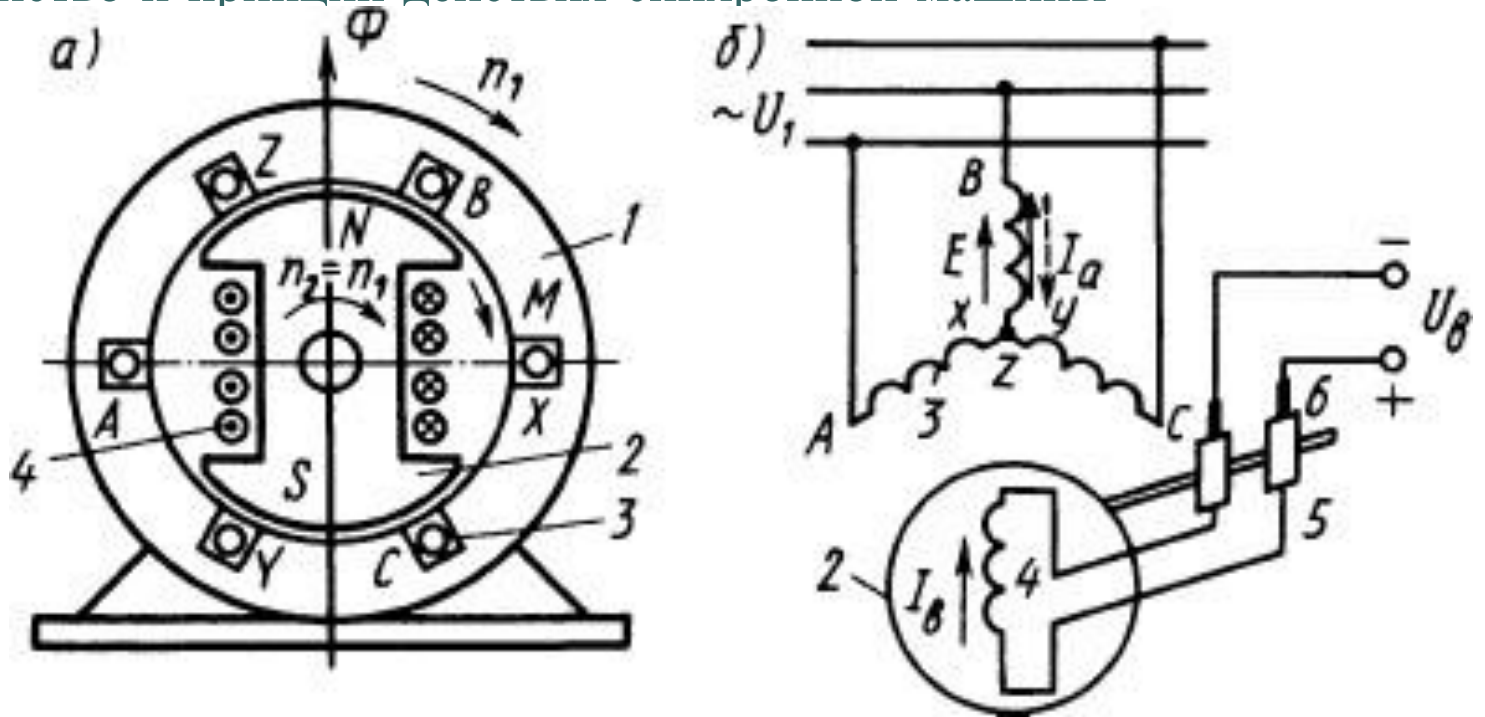


Синхронные машины

- Магнитные поля и векторные диаграммы
- Характеристики и режимы работы

Устройство и принцип действия синхронной машины



Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема ее включения (б)

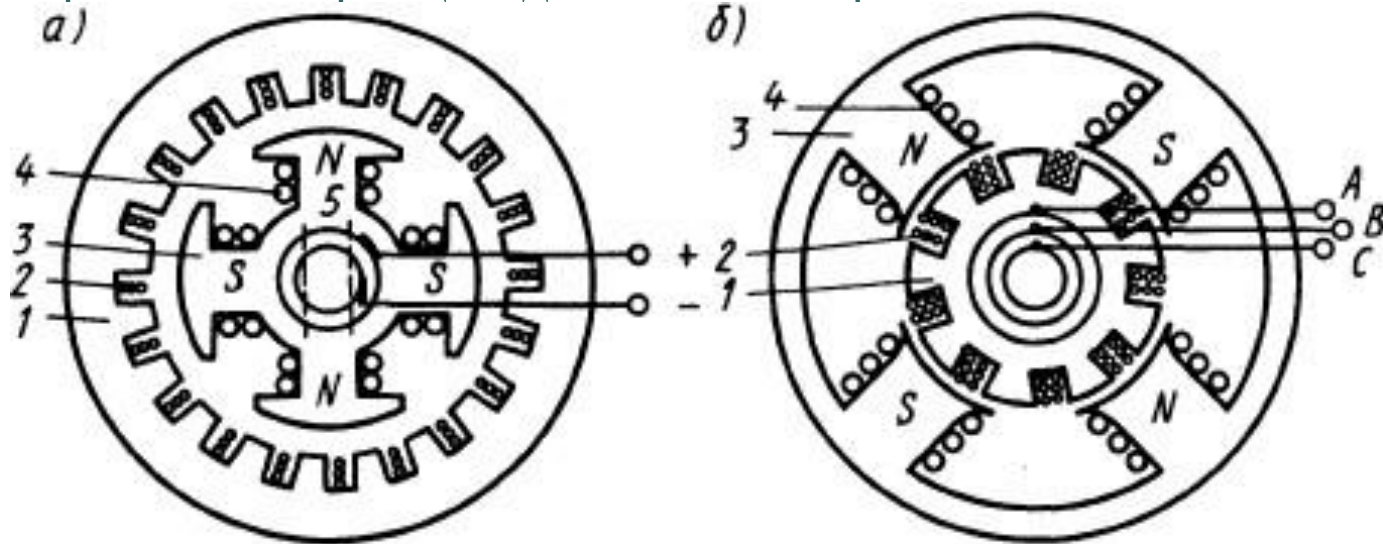
$$f_1 = \frac{n p}{60} - \text{частота ЭДС, Гц}$$

n – частота вращения ротора, об/мин

$n_1 = f_1 \cdot \frac{60}{p}$ – частота вращения поля статора, об/мин

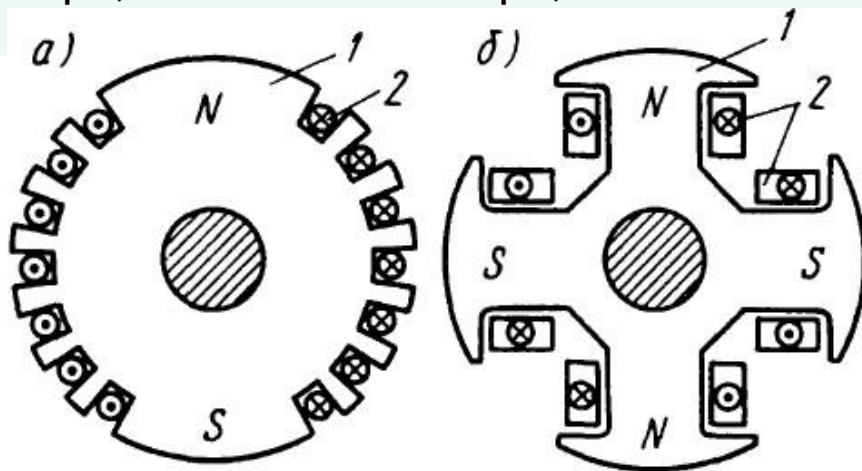
$$n = n_1$$

Устройство и принцип действия синхронной машины



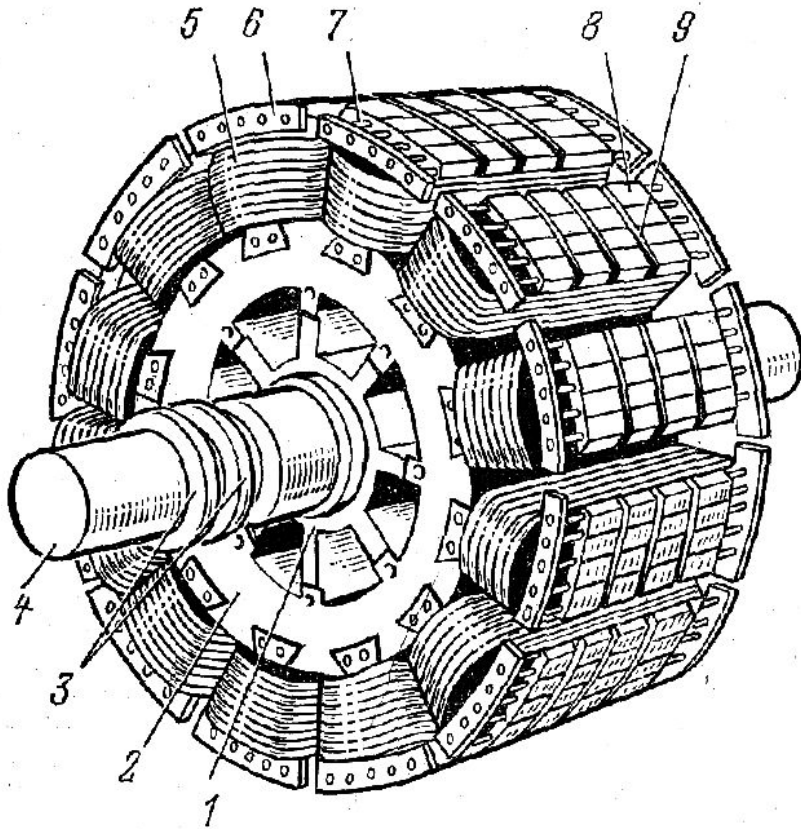
Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным (а) и вращающимся (б) якорем:

1 — якорь; 2 — обмотка якоря; 3 — полюсы индуктора; 4 — обмотка возбуждения



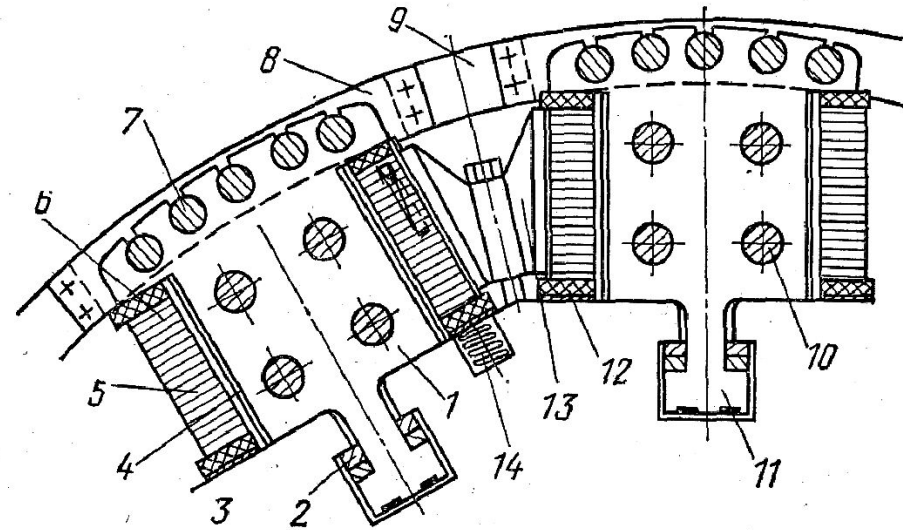
Роторы синхронных неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) машин:
1 — сердечник ротора;
2 — обмотка возбуждения

Явнополюсные

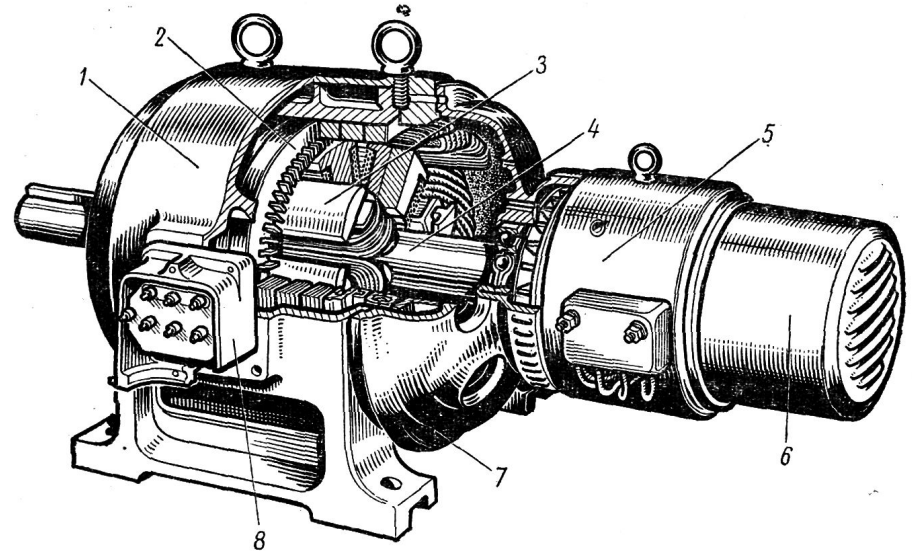


Внешний вид явнополюсного ротора.

1 — остов ротора; 2 — обод ротора; 3 — контактные кольца; 4 — вал; 5 — катушка обмотки возбуждения; 6 — сегмент демпферной обмотки; 7 — стержень демпферной обмотки; 8 — пакет сердечника полюса; 9 — вентиляционный канал в полюсе.

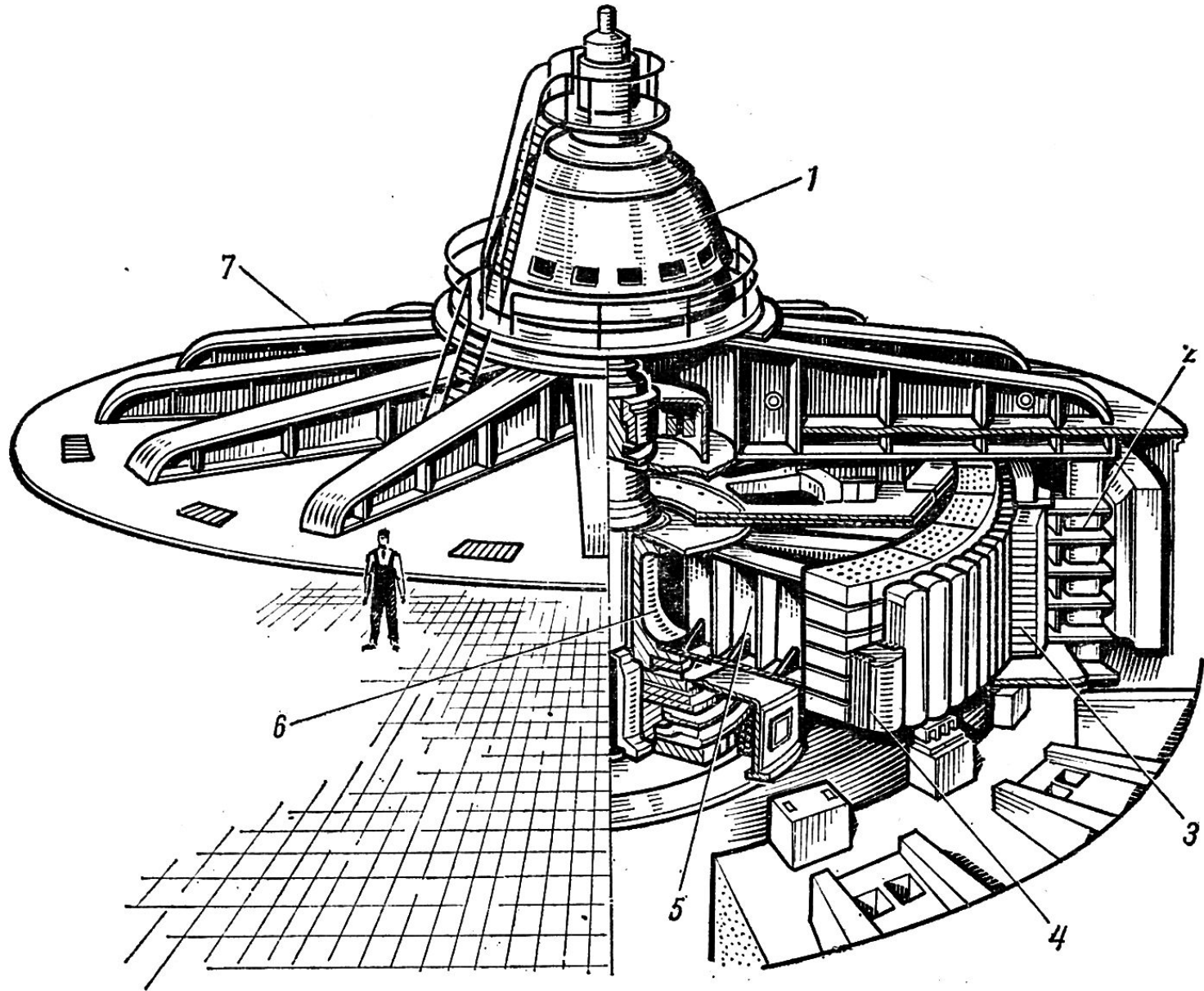


Поперечный разрез явнополюсного ротора.



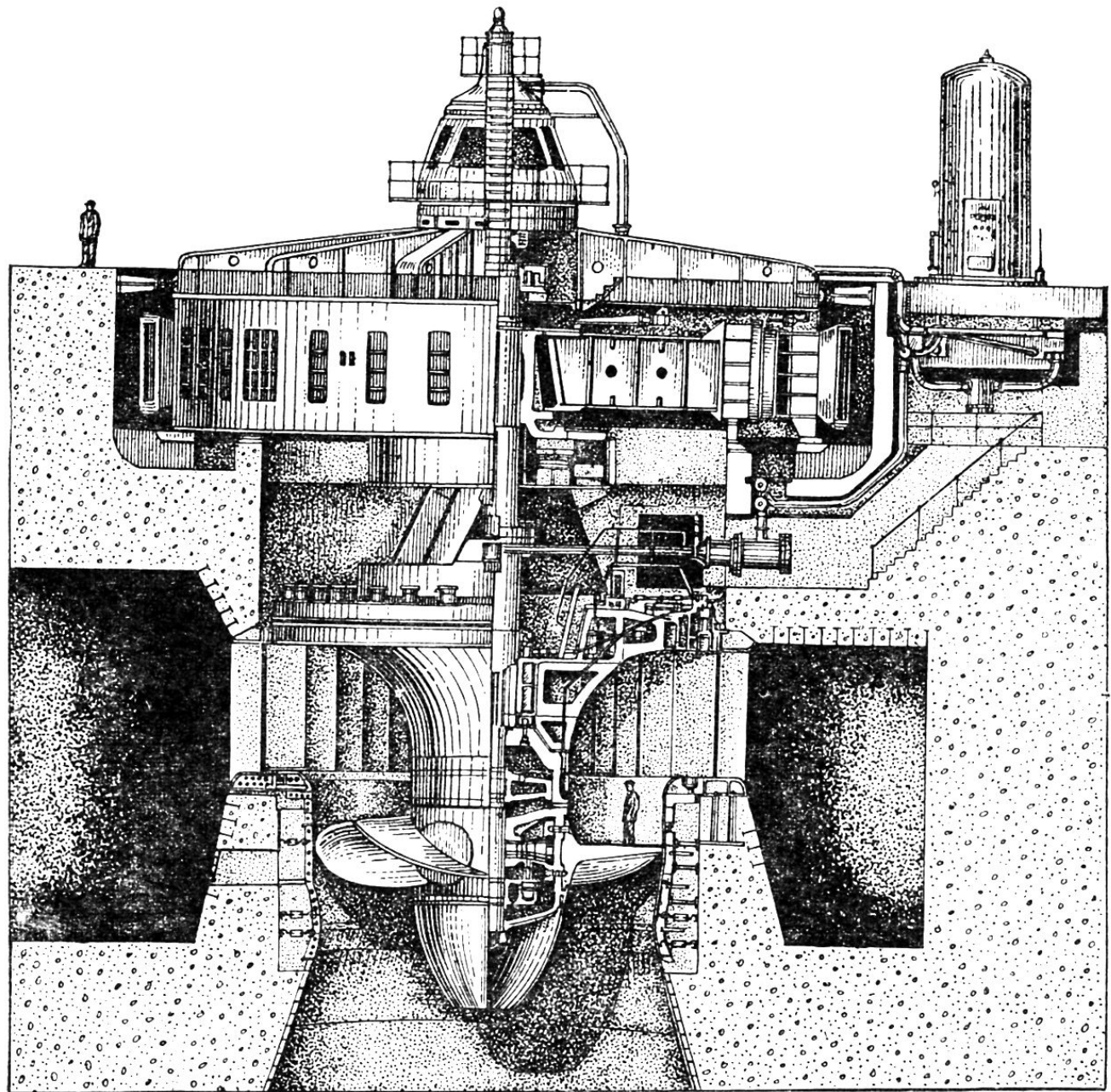
Синхронный генератор:

