

61. Устройство и принцип действия синхронных машин

Синхронные машины — это бесколлекторные машины переменного тока.

По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора.

Что же касается свойств, то синхронные машины отличаются синхронной частотой вращения ротора ($n_2 = n_1 = \text{const}$) при любой нагрузке.

Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т. е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами.

Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более.

Синхронные двигатели применяются главным образом для привода устройств большой мощности.

Такие двигатели по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов.

В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве **компенсаторов** — генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки.

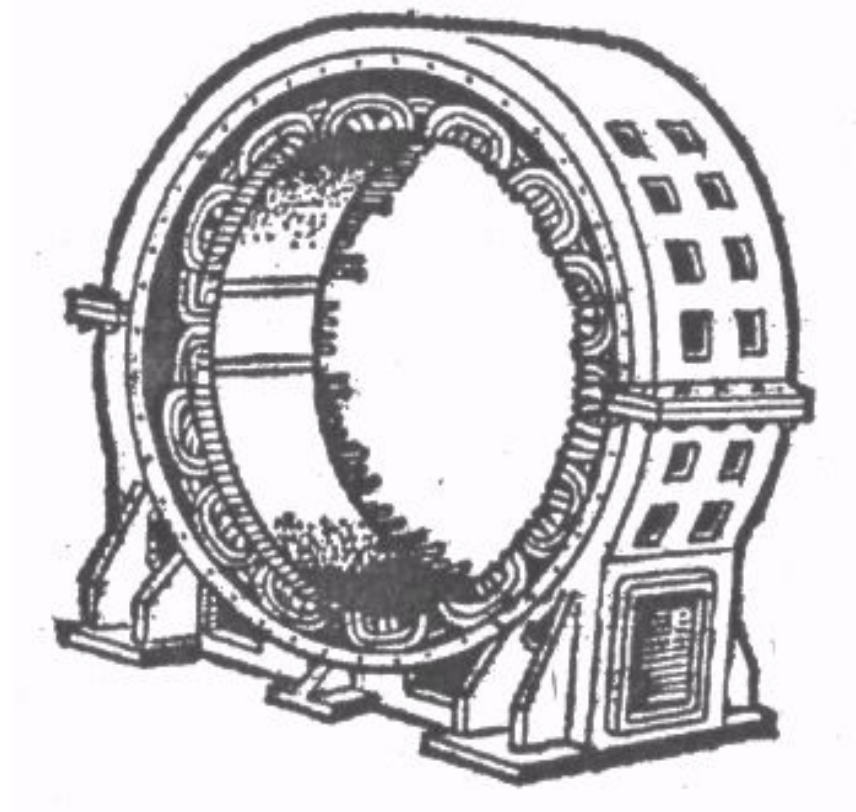
Устройство синхронной машины

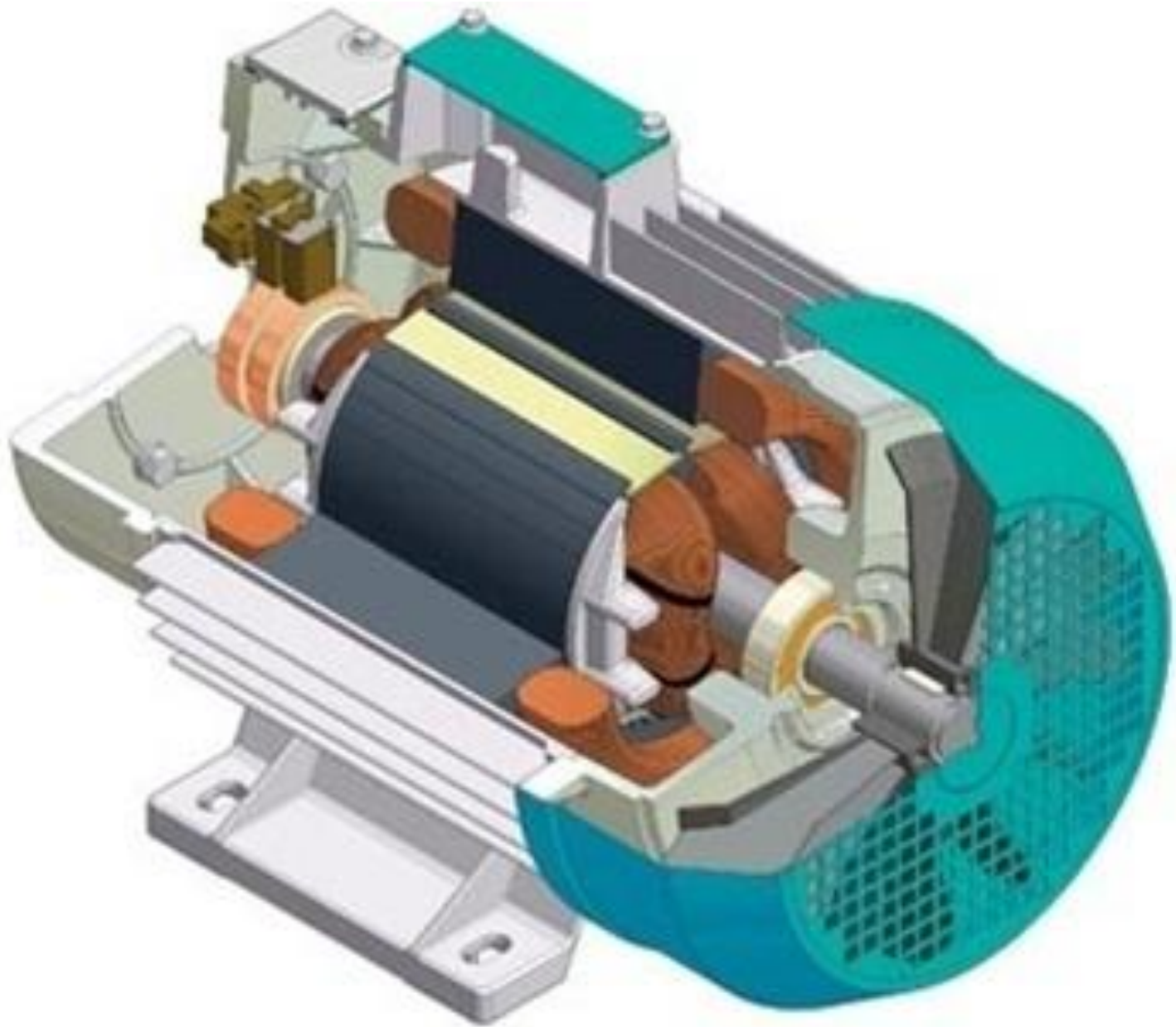
- Синхронные машины независимо от назначения и их использования состоят из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося внутри него ротора.
- Ротор и статор разделены воздушным зазором.

Статор синхронной машины

- Статор трехфазной синхронной машины аналогичен статору трехфазного асинхронного двигателя и содержит шихтованный цилиндрический сердечник с пазами на внутренней поверхности, в которых располагаются фазы трехфазной обмотки статора.
- Концы обмотки статора выведены на клеммную панель.

Общий вид статора синхронной машины





Типы роторов синхронной машины

Роторы синхронной машины бывают двух типов:

- с явно выраженными полюсами;
- с неявно выраженными полюсами.

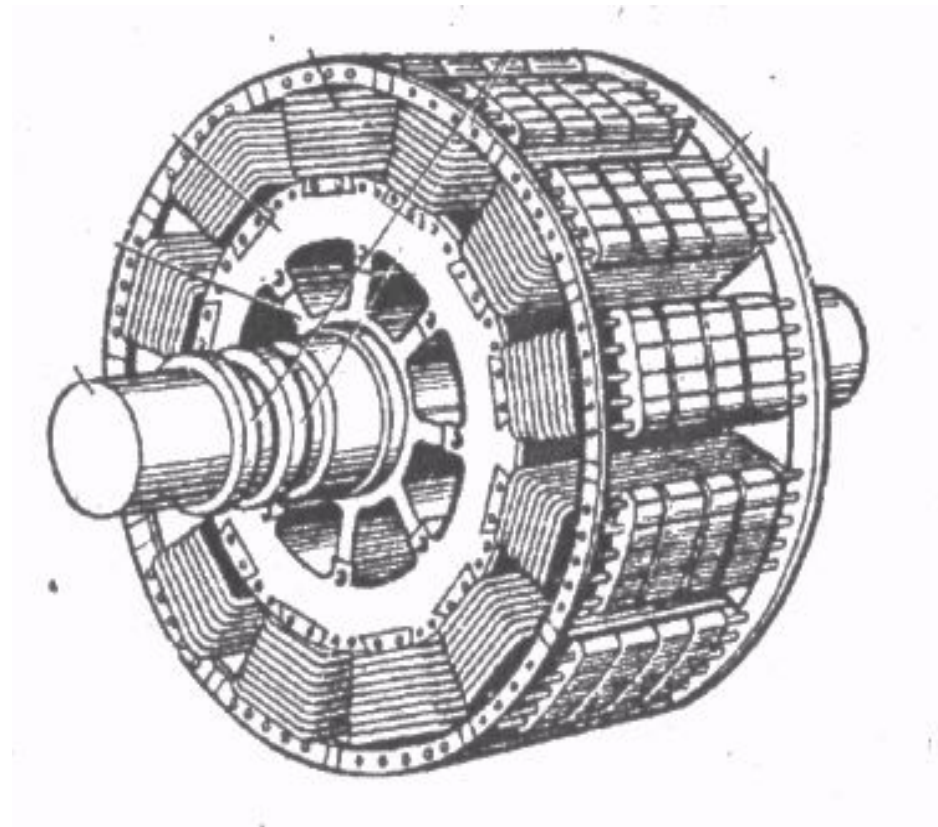
Ротор синхронной машины

- Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока, который образует магнитное поле, вращающееся вместе с ротором.
- На роторе располагается обмотка возбуждения, концы которой через специальные кольца на роторе и неподвижные графитовые щетки подсоединены к источнику постоянного тока, называемому возбудителем.

Роторы с явно выраженными полюсами

- Роторы с явно выраженными полюсами применяются в сравнительно тихоходных машинах, число оборотов которых не превышает 1000 об/мин.
- Такие роторы, например, приводятся в действие тихоходными водяными турбинами ГЭС.
- На полюсах такого ротора размещаются катушки обмотки возбуждения.
- У синхронных двигателей с таким ротором витки пусковой короткозамкнутой обмотки типа «беличья клетка» закладываются в тело полюсов и по торцам замыкаются кольцами.

