

# Синхронные машины

## Принцип действия, устройство и классификация синхронных машин

### Общие сведения о синхронных машинах

Прообразом современных СМ является генератор, созданный в 1878 году нашим соотечественником П.Н. Яблочковым для питания знаменитых «свечей Яблочкова».

П.Н. Яблочков - русский электротехник, военный инженер, изобретатель и предприниматель. Известен разработкой дуговой лампы (вошедшей в историю под названием «свеча Яблочкова»), создал один из первых телеграфных аппаратов и придумал прожектор с дуговой лампой, новую конструкцию электромагнита и занимался улучшением существующих аккумуляторов и динамо-машины. В 1876—1877 годах в Париже Яблочков создал первые в мире генератор и трансформатор переменного тока.

Синхронной машиной (СМ) называется такая электрическая машина переменного тока, скорость вращения ротора  $n$  которой во всех режимах работы находится в строго постоянном отношении к частоте сети  $f$  и определяется выражением

$$n = \frac{60 f}{p}$$

где  $p$  — число пар полюсов магнитной системы ротора.

Другими словами, скорости вращения ротора и магнитного поля, создаваемого обмоткой статора СМ, равны и в отличие от асинхронных машин, скорость вращения ротора  $n$  синхронных машин не зависит от нагрузки.

Синхронная машина, так же как машина постоянного тока и асинхронная, обратима, то есть может работать как генератором, так и двигателем.

Наибольшее распространение она получила в качестве трехфазного синхронного генератора (СГ) переменного тока.

Этот тип генераторов является основным источником электрической энергии промышленных и судовых электростанций переменного тока.

Чаще всего трехфазная обмотка размещается на неподвижном статоре, а обмотка возбуждения - на вращающемся роторе.

Синхронные машины малой мощности (2...5 кВт) иногда изготавливаются в обращенном исполнении с обмоткой возбуждения на статоре и трехфазной обмоткой на роторе. Основное исполнение предпочтительнее, так как мощность возбуждения, подводимая к обмотке возбуждения через скользящие контакты, составляет 0,3...2% преобразуемой мощности, тогда как в обращенном исполнении через эти контакты нужно снимать практически полную мощность машины. В синхронных микромашинах и машинах специального исполнения для возбуждения часто используются постоянные магниты.

Преимущественное применение синхронные машины имеют в качестве генераторов с турбо- или гидроприводом. В судовых электроэнергетических системах

в качестве основных и аварийных источников электроэнергии применяются дизель-генераторы.

В крупных промышленных установках (поршневые компрессоры, воздуходувки и др.) применяются синхронные двигатели. Их преимущество перед асинхронными двигателями заключается главным образом в том, что они не потребляют, а генерируют в сеть реактивную мощность, повышая, таким образом, общий коэффициент мощности системы.

Все синхронные машины, выпускаемые в нашей стране, рассчитаны на частоту  $f = 50$  Гц с учетом частоты вращения ротора  $n$  в зависимости от числа пар полюсов обмотки статора

$$p = \frac{60 f}{n}$$

Таким образом, значения  $p$  и  $n$  строго стандартизированы:

$p$ , 1 2 3 4 8 16 32 64

$n$ , об/мин 3000 1500 1000 750 375 187,5 93,7 46,9

Синхронные двигатели имеют следующие достоинства:

1. Возможность работы при  $\cos \varphi = 1$ ; это приводит к улучшению  $\cos \varphi$  сети, а также к сокращению размеров двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций.

2. Меньшую чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени, а не квадрату напряжения.

3. Строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатки синхронных двигателей:

1. Сложность конструкции.

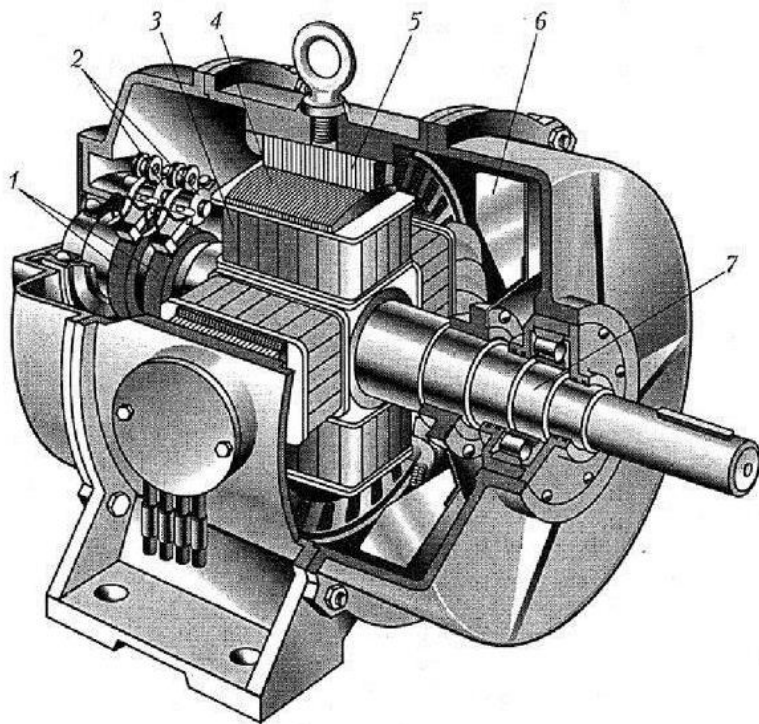
2. Сравнительная сложность пуска в ход.

3. Трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными, чем асинхронные двигатели, при ограниченных мощностях до 100кВт.

