

Машины переменного тока ч.2(продол.)

Синхронные машины (СМ) (продолж.).

Реакция якоря (Р.Я.)

при активной нагрузке

при индуктивной нагрузке

при ёмкостной нагрузке

**при активно-индуктивной (смешанной)
нагрузке**

Потоки и ЭДС нагруженного СГ

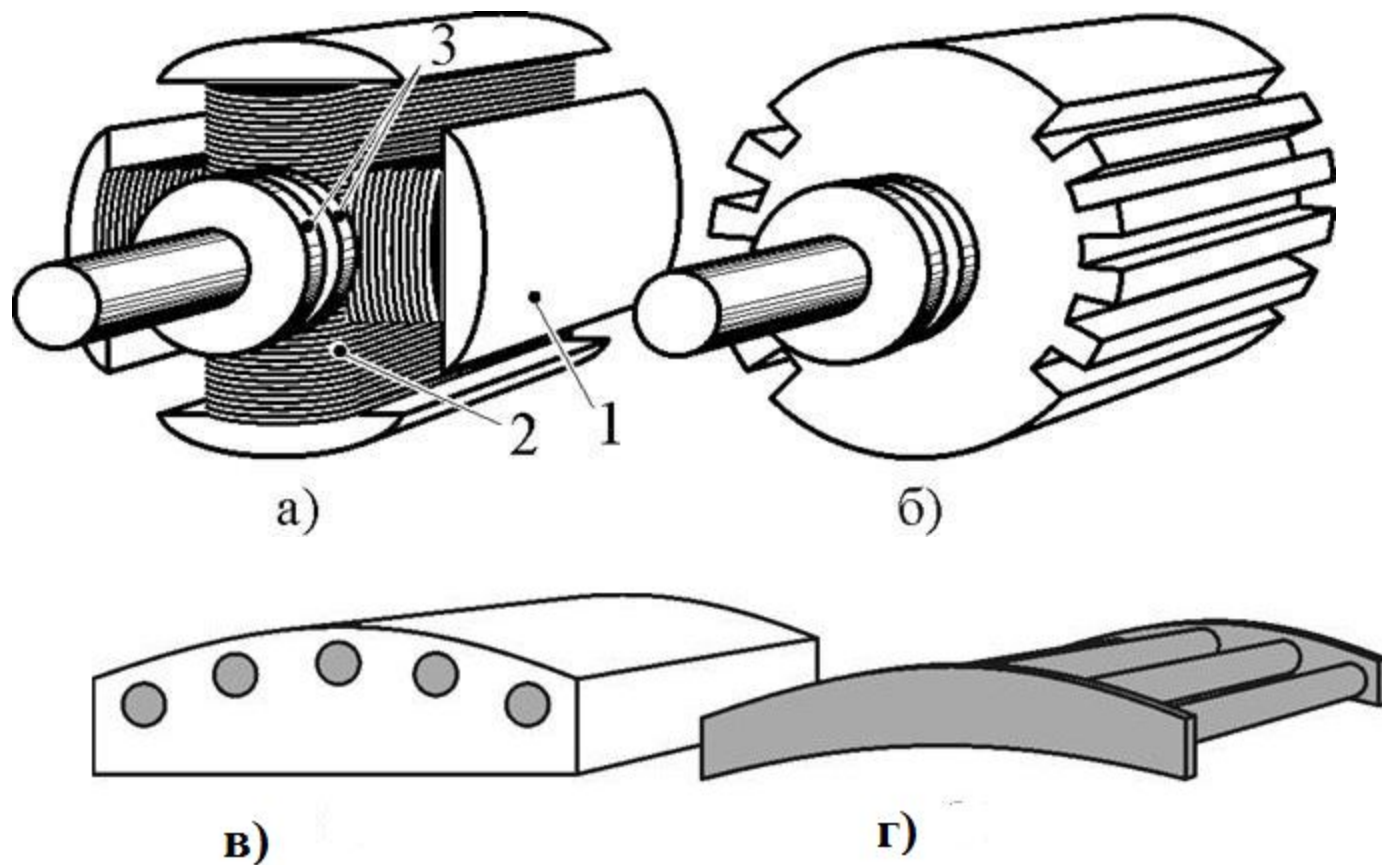
Номинальные данные СМ

Характеристики СГ

Векторные диаграммы СГ

**Выражение для электромагнитной мощности
и электромагнитного момента СМ**

Рис.1. Явнополюсный (а) и неявнополюсный (б) роторы СМ (1- башмак полюса, 2- катушка возбуждения, 3- контактные кольца), башмак с к.з. обмоткой(в), фрагмент к.з. обмотки(г)



Что такое реакция якоря?

Магнитное поле статора, накладываясь на магнитное поле ротора, может либо ослаблять, либо усиливать его.

Результат взаимодействия этих полей определяют величина и характер нагрузки СГ.

