

Машины переменного тока ч.2

(продолжение)

Синхронные машины (СМ). Общие сведения.

Синхронные генераторы (СГ)

Синхронные двигатели (СД)

Синхронные компенсаторы (СК)

Устройство синхронной трёхфазной машины

Системы возбуждения СМ

Принцип действия СГ и СД

Разновидности СМ большой мощности

Общие сведения о СМ

- СМ являются машинами переменного тока.
- СМ применяют в качестве генераторов и двигателей.
- В СМ при установившемся режиме работы ротор и магнитное поле статора вращаются с одинаковой скоростью $n_2 = n_1$.
- СМ являются обратимыми машинами, т. е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы

- **СГ установлены почти на всех электростанциях и служат основным источником электрической энергии для промышленных сетей энергоснабжения.**
- **СГ получают механическую мощность и приводятся во вращение гидравлическими, паровыми, газовыми турбинами или, при меньшей мощности, — дизелями и двигателями внутреннего сгорания.**
- **СГ служат также источником автономного электроснабжения на транспорте, на передвижных электростанциях, на строительных машинах и другой технике.**

Синхронные двигатели

- СД применяют там, где требуется постоянство частоты вращения.
- Они находят широкое применение в качестве привода прокатных станов на металлургических заводах, компрессоров и насосов на газо - и нефтеперекачивающих станциях магистральных газопроводов, в промышленности строительных материалов.
- Специальные СД малой мощности используют в устройствах с программным управлением, самопишущих приборах и др.

Синхронные компенсаторы

- **Весьма ценным качеством СД является их способность работать при токе, опережающим по фазе питающее напряжение.**
- **Такие двигатели называют синхронными компенсаторами и используют для улучшения параметров, в частности $\cos \varphi$ электрических сетей.**

Устройство синхронной машины

- **СМ 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 СМ аналогичен статору трехфазного АД и содержит шихтованный цилиндрический сердечник из электротехнической стали с пазами на внутренней поверхности, в которых располагают фазы трехфазной обмотки статора.**
- **Концы обмотки статора выведены на клеммную панель.**

Общий вид статора синхронной машины

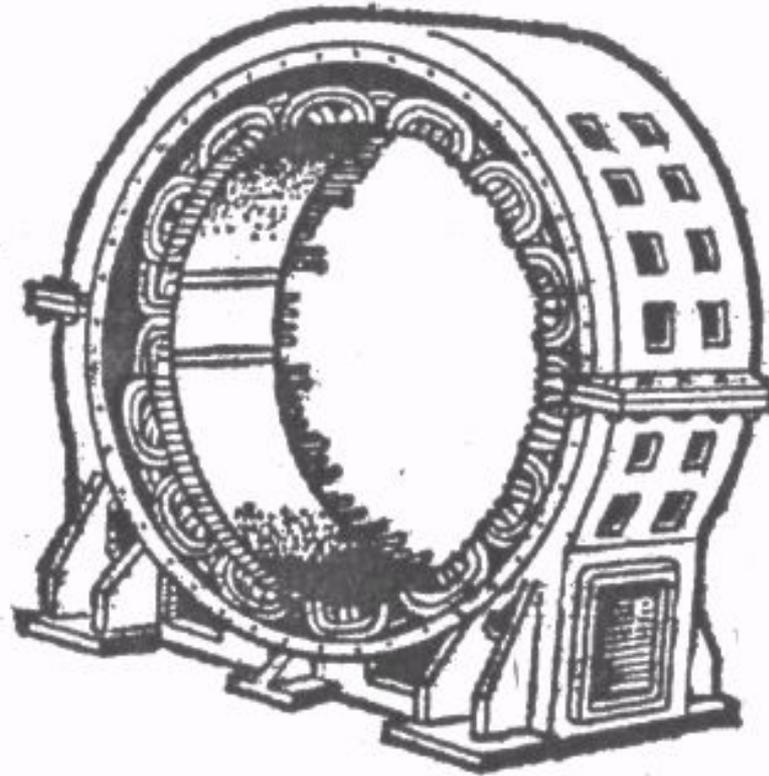


Рис.1.Общий вид статора СМ

Ротор синхронной машины

- **Ротор СМ представляет собой электромагнит постоянного тока, который образует магнитное поле, вращающееся вместе с ротором.**
- **На роторе располагают обмотку возбуждения, концы которой через специальные медные кольца на роторе и неподвижные графитовые щетки подсоединяют к источнику постоянного тока, называемому возбудителем.**

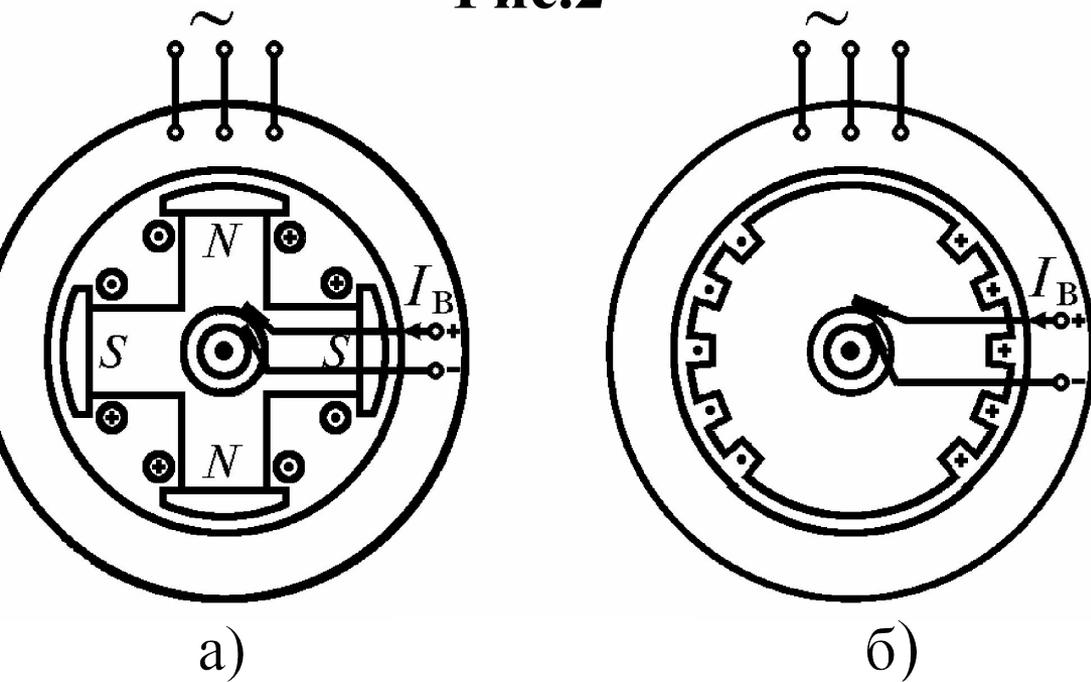
Типы роторов синхронной машины

Роторы СМ бывают двух типов:

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

Устройство синхронной машины

Рис.2



- Вращающийся ротор – служит индуктором.
- Неподвижный статор – выполняет функции якоря,

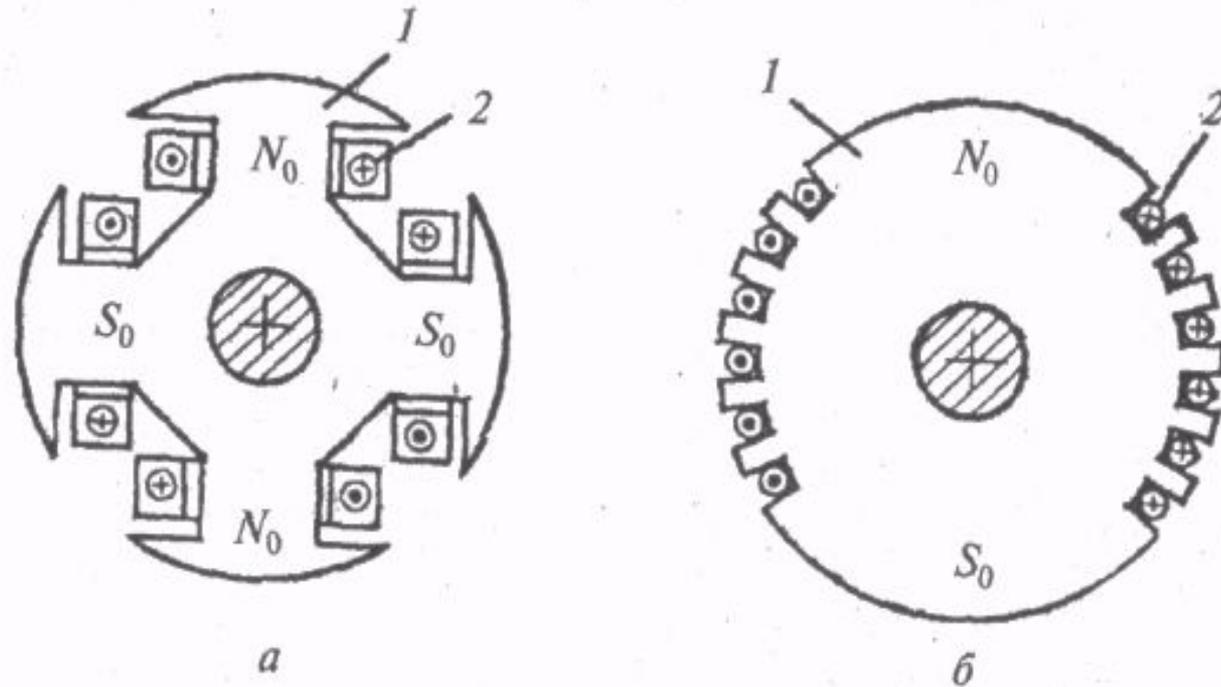
Два типа роторов:

