

Основы устройства и работы машин переменного тока

Учебные вопросы

1. Назначение, устройство, принцип действия и основные характеристики асинхронных двигателей
2. Назначение, устройство, принцип действия и основные характеристики синхронных генераторов

1. Назначение, устройство, принцип действия и основные характеристики асинхронных двигателей

Асинхронная безколлекторная машина является самой распространенной электрической машиной, применяемой обычно в качестве двигателя. Асинхронным двигателем называется такой двигатель переменного тока, у которого магнитное поле, создаваемое трехфазным током в статорной обмотке, и ротор вращаются с разными скоростями. При этом скорость вращения ротора при постоянной частоте тока в сети изменяется в зависимости от нагрузки на валу. Наибольшее практическое применение в электросиловых приводах технологических машин нашел асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором, который по сравнению с двигателем постоянного тока проще по конструкции, имеет высокую надежность, меньшую массу и габариты.

Рассмотрим устройство и принцип действия трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Трехфазный двигатель имеет две основные части: неподвижную – **с т а т о р** и вращающуюся – **р о т о р** (рис. 1).

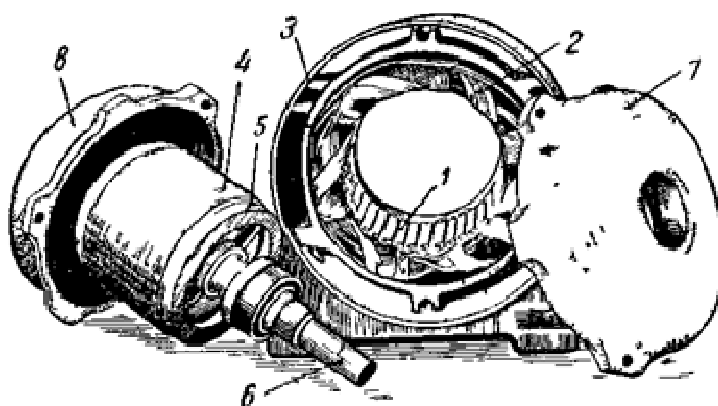


Рисунок 1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде:

1 – статор; 2 – трехфазная обмотка; 3 – корпус; 4 – ротор с короткозамкнутой обмоткой; 5 – кольца, замыкающие обмотку ротора; 6 – вал ротора; 7,8 – подшипниковые щиты.

Магнитопроводы статора 1 и ротора 4 собираются из отдельных штампованных пластин электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм, изолированных друг от друга слоем лака. Между статором и ротором имеется воздушный зазор (0,3-0,35 мм в двигателях малой мощности и 1-1,5 мм в двигателях большой мощности).

С внутренней стороны магнитопровода статора 1 сделаны пазы, куда укладываются фазные обмотки 2, питаемые трехфазным током. Каждая фазная обмотка содержит одну или несколько катушечных групп, соединенных последовательно и расположенных вдоль окружности статора на равном расстоянии друг от друга. Фазные обмотки соединяются между собой звездой или треугольником и включаются в питающую трехфазную сеть. Начала и концы трех фаз этой обмотки выводятся на общий щиток, укрепленный снаружи на корпусе двигателя (рис.2

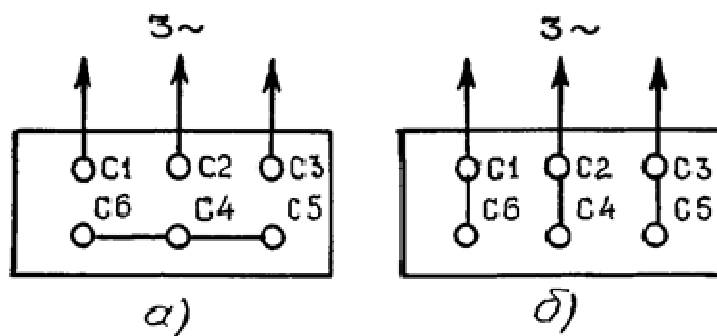


Рисунок.2. Щиток трехфазного асинхронного двигателя
а – соединение звездой; б – соединение треугольником

Собранный статор, являющийся магнитопроводом, укрепляется в корпусе двигателя 3 (рис.1).

