока согласно ГОСТ обозначаются следующим образом:

- обмотка якоря $Я1$ и $Я2$;
- обмотка добавочных полюсов $Д1$ и $Д2$;

- обмотка компенсационная $K1$ и $K2$;
- обмотка возбуждения независимая $H1$ и $H2$;
- обмотка параллельного возбуждения (шунтовая) $Ш1$ и $Ш2$;
- обмотка последовательного возбуждения (сериесная) $C1$ и $C2$.

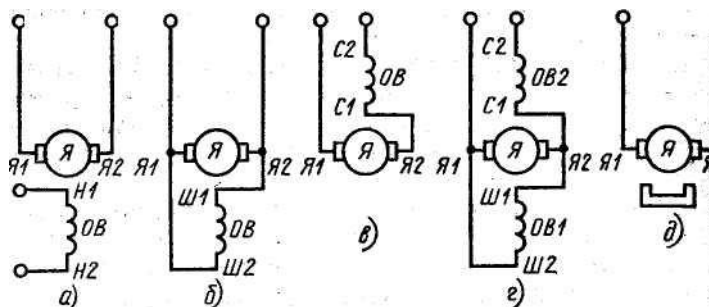


Рис.2.11 Способы возбуждения машин постоянного тока

2.5. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

В машине постоянного тока основной магнитный поток— поток возбуждения. При работе под нагрузкой в обмотке якоря появляется ток, а следовательно, в якоре возникает магнитный поток, вызванный этим током. *Влияние магнитного потока якоря на основной магнитный поток машины и может быть определено как реакция якоря.*

Рассмотрим указанное явление более детально на примере генератора постоянного тока, поперечное сечение которого представлено на рис. 2.12. Основной магнитный поток представлен полюсами N — S (назовем его Φ_v). Якорь показан сечением сердечника с проводниками обмотки, находящимися внутри сердечника. Направление вращения якоря показано стрелкой.

При работе генератора в режиме холостого хода $I_a = 0$, магнитный поток якоря отсутствует и действует лишь основной магнитный поток машины Φ_v , создаваемый обмоткой возбуждения OB . Магнитное поле в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 2.12, а).

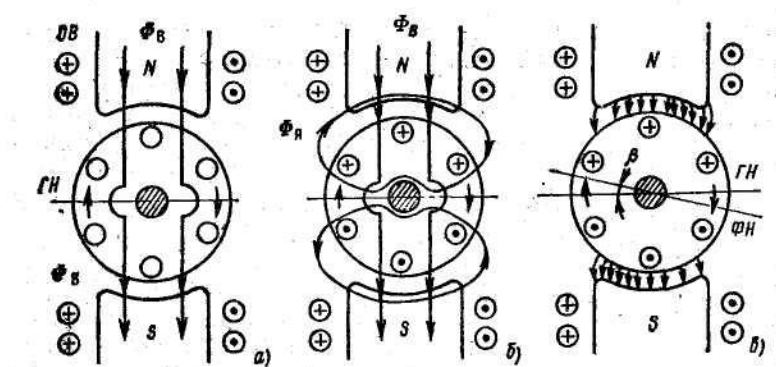


Рис. 2.12 Реакция якоря

Если генератор нагружен и по обмотке якоря протекает ток $I_{\text{я}}$, то в машине появляется дополнительный магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$ и якорь, по существу, становится электромагнитом (рис. 2.12,б). Следует заметить, что направление потока $\Phi_{\text{я}}$ (в соответствии с правилами правой руки и буравчика) определяется направлением $\Phi_{\text{в}}$ и направлением вращения якоря и, следовательно, при повороте якоря поток $\Phi_{\text{я}}$ не изменяет своего положения и направления, находясь постоянно в поперечной плоскости машины. Этот магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$, называемый поперечным потоком реакции якоря, замыкается через воздушный зазор и полюсы машины. Образовавшееся магнитное поле $\Phi_{\text{я}}$ взаимодействует с основным магнитным потоком $\Phi_{\text{в}}$ в результате чего те края полюсов, где магнитные силовые линии потоков $\Phi_{\text{в}}$ и $\Phi_{\text{я}}$ сонаправлены, дополнительно намагничиваются, а другие края полюсов, где магнитные силовые линии $\Phi_{\text{в}}$ и $\Phi_{\text{я}}$ направлены навстречу друг другу размагничиваются. Как видно из рис. 2.12,б и в, намагничиваются сбегаящие края полюсов, а размагничиваются набегающие края полюсов.

Таким образом, в результате реакции якоря магнитное поле искажается. Суммарный магнитный поток машины смещается в направлении вращения якоря; при этом смещается физическая нейтраль (ФН) относительно геометрической нейтрали (ГН) на угол β (рис. 2.12, в).