1. Явнополюсный а)
2. Неявнополюсный б)

Явнополюсный ротор – имеет выступающие полюсы. Применяют в машинах с частотой вращения до 1000, 1500 *об/мин.*

Неявнополюсный ротор – имеет вид цилиндра с пазами. Применяют при скоростях 1500 и 3000 *об/мин.*

Поперечное сечение а) явнополюсного и б) неявнополюсного ротора с обмоткой возбуждения (рис.6)



1 – башмак сердечника полюса ротора; 2 – обмотка возбуждения ротора,

Устройство явнополюсного ротора

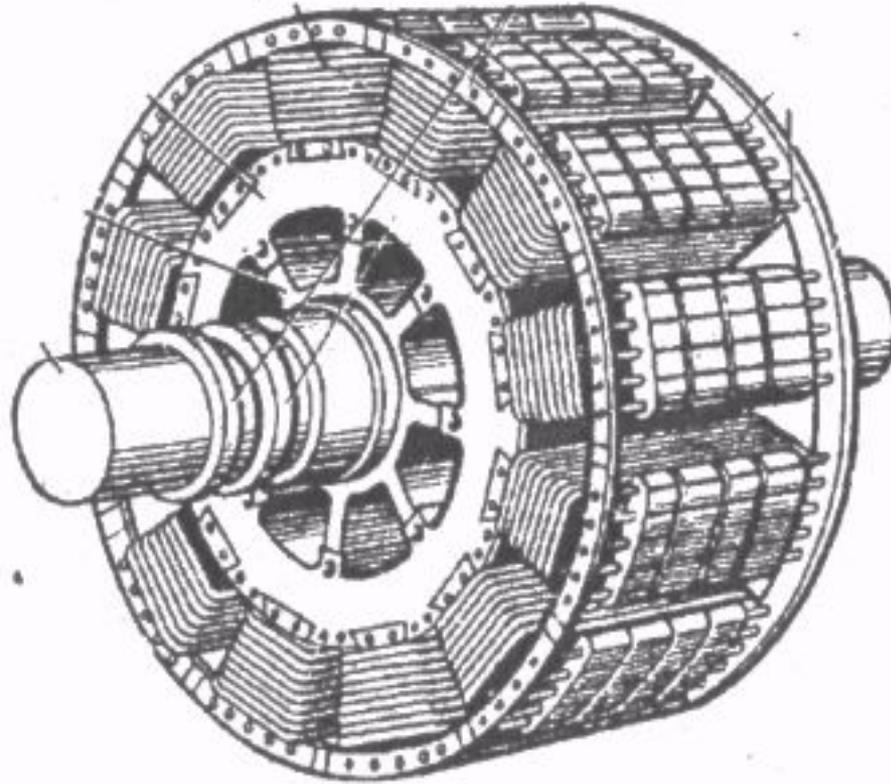


Рис.3.Явнополюсный ротор

Роторы с явно выраженными полюсами

- **Роторы с явно выраженными полюсами применяют в сравнительно тихоходных машинах, число оборотов которых не превышает 1000 об/мин.**
- **Такие роторы, например, приводят в действие тихоходные водяные турбины ГЭС.**
- **На полюсах роторов размещают катушки обмотки возбуждения.**
- **У СД с такими роторами витки пусковой к.з. обмотки типа «беличья клетка» закладывают в башмаки полюсов ротора и по торцам замыкают короткозамыкающими кольцами.**
- **Башмаки – это расширяющиеся части сердечников полюсов ротора, обращённые к статору.**

Общий вид неявнополюсного ротора

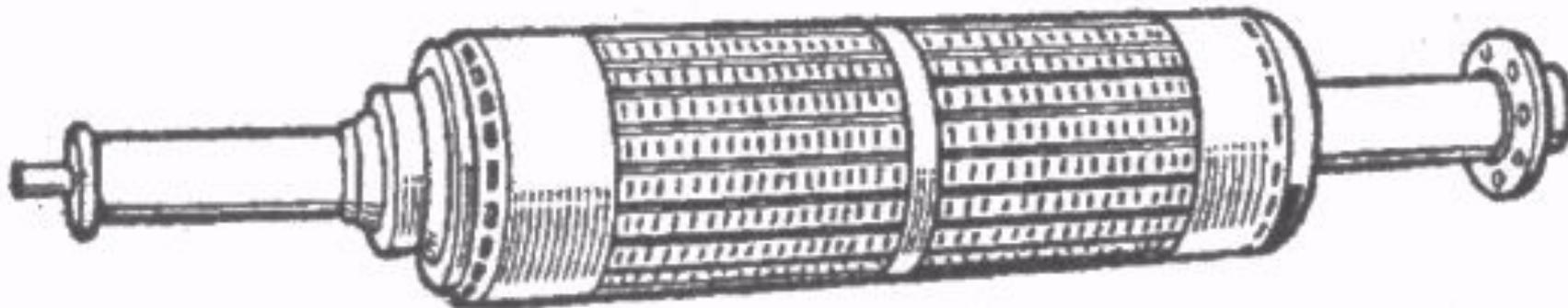


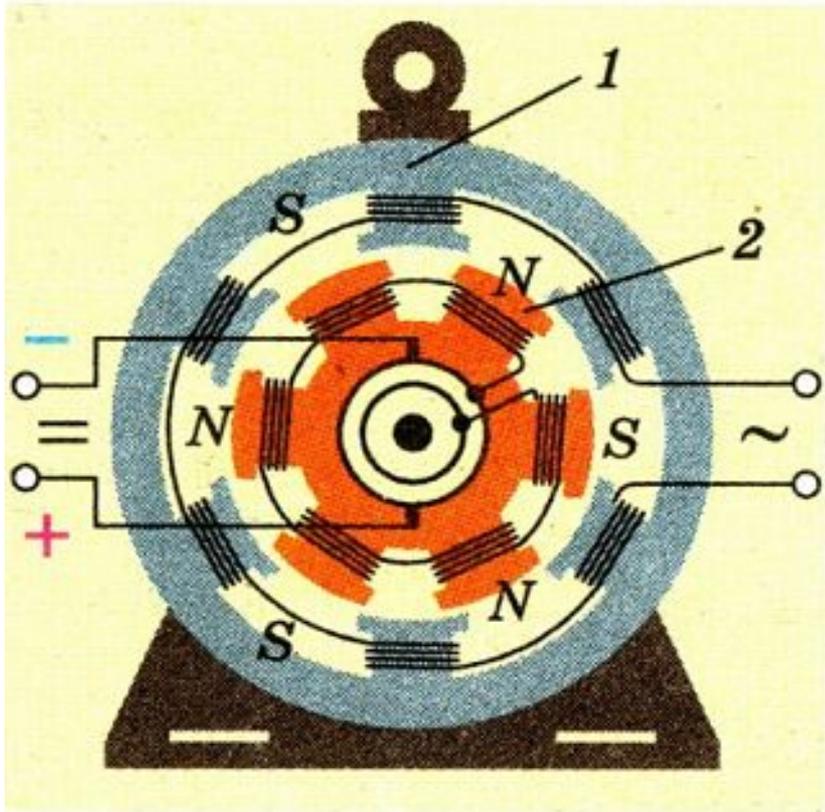
Рис.4. Неявнополюсный ротор

Ротор с неявно выраженными полюсами

- **Ротор с неявно выраженными полюсами обладает повышенной динамической прочностью, так как его выполняют из цельной стальной поковки цилиндрической формы.**
- **На внешней поверхности поковки фрезеруют пазы, в которые закладывают обмотку возбуждения.**

Особенности синхронных машин

СМ проектируют и изготавливают так, чтобы количество полюсов магнитного поля ротора и поля, создаваемого обмоткой статора, было одинаковым.