Магнитопровод ротора 4 насажен на вал 6, закрепленный в подшипниках 7,8. В пазах ротора размещается обмотка ротора, замкнутая по краям кольцами 5 (см.рис.1). Обмотка короткозамкнутого ротора (рис.3) выполняется в виде цилиндрической клетки (напоминающей “беличье колесо”) из медных или алюминиевых стержней, которые без изоляции вставляются в пазы магнитопровода ротора 1. Торцевые концы стержней замыкаются коротко кольцами 2 из того же материала, что и стержни (рис. 3,а,б,в). Часто короткозамкнутая обмотка изготавливается путем заливки пазов ротора 1 расплавленным алюминием (рис.3,в).

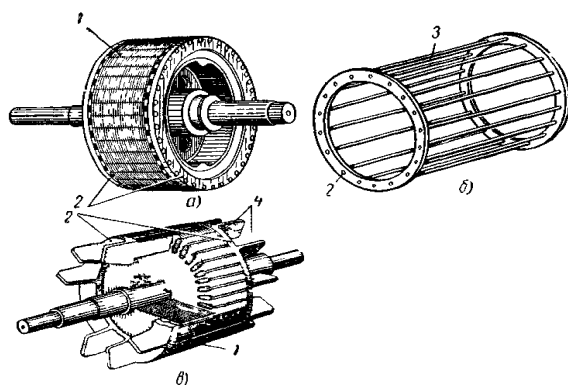


Рисунок 3.Короткозамкнутый ротор:

- а – ротор с короткозамкнутой обмоткой;
б – “беличье колесо”; в – короткозамкнутый ротор,залитый алюминием
1– магнитопровод ротора; 2 – замыкающие кольца;
3 – медные стержни; 4 – вентиляционные лопатки.

На рис 4 приведены условные обозначения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

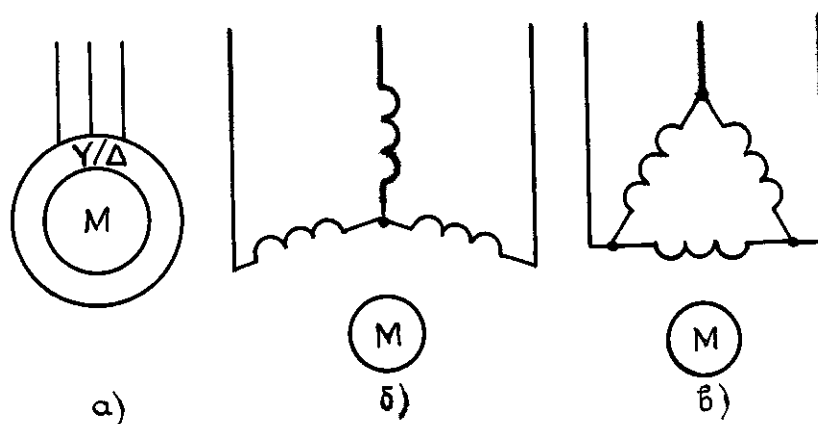


Рисунок 4. Условные обозначения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на схемах:
а – форма 1; б – соединение обмоток звездой;
в – соединение обмоток треугольником.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, созданного трехфазным током в обмотке статора, с токами, индуцируемыми этим полем в обмотке ротора.

Таким образом, при подключении обмотки статора к сети трехфазного тока внутри статора возникает магнитное поле, вращающееся со скоростью

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$

При промышленной частоте $f_1 = 50$ Гц частота вращения магнитного поля n_1 будет иметь вполне определенные синхронные значения, определяемые числом пар полюсов p (табл.1)

Таблица 1.

Число пар полюсов (p)	1	2	3	4	5
Частота вращения магнитного поля (n_1 , об/мин)	3000	1500	1000	750	600

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует ЭДС в замкнутой накоротко обмотке ротора. Под действием этой ЭДС в обмотке ротора будет протекать ток. Ток ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться в сторону вращения поля со скоростью (n_2), меньшей скорости вращения поля (n_1).

Если предположить, что ротор будет иметь такую же скорость вращения, как и магнитное поле статора, то токи в обмотке ротора исчезнут. Вследствие чего прекратится взаимодействие их с магнитным полем и ротор станет вращаться медленнее вращающегося поля статора. При этом обмотка ротора вновь начнет пересекаться с вращающимся полем и на ротор снова будет действовать вращающий момент.

Следовательно, ротор при своем вращении всегда должен отставать от скорости вращения магнитного поля статора, т.е. вращаться с меньшей скоростью, почему эти двигатели и получили название **асинхронных**.

Относительная скорость, равная разности частот вращения поля n_1 и ротора n_2 и выраженная в об/мин, называется **скоростью скольжения**.

