

1. Устройство и принцип работы синхронного генератора переменного тока
2. Характеристики синхронного генератора
3. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока
4. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока

1. Устройство и принцип работы синхронного генератора переменного тока

Синхронными называются электрические машины, частота вращения которых связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена. Синхронные машины служат генераторами переменного тока на электрических станциях, а синхронные двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения. Синхронные машины обратимы, т.е. они могут работать и как генераторы, и как двигатели, хотя в конструкциях современных синхронных генераторов и двигателей имеются небольшие, но практически весьма существенные отличия. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающая или тормозящая механическая сила. В первом случае она получает на валу механическую, а отдает в сеть электрическую энергию, а во втором случае она потребляет из сети электрическую энергию, а отдает на валу механическую энергию.

Синхронная машина имеет две основные части – ротор и статор, причем статор не отличается от статора асинхронной машины. Ротор синхронной машины представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные

кольца и щетки от внешнего источника. В обмотках статора под действием вращающегося магнитного поля ротора наводится ЭДС, которая подается на внешнюю цепь генератора (в режиме двигателя на обмотку статора подается напряжение сети). Такая конструкция генератора позволяет устранить скользящие контакты в цепи нагрузки генератора (обмотки статора непосредственно соединяются с нагрузкой) и надежно изолировать обмотки статора от корпуса машины, что существенно для мощных генераторов, работающих при высоких напряжениях.

Основной магнитный поток синхронного генератора, создаваемый вращающимся ротором, возбуждается посторонним источником-возбудителем, которым обычно является генератор постоянного тока небольшой мощности, установленный на общем валу с синхронным генератором. Постоянный ток от возбудителя подается на ротор через щетки и контактные кольца, установленные на валу ротора.

По своей конструкции роторы бывают *явнополюсные* (рис. 9.1, а) и *неявнополюсные* (рис. 9.1, б). Число пар полюсов ротора обусловлено скоростью его вращения.

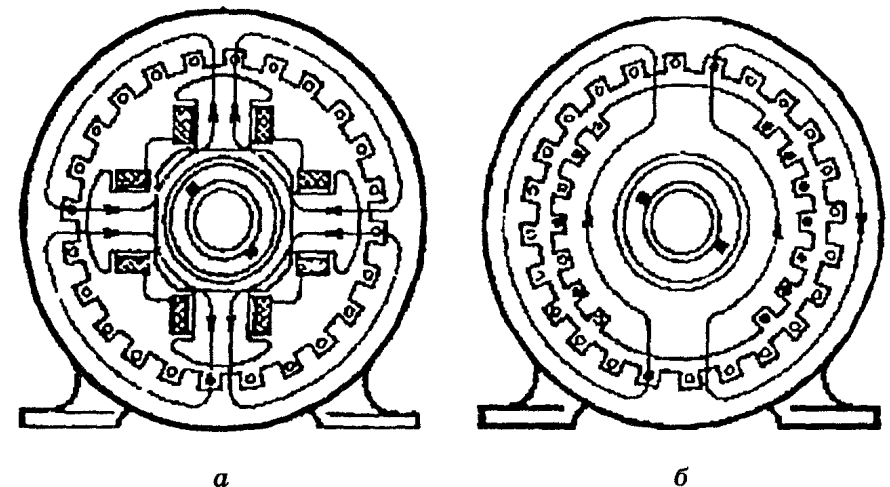


Рис. 9.1

У многополюсной синхронной машины ротор имеет p пар полюсов, а токи в обмотке статора образуют также p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как у асинхронной машины). Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная скорость равна

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (9.1)$$

При стандартной частоте переменного тока 50 Гц частота вращения двухполюсной машины ($p = 1$) 3000 об/мин. С такой частотой вращаются современные турбогенераторы, состоящие из паровой турбины и синхронного генератора большой мощности с неявнополюсным ротором, который имеет одну пару полюсов. Неявнополюсный ротор такого генератора изготавливается из массивной стальной поковки. Обмотка постоянного тока расположена в пазах, выфрезерованных по всей его длине.