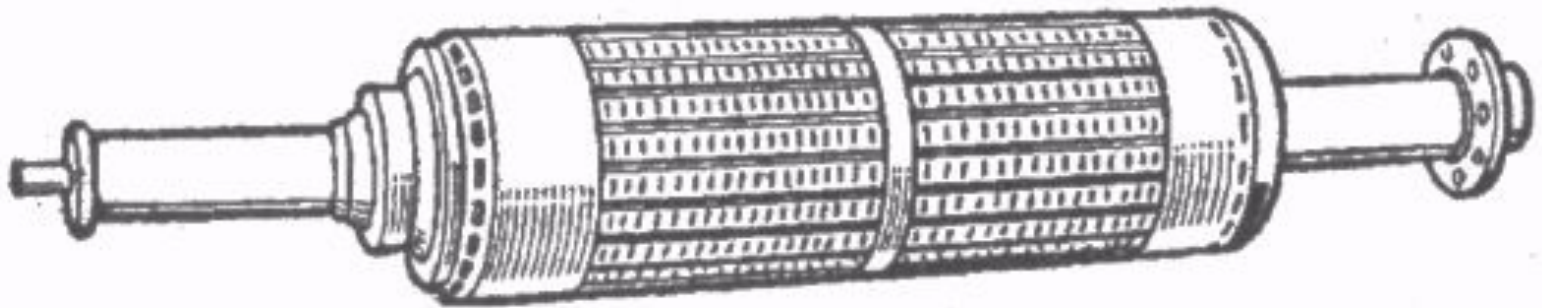
Устройство явнополюсного ротора



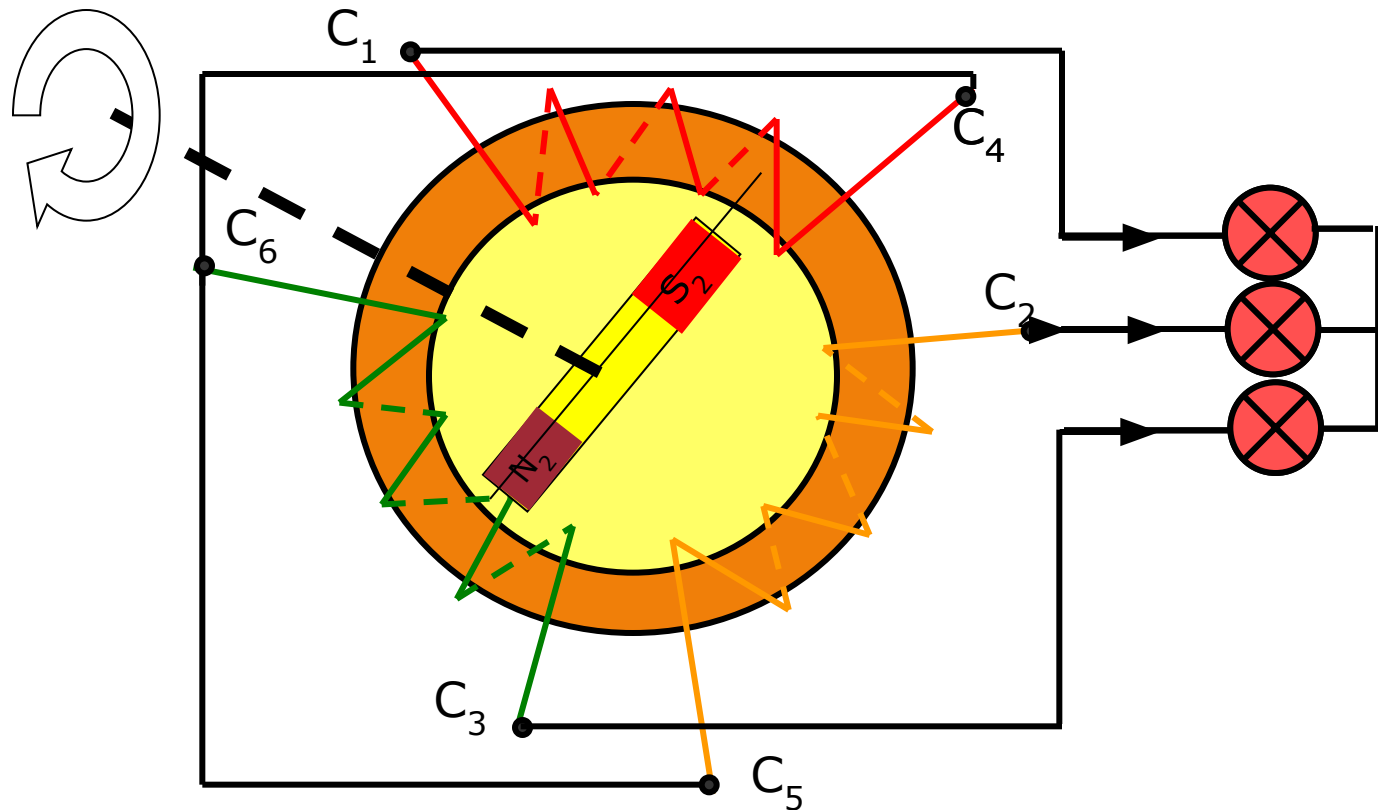
Ротор с неявно выраженными полюсами

- Ротор с неявно выраженными полюсами обладает повышенной динамической прочностью, так как выполняется из цельной стальной поковки цилиндрической формы.
- На внешней поверхности поковки фрезеруются пазы, в которые закладывается обмотка возбуждения.
- Частота вращения, как правило, 3000 об/мин, приводятся в движение паровыми турбинами

Общий вид неявнополюсного ротора



Принцип действия синхронного генератора



При вращении ротора в статоре возникает ЭДС: $E_1 = C_E \Phi f_1 W_1$

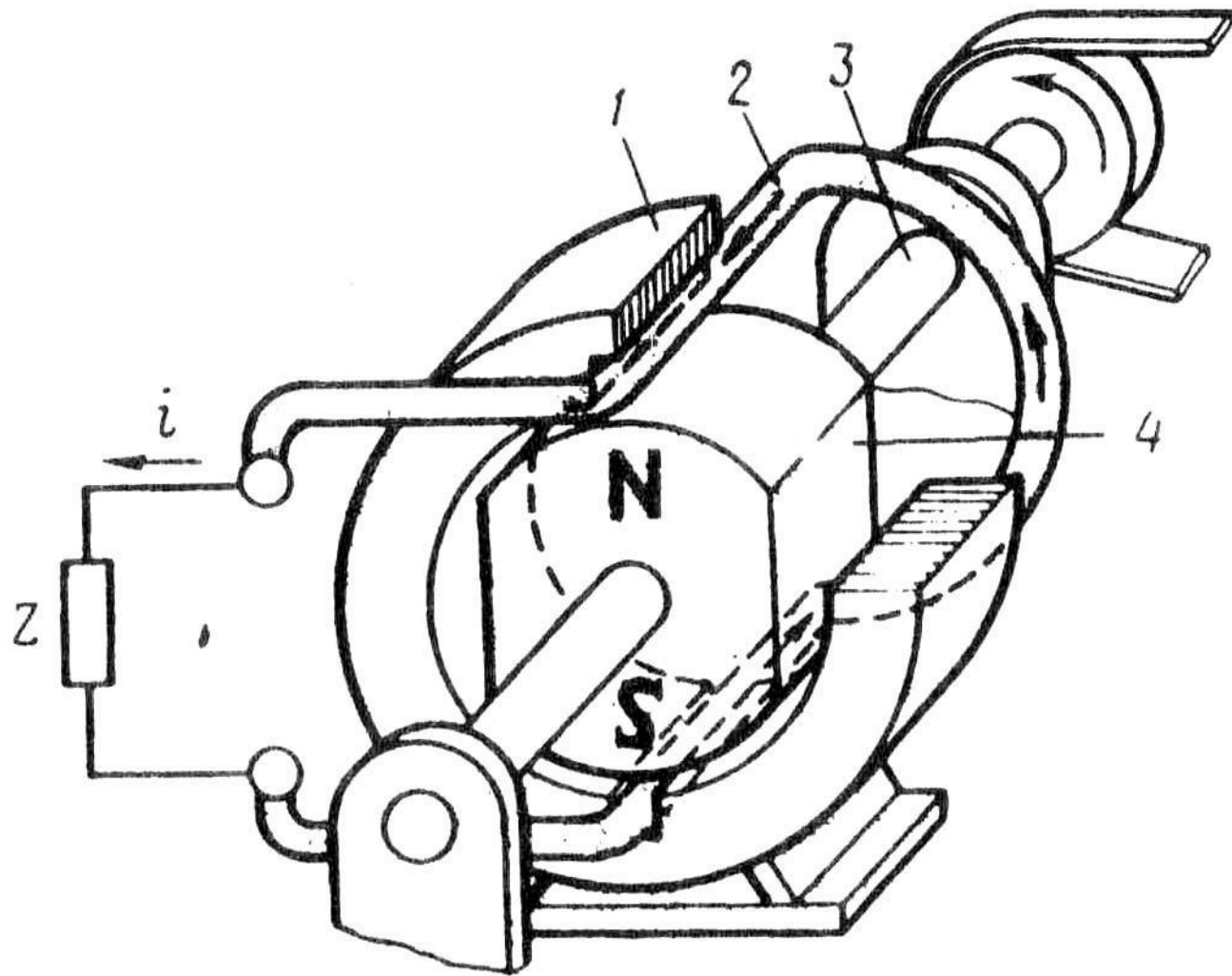
Частота перемагничивания статора определяется частотой вращения ротора и числом пар полюсов

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

Магнитный поток создаётся либо постоянными магнитами, либо электромагнитами, установленными на роторе

Для изучения принципа действия синхронного генератора воспользуемся упрощенной моделью синхронной машины. Неподвижная часть машины, называемая статором, представляет собой полый шихтованный цилиндр 1 (сердечник статора) с двумя продольными пазами на внутренней поверхности.

В этих пазах расположены стороны витка 2, являющегося обмоткой статора. Во внутренней полости сердечника статора расположена вращающаяся часть машины — ротор, представляющий собой постоянный магнит 4 с полюсами N и S, закрепленный на валу 3.



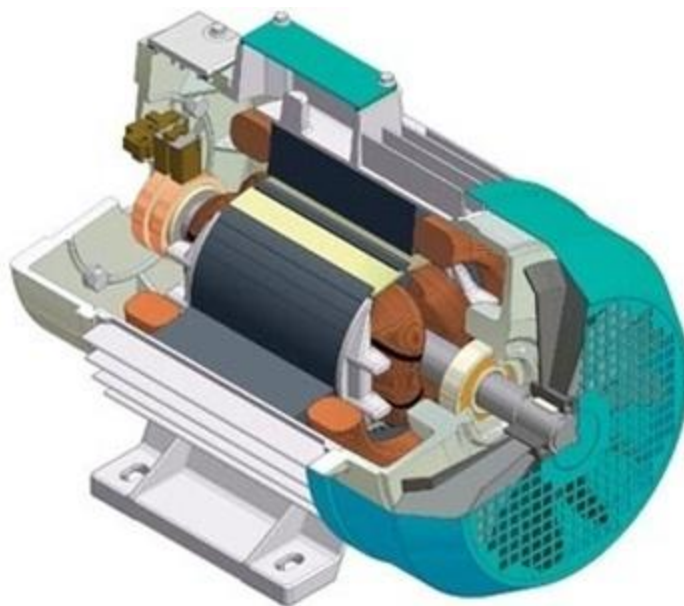
Вал ротора посредством ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан). В реальном синхронном генераторе в качестве приводного двигателя может быть использован двигатель внутреннего сгорания либо турбина.

Под действием вращающего момента приводного двигателя ротор генератора вращается с частотой n_1 против часовой стрелки. При этом в обмотке статора в соответствии с явлением электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой показано на рисунке стрелками. Так как обмотка статора замкнута на нагрузку Z , то в цепи этой обмотки появится ток i .

В процессе вращения ротора магнитное поле постоянного магнита также вращается с частотой n_1 , а поэтому каждый из проводников обмотки статора попеременно оказывается то в зоне северного (N) магнитного полюса, то в зоне южного (S) магнитного полюса.

При этом каждая смена полюсов сопровождается изменением направления ЭДС в обмотке статора. Таким образом, в обмотке статора синхронного генератора наводится переменная ЭДС, а поэтому ток i в этой обмотке и в нагрузке Z также переменный.