Однако при более высоких мощностях, когда особенно важно иметь высокий  $\cos \varphi$  и уменьшенные габаритные размеры машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

## **Устройство СМ**



Синхронный генератор:

- 1 – контактные кольца
- 2 – щетодержатели
- 3 – полюсная катушка
- 4 – полюсный наконечник
- 5 – сердечник статора
- 6 – вентилятор
- 7 – вал

Основные части синхронного генератора: неподвижная — статор, вращающаяся — ротор, представляющая собой электромагнит, и две основные обмотки.

Одна обмотка статора («обмотка возбуждения») запитывается от источника постоянного тока, функцию которого выполняет электронный регулятор напряжения. Регулятор используется в генераторах с самовозбуждением. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение осуществляется с использованием остаточного магнетизма магнитопровода СГ. При этом энергия переменного тока поступает от обмотки статора СГ. Комплекс из понижающего трансформатора и полупроводникового выпрямителя-преобразователя трансформирует ее в энергию постоянного тока.

Ток, протекающий в обмотке возбуждения статора, наводит ЭДС на обмотке возбуждения якоря генератора. Статор возбудителя, как конструкционный элемент может отсутствовать, и тогда его функции выполняют постоянные магниты.

Обмотка ротора, в которой индуцируется ЭДС, называется обмоткой возбуждения якоря, или якорем возбудителя.

Переменное напряжение, возникающее на обмотке якоря возбудителя, выпрямляется в блоке вращающихся диодов, которые так же называются словосочетанием «диодный мост», и превращает силовую обмотку ротора во вращающийся электромагнит, который наводит ЭДС в силовой обмотке статора СГ.

Силовые обмотки и обмотки возбуждения монтируются в пазы якоря и ротора.

Генераторы по типу выходного напряжения делятся на одно-, или трехфазные. Основное распространение в промышленности имеют трехфазные синхронные генераторы, а в быту — однофазные.

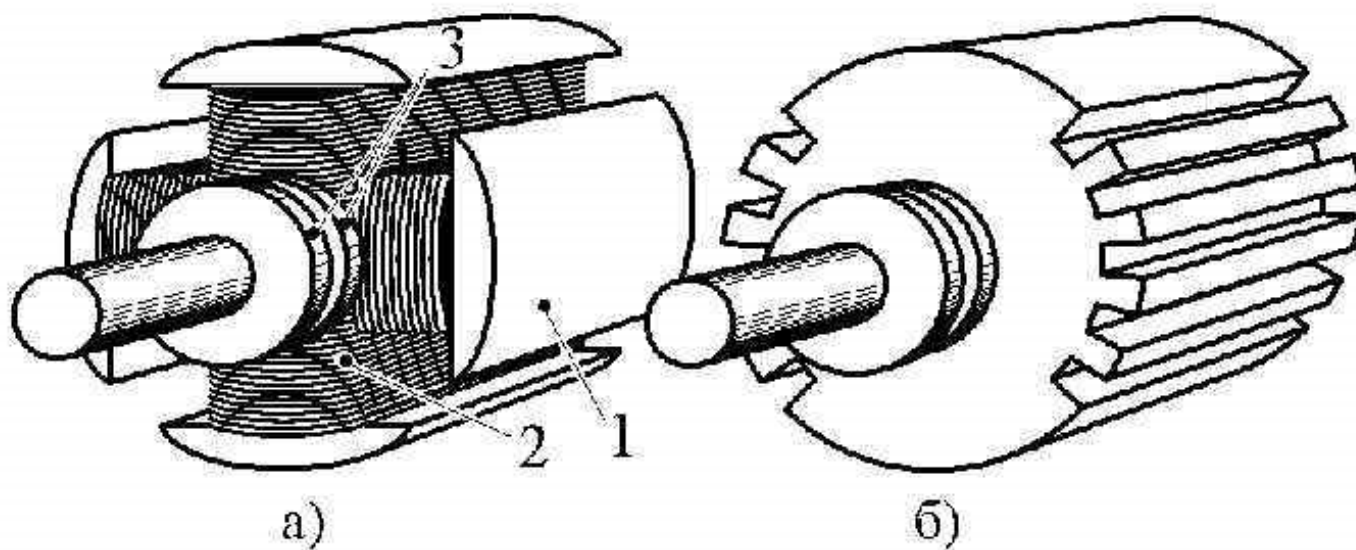
В конструкцию статора входит корпус, внутри которого расположен сердечник, или пакет, собираемый из листов электротехнической стали особой формы. На качество электрического тока влияют такие факторы как: цельность листов

в пакете (бывают цельными или составными), качество и материал обмотки. Для обмотки применяется медный эмаль-провод, а в дешевых устройствах возможна замена меди на алюминий.

Роторы изготавливаются явнополюсными или неявнополюсными.

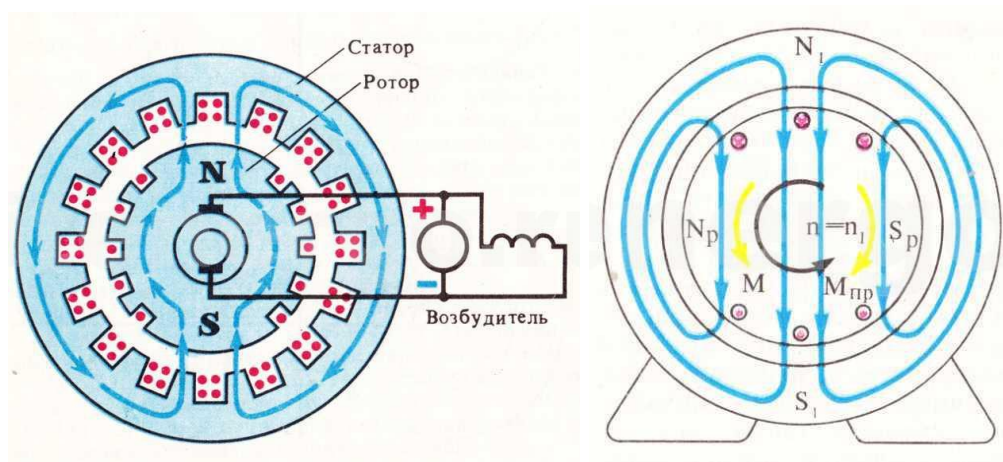
А) Явнополюсные роторы предназначены для синхронных генераторов, работающих с двигателями внутреннего сгорания с низкой частотой вращения — 1500 и 3000 об/мин.

Б) Неявнополюсные роторы востребованы в высокоскоростных (более 3000 об/мин) механизмах переменного электрического тока высокой мощности. Обычно их размещают на одном валу с паровыми турбинами. Такие СГ называют «турбогенераторы».



1 – полюсы ротора  
2 – обмотка возбуждения  
3 – контактные кольца

## Принцип действия синхронного генератора



Принцип действия машины в режиме синхронного генератора:

1. При пропускании через обмотку возбуждения постоянного тока образуется стабильное во времени магнитное поле с чередующейся полярностью.

2. При вращении магнитного поля относительно проводников обмотки якоря возбуждаются переменные ЭДС.
3. Переменные ЭДС суммируются, образуя ЭДС фаз. Трехфазная система образуется тремя одинаковыми обмотками, размещаемыми на якоре под электрическим углом друг к другу, равным  $120^\circ$ .

В случаях, если централизованное электроснабжение имеет недостаточную мощность или отсутствует, как, например, на удаленных стройплощадках, нефтегазодобывающих объектах, морских и воздушных судах, СГ в составе с двигателем внутреннего сгорания функционируют в автономном режиме.

При необходимости создания мощных источников питания СГ включают на параллельную работу. Такой способ включения позволяет более полно использовать мощность каждой машины и при необходимости выводить отдельные СГ в ремонт без прекращения эффективного электроснабжения потребителей.

Второй режим работы синхронной машины — выполнение функций электродвигателя. Обычно СГ востребован в качестве двигателя в высокомо мощных установках более 50 кВт. Для работы в режиме электродвигателя обмотку статора подключают к электросети, а обмотку ротора — к источнику постоянного тока. Вращающий момент возникает при взаимодействии вращающегося магнитного поля СГ с постоянным током обмотки возбуждения.

### **Классификация синхронных машин**

Синхронные машины классифицируются по следующим признакам:

- а) по назначению — синхронные генераторы, синхронные двигатели, синхронные компенсаторы;
- б) по числу фазных обмоток на статоре — однофазные, трехфазные, многофазные;
- в) по конструкции ротора — явнополюсные, неявнополюсные;
- г) по способу возбуждения — с независимым возбуждением, с самовозбуждением, с контактными кольцами и бесщеточные;
- д) по типу первичного двигателя — турбогенераторы, гидрогенераторы, дизель-генераторы;
- е) по номинальным данным — мощность, частота, скорость вращения, напряжение;
- ж) по способу охлаждения — с воздушным, с газовым (водород, гелий), с водяным, криогенные.

### **Реакция якоря синхронного генератора**

Основной магнитный поток машины - это поток возбуждения, создаваемый обмоткой ротора. При отсутствии нагрузки этот поток является единственным потоком машины.

При нагрузке синхронного генератора по обмотке статора (якоря) проходит ток  $I$ , который создает свой магнитный поток. Этот поток оказывает значительное влияние

на магнитное поле машины в целом, изменяя его по величине или искажая его распределение. Такое действие магнитного потока статора (якоря) на поток полюсов ротора называется реакцией якоря.

Реакция якоря синхронного генератора зависит от характера нагрузки, т. е. от сдвига фаз между индуцированной в статоре э.д.с. и его током.

Влияние реакции якоря на работу синхронного генератора зависит от величины нагрузочного тока  $I$ , протекающего по обмотке статора. С ростом индуктивной нагрузки усиливается размагничивающее действие реакции якоря, а с ростом емкостной нагрузки усиливается намагничивающее действие реакции якоря.

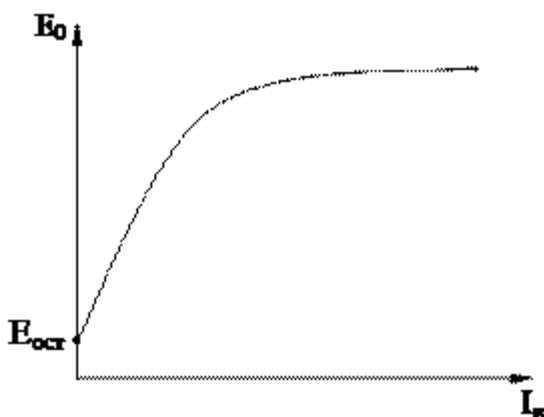
## Основные характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода – это зависимость напряжения на выходе генератора от тока возбуждения при токе нагрузки равном нулю.

$$E_o = f(I_o) \text{ при } n = \text{const}, I_a = 0$$

Описывается следующим уравнением:

$$E = 4.44 f \omega \Phi k_{c\delta}$$



Нелинейность характеристики холостого хода обусловлена нелинейностью кривой намагничивания.

Наличие остаточной ЭДС вызвано остаточным магнитным потоком в индукторе.

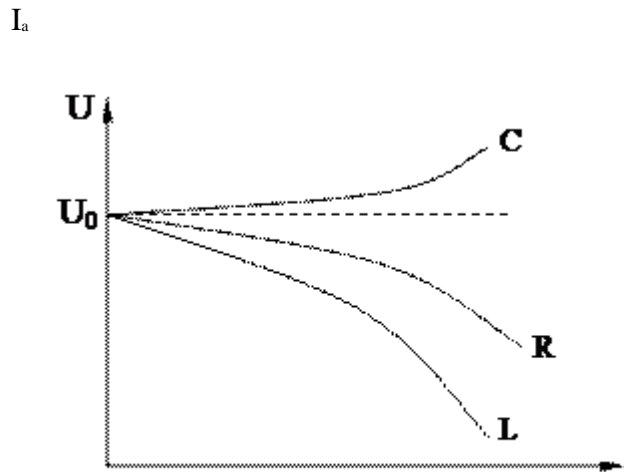
Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки при постоянном токе возбуждения.

$$U = f(I_a) \text{ при } n = \text{const}, I_b = \text{const}$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки якоря, то уравнение внешней характеристики примет вид:

$$U_1 = E_1 - j I_a x_c,$$

где  $x_c$  – полное синхронное сопротивление машины.



Таким образом, изменение напряжения обусловлено двумя причинами:

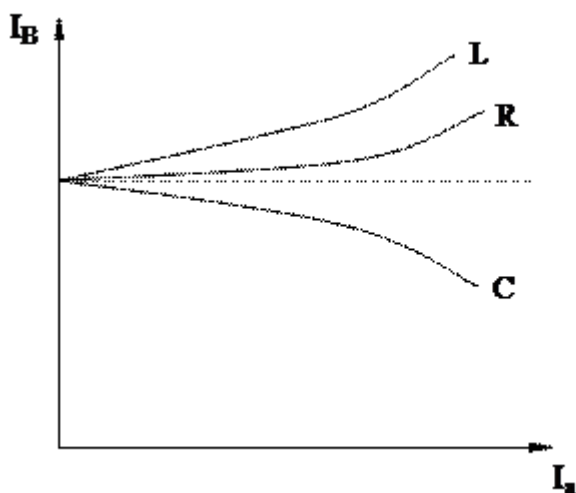
- 1) падение напряжения на внутреннем сопротивлении якоря
- 2) изменение ЭДС вследствие реакции якоря.

Следовательно, внешняя характеристика зависит от величины и характера нагрузки.

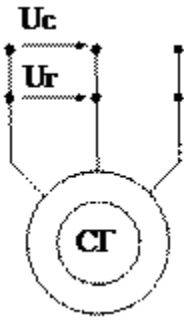
Регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении.

$$I_B = f(I_a) \text{ при } n = \text{const}, U = \text{const}$$

Показывает, каким образом необходимо изменять ток возбуждения, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось неизменным.



## Параллельная работа синхронного генератора с сетью

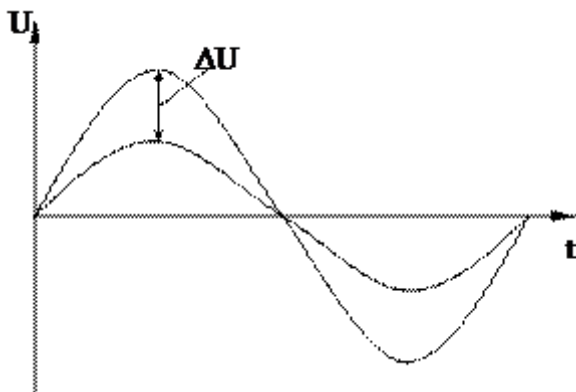


При работе синхронного генератора параллельно с сетью, энергия, вырабатываемая генератором, поступает в сеть. При включении генератора на параллельную работу с сетью необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент включения.

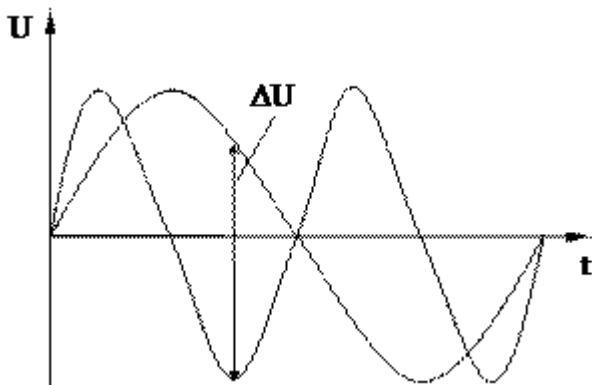
Для этого необходимо, чтобы мгновенные значения напряжения сети и напряжения генератора в момент включения были равны.

Для этого необходимо выполнить следующие условия:

- 1) действующие значения напряжения сети и генератора должны совпадать  $U_c = U_g$ .

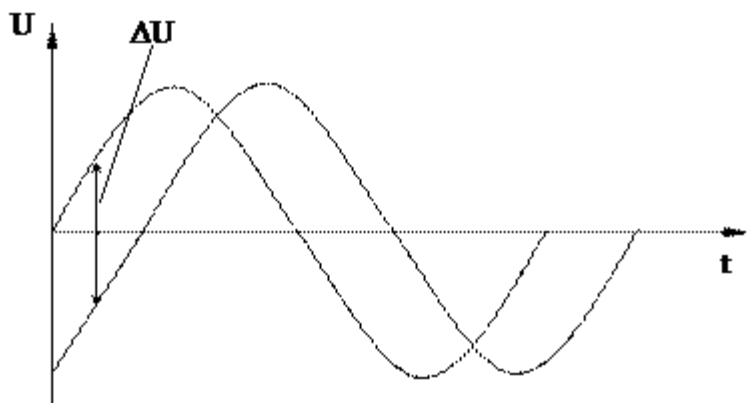


- 2) частота напряжения сети должна равняться частоте напряжения генератора  $f_c = f_T$



- 3) Начальные фазы напряжения сети и генератора должны быть одинаковы.





4) Порядок чередования фаз должен быть одинаковым.

### Устойчивость работы синхронной машины

Под статической устойчивостью синхронной машины, работающей параллельно с сетью, понимают ее способность сохранять синхронное вращение при изменении внешнего момента на валу.

Статическая устойчивость обеспечивается только при углах  $\theta < \pi/2$ .

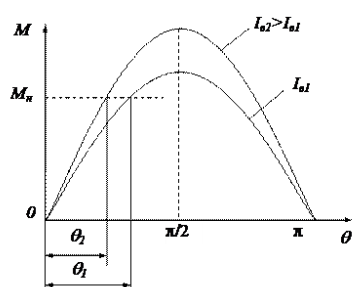
Возрастание угла  $\theta$  больше  $\pi/2$  может привести к выпадению из синхронизма, когда ротор начинает вращаться с частотой, отличающейся от частоты вращения магнитного поля статора.

Выпадение из синхронизма является аварийным режимом, так как сопровождается прохождением по обмотке якоря больших токов. Это объясняется тем, что ЭДС генератора и напряжение сети при указанном режиме могут складываться по контуру "генератор-сеть", а не вычитаться, как при нормальной работе.

Синхронные машины обычно работают с  $\theta=20-30^\circ$ , что соответствует двукратному или несколько большему запасу по моменту.

Устойчивость работы синхронной машины зависит от тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения увеличивается ЭДС  $E_o$ , а следовательно и максимальный момент, что увеличивает устойчивость машины.

Обычно синхронные машины работают с некоторым перевозбуждением. Это позволяет увеличить перегрузочную способность машины и генерировать реактивную мощность, т.е. компенсировать реактивную мощность других потребителей, уменьшая нагрузку на энергосистему.



## Пуск синхронного двигателя

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если его подключить к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока электромагнитный момент будет дважды изменять свое направление, т.е. средний момент за период равняется нулю. При этих условиях двигатель не сможет прийти во вращение, так как его ротор, обладающий определенной инерцией, не может быть в течение одного полупериода разогнан до синхронной частоты вращения.

Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной.

В настоящее время чаще всего применяют следующие способы пуска:

### 1. Асинхронный пуск.

При этом способе синхронный двигатель пускают как асинхронный, для чего его снабжают специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой, выполненной по типу "беличья клетка". Чтобы увеличить сопротивление стержней, клетку изготавливают из латуни. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, на обмотку возбуждения подается напряжение и постоянный ток, проходящий по ней, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм.

### 2. Пуск при помощи вспомогательного двигателя.

Ротор возбужденного двигателя приводится во вращение до синхронной скорости и с помощью синхронизирующего устройства подключается к сети. После этого вспомогательный двигатель отключают.

В качестве пускового двигателя обычно используют асинхронный двигатель с числом полюсов на два меньше, чем у синхронного.

Недостатком данного способа является невозможность пуска двигателя под нагрузкой, так как нерационально иметь пусковой двигатель большой мощности.

### 3. Частотный пуск.

При частотном пуске синхронного двигателя частота питающего напряжения плавно изменяется от нуля до номинальной. При этом ротор вращается синхронно с магнитным полем статора.

Недостатками частотного пуска являются высокая стоимость преобразователя частоты, а также необходимость реализации сложных законов регулирования исходного напряжения и частоты в процессе разгона двигателя. Частотный пуск синхронных двигателей применяется в приводах специальных установок.

## Способы возбуждения СМ

При рассмотрении принципа действия синхронного генератора было установлено, что на роторе синхронного генератора расположен источник МДС (индуктор), создающий в генераторе магнитное поле. С помощью приводного двигателя (ПД) ротор генератора приводится во вращение с синхронной частотой  $n_1$ . При этом

магнитное поле ротора также вращается и, сцепляясь с обмоткой статора, наводит в ней ЭДС.

Синхронные двигатели конструктивно почти не отличаются от синхронных генераторов. Они также состоят из статора с обмоткой и ротора. Поэтому независимо от режима работы любая синхронная машина нуждается в процессе возбуждения - наведения в ней магнитного поля.

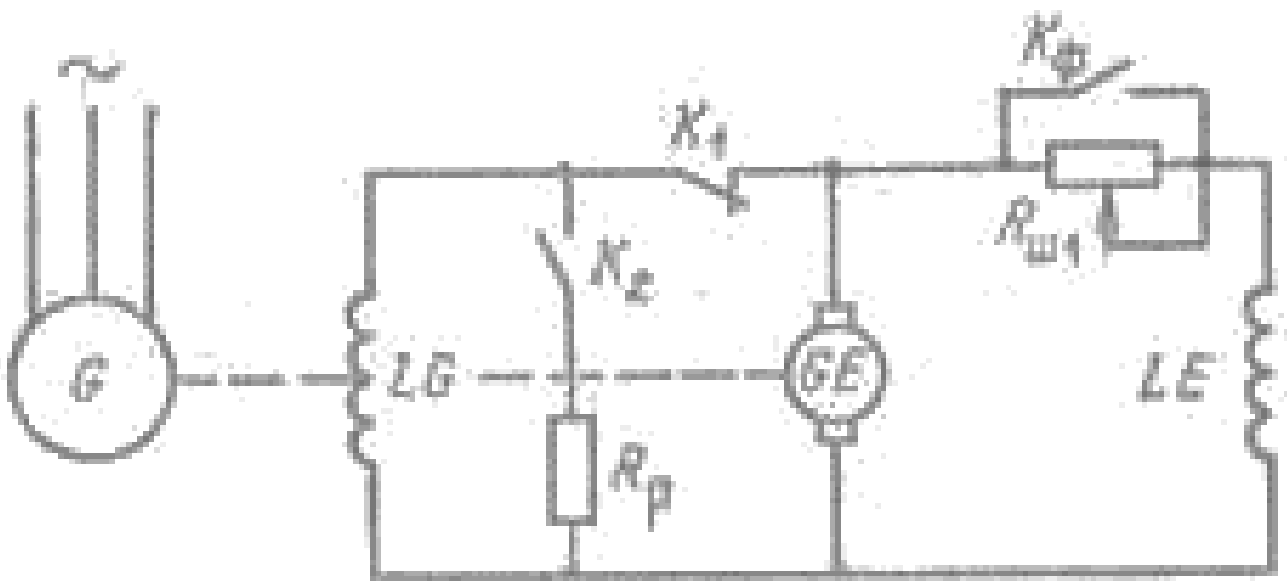
Системы возбуждения делятся на два типа – прямые и косвенные.

В прямых системах возбуждения якорь возбудителя соединен с валом синхронной машины. Прямые системы более надежны, так как при аварийных ситуациях в энергосистеме ротор возбудителя продолжает вращаться вместе с ротором синхронной машины и обмотка возбуждения сразу не обесточивается.

В косвенных системах возбуждения возбудитель приводится во вращение двигателем, который питается от шин собственных нужд электростанции или вспомогательного генератора. Вспомогательный генератор может быть соединен с валом синхронной машины или работать автономно.

### Электромашинная система возбуждения с возбудителем постоянного тока

В этой системе в качестве источника используется специальный генератор постоянного тока (ГПТ), называемый возбудителем.



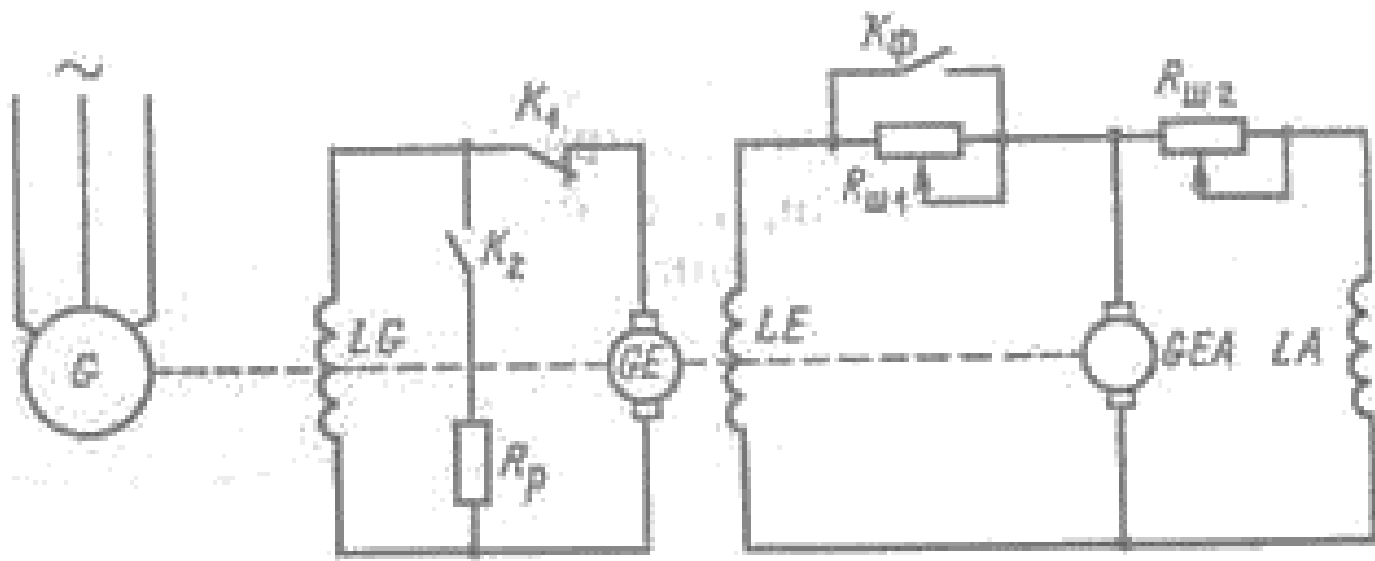
### Электромашинная система возбуждения с подвозбудителем

Мощность возбудителя обычно равна 0,3—3 % мощности синхронного генератора. Он приводится во вращение от вала синхронного генератора.

Ток возбуждения крупной синхронной машины  $I_B$  относительно велик и составляет несколько сотен и даже тысяч ампер. Поэтому его регулируют с помощью реостатов, установленных в цепи возбуждения возбудителя.

Возбуждение возбудителя осуществляется по схеме *самовозбуждения* или *независимого возбуждения* от специального генератора постоянного тока, называемого *подвозбудителем*.

Подвозбудитель работает с самовозбуждением, и сопротивление резистора  $R_{ш2}$  в процессе работы генератора не изменяется.

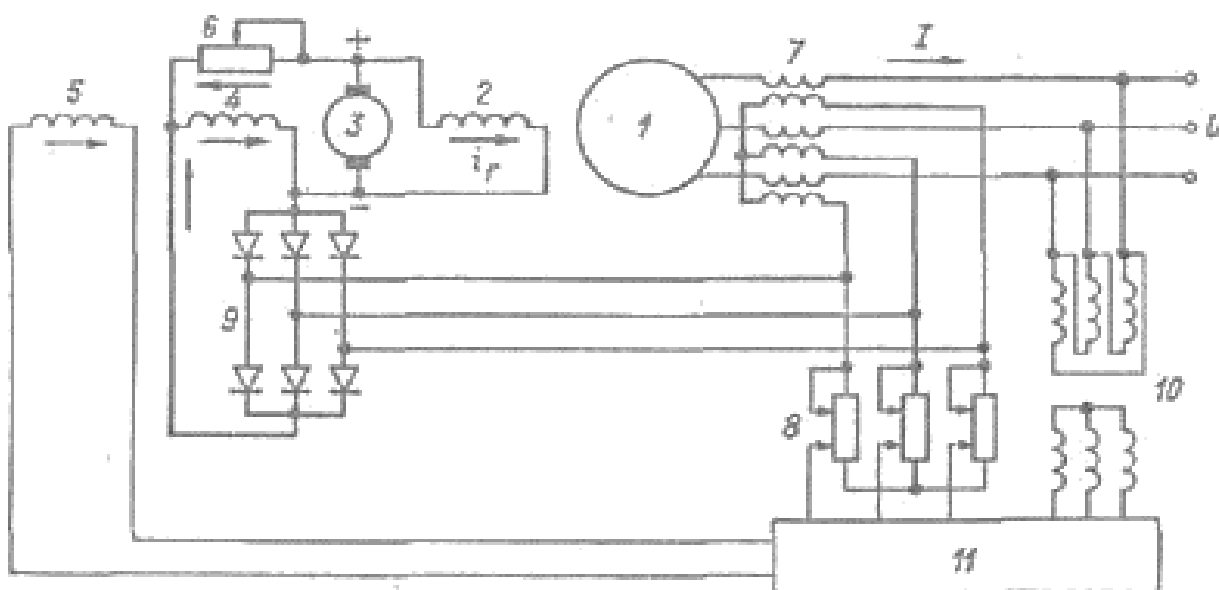


### Компаундированная система возбуждения с возбудителем постоянного тока

В современных системах возбуждения широко применяется принцип компаундирования, т. е. автоматическое изменение намагничивающей силы возбуждения при изменении тока нагрузки синхронного генератора.

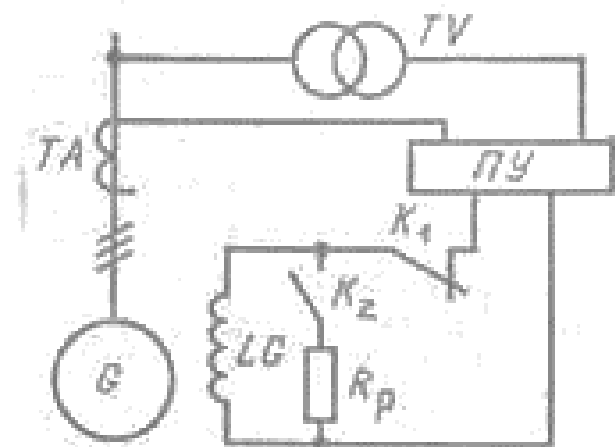
Так как в обмотке якоря синхронной машины протекает переменный ток, а в обмотке возбуждения — постоянный ток, то в схемах компаундирования синхронных машин применяются полупроводниковые выпрямители.

Компаундирующее действие схемы зависит только от значения тока нагрузки и не зависит от его фазы. Поэтому при индуктивной нагрузке это действие слабее, чем при активной нагрузке. Такое компаундирование называется токовым, и при этом постоянство напряжения  $U$  в пределах диапазона нормальных нагрузок удается сохранять с точностью до  $\pm (5—10)\%$ . Такая точность для современных установок недостаточна, и поэтому в схемах применяется дополнительный корректор или автоматический регулятор напряжения.



**Вентильные системы возбуждения** могут быть построены на большие мощности и являются более надежными, чем электромашинные.

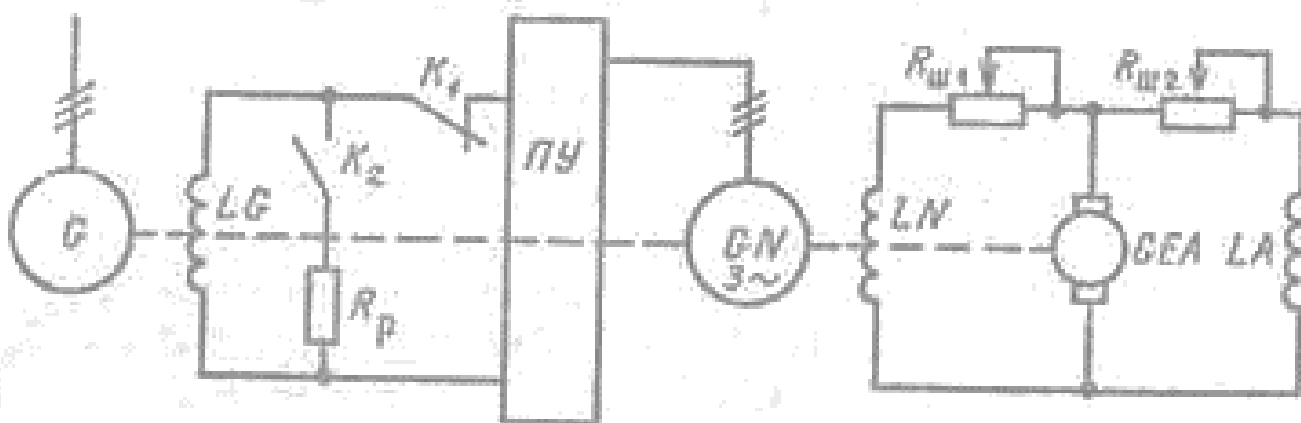
Различают три разновидности вентильных систем возбуждения: с **самовозбуждением**, независимую и бесщеточную.



В системе с самовозбуждением энергия для возбуждения синхронной машины отбирается от обмотки якоря основного генератора, а затем преобразуется статическим преобразователем ПУ (*тиристорный преобразователь*) в энергию постоянного тока, которая поступает в обмотку возбуждения.

Начальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного намагничивания его полюсов.

В **независимой системе** вентильного возбуждения энергия для возбуждения получается от специального возбудителя GN, выполненного в виде трехфазного синхронного генератора. Ротор его расположен на валу главного генератора. Переменное напряжение возбудителя выпрямляется и подается в обмотку возбуждения.



Разновидностью независимой системы вентильного возбуждения является бесщеточная система возбуждения. В этом случае на валу основной синхронной машины размещается якорь возбудителя переменного тока с трехфазной обмоткой.

Переменное напряжение этой обмотки через выпрямительный мост, закрепленный на валу машины, преобразуется в постоянное и непосредственно (без колец) подается на обмотку возбуждения основного генератора. Обмотка возбуждения

возбудителя располагается на статоре и получает питание от подвозбудителя или регулятора напряжения.

### **Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов**

Особенностью этих машин является то, что для создания магнитного поля возбуждения у них используются постоянные магниты. Постоянные магниты чаще всего размещаются на роторе, благодаря чему машина становится бесконтактной.

Синхронные машины с постоянными магнитами широко используются в качестве генераторов небольшой мощности и микродвигателей.

Преимуществами машин с постоянными магнитами являются простота конструкции, отсутствие скользящего контакта, высокий КПД и меньший нагрев из-за отсутствия потерь в обмотке: возбуждения и скользящем контакте. Большим достоинством этих машин является также отсутствие источника постоянного тока для их возбуждения.

К недостаткам таких машин следует отнести сложность регулирования магнитного потока, высокую стоимость, малую предельную мощность (из-за невысокой механической прочности ротора из постоянных магнитов), а также повышенную массу машин средней мощности.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами выпускаются на мощности, не превышающие нескольких десятков киловатт.

Широкое распространение получили синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском. Роторы таких двигателей сочетают в себе элементы синхронного двигателя — постоянные магниты и асинхронного двигателя — беличью клетку, необходимую для пуска.

### **Потери**

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии.

Все виды потерь в синхронной машине разделяются на основные и добавочные.

Основные потери в синхронной машине слагаются из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, магнитных потерь и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора (Вт):

$$P_{\sigma 1} = I_1^2 r_1$$

где  $r_1$  — активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной рабочей температуре, Ом.

### **Потери на возбуждение (Вт)**

а) при возбуждении от отдельного возбудительного устройства

$$P_{\sigma} = I_{\sigma}^2 r_{\sigma} + \Delta U_{\text{щ}} I_{\sigma}$$

где  $r_{\sigma}$  — активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре, Ом;  $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$  — падение напряжения в щеточном контакте щеток;

б) при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины,

$$P_{\sigma} = (I_{\sigma}^2 r_{\sigma} + \Delta U_{\text{щ}} I_{\sigma}) / \eta_{\sigma}$$

где  $\eta_{в.} = 0,80 \div 0,85$  — КПД возбудителя.

**Магнитные потери** синхронной машины происходят в сердечнике статора, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем.

Эти потери состоят из потерь от гистерезиса  $P_{г}$  и потерь от вихревых токов  $P_{в.т.}$ :

$$P_{м} = P_{г} + P_{в.т.}$$

**Добавочные потери в синхронных машинах** разделяются на два вида: пульсационные потери в полюсных наконечниках ротора и потери при нагрузке.

Добавочные пульсационные потери  $P_{п}$  в полюсных наконечниках ротора обусловлены пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости внутренней поверхности статора.

Значение этих потерь (Вт):

$$P_{п} = k_{п} p b_{п} l_{1} (10^{-4} Z_{1} n_{1})^{1,5} * [B_{\delta} (k_{\delta 1} - 1) t_{1}]^2 * 10^{-6}$$

где  $k_{п}$  - коэффициент, учитывающий толщину листов полюсов ротора;

$b_{п}$  — ширина полюсного наконечника, мм;

$Z_{1}$  — число пазов на статоре;

$B_{\delta}$  - магнитная индукция в зазоре, Тл;

$k_{\delta 1}$  - коэффициент воздушного зазора статора;

$t_{1}$  - зубцовое деление статора, мм.

Добавочные потери при нагрузке  $P_{доб}$  в синхронных машинах определяют в процентах от подводимой мощности двигателей или от полезной мощности генераторов.

Для синхронных машин мощностью до 1000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5%,

Для машин мощностью более 1000 кВт — 0,25—0,4%.

**Суммарные потери в синхронной машине (кВт):**

**Коэффициент полезного действия:**

для синхронного генератора

$$\eta_{г} = 1 - \sum P / (P_{ном} + \sum P)$$

где  $P_{ном} = m_{1} U_{1ном} I_{1ном} \cos \varphi_{1} * 10^{-3}$  - активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке, кВт; где  $U_{1ном}$  и  $I_{1ном}$  — фазные значения напряжения и тока статора.

для синхронного двигателя

$$\eta_{д} = 1 - \sum P / P_{1ном}$$

КПД синхронных машин мощностью до 100 кВт составляет 80—90%, у более мощных машин КПД достигает 92—99%. Более высокие значения КПД относятся к турбо- и гидрогенераторам мощностью в десятки и даже сотни тысяч киловатт.