1 — корпус статора; 2 — сердечник статора; 3 — полюса ротора; 4 — вал; 5 — возбудитель; 6 — контактные кольца; 7 — подшипниковый щит; 8 — коробка выводов

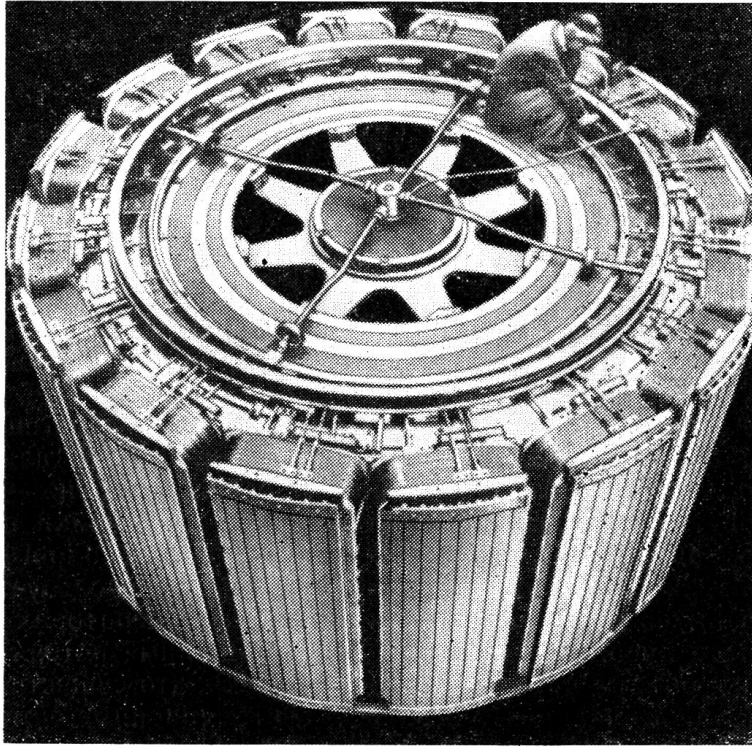


Гидрогенератор Куйбышевской ГЭС, мощность 105 тыс. квт,
напряжение 13,8 кв:

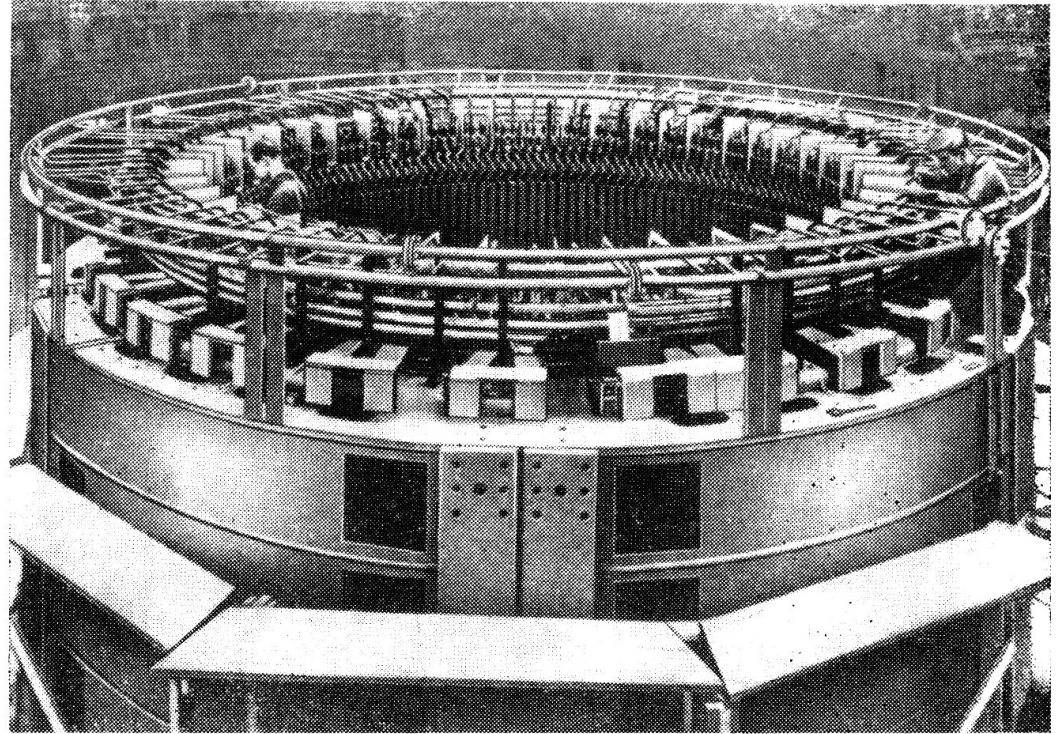
1 — возбудитель; 2 — корпус статора; 3 — сердечник статора; 4 — полюс ротора; 5 — спицы ротора; 6 — втулка ротора; 7 — грузонесущая крестовина



Гидроагрегат Волжской гидроэлектростанции им. В. И. Ленина



Ротор гидрогенератора 190 Мв·а, 375 об/мин с полным водяным охлаждением



Статор гидрогенератора 190 Мв·а, 375 об/мин с полным водяным охлаждением

Системы возбуждения синхронных машин

Требования к электромагнитному возбуждению

- 1) надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы,
- 2) быстроедействие (форсировка возбуждения), применяется для поддержания устойчивой работы машины во время аварии или после её ликвидации,
- 3) быстрое гашение магнитного поля , т.е. уменьшение магнитного поля до нуля без значительного повышения напряжения на его обмотках, необходимость в гашении поля возникает при отключении или аварии в генераторе.

Электромашинная система возбуждения: в качестве источника используется генератор постоянного тока (возбудитель).

$$P_v = (0,3 \div 3\%) P_g$$

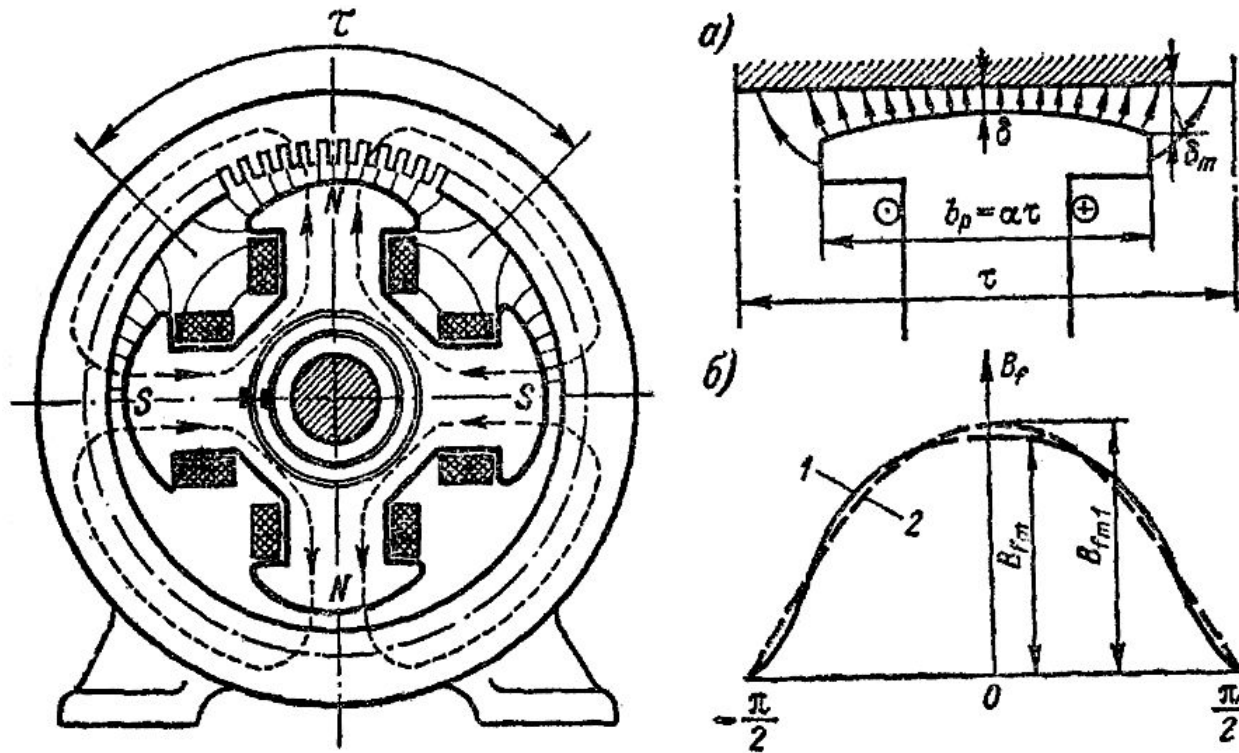
Ток возбуждения регулируется с помощью реостатов в цепи возбуждения возбудителя, возбудитель приводится во вращение от вала генератора.

Системы возбуждения синхронных машин

Вентильная система возбуждения: рассчитываются на большие мощности и являются более надежными.

- 1) С самовозбуждением – энергия возбуждения отбирается от обмотки якоря, преобразуется в энергию постоянного тока и подается на обмотку возбуждения.
- 2) Независимая система – энергия получается от специального возбудителя (трехфазный синхронный генератор).
- 3) Бесщеточная система – якорь возбудителя располагается на валу генератора и ток в обмотку возбуждения подаётся через выпрямительный блок на валу генератора.

Магнитное поле и параметры обмотки возбуждения



Магнитное поле обмотки возбуждения синхронной машины

Рис а) Неравномерный воздушный зазор

Рис б): кривая 1 – Реально достижимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре;

кривая 2 – Первая гармоника магнитной индукции.

Магнитное поле обмотки возбуждения

$$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}} \quad \text{– коэффициент формы поля}$$

B_{fm1} – амплитуда первой гармонической индукции

B_{fm} – амплитуда действительного распределения

$$k_\phi = \frac{\Phi}{\Phi_f} \quad \text{– коэффициент потока возбуждения}$$

Φ – поток, созданный обмоткой возбуждения в воздушном зазоре

Φ_f – поток первой гармонической этого поля

$$k_{\phi, k} = f\left(\frac{\delta_m}{\delta}; \frac{\delta}{\tau}; \alpha = \frac{b_p}{\tau}\right)$$

δ_m – воздушный зазор под краем полюса, δ – воздушный зазор под центром полюса

τ – полюсное деление, b_p – полюсная дуга, α – относительная полюсная дуга

$$\frac{\delta_m}{\delta} = 1 \div 2,5 \quad \alpha = 0,65 \div 0,75$$

$$k_f = 0,95 \div 1,15, \quad k_\phi = 0,92 \dots 1,08$$

Магнитное поле обмотки возбуждения

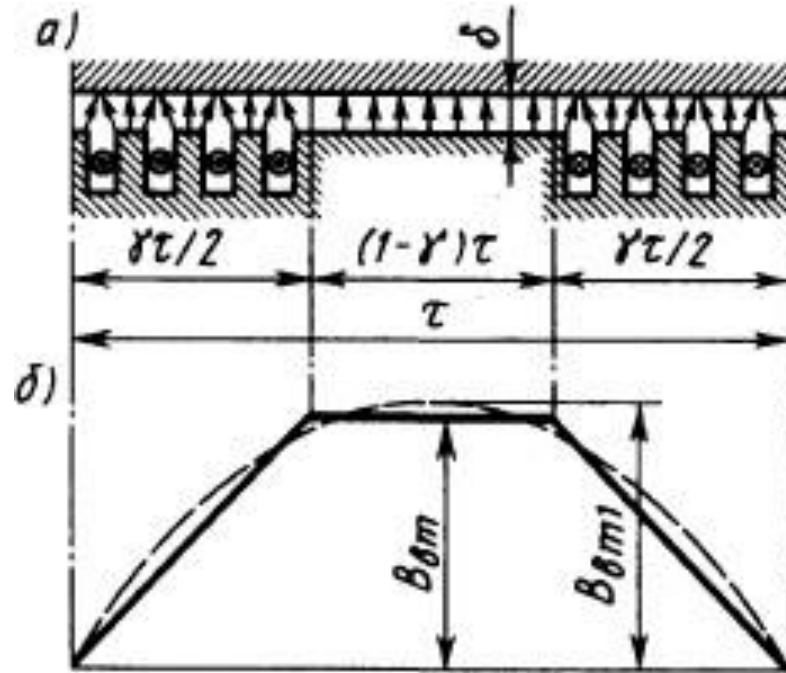


Рис а) Неявнополюсный ротор

Рис б): Реально достижимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре и Первая гармоника магнитной индукции.

$$\gamma = 0,65 \dots 0,80$$

$$k_f = 1,065 \dots 0,965, k_{\phi} = 0,995 \dots 0,975.$$

ЭДС обмотки якоря от поля возбуждения

М.д.с. ОВ на один полюс, $F_f = \frac{w_f i_f}{2p}$

w_f – число витков обмотки возбуждения

i_f – ток обмотки возбуждения

Амплитуда основной гармоники поля $B_{fm1} = k_f B_{fm} = \Lambda_\delta F_f k_f = \frac{\mu_0}{k_\delta k_\mu \delta} \frac{w_f k_f}{2p} i_f$

$\Lambda_\delta = \frac{\mu_0}{k_\delta k_\mu \delta}$ – магнитная проводимость воздушного зазора,

k_δ – коэффициент воздушного зазора (учитывает неравномерность воздушного зазора, возникающую в результате зубчатости сердечников)

k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи

Поток основной гармоники поля ОВ $\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} B_{fm1} \tau l_\delta = \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_\mu \delta} \frac{w_f k_f}{p} i_f$

ЭДС обмотки якоря от поля возбуждения

Потокоцепление потока Φ_{f1} с обмоткой якоря при совпадении оси фазы с осью полюсов машины

$$\Psi_{fad} = \Phi_1 k_{об} w_1$$

w_1 – число витков обмотки якоря

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент обмотки якоря

Потокоцепление ОЯ с ОВ с учетом вращения ротора

$$\Psi_{fadt} = \Psi_{fad} \cos \omega_1 t = M_{fad} i_f \cos \omega_1 t,$$

где $M_{fad} = \frac{\Psi_{fad}}{i_f}$ - взаимная индуктивность ОЯ с ОВ

Э.д.с. обмотки якоря

$$e = -\frac{d\Psi_{fadt}}{dt} = \omega_1 M_{fad} i_f \sin \omega_1 t$$

Сопротивление взаимной индуктивности

Амплитуда и действующее значение ЭДС

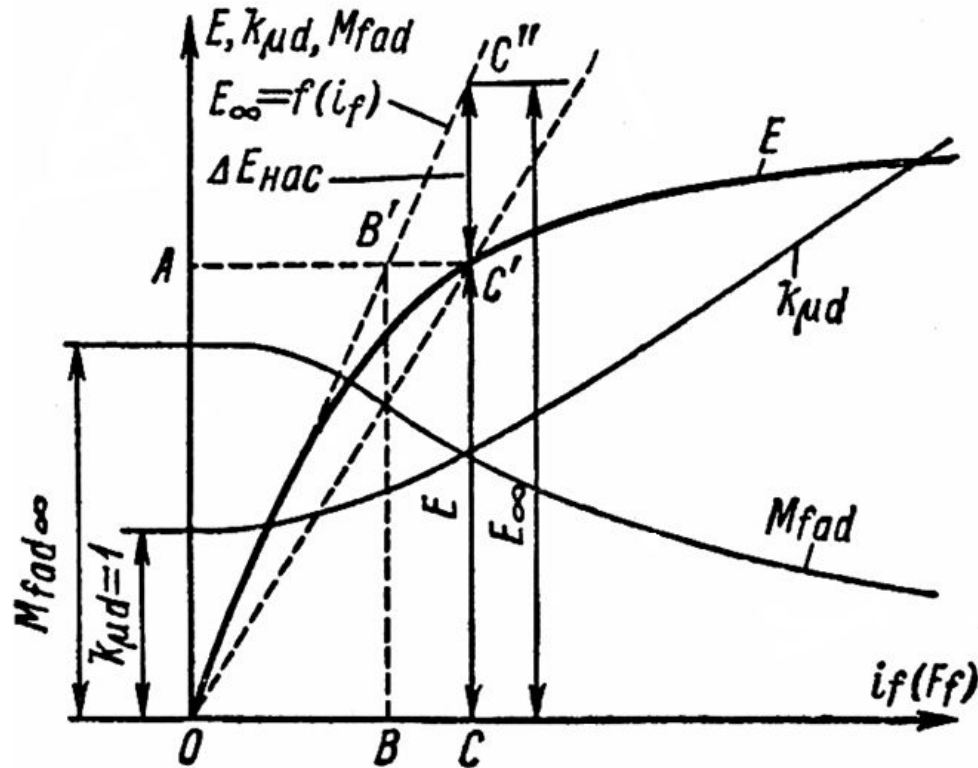
$$\begin{cases} E_m = \omega_1 M_{fad} i_f = x_{fad} i_f \\ E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{x_{fad}}{\sqrt{2}} i_f, \end{cases}$$

где $x_{fad} = \omega_1 M_{fad}$ – сопротивление взаимной индукции ОВ сОЯ

$\omega_1 = \omega$ – угловая электрическая скорость вращения ротора

$$M_{fad} = \frac{x_{fad}}{\omega_1} = \frac{\sqrt{2}E}{\omega_1 i_f}$$

Характеристика холостого хода $E=f(i_f)$ и зависимость взаимной индуктивности обмоток возбуждения и якоря от насыщения



$$M_{fad} = f(E)$$

$$k_{\mu} = \frac{E_{\infty}}{E}$$

E_{∞} – ЭДС без учета насыщения магнитной цепи

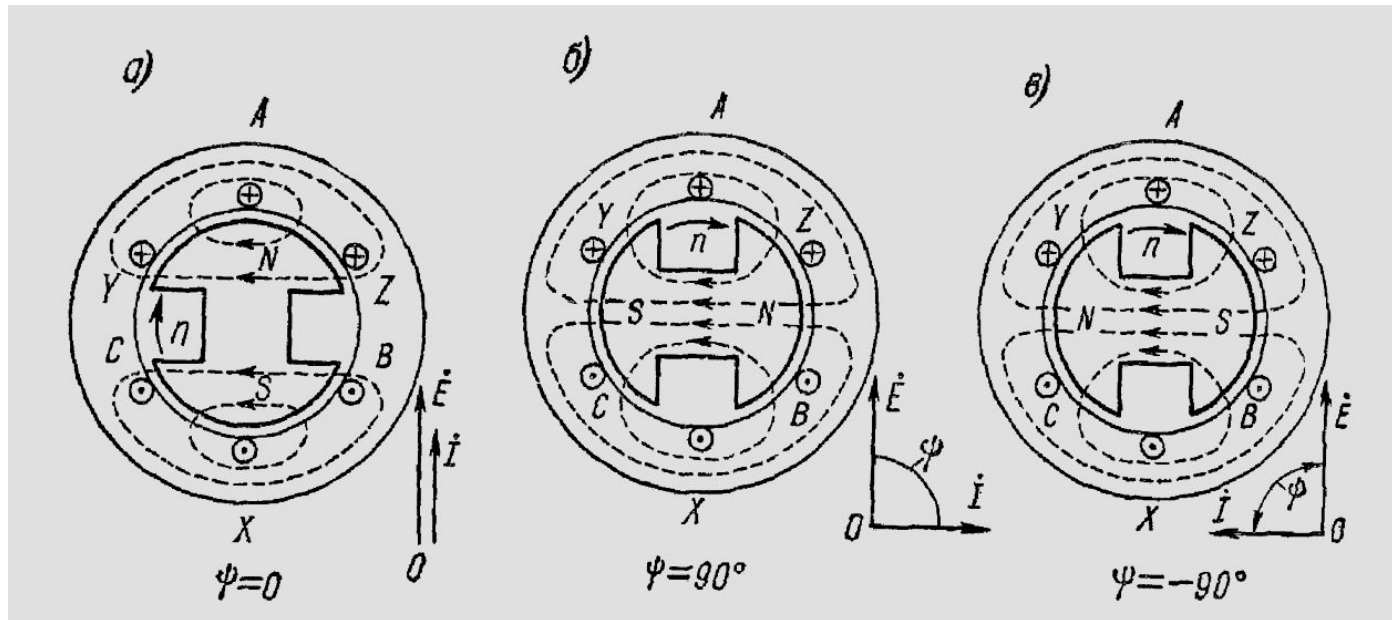
E – ЭДС с учетом насыщения

$$M_{fad} = \frac{M_{fad\infty}}{k_{\mu}}; \quad x_{fad} = \frac{x_{fad\infty}}{k_{\mu}}$$

Магнитное поле обмотки якоря

При протекании по обмотке якоря синхронной машины тока она создает собственное магнитное поле, которое называется *полем реакции якоря*.