У гидрогенераторов первичным двигателем служит гидравлическая турбина, скорость вращения которой невелика (от 50 до 750 об/мин) и определяется высотой напора воды. В этом случае используются синхронные генераторы с явнополюсным ротором, имеющим от 4 до 60 пар полюсов.

Частота вращения дизель-генераторов, соединенных с первичным двигателем — дизелем, находится в пределах от 500 до 1500 об/мин. Обычно это явнополюсные машины небольшой мощности. В маломощных синхронных генераторах обычно используется *самовозбуждение*: обмотка возбуждения питается выпрямленным током того же генератора (рис. 9.2).

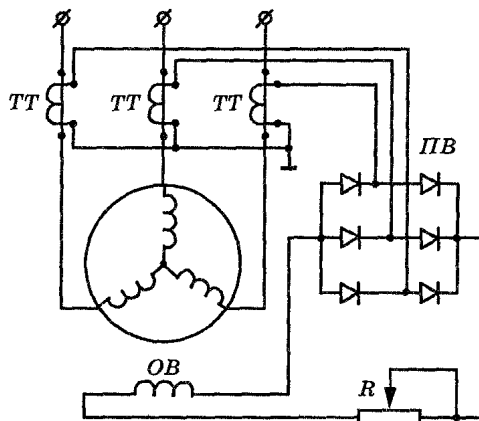


Рис. 9.2

Цепь возбуждения образуют трансформаторы тока $ТТ$, включенные в цепь нагрузки генератора, полупроводниковый выпрямитель, собранный по схеме трехфазного моста, и обмотка возбуждения генератора $ОВ$ с регулировочным реостатом R .

Самовозбуждение генератора происходит следующим образом. В момент пуска генератора благодаря остаточной индукции в магнитной системе появляются слабые ЭДС и токи в рабочей обмотке генератора. Это приводит к появлению ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов $ТТ$ и небольшого тока в цепи возбуждения, усиливающего индукцию магнитного поля машины. ЭДС генератора возрастает до тех пор, пока магнитная система машины полностью не возбудится.

Среднее значение ЭДС, наводимое в каждой фазе обмотки статора,

$$E_{cp} = cn\Phi, \quad (9.2)$$

где n — скорость вращения ротора, Φ — максимальный магнитный поток, возбуждаемый в синхронной машине, а c — постоянный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности данной машины.

Мы видим, что ЭДС генератора пропорциональна основному магнитному потоку машины, при этом напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину падения напряжения на обмотке:

$$\vec{U} = \vec{E} - \vec{I}z, \quad (9.3)$$

где \vec{I} — ток в обмотке статора (ток нагрузки); z — полное сопротивление обмотки (одной фазы).

Для точной подгонки амплитуды ЭДС величину магнитного потока регулируют путем изменения тока в цепи возбуждения регулировочным реостатом. Форма ЭДС синхронного генератора должна быть синусоидальной. Синусоидальность ЭДС зависит прежде всего от распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и рото-

ром. В явнополюсных машинах полюсным концевикам ротора придают определенную форму (делают скосы по краям). При этом воздушный зазор постепенно увеличивается от середины полюса к его краям, а магнитная индукция распределяется по закону косинуса.

Однако такой способ получения синусоидальной ЭДС неприменим для машин с неявнополюсным ротором. В неявнополюсных машинах нужного распределения магнитной индукции добиваются путем особого размещения обмотки возбуждения на поверхности ротора. Эти и другие меры обеспечивают практически синусоидальную форму ЭДС.

Реакция якоря

Для частей синхронной машины применяются те же наименования, что и для частей машин постоянного тока: якорем принято называть ту часть, в обмотке которой индуцируется ЭДС. Следовательно, в синхронных машинах основного типа с неподвижной обмоткой переменного тока статор служит якорем. Индуктором, т.е. той частью, которая возбуждает основной магнитный поток, в синхронной машине основного типа является ротор.