62. Возбуждение синхронных машин



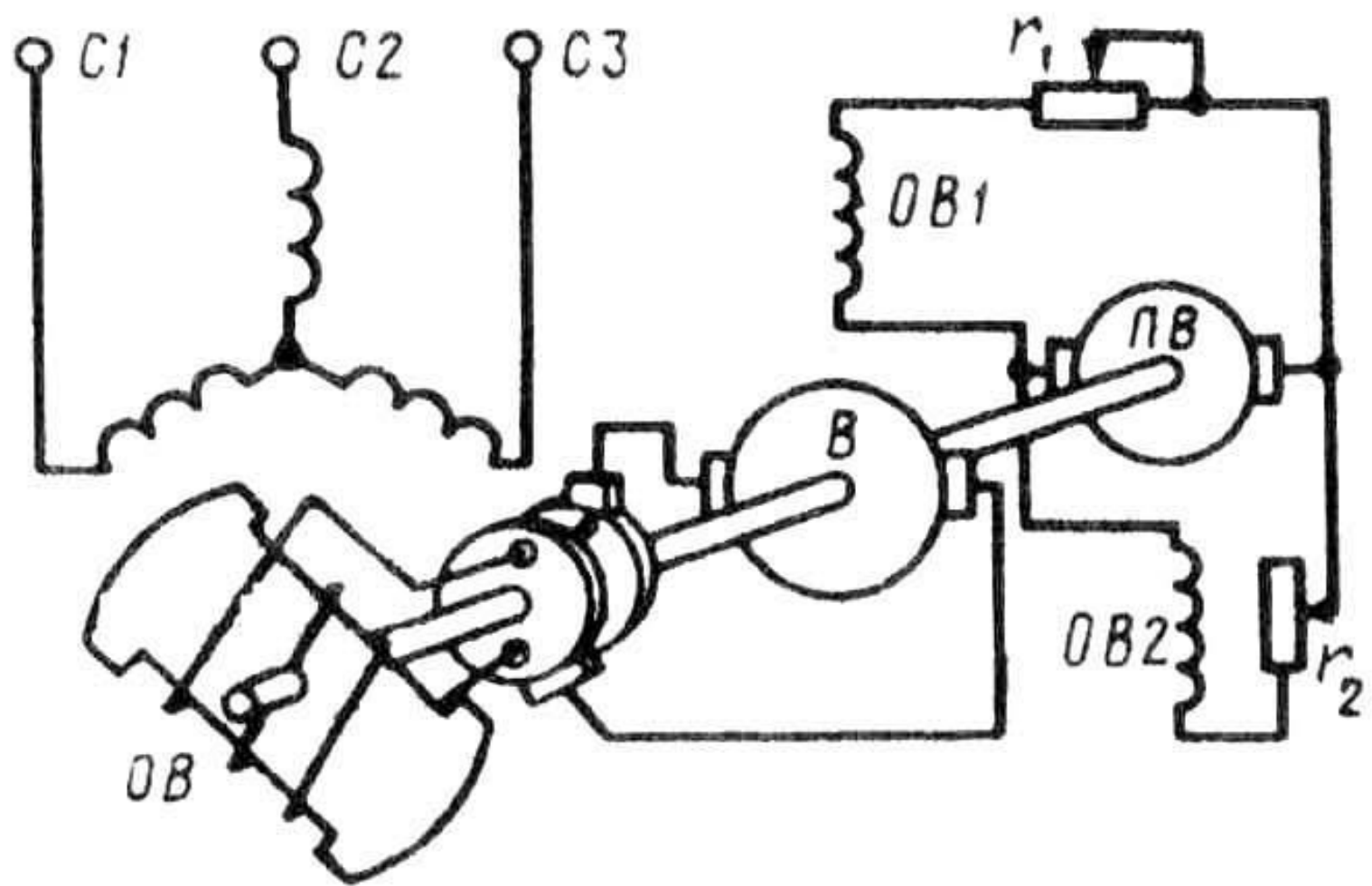
Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение, сущность которого состоит в том, что на полюсах ротора располагают обмотку возбуждения.

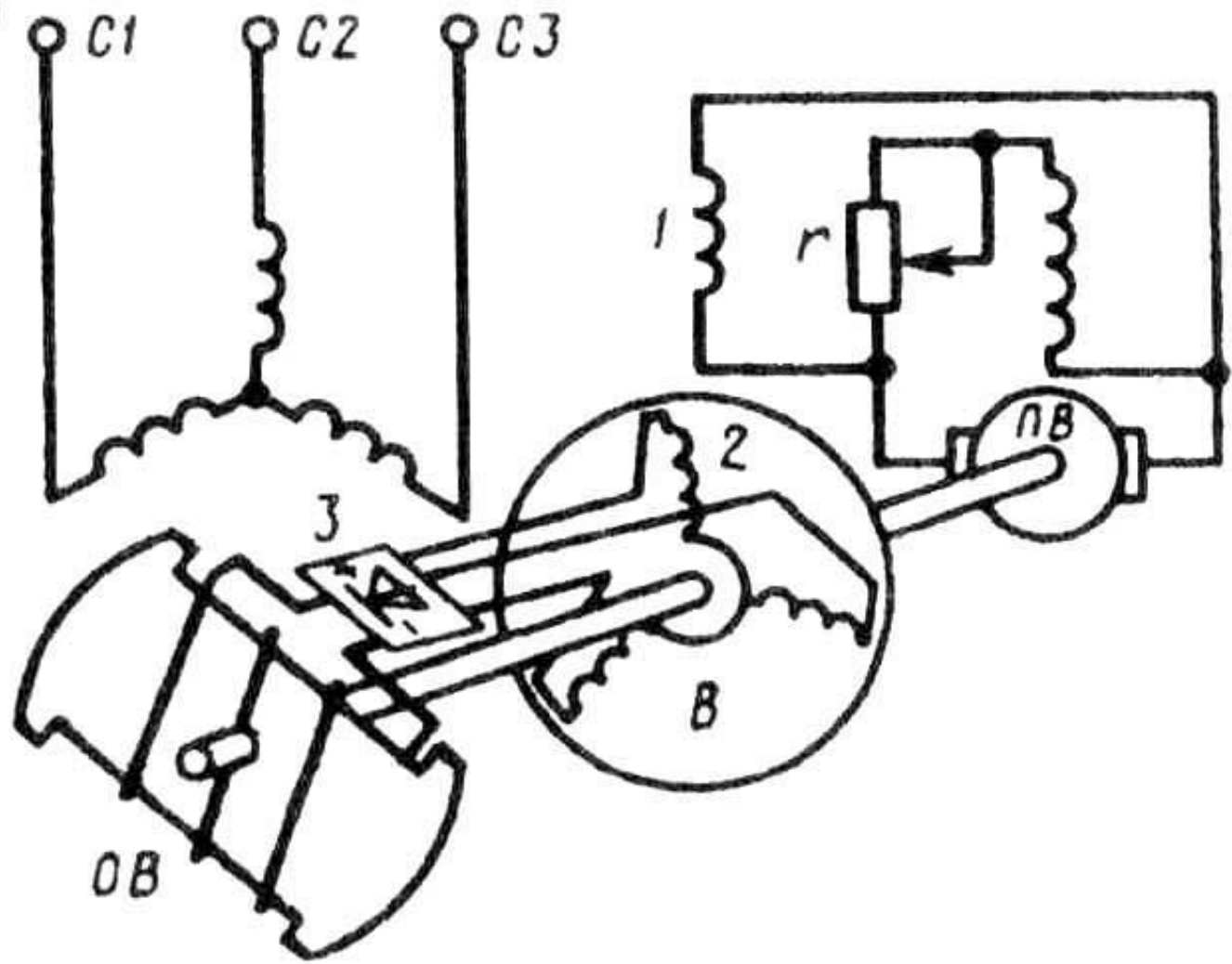
При прохождении по этой обмотке постоянного тока возникает МДС возбуждения, которая наводит в магнитной системе машины магнитное поле.

До последнего времени для питания обмотки возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения называемые возбудителями В , обмотка возбуждения которого (ОВ) получала питание постоянного тока от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ).

Ротор синхронной машины и якоря возбудителя и подвозбудителя располагаются на общем валу и вращаются одновременно. При этом ток в обмотку возбуждения синхронной машины поступает через контактные кольца и щетки.

Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты, включаемые в цепи возбуждения возбудителя (r_1) и подвозбудителя (r_2).