Отношение скорости скольжения к частоте вращения магнитного поля статора называется **скольжением**:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

откуда
$$n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s).$$

Если скольжение выражается в процентах, то соответственно

$$s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100.$$

Скольжение S является важным параметром, определяющим режим работы асинхронной машины.

При номинальной работе скольжение асинхронного двигателя составляет примерно 1-6%.

Если, например, магнитное поле делает 3000, а ротор – 2880 об/мин, то скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04 = 4\%.$$

В момент пуска двигателя, когда скорость ротора $n_2 = 0$, скольжение

$$s = \frac{n_1}{n_1} = 1, \text{ или } 100\%.$$

Электрохимические свойства асинхронных двигателей определяются его механическими и рабочими характеристиками.

Механические характеристики асинхронного двигателя выражаются функциональными зависимостями $M = f(s)$ при $U_1 = const$, либо как $n_2 = f(M)$ при $U_1 = const$.

Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рис.5.

Максимум вращающего момента M_{\max} определяет перегрузочную способность асинхронного двигателя и разделяет график вращающего момента на устойчивую часть – от $s = 0$ до s_k и неустойчивую часть от s_k до $s = 1$, в

пределах которой вращающий момент уменьшается с ростом скольжения (см.рис. 5).

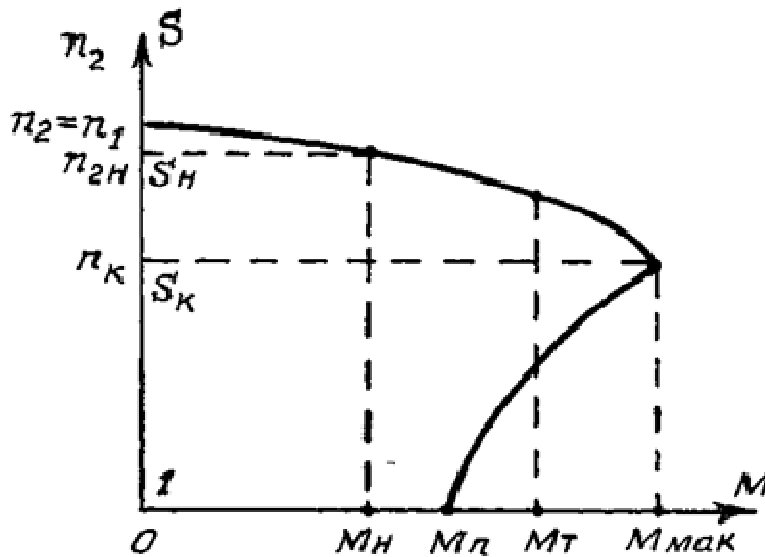


Рисунок 5. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

У работающего асинхронного двигателя динамическое равновесие моментов двигателя и тормозного момента на валу автоматически восстанавливается при увеличении нагрузки (скольжения), пока тормозной момент на валу M_T меньше максимального M_{\max} вращающего момента двигателя (устойчивая часть графика – от $s = 0$ до s_K). Но когда тормозной момент M_T достигнет значения максимального момента M_{\max} двигателя, тогда при дальнейшем увеличении нагрузки (от s_K до $s = 1$) возрастание скольжения будет лишь уменьшать вращающий момент. Таким образом, динамическое равновесие, нарушенное увеличением нагрузки, не восстанавливается и вследствие преобладания тормозного момента двигатель останавливается.

Как видно из рис.5 и выражения для скорости вращения ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s),$$

механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при постоянной частоте тока питающей сети является "жесткой",

так как при изменении нагрузки на валу в пределах устойчивого участка скольжение двигателя (s) изменяется незначительно.

Экспериментальная механическая характеристика $n_2 = f(M_2)$ строится по данным, полученным путем измерения частоты вращения асинхронного двигателя n при различных моментах нагрузки на его валу.

Механическая характеристика (рис.5) наглядно показывает свойства асинхронного двигателя как части электропривода.

Для более полного выявления свойств самого двигателя служат его рабочие характеристики (Рис.6).

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют зависимости скорости вращения n_2 (скольжения s), момента на валу M_2 , коэффициента полезного действия η и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от полезной мощности на валу (т.е. от нагрузки) при постоянном напряжении U_1 и постоянной частоте тока сети f_1 , т.е.

$$n_2, M_2, s, \eta, \cos \varphi = f(P_2).$$

Рабочие характеристики асинхронных двигателей могут быть получены расчетным или экспериментальным путем, при номинальном напряжении $U_{1н}$ и номинальной частоте тока сети $f_{1н}$. Рассмотрим причины и ожидаемые закономерности изменения указанных зависимостей.