Характер реакции якоря определяется углом сдвига ψ между током якоря и ЭДС в обмотке якоря.

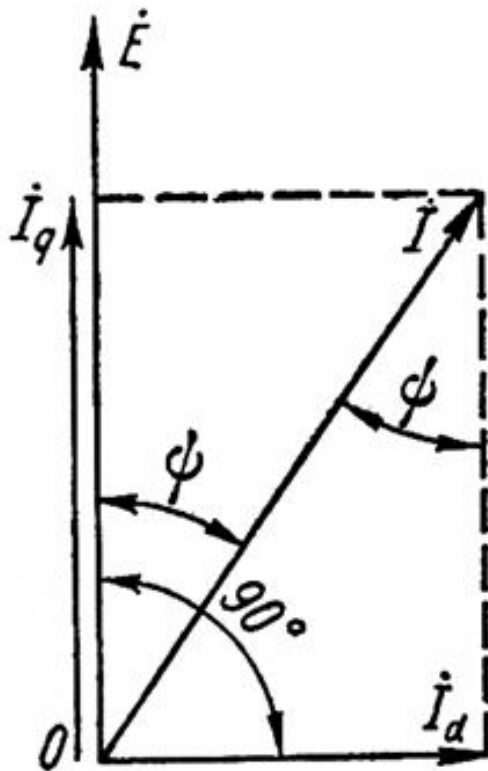


а) – Поперечная реакция якоря.

б) – Продольная размагничивающая реакция якоря.

в) – Продольная намагничивающая реакция якоря.

Разложение тока якоря на продольную и поперечную составляющую (метод двух реакций)



$$\dot{I} = \dot{I}_q + \dot{I}_d$$

Продольный ток

$$I_d = I \sin \psi$$

Продольная реакция якоря

$$F_{ad} = F_a \sin \psi = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_d$$

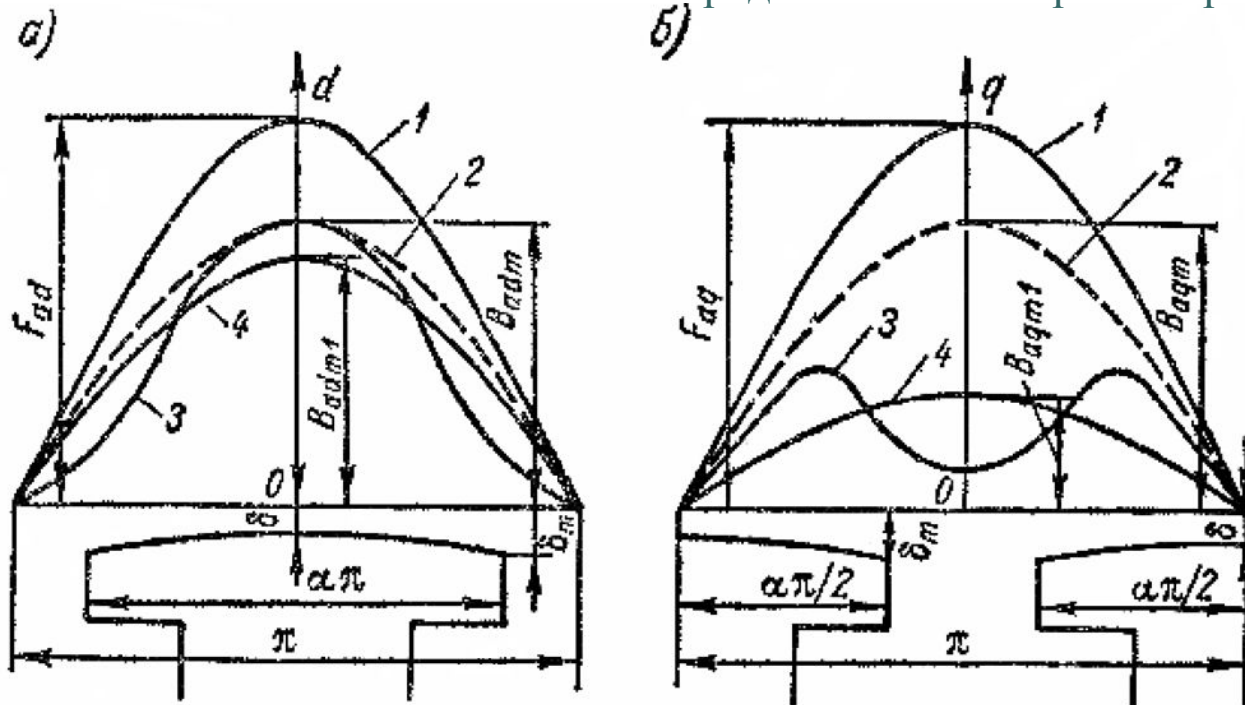
Поперечный ток

$$I_q = I \cos \psi$$

Поперечная реакция якоря

$$F_{aq} = F_a \cos \psi = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_q$$

Магнитные поля продольной и поперечной реакции якоря



1. - МДС реакции якоря.
2. - Магнитная индукция реакции якоря при равномерном зазоре.
3. - Действительные кривые индукции реакции якоря.
4. - Первые гармоники поля реакции якоря.

Кривые поля реакции якоря явнополюсной синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

Магнитная индукция реакции якоря при равномерном зазоре

$$B_{adm} = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta k_\mu} F_{ad};$$

$$B_{aqm} = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta k_\mu} F_{aq}$$

Неравномерность зазора уменьшает основные гармоники реакции якоря

$$k_{ad} = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}} < 1; \quad k_{aq} = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}} < 1; \quad k_{aq} < k_{ad}$$

Э.Д.С. продольной и поперечной реакции якоря

Коэффициенты формы поля
реакции якоря

$$k_{ad} k_{aq} = \left(\frac{\tau}{\delta_{\min}}; \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}}; \frac{b_p}{\tau} \right)$$

Потоки реакции якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{adm1} \tau l_{\delta} = \frac{2}{\pi} k_{ad} B_{adm} \tau l_{\delta}$$

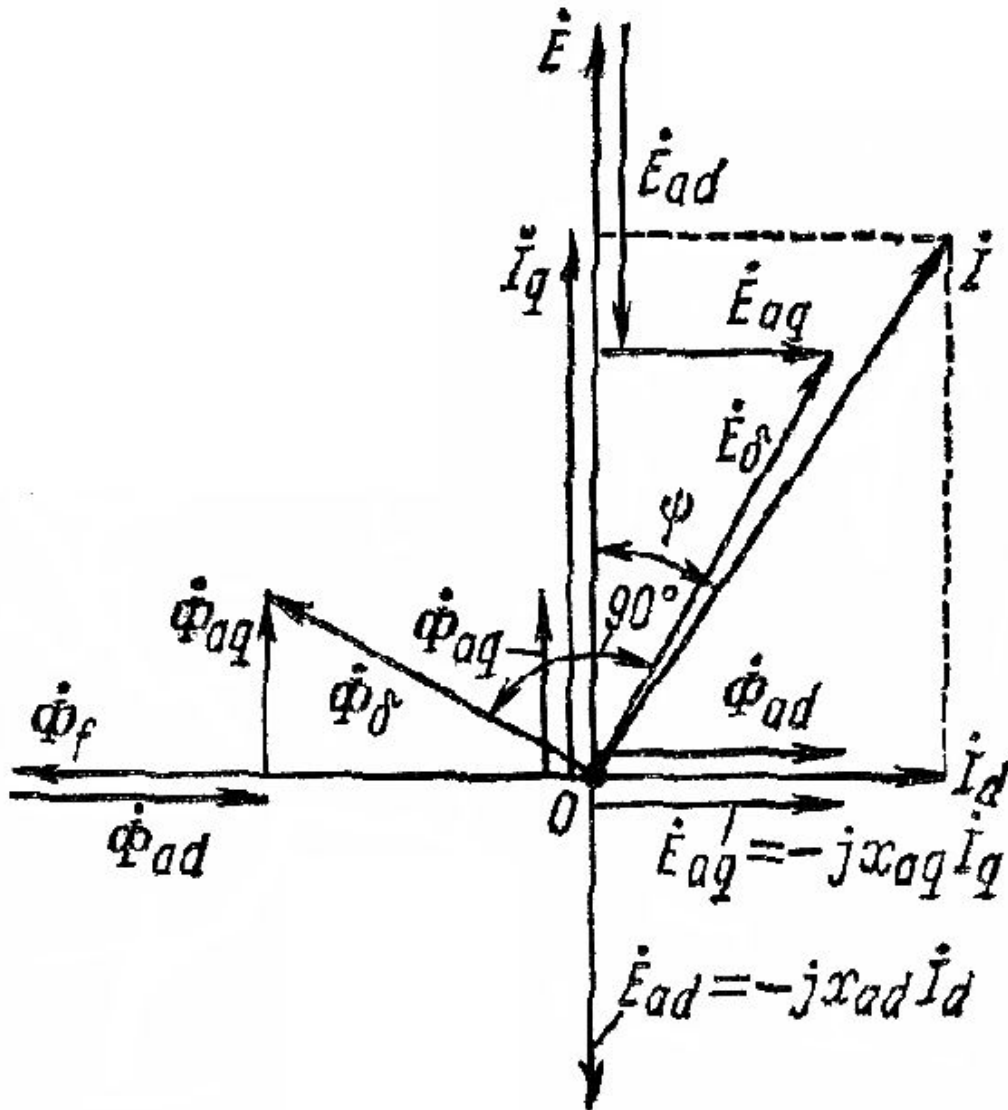
$$\Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{aqm1} \tau l_{\delta} = \frac{2}{\pi} k_{aq} B_{aqm} \tau l_{\delta}$$

ЭДС реакции якоря

$$E_{ad} = \pi \sqrt{2} f_1 w_1 k_{ad}$$

$$E_{aq} = \pi \sqrt{2} f_1 w_1 k_{aq}$$

Векторная диаграмма потоков и э.д.с.
реакции якоря синхронной машины



Омеханизация

активно-индуктивная нагрузка

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_f + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq}$$

$$\dot{E}_\delta = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}$$

Параметры обмотки якоря синхронных машин

$$F_{ad} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{w_1 k_{o\delta 1}}{p} I_d \rightarrow B_{adm} = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta k_\mu} F_{ad} \rightarrow$$

$$\rightarrow \Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} k_{ad} B_{adm} \tau l_\delta \rightarrow E_{ad} = \pi \sqrt{2} f_1 w_1 k_{ad} \Phi$$

$$E_{ad} = x_{ad} I_d \quad E_{aq} = x_{aq} I_q$$

Индуктивные сопротивления продольной и поперечной реакции якоря

$$\begin{cases} x_{ad} = 4mf_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta k_{\mu d}} \frac{(w_1 k_{o\delta 1})^2}{p} k_{ad} \\ x_{aq} = 4mf_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi \delta k_\delta k_{\mu q}} \frac{(w_1 k_{o\delta 1})^2}{p} k_{aq} \end{cases}$$

Для неявнополюсной СМ: $k_{ad} \neq k_{aq} \neq 1 \quad x_{ad} \neq x_{aq}$

Для явнополюсной СМ: $k_{ad} = k_{aq} = 1 \quad x_{ad} = x_{aq}$

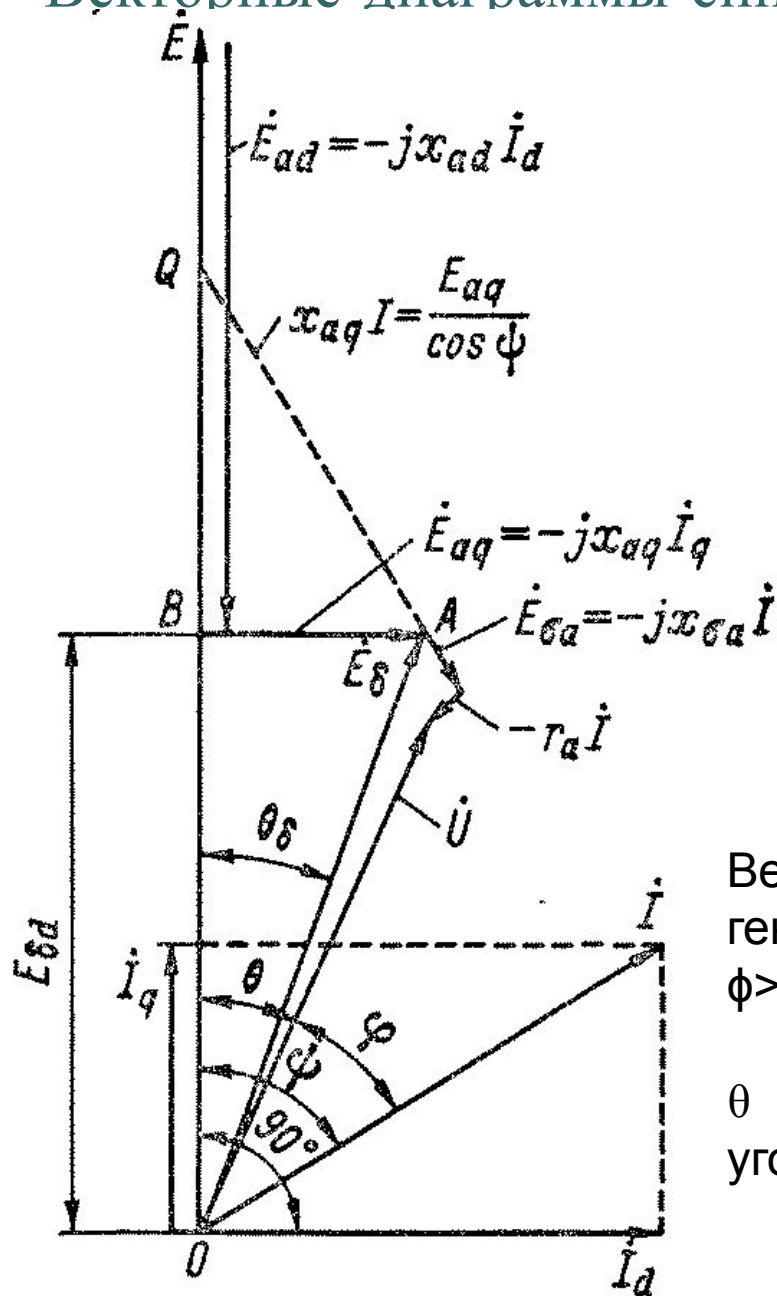
Продольное и поперечное синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря

$$E_d = E_{ad} + E_{\sigma ad} = x_d I_d \quad E_q = E_{aq} + E_{\sigma aq} = x_q I_q$$

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma ad} \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma aq} \quad \text{СМ}$$

Векторные диаграммы синхронных машин

Диаграмма Blondеля
Явнополюсная машина

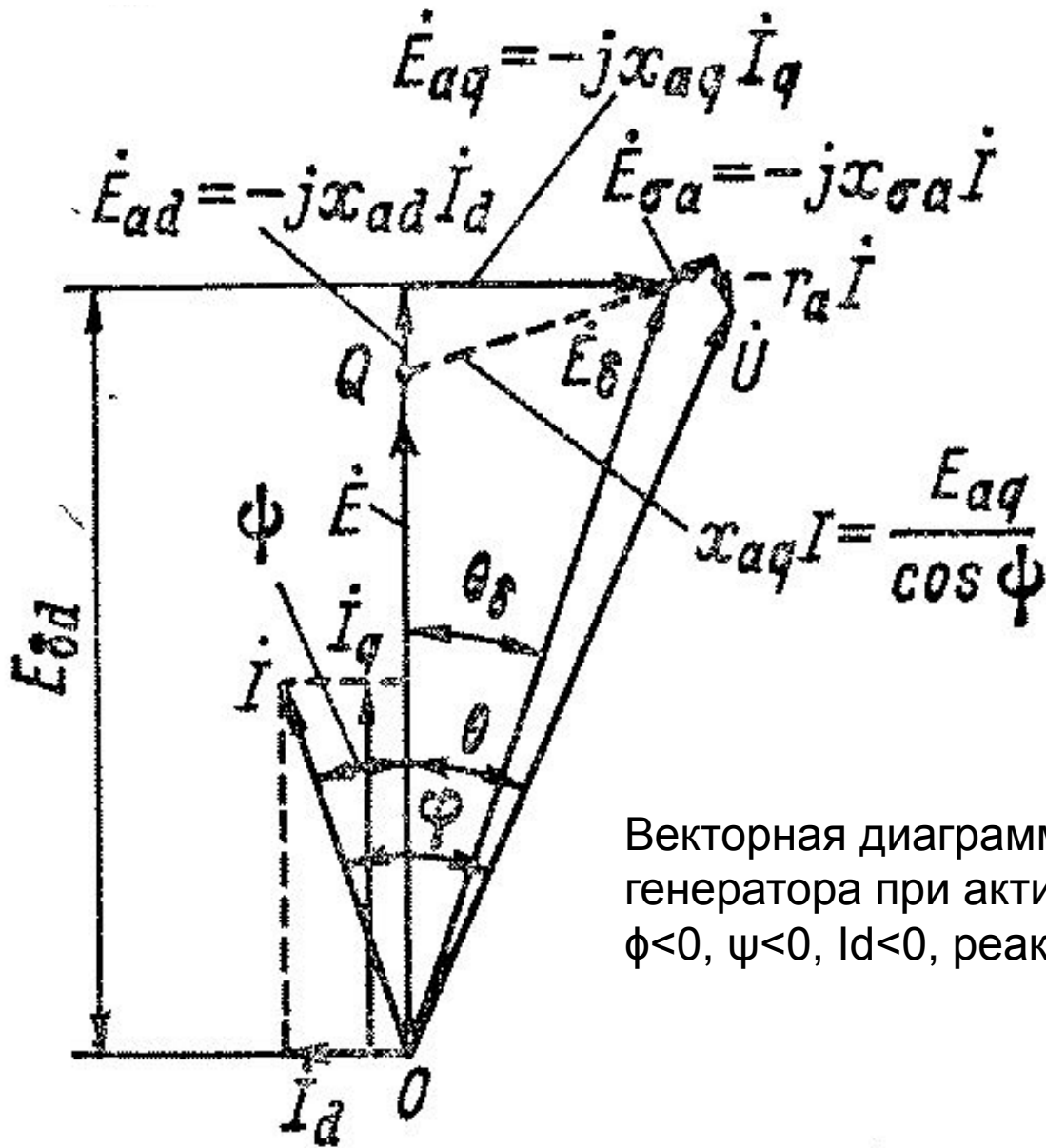


$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a$$

$$\begin{cases} U = E_0 - jx_{ad}I_d - jx_{aq}I_q - jx_{\sigma a}I - r_a I \\ I = I_d + I_q \end{cases}$$

Векторная диаграмма явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке $\phi > 0$, $\psi > 0$, $I_d > 0$, реакция якоря размагничивающая