С увеличением нагрузки (тока в обмотке якоря) угол смещения физической нейтрали β возрастает. Если при этом щетки машины занимают положение, соответствующее геометрической нейтрали, то смещение физической нейтрали приводит к тому, что в местах пересечения поверхности якоря с геомет-

рической нейтралью магнитная индукция приобретает некоторое значение и в активных секциях обмотки в момент их перехода через геометрическую нейтраль наводится ЭДС. Это нарушает нормальную работу щеточного контакта, вызывая искрение на коллекторе.

Как выше указывалось, одни края полюсных наконечников подмагничиваются, а другие размагничиваются. Если бы магнитная цепь машины была ненасыщенной, подмагничивание одних краев полюсов компенсировалось бы размагничиванием других. Однако в реальных условиях магнитная цепь машины насыщена, и это ограничивает увеличение магнитного потока одних краев полюсных наконечников, не ограничивая при этом размагничивание (уменьшение потока) других краев полюсных наконечников. В итоге — *реакция якоря вызывает ослабление результирующего магнитного потока машины.*

Отрицательное влияние реакции якоря на работу машины проявляется еще и в появлении между соседними коллекторными пластинами напряжений, превышающих допустимые значения (25—60 В), что, в свою очередь, может вызвать ионизацию пространства между пластинами и возникновение электрической дуги на коллекторе. При интенсивном развитии этого процесса дуга может переброситься на щетки и корпус машины. Описанное явление, называемое круговым огнем, чрезвычайно опасно для электрической машины.

Наиболее действенным средством устранения вредного влияния реакции якоря является применение в машине компенсационной обмотки, которую укладывают в пазы полюсных наконечников и включают последовательно с обмоткой якоря так, чтобы МДС компенсационной обмотки была противоположна МДС обмотки якоря машины. Такое включение компенсационной обмотки автоматически обеспечивает компенсацию МДС обмотки якоря при любой нагрузке машины. Компенсационную обмотку делают распределенной по всей внутренней поверхности полюсных наконечников главных полюсов машины.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

2.6 КОММУТАЦИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.7. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Свойства генераторов постоянного тока определяются в основном способом возбуждения.

В генераторе с независимым возбуждением (рис. 2.13, а) обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока и электрически не связана с обмоткой якоря. Последовательно с обмоткой возбуждения включают регулировочный реостат RP , с помощью которого изменяется ток возбуждения I_e , а следовательно, магнитный поток Φ_e , ЭДС E и выходное напряжение генератора U . Свойства генератора с независимым возбуждением определяются его основными характеристиками: холостого хода, внешней и регулировочной.

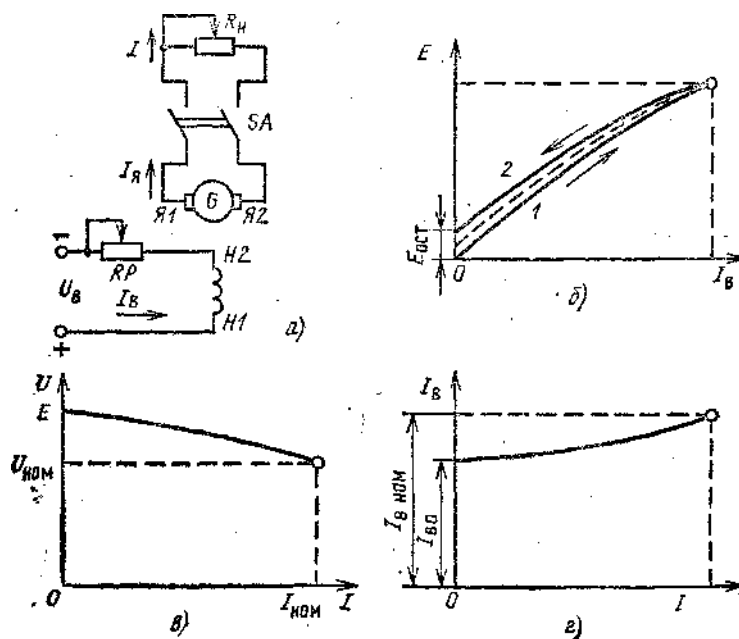


Рис. 2.13 Генератор независимого возбуждения

Характеристикой холостого хода называется зависимость ЭДС генератора E от тока возбуждения I_e при постоянной частоте вращения n и при отключенной нагрузке R_n , т.е. $E=f(I_e)$ при $n = \text{const}$ и $I_a=0$. При снятии характеристики холостого хода (рис. 2.13,б) ток возбуждения I_e плавно увеличивается от $I_e=0$ до такого значения, при котором $E=1,25U_{\text{ном}}$ (кривая 1), а затем I_e уменьшают до 0 (кривая 2). Как видно из характеристики (рис. 2.13,б, кривая 1), вначале, пока магнитная система не насыщена, при увеличении тока I_e ЭДС E растет пропорционально току I_e , а затем по

мере насыщения магнитной цепи рост ЭДС E замедляется и при полном насыщении E практически, не увеличивается. В ненасыщенной машине магнитный поток пропорционален току возбуждения, поэтому при изменении тока возбуждения I_e соответствующим образом изменяются как поток возбуждения Φ_v , так и ЭДС обмотки якоря $E = c_e \Phi_e n$.