Магнитная система синхронного генератора в режиме холостого хода (без нагрузки) состоит из магнитного потока полюсов, который индуцирует ЭДС в обмотке статора. После включения нагрузки в трехфазной обмотке статора возникает ток, который, как известно, создает свое вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля равна скорости вращения магнитного поля полюсов. Следовательно, полный магнитный поток синхронной машины при нагрузке складывается из магнитных потоков ротора и статора. Магнитное поле статора, накладываясь на магнитное поле ротора, может либо ослаблять, либо усиливать его. Результат взаимодействия этих полей определяется величиной и характером нагрузки. Влияние магнитного поля статора на магнит-

ное поле, создаваемое вращающимися полюсами ротора, называется *реакцией якоря*.

Реакция якоря различна при различных нагрузках. В случае активной нагрузки (для получения такого режима нагрузка должна быть активно-емкостной, при этом емкость скомпенсирует индуктивность обмотки генератора) общий магнитный поток генератора несколько увеличивается и, следовательно, ЭДС генератора возрастает.

В случае чисто индуктивной нагрузки общий магнитный поток генератора уменьшается и, следовательно, уменьшается его ЭДС.

При емкостной нагрузке генератора общий магнитный поток генератора увеличивается, что приводит к увеличению ЭДС.

Отметим, что при увеличении тока нагрузки увеличивается магнитное поле якоря. Поэтому чем больше ток нагрузки, тем больше реакция якоря. Реакция якоря в синхронном генераторе приводит к изменению суммарного магнитного потока и ЭДС, что крайне нежелательно, поскольку изменение величины и характера нагрузки приведет к изменению напряжения на зажимах генератора.

Чтобы свести реакцию якоря к минимуму, увеличивают зазор между статором и ротором и одновременно увеличивают ток и число витков обмотки возбуждения. Это приводит к уменьшению потока якоря за счет увеличения магнитного сопротивления машины при неизменном общем магнитном потоке. Однако таким способом нельзя полностью устранить влияние реакции якоря. На практике при всяком изменении нагрузки с помощью автоматических устройств изменяют ток возбуждения, что существенно ослабляет влияние реакции якоря.

Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но поскольку в этих двигателях форма кривой ЭДС малозначительна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

3. Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора являются характеристика холостого хода, а также внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода

Эта характеристика представляет собой зависимость ЭДС генератора E_0 на холостом ходу (т.е. без нагрузки) от тока возбуждения I_0 . Она связана с кривой намагничивания стали и напоминает ее по форме (рис. 9.3).

На холостом ходу синхронного генератора его ЭДС создается только главным магнитным потоком, поэтому ЭДС E_0 пропорциональна главному магнитному потоку Φ_0 , который в свою очередь пропорционален магнитной индукции B_0 в статоре. Поэтому зависимость $E_0 = f(I_0)$ подобна зависимости $B_0 = f(I_0)$, т.е. первоначальной кривой намагничивания стали. При достижении области магнитного насыщения магнитной системы генератора скорость роста ЭДС уменьшается, а спрямление кривой при малых значениях индукции происходит за счет воздушного зазора в магнитной цепи машины, обладающего большим магнитным сопротивлением.

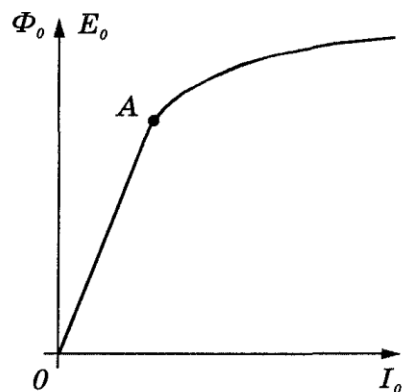


Рис. 9.3

Опытным путем эту характеристику получают, изменяя ток возбуждения при номинальной скорости вращения ротора.