θ - угол нагрузки,
угол между векторами ЭДС и напряжения



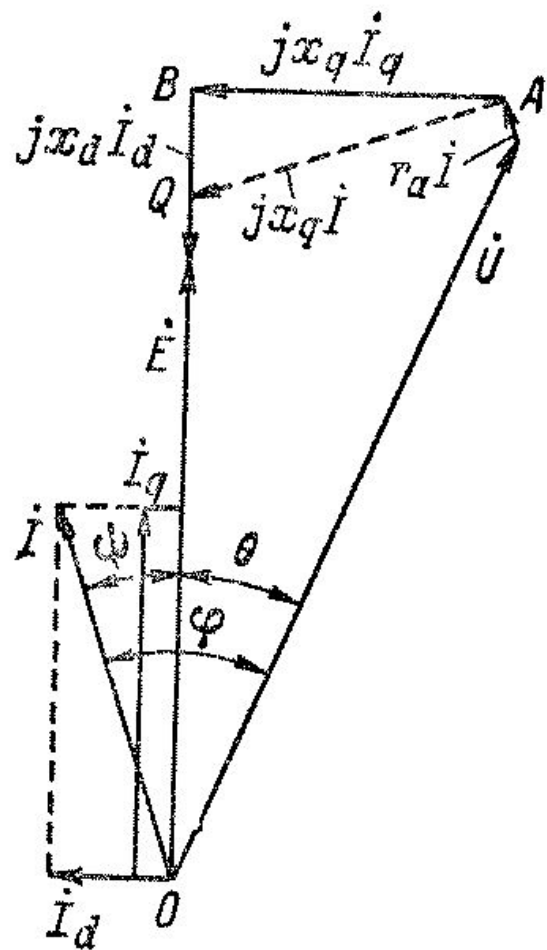
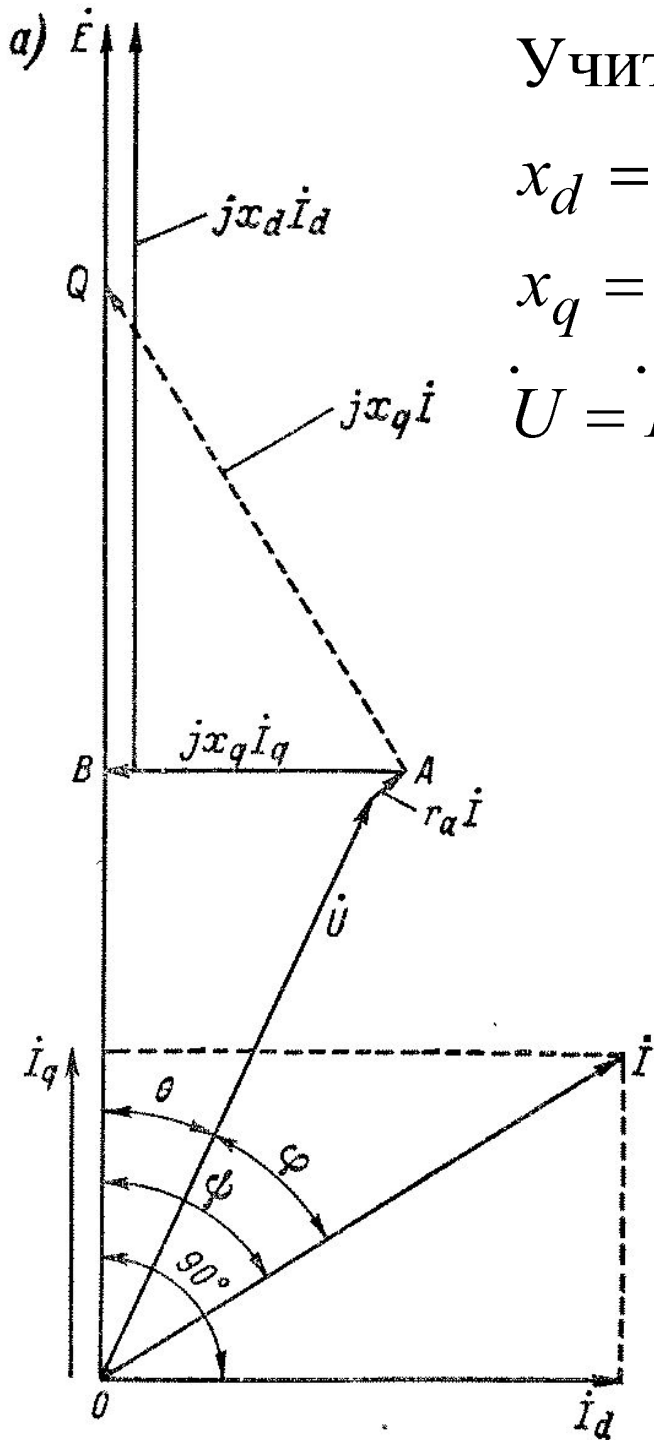
Векторная диаграмма явнополюсного генератора при активно-емкостной нагрузке $\phi < 0$, $\psi < 0$, $I_d < 0$, реакция якоря намагничивающая

УЧИТЫВАЯ ЧТО

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma ad}$$

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma aq}$$

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q - r_a \dot{I}$$



CM

Неявнополюсная машина

$$x_{ad} = x_{aq}, \quad x_d = x_q$$

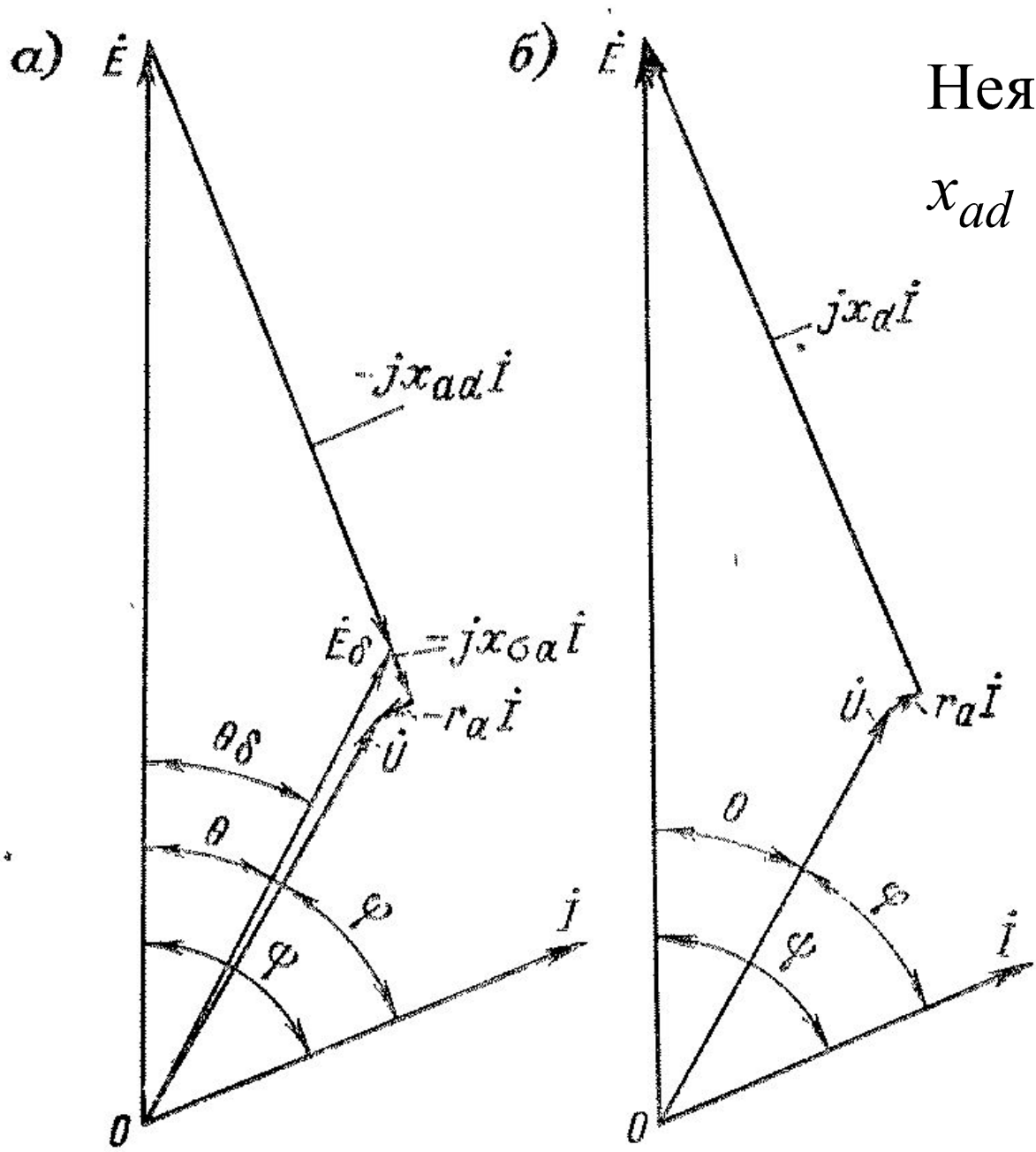
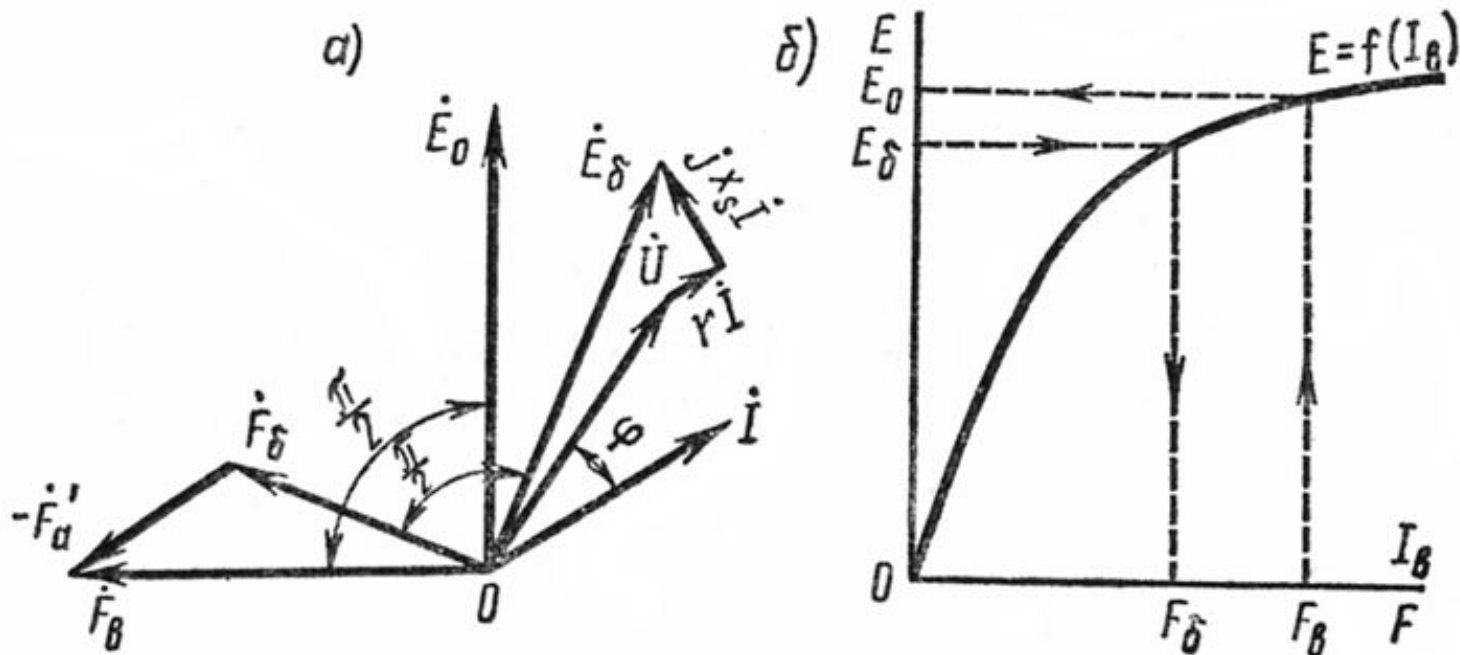


Диаграмма Потье (с учетом насыщения)

Диаграмма Потье используется для определения тока возбуждения синхронной машины, требуемого для обеспечения заданного режима работы

$$\left(U_{зад}, \cos(\varphi) \right) \quad F_{\delta} = F_e + F_a \quad E_{\delta} = U + I(r_a + jx_{\sigma})$$



Построение диаграммы неявнополюсного генератора с учетом насыщения:

а – векторная диаграмма;

б – характеристика холостого хода

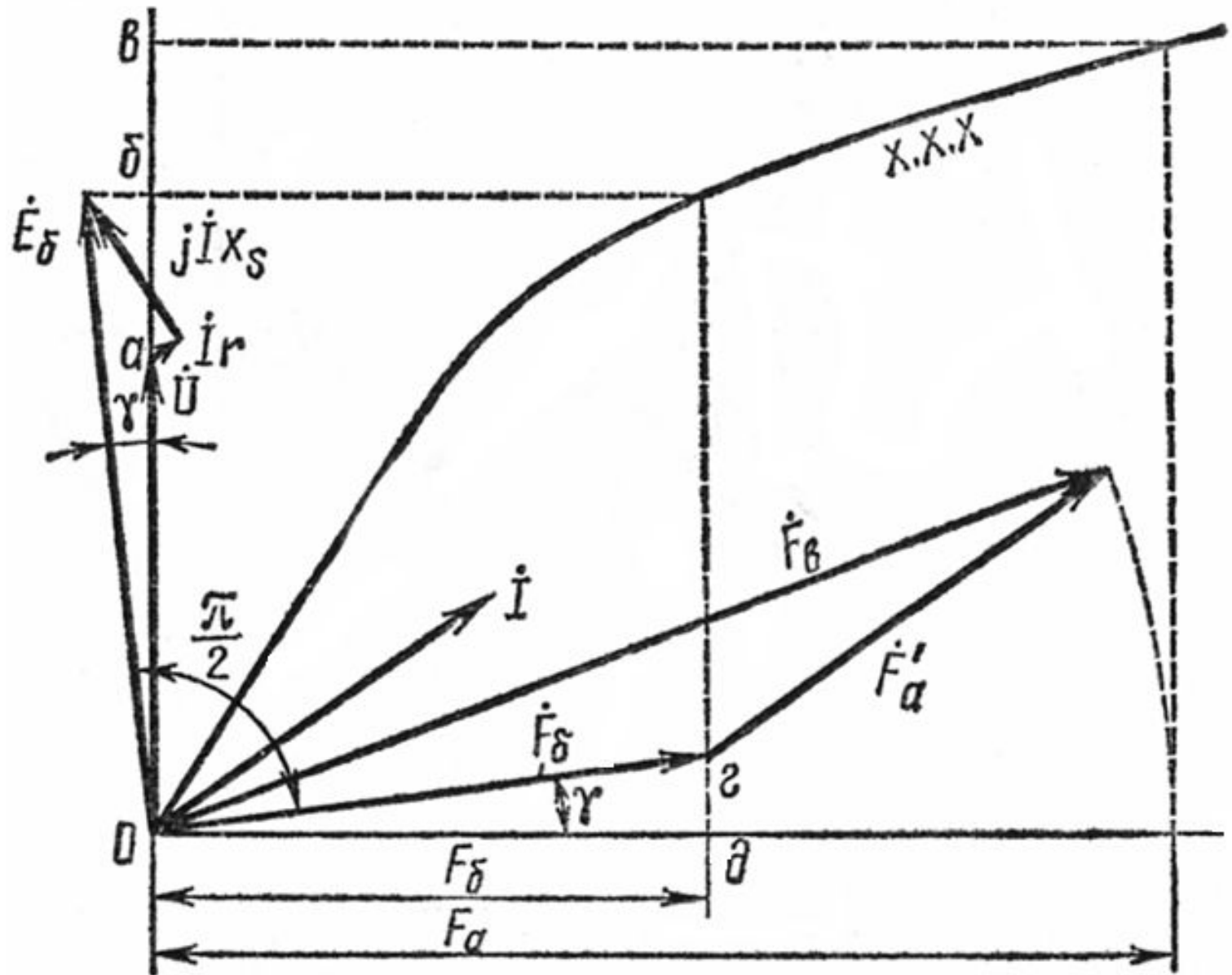
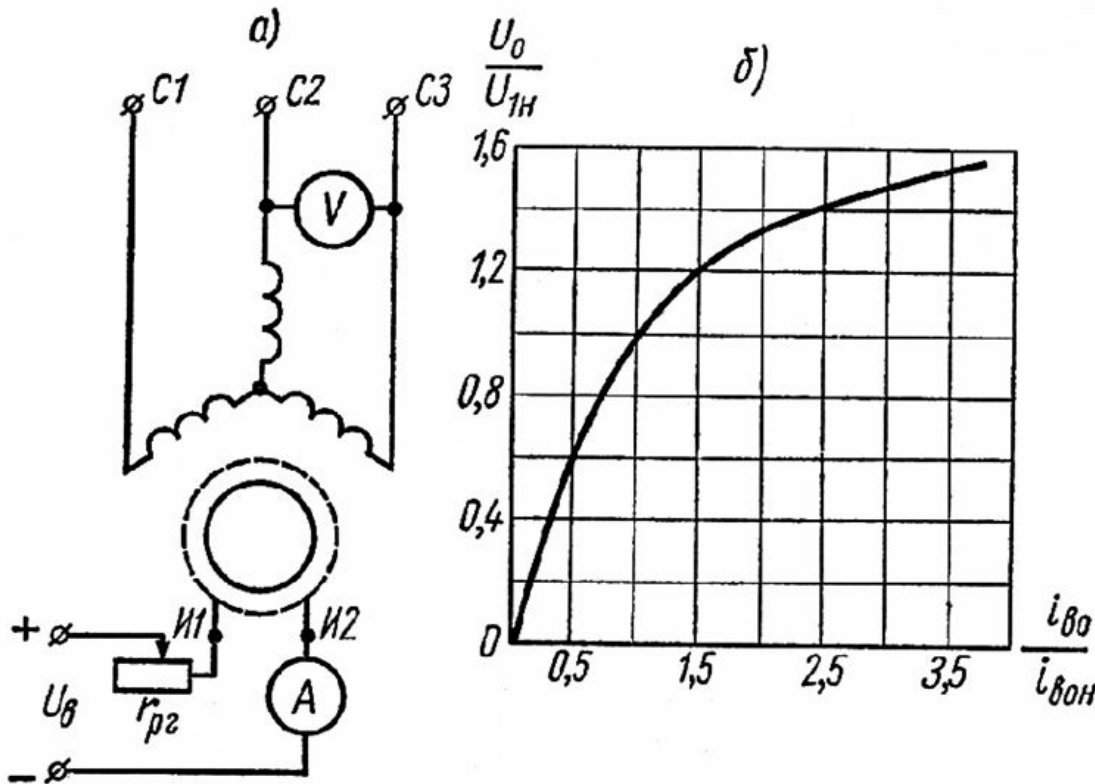


Диаграмма неявнополюсного генератора,
совмещенная с характеристикой холостого хода

Характеристики синхронных генераторов

Характеристика холостого хода

$$U = f(i_e) \quad I_1 = 0 \quad f = f_H$$



$$\Psi = 4,44 f w_1 k_{об}$$

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu}$$

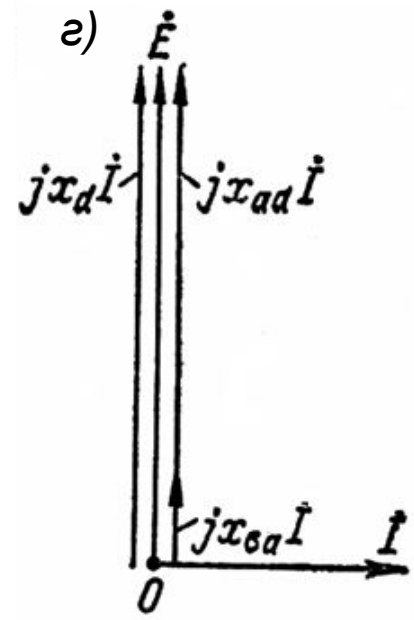
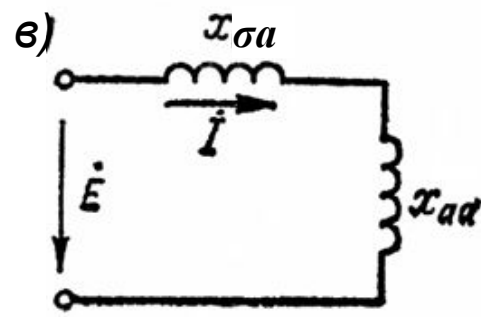
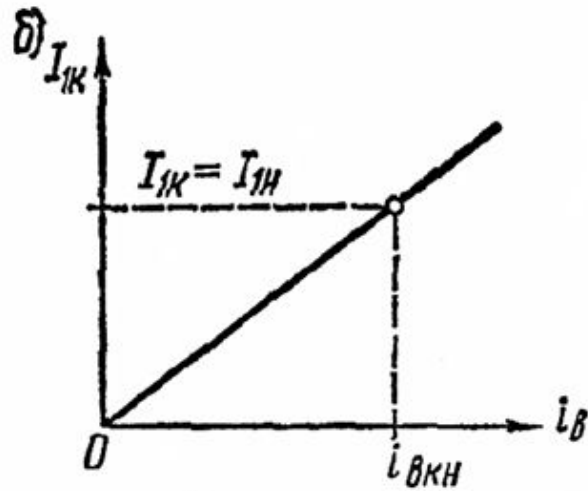
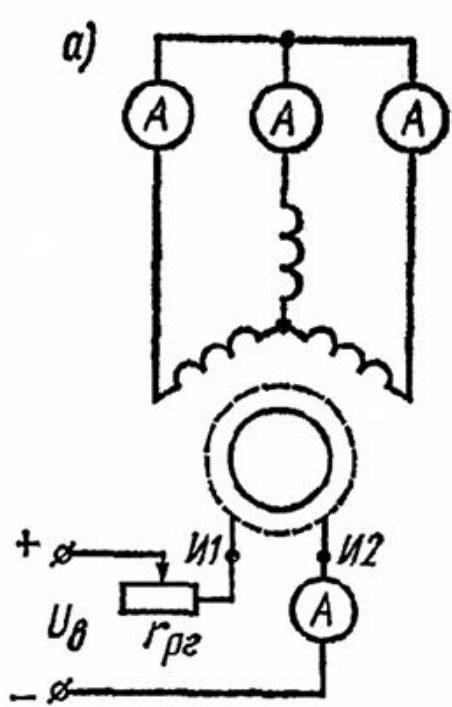
Опыт холостого хода синхронного генератора:

а – схема опыта;

б – нормальная характеристика холостого хода.