При уменьшении тока возбуждения I_e ЭДС E , как и следовало ожидать, уменьшается (рис. 2.13, б, кривая 2), однако вследствие остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины кривая 2 (нисходящая ветвь характеристики) лежит выше кривой 1 (восходящая ветвь характеристики). Это обстоятельство приводит к тому, что при $I_e = 0$ в обмотке якоря индуцируется ЭДС, являющаяся по существу остаточной $E_{ост}$. Поскольку данная характеристика снимается при $n = \text{const}$, то исходя из выражения $E = c_e \Phi_e n$ ЭДС E в данном случае прямо пропорциональна Φ_e и характеристика холостого хода является магнитной характеристикой машины.

Расчетной характеристикой холостого хода считается средняя кривая между восходящей и нисходящей ветвями характеристики холостого хода (штриховая линия). По характеристике холостого хода можно судить о степени магнитного насыщения машины, о значении остаточного магнетизма (гистерезиса), а также строить почти все основные характеристики генератора.

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока нагрузки I при постоянных значениях тока возбуждения I_e и частоты вращения n : $U = f(I)$ при $I_e = \text{const}$ и $n = \text{const}$; эта характеристика определяет эксплуатационные свойства машины. Вид внешней характеристики (рис. 2.13, в) можно объяснить исходя из уравнения ЭДС генератора, которое в данном случае может быть записано в следующем виде: $U = E - I \cdot \Sigma r_{\text{я}}$.

При увеличении тока нагрузки I растет падение напряжения в цепи якоря $I(\Sigma r_{\text{я}})$, что приводит к снижению напряжения генератора U . К тому

же при увеличении тока якоря ($I_{\text{я}}=I$) возрастает размагничивающее действие реакции якоря, что приводит к снижению магнитного потока машины $\Phi_{\text{в}}$, а следовательно, к уменьшению ЭДС обмотки якоря E и напряжения U .

Номинальным напряжением генератора $U_{\text{ном}}$ называется напряжение, соответствующее номинальному току нагрузки $I_{\text{ном}}$. Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к номинальному режиму обычно выражается в процентах $U_{\text{ном}}$:

$$\Delta U_{\text{ном}\%} = \frac{E - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (2.13)$$

У генераторов независимого возбуждения $\Delta U_{\text{ном}} \leq 10\%$. Такое небольшое значение изменения напряжения является достоинством генератора независимого возбуждения.

Регулировочной характеристикой генератора называется зависимость тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от тока нагрузки I (тока якоря $I_{\text{я}}$) при постоянном напряжении генератора $U_{\text{ном}}$ и постоянной частоте вращения якоря n : $I_{\text{в}}=f(I)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $n = \text{const}$ (рис. 2.13,г).

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменить ток возбуждения $I_{\text{в}}$ для того, чтобы при изменении тока нагрузки I напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным, равным номинальному.

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения, несколько ограничивающий их применение, состоит в необходимости постороннего источника постоянного тока (возбудителя $U_{\text{в}}$).

Генераторы с самовозбуждением выполняются с параллельным, последовательным и смешанным включением обмотки возбуждения относительно обмотки якоря. Принцип самовозбуждения, одинаковый для этих схем, изучается ниже, на примере генератора параллельного возбуждения.

Генератор параллельного возбуждения (рис. 2.14, а). Принцип самовозбуждения основан на использовании свойства магнитных материалов сохранять определенное значение остаточной магнитной индукции в течение длительного времени. Благодаря этому в любой электрической машине, даже обесточенной, всегда сохраняется остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$, значение которого составляет 2—5 % рабочего потока.

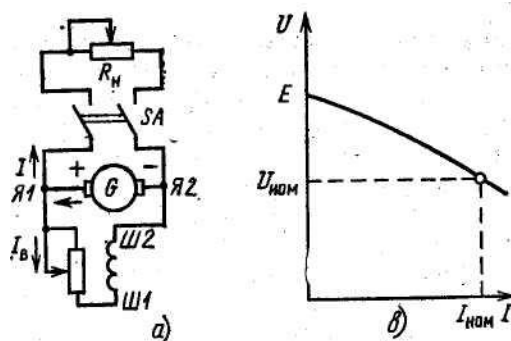


Рис. 2.14 Генератор параллельного возбуждения

При вращении якоря поток $\Phi_{ост}$ наводит в обмотке якоря небольшую ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в цепи возбуждения возникает небольшой ток I_e (нагрузка R_n отключена). Этот ток вызывает в сердечнике генератора дополнительный магнитный поток Φ_b , и если его направление совпадает с направлением $\Phi_{ост}$, то результирующий магнитный поток увеличивается, что приводит к увеличению ЭДС генератора и соответствующему увеличению тока возбуждения и т.д. Процесс постепенного нарастания ЭДС генератора продолжается до тех пор, пока падение напряжения на обмотке возбуждения $U_e = I_e r_e$ не уравнивает указанную ЭДС генератора, т.е.