Номинальный режим возбуждения генератора выбирают в области изгиба кривой (точка А). Использование области магнитного насыщения для увеличения ЭДС генератора приводит к неоправданному увеличению тока и размеров обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика

Внешняя характеристика синхронного генератора характеризует его электрические свойства и представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от его тока нагрузки I при постоянных значениях коэффициента мощности $\cos \varphi$, скорости вращения ротора n и тока возбуждения I_0 (рис. 9.4).

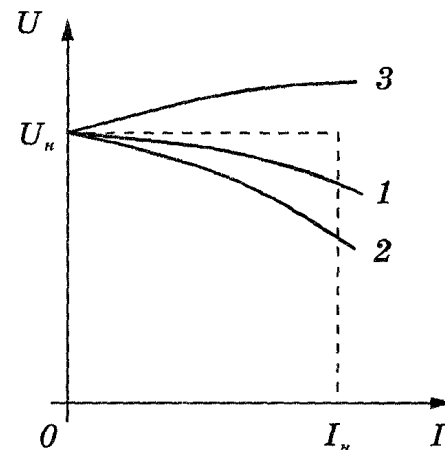


Рис. 9.4

Чтобы экспериментально получить внешнюю характеристику, нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока I_n при номинальном напряжении U_n на зажимах генератора, которое устанавливается путем регулировки тока возбуждения. Затем, поддерживая ток возбуждения и частоту вращения постоянными, постепенно уменьшают ток нагрузки до нуля. Внешние характеристики могут иметь спад (кривая 2) или подъем (кривая 3) в зависимости от характера нагрузки и действия реакции якоря. Номинальный режим нагрузки выбирают таким, чтобы при $\cos \varphi = 0,8$ изменения напряжения ΔU не превышали 35–45 % от номинального (кривая 1).

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения генератора I_0 от тока нагрузки I при $U = U_n = \text{const}$, $n = n_n = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

Эта характеристика показывает, как выбрать ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора оставалось бы постоянным при изменениях нагрузки.

Чтобы экспериментально получить регулировочную характеристику, нужно сначала включить генератор и сообщить его ротору номинальную скорость вращения n_n при холостом ходе, а потом путем изменения тока возбуждения добиться получения номинального напряжения U_n .

Далее постепенно увеличивают ток нагрузки и снимают характеристику, добываясь в каждой точке постоянства напряжения на зажимах машины ($U = U_n = \text{const}$) путем регулирования тока возбуждения.

На рис. 9.5 изображены регулировочные характеристики для различных значений $\cos \varphi$. Мы видим, что при активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi \geq 0$ (кривая 2), ток возбуждения необходимо увеличивать, а при активно-емкостной нагрузке, когда $\varphi \leq 0$ (кривая 3) — уменьшать. Кривая 1 соответствует оптимальному режиму. Все эти явления обусловлены реакцией якоря.

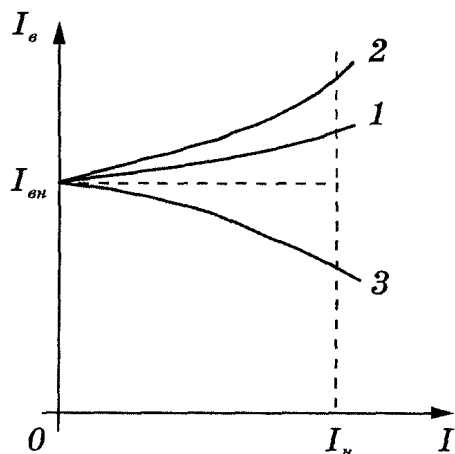


Рис. 9.5

Регулировочные характеристики имеют важное практическое значение, так как они определяют пределы изменения тока возбуждения для поддержания номинального напряжения при изменении нагрузки.

3. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока

Генераторы постоянного тока используются для питания электролитических ванн, электромагнитов различного назначения и т.п. Генераторы постоянного тока, как правило, приводятся в действие асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

Принцип работы генератора постоянного тока основан на возникновении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (рис. 10.1, а).