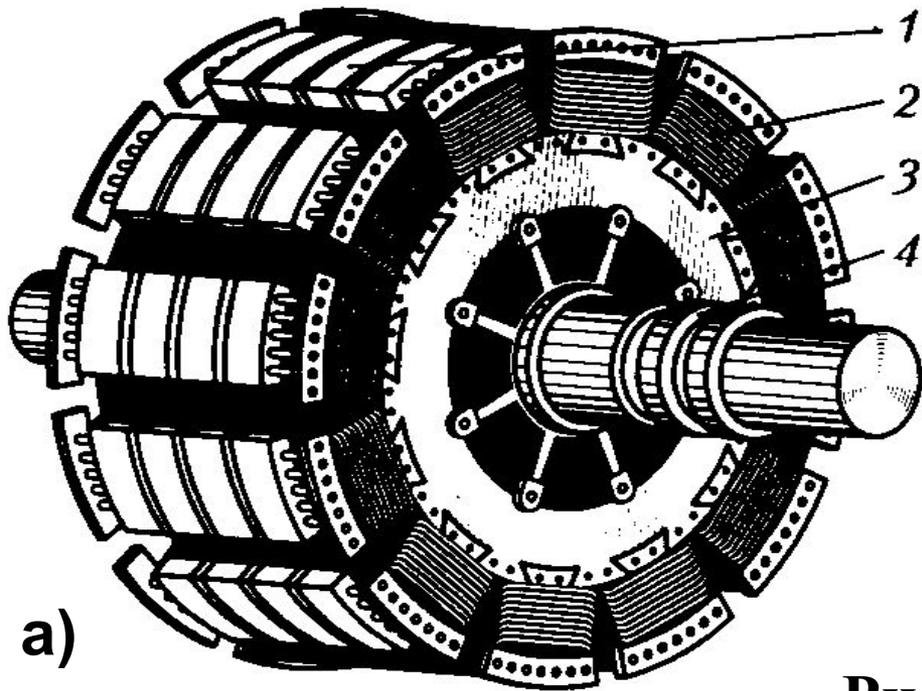


Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи.

Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

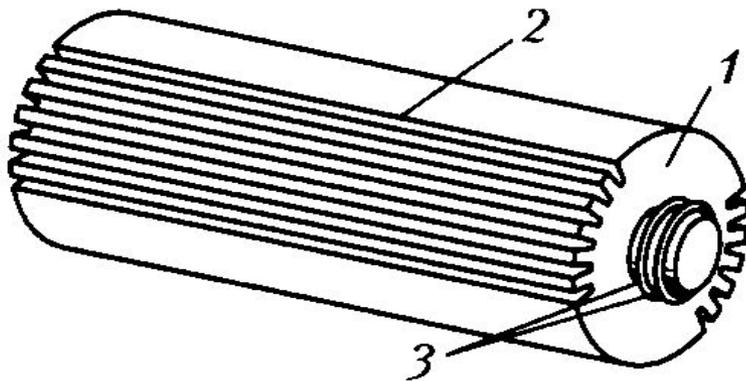
Ротор СМ представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные кольца и щетки от внешнего источника (клеммы слева на рис.5) Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянных магнитов.

Рис.5. Поперечный разрез СМ



а)

Рис.7. Вид а) явнополюсного и
б) неявнополюсного ротора



б)

Возбуждение синхронных машин

Основным способом возбуждения СМ 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 применяли специальные генераторы постоянного тока независимого возбуждения, называемые возбудителями (В) (рис.8,а), обмотка возбуждения которого (ОВ) получала питание постоянным током от другого генератора (параллельного возбуждения), называемого подвозбудителем (ПВ). Ротор синхронной машины и якорь возбудителя и подвозбудителя располагаются на общем валу и вращаются одновременно.

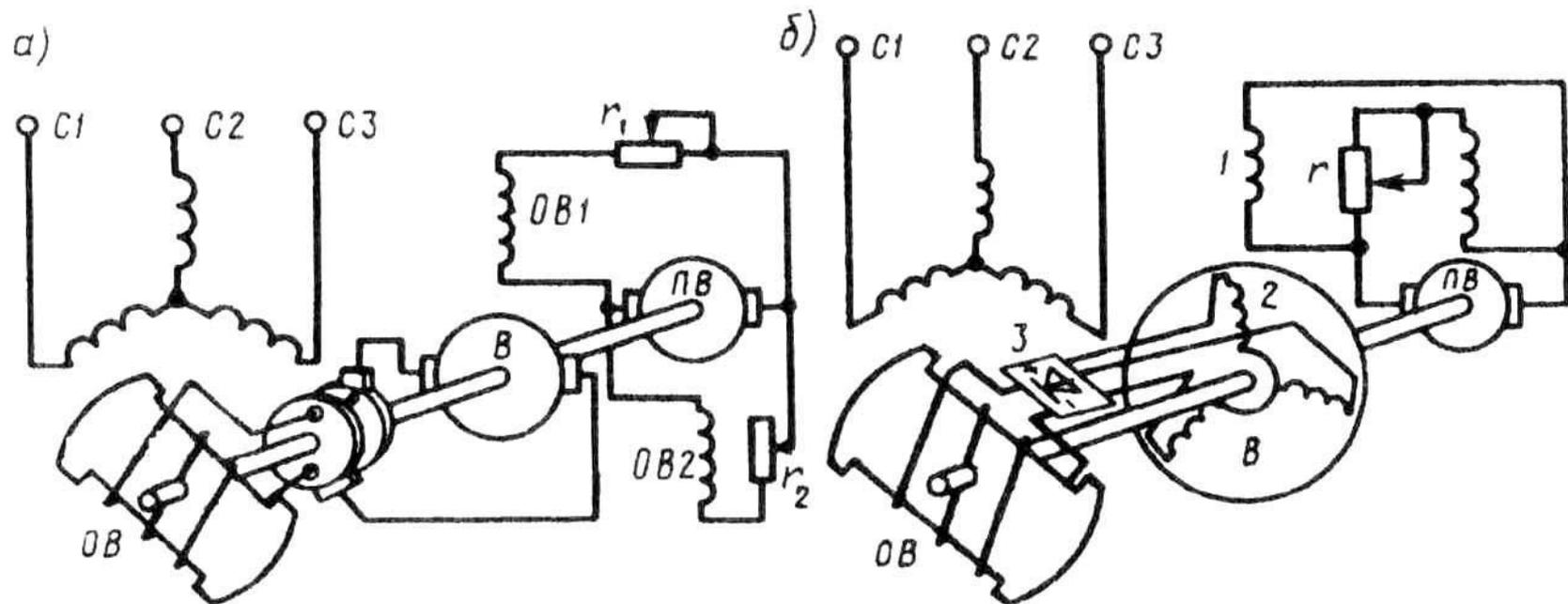


Рис.8. Контактная (а) и бесконтактная (б) системы электромагнитного возбуждения СГ

Находит применение в СГ бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе.

В качестве возбудителя в этом случае применяют генератор переменного тока (рис. 8, б), у которого обмотка 2, в которой наводится ЭДС (обмотка якоря), расположена на роторе, а обмотка возбуждения 1 расположена на статоре.

В результате обмотка якоря возбудителя и обмотка возбуждения СМ оказываются вращающимися, и их электрическое соединение осуществляется непосредственно, без контактных колец и щеток.

Но так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включают полупроводниковый преобразователь 3, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения СМ и обмоткой якоря возбудителя.

Питание постоянным током обмотки возбуждения 1 возбудителя осуществляют от подвозбудителя (ПВ) — генератора постоянного тока.

Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения СМ позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В СГ, в том числе гидрогенераторах получил распространение принцип самовозбуждения (рис. 9, а), когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора СГ и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь (ПП) преобразуется в энергию постоянного тока.

Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины.