Влияние магнитного поля статора на магнитное поле, создаваемое вращающимися полюсами ротора, называют реакцией якоря.

Явление реакции якоря имеется и в синхронных двигателях, но поскольку в СД форма кривой ЭДС малосущественна, то реакция якоря в СД имеет второстепенное значение.

Итак, при нагрузке ток I_a протекает по обмотке якоря (статора) и создаёт МДС F_a , которая взаимодействует с МДС возбуждения (ротора) F_B .

Необходимо учитывать род нагрузки генератора:

□ активная R ,

□ реактивная L ,

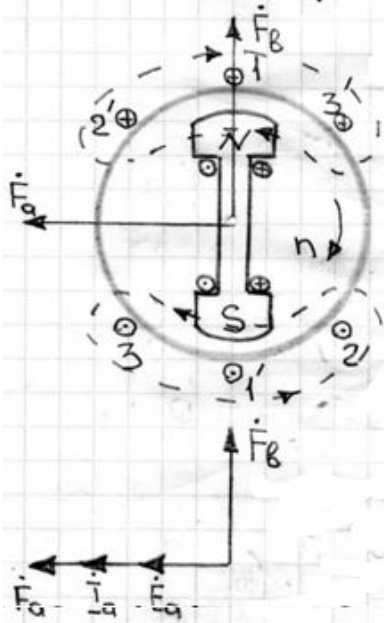
□ ёмкостная C ,

□ смешанная активно-индуктивная $R+L$,

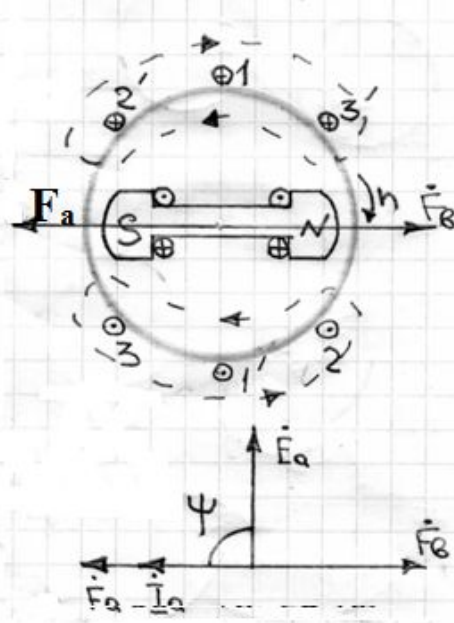
□ смешанная активно-ёмкостная $R+C$.

Будем характеризовать род нагрузки углом Ψ – углом сдвига между вектором ЭДС E_a и вектором тока статора I_a (а не углом Φ – сдвига между векторами напряжения и тока статора).