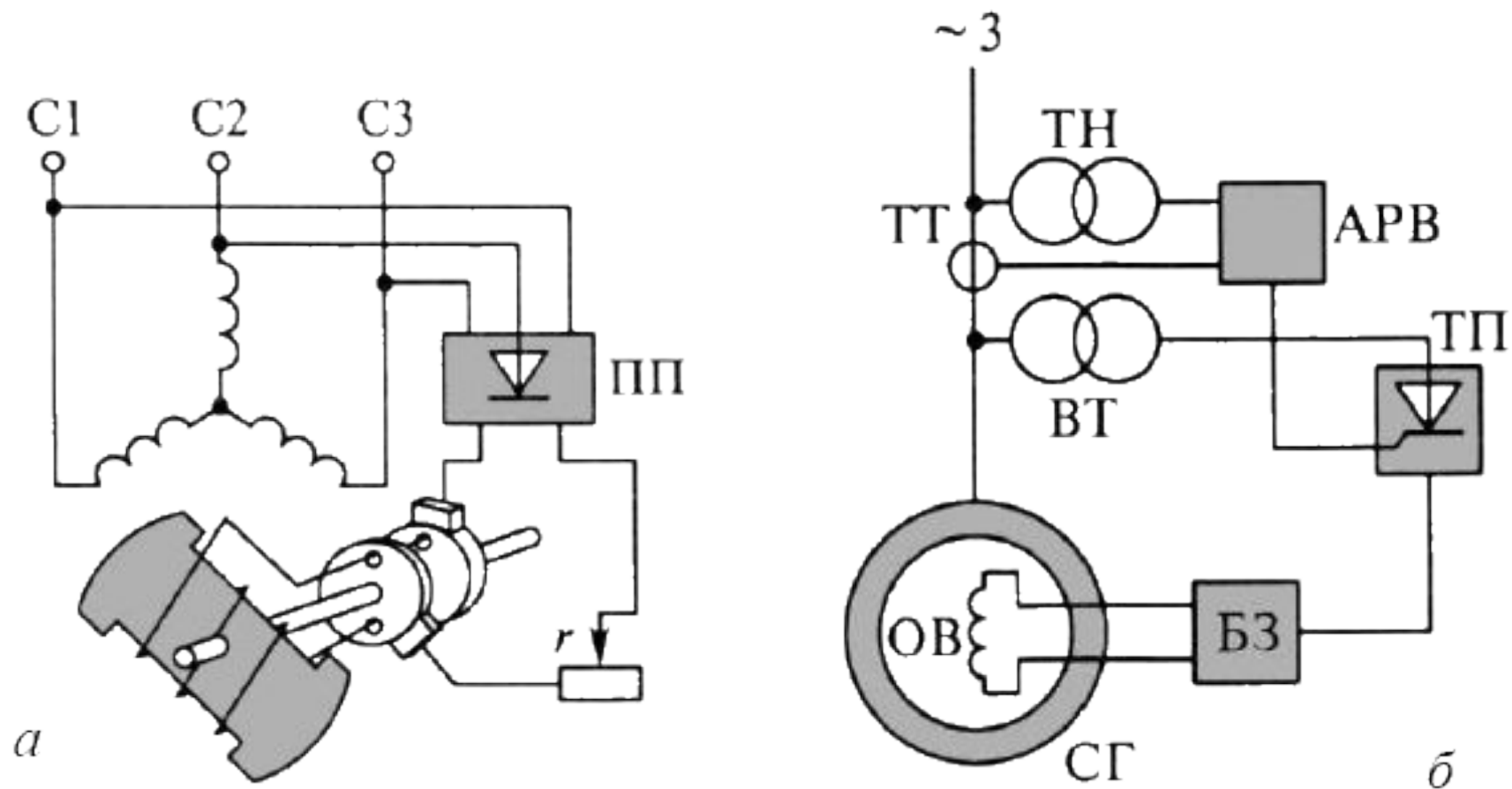
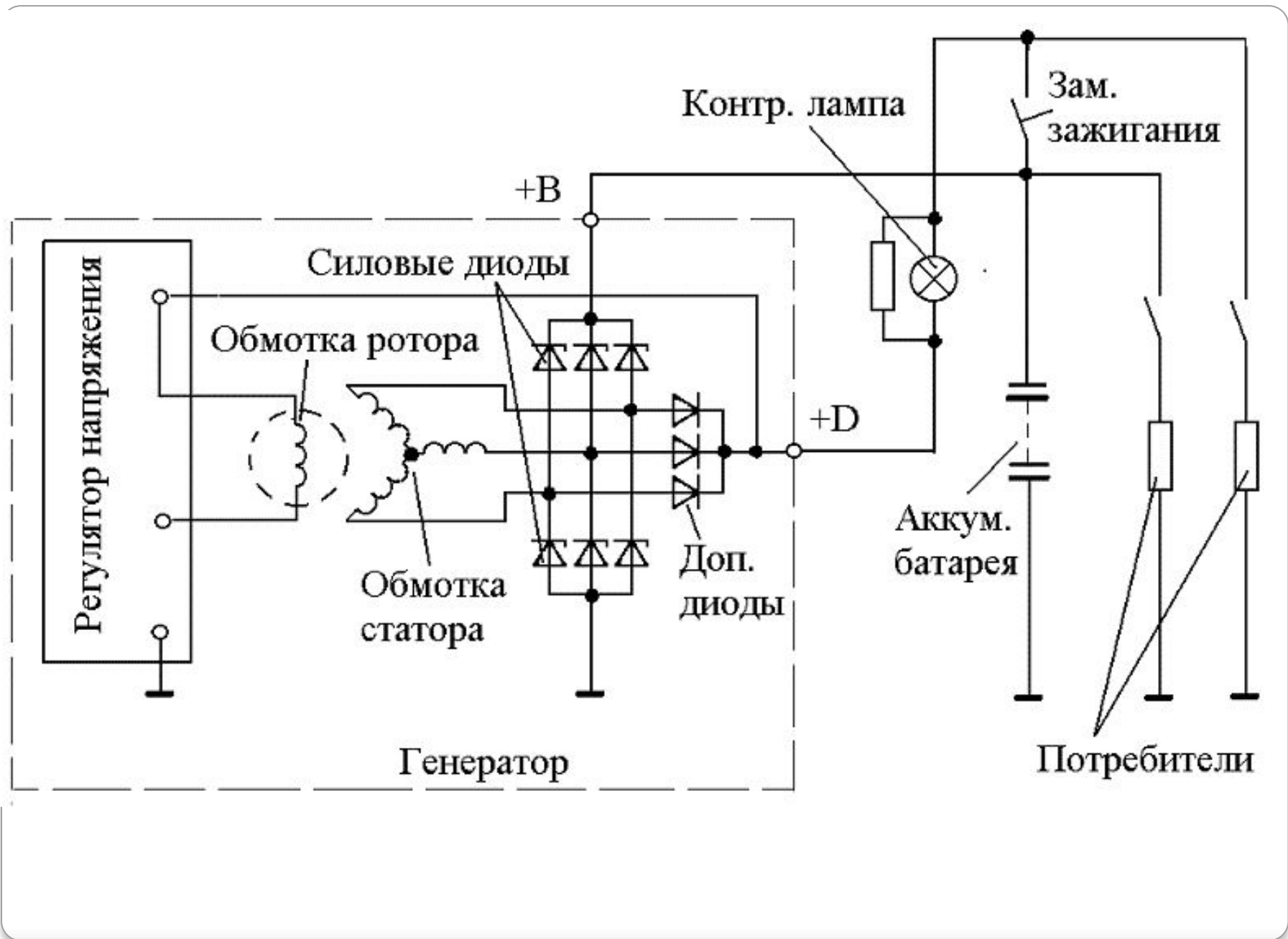
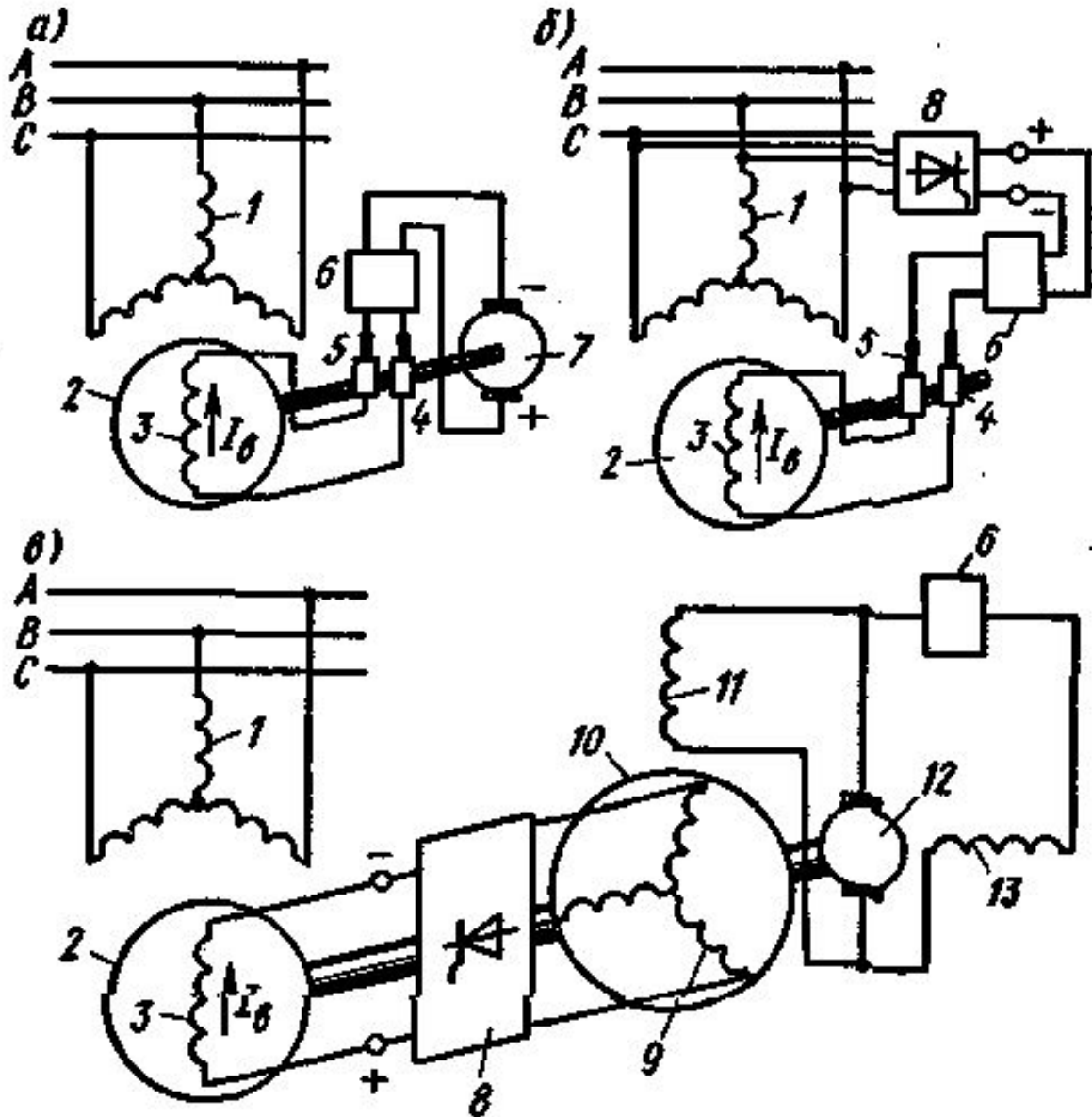


Рис. 1.4. Принцип самовозбуждения синхронных генераторов





Схемы возбуждения синхронной машины:

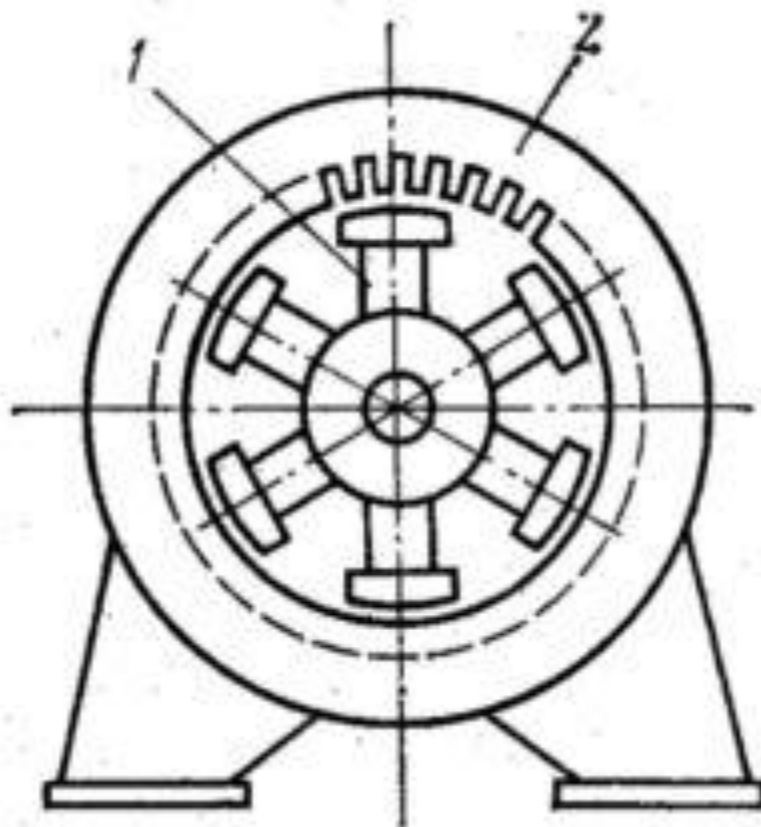
- 1 - обмотка якоря;
- 2 - ротор генератора;
- 3 - обмотка возбуждения;
- 4 - кольца;
- 5 - щетки;
- 6 - регулятор напряжения;
- 7 - возбудитель;
- 8 - выпрямитель;
- 9 - обмотка якоря возбудителя;
- 10 - ротор возбудителя;
- 11 - обмотка возбуждения возбудителя;
- 12 - подвозбудитель;
- 13 - обмотка возбуждения подвозбудителя

Мощность, затрачиваемая на возбуждение, составляет 0,2 – 5 % полезной мощности машины

**63. Особенности
конструктивного
исполнения
гидрогенераторов,
турбогенераторов,
дизельгенераторов**

В большинстве синхронных машин используется обращенная конструктивная схема по сравнению с машинами постоянного тока, т. е., система возбуждения расположена на роторе, а якорная обмотка на статоре. Это объясняется тем, что через скользящие контакты проще осуществить подвод сравнительно слабого тока к обмотке возбуждения, чем тока к рабочей обмотке. Магнитная система синхронной машины показана на рис. 1.