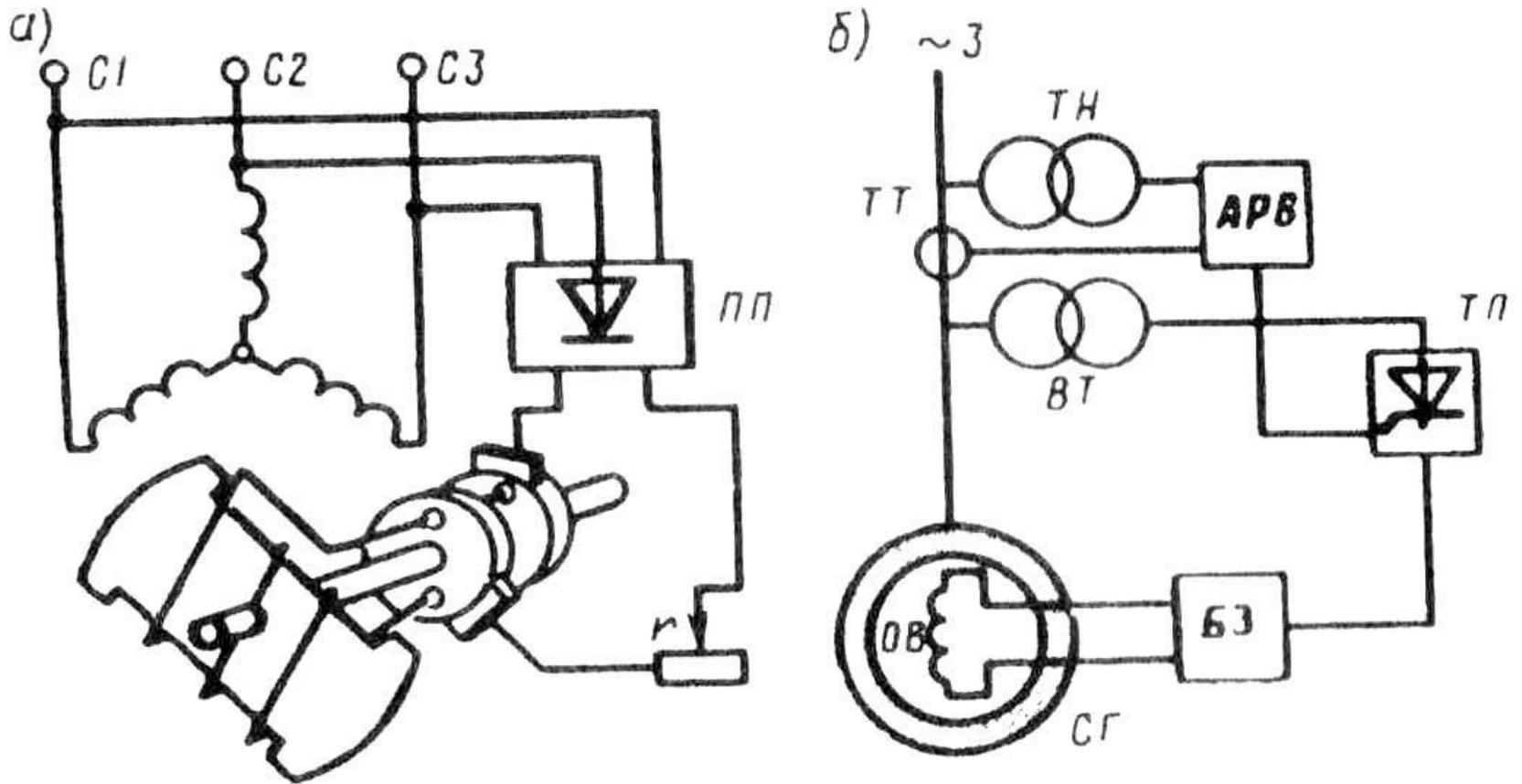


Рис. 9. Принцип самовозбуждения СГ

На рис. 9,б представлена структурная схема автоматической системы самовозбуждения СГ с выпрямительным трансформатором (ВТ) и тиристорным преобразователем (ТП), через которые электроэнергия переменного тока из цепи статора СГ после преобразования в постоянный ток подаётся в обмотку возбуждения.

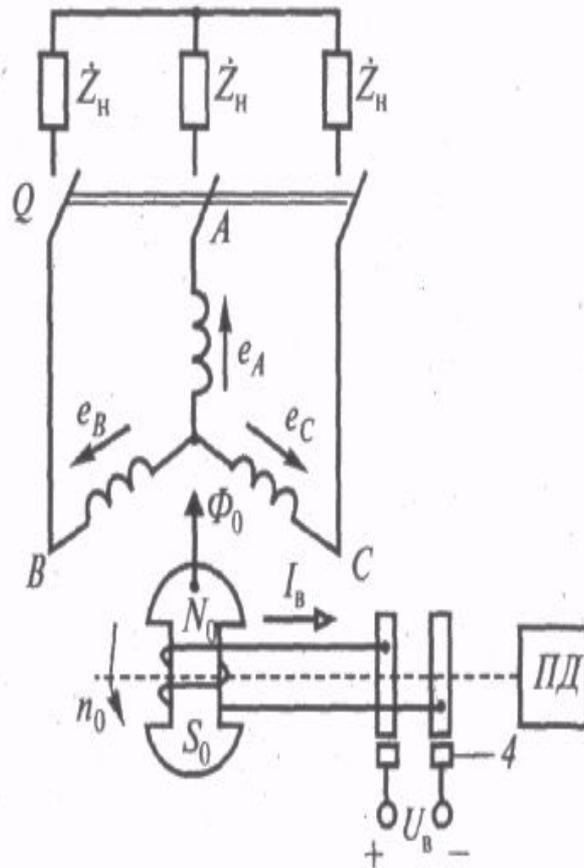
Управление тиристорным преобразователем осуществляют посредством автоматического регулятора возбуждения АРВ, на вход которого поступают сигналы напряжения на выходе СГ (через трансформатор напряжения ТН) и тока нагрузки СГ (от трансформатора тока ТТ).

Схема содержит блок защиты БЗ, обеспечивающий защиту обмотки возбуждения и тиристорного преобразователя ТП от перенапряжений и токовой перегрузки.

Принцип действия. СМ

Принцип действия СГ

Работа машины генератором



На обмотку ротора
подают постоянный
ток от возбuditеля.
Образуется постоянное
магнитное поле ротора
с полюсами

N_0 и S_0

Рис.10. Эл схема работы СМ генератором

- Ротор вместе обмоткой возбуждения приводят во вращение с постоянной частотой n_0 приводным двигателем ПД, создающим вращающий момент $M_{\text{п.дв.}}$.
- При этом вращающееся магнитное поле ротора поочередно пересекает проводники фазных обмоток статора $A - X$, $B - Y$, $C - Z$ и по закону электромагнитной индукции наводит в них переменные ЭДС.

$$\begin{aligned}e_A &= E_{mA} \sin \omega t, \\e_B &= E_{mB} \sin (\omega t + 120^\circ), \\e_C &= E_{mC} \sin (\omega t + 240^\circ) = E_{mC} \sin (\omega t - 120^\circ),\end{aligned}$$

Рассмотрим, как образуются эти ЭДС:

- **Наведенная ЭДС в одном проводнике фазы**
- $$e = B l v,$$
- **где B - магнитная индукция в воздушном зазоре;**
- **l - активная длина проводника в пазу статора;**
- **v — линейная скорость пересечения проводника магнитным полем.**

Закон изменения ЭДС

- Индукция B в воздушном зазоре распределяется по синусоидальному закону

$$B = B_m \sin \alpha,$$

где $\alpha = \omega t$ - угол, отсчитываемый от нейтральной линии при вращении ротора с угловой частотой ω .

- ЭДС, наводимая в одном проводнике, также будет изменяться по синусоидальному закону:

$$e = Blv = B_m l v \sin \alpha = B_m l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t.$$

Действующее значение ЭДС

Если в каждой фазе обмотки статора имеется W витков, то действующее значение ЭДС фазы определяется выражением:

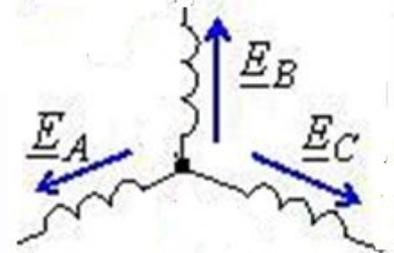
$$E = 4,44 k f w \Phi_{от} ,$$

- где k — обмоточный коэффициент;
- $f = pn_0 / 60$ — частота наведенных синусоидальных ЭДС;
- p - число пар полюсов ротора;
- $\Phi_{от}$ - амплитудное значение магнитного потока полюса ротора.

ЭДС фаз

Поскольку катушки отдельных фаз обмотки статора $A—X$, $B—Y$, $C—Z$ имеют одинаковое число витков и сдвинуты в пространстве по окружности статора симметрично, т. е. на угол 120° (эл.град.), то и ЭДС каждой фазы будут иметь одинаковые амплитуды и оказываются сдвинутыми во времени друг относительно друга на электрический угол в 120° .

$$\begin{aligned}e_A &= E_{mA} \sin \omega t, \\e_B &= E_{mB} \sin (\omega t + 120^\circ), \\e_C &= E_{mC} \sin (\omega t + 240^\circ) = E_{mC} \sin (\omega t - 120^\circ),\end{aligned}$$



Переход генератора в режим работы с нагрузкой

- При переходе генератора в режим работы с нагрузкой сопротивлением Z_H по фазам обмотки статора потекут токи, которые создадут вращающееся магнитное поле статора (рис.11).
- Ось полюсов статора $N - S$ будет отставать от оси полюсов $N_0 - S_0$ первичного магнитного поля ротора на угол рассогласования θ (рис.12) .
- В результате взаимодействия разноименных отстающих полюсов статора и опережающих полюсов ротора на ротор будет действовать момент, направленный против его вращения,
- т. е. тормозной момент M_T .
- В установившемся режиме тормозной момент уравновешивает вращающий момент приводного двигателя: $M_T = M_{п.дв}$.