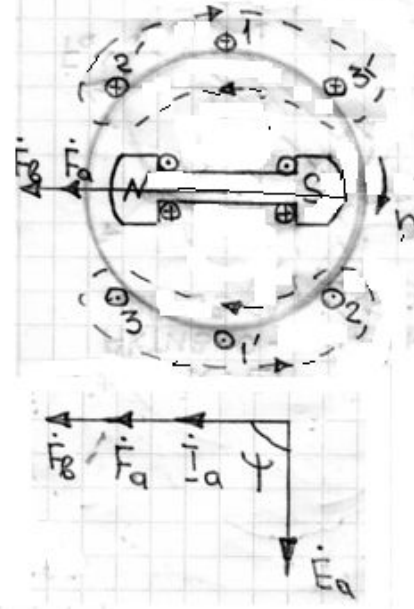
а) $Z=R$
 ЧИСТО АКТИВНАЯ
 НАГРУЗКА $\psi=0$



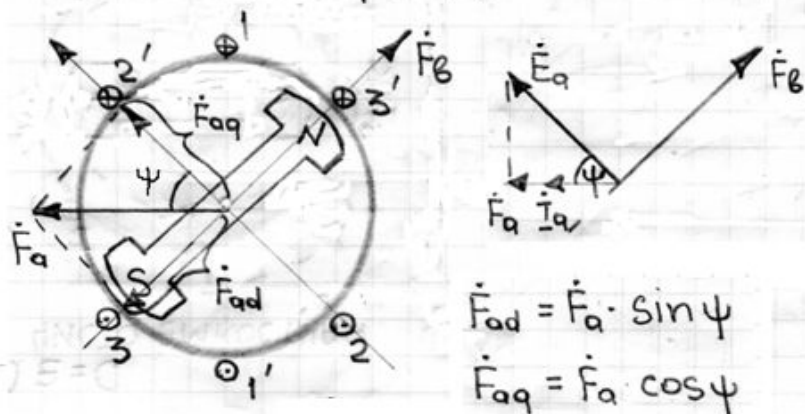
б) $Z=L$
 ЧИСТО ИНДУКТИВНАЯ
 НАГРУЗКА $\psi=\pi/2$



в) $Z=C$
 ЧИСТО ЕМКОСТНАЯ $\psi=-\pi/2$



г) $Z=R+L$
 АКТИВНО-ИНДУКТИВНАЯ
 НАГРУЗКА $\psi \neq \pi/2$



$$\begin{aligned} \dot{F}_{ad} &= \dot{F}_a \cdot \sin \psi \\ \dot{F}_{aq} &= \dot{F}_a \cdot \cos \psi \end{aligned}$$

Рис.2. Реакция якоря СГ при активной (а), индуктивной (б), емкостной (в), активно-индуктивной (г) нагрузках.