$$E = I_e r_e \quad (2.14)$$

где r_e — сопротивление обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения подобна аналогичной характеристике генератора с независимым возбуждением (рис. 2.13,б). Однако в данном случае увеличение тока нагрузки вызывает более резкое, чем в генераторах с независимым возбуждением, падение выходного напряжения U (от 15 до 30 %). Объясняется это тем, что из-за параллельного соединения обмоток изменение выходного

напряжения U вызывает соответствующее изменение тока возбуждения, поскольку $I_g = \frac{U}{r_g}$, что, в свою очередь, приводит к изменению магнитного потока Φ_g , ЭДС E , а значит, и напряжения U . Регулировочные характеристики снимаются при $U = \text{const}$, и в данном случае фактор падения выходного напряжения, указанный выше, не проявляется, а поэтому регулировочные характеристики генераторов параллельного и независимого возбуждения одинаковы.

Генератор последовательного возбуждения. У генератора последовательного возбуждения (рис. 2.15, а) ток возбуждения равен току якоря (току нагрузки): $I_n = I_a = I$. Поэтому свойства такого генератора определяются лишь внешней характеристикой (рис. 2.15, б), а остальные характеристики генератора могут быть сняты только при включении генератора на независимое возбуждение.

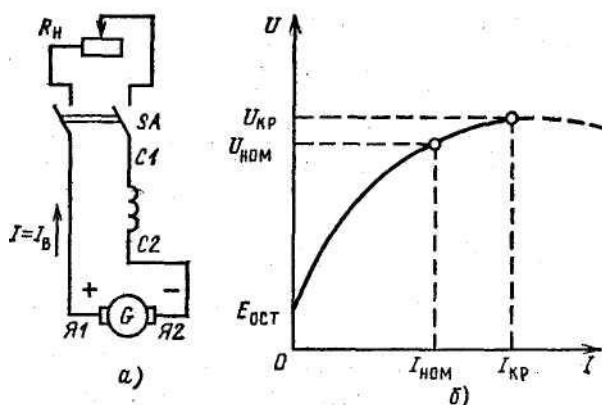


Рис. 2.15 Генератор последовательного возбуждения

Как видно из рис. 2.15, б, при разомкнутой цепи якоря, поскольку $I_a = I_n = 0$, ЭДС генератора E невелика и равна $E_{ост}$. С появлением тока растет напряжение на выходе генератора U до некоторого значения $U_{кр}$, обусловленного магнитным насыщением машины. При дальнейшем увеличении тока нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается, так как основной поток вследствие насыщения почти не увеличивается, а падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря продолжают возрастать. В результате внешняя характеристика при $I > I_{кр}$ становится падающей. Как видно из рис. 2.15, б, напряжение на выходе генератора значительно меняется при изменении тока нагрузки. Это об-

стоятельство ограничивает применение генераторов последовательного возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения (рис. 2.16, а). В генераторе смешанного возбуждения магнитный поток создается параллельной (80 — 85 %) и последовательной (15 — 20 %) обмотками возбуждения. Наличие двух обмоток при их согласном включении позволяет получить почти неменяющееся напряжение на выходе генератора при изменении нагрузки. Пояснить это можно следующим образом. Если генератор работает в режиме холостого хода, то магнитный поток создается только параллельной обмоткой возбуждения; с появлением нагрузки возникает магнитный поток от последовательной обмотки возбуждения, который подмагничивает машину, компенсируя при этом размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. Таким образом, внешняя характеристика генератора становится жесткой (кривая 1, рис. 4.16, б), т. е. напряжение на зажимах генератора почти не меняется с увеличением тока нагрузки I . Практически оно меняется в пределах 2 — 3 %.

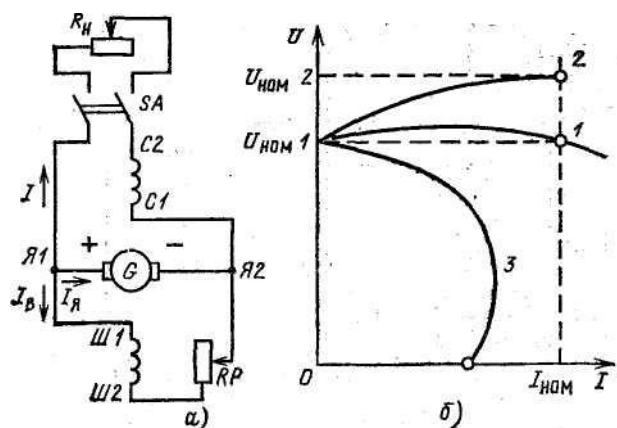


Рис.2.16 Генератор смешанного возбуждения

Увеличивая число витков последовательной обмотки возбуждения, можно добиться компенсации падения напряжения не только на внутреннем сопротивлении генератора $\Sigma r_{я}$, но и в проводах линии, соединяющей генератор с нагрузкой. Внешняя характеристика при этом соответствует кривой 2. При встречном включении обмоток размагничивающее действие последовательной обмотки возбуждения вызывает резкое падение внешней характери-