Как известно, при вращении рамки индуцируемая в ней ЭДС будет изменяться по синусоиде, т.е. за один оборот дважды поменяет знак. Чтобы ток во внешней цепи имел одно

направление (постоянное), применяют коллектор – два полукольца, соединенных с концами рамки, которые через щетки соединяются с внешней цепью. Как только рамка повернется на 180° и ЭДС начнет менять знак, полукольца коллектора поменяются местами. Благодаря этому направление тока во внешней цепи останется неизменным, хотя его величина будет изменяться (пульсировать, рис. 10.1, б).

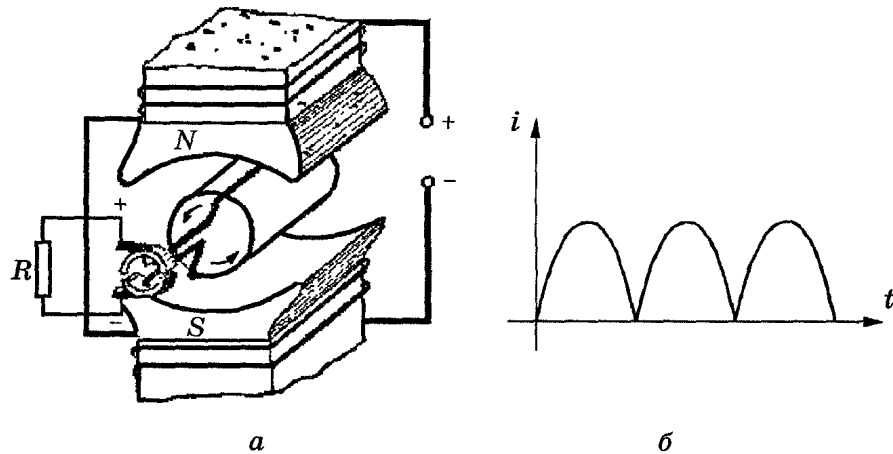


Рис. 10.1

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части, служащей для возбуждения главного магнитного поля, и вращающейся части, в которой индуцируются ЭДС и токи, создающие тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.

Устройство промышленного генератора постоянного тока показано на рис. 10.2.

Неподвижная часть генератора состоит из станины 1, на которой находятся главные полюсы 2 с обмотками возбуждения и дополнительные полюсы с обмотками для компенсации ЭДС самоиндукции и реакции якоря. В большинстве случаев электромагниты питаются от самого генератора. Внут-

