

# Электрические машины

## СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Трехфазные синхронные машины впервые были разработаны в конце 80-х и в начале 90-х годов XIX в. выдающимся русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским

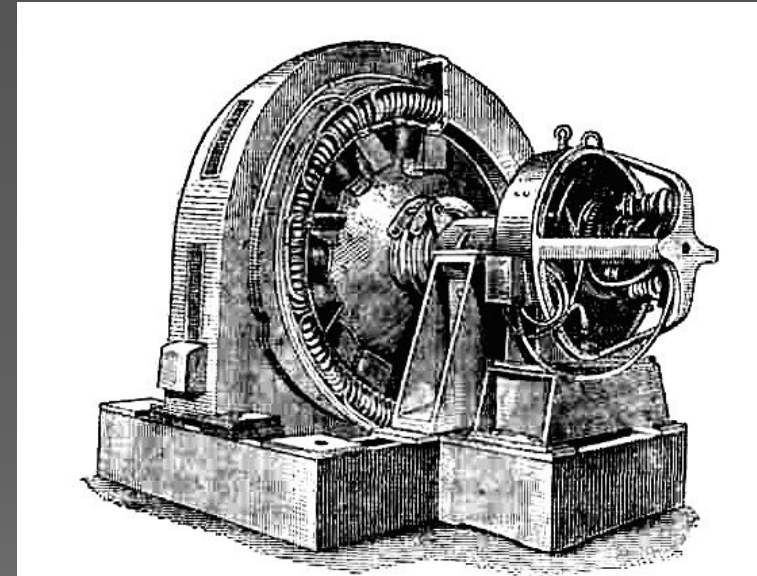


# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

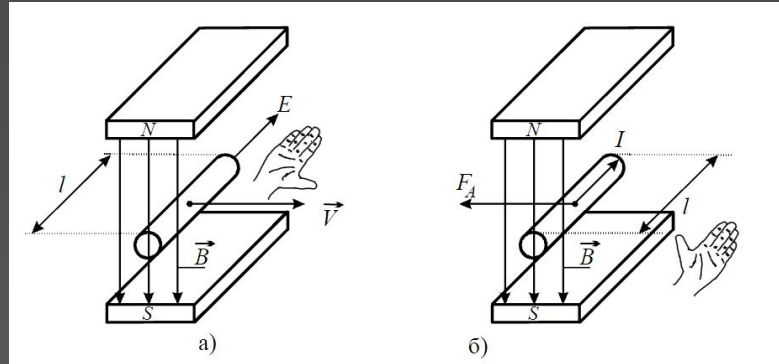
Ученым были с блеском решены задачи по созданию практически всех элементов и устройств, входящих в трехфазные цепи. Одной из решенных является разработка трехфазного синхронного электромашинного генератора (2,2 кВт 1888 г.), создание которого открыло (по мнению специалистов Международной электротехнической конференции — МЭК, регулярно собирающейся для решения насущных электротехнических вопросов) новый, «современный» этап развития мировой электротехники. Сегодня такие генераторы вырабатывают электроэнергию практически на всех промышленных электростанциях мира.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Синхронные машины используют в качестве генераторов и двигателей. Все генераторы переменного тока — это синхронные машины. Синхронные двигатели применяют реже асинхронных и только в тех случаях, когда при заданной мощности и режиме работы они оказываются экономичнее, чем асинхронные, или когда требуется привод с абсолютно жесткой механической характеристикой.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



В основе работы синхронных генераторов лежит явление электромагнитной индукции. Так как принципиально безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать неподвижное магнитное поле или, наоборот, подвижное поле будет пересекать неподвижный проводник, то конструктивно синхронные генераторы могут быть изготовлены двух видов. В первом из них магнитные полюсы можно поместить на статоре и питать их обмотку постоянным током, а проводники расположить на роторе и снимать с них при помощи колец и щеток переменный ток.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Часто ту часть машины, которая создает магнитное поле, называют индуктором, а ту часть машины, где располагается обмотка, в которой индуктируется ЭДС, называют якорем.

Следовательно, в первом типе генератора индуктор неподвижен (статор), а якорь вращается (ротор).

Современные синхронные генераторы строятся на напряжения 6, 10, 16 кВ и выше. Снимать такие высокие напряжения с вращающейся обмотки якоря при помощи скользящих контактов (колец и щеток) становится невозможным, так как обмотку высокого напряжения трудно изолировать.

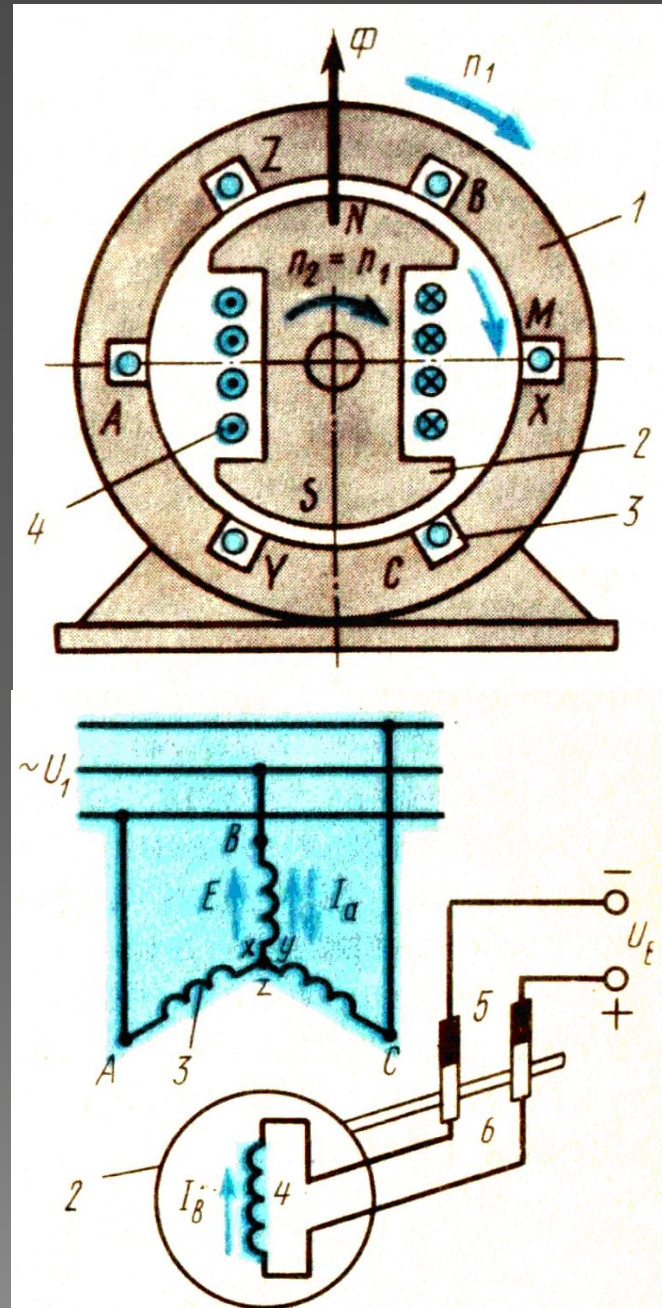
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

При больших мощностях якоря габариты трех его колец получились бы весьма значительными. Этим объясняется, что в современных генераторах обмотку якоря располагают на неподвижной части машины — статоре, а обмотку возбуждения (магнитные полюсы) — на роторе.

Статор синхронного генератора, как и других машин переменного тока, состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали, в пазах которого укладывается обмотка переменного тока, и станины — чугунного или сваренного из листовой стали кожуха.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

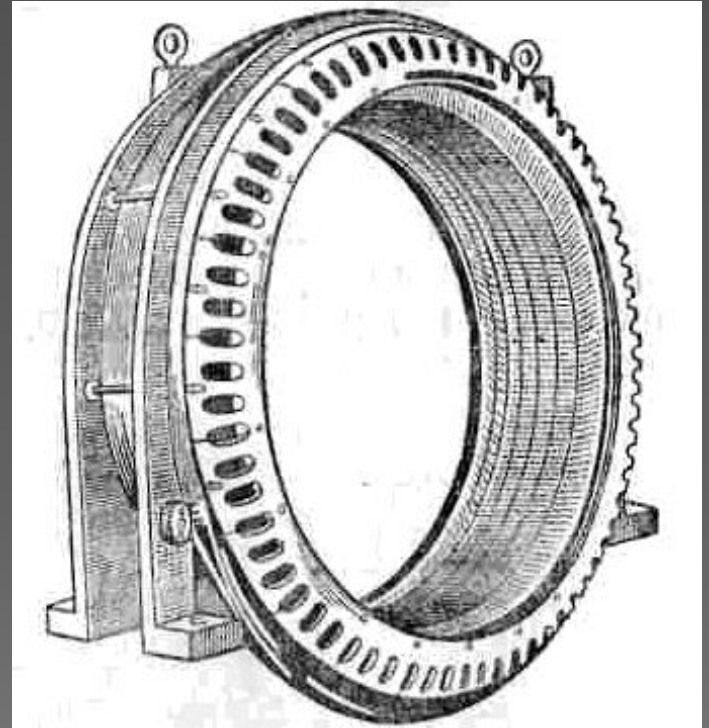
В пазах статора 1 машины подобно тому, как это сделано у асинхронного двигателя, уложена трехфазная силовая обмотка 3. Начала фазных обмоток обозначены А, В, С; концы — Х, Y, Z. На роторе 2 размещена обмотка возбуждения 4. Она соединена через кольца 6 и щетки 5 с источником постоянного тока. Мощность, необходимая для возбуждения, составляет 0,3—3 % от номинальной мощности синхронной машины. 3 — обмотка якоря; 5 — щетки; 6 — контактные кольца