стики (*кривая 3*). Такое включение обмоток применяют в сварочных генераторах и других специальных машинах.

2.8. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия двигателя постоянного тока и основные соотношения для него приведены в § 2.3. При эксплуатации двигателей постоянного тока необходимо учитывать особенности режимов работы двигателей различных видов, управлять режимом пуска двигателя, частотой и направлением вращения якоря.

Пуск двигателя. Из уравнения ЭДС двигателя (2.13) ток якоря можно записать следующим образом:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{\Sigma r_{\text{я}}} \quad (2.15)$$

В момент включения двигателя в сеть его якорь неподвижен, т. е. $n = 0$, и, следовательно, согласно (2.6), $E=0$. Таким образом, в момент пуска двигателя в обмотке якоря возникает ток

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{\Sigma r_{\text{я}}} \quad (2.16)$$

Обычно $\Sigma r_{\text{я}}$ невелико, поэтому пусковой ток оказывается иногда недопустимо большим, превышающим номинальный ток двигателя в 5 — 20 раз.

Пуск непосредственным подключением двигателя к сети применяется для двигателей мощностью не более 0,7 — 1,0 кВт. В двигателях большой мощности для ограничения пускового тока применяют специальные пусковые реостаты. Их включают последовательно с цепью якоря, и при введенном реостате пусковой ток

$$I'_{\text{я.п}} = \frac{U}{\Sigma r_{\text{я}} + R_{\text{п}}} \quad (2.16a)$$

где R_n — сопротивление пускового реостата, подбирается таким образом, чтобы начальный пусковой ток превышал номинальный ток двигателя не более чем в 2 — 4 раза.

По мере разгона увеличивается противоЭДС якоря, ток в цепи якоря уменьшается, что позволяет уменьшить сопротивление пускового реостата. По окончании процесса разгона сопротивление пускового реостата доводится до нуля.

Регулирование частоты вращения двигателя. Согласно (2.6) частота вращения двигателя определяется следующим выражением:

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

Подставив в это выражение E из (2.7), получим

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_e \Phi} \quad (2.17)$$

Из (2.17) следует, что регулирование частоты вращения якоря возможно тремя способами:

- 1) изменением напряжения питающей сети U ;
- 2) изменением активного сопротивления цепи якоря $\Sigma r_{\text{я}}$, куда входит и сопротивление регулировочного реостата;
- 3) изменением магнитного потока двигателя Φ .

Первый способ применяется для мощных двигателей, а также в тех случаях, когда необходимо регулировать частоту вращения в широких пределах. При этом способе регулирования необходим индивидуальный источник питания с плавной регулировкой выходного напряжения.

Второй способ применяется в двигателях небольшой мощности, так как в регулировочном реостате, включенном последовательно с обмоткой якоря, в этом случае потери мощности будут допустимыми. Следует иметь в виду, что при этом способе регулирования изменение нагрузки двигателя резко влияет на ток якоря, что вызывает значительные колебания частоты вращения якоря.

Третий способ заключается в следующем. В цепь обмотки возбуждения включается регулировочный реостат. Изменяя сопротивление этого реостата, можно изменять значение тока возбуждения $I_{\text{в}}$, а следовательно, и значение магнитного потока двигателя Φ .

Реверсирование двигателей (изменение направления вращения).

Направление вращения якоря двигателя определяется направлением электромагнитного вращающего момента, которое, в свою очередь, определяется направлениями магнитного потока Φ и тока якоря $I_{\text{я}}$ (2.10), следовательно, *изменяя направление магнитного потока Φ или тока якоря $I_{\text{я}}$, можно изменить направление вращающего момента, а значит, и направление вращения якоря двигателя постоянного тока.*

В двигателях с электромагнитным возбуждением реверсирование может осуществляться изменением направления любого из токов: тока возбуждения $I_{\text{в}}$ или тока якоря $I_{\text{я}}$. Следует заметить, что одновременное изменение направления тока возбуждения $I_{\text{в}}$ и тока $I_{\text{я}}$ (при переключении общих зажимов схемы) изменение направления вращения якоря не дает.

В двигателях с возбуждением постоянными магнитами, как правило, применяется реверсирование изменением направления тока якоря $I_{\text{я}}$. Свойства двигателей постоянного тока, как и генераторов, зависят в основном от способа возбуждения (§ 2.4).