Характеристика короткого замыкания

$$I_K = f(\psi_{\delta}) \quad n = const$$



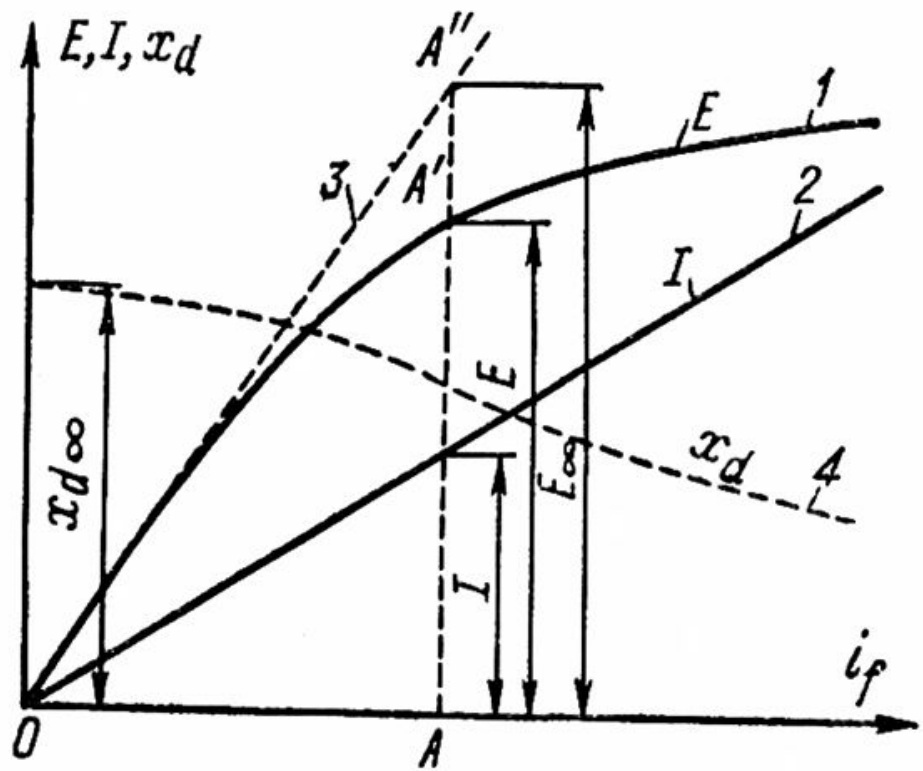
$$E_{\delta} = E - x_{ad}I = x_{\sigma a}I$$

$$E = x_d I$$

- а – схема опыта;
- б – характеристика короткого замыкания;
- в – схема замещения;
- г – векторная диаграмма.

В режиме короткого замыкания реакция якоря чисто размагничивающая (г-мало), поток машины мал, следовательно, магнитная цепь ненасыщенна и характеристика короткого замыкания линейна.

Опытное определение x_d



Ненасыщенное значение $x_{d\infty}$

$$x_{d\infty} = \frac{E_{\infty}}{I}$$

Насыщенное значение x_d

$$x_d = \frac{E}{I} = \frac{E_{\infty}}{k_{\mu d} I} = \frac{x_{d\infty}}{k_{\mu d}}$$

$$k_{\mu} = \frac{E_{\infty}}{E}$$

E_{∞} – ЭДС без учета насыщения магнитной цепи

E – ЭДС с учетом насыщения

- Характеристики холостого хода (кривая 1) и короткого замыкания (кривая 2) синхронного генератора
- Спрямолинейная характеристика ХХ (кривая 3)
- Изменение синхронного индуктивного Сопротивления по оси d (кривая 4)

Опытное определение отношения короткого замыкания (о.к.з.)

$$k_{\text{ОКЗ}} = \frac{I_{\text{КО}}}{I_{\text{H}}}$$

$$I_{\text{КО}} = \frac{U_{\text{H}}}{x_d}$$

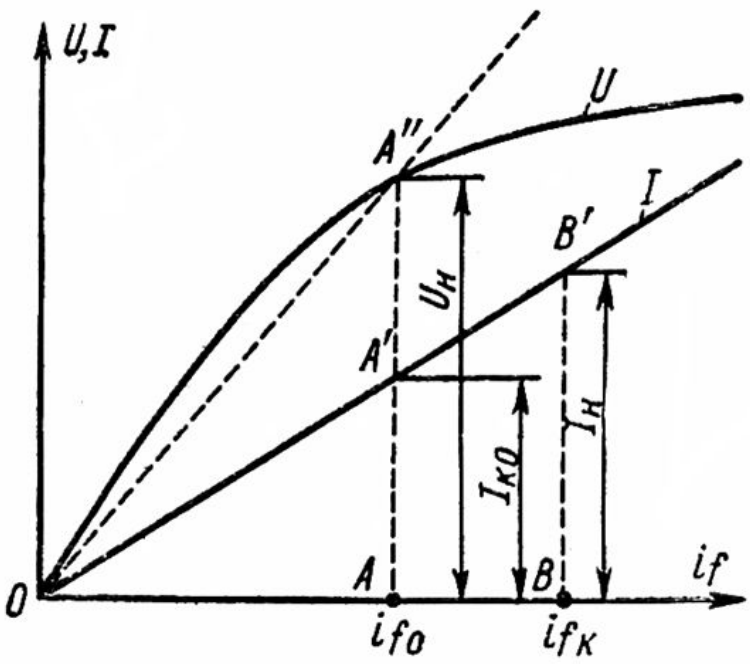
x_d насыщенное продольное синхронное сопротивление при $E = U_{\text{H}}$

$$k_{\text{ОКЗ}} = \frac{U_{\text{H}}}{x_{\text{H}} I} = \frac{1}{x_d^*} = \frac{k_{\mu d}}{x_{d\infty}^*};$$

Исходя из подобия $\triangle OAA'$ и $\triangle OBB'$ $k_{\text{ОКЗ}} = \frac{I_{f0}}{I_{fk}}$

$k_{\text{ОКЗ}} = 0,8$ для генераторы

$k_{\text{ОКЗ}} = 0,45$ для генераторы

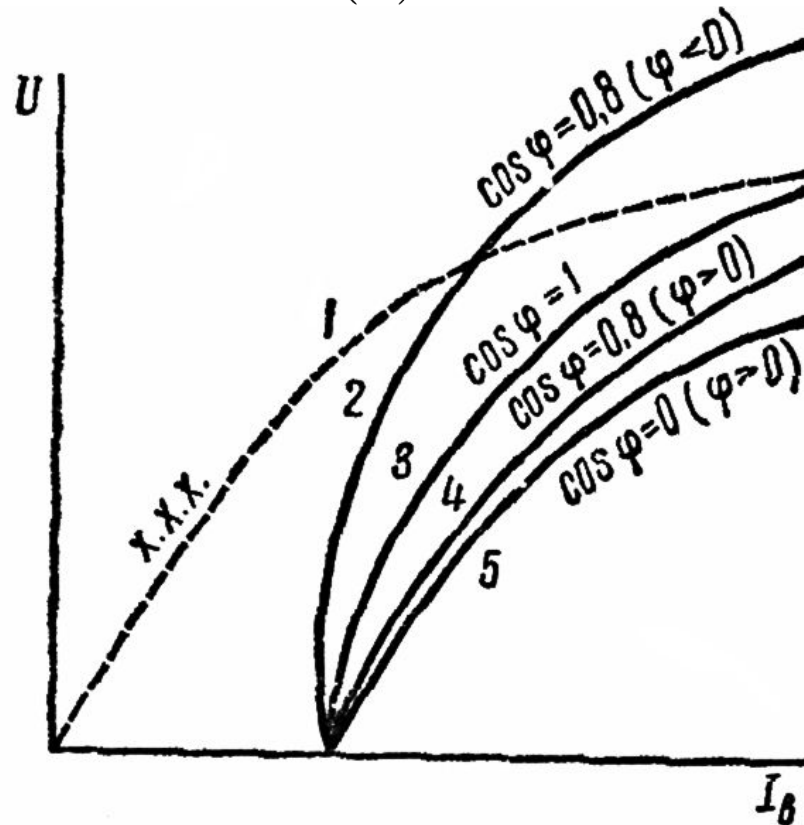


ОКЗ – отношение установившегося тока короткого замыкания $I_{\text{ко}}$ при токе возбуждения, который при X и $n=n_n$ дает $E=U_n$ к току номинальному I_n .

Нагрузочные характеристики

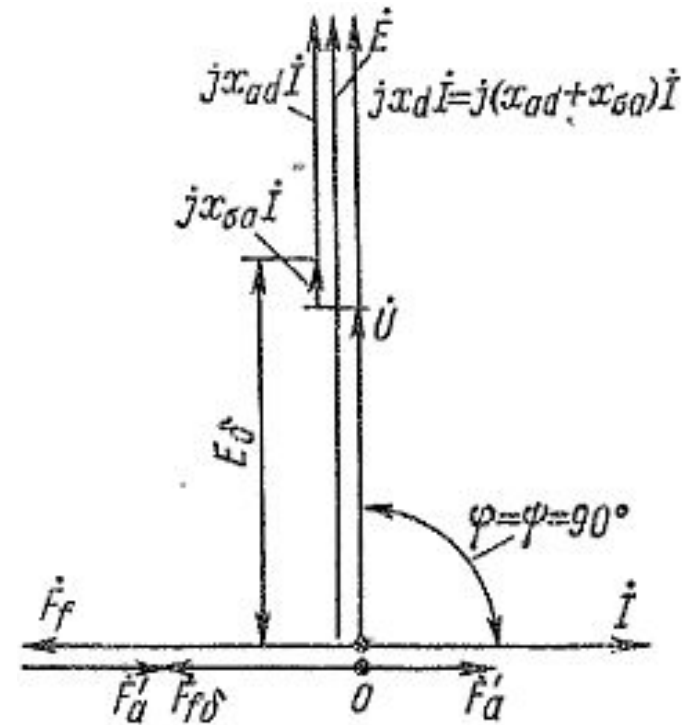
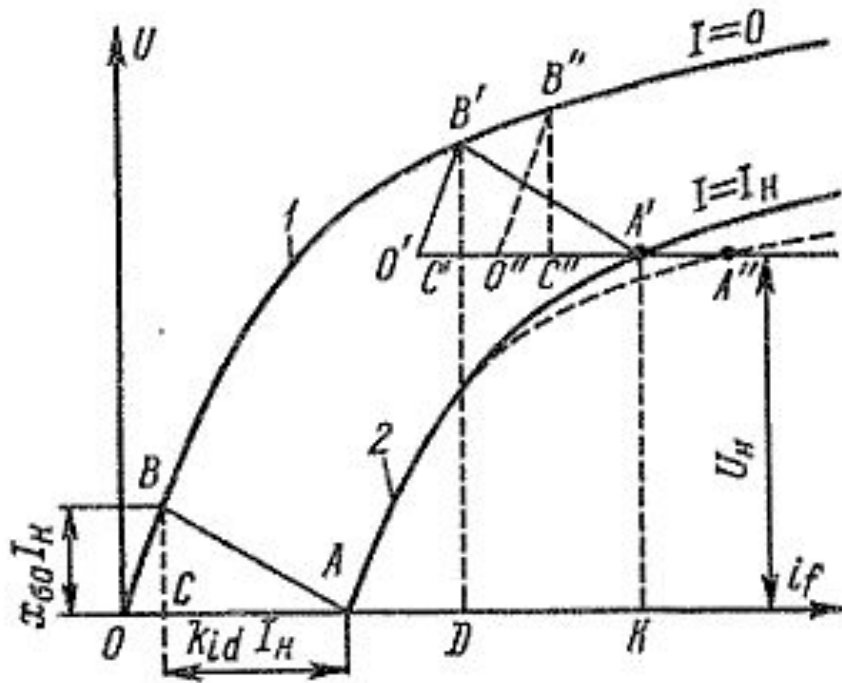
$$U = f(I_f) \text{ при } I = \text{const}, f = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}$$

Нагрузочная характеристика при $\cos(\varphi) = 0$ называется *индукционной* (кривая 5)



Нагрузочные характеристики
синхронного генератора

Реактивный треугольник



- 1 – характеристика холостого хода
- 2 – индукционная нагрузочная характеристика

ΔCBA реактивный треугольник

$CB = x_{\sigma a} I_n$ падение напряжения в сопротивлении рассеяния якоря

$CA = F_a$ м.д.с. реакции якоря

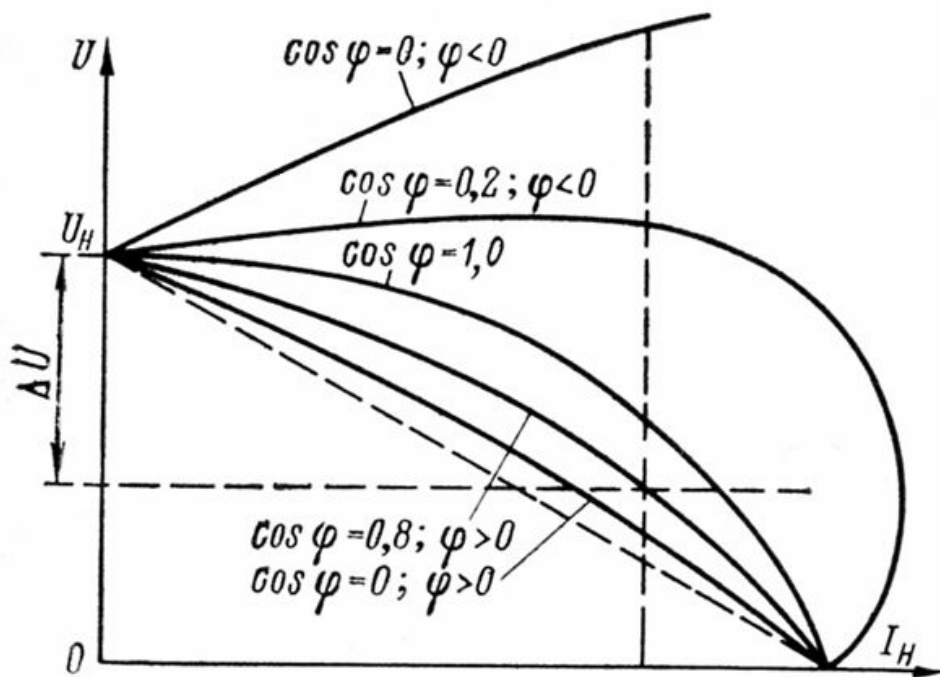
$x_p = \frac{C''B''}{I_n}$ индуктивное сопротивление Потье

$x_p \approx (1,05 \div 1,1) x_{\sigma a}$ явнополюсные

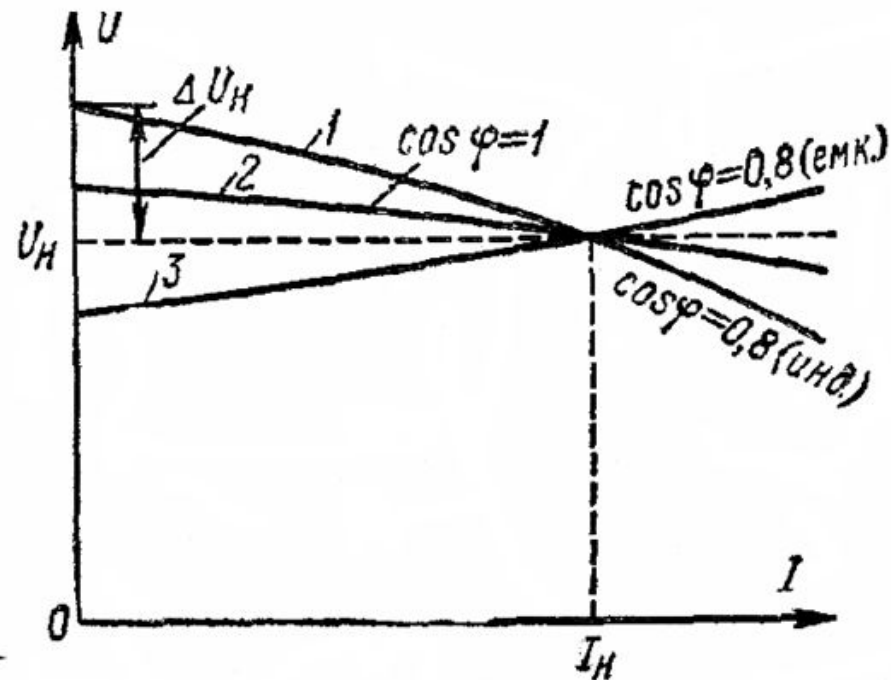
$x_p \approx (1,05 \div 1,1) x_{\sigma a}$ неявнополюсные

Внешние характеристики

$$U = f(I) \text{ при } i_f = \text{const}, n = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}$$