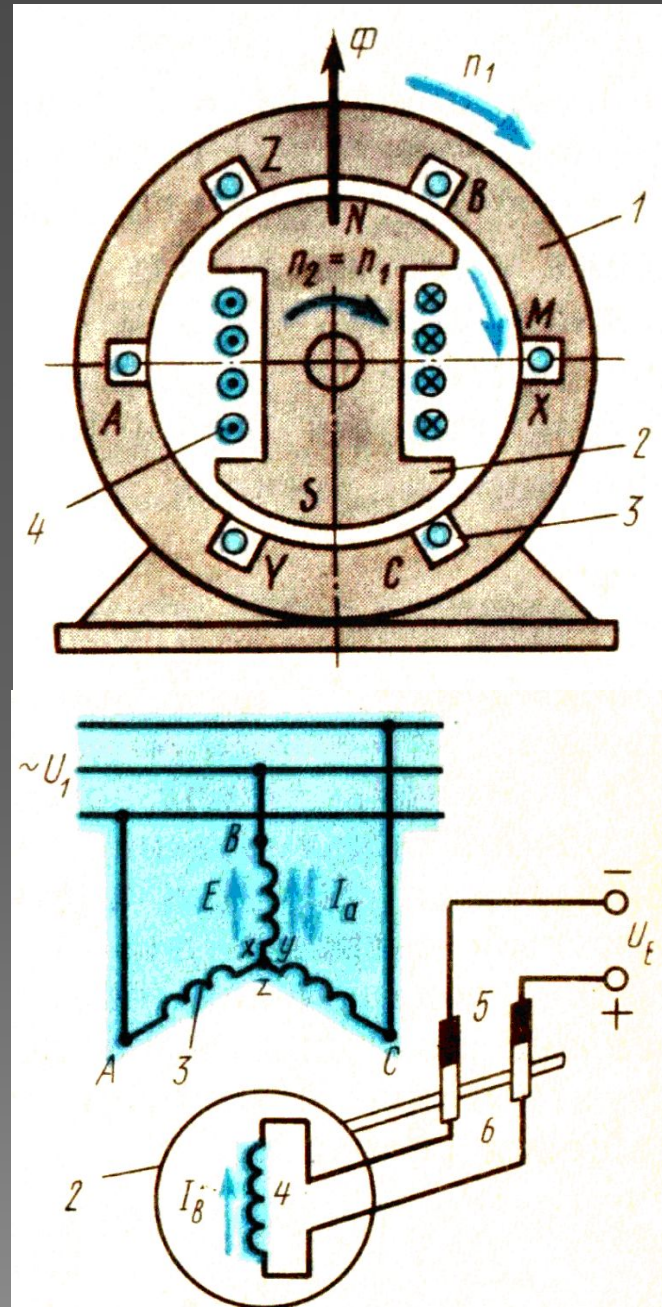
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Обмотка статора выполняется из секций, изготовленных обычно из медных проводников круглого или прямоугольного сечения. Изоляция обмотки выполняется особо тщательно, так как машина работает обычно при высоких напряжениях.



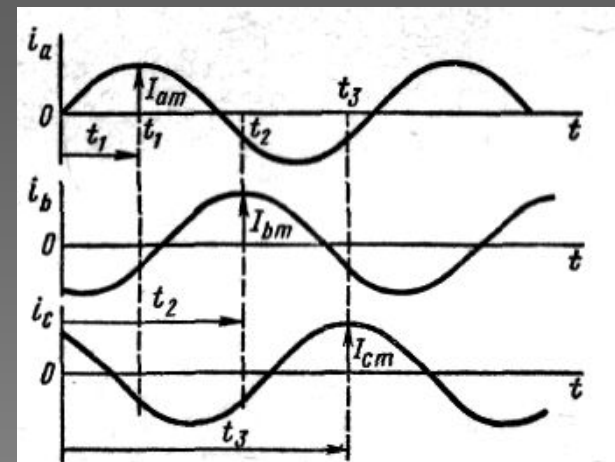
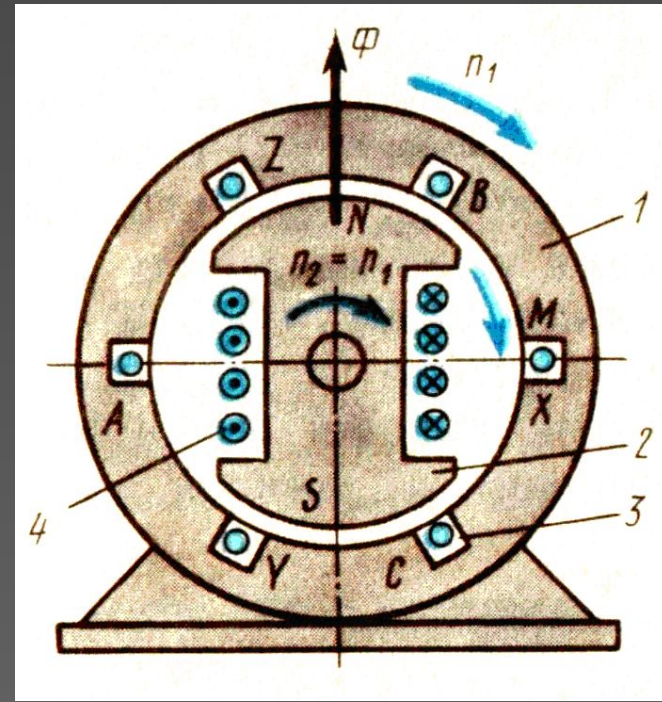
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Постоянный магнитный поток, создаваемый током ротора, замыкается через сталь ротора, воздушные зазоры и сердечник статора. Если ротор вращается, то создается вращающееся магнитное поле. Пересекая проводники фазных обмоток статора, это поле наводит в них переменную ЭДС  $E$ .



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Частота вращения ротора  $n_2$  поддерживается постоянной, поэтому изменение ЭДС во времени определяется только распределением магнитной индукции вдоль окружности ротора. Это распределение носит синусоидальный характер, поэтому и в фазных обмотках статора индуцируются синусоидальные ЭДС, сдвинутые по фазе одна относительно другой на одну треть периода

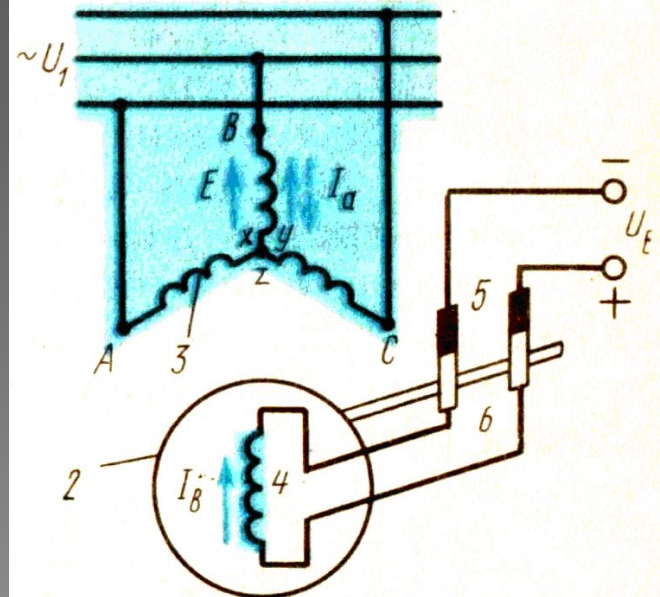
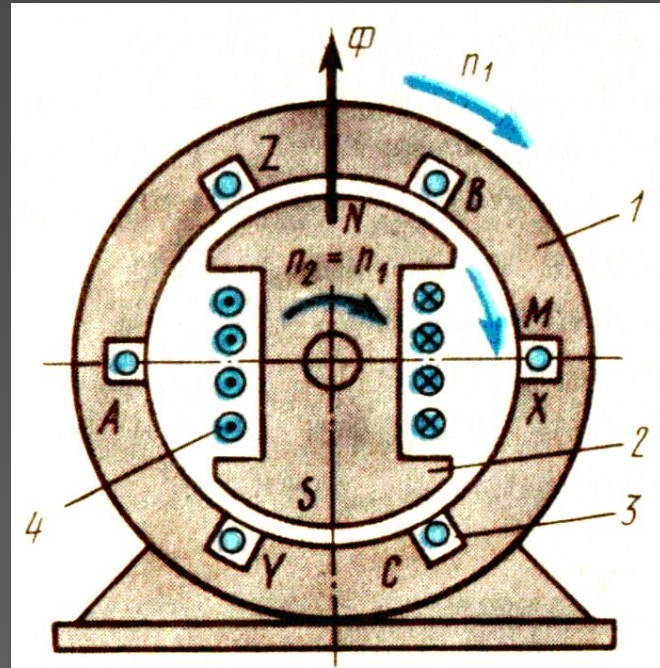


# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Если на роторе  $p$  пар полюсов, то за один его оборот  $p$  раз изменяется ЭДС и частота этого изменения

$$f = \frac{p \cdot n_2}{60}$$

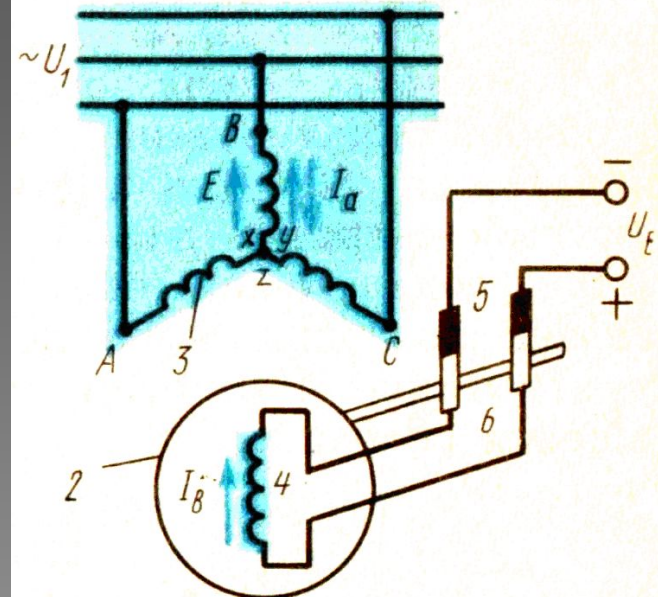
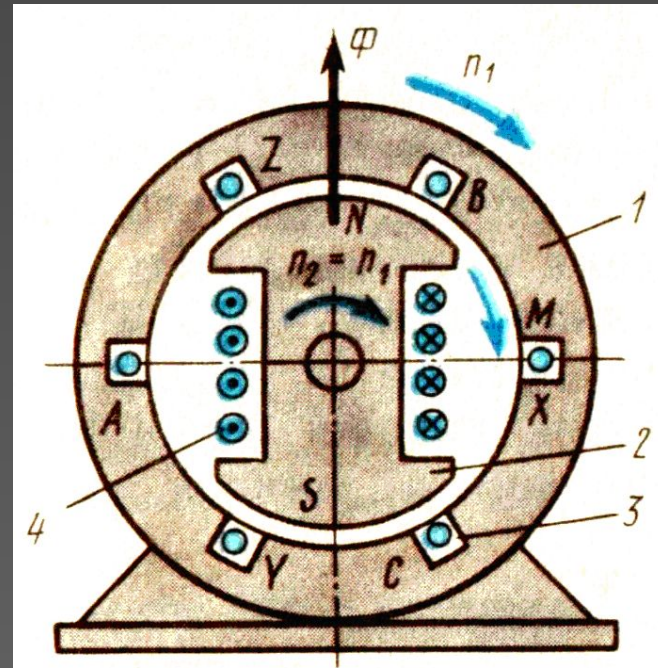
Для получения частоты 50 Гц двухполюсный генератор ( $p = 1$ ) должен делать 3000 об/мин.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

При подключении обмотки статора к трехфазной нагрузке проходящий по ней ток создает вращающее магнитное поле с частотой вращения  $n_1$ , равной частоте вращения ротора  $n_2$ .

Суммарное магнитное поле вращается с той же частотой, с какой вращается ротор. Поэтому машина называется синхронной



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

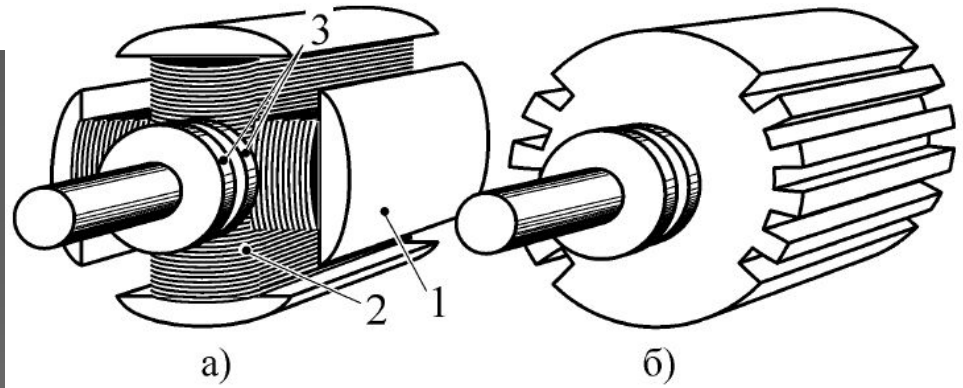
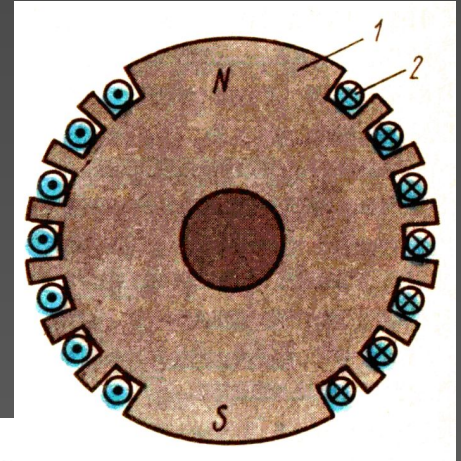
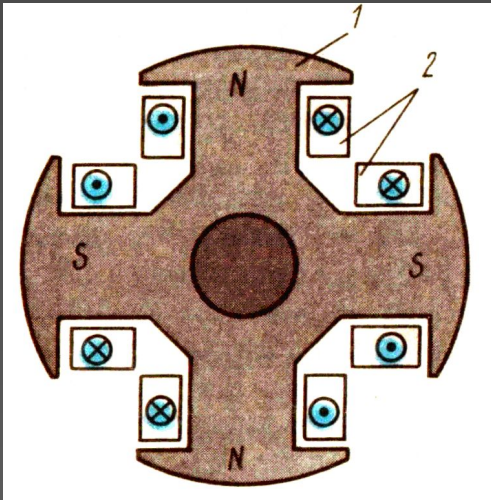
Магнитное поле токов статора, неподвижное относительно вращающегося ротора, взаимодействуя с постоянным током ротора, создает электромагнитный тормозной момент  $M$ , который должен быть уравновешен вращающим моментом первичного двигателя.

Чем больше активная составляющая тока статора  $I_a$ , тем больше мощность, преобразуемая в машине, т. е. электромагнитная мощность  $P_{эм}$  генератора:

$$P_{эм} = 3 \cdot E \cdot I_a = M\omega \quad \omega = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}$$

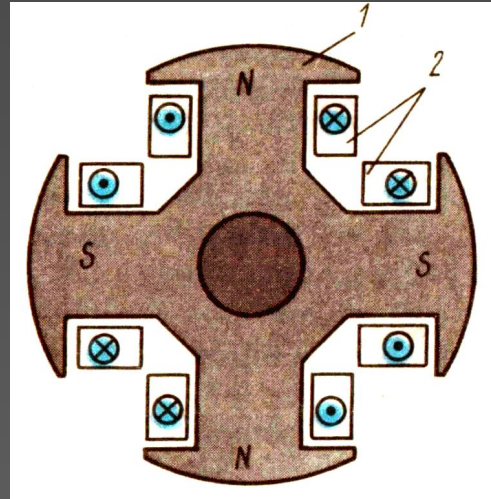
$E$  — ЭДС фазы обмотки статора

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Ротор может быть явнополюсным и неявнополюсным. Явнополюсный ротор (рис. а) используют в машинах с четырьмя и большим числом полюсов.