В двигателях параллельного возбуждения обмотку возбуждения включают параллельно обмотке якоря (рис. 4.17,а), причем в двигателях большой мощности $I_{\text{в}} = (0,01 \div 0,03)I_{\text{я}}$, в двигателях средней мощности $I_{\text{в}} = (0,05 \div 0,1)I_{\text{я}}$, а в маломощных двигателях $I_{\text{в}} = (0,3 \div 0,5)I_{\text{я}}$. Ток, потребляемый двигателем от сети, $I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}$. На рис. 2.17, б показаны рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения: $n=f(P'_2)$; $M_{\text{вэл}} = f(P'_2)$; $M(I)=f(P'_2)$, зависимости частоты вращения, моментов, развиваемых двигателем, и тока, потребляемого двигателем, от полезной мощности P'_2 при $U = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$.

Характеристика $n=f(P'_2)$ (скоростная характеристика) имеет вид кривой, наклонной к оси P'_2 (рис. 4.17,б). Форма этой характеристики определяется вы-

ражением (2.17). С ростом потребляемой мощности P'_2 увеличивается потребляемый двигателем ток I , что приводит к увеличению $I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}$, а следовательно, к уменьшению числителя $(U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}})$, а значит, и к уменьшению частоты вращения n . Одновременно с возрастанием тока якоря $I_{\text{я}}$ усиливается реакция якоря (см. § 2.5), что приводит к уменьшению магнитного потока Φ и, согласно (2.17), к некоторому увеличению частоты вращения n . Совместное влияние указанных факторов на скоростную характеристику приводит к тому, что частота вращения меняется незначительно с изменением нагрузки P'_2 , т. е. характеристика становится «жесткой».

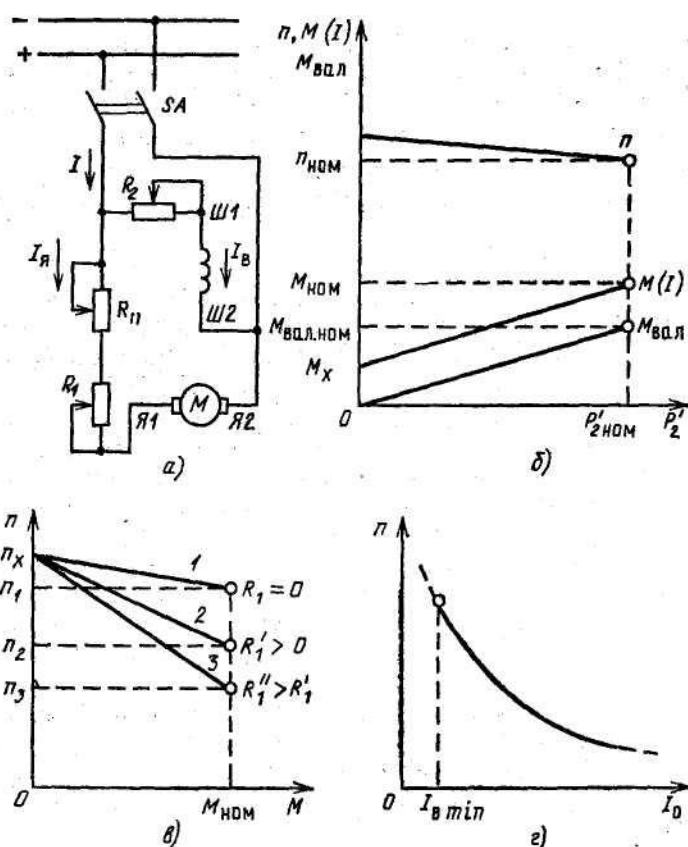


Рис.2.17 Двигатель параллельного возбуждения

В двигателях малой мощности вследствие незначительного магнитного насыщения размагничивающее действие реакции якоря незначительно и оно почти не влияет на форму характеристики $n=f(P'_2)$, которая в этом случае практически линейна.

Характер зависимости $M_{\text{вал}} = f(P'_2)$ можно объяснить с помощью выражения

$$M_{вал} = \frac{P'_2}{\omega} = \frac{30 \cdot P'_2}{\pi \cdot n} \quad (2.18)$$

где $M_{вал}$ — полезный момент, момент на валу двигателя, Н·м; P'_2 — полезная мощность, Вт; ω — угловая скорость, рад/с; n — частота вращения, об/мин.

Если бы частота вращения n при увеличении P'_2 не изменялась, то график $M_{вал} = f(P'_2)$ имел вид прямой. Однако с увеличением нагрузки P'_2 частота вращения якоря двигателя n уменьшается и поэтому характеристика $M_{вал} = f(P'_2)$ нелинейна (рис. 2.17, б).