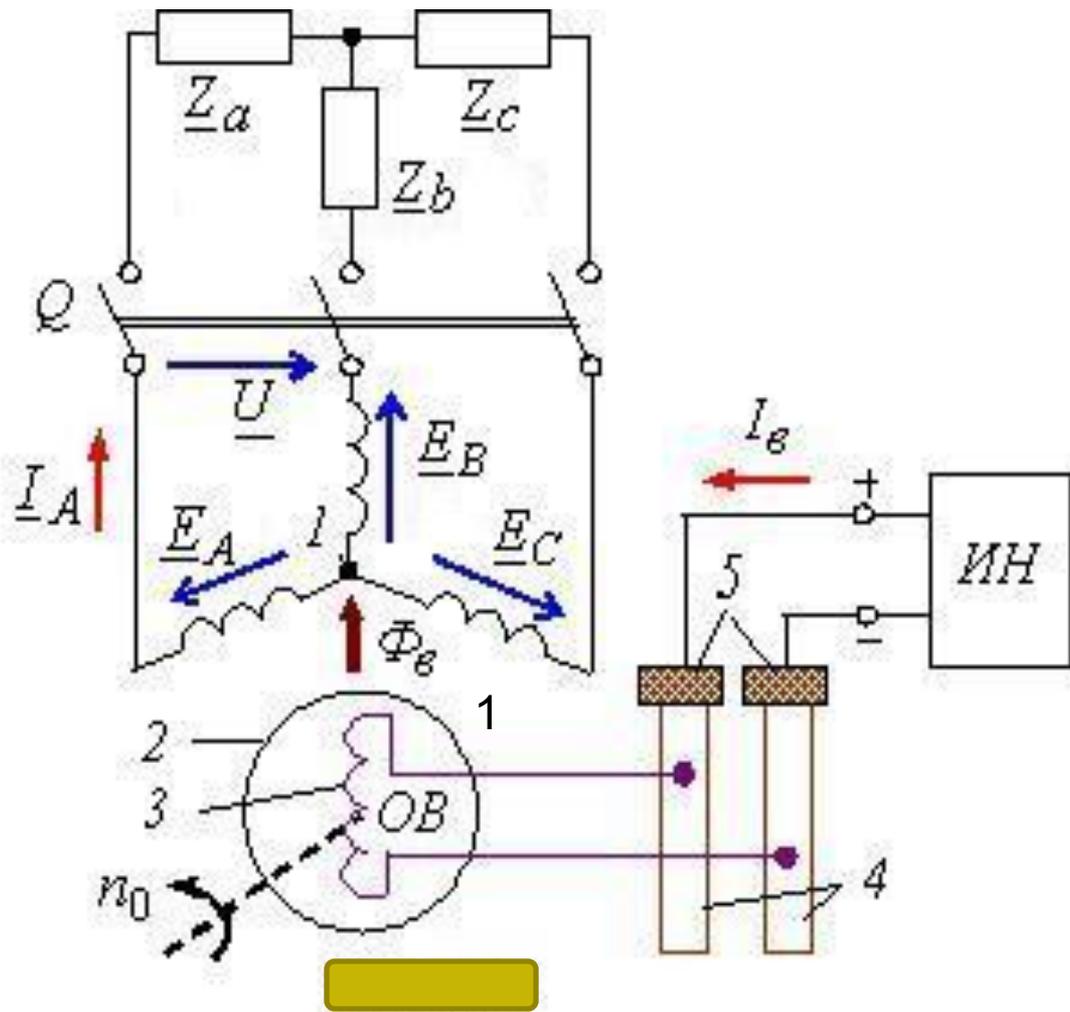


Рис. 11.
Принципиальная
схема включения СГ
состоит из статора
(якоря) 1, ротора
(индуктора) 2,
обмотки
возбуждения 3,
контактных колец 4,
щёток 5

Взаимодействие магнитных полей в СТ

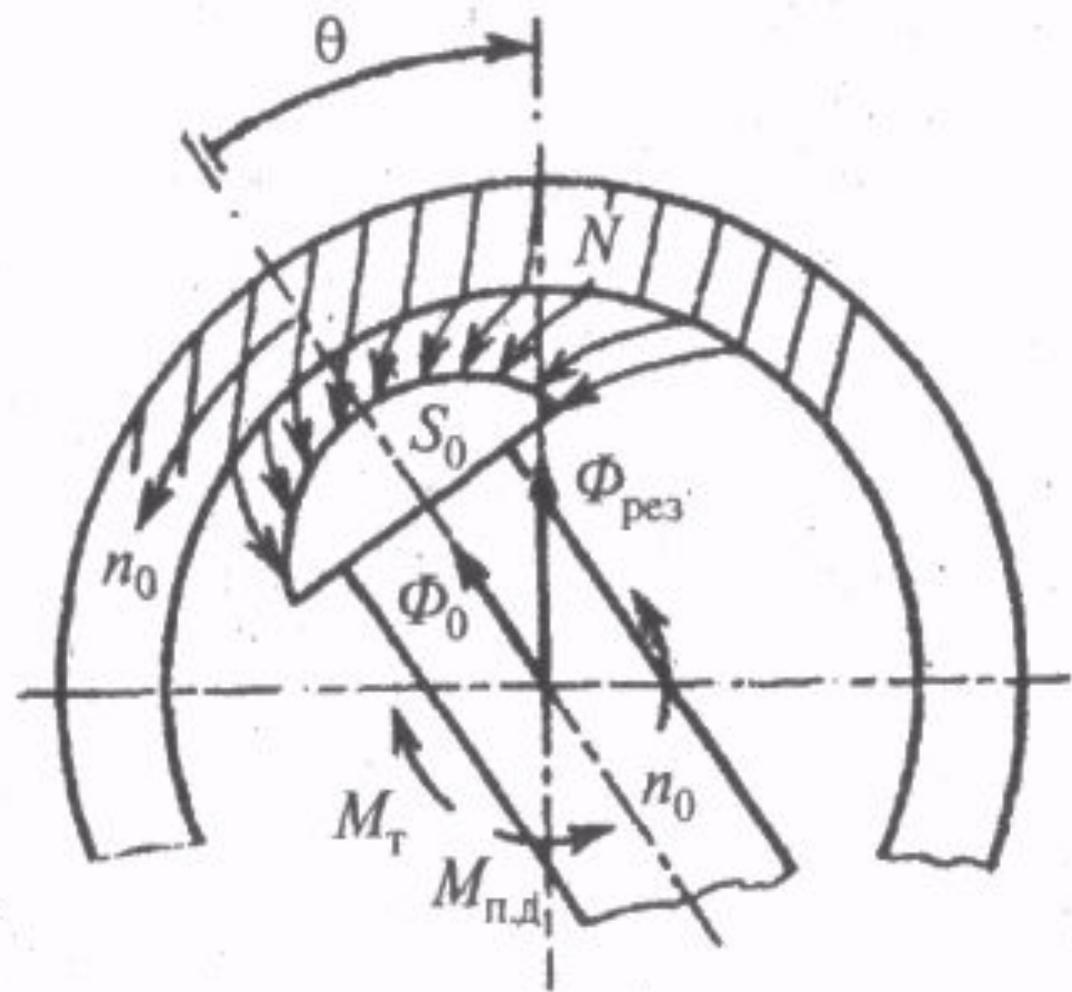
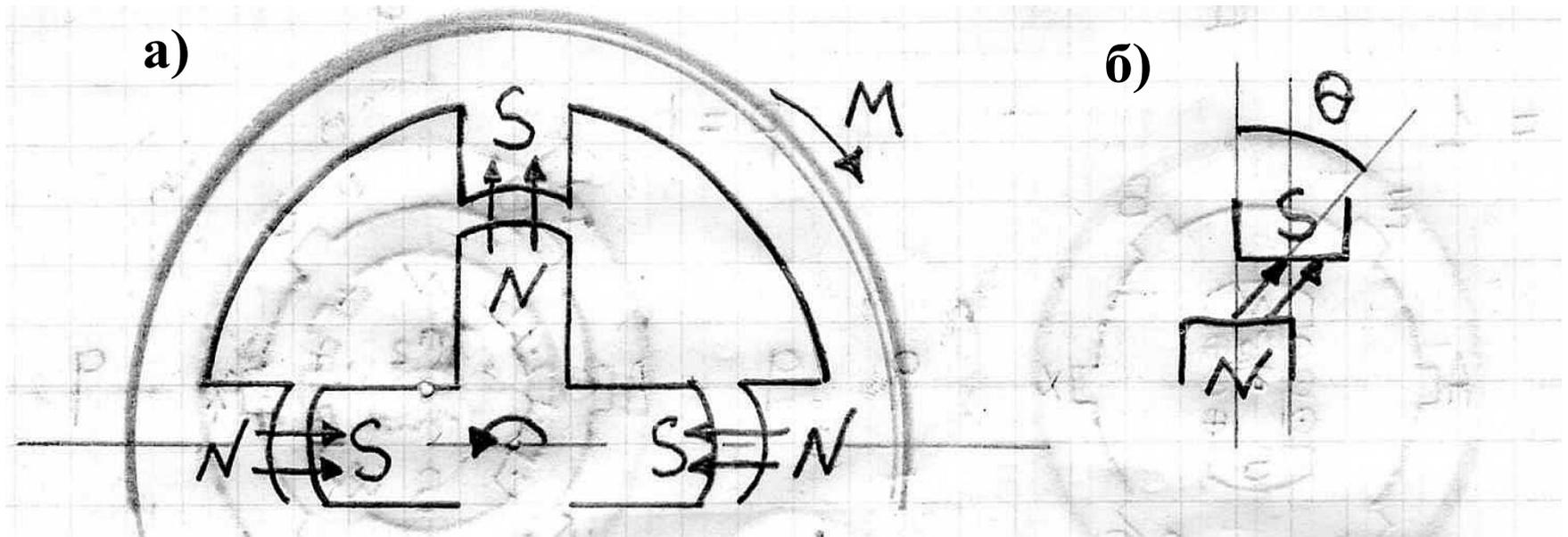


Рис.12

Принцип действия двигателя

- **Принцип действия СД основан на явлении притяжения разноименных магнитных полюсов двух магнитных полей - статора и ротора.**
- **Вращающееся магнитное поле статора с полюсами N и S образуется при питании фаз обмотки статора тремя токами от трехфазной сети аналогично вращающемуся полю асинхронного двигателя.**

- Если на ротор не действует никакая нагрузка,
- т. е. момент сопротивлений на роторе $M_c = 0$, то оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис.13,а.)



**Рис.13. Расположение магнитных полей статора и ротора:
а) без нагрузки; б)при работе под нагрузкой**

Взаимодействие магнитных полей в двигателе

Если же двигатель работает под нагрузкой и на роторе имеется момент сопротивления $M_c \neq 0$ от какого-либо механизма, то ось полюсов ротора $d-d$ сместится от оси полюсов статора $d'-d'$ в сторону отставания на какой-то угол θ (рис. 13,б и рис.14.).