Внешние характеристики
синхронного генератора для $U=U_H$ при $I=0$

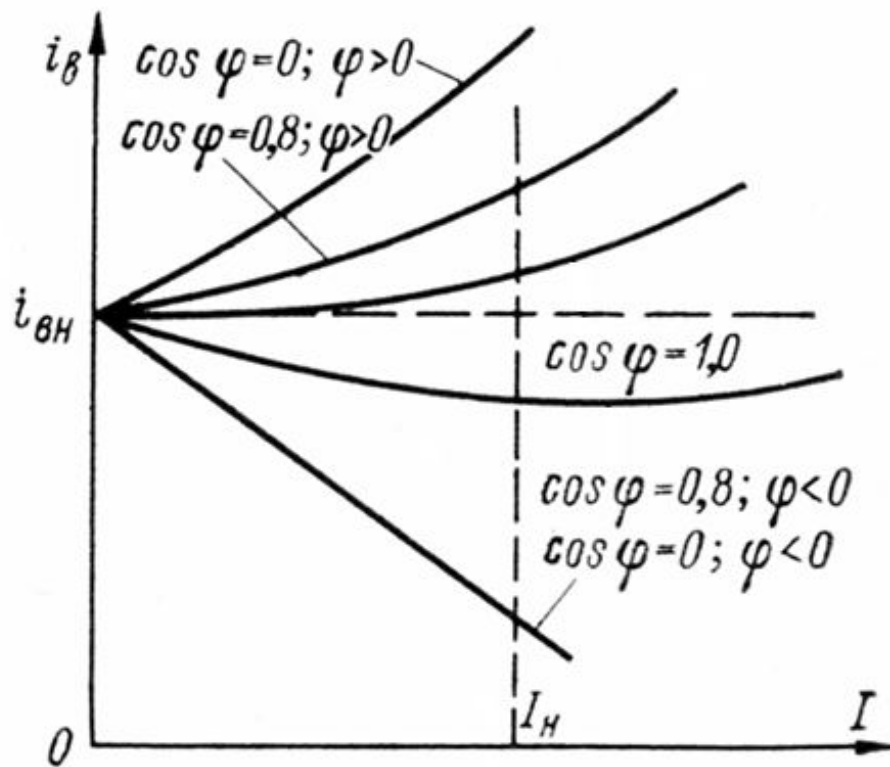


Внешние характеристики
синхронных генераторов для $U=U_H$ при $I=I_H$

$$\Delta U_{H\%} = (25 \div 35)\%$$

Регулировочные характеристики

$$i_f = f(I) \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}$$

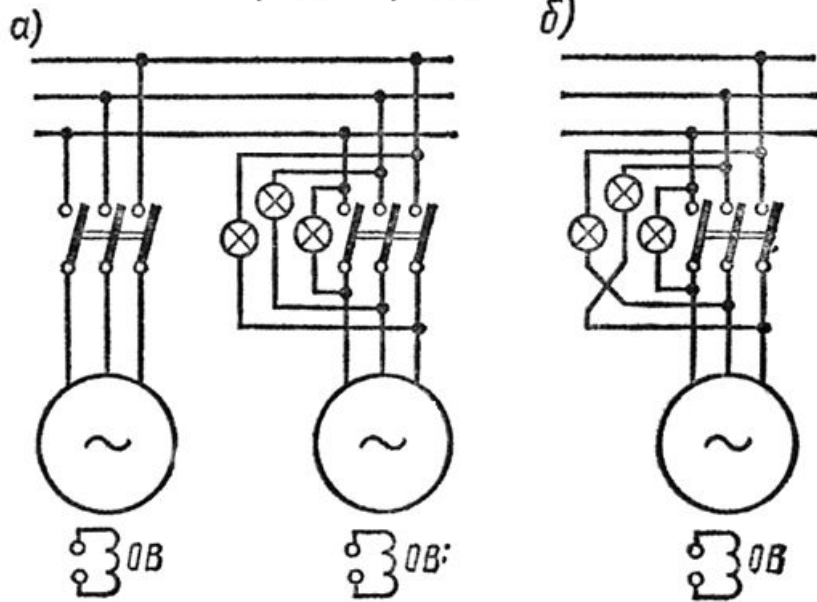


Параллельная работа синхронных машин

Особенности параллельной работы СГ

В энергосистеме параллельно работают несколько сотен машин, следовательно

$$P_{\text{сети}} \gg P_{\text{ген}} \Rightarrow U_{\text{ген}} = U_{\text{сети}} = \text{const},$$
$$f_{\text{ген}} = f_{\text{сети}} = \text{const}$$



Схемы включения синхронных генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации

а – на потухание света; б – на вращение света

Метод точной синхронизации

Условия включения на параллельную работу

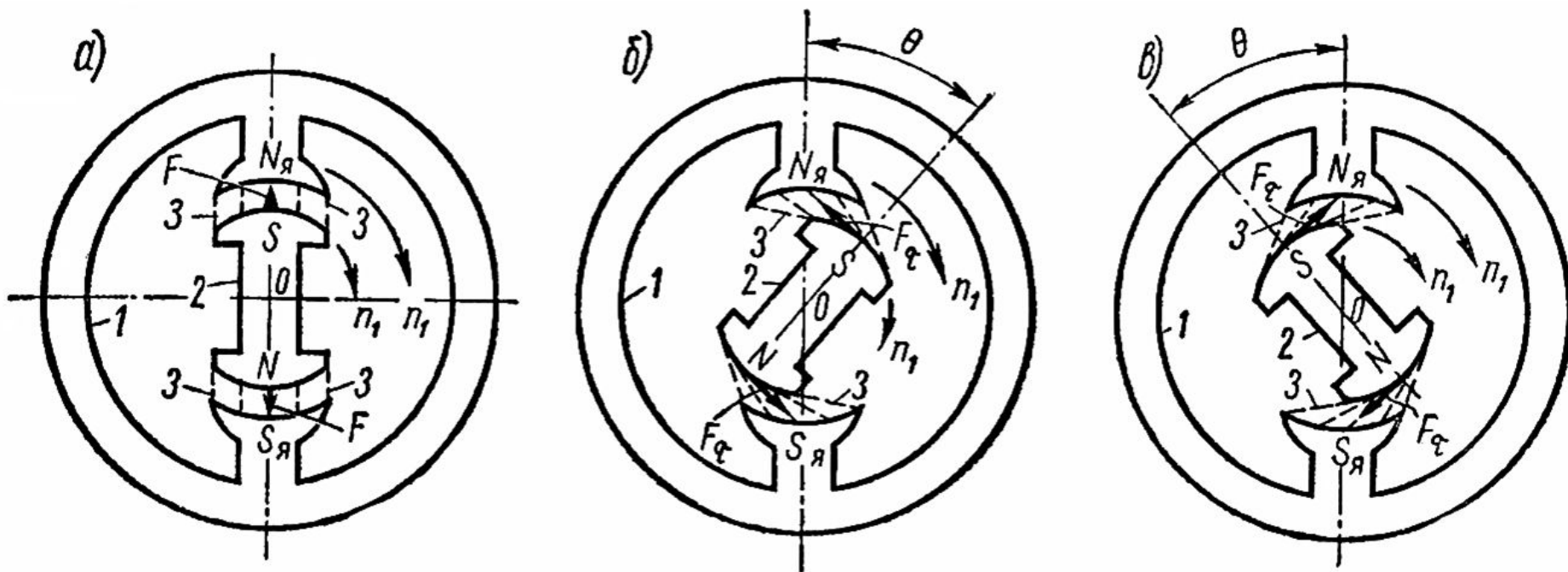
1. Равенство напряжений СГ и сети
2. Равенство частот напряжения СГ и сети
3. Одинаковое чередование фаз СГ и сети
4. Одинаковые фаза напряжений СГ и сети

Метод самосинхронизации

1. Проверяется чередование фаз.
2. Разгоняется генератор до $n = n_H$ при $I_f = 0$.
3. Обмотка якоря подключается к сети.
4. Подается питание на ОВ

Синхронные режимы параллельной работы

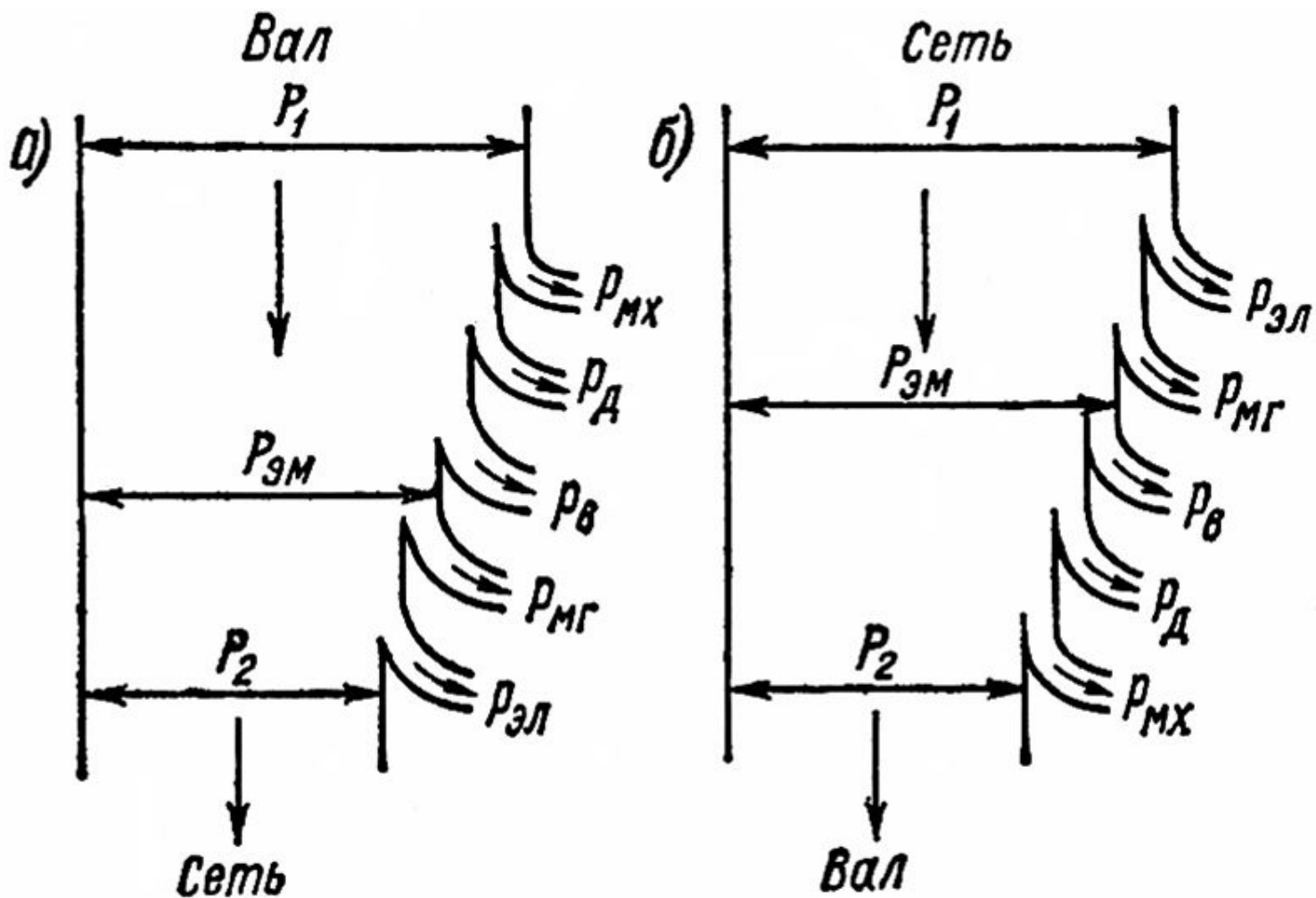
Режимы работы синхронной машины параллельно с сетью при синхронной скорости вращения называются *синхронными*.



Условные модели, иллюстрирующие взаимодействие полей синхронной машины:

а – при холостом ходе; б – в генераторном режиме; в – в двигательном режиме

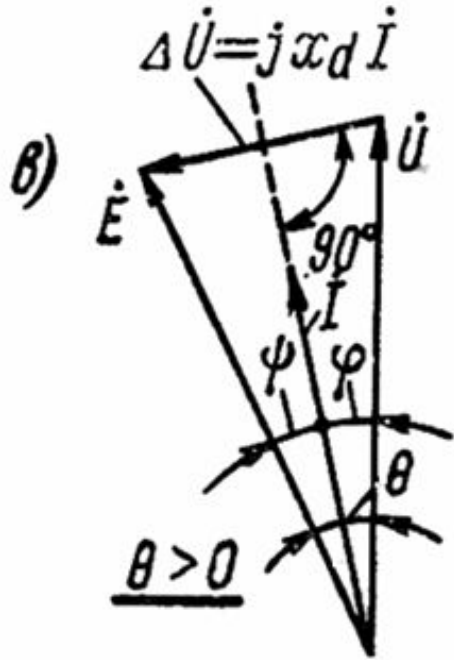
Энергетические диаграммы



Энергетические диаграммы синхронного генератора (а) и двигателя (б)

Регулирование активной мощности

При работе с сетью большой мощности $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$.



$$I_{fi} = I_f \Rightarrow E_0 = U$$

$n \boxtimes n_1 \rightarrow E_0$ сдвинется в

сторону вращения на $\theta \rightarrow$

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_c + E_0 \rightarrow I \approx -j \frac{\Delta \dot{U}}{x_d}$$

I отстает от $\Delta \dot{U}$ на $90^\circ \rightarrow \psi \boxtimes 90^\circ$

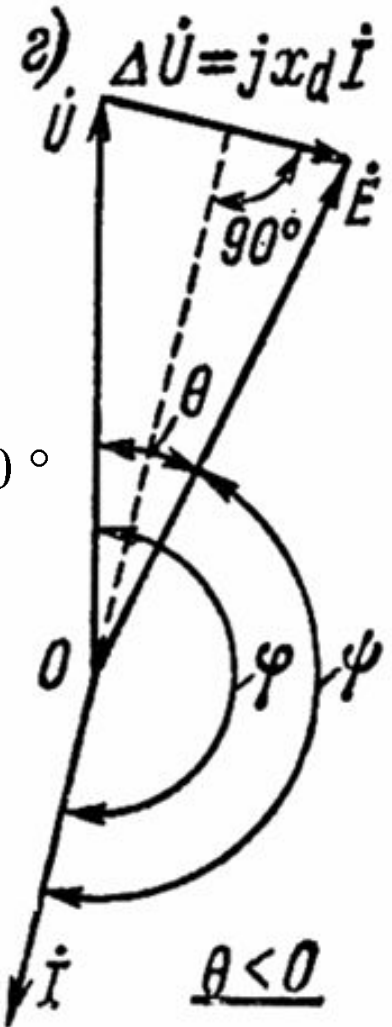
$P_{эм} = m E_0 I \cos \psi \rightarrow$

активную мощность в сеть

(в) – генераторный режим Аналогично для $n \boxtimes n_1$

θ – угол нагрузки

Изменение активной мощности синхронной машины, возможно только при изменении механической мощности на ее валу.



(г) – двигательный режим

Регулирование реактивной мощности

$U = \text{const}$ и $f = \text{const}$

$$I_{fi} = I_f, E_0 = U$$

$$I_{fi} \neq I_f \Rightarrow \Delta \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U} \neq 0 \Rightarrow I \approx -j \frac{\Delta \dot{U}}{x_d}$$

Ток отстает от $\Delta \dot{U}$ и E_0 на $\psi = 90^\circ$

$E_0 I$ вырабатывает реактивную мощность

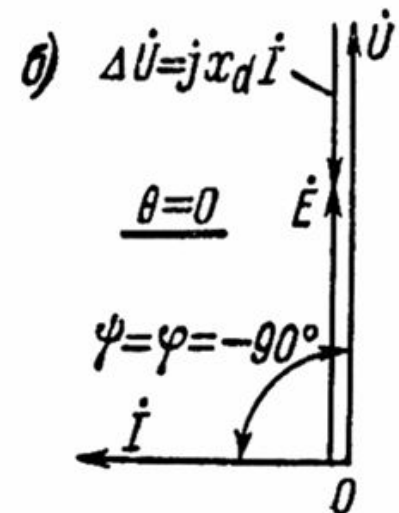
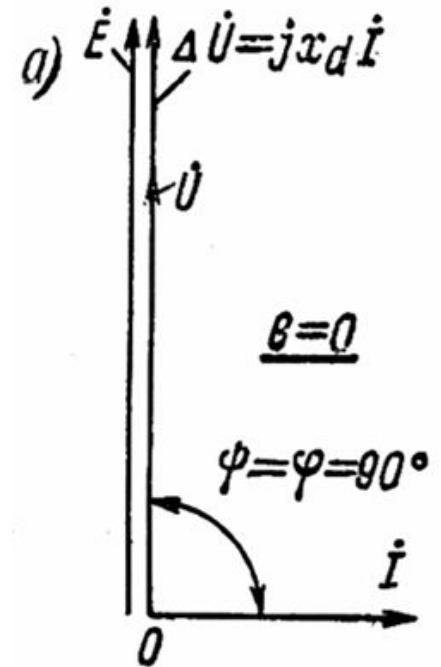
Аналогично для $I_{fi} \neq I_f$

Векторные диаграммы (а) и (б) – изменение реактивной мощности при изменении тока возбуждения для $P=0$.

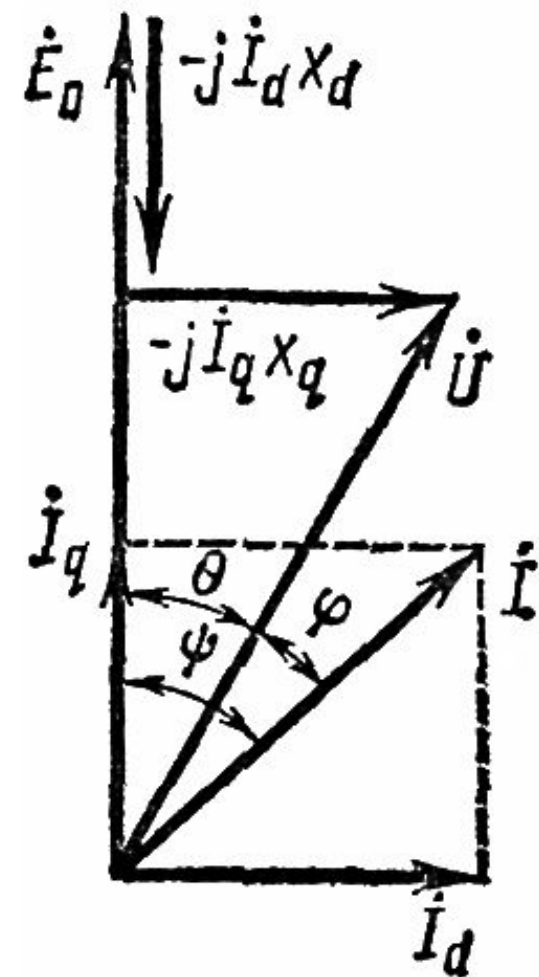
При $E_0 > U_c$ синхронная машина считается перевозбужденной, а при $E_0 < U_c$ – недовозбужденной.

Перевозбужденная машина эквивалентна емкости, а недовозбужденная индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется *синхронным компенсатором*.



Электромагнитная мощность СМ



$P_2 = mUI \cos \varphi$ — активная мощность генератора

$$P_{\text{ЭМ}} = mUI \cos \varphi = P_{\text{ЭЛ1}} + P_{\text{СТ}} = P \cos \varphi + \text{ЭЛ1} + \text{СТ}$$

если $P_{\text{ЭЛ1}} \approx 0$ и $P_{\text{СТ}} \approx 0$, то $P_{\text{ЭМ}} = mUI \cos \varphi$

из векторной диаграммы $\varphi = \psi - \theta$

$$I_q \sin \theta = U \sin \theta \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q} \cos \psi$$

$$I_d \sin \theta = E_0 - U \cos \theta \quad I_d = \frac{E_0 - U \cos \theta}{x_d} \sin \psi$$

$$P_{\text{ЭМ}} = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi - \theta) = mUI \sin \psi \sin \theta +$$

$$+ mUI \cos \psi \cos \theta = \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

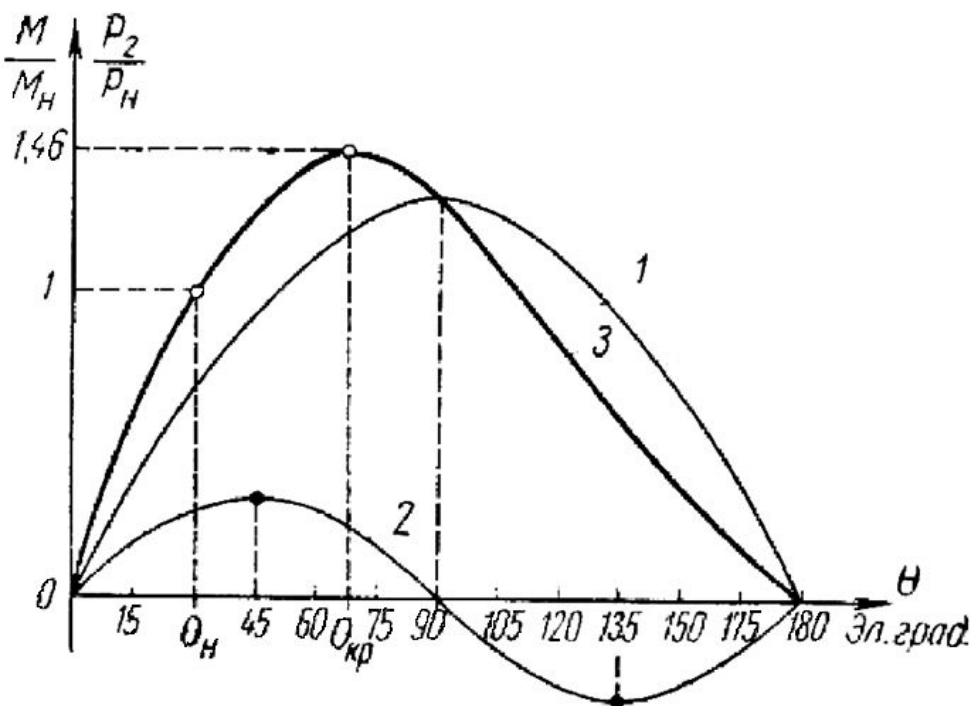
Электромагнитный момент и угловые характеристики

$$P_{ЭМ} = P_{сн} + \text{доп } P \quad P_{сн} \equiv \sin^2 \theta \quad \text{доп } P \equiv (d - q) \sin 2\theta$$

$$P_{\text{доп}} \approx (0,25 \text{ я.с.м.}) P_{сн} \times \omega \times P \quad d = q \quad \text{доп } P = 0$$

$$M_{ЭМ} = \frac{P}{\Omega} = \frac{p \cdot P}{\omega}$$

$$M_{ЭМ} = \frac{mUE_0}{\Omega \cdot x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$