Характеристика $M = f(P'_2)$ согласно определяется суммой $M_x + M_{вал}$. Поскольку рабочие характеристики снимаются при $I_\phi = \text{const}$, что обеспечивает постоянство магнитных потерь, то $M_x = \text{const}$ и характеристика $M = f(P'_2)$ является равноудаленной от характеристики $M_{вал} = f(P'_2)$. Если принять $\Phi = \text{const}$, то график $M = f(P'_2)$ является одновременно и выражением зависимости $I = f(P'_2)$, так как согласно (2.10) $M = c_M \Phi I_\phi$.

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ и $I_\phi = \text{const}$ (рис. 2.17, в). Для получения указанной зависимости необходимо преобразовать выражение (2.17). После подстановки в него $I_\phi = M / c_M \Phi$ из (2.10) зависимость частоты вращения двигателя n от электромагнитного момента M примет вид:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \Sigma r_\phi}{c_e c_M \Phi^2} = n_x - \Delta n, \quad (2.19)$$

где n_x — частота вращения в режиме холостого хода; Δn — изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.

Если пренебречь реакцией якоря, то можно считать $\Phi = \text{const}$. Тогда механическая характеристика двигателя будет представлять собой прямую линию, наклоненную к оси M . Угол наклона характеристики (ее крутизна) увеличивается с увеличением сопротивления R_l дополнительно включаемого в цепь якоря, что приводит к увеличению Σr_ϕ (рис. 2.17, в, графики 2 и 3).

Регулировочная характеристика двигателя $n=f(I_e)$ представляет собой зависимость частоты вращения от тока возбуждения при $I_n=\text{const}$ и $U=\text{const}$. Характер ее определяется выражением (2.17), согласно которому с увеличением тока возбуждения I_e и соответствующим увеличением потока Φ_e частота вращения n уменьшается (рис. 2.17,г).

Из графика видно, что при очень малых значениях $I_e \ll I_{e\min}$, а тем более при обрыве цепи возбуждения ($I_e = 0$) частота вращения неограниченно возрастает, что приводит к механическому разрушению двигателя. Это обстоятельство требует строгого контроля прочности электрических соединений обмотки возбуждения. Двигатели параллельного возбуждения широко применяются в силовом электроприводе и в схемах автоматики благодаря линейности и жесткости механических характеристик, а также возможности плавного регулирования частоты вращения вала двигателя в широких пределах.

Двигатель последовательного возбуждения. В этом двигателе обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря (рис. 2.18, а) и, следовательно, $I_{\text{я}} = I_n = I$, где I — ток нагрузки. При небольших нагрузках магнитная система машины не насыщена, т.е. $\Phi_n = kI_{\text{я}}$, где k — коэффициент пропорциональности. В этом случае электромагнитный момент будет равен:

$$M = c_M \Phi_n I_{\text{я}} = c_M k I_{\text{я}} I_{\text{я}} = c'_M I_{\text{я}}^2, \quad (2.20)$$

где $c'_M = c_M k$.

Частота вращения якоря из (2.17)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_e \Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_e k I_{\text{я}}} = \frac{U}{c'_e I_{\text{я}}} - \frac{\Sigma r_{\text{я}}}{c'_e} \quad (2.21)$$

где $c'_e = c_e k$.

Рабочие характеристики двигателя $M = f(I_{\text{я}})$ и $n = f(I_{\text{я}})$ в соответствии с полученными выражениями (2.20) и (2.21) представлены на рис. 4.18,б. При небольших нагрузках двигателя электромагнитный (вращающий) момент пропорционален квадрату тока, потребляемого двигателем, а частота вращения якоря обратно пропорциональна этому току. С увеличением

нагрузки наступает насыщение магнитопровода, т.е. $\Phi_{\Pi} = \Phi_{\text{В}} = \text{const}$ и характеристики двигателя приобретают почти линейный характер, так как в этом случае электромагнитный момент согласно (2.10) будет равен

$$M = c_M \Phi_s I_{\text{я}} = c'_M I_{\text{я}}, \quad (2.22)$$

где $c'_M = c_M \Phi_s$, а частота вращения согласно (2.17)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_e \Phi_s} = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c''_e}, \quad (2.23)$$

где $c''_e = c_e \Phi_s$.