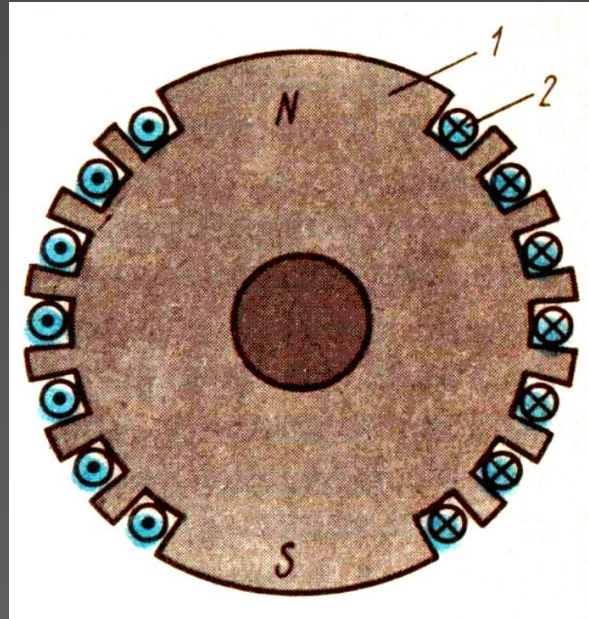
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Сердечники 1 делают либо массивными из стальных поковок, либо набирают из листов электротехнической стали. Их крепят к втулке вала или (при большом числе полюсов) к ободу крестовины. Обмотки возбуждения 2 выполняют в виде цилиндрических катушек из полосовой меди, которые укрепляют на сердечниках полюсов.

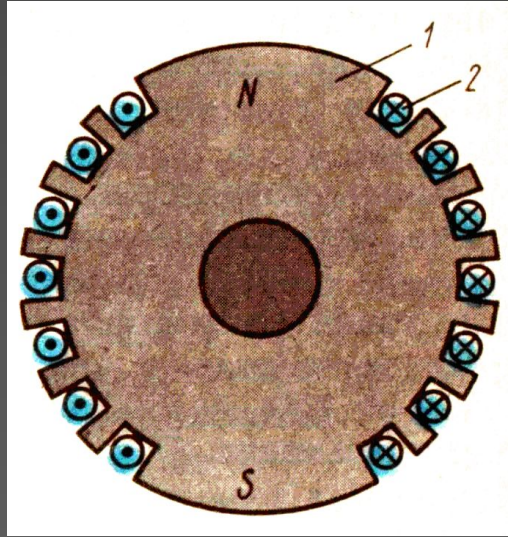


# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



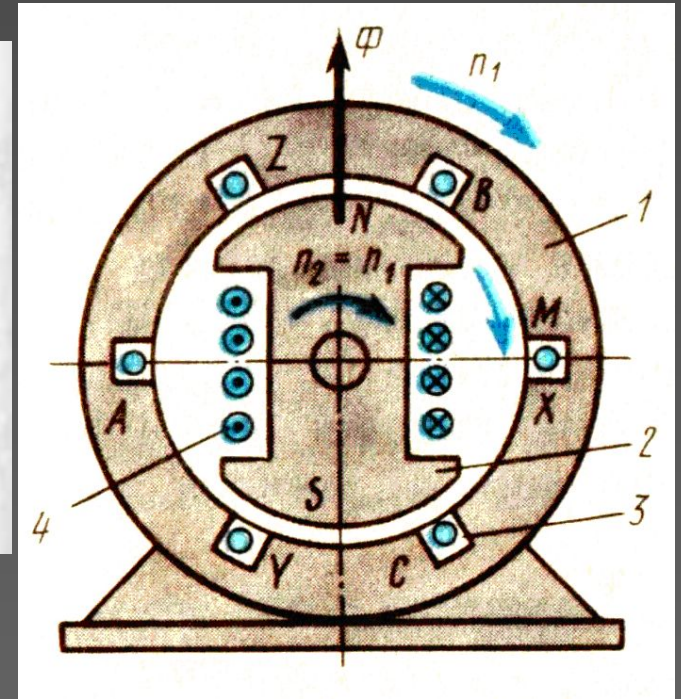
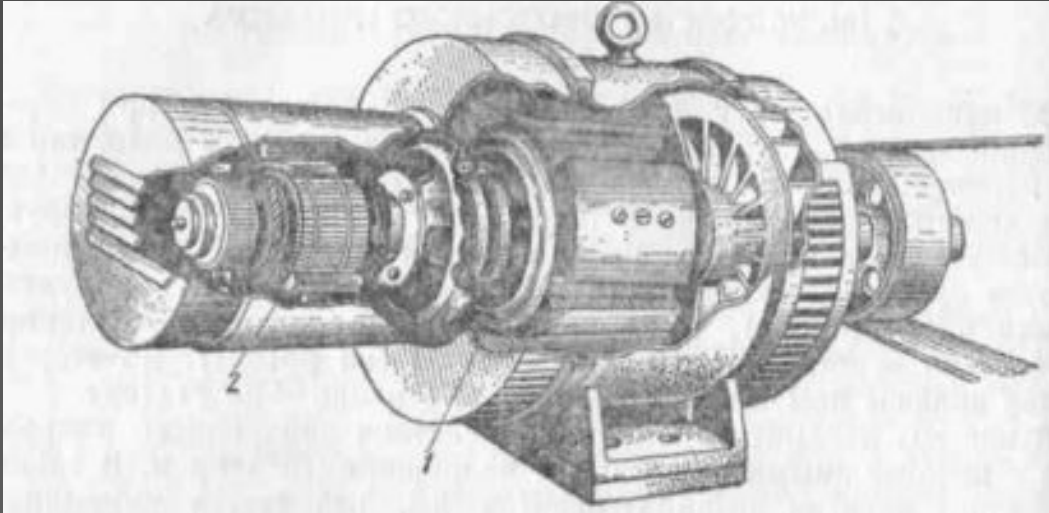
Машины, работающие с частотой вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготавливают с неявнополюсным ротором (рис. б), иначе невозможно обеспечить механическую прочность крепления полюсов 1 и обмотки возбуждения 2. Обмотку возбуждения размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



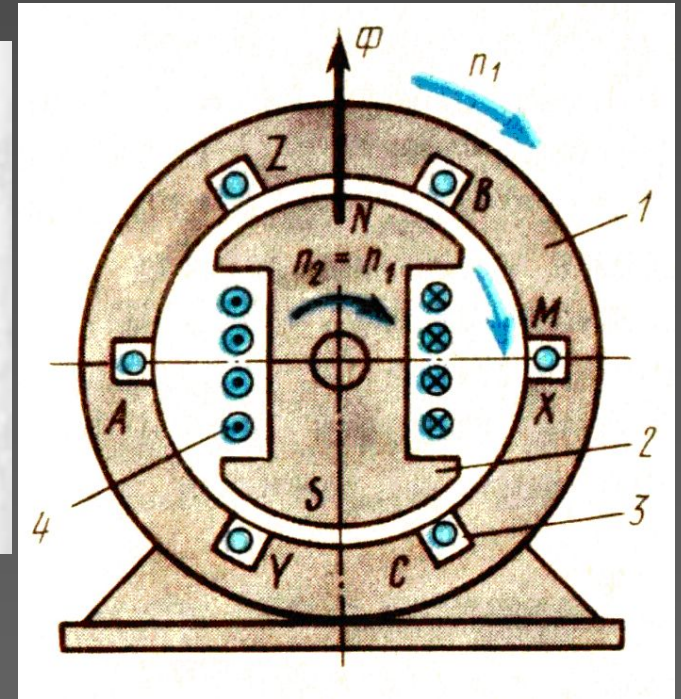
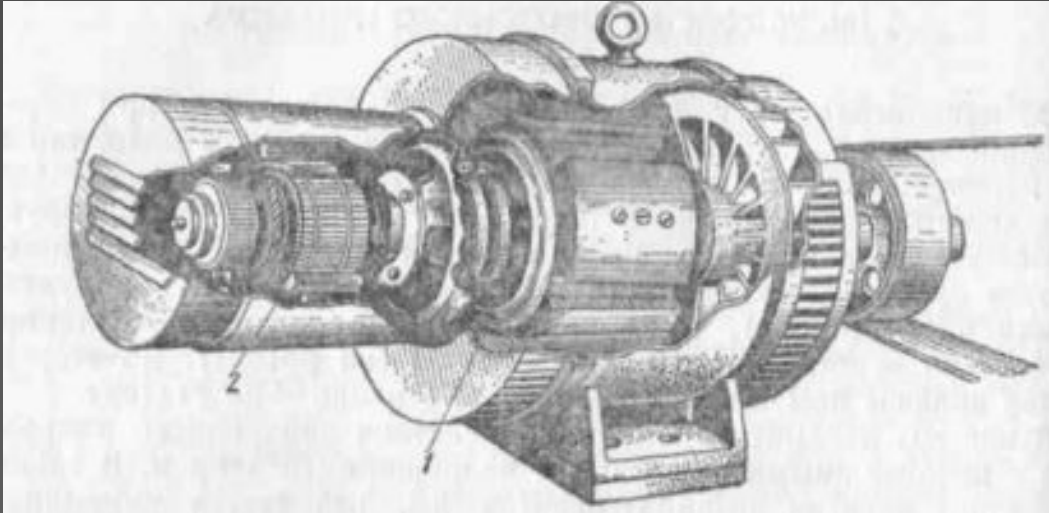
Та или иная конструкция ротора диктуется соображениями механической прочности. У современных генераторов, вращающихся от быстроходных двигателей (паровая турбина), окружная скорость ротора может достигать 100—160 м/сек. Поэтому быстроходные генераторы и имеют неявнополюсный ротор. Скорость вращения быстроходных генераторов составляет 3000 об/мин и 1500 об/мин.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