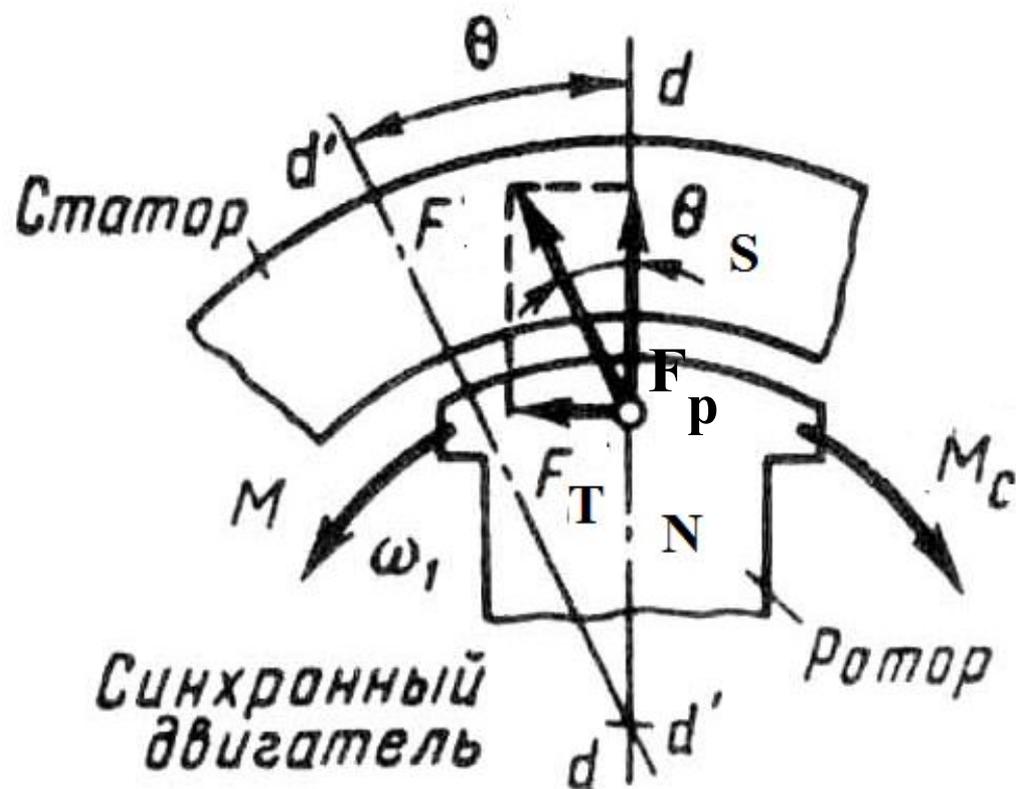


Рис.14. Работа двигателя под нагрузкой

Таким образом, магнитное поле статора как бы «ведет» за собой поле ротора и сам ротор. Тангенциальные составляющие F_T магнитных сил F удерживают поля ротора и статора и создают вращающий момент M , зависящий от угла рассогласования θ :

$$M = 2F_T R = 2FR \sin \theta$$

где R — радиус ротора.

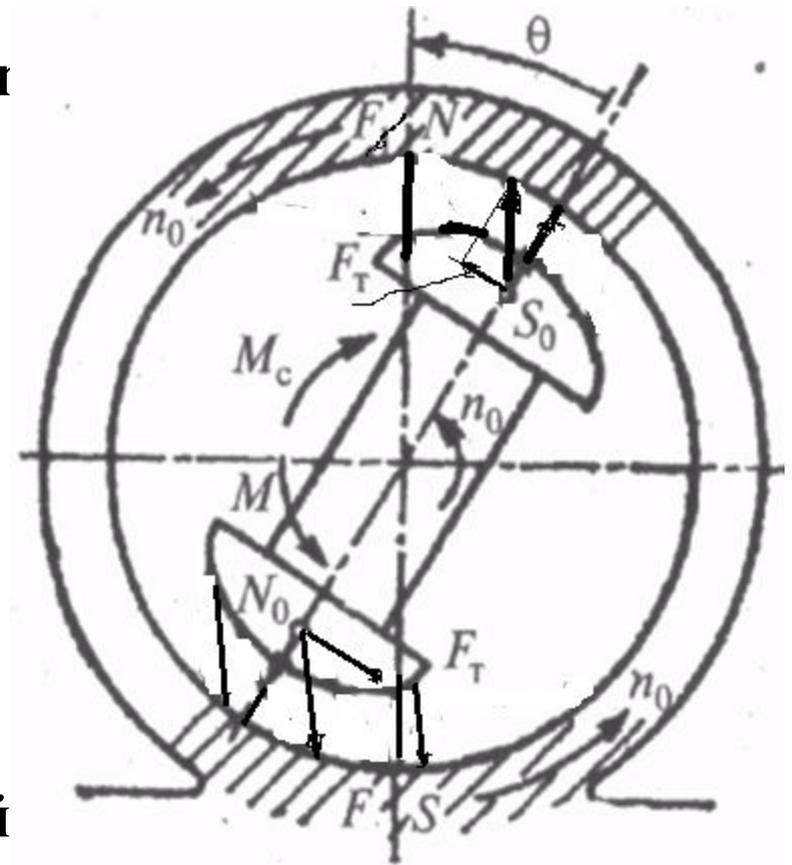


Рис.15. Работа СД под нагрузкой

Разновидности СМ большой мощности

Разновидности СМ большой мощности.

СМ как никакие другие подвергаются большим механическим и электромагнитным нагрузкам.

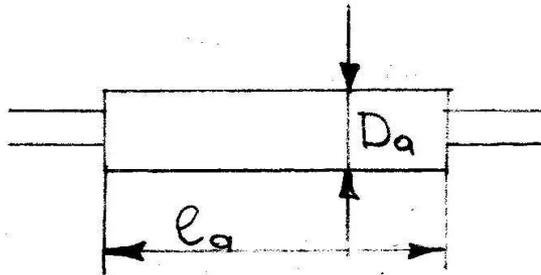
Поэтому назначение машины определяют на стадии проектирования.

По характеру приводного двигателя СМ разделяют:

1) Турбогенераторы (ТГ)