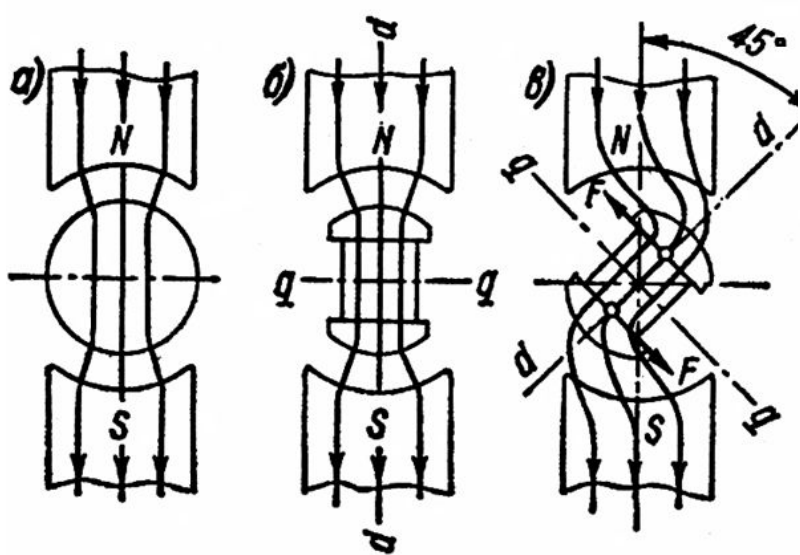
$P_{сн} = \frac{p}{\omega} \frac{mUE}{x_d} \sin^2(\theta)$ — соответствует только в возбужденной СМ
 $P_{\text{доп}} = \frac{p}{\omega} \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right)$ — не зависит от возбуждения

Угловая характеристика электромагнитного момента и активной мощности синхронного генератора

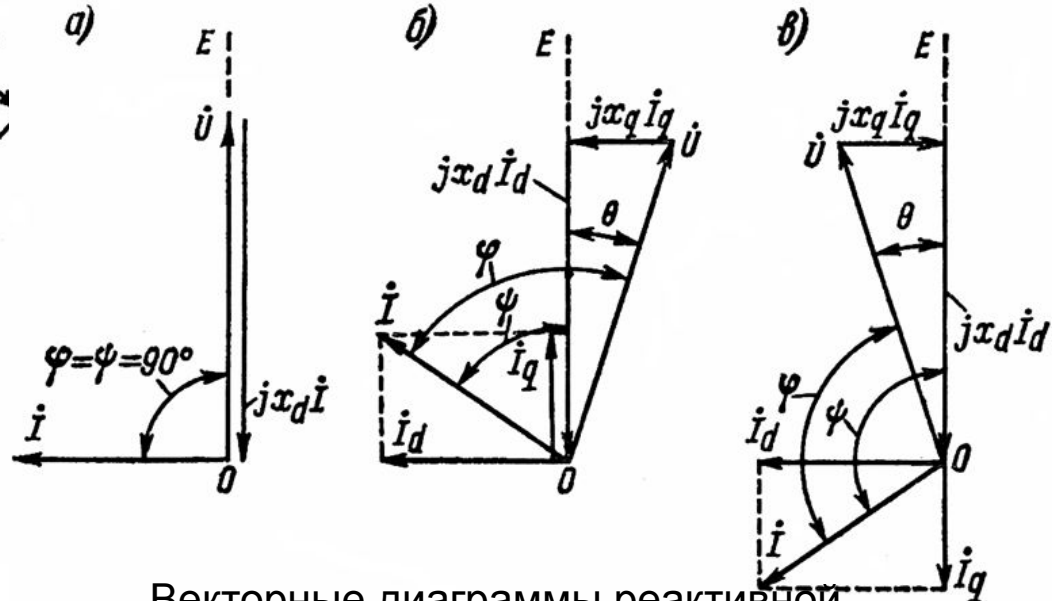
Реактивные синхронные машины

Электромагнитный момент невозбужденной явнополюсной машины возникающий исключительно вследствие неравномерности воздушного зазора (*реактивный*) называется

Явнополюсная синхронная машина не имеющая собственного источника поля возбуждения называется *реактивной*.

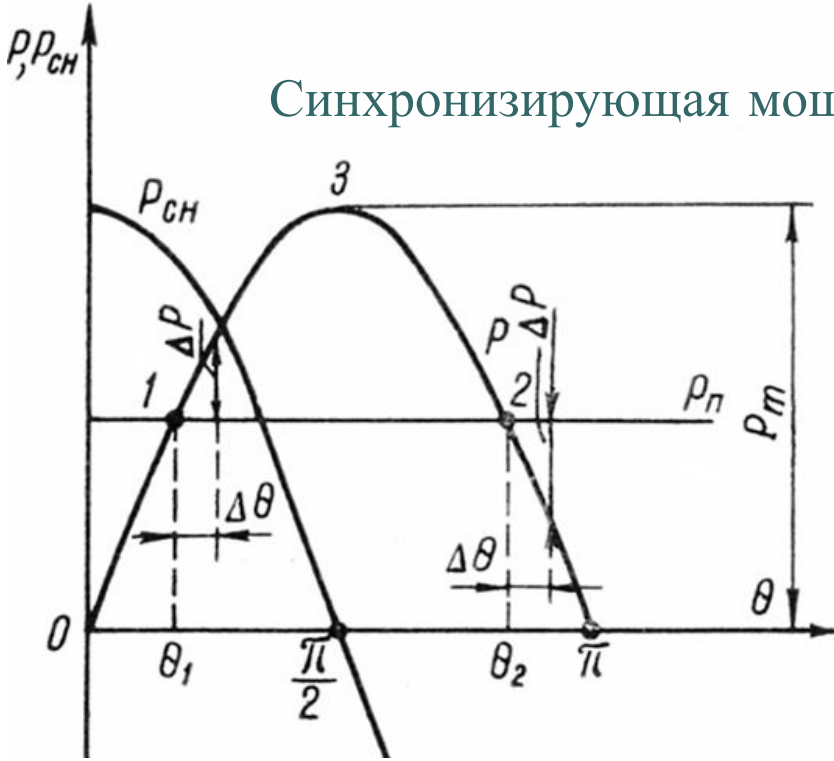


Картины магнитного поля невозбужденной синхронной машины



Векторные диаграммы реактивной синхронной машины при работе на холостом ходу (а), в режиме генератора (б), и двигателя (в)

Синхронизирующая мощность, перегрузочная способность СМ



$$k_{\Pi} = \frac{M_m}{P_H} = \frac{m}{M_H} = \frac{1}{\sin \theta_H} \quad - \text{коэфф.}$$

перегрузочной способности - предельно возможная кратность перегрузки при весьма медленном увеличении внешнего момента (регламентируется ГОСТ).

$$P_m \equiv E_0 \equiv I_f \rightarrow \uparrow I_f \rightarrow \uparrow P_m$$

при проектировании $\delta \uparrow \rightarrow x_d \uparrow \rightarrow P_m \uparrow$

$\theta \approx \frac{\pi}{2}$ - устойчивая работа СГ (точка 1)

$M_{эм} = M_n$, Пусть $\theta \uparrow \Rightarrow M_{эм} \uparrow \Rightarrow M_{эм} > M_n \Rightarrow \Delta \Rightarrow \theta \downarrow$ вернется в точку 1

Пусть $\theta \downarrow \Rightarrow M_{эм} \downarrow \Rightarrow M_{эм} < M_n \Rightarrow \Delta \Rightarrow \theta \uparrow$ вернется в точку 1

$\theta \approx \frac{\pi}{2}$ - неустойчивая работа СГ (точка 2)

$M_{эм} = M_n$, Пусть $\theta \uparrow \Rightarrow M_{эм} \downarrow \Rightarrow M_{эм} < M_n \Rightarrow \Delta \Rightarrow \theta \uparrow$ выпадение из синхронизма

Пусть $\theta \downarrow \Rightarrow M_{эм} \uparrow \Rightarrow M_{эм} > M_n \Rightarrow \Delta \Rightarrow \theta \downarrow$ выпадение из синхронизма

Синхронизирующая мощность

Устойчивая работа $\frac{\Delta M}{\Delta \theta} \gg 0$ или $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} \gg 0$

$P_{сн} = \frac{\Delta P}{\Delta \theta}$ или $сн = \frac{\partial P}{\partial \theta}$ - коэфф. синхронизирующей мощности

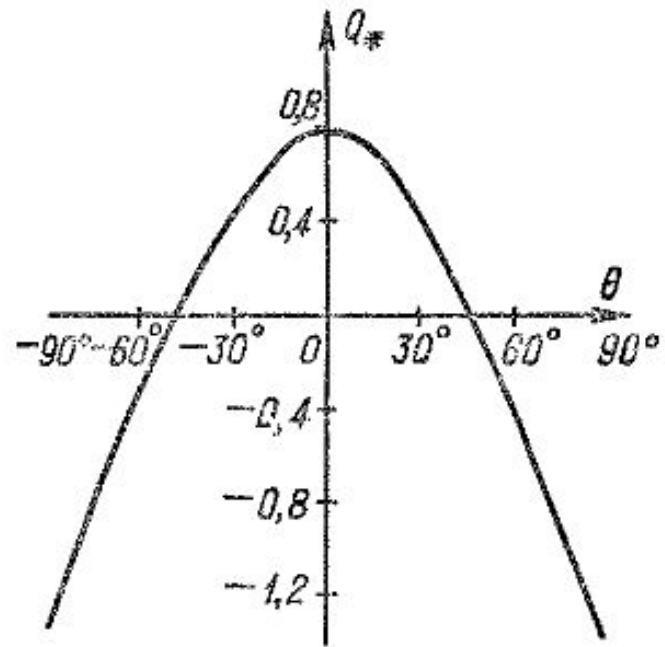
аналогично $M_{сн} = \frac{\partial M}{\partial \theta}$ - коэфф. синхронизирующего момента

Характеризуют способность машины держаться в синхронизме при той или иной нагрузке.

$$P_{сн} = \frac{mUE_0}{x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta$$

$$M_{сн} = \frac{mUE_0}{\Omega x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta$$

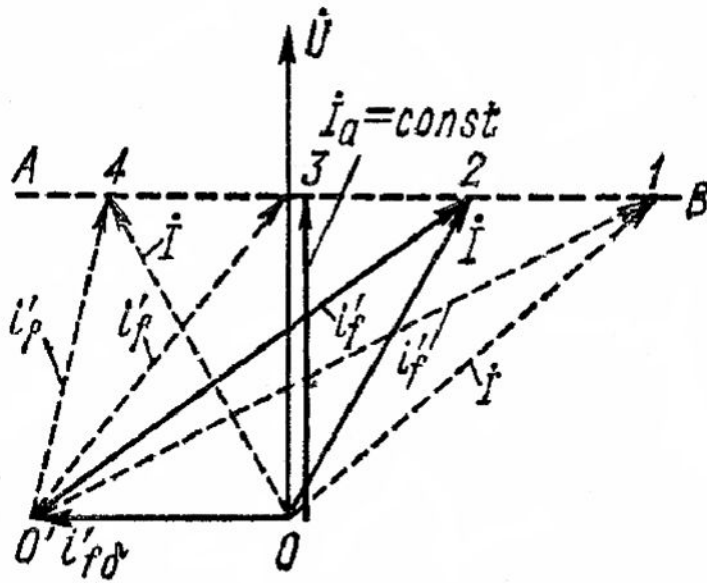
Угловая характеристика реактивной мощности



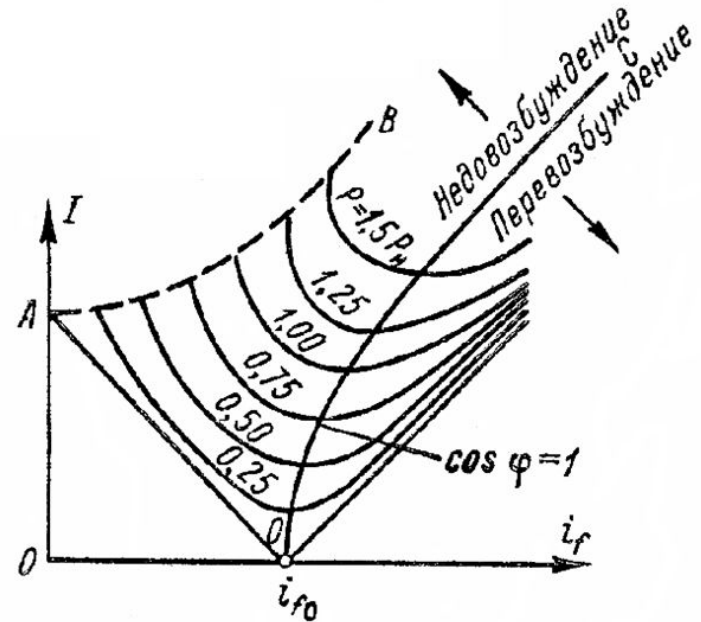
$$Q = \frac{mEU}{x_d} \cos \theta - \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta - \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right)$$

U – образные характеристики

$$U = f(i_{fd}), U_c = U = const, P = const, f = f$$



Упрощенная векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора



U – образные характеристики синхронной машины

$$P = mUI \cos \varphi = const \Rightarrow I_a = const$$

Примем $x_{\sigma a} = 0$,

$$E_{\delta} = U = const \Rightarrow i_{f\delta} = const$$

$$i'_{f\delta} = i'_{f\delta} - I$$

$$\Phi \approx 4.44 f W_{\text{об}} k_{\text{об}} \delta \quad \delta =$$

$\varphi \uparrow (\downarrow) \Rightarrow I \uparrow (\downarrow) \Rightarrow$ (реакция якоря)

Линия АВ граница устойчивости $\theta = \theta_{кр}$

Синхронные двигатели

Достоинства

Синхронные двигатели могут работать с $\cos\varphi=1$, не потребляя реактивной мощности, а при перевозбуждении отдают реактивную мощность в сеть.

При пониженном напряжении СД сохраняет большую нагрузочную способность, т.к. $M_{max} \equiv U$ (в АД $M_{max} \equiv U^2$)

Вследствие большого зазора добавочные потери меньше, КПД выше, чем в АД

Частота вращения синхронных двигателей определяется частотой питания и не зависит от нагрузки на валу.

Недостатки

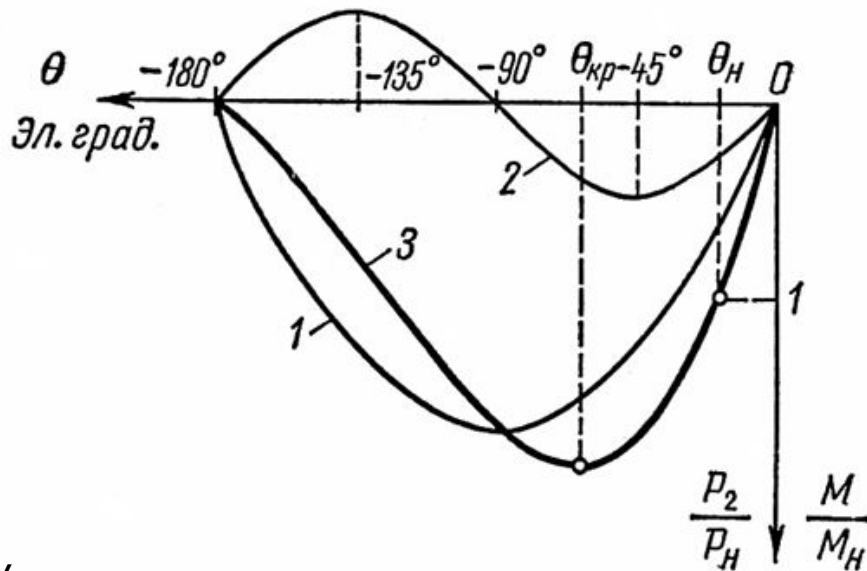
Более сложная конструкция по сравнению с АД с КЗ ротором

Необходимость в источнике возбуждения

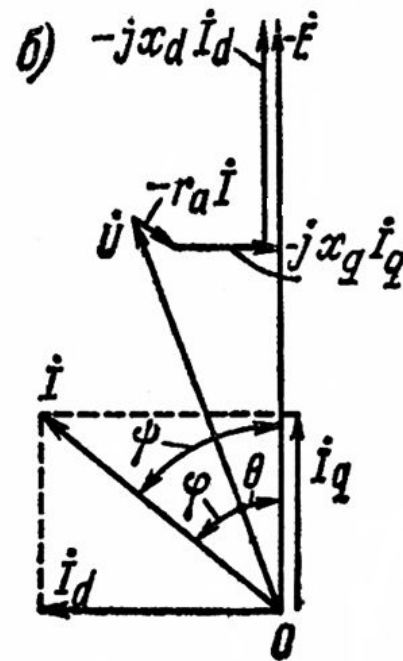
Большая стоимость

Пуск и регулирование скорости вращения сложнее чем у АД

Синхронные двигатели



Угловая характеристика электромагнитного момента и мощности синхронного двигателя



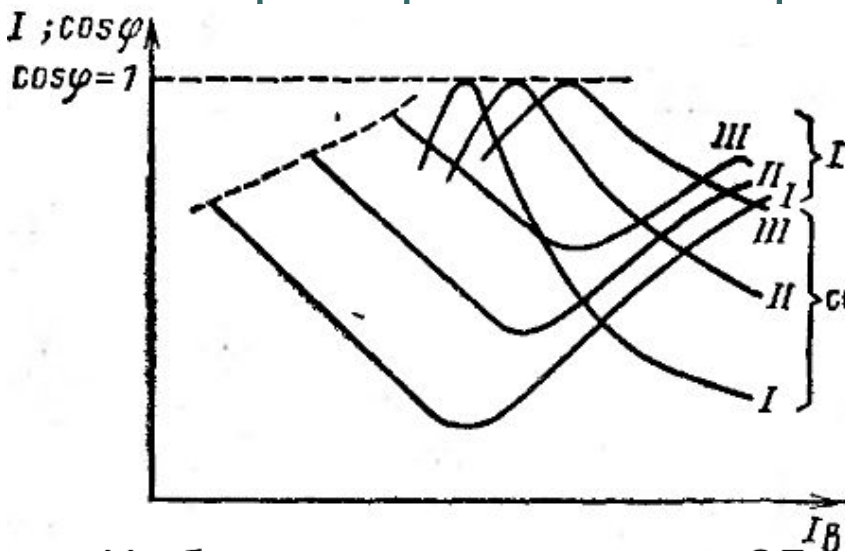
Векторная диаграмма перевозбужденного явнополюсного синхронного двигателя

$$\dot{E} = \dot{U} - r_a \dot{I} - jx_q \dot{I}_q - jx_d \dot{I}_d$$

$$P = mUI \cos \varphi \text{ потребляемая из сети}$$

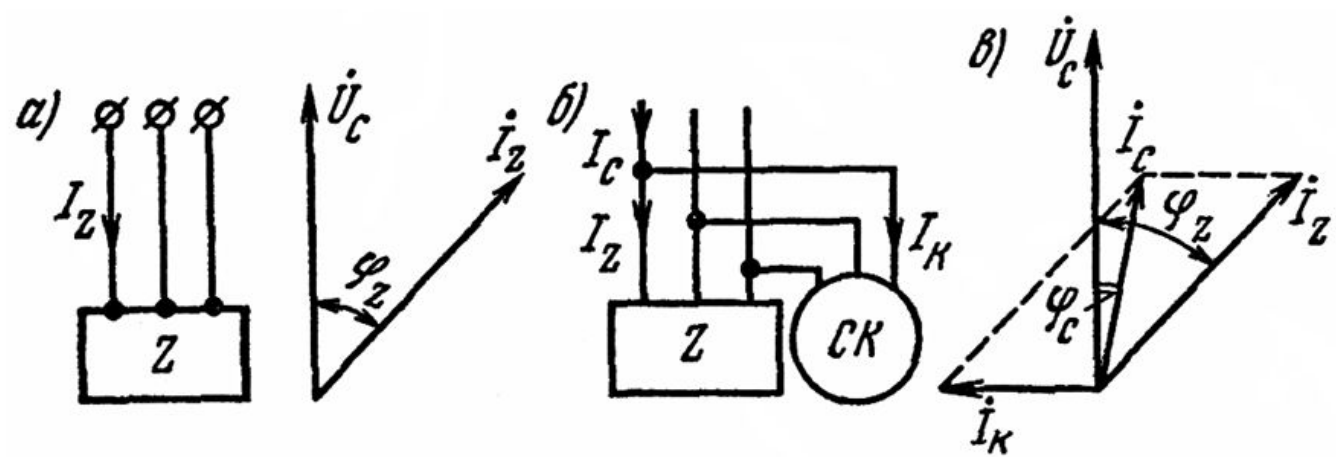
активная мощность

Характеристики синхронных двигателей



I_Z ток в сети при отсутствии компенсатора
 I_K ток компенсатора
 I_C ток в сети при включении компенсатора
 $I_K = I_Z + I_C \rightarrow$ при работе с опережающим током при перевозбуждении
 СК может работать как в режиме перевозбуждения, так и недо возбуждения