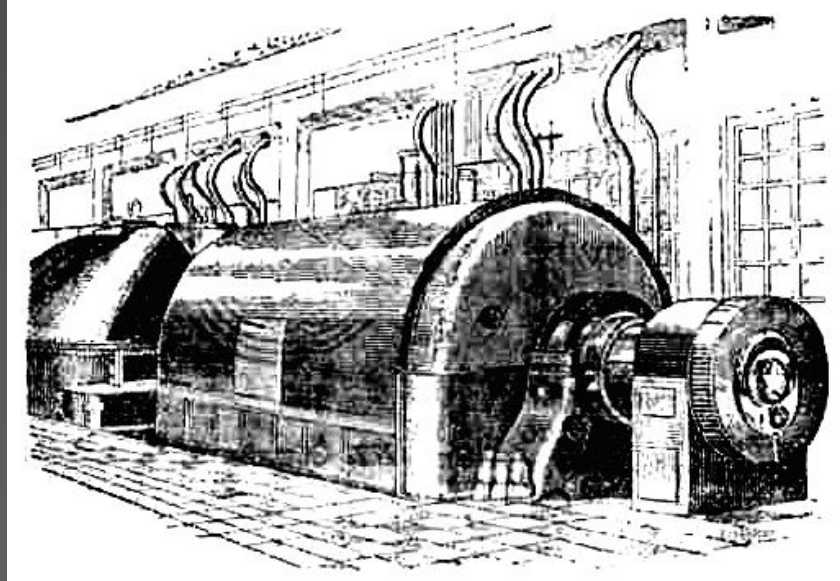
Обмотка возбуждения генератора через кольца и щетки получает питание либо от генератора постоянного тока (возбудителя), связанного с ротором синхронного генератора, либо от выпрямителей, подключаемых к сети. Для мощных синхронных генераторов применяют так называемую бесщеточную систему возбуждения.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



В этой системе в качестве возбудителя используют специальный синхронный генератор, у которого обмотка якоря расположена на роторе машины, а выпрямитель укреплен непосредственно на валу. При этом в цепи обмотки генератора отсутствуют скользящие контакты, что повышает надежность системы.

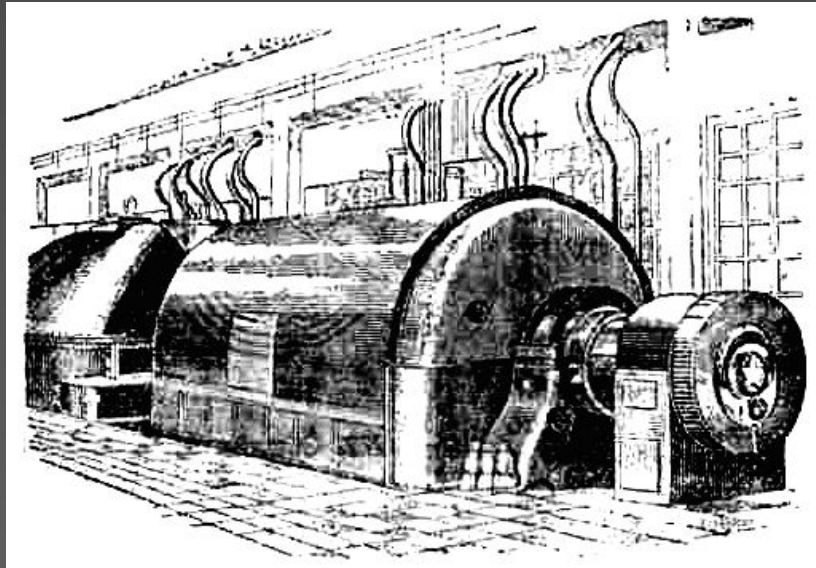
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Синхронные генераторы подразделяются на турбо-, гидро- и дизель-генераторы.

Турбогенераторы приводятся во вращение быстроходными паровыми или газовыми турбинами и выполняются неявнополюсными. Вал в них расположен горизонтально.

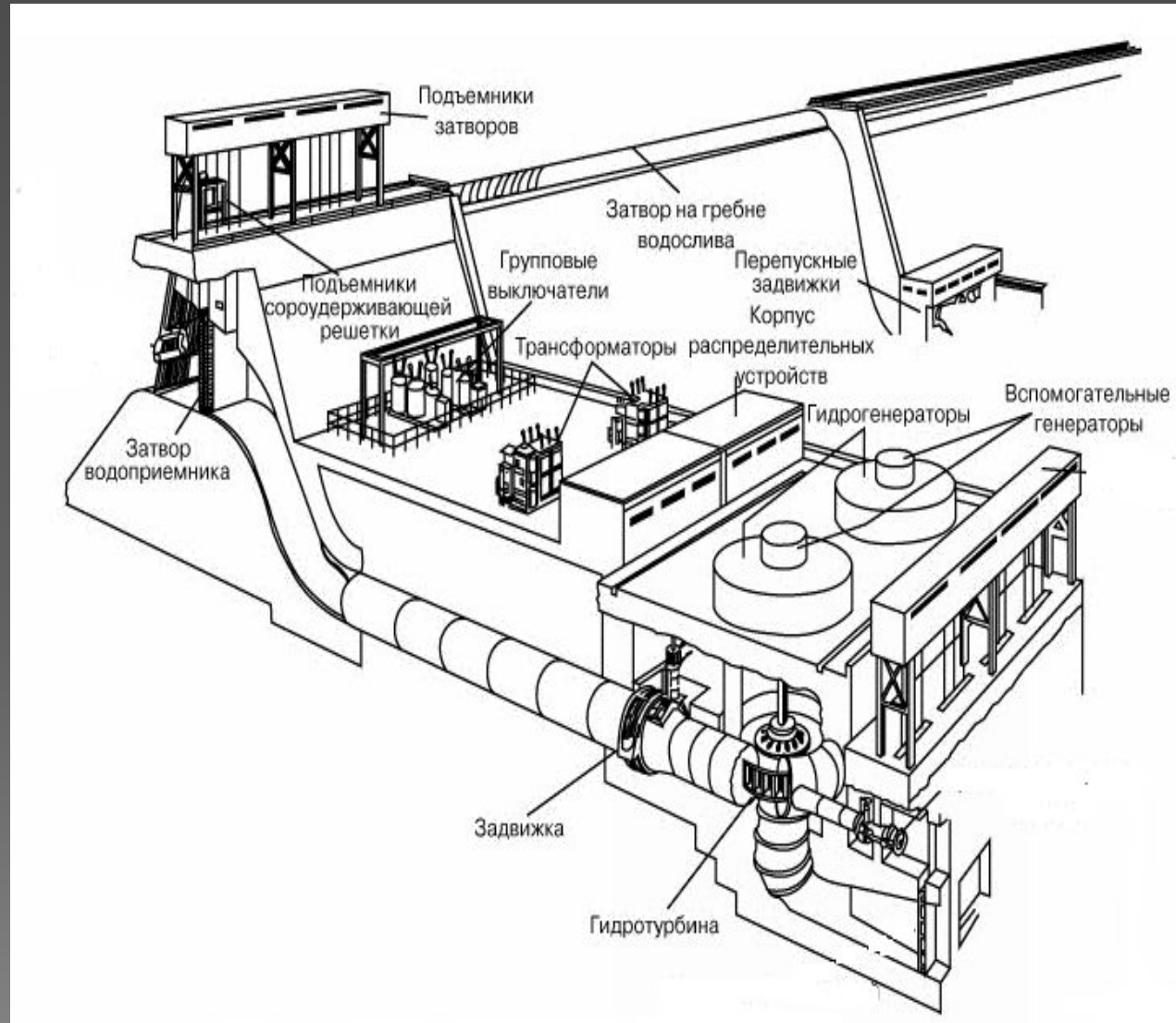
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