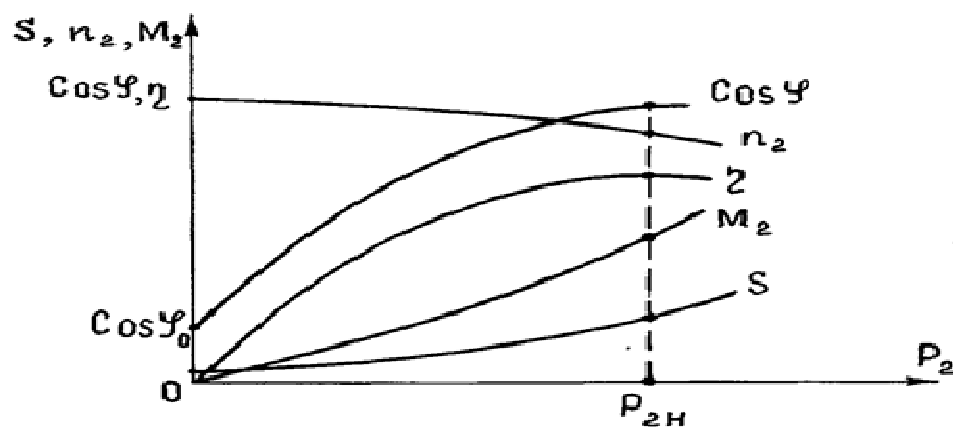


Рисунок 6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Скорость вращения ротора n_2 уменьшается незначительно при увеличении нагрузки на валу асинхронного двигателя, потому что скольжение при изменении нагрузки в пределах номинальной возрастает в небольших пределах 0,05...0,08, а скорость вращения однозначно связана со скольжением $n_2 = n_1(1 - s)$. Поэтому скоростную характеристику асинхронного двигателя $n_2 = f(P_2)$, как и двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, называют "жесткой" (см.рис. 6).

Полезный момент на валу двигателя M_2 связан с мощностью P_2 соотношением:

$$M_2 = P_2 / \omega_2,$$

где $\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ – угловая частота вращения ротора.

Так как n_2 изменяется незначительно, то зависимость $M_2 = f(P_2)$ близка к прямолинейной.

Зависимость коэффициента мощности двигателя $\cos\varphi$ от нагрузки P_2 обусловлена изменением относительного значения реактивной мощности к активной Q_1/P_1 , что видно из выражения для коэффициента мощности асинхронного двигателя:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1} = \frac{P_1}{\sqrt{3}\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{1 + (Q_1/P_1)^2}}.$$

При холостом ходе двигателя $\cos\varphi$ довольно низок и не превышает обычно 0,2...0,3. Это является большим недостатком таких двигателей и объясняется тем, что полезная мощность при отсутствии нагрузки на валу $P_2 = 0$, а активная мощность, потребляемая двигателем, много меньше мощности реактивной (отношение Q_1/P_1 велико).

С увеличением нагрузки $\cos \varphi$ быстро возрастает, так как реактивная мощность (намагничивающий ток) мало зависит от нагрузки (ее увеличение вызывает лишь возрастание потоков рассеяния, пропорциональных токам статора и ротора, а основной магнитный поток машины при возрастании нагрузки уменьшается незначительно).

Активная мощность P_1 возрастает пропорционально механической нагрузке на валу двигателя P_2 . Таким образом, с увеличением нагрузки двигателя относительное значение реактивной мощности убывает, а $\cos \varphi$ увеличивается (рис.6). Своего максимального значения $(0,75...0,85)\cos \varphi$ достигает при нагрузке, близкой к номинальной.

Неполная загруженность асинхронных двигателей является одной из главных причин низкого $\cos \varphi$, а следовательно, КПД электроустановок. Поэтому для повышения $\cos \varphi$ необходимо эксплуатировать асинхронные двигатели при номинальной нагрузке.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от полезной нагрузки на валу $\eta = f(P_2)$ имеет такой же вид, как и у других электрических машин и трансформаторов:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p},$$

где $\sum p = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}} + P_{\text{доб}}$ - суммарные мощности потерь, имеющие место в двигателе при преобразовании энергии;

$P_{\text{ст}}$ - мощность потерь в магнитопроводе статора;

$P_{\text{мех}}$ - мощность механических потерь;

$P_{\text{м1}}$ - мощность потерь в обмотке статора;

$P_{\text{м2}}$ - мощность потерь в обмотке ротора;

$P_{\text{доб}}$ - мощность добавочных потерь.