Полюса возбуждения синхронной машины размещены на роторе. Сердечники полюсов электромагнитов выполняются так же, как в машинах постоянного тока. На неподвижной части - статоре расположен сердечник 2, набранный из изолированных листов электротехнической стали, в пазах которого размещена рабочая обмотка переменного тока - обычно трехфазная.

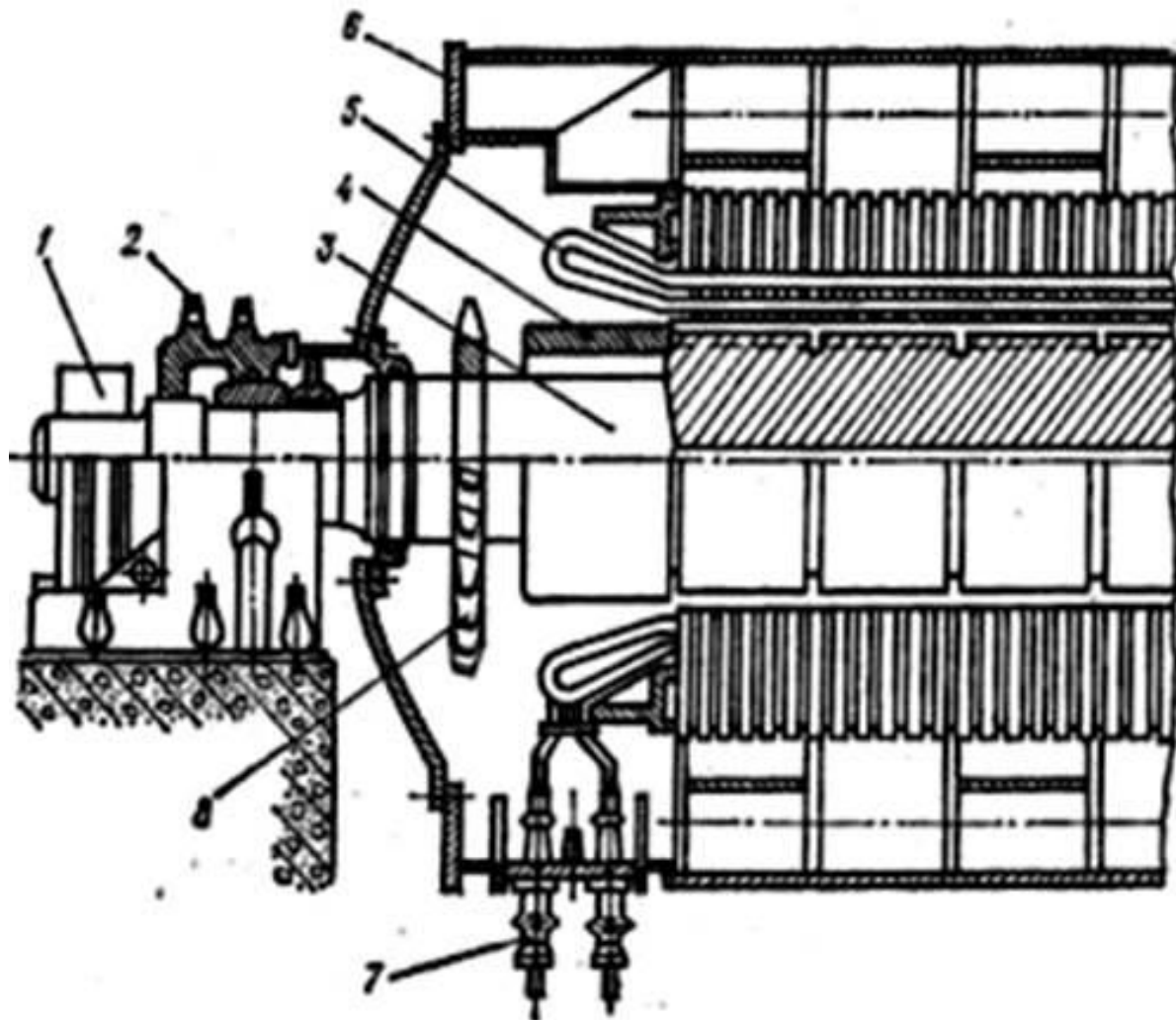


Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми турбинами, которые наиболее экономичны при высоких частотах вращения.

Поэтому турбогенераторы выполняют с минимальным числом полюсов системы возбуждения - двумя, что соответствует максимальной частоте вращения 3000 об/мин при промышленной частоте 50 Гц.

Основная проблема турбогенераторостроения заключается в создании надежной машины при предельных величинах электрических, магнитных, механических и тепловых нагрузок.

Эти требования накладывают отпечаток на всю конструкцию машины (рис. 2).



1 - контактные кольца и щеточный аппарат,
2 - подшипник,
3 - ротор,
4 - бандаж ротора,
5 - обмотка статора,
6 - статор,
7 - выводы обмотки статора,
8 - вентилятор.

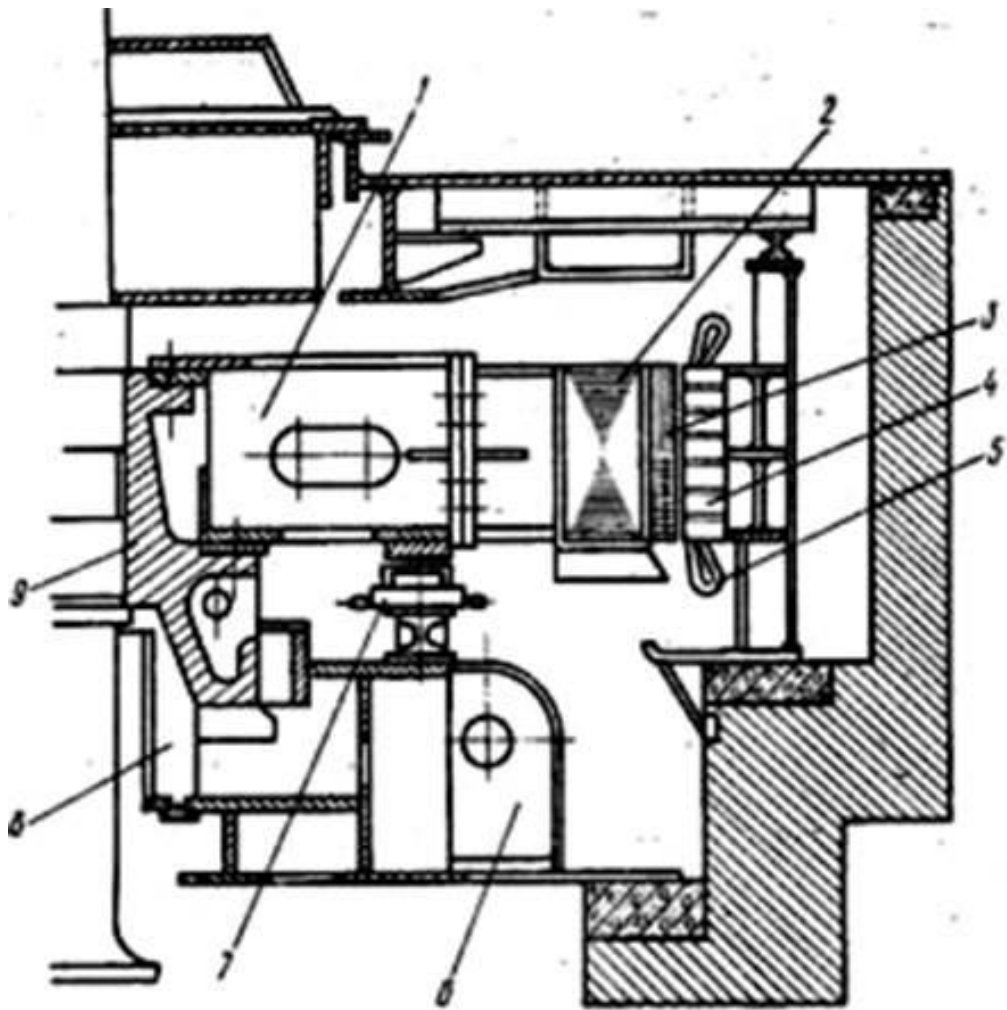
Ротор турбогенератора выполняется в виде цельной поковки диаметром до 1,25 м, длиной до 7 м (рабочая часть). Полная длина поковки с учетом вала составляет 12 - 15 м.

На рабочей части фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения.

Таким образом получается двухполюсный электромагнит цилиндрической формы без явно выраженных полюсов.

Гидрогенераторы по конструкции существенно отличаются от турбогенераторов. Экономичность режима гидравлических турбин зависит от скорости водяного потока, т. е. напора. На равнинных реках создать большой напор невозможно, поэтому частоты вращения турбин весьма низкие - от десятков до сотен оборотов в минуту.

Чтобы получить промышленную частоту 50 Гц, такие тихоходные машины приходится делать с большим числом полюсов. Для размещения большого количества полюсов приходится увеличивать диаметр ротора гидрогенератора, иногда до 10 - 11 м.



- 1 - ступица ротора,
- 2 - обод ротора,
- 3 - полюс ротора,
- 4 - сердечник статора,
- 5 - обмотка статора,
- 6 - крестовина,
- 7 - тормоз,
- 8 - подпятник,
- 9 - втулка ротора.

Стандартная **дизель-генераторная установка** представляет собой устройство, предназначенное для автономной подачи топлива в аварийном или штатном режиме.

Основа работы подобного генератора - преобразование механической энергии, получаемой из коленчатого вала двигательной системы, в обычную электрическую. Устройство подобного типа позволяет получать электроэнергию из любых генераторов переменного тока.

Топливный бак.

Заливная горловина.



Электронный блок

Генератор

Контрольные приборы

Рама
(защитный каркас)

Двигатель внутреннего сгорания.

Принцип работы **дизель-генератора**

Конструкция стандартного устройства данного типа производит топливо посредством механической энергии, которая создаётся при работе двигателя, сжигающего дизельное топливо и расширении веществ, находящихся в его составе в виде газов.

Пошаговое описание процесса работы установки:

Кривошипно-шатунный элемент запускает работу металлического коленчатого вала.

Полученный таким образом вращательный момент передаётся на ротор генераторной установки.

Указанный процесс формирует в роторе электромагнитное поле, преобразующее полученную в результате вращения механическую энергию в привычную для работы электрическую.

Конечная цель использования генератора - получение стандартного переменного тока.

Осуществление процесса трансформации энергии возможно при наличии работоспособных узлов в конструкции ДГУ.

Основные узлы генераторной установки:

Главный элемент дизель-генератора — это двигатель внутреннего сгорания, задача которого состоит в сжигании залитого в него топлива. Эффективную работу этого элемента обеспечивает система охлаждения (воздушная - для небольших установок, или жидкостная - для промышленных), механизм оперативного долива топлива, а также мелкие узлы, стабилизирующие функционирование всей системы.

Генератор переменного тока (альтернатор) - установка, использующая вращение магнитного поля, которое трансформирует механическую энергию в стандартную электрическую.