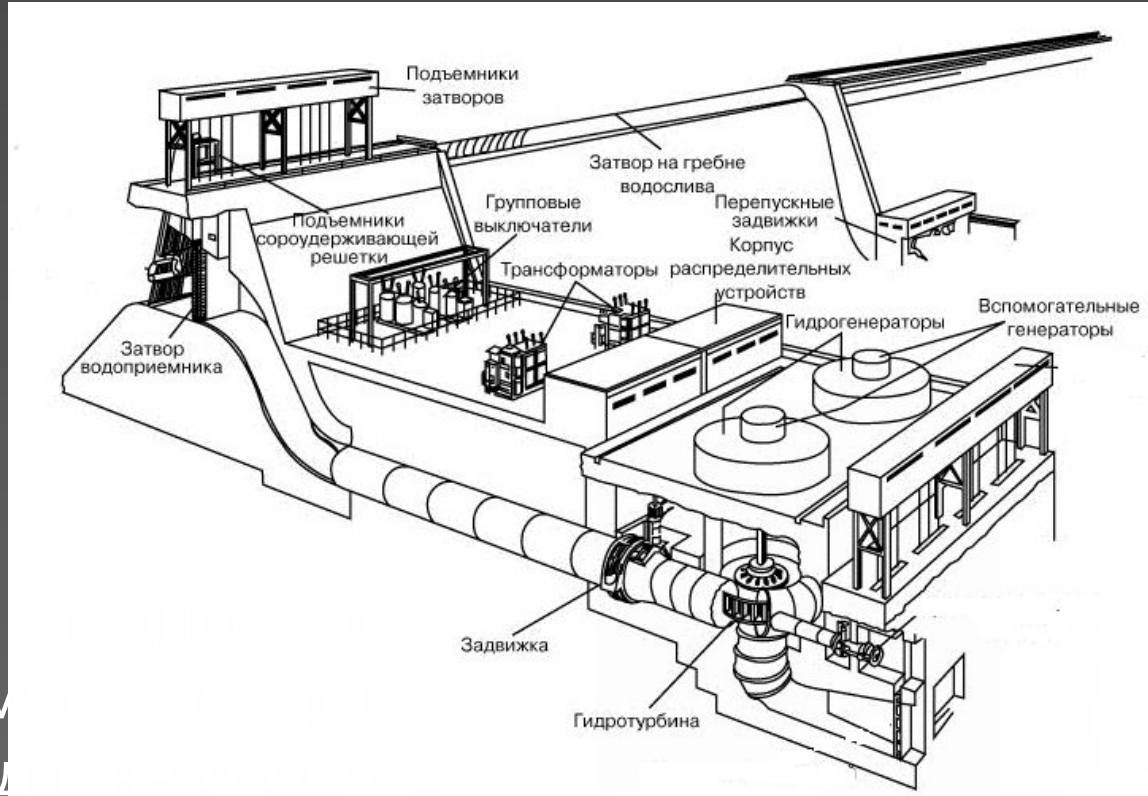
Диаметр ротора по условиям механической прочности ограничен размерами 1 —1,5 м. Предельная длина ротора 7,5—8,5 м; она ограничена допустимым прогибом вала. При заданных ограничениях за счет увеличения электромагнитных нагрузок и повышения интенсивности охлаждения (применения водородного и водяного охлаждения) удалось создать турбогенераторы мощностью 800— 1200 МВт.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Гидрогенераторы приводятся во вращение гидравлическими турбинами, частота вращения которых составляет 50—500 об/мин. Генераторы выполняют с большим числом полюсов и явнополюсными роторами.



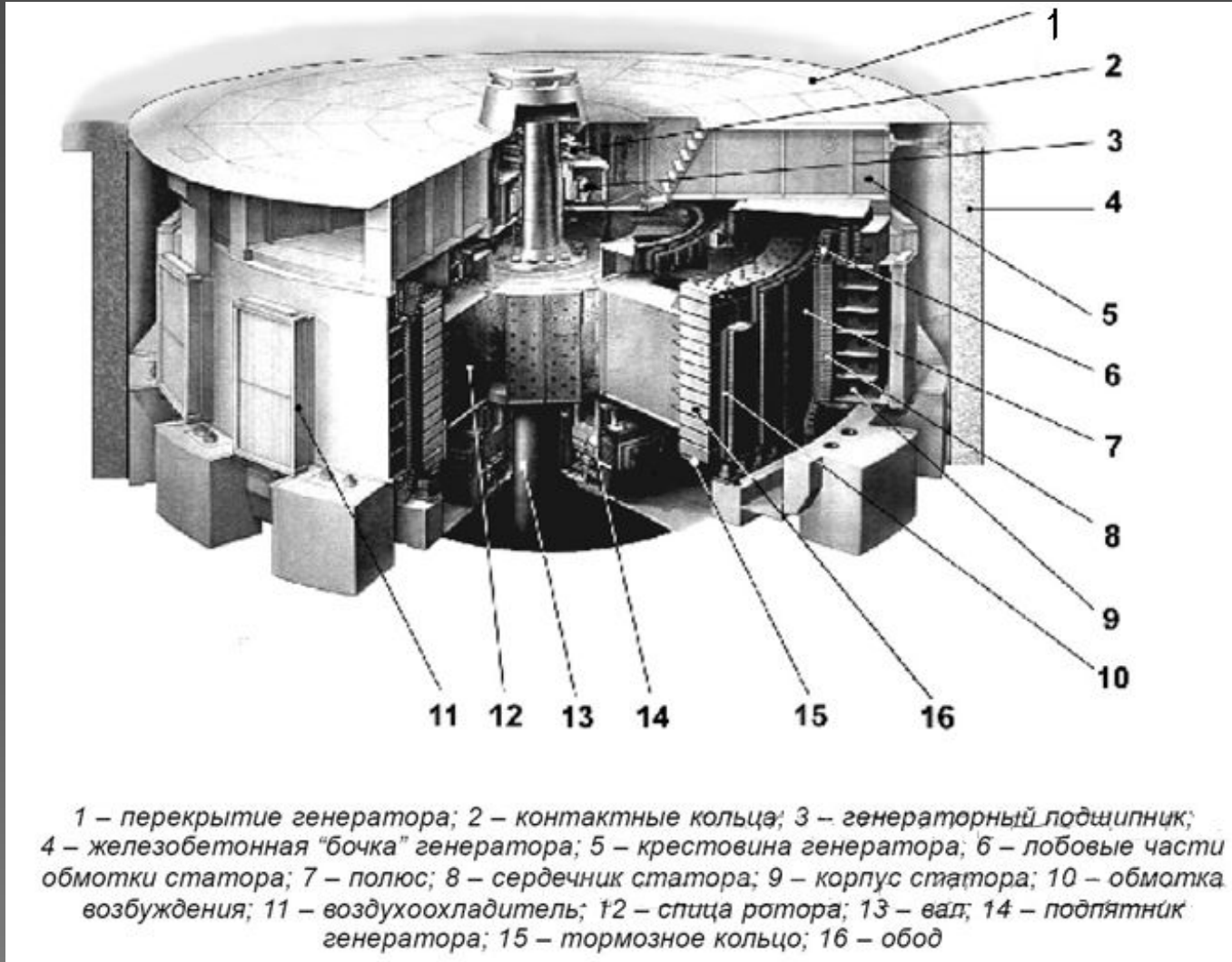
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



В гидрогенераторах более 500 МВт диаметр вала превышает 15 м при длине 2 м. В мощных гидрогенераторах вал располагают вертикально. Турбина находится под генератором и фланцем сочленяется с его валом.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Тихоходный синхронный генератор имеет большое число полюсов и в связи с этим большие размеры.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Дизель-генераторы приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания. Их изготавливают явнополюсными с горизонтальным расположением вала. Мощность таких генераторов бывает от нескольких киловольт-ампер до нескольких мегавольт-ампер при частотах вращения от 100 до 1500 об/мин.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Воздушное охлаждение осуществляется при помощи вентиляторов, укрепленных на валу с обеих сторон ротора (для генераторов мощностью от 1,5 до 50 тыс. *кВт*) или расположенных под машиной в отверстии фундамента (для более мощных генераторов).

Массы холодного воздуха, поступающие для вентиляции, во избежание загрязнения машины пылью проходят через фильтры. При замкнутой системе вентиляции машина охлаждается одним и тем же объемом воздуха. Воздух, пройдя через машину, нагревается и поступает в воздухоохладители, затем снова нагнетается в машину и т. д. Для целей охлаждения служит также система вентиляционных каналов, устроенных в отдельных частях машины.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Синхронные генераторы электростанций работают обычно параллельно с сетью. На время профилактических осмотров, ремонта или просто на время уменьшения нагрузки синхронный генератор может быть отключен от сети. Необходимым условием включения генератора на параллельную работу с сетью является его синхронизация, т. е. достижение совпадения чередования фаз, частот, начальных фаз и значений напряжения сети и генератора.