КПД достигает максимума, когда мощности постоянных потерь двигателя ($P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$), не зависящие от нагрузки, становятся равными мощности переменных потерь ($P_{\text{м1}} + P_{\text{м2}} + P_{\text{доб}}$), зависящими от нагрузки. КПД асинхронных двигателей малой мощности равен 0,6...0,75. С увеличением мощности он возрастает и достигает величин 0,85...0,9. Обычно КПД асинхронных двигателей достигает максимального значения при нагрузке, примерно равной 0,75...1,0 от номинальной.

2. Назначение, устройство, принцип действия и основные характеристики синхронных генераторов

Генератор называется синхронным потому, что частота индуцированной в его обмотке якоря ЭДС пропорциональна скорости вращения машины n , а именно:

$$f = \frac{p \cdot n}{60}, \quad (1)$$

где p - число пар полюсов машины.

Синхронные трехфазные генераторы являются основным источником электрической энергии переменного тока в современных системах электроснабжения. Они выполняются, как правило, по прямой схеме (нормального исполнения).

Трехфазный синхронный генератор нормального исполнения состоит из неподвижной части - статора, в пазах которого помещается рабочая трехфазная обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС, и вращающейся части - ротора, несущего на себе обмотку возбуждения и называемого ещё индуктором, создающим магнитный поток. К обмотке возбуждения генератора подводится постоянный ток через контактные кольца и наложенные на них щетки (рис.7).

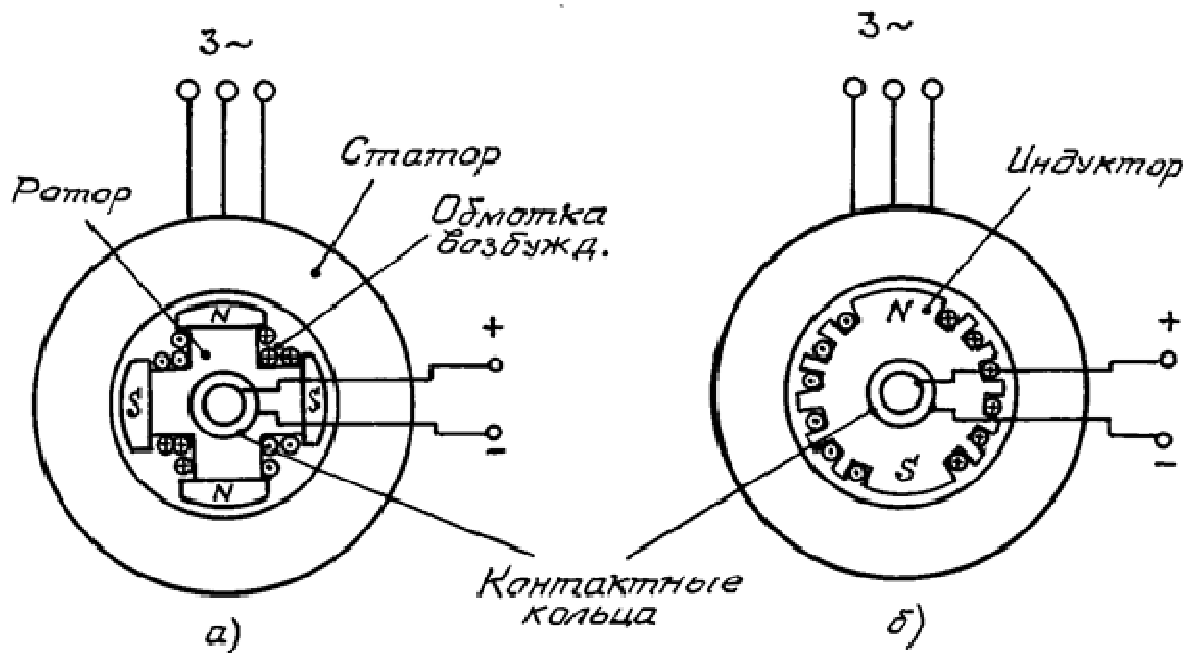


Рисунок.7. Схемы синхронного генератора с:
а) явнополюсным ротором; б) неявнополюсным ротором

По конструктивному исполнению индуктора (т.е. той части машины, которая создает магнитный поток), различают два типа синхронных генераторов:

а) явнополюсные, имеющие выступающие полюсные магнитопроводы с катушками возбуждения (рис.7, а);

б) неявнополюсные, или машины с равномерными воздушными зазорами, имеющие неявно выраженные полюса на роторе цилиндрической формы (рис.7, б).