Эти машины как правило неявнополюсные

$$n_1 = 3000 \text{ об/мин.}$$



D_a и L_a - диаметр и длина сердечника ротора соответственно

$$D_a = 1 \div 1,5 \text{ м}$$

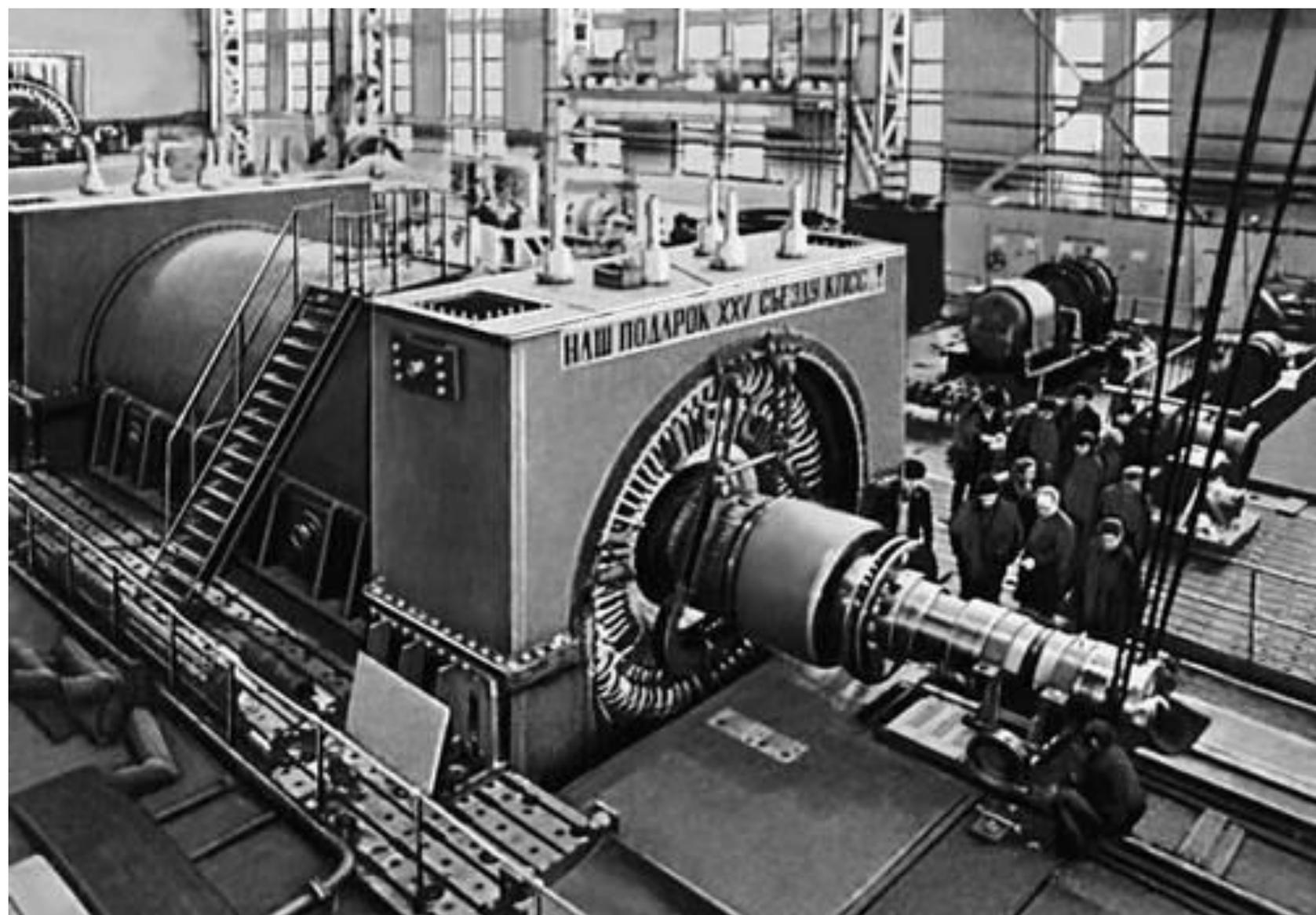
$$L_a = 7,5 \div 8 \text{ м}$$

$$L_a / D_a = 5 \div 6 \text{ соотношение гл. размеров СМ}$$

$$P = \text{до } 800 \div 1200 \text{ МВА}$$

Фото турбогенератора





2) Гидрогенераторы (ГГ)

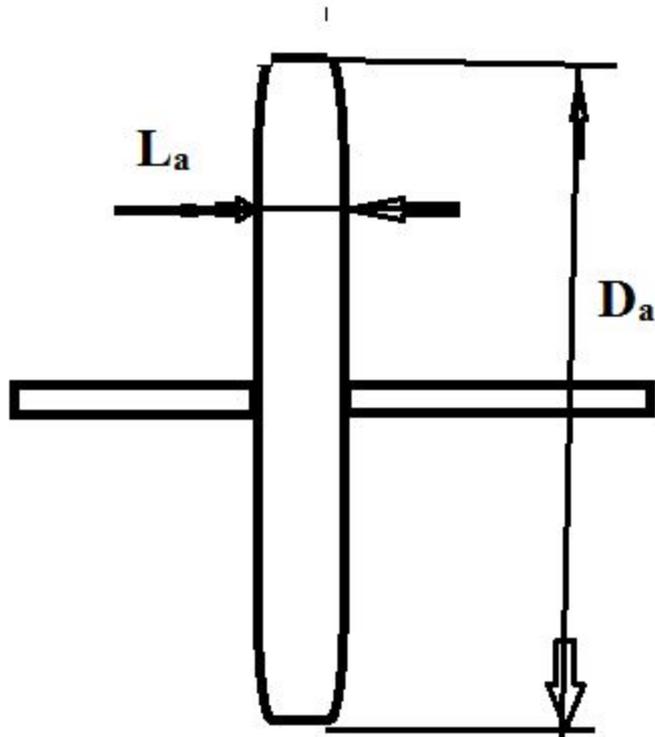
$$D_a = 16 \text{ м}$$

$$L_a = 1,75 \text{ м}$$

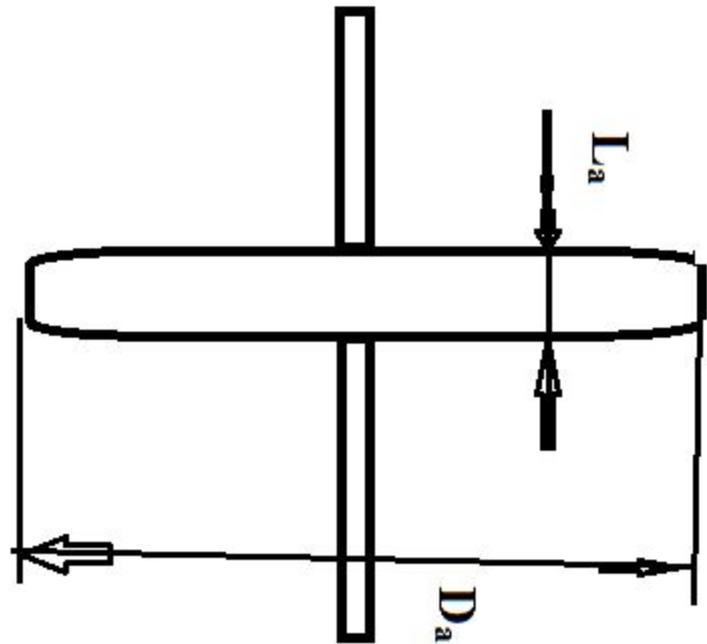
$$L_a/D_a = 0,2$$

$$P = 590 \div 640 \text{ МВА}$$

$$n_1 = 50 \div 500 \text{ об/мин.}$$



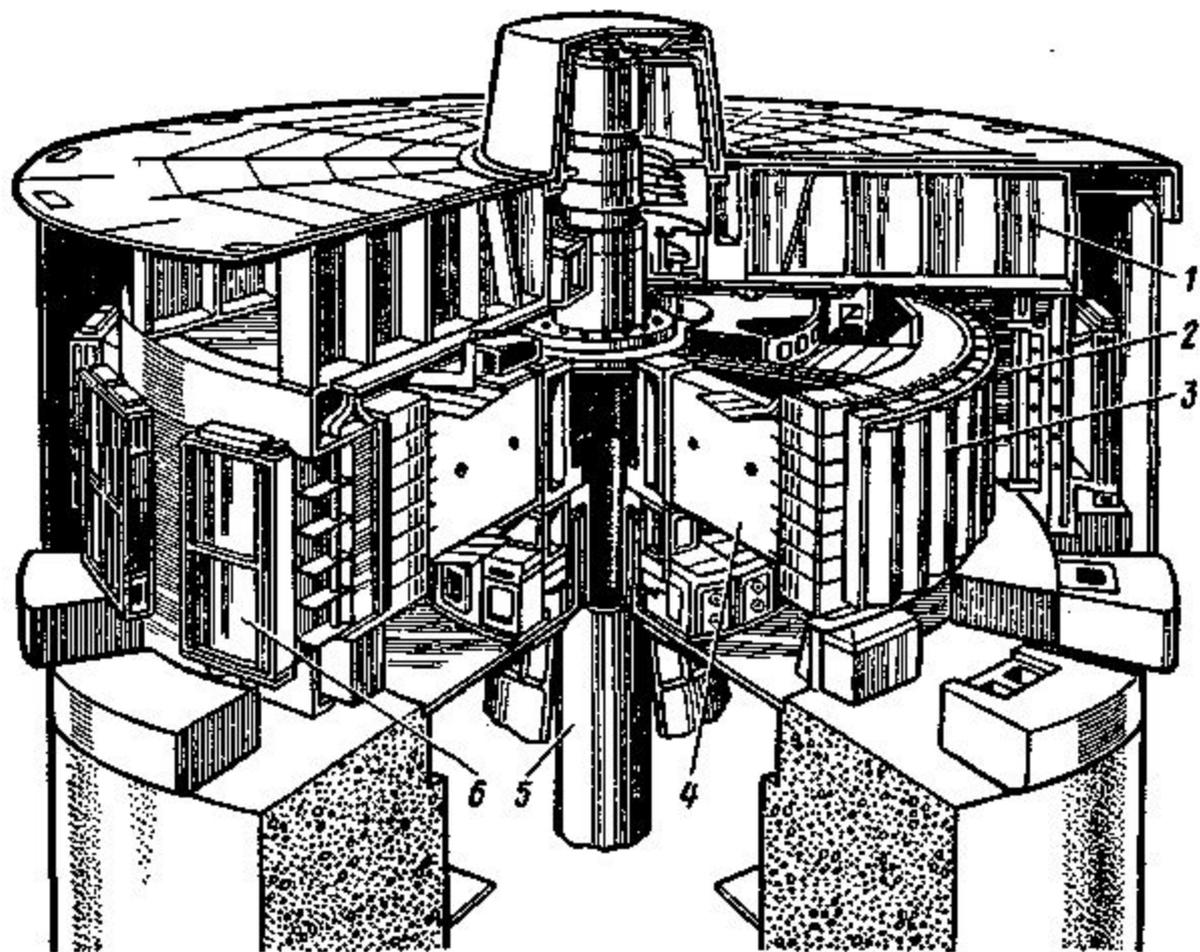
а) Горизонтальный вал



б) Вертикальный вал

Фото гидрогенератора







**Остов ротора гидрогенератора-двигателя в цехе завода
Электротяжмаш**

3) Синхронный компенсатор (СК).

Обычно – явнополюсный, работает в режиме не нагруженного двигателя (т.е. на х.х.), поэтому имеет облегчённую конструкцию и не имеет выступающего конца вала. ОВ рассчитывают на большую МДС, чем у генераторов и двигателей.