Момент совпадения фаз контролируют синхроноскопами. Для включения генераторов на параллельную работу используют автоматическую синхронизацию, которая позволяет регулировать напряжения и частоты так, как это необходимо.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Широкое распространение получил метод самосинхронизации, сущность которого заключается в том, что генератор включают в сеть невозбужденным при частоте вращения ротора, близкой к синхронной. Затем включают ток возбуждения и ротор генератора втягивается в синхронизм.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Качество электрической энергии, вырабатываемой генераторами переменного тока, оценивается: частотой ЭДС, которая должна быть строго равна заданному значению  $f$ ; величиной напряжения на зажимах, которое должно быть равно заданной величине  $U_n$ ; форма кривой ЭДС должна быть возможно ближе к синусоиде.

Заданное значение частоты ЭДС обеспечивается постоянством скорости вращения первичного двигателя. Необходимая величина напряжения  $U_n$  достигается регулировкой тока возбуждения. Синусоидальная форма кривой ЭДС достигается в явнополюсных машинах увеличением воздушного зазора под краями полюсных наконечников и другими мерами. В неявнополюсных машинах синусоидальный характер ЭДС, индуктированной в обмотке статора, обеспечивается соответствующим распределением витков обмотки возбуждения в пазах ротора.

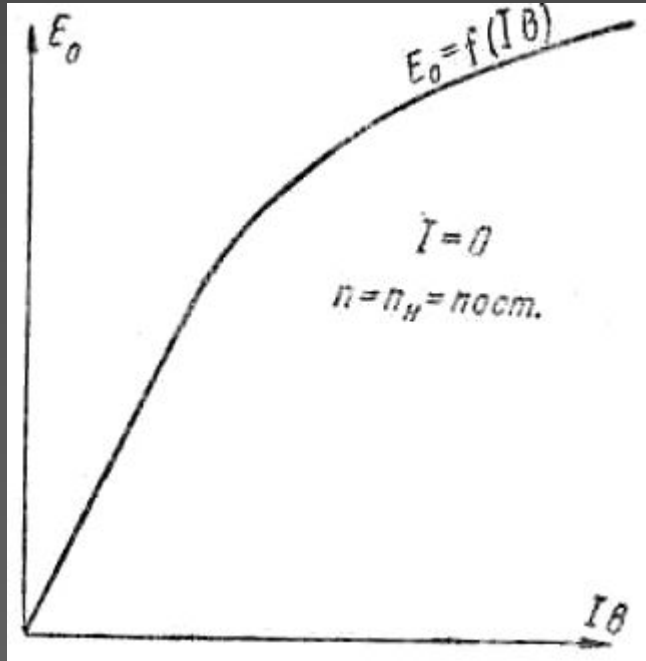
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Энергетическое состояние синхронного генератора характеризуется углом  $\theta$  — углом поворота оси ротора относительно оси вращающегося магнитного поля. Чем больше нагрузка, тем больше угол  $\theta$ .

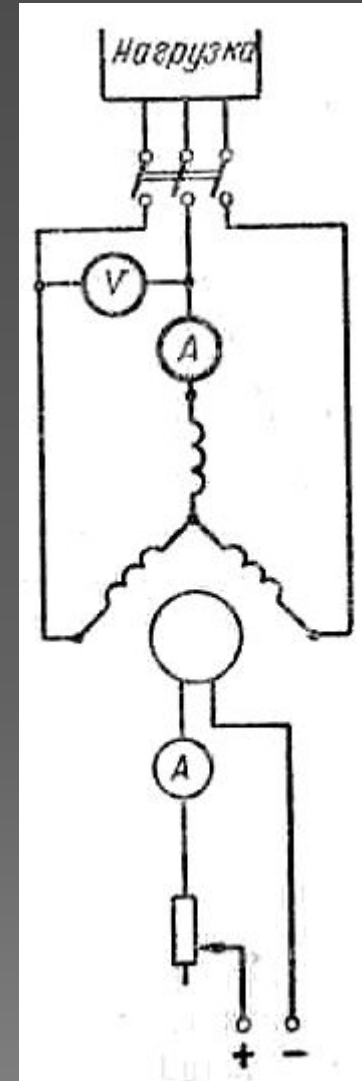
Для увеличения активной мощности, выдаваемой генератором в сеть, следует увеличить момент первичного двигателя (подать больше пара в паровую турбину или воды в гидравлическую). Ротор в этом случае приобретает некоторое ускорение, угол возрастает, возрастает тормозной момент и устанавливается новое состояние равновесия при новом большем значении угла.

При увеличении возбуждения генератора возрастают ЭДС и ток, выдаваемый генератором в сеть. Однако это увеличение идет за счет реактивной составляющей тока, т. е. растет реактивная мощность.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

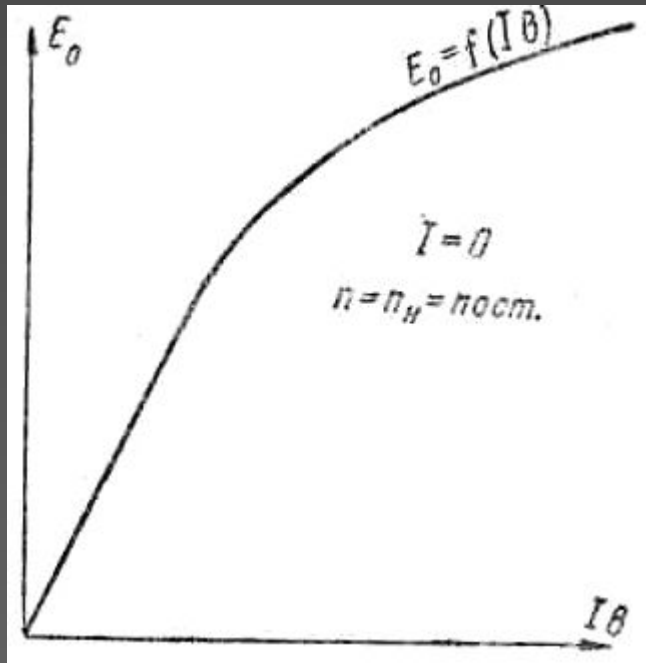


Характеристика холостого хода синхронного генератора представляет зависимость индуктированной в статоре ЭДС  $E_0$  от тока возбуждения  $I_b$  при разомкнутой внешней цепи машины



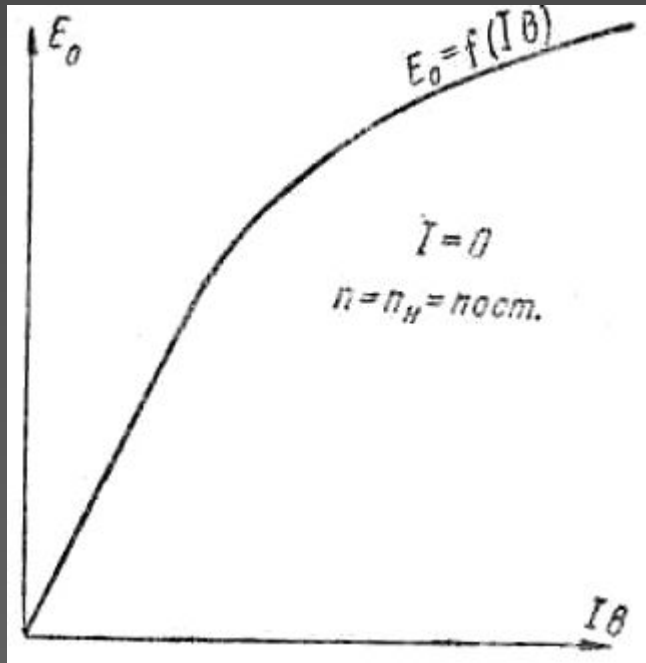


# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Генератор приводится во вращение с синхронной скоростью, соответствующей номинальной частоте генератора. Увеличивают при помощи реостата ток возбуждения, отмечая показания амперметра в цепи возбуждения