Особенности современного дизельного двигателя

Важнейший узел дизель-генератора — это двигатель внутреннего сгорания, работающий на дизельном топливе. Воспламенение горючего в указанном типе двигателя происходит от сжатия топлива. Современный рынок богат как двигателями, работающими в четырёхтактном режиме (впуск топлива, его сжатие, рабочий ход и выпуск), так и в двухтактном (сжатие топлива и рабочий ход).

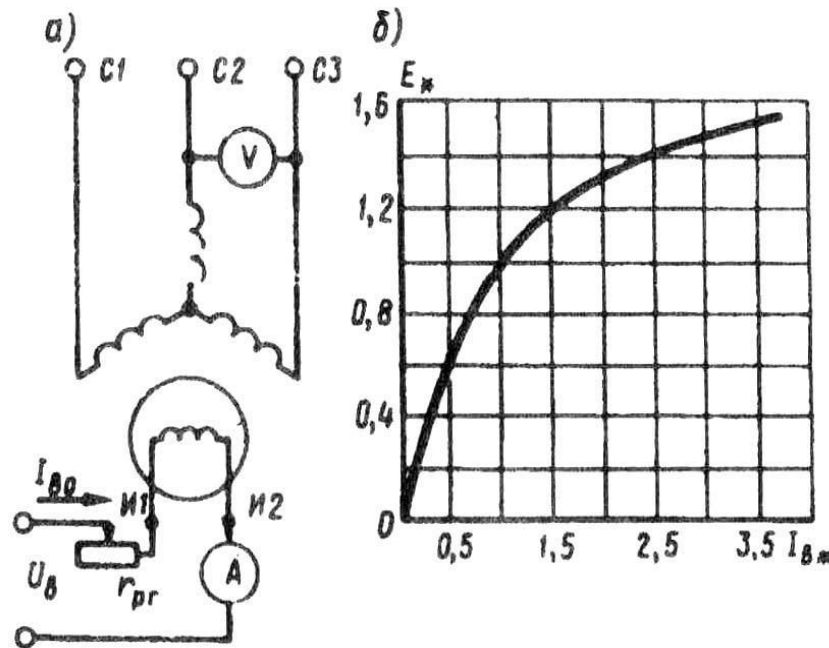
В среднем, работа дизельных двигателей требует меньшей скорости оборотов, так как топливо более долго прогорает, сама конструкция более массивна, поэтому не получила широкого распространения в автомобильной промышленности. При этом, использование дизельного двигателя в составе ДГУ позволяет сэкономить финансы на покупке более доступного по цене и экономичного топлива.

Дизельные двигатели различаются в зависимости от сферы их применения. Например, для использования на автономных электростанциях выбирают мощные генераторы, снабжённые жидкостной системой охлаждения. Переносные ДГУ снабжены воздушным вариантом охлаждения, в некоторых случаях устанавливается промежуточная конструкция для понижения температуры воздуха. Массивность деталей дизельного двигателя нивелируется экономичностью и надёжностью использования топлива, а также большой износостойкостью подобного оборудования. По этим причинам именно ДГУ - самый выгодный варианты для современных мощных электростанций. Пожаробезопасные и экономичные установки прослужат хозяевам в течение долгого времени.

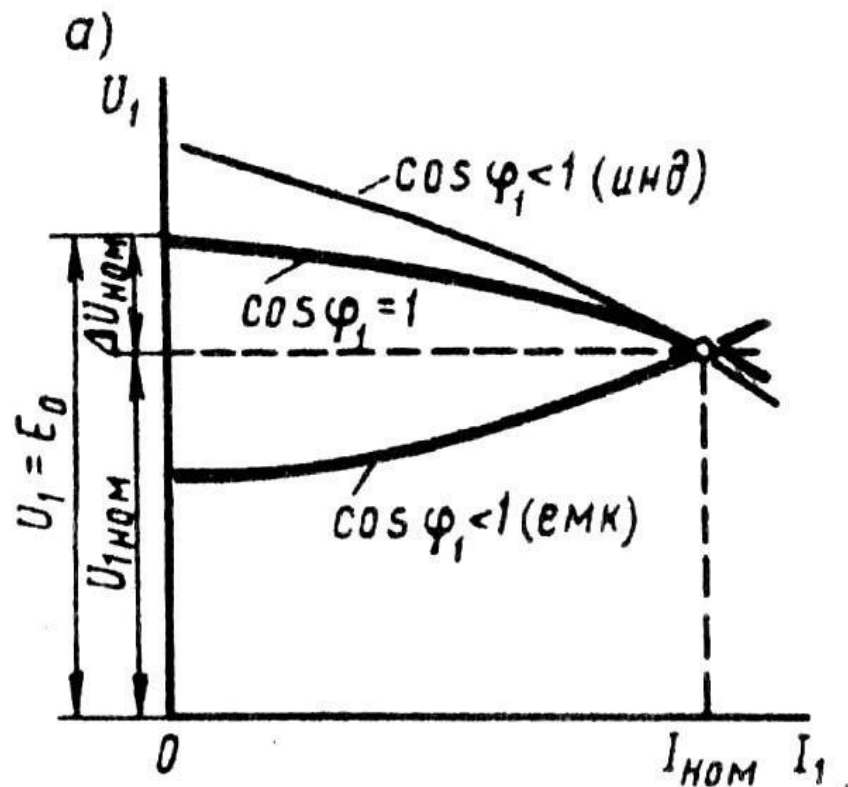
64.

**Характеристики
синхронного
генератора**

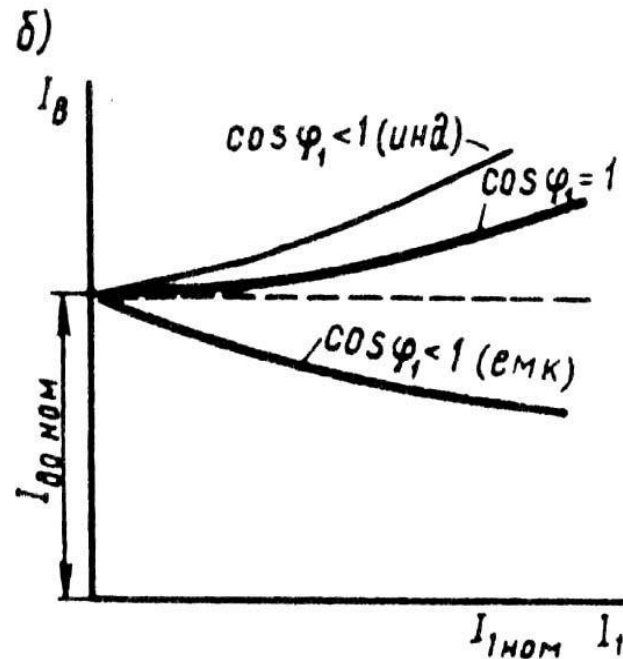
Характеристика **холостого хода** .
Представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме х.х. $U_1 = E_0$ от тока возбуждения $I_{в.0}$ при $n_1 = \text{const}$.



Внешняя характеристика. Представляет собой зависимость напряжения на выводах обмотки статора от тока нагрузки: $U_1 = f(I_1)$ при $I_B = \text{const}$; $\cos \varphi_1 = \text{const}$; $n_1 = n_{\text{НОМ}} = \text{const}$.



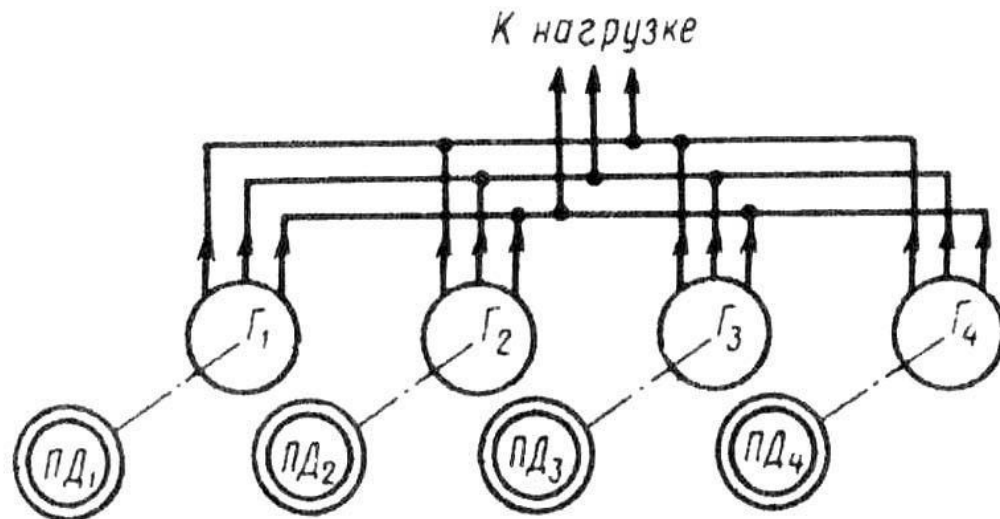
Регулировочная характеристика. Она показывает, как следует изменять ток возбуждения генератора при изменениях нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменно равным номинальному: $I_B = f(I_1)$ при $U_1 = U_{1\text{НОМ}} = \text{const}$; $n_1 = n_{\text{НОМ}} = \text{const}$ и $\cos \varphi_1 = \text{const}$.



65. Параллельная работа синхронных генераторов.

На электрических станциях обычно устанавливают несколько синхронных генераторов, включаемых параллельно для совместной работы.

Наличие нескольких генераторов вместо одного суммарной мощности дает преимущества, объясняемые теми же соображениями, которые были изложены применительно к параллельной работе трансформаторов.



При включении синхронного генератора в сеть на параллельную работу необходимо соблюдать следующие условия:

1. ЭДС генератора в момент подключения его к сети должна быть равна и противоположна по фазе напряжению сети ,
2. частота ЭДС генератора должна быть равна частоте переменного напряжения в сети ;
3. порядок следования фаз на выводах генератора должен быть таким же, что и на зажимах сети.

Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называют ***синхронизацией***.

Несоблюдение любого из условий синхронизации приводит к появлению в обмотке статора больших уравнивающих токов, чрезмерное значение которых может явиться **причиной аварии**.

Включить генератор в сеть с параллельно работающими генераторами можно или способом **точной синхронизации**, или способом **самосинхронизации**

Способ точной синхронизации. Сущность этого способа состоит в том, что, прежде чем включить генератор в сеть, его приводят в состояние, удовлетворяющее всем вышеперечисленным условиям. Момент соблюдения этих условий, т. е. момент синхронизации, определяют прибором, называемым *синхроноскопом*.