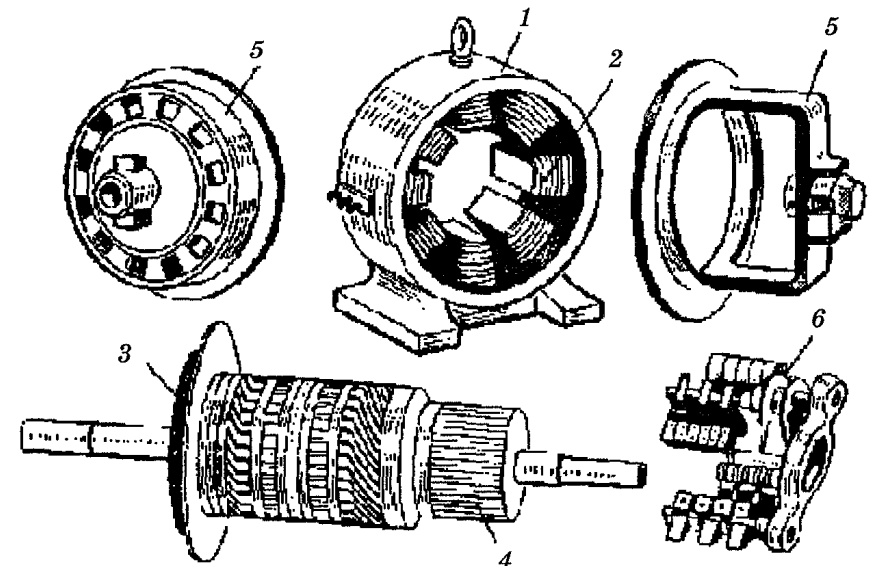


Рис. 10.2

ри станины помещается якорь 3, представляющий собой металлический цилиндр, набранный из штампованных, изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. В продольных пазах на поверхности якоря размещена обмотка, состоящая из соединенных между собой секций. Для сглаживания пульсаций ЭДС и тока обмотка якоря равномерно распределена по всей поверхности. Выводы секций присоединены к изолированным друг от друга и от корпуса машины медным пластинам коллектора 4, причем конец одной секции и начало следующей присоединяют к одной и той же пластине. Коллектор жестко укреплен на валу якоря; на этом же валу крепится и вентилятор. Вал якоря помещается в подшипники подшипниковых щитов 5, укрепляемых на боковых сторонах станины. Между якорем и полюсами имеется небольшой воздушный зазор, благодаря которому якорь может свободно вращаться. На цилиндрическую поверхность коллектора накладываются угольные щетки, вставленные в щеткодержатели 6.

Машины постоянного тока часто делают многополюсными (рис. 10.3), при этом количество изменений значений и знака ЭДС в каждой секции обмотки якоря за один оборот равно количеству полюсов. В таких машинах число пар щеток равно числу пар полюсов, а щетки одинаковой полярности соединяются вместе.

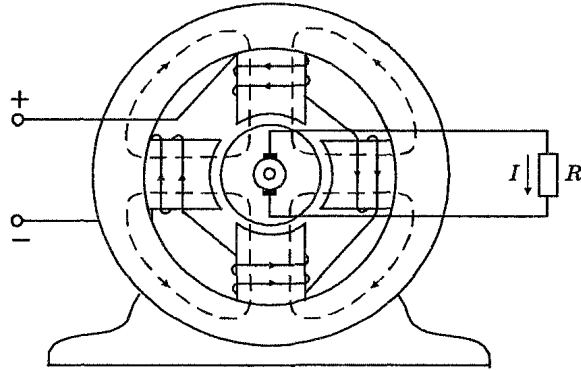


Рис. 10.3

Как и все электрические машины, машины постоянного тока обратимы. Машина работает в режиме генератора, если ее вращает тот или иной первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В этом случае в обмотке якоря индуцируется ЭДС, которая через коллектор и щетки подает ток в нагрузку. В самой машине взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Машина преобразует механическую энергию в электрическую. Если цепь якоря и цепь возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии, то в них возникают токи, взаимодействие которых создает вращающий момент. Под действием этого момента якорь начинает вращаться и машина работает в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую. Таким образом, одна и та же машина может быть использована и в качестве генератора, и в качестве двигателя.

4. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока

Выясним, как зависит ЭДС генератора постоянного тока от параметров машины, скорости вращения якоря и магнитного потока.

При равномерном перемещении проводника длиной l со скоростью v в магнитном поле с индукцией B (скорость перпендикулярна вектору индукции), в нем по закону электромагнитной индукции возникнет ЭДС e :

$$e = \left| -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv. \quad (10.1)$$

Рассмотрим движение проводника обмотки якоря в магнитном поле под полюсом. Чтобы определить среднее значение ЭДС в этом проводнике, введем понятие средней индукции.

Пусть Φ – магнитный поток, создаваемый главным полюсом, тогда при $2p$ полюсах общий магнитный поток равен $2p\Phi$. Допустим, что индукция равномерно распределена по всему воздушному зазору. Тогда ее среднее значение

$$B_{cp} = \frac{2p\Phi}{S} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}, \quad (10.2)$$

где S – площадь поверхности якоря, d – диаметр якоря, l – длина образующей цилиндра якоря. Предполагая, что вектор средней магнитной индукции везде направлен по радиусу якоря, т.е. перпендикулярно скорости, мы получим для средней ЭДС в одном проводнике обмотки якоря

$$e_{cp} = B_{cp} lv, \quad (10.3)$$

где v – линейная скорость вращения проводника обмотки якоря.