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



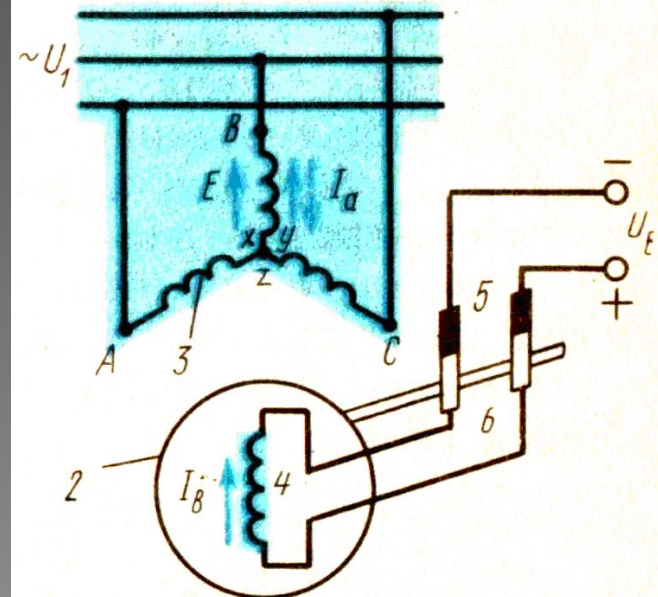
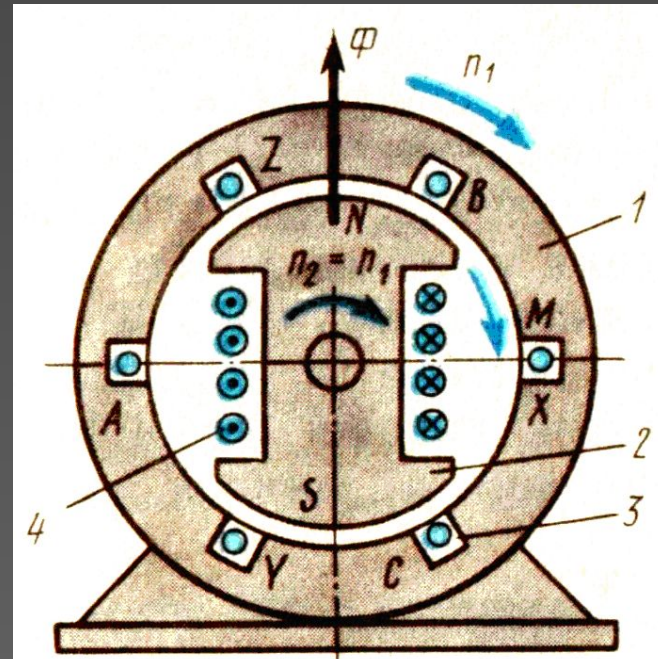
По показаниям вольтметра, включенного на зажимы обмотки статора, определяют величину индуктированной ЭДС  $E_0$ .

Прямолинейная часть характеристики указывает на пропорциональность между индуктированной ЭДС и током возбуждения.

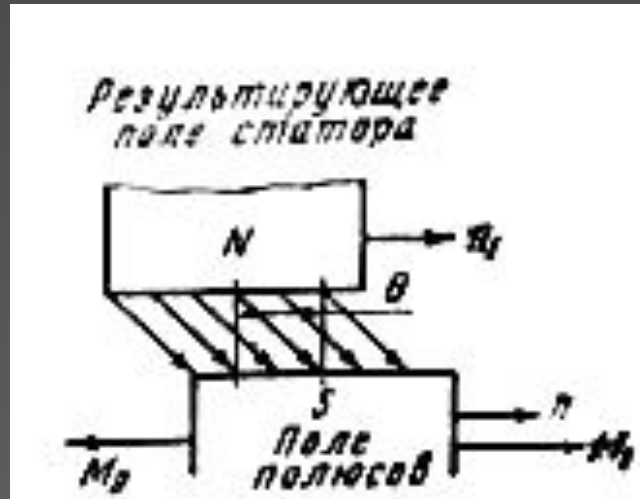
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Принципиальная схема устройства трехфазного синхронного двигателя такая же, как и генератора (см. рис.). Его трехфазную статорную обмотку подключают к сети трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения подают постоянный ток.

Частота вращения ротора синхронного двигателя равна частоте вращения магнитного поля, т. е. не зависит от нагрузки. Иначе говоря, двигатель имеет абсолютно жесткую механическую характеристику.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



При увеличении нагрузки двигателя возрастает угол  $\theta$  между осями ротора и поля (в режиме двигателя ротор следует за полем). По достижении максимального (опрокидывающего) момента ротор «выпадает из синхронизма» и останавливается.

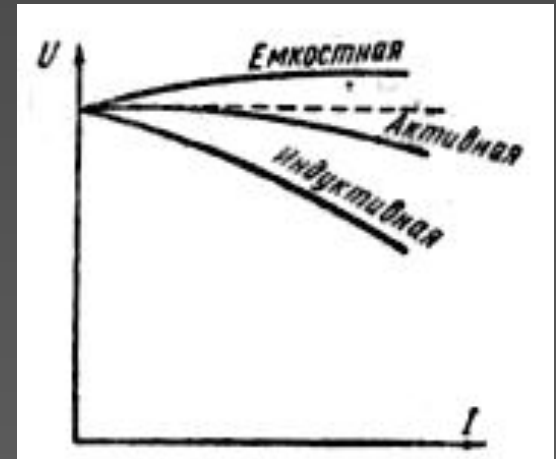
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных— квадрату напряжения.

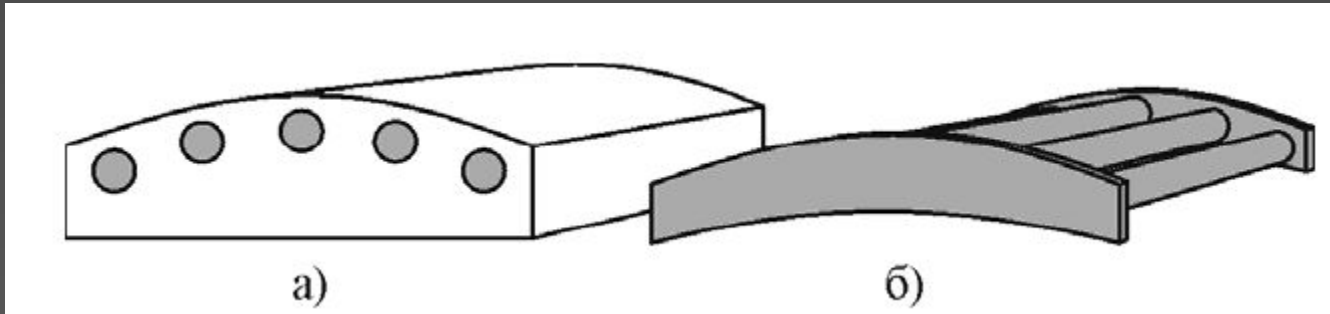
$$M \sim U$$

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

На рис. изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках. Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных скорости вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется не одинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ



Для разгона синхронного двигателя применяют асинхронный пуск. Для этого на роторе имеется специальная короткозамкнутая пусковая обмотка: медные или латунные стержни, заложенные в полюсные наконечники и замкнутые накоротко торцевыми кольцами. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной (95—97% синхронной скорости), в обмотку возбуждения подается постоянный ток и ротор втягивается в синхронизм.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Недостатком асинхронного пуска является большой пусковой ток (в 5—7 раз больше номинального тока). Пусковой ток мощных синхронных двигателей вызывает значительное падение напряжения в сети, а это отражается на работе других потребителей. Для уменьшения пускового тока применяют пуск при пониженном напряжении с помощью автотрансформатора.

В настоящее время применяют почти исключительно асинхронный пуск синхронных двигателей ввиду его простоты и надежности. Существуют также схемы автоматического асинхронного пуска синхронных двигателей.



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10—12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая ЭДС, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала. Создание ЭДС большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой скоростью относительно неподвижного ротора и с большой скоростью пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Если обмотку возбуждения замкнуть накоротко при пуске в ход, то двигатель при пуске под нагрузкой может развить скорость, близкую к половине синхронной, и войти в синхронизм не сможет.

Достоинством синхронных двигателей помимо абсолютно жесткой механической характеристики является их способность работать с  $\cos \varphi = 1$  и даже с опережающим током, т.е. генерировать реактивную мощность. Для этого увеличивают возбуждение двигателей.

Применение синхронных двигателей позволяет повысить  $\cos \varphi$  в системе и тем самым понизить потери при передаче электроэнергии.

Для повышения  $\cos \varphi$  в системе применяют также синхронные компенсаторы — перевозбужденные синхронные двигатели облегченной конструкции, работающие вхолостую.

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

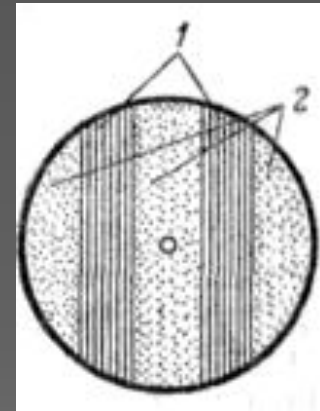
Повышение  $\cos \phi$  снижает потребление реактивной мощности электроустановок предприятия и уменьшает стоимость электроэнергии.

Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения  $\cos \phi$  предприятия. Таким образом, компенсатор является генератором реактивной мощности.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно.

Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя.

Ротор: 1- мягкая сталь, 2 - алюминий



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

В синхронных машинах имеют место электрические потери в роторе и статоре, магнитные потери в сердечнике статора, механические потери на вентиляцию и трение вращающихся частей.

В двигателях большой мощности кпд достигает 0,95—0,98; кпд мощных генераторов очень велик, достигая 0,99 при мощности ~ 1000 МВт.

Основным недостатком синхронных двигателей является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока.

Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях. Поэтому при малых мощностях синхронные двигатели с возбуждением постоянным током не находят применения.