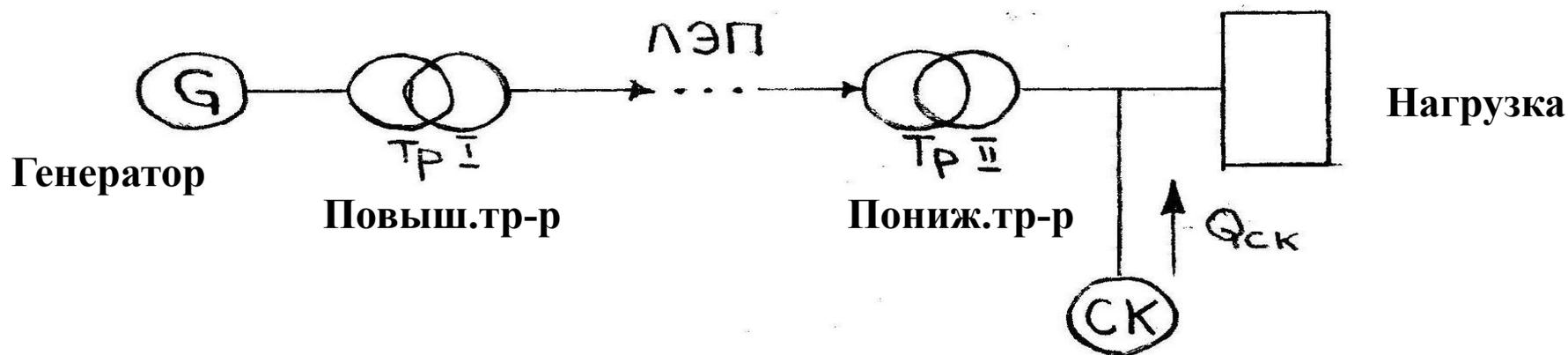
Работает с перевозбуждением.

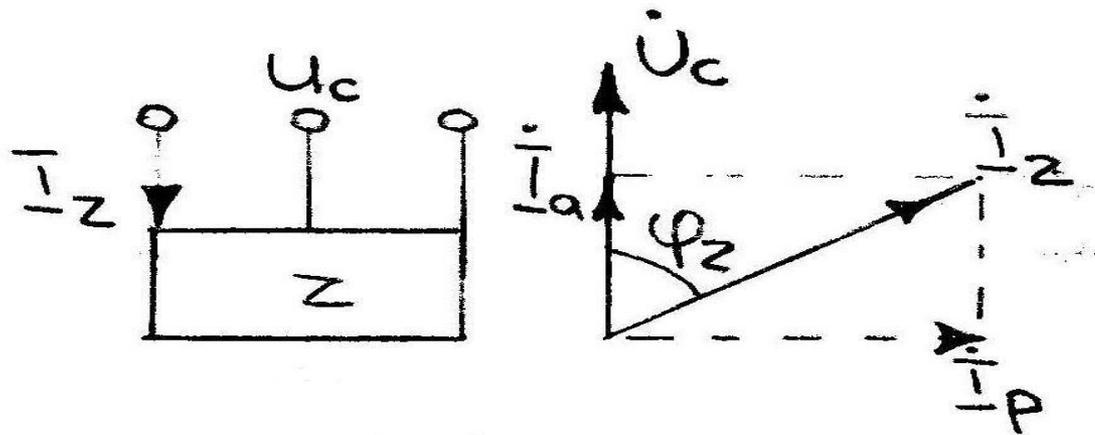
$$n_1 = 750 \div 1000 \text{ об/мин}$$

$$P = 10 \div 100 \text{ МВА}$$

СК – устройство для генерирования реактивной мощности.

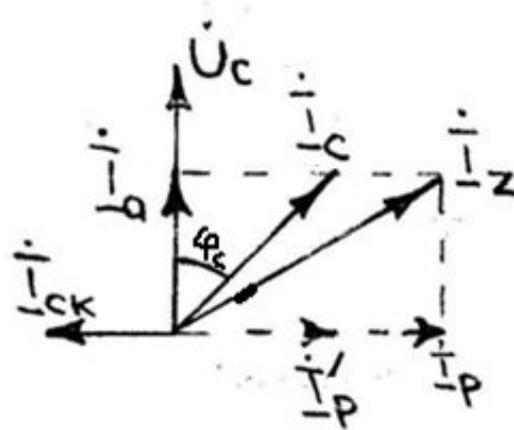
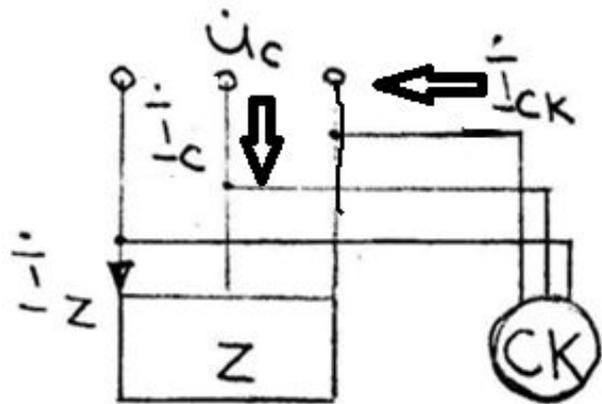
Может работать как в режиме улучшения $\cos\varphi$ в сети, так и для стабилизации напряжения в сети..





а) без СК

$$\varphi_Z = \varphi_C$$



б) включен СК

$$\varphi_C < \varphi_Z$$

Рис.16. Векторные диаграммы:
а) без СК ; б) при включении СК

Пример.

а) без СК

$$I_a = 1000A \quad I_p = 1000A \quad I_C = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{1000^2 + 1000^2} = 1414A$$

$$\cos \varphi_C = \frac{I_a}{I_C} = \frac{1000}{1414} = 0,707$$

б) с включением СК

$$I_{СК} = 600A$$

$$I_p' = I_p - I_{СК} = 1000 - 600 = 400A \quad I_C = \sqrt{1000^2 + 400^2} = 1077A$$

$$\cos \varphi_C = \frac{1000}{1077} = 0,93$$

Вывод: При включении СК $\cos \varphi_c$ увеличился на 31 %

4) Синхронные двигатели (СД).

У них, как правило,
горизонтальный вал, самовентиляция, иногда и
независимая.

при $n_1 = 100 \div 1000$ об/мин – явнополюсное исполнение

при $n_1 = 1500 \div 3000$ об/мин – неявнополюсное исполнение

Мощность P - до десятков МВт

Применяют там, где требуется постоянная скорость.

5) Дизель – генератор.

Предназначен для привода во вращение от ДВС. Выполняют явнополюсным с горизонтальным валом, имеет один подшипник, второй является опорой дизеля.

Возбудитель устанавливают непосредственно на валу ротора, или он приводится во вращение от ротора с помощью клиноремённой передачи.

Частота вращения $n_1 = 100 \div 1500$ об/мин

Мощность от нескольких кВА до нескольких МВА

Уравнение ЭДС синхронного генератора.

Для явнополюсного генератора.

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{p1} + I_1 r_1$$

В машине результирующее поле – одно, но чтобы учесть факторы, влияющие на напряжение СГ, условно исходят из предположения независимого действия всех намагничивающих сил СГ, т.е. предполагается, что каждая намагничивающая сила создаёт свой собственный поток.

1) Обмотка возбуждения $F_0 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow E_0$

2) $F_{ad} \rightarrow \Phi_{ad} \rightarrow E_{ad}$ – составляющая намагничивающей силы якоря по продольной оси.

$$\dot{E}_{ad} = -j I_d x_{ad}$$

3) $F_{aq} \rightarrow \Phi_{aq} \rightarrow E_{aq}$ составляющая намагничивающей силы якоря по поперечной оси.

$$E_{aq} = -jI_d X_{aq}$$

4) Магнитный поток рассеяния обмотки статора $\Phi_{p1} \rightarrow E_{p1}$

$$E_{p1} = -jI_1 X_1$$

5) Ток в фазной обмотке статора I_1 создаёт активное падение напряжения в обмотке статора

$$U_{r1} = I_1 r_1 \cong 1\% U_H$$

В неявнополюсных синхронных генераторах реакция якоря характеризуется полной МДС статора F_1 без разделения ее по осям, так как в этих машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы. Поэтому ЭДС статора в неявнополюсных машинах E_1 , равная индуктивному падению напряжения в обмотке статора, пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря x_a , т. е.

$$E_1 \dot{=} -j I_1 x_a \dot{.}$$

Поток реакции якоря Φ_1 и поток рассеяния статора $\Phi_{\sigma 1}$ создаются одним током I_1 , поэтому индуктивные сопротивления x_a и x_1 можно рассматривать как суммарное индуктивное сопротивление $x_c = x_a + x_1$, представляющее собой синхронное сопротивление неявнополюсной машины. С учетом этого ЭДС реакции якоря E_1 и ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ следует рассматривать также как сумму

$$E_c^\bullet = E_1^\bullet + E_{\sigma 1}^\bullet = -j I_1^\bullet x_a + (-j I_1^\bullet x_1) = -j I_1^\bullet x_c$$

представляющую собой синхронную ЭДС неявнополюсной машины. С учетом изложенного уравнение напряжений неявнополюсного синхронного генератора имеет вид

$$U_1^\bullet \approx \sum E^\bullet - I_1^\bullet r_1 = E_0^\bullet + E_c^\bullet - I_1^\bullet r_1 \quad \text{или}$$

$$U_1^\bullet \approx \sum E^\bullet = E_0^\bullet + E_c^\bullet$$