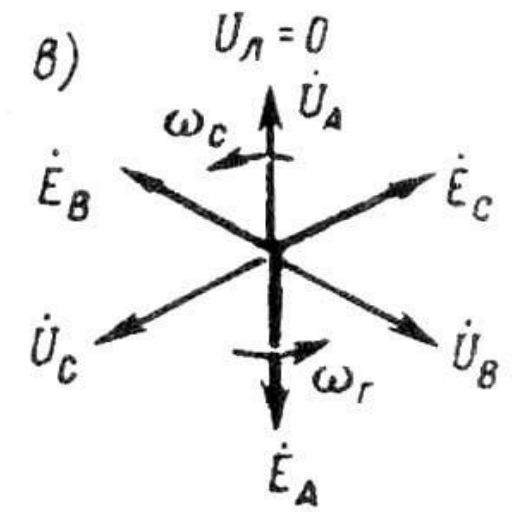
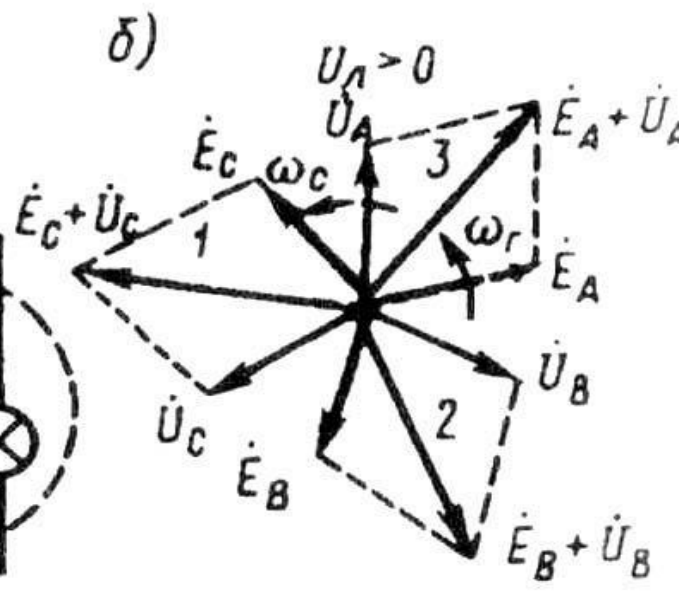
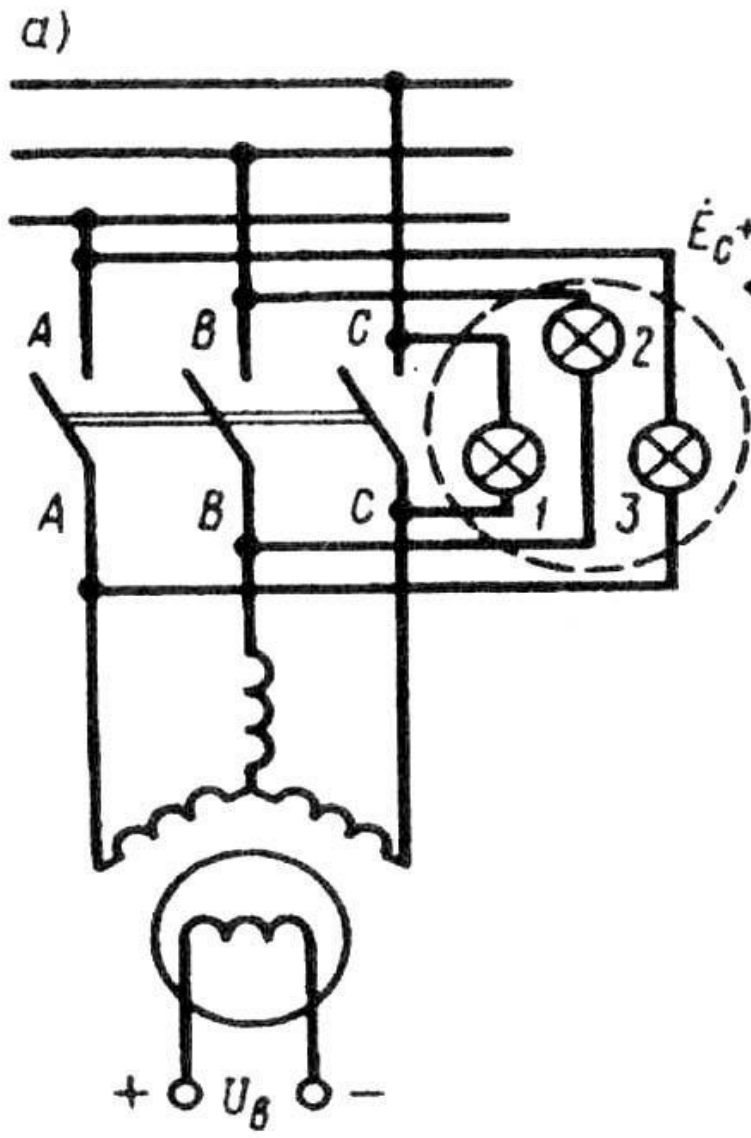
По конструкции синхроноскопы разделяют на стрелочные и ламповые. Рассмотрим процесс синхронизации генераторов с применением лампового синхроноскопа, который состоит из трех ламп 1, 2, 3, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. При включении ламп по схеме «на погасание» момент синхронизации соответствует одновременному погасанию всех ламп.

**Величину ЭДС регулируют
изменением тока возбуждения.**

**Частоту регулируют изменением
частоты вращения приводного
двигателя**

$$E_1 = C_E \Phi f_1 W_1$$

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



Способ самосинхронизации. Ротор невозбужденного генератора приводят во вращение первичным двигателем до частоты вращения, отличающейся от синхронной не более чем на 2—5%, затем генератор подключают к сети.

Для того чтобы избежать перенапряжений в обмотке ротора в момент подключения генератора к сети, ее замыкают на некоторое активное сопротивление. Так как в момент подключения генератора к сети его ЭДС равна нулю (генератор не возбужден), то под действием напряжения сети в обмотке статора наблюдается резкий бросок тока, превышающий номинальное значение тока генератора.

Вслед за включением обмотки статора в сеть подключают обмотку возбуждения к источнику постоянного тока и синхронный генератор под действием электромагнитного момента, действующего на его ротор, втягивается в синхронизм, т. е. частота вращения ротора становится синхронной. При этом ток статора быстро уменьшается.

Способ самосинхронизации (грубой синхронизации) обычно применяют в генераторах при их частых включениях.

Этот способ прост и легко автоматизируется.

66. Синхронные двигатели, компенсаторы

По своей конструкции синхронные двигатели в принципе не отличаются от синхронных генераторов, но все же имеют некоторые особенности.

Их изготавливают преимущественно явнополюсными с $2p = 6-24$ полюсов; воздушный зазор делают меньшим, чем в генераторах такой же мощности, что способствует улучшению ряда параметров двигателя, в частности уменьшению пускового тока; демпферную (успокоительную) обмотку выполняют стержнями большего сечения, так как при пуске двигателя она является пусковой обмоткой

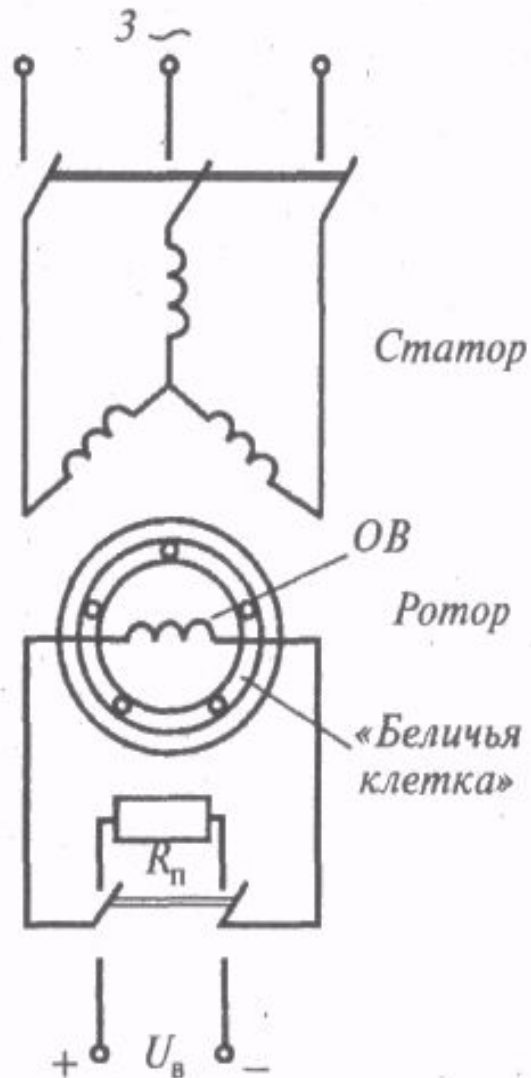
Пуск синхронного двигателя непосредственным включением в сеть невозможен, так как ротор из-за своей значительной инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, частота вращения которого устанавливается мгновенно. В результате устойчивая магнитная связь между статором и ротором не возникает.

Для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до синхронной или близкой к ней частоте, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

Пуск в ход синхронного двигателя

- Распространение получил так называемый асинхронный пуск синхронного двигателя. Для осуществления такого пуска на роторе располагается специальная пусковая обмотка, представляющая собой короткозамкнутую обмотку типа беличьей клетки как у ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя.
- Витки этой обмотки располагаются в полюсах ротора.

Схема пуска в ход синхронного двигателя



1. Вначале обмотка постоянного тока ротора (обмотка возбуждения) замыкается на пусковой реостат R_n .

Пуск в ход синхронного двигателя

2. Затем подается трехфазное напряжение на обмотку статора, по ее фазам начинают проходить токи и создается вращающееся магнитное поле статора.

Синхронный двигатель за счет наличия пусковой обмотки трогается с места и начинает разгоняться как асинхронный двигатель.

Пуск в ход синхронного двигателя

3. Когда частота вращения ротора синхронного двигателя достигнет примерно 95 % синхронной частоты вращения поля статора n_0 , пусковой реостат R_n отключают, а обмотку возбуждения ротора подключают к источнику постоянного напряжения U_B .

Пуск в ход синхронного двигателя

По обмотке возбуждения идет постоянный ток, и на роторе образуются магнитные полюса. Так как в это время частота вращения магнитного поля статора незначительно превышает частоту вращения ротора, то разноименные магнитные полюса ротора и поля статора притягиваются к друг другу, а одноименные - отталкиваются.

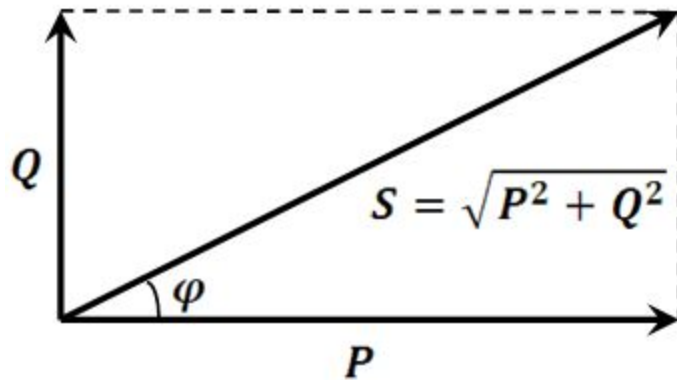
Пуск в ход синхронного двигателя

В результате ротор получает некоторое ускорение и после нескольких качаний ротора его частота вращения сравнивается с частотой вращения поля статора и далее остается постоянной (говорят, что двигатель втянулся в синхронизм).

Вторым способом является применение вспомогательного двигателя малой мощности, с помощью которого синхронный двигатель разгоняется до скорости, близкой к синхронной

Синхронные компенсаторы

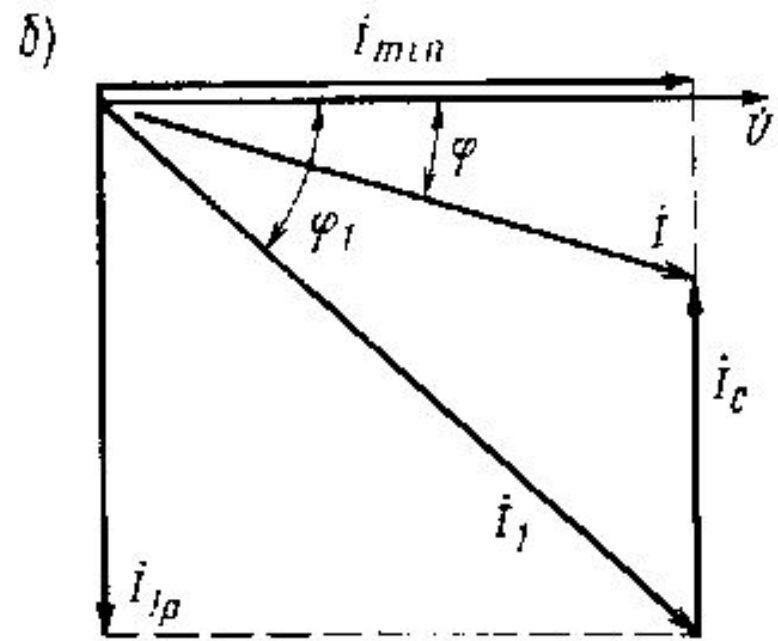
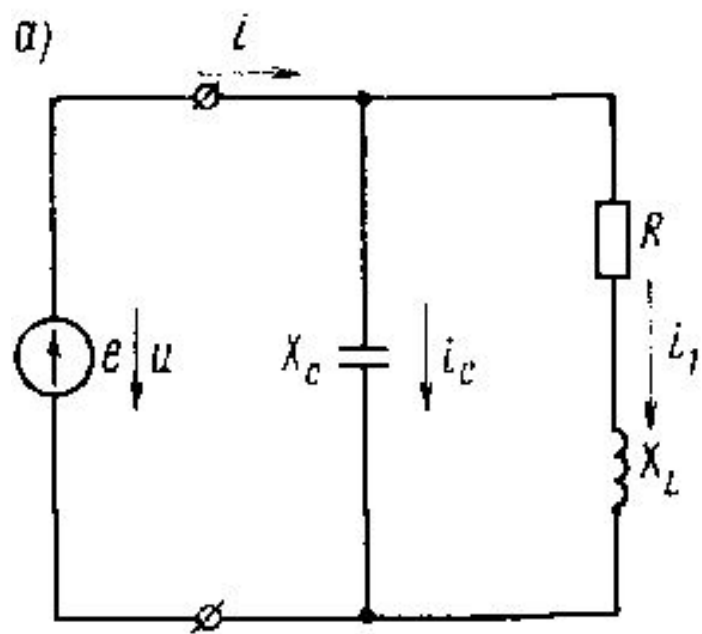
Компенсация реактивной мощности



На любом развитом промышленном предприятии большая часть электроэнергии потребляется двигателями (синхронными, асинхронными, однофазными, трехфазными) и трансформаторами, т.е. преобладает реактивная мощность индуктивного характера.

Следует отметить, что на предприятиях устанавливают не один электросчетчик, как в домах и квартирах, а два, один из которых активный, а другой - реактивный.

И за перерасход напрасно «гоняемой» по линиям электропередач энергии соответствующие органы беспощадно штрафуют, так что администрация кровно заинтересована в том, чтобы произвести расчет реактивной мощности и принять меры к ее снижению.





Генератор
электростанции



Сеть
электропитания



Электродвигатель



Компенсация
реактивной мощности

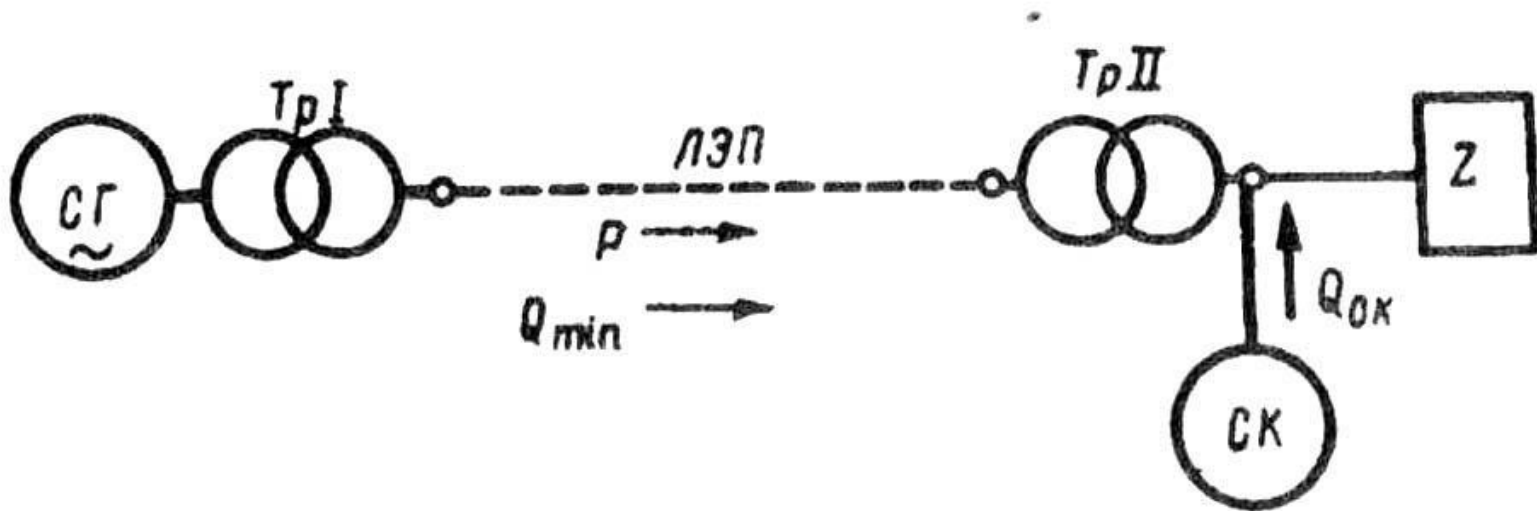
Синхронный компенсатор (СК) представляет собой синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности. Синхронный компенсатор включают в электрическую систему с целью повышения ее коэффициента мощности.



Принцип происходящих при этом явлений состоит в том, что необходимую для работы некоторых потребителей реактивную мощность вырабатывает не синхронный генератор, установленный на электростанции, а синхронный компенсатор, установленный в непосредственной близости к потребителю.

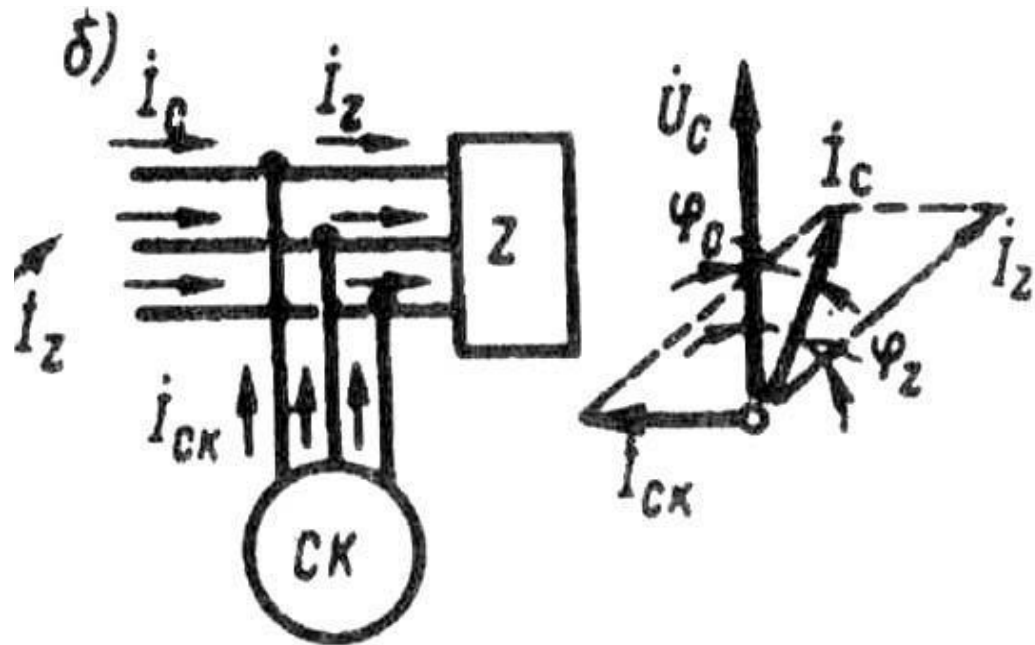
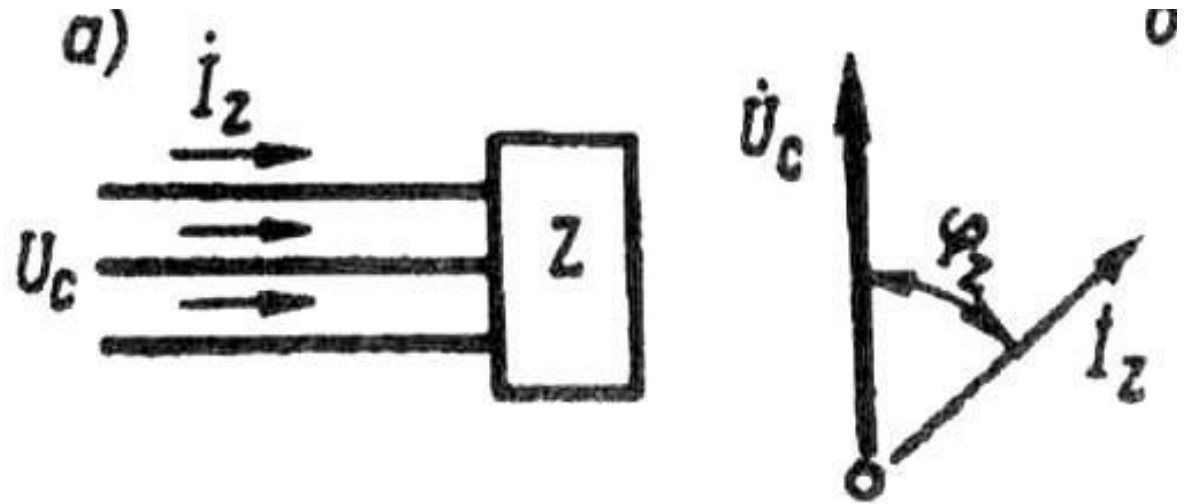
К числу потребителей переменного тока, требующих значительной реактивной мощности, в первую очередь относятся асинхронные двигатели.

На рисунке показана система, состоящая из синхронного генератора (СГ), повышающего Tr I и понижающего Tr II трансформаторов, линии электропередачи (ЛЭП), потребителя Z и синхронного компенсатора (СК), включенного непосредственно на входе потребителя.



Синхронный компенсатор, включенный в сеть, работает как синхронный двигатель без нагрузки т. е. в режиме х. х., и при этом вырабатывает реактивную мощность, необходимую для работы потребителя Z , например группы асинхронных двигателей.

Благодаря этому реактивная мощность в СГ и ЛЭП доведена до некоторого минимального значения. Это способствует повышению технико-экономических показателей всей электрической системы



Синхронные компенсаторы применяют также для стабилизации напряжения в сети при передаче энергии по линиям большой протяженности.

При больших индуктивных нагрузках напряжение в конце линии (у потребителей) оказывается намного меньше, чем в начале; при малых нагрузках, наоборот, под влиянием емкостных сопротивлений линии напряжение в конце линии может даже повышаться по сравнению с напряжением в начале.

Если же в конце линии (у потребителей) включить СК, работающий при больших нагрузках с перевозбуждением и при малых нагрузках с недовозбуждением, то это позволит поддерживать напряжение в конце линии практически неизменным.

Конструктивно СК отличается от СД облегченным ротором.