При вращении ротора генератора с помощью первичного двигателя с постоянной скоростью n с такой же скоростью вращения и магнитный поток Φ , созданный постоянным током в обмотке возбуждения. Вращающееся поле на закону электромагнитной индукции наводит в каждом активном проводнике обмотки статора (якоре) переменную ЭДС, изменяющуюся с частотой, строго пропорциональной скорости вращения ротора n и числу пар полюсов p (рис.7.).

Синхронные генераторы в силовых установках переменного тока обычно приводятся во вращение паровыми или гидравлическими турбинами

и двигателями внутреннего сгорания (дизелями). Первые называются турбогенераторами и гидрогенераторами, а вторые дизель-генераторами.

Гидрогенераторы работают при сравнительно небольшой скорости вращения (75-250 об/мин.), и поэтому они выполняются явнополюсными с большим числом полюсов.

Турбогенераторы являются быстроходными машинами, поэтому из соображений прочности ротора и лучшего размещения и крепления обмотки возбуждения, в этом случае применяют неявнополюсный ротор.

Помимо вышеприведенной классификации синхронных генераторов их подразделяют ещё по способу возбуждения на:

- генераторы с электромагнитным возбуждением;
- генераторы, возбуждаемые постоянными магнитами.

Синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов находят широкое применение в специальных электромашинных преобразователях, преобразующих энергию постоянного тока в энергию переменного тока повышенной частоты (400, 500, 1000 Гц).

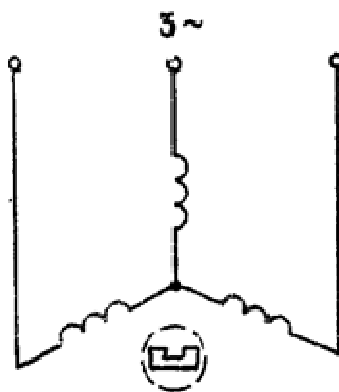


Рисунок 8. Электрическая схема синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов

Синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением делятся на:

- генераторы с независимым возбуждением;

- генераторы с самовозбуждением.

В первом случае питание обмотки возбуждения осуществляется:

- от автономной сети постоянного тока (рис.9, а);
- от специального генератора постоянного тока - возбудителя (рис.9, б).

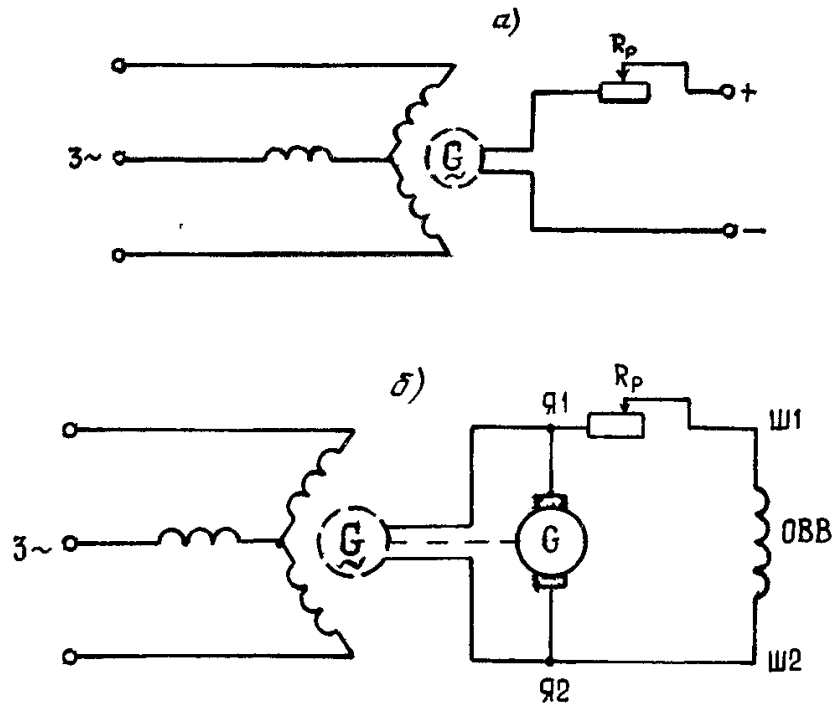


Рисунок 9 - Электрические схемы синхронного генератора:

- а) с возбуждением от постоянного источника;
- б) с возбуждением от возбудителя

По способу размещения возбудителя синхронные генераторы делятся на:

- синхронные генераторы с возбудителем на валу;
- синхронные генераторы с возбудителем на корпусе.