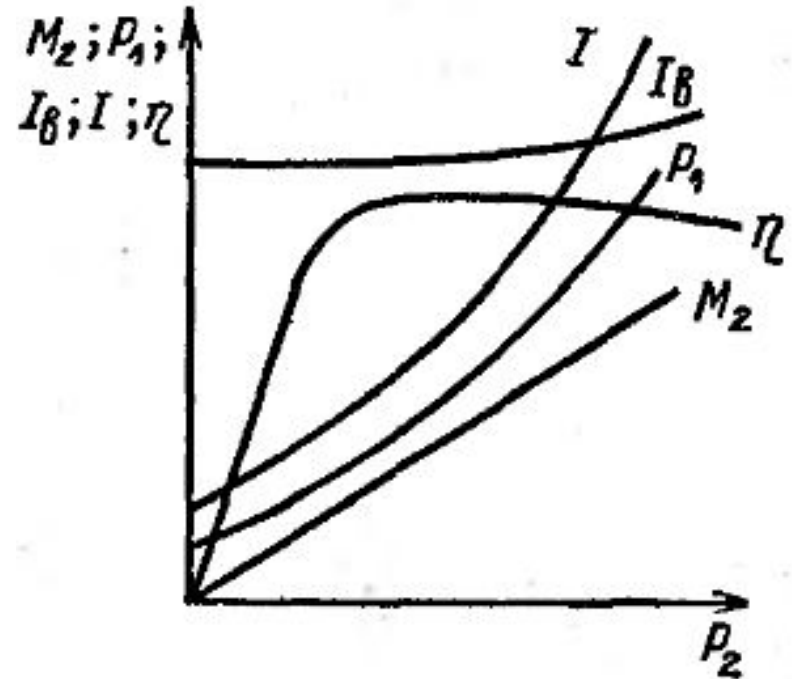
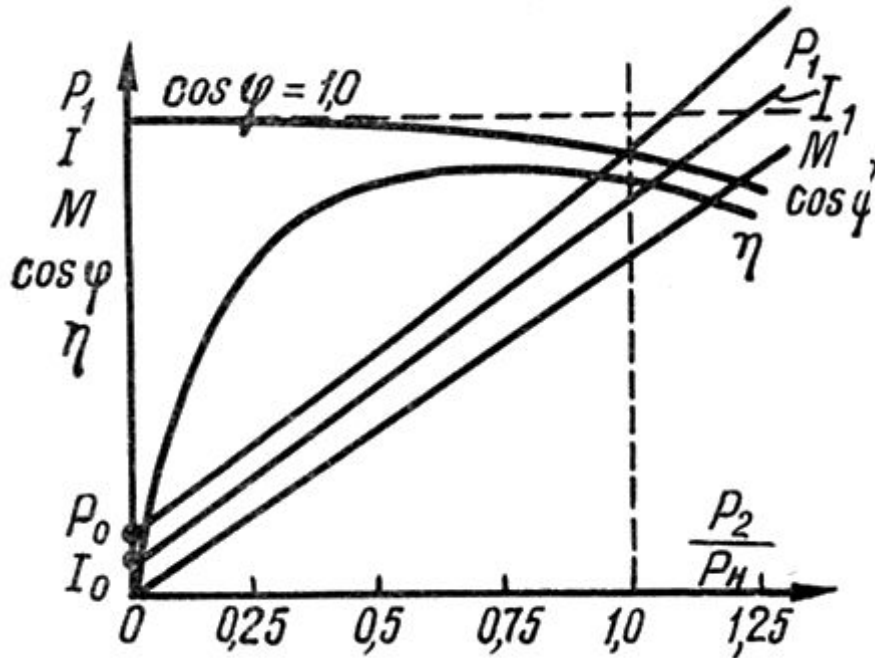
У образные характеристики СД
 Зависимость $\cos \varphi = f(I_B)$



Применение синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности

Характеристики синхронных двигателей

$$P_1, I_1, M, \eta = f(P_2), \quad 2) \cos I_f = const \quad \varphi = const$$



Рабочие характеристики синхронного двигателя

$$M = \frac{P_2}{\omega}, \quad \omega = const$$

при $P_2 = 0$ (хх) $P_1 = P_0 = P_{cm} + P_{mex}$, $I_1 = I_0$

$$P_1 = P_2 + \Sigma P, \quad I_1 = \frac{P_1}{U \cos \varphi}$$

Способы пуска СД

1. С помощью вспомогательного двигателя

- ОВ включена в сеть, ОЯ разомкнута, $n = n_1$ разгонным двигателем (генераторный режим)
- Подключение к сети, отсоединение двигателя, переход в двигательный режим

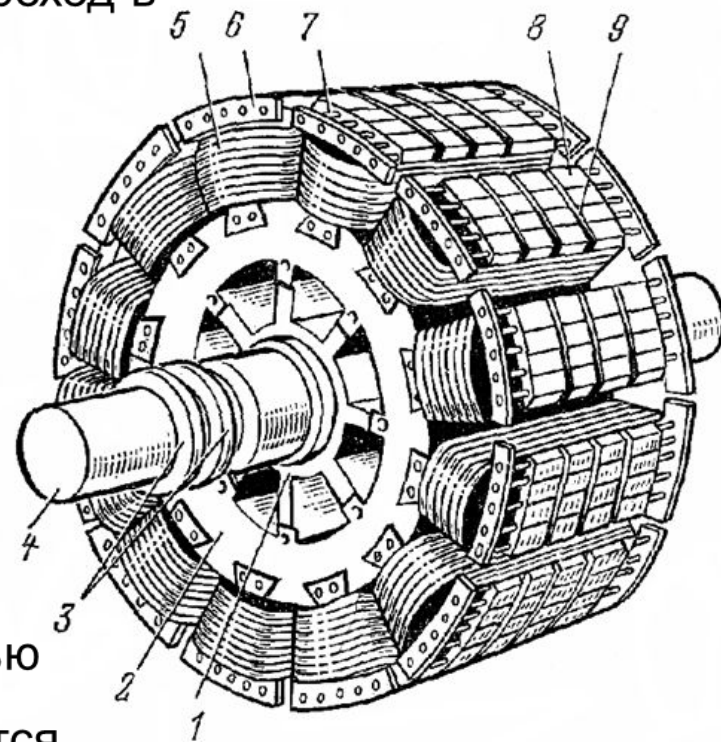
2. Частотный способ

Подключение к автономному источнику с $f = var$

3. Асинхронный

Наличие пусковой обмотки

- ОВ не включена, ОЯ подключается в сеть
- В пусковой обмотке наведется ЭДС и ток, ротор придет во вращение с асинхронной скоростью
- ОВ подключается к источнику, машина втягивается в синхронизм.



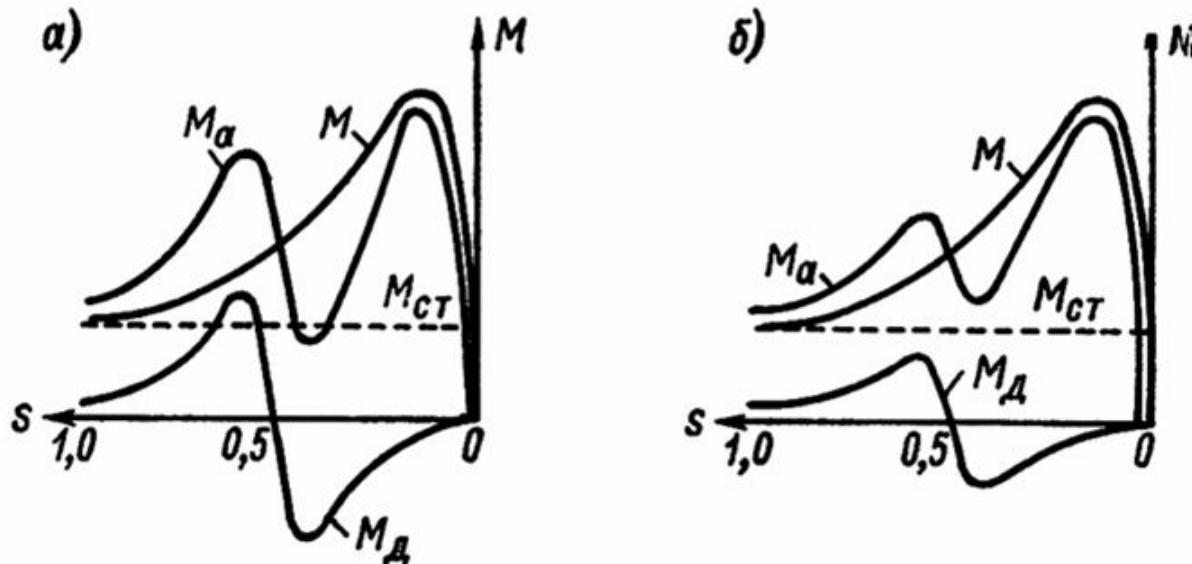
Внешний вид
явнополюсного ротора

Способы пуска СД

При асинхронном пуске:

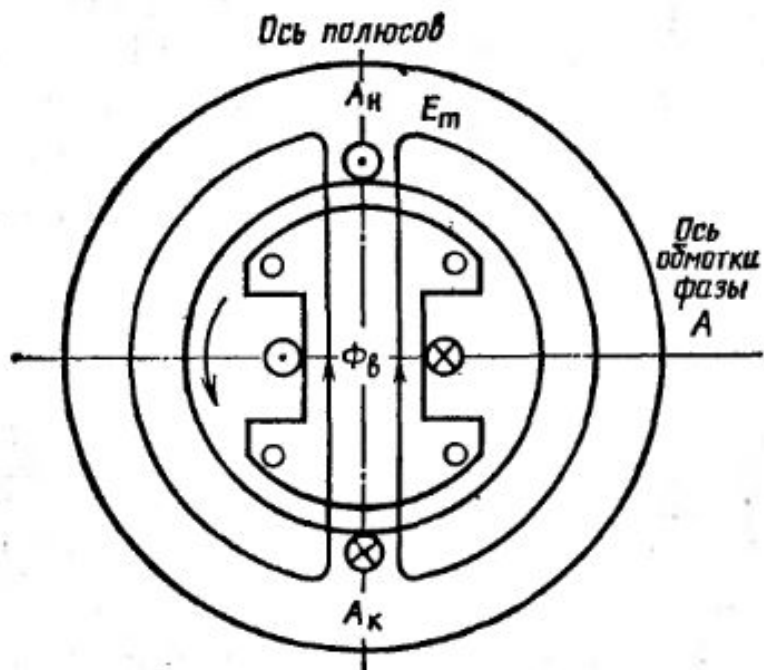
- ОВ нельзя оставлять разомкнутой W_B большое, следовательно наведется большое E ,
- при замкнутой ОВ накоротко провал в механической характеристике (а) машина может застрять на промежуточной скорости.

ОВ замыкают на R_D $R_D = (10 \div 15)R_{OB}$



Кривые вращающихся моментов синхронного двигателя при асинхронном пуске с замкнутой накоротко (а) и через сопротивление (б) обмоткой возбуждения

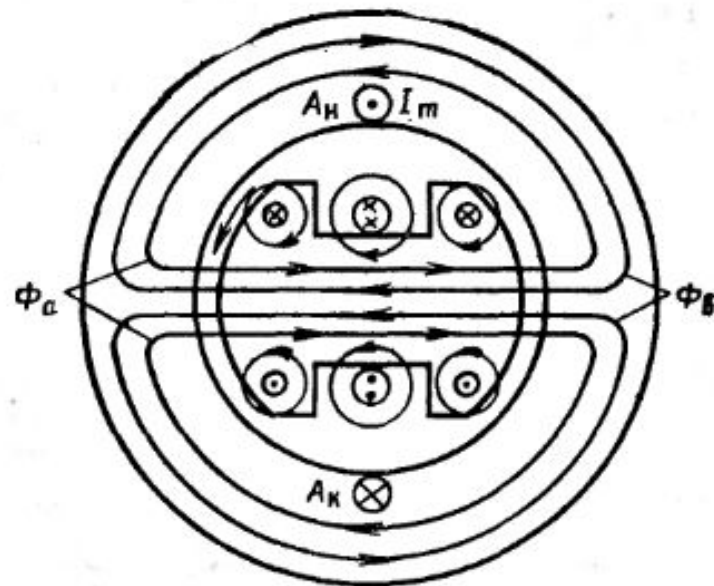
Внезапное К.З. Синхронного генератора



Положение ротора в момент
внезапного КЗ при $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$e = E_m$$

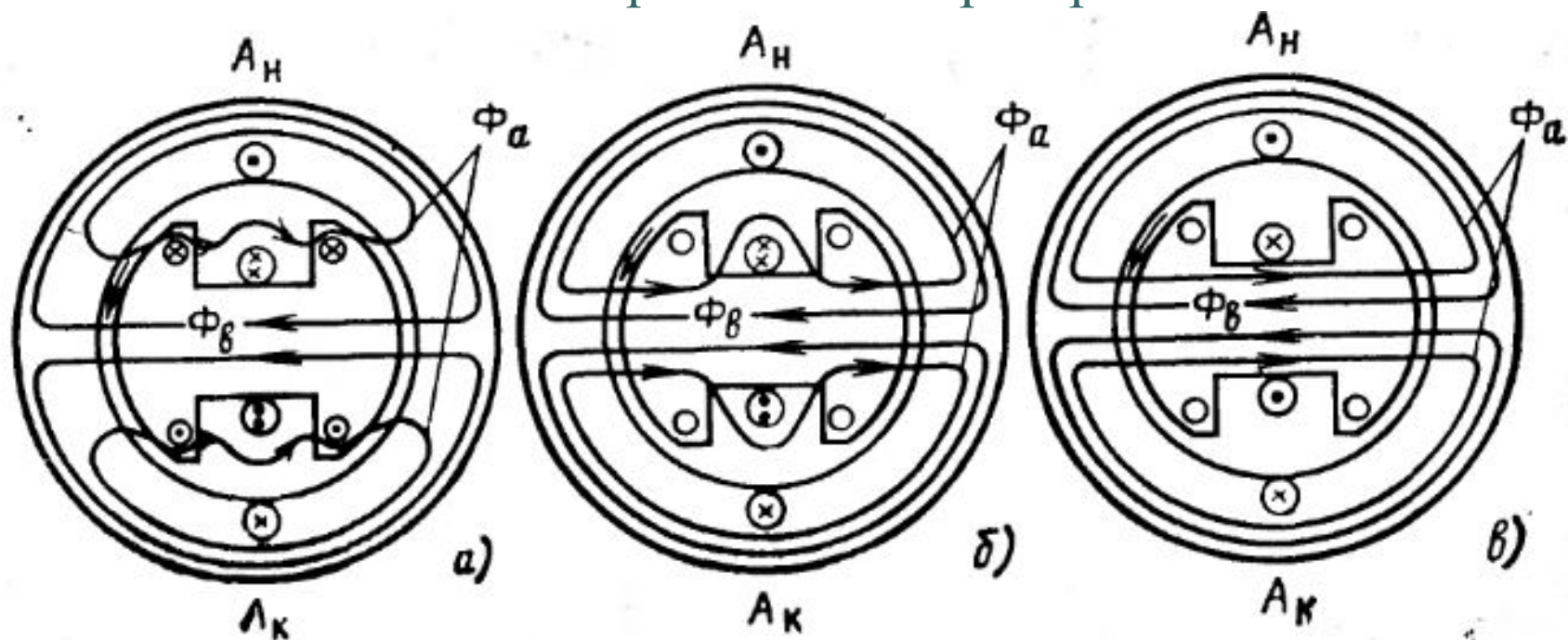


Магнитные поля спустя $\frac{1}{4}$ периода

$$-\frac{d\psi}{dt} = ir$$

$$r \approx 0, \quad -\frac{d\psi}{dt} = 0, \quad \psi = const$$

Внезапное К.З. Синхронного генератора



Магнитные поля СГ при внезапном КЗ для различных моментов времени

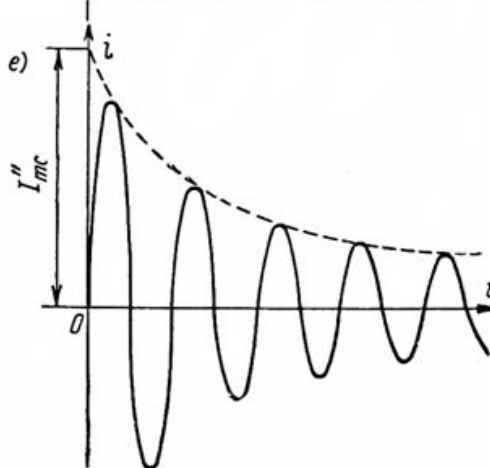
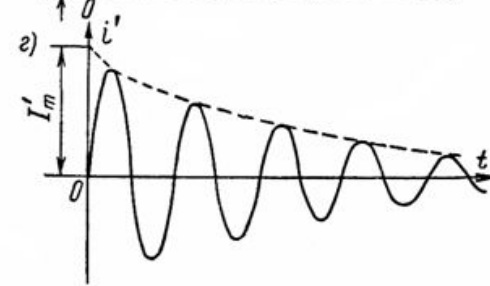
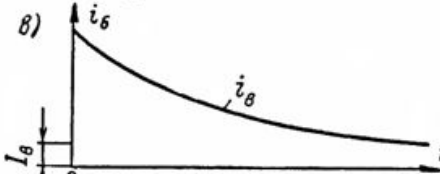
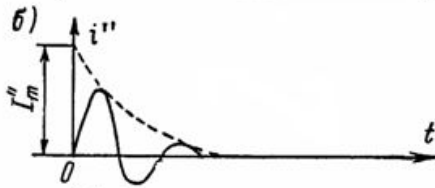
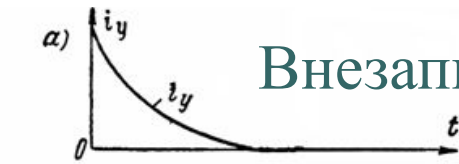
x''_d -сверхпереходное индуктивное сопротивление ОС по продольной оси
(сопротивление в начальный момент времени КЗ)

x'_d -переходное индуктивное сопротивление ОС по продольной оси
(сопротивление в следующий период переходного процесса)

x''_q -сверхпереходное индуктивное сопротивление ОС по поперечной оси

x'_q -переходное индуктивное сопротивление ОС по поперечной оси

Внезапное К.З. Синхронного генератора



$$i'' = I_m'' e^{-t/T_d''} \text{ — переходной ток}$$

$$i' = I_m' e^{-t/T_d'} \text{ — переходной ток}$$

$$i = I_m \text{ — установившийся ток КЗ}$$

$$i_K = i'' + i' + i$$

Токи внезапного короткого замыкания:

- а) — ток в успокоительной обмотке;
- б) — составляющая тока в якоре;
- в) — ток в обмотке возбуждения;
- г) — составляющая этого тока в якоре;
- д) — установившийся ток короткого замыкания в якоре;
- е) — результирующий ток короткого замыкания в якоре.

Ударный ток К.З.

Ударным током короткого замыкания называют пиковое значение тока короткого замыкания.

При отсутствии затухания

$$i_{уд} = \frac{2E_m}{x_d''}$$

По ГОСТ ударный ток к.з. определяется:

$$i_{уд} = \frac{1,05 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot U_H}{x_d''}$$

Например:

$$x_{уд}'' = 0,1 \quad i^\bullet = \frac{i_{уд}}{\sqrt{2}I_H} = \frac{1,8 \cdot 1,05}{0,1} = 18,9$$