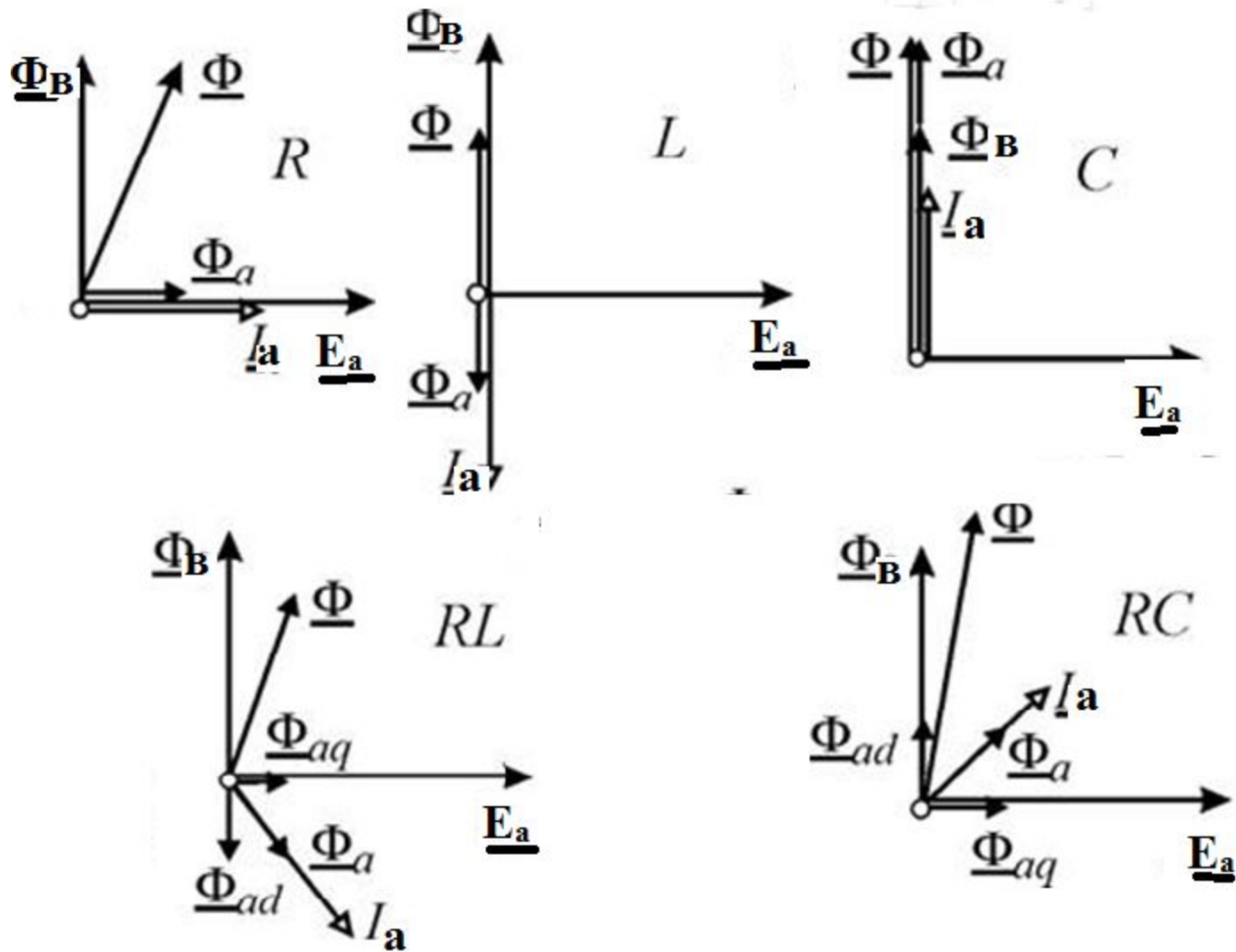
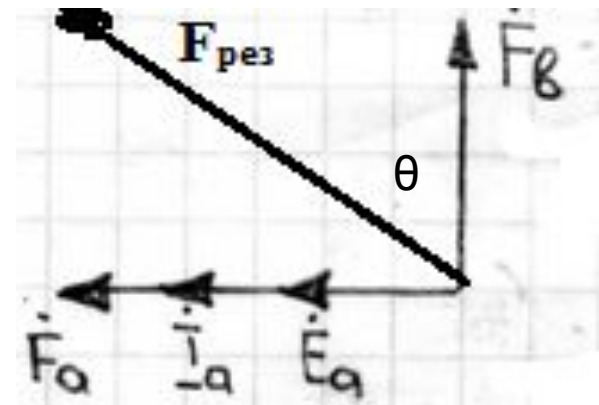
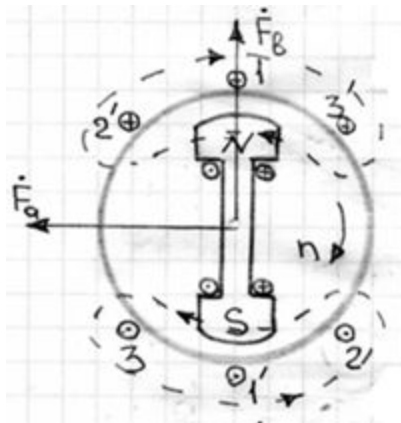


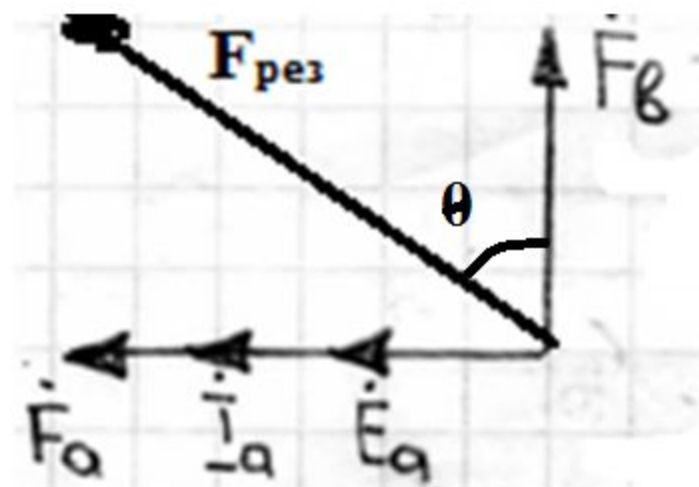
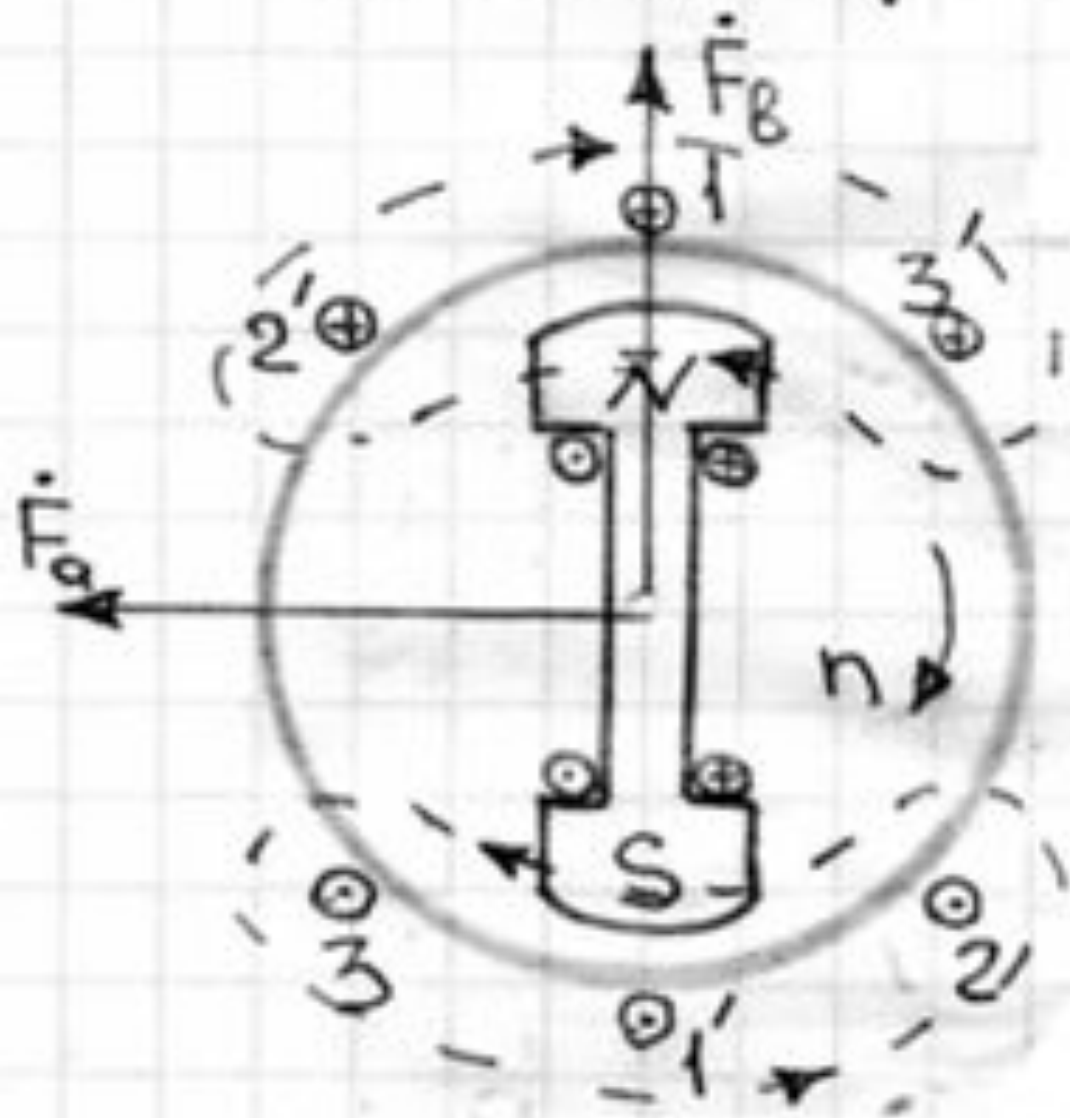
Рис. 3. Распределение магнитных потоков при различной нагрузке СГ

Реакция якоря в СМ при активной нагрузке

- При активной нагрузке (сопротивлением $Z=R$) ЭДС E_a фазы $1-1'$ обмотки статора и ее ток I_a совпадают по фазе и достигают максимума в тот момент, когда ось магнитного потока ротора $N-S$ (вектор МДС F_B) перпендикулярна оси катушки фазы $1-1'$ (вектор F_a).
- В этом случае вектор МДС ротора F_B опережает вектор МДС статора F_a на электрический угол, равный 90° .
- При этом результирующий вектор МДС $\vec{F}_{рез} = \vec{F}_B + \vec{F}_a$ поворачивается относительно вектора МДС F_B на угол θ в направлении, противоположном направлению вращения ротора n_0 (рис.2.а).



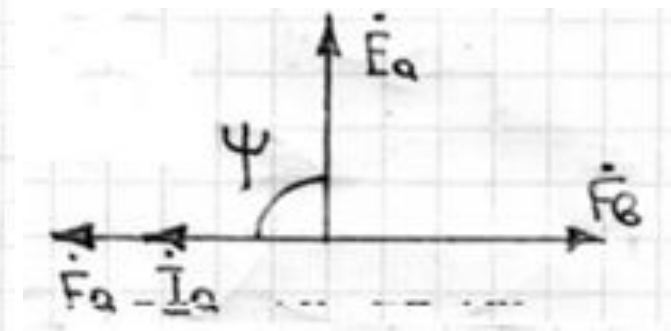
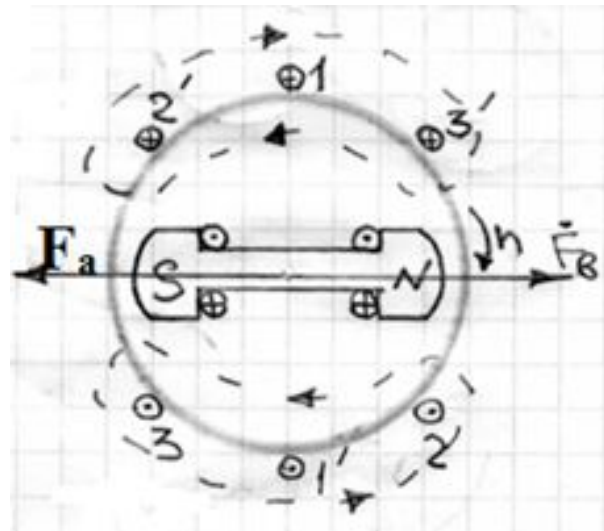
ЧИСТО АКТИВНАЯ
 НАГРУЗКА $\psi = 0$

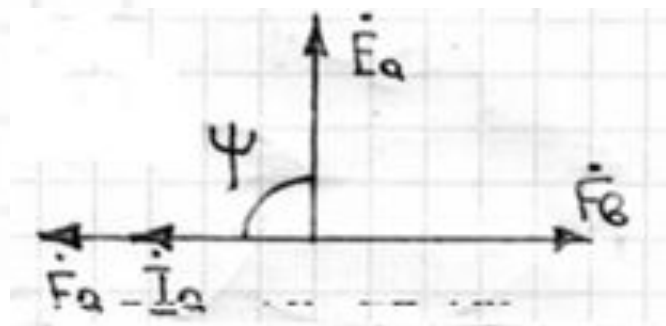
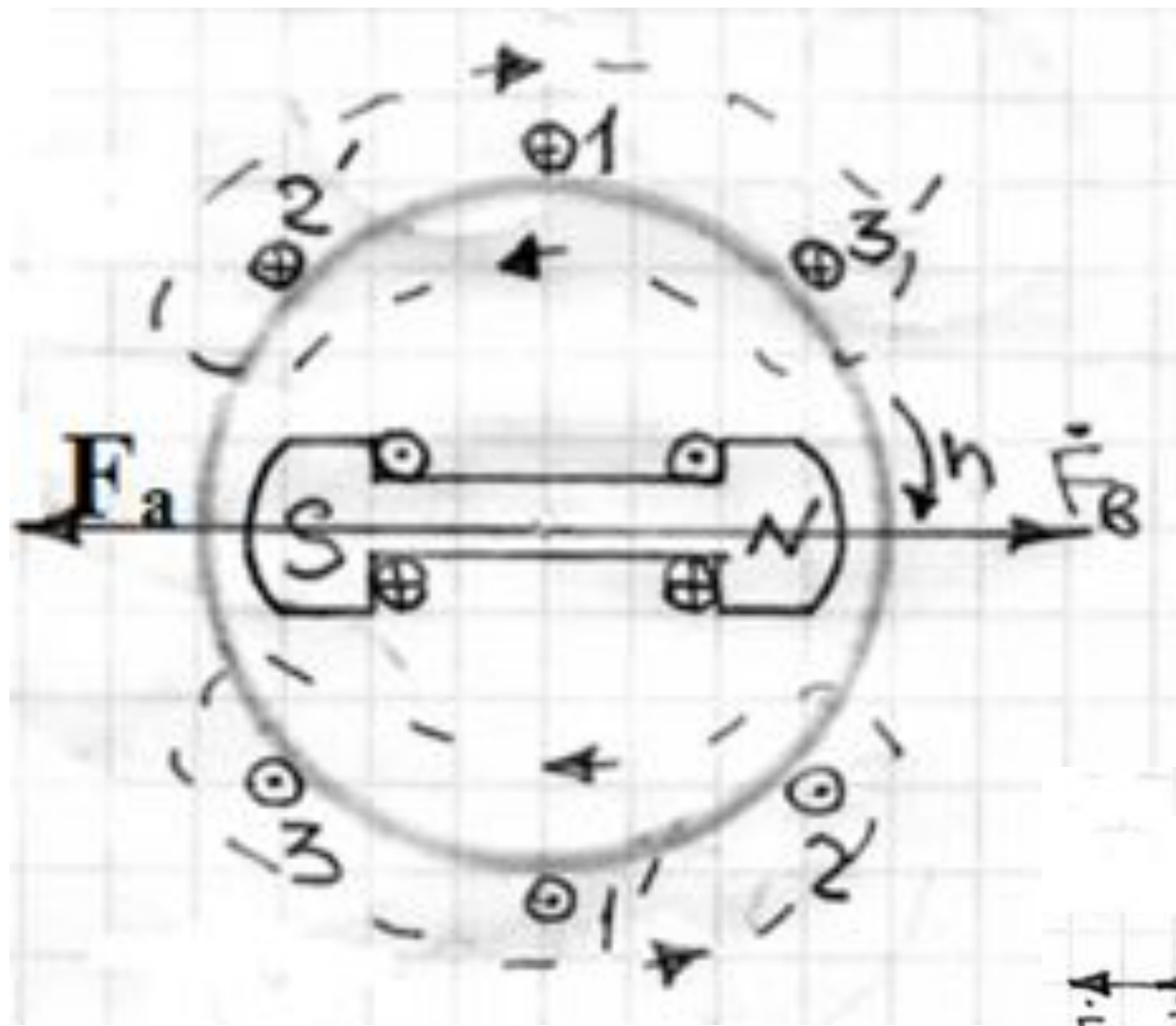


Реакция якоря в СМ при индуктивной нагрузке

- При чисто индуктивной нагрузке (сопротивление $Z=L