Самовозбуждение синхронных генераторов так же как и машин постоянного тока, основано на остаточном магнетизме полюсов индуктора. В этом случае обмотка возбуждения, расположенная на роторе, получает питание от обмотки якоря, расположенной на статоре, через выпрямитель $VD1...VD6$ (рис. 10).

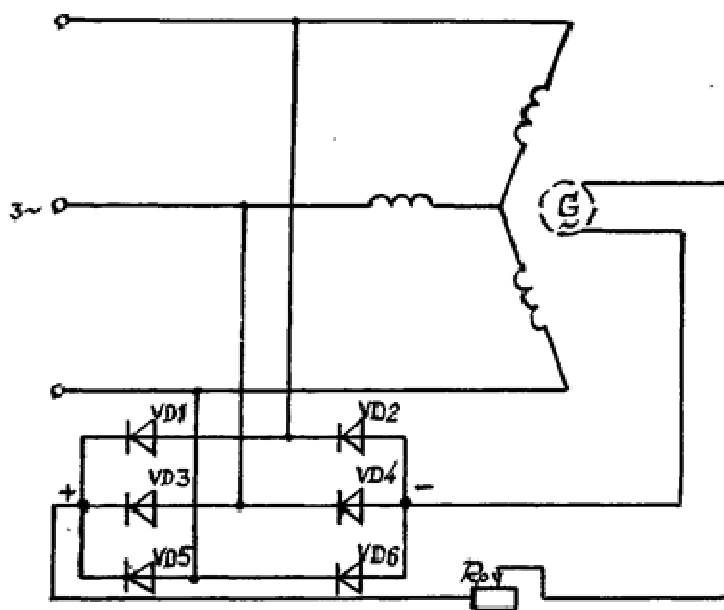


Рисунок 10 Электрическая схема синхронного генератора с самовозбуждением

Достоинствами синхронного генератора с самовозбуждением, применяемым в спецтехнике, являются их простота, отсутствие коллекторного узла машины постоянного тока и меньшая масса системы возбуждения по сравнению с системами, имеющими машинный возбудитель.

Основные свойства синхронного генератора определяются его характеристиками: внешними и регулировочными.

Внешние характеристики

Внешние характеристики представляют собой зависимость линейного напряжения U_L на зажимах генератора от тока нагрузки I генератора при неизменном значении скорости вращения, тока возбуждения генератора и заданном значении коэффициента мощности нагрузки, т.е.

$$U_L = f(I) \text{ при } n = \text{const}; I_B = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}.$$

Внешние характеристики позволяют судить о влиянии величины и характера нагрузки на напряжение синхронного генератора в условиях эксплу-

атации и определить процентное изменение напряжения $\Delta U \%$ при переходе генератора от нагрузки к холостому ходу.

Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки, на которую включен генератор (рис. 11).

Ход внешней характеристики можно объяснить с помощью уравнения фазного напряжения на зажимах генератора:

$$\underline{U}_\phi = \underline{E}_0 - \underline{I}r - j\underline{I}x_c, \quad (2)$$

где r - активное сопротивление фазы;

$x_c = x_\text{я} + x_s$ - полное или синхронное сопротивление неявнополюсного генератора;

$x_\text{я}$ - индуктивное сопротивление реакции якоря, обусловленное потоком якоря $\Phi_\text{я}$;

x_s - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки фазы, обусловленное потоком рассеяния Φ_s ;

E_0 - фазная ЭДС.