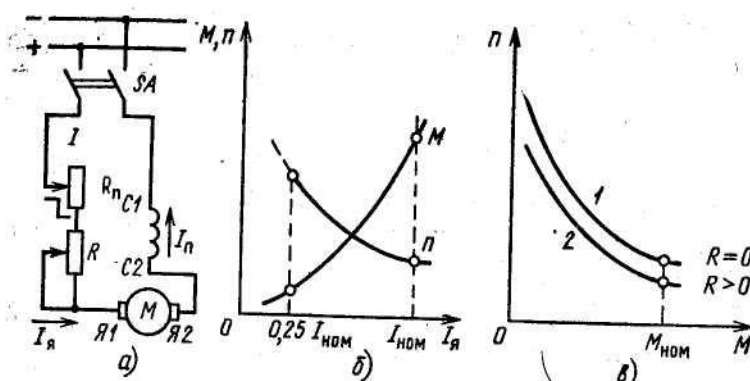


Рис.2.18 Двигатель последовательного возбуждения

При уменьшении нагрузки, как видно из рис. 2.18, б, частота вращения якоря увеличивается, а при токе $I_{\text{я}} < 0,25 I_{\text{я.ном}}$ частота вращения n может достигнуть опасных значений, приводящих к разрушению двигателя. Поэтому *работа двигателя последовательного возбуждения или пуск его при нагрузке меньше 25 % номинальной, а следовательно, и в режиме холостого хода недопустимы*. Для более надежной работы двигателя его вал должен соединяться с рабочим механизмом с помощью муфты или зубчатой передачи; применение ременной передачи недопустимо, так как обрыв или сброс ремня ведет к «разносу» двигателя.

В двигателе малой мощности (до 100 Вт) режим холостого хода допустим, так как механические потери при больших частотах вращения соизмеримы с номинальной мощностью.

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения $n=f(M)$ при $U=\text{const}$ представлена на рис. 2.18, в. Выражение (2.21) может быть преобразовано следующим образом:

$$n = \frac{U}{c_e' I_{\text{я}}} - \frac{\Sigma r_{\text{я}}}{c_e'} = \frac{U}{c_e' \sqrt{M/c_M'}} - \frac{\Sigma r_{\text{я}}}{c_e'} \quad (2.24)$$

где $\sqrt{M/c_M'} = I_{\text{я}}$ получено из (2.20).

Как следует из (2.24), частота вращения n обратно пропорциональна \sqrt{M} , что иллюстрирует кривая 1 на рис. 2.18, в. При введении добавочного сопротивления R в цепь якоря механическая характеристика смещается в область низких частот вращения (рис. 2.18, в, кривая 2).

Двигатели последовательного возбуждения широко применяются в различных электроприводах, где имеют место значительные изменения нагрузки (нагружающего момента) и тяжелые условия пуска (грузоподъемные, поворотные механизмы, тяговый привод и т.п.).

Двигатель смешанного возбуждения. В этом двигателе имеются две обмотки возбуждения, одна из которых соединяется последовательно с обмоткой якоря, другая — параллельно ей (рис. 2.19,а). Частота вращения якоря согласно (2.10) для данного случая

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \Sigma r_{\text{я}}}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)} \quad (2.25)$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки обмоток возбуждения, причем знак «+» соответствует сонаправленным потокам (общий магнитный поток машины увеличивается), а «—» — потокам, направленным навстречу друг другу.

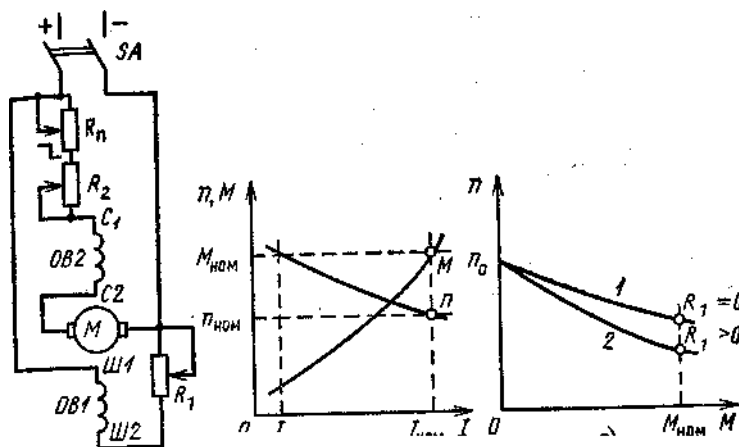


Рис.2.19 Двигатель смешанного возбуждения

На рис. 2.19,б показаны *рабочие характеристики двигателя* смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения.

Механические характеристики представлены на рис. 2.19, в.

По форме характеристики данного двигателя занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения; приближаются они к характеристикам одного из двигателей в зависимости от преобладания МДС в какой-либо из указанных обмоток.

Двигатель смешанного возбуждения имеет ряд преимуществ по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Этот двигатель может работать вхолостую, так как в режиме холостого хода поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя и устраняет опасность «разноса». Регулировка частоты вращения производится реостатом R_1 в цепи параллельной обмотки возбуждения.

Однако наличие двух обмоток возбуждения делает двигатель смешанного возбуждения более дорогостоящим по сравнению с двигателями предыдущих типов, что несколько ограничивает его применение. Двигатели смешанного возбуждения применяются обычно там, где требуются значительные пусковые моменты, быстрое ускорение при разгоне, устойчивая работа, а также допустимо некоторое снижение частоты вращения при увеличении нагрузки на вал.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