Учитывая, что скорость вращения проводника обмотки якоря $v = \omega \frac{d}{2} = 2\pi n \frac{d}{2} = \pi n d$ или в об/мин $v = \frac{\pi n d}{60}$ (ω и n — угловая скорость и частота вращения якоря, соответственно) и подставляя в (10.3) значение средней индукции (10.2), получим

$$e_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l \frac{\pi n d}{60} = \frac{2p}{60} n\Phi. \quad (10.4)$$

Обмотка якоря состоит из N активных проводников. Щетки делят эту обмотку на $2a$ параллельных ветвей. Таким образом, в пределах каждой параллельной ветви последовательно соединяются $N/2a$ активных проводников. Поскольку ЭДС генератора e равна ЭДС параллельной ветви, то для нее можно записать следующее выражение:

$$e = e_{cp} \frac{N}{2a}. \quad (10.5)$$

Подставляя в (10.5) выражение для средней ЭДС (10.4), получим

$$e = \frac{pN}{60a} n\Phi = cn\Phi, \quad (10.6)$$

где $c = pN/60a$ — постоянная, зависящая только от параметров машины.

Таким образом, мы видим, что ЭДС генератора постоянного тока пропорциональна значению магнитного потока машины Φ и скорости вращения якоря n . Следовательно, для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора можно изменять ЭДС, либо изменяя магнитный поток, либо скорость вращения якоря (либо и то и другое). Обычно якорь генератора приводят во вращение двигателем, работающим при определенной скорости вращения, а магнитный поток изменяют путем изменения тока в обмотке возбуждения.

Вычислим мощность генератора постоянного тока:

$$P = \frac{A}{t}, \quad (10.7)$$

причем работой A следует считать механическую работу, затрачиваемую на преодоление тормозного момента, развиваемого якорем. В формуле (10.7) мощность можно выразить через линейную скорость вращения якоря:

$$P = \frac{Fs}{t} = Fv, \quad (10.8)$$

где F — сила, действующая на якорь, а v — линейная скорость точки на поверхности якоря.

Как мы уже видели, линейная скорость проводника на поверхности якоря $v = \pi n d$, где n — частота вращения якоря, d — диаметр якоря. Подставляя выражение для скорости в (10.8) и переходя к оборотам в минуту, получим

$$P = F\pi d \frac{n}{60}. \quad (10.9)$$

На каждый проводник обмотки якоря с током I действует по закону Ампера сила $F_1 = IB_{cp}l$, а на N проводников обмотки с учетом формулы (10.2) будет действовать сила

$$F_{cp} = NIB_{cp}l = NI \frac{2p\Phi}{\pi dl} l = \frac{pN}{\pi da} \Phi I_a. \quad (10.10)$$

Подставляя соотношение (10.10) в (10.9) и учитывая формулу (10.6), получим:

$$P = F_{cp} \frac{\pi dn}{60} = \frac{pN}{60a} n\Phi I_a = eI_a. \quad (10.11)$$

Вращающий момент машины можно записать в виде

$$M = F_{cp} \frac{d}{2} = \frac{pN}{\pi da} \Phi I_a \frac{d}{2} = c\Phi I_a, \quad (10.12)$$

где $c = \frac{pN}{2\pi a}$ — постоянный коэффициент, учитывающий особенности конструкции машины.

10.4. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Возбуждением генератора называется создание главного магнитного потока, благодаря которому во вращающемся якоре создается ЭДС. Важнейшим отличительным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля. Практически во всех современных машинах главное магнитное поле возбуждается электромагнитным путем, для чего по обмотке возбуждения, размещенной на сердечниках полюсов машины, пропускается ток. Все рабочие характеристики машины постоянного тока при работе как в режиме генератора, так и в режиме двигателя зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, цепи эти могут быть независимы друг от друга. При любом способе включения мощность, потребляемая цепью возбуждения, невелика и составляет несколько процентов от номинальной мощности машины.

Генератор с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения OB такого генератора подключена к постороннему источнику тока через регулировочный реостат (рис. 10.4, а).

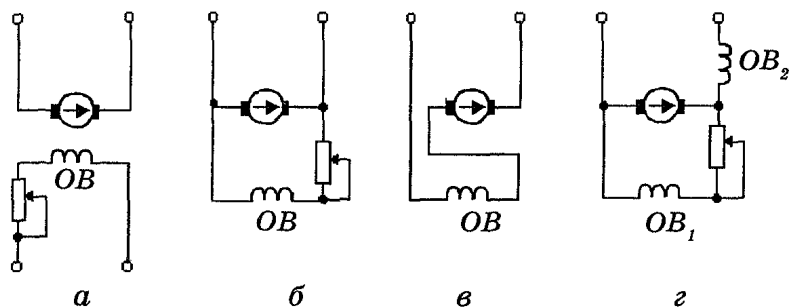


Рис. 10.4

При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах этого генератора несколько уменьшается из-за падения на-

пряжения на обмотке якоря и в результате действия реакции якоря, которая уменьшает магнитный поток машины. Для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора изменяют ток возбуждения с помощью регулировочного реостата. Внешняя характеристика этого генератора (зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки) показана на рис. 10.5 (кривая 1).

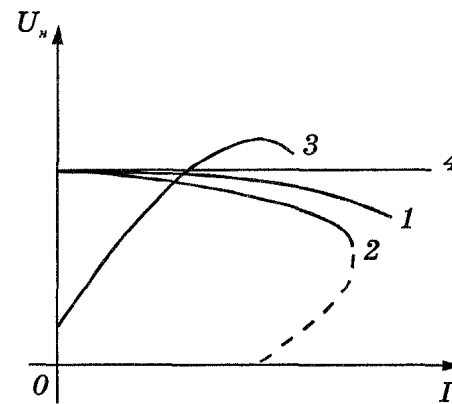


Рис. 10.5

Генератор с параллельным возбуждением. Это генератор с самовозбуждением: обмотку возбуждения OB такого генератора подключают через регулировочный реостат параллельно обмотке якоря (рис. 10.4, б). При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря. Это в свою очередь вызывает уменьшение тока возбуждения и ЭДС в якоре. Поэтому при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к такому сильному уменьшению тока возбуждения, что при коротком замыкании цепи нагрузки напряжение генератора падает до нуля. Поэтому короткое замыкание генератора с параллельным возбуждением опасно. Внешняя характеристика этого генератора показана на рис. 10.5 (кривая 2).

Генератор с последовательным возбуждением. Это также генератор с самовозбуждением, но его обмотка возбуждения OB включена последовательно с якорем (рис. 10.4, в) и по обеим обмоткам протекает одинаковый ток. При отсутствии нагрузки (внешняя цепь разомкнута) в якоре все же возбуждается небольшая ЭДС вследствие остаточной индукции стального сердечника статора. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала растет до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы машины, после чего оно начинает быстро уменьшаться из-за падения напряжения на сопротивлении якоря и вследствие размагничивающего действия реакции якоря (кривая 3 на рис. 10.5). Ввиду сильной зависимости напряжения на зажимах генератора от нагрузки генераторы с последовательным возбуждением применяются очень редко.

Генератор со смешанным возбуждением. Этот генератор также относится к генераторам с самовозбуждением, но имеет две обмотки возбуждения: OB_1 , которая включается параллельно якорю, и OB_2 , которая включается последовательно с якорем (рис. 10.4, г). Обмотки включают так, чтобы они создавали магнитные потоки одного направления, а число витков в обмотках выбирают таким, чтобы падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и ЭДС реакции якоря были бы скомпенсированы ЭДС от потока параллельной обмотки. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора со смешанным возбуждением остается практически постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах (кривая 4 на рис. 10.5).