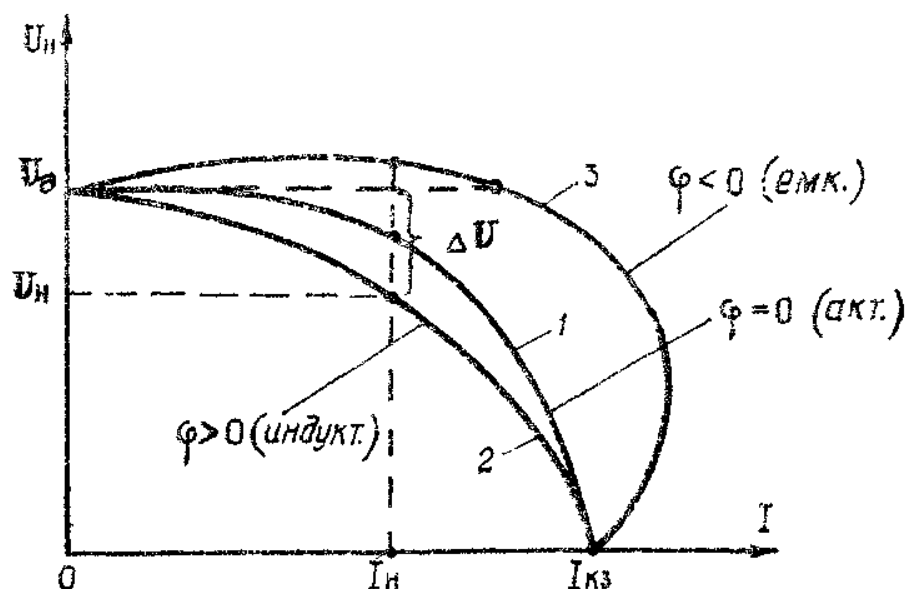


Рисунок 11. Внешние характеристики синхронного генератора

При работе на индуктивную нагрузку, вследствие продольно-размагничивающей реакции якоря (значительно уменьшающей основной поток Φ_0 и, следовательно, E_0) и падения напряжения на сопротивлениях обмотки r и x_s , внешняя характеристика имеет резко падающий характер (кривая 2, рис. 11).

Если нагрузка активная, то с ростом тока I напряжение на зажимах снижается менее интенсивно, чем при индуктивной нагрузке, (кривая 1, рис. 10), так как в этом случае в машине действует поперечная реакция якоря, не так сильно уменьшающая основной поток Φ_0 и ЭДС E_0 , как продольно-размагничивающая реакция якоря.

При работе с опережающим током (емкостная нагрузка) в машине имеет место продольно-подмагничивающая составляющая реакции якоря (усиливающая поток Φ_0 и, следовательно, увеличивающая ЭДС E_0), и поэтому напряжение на зажимах генератора с увеличением тока нагрузки I сначала даже несколько возрастает (кривая 3, рис. 11), а затем уменьшается за счет все более возрастающего падения напряжения на r и x_s .

При коротком замыкании ($U = 0$) все внешние характеристики пересекаются в одной точке $I_{к.з.}$

Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики выражают зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных напряжении на зажимах генератора, скорости вращения и коэффициенте мощности, т.е.

$$I_B = f(I) \text{ при } U = U_H = \text{const}; n = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}.$$

Примерный вид регулировочных характеристик синхронного генератора при различных по характеру нагрузках изображен на рис. 12

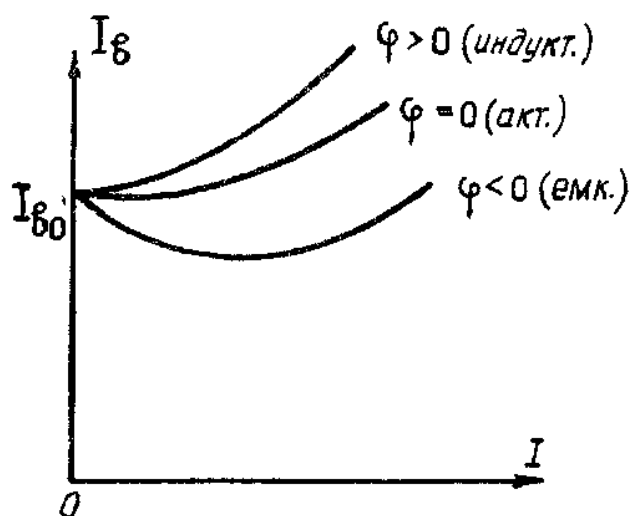


Рисунок 12. Регулировочные характеристики синхронного генератора

Они показывают как надо изменять ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении тока нагрузки и определенном коэффициенте мощности $\cos \varphi$ напряжение на зажимах оставалось постоянным, равным номинальному. Для этого в соответствии с внешними характеристиками при возрастании индуктивной и активной нагрузок ток возбуждения надо увеличивать, причем при индуктивной - более интенсивно, а при емкостной нагрузке, наоборот, сначала уменьшать, а потом увеличивать. По регулировочным характеристикам устанавливаются пределы регулирования тока возбуждения, необходимые для поддержания напряжения на зажимах генератора постоянным при изменении заданной нагрузки в рабочем диапазоне. Они имеют важное значение при выборе и расчете аппаратуры, применяемой для регулирования напряжения генератора в условиях его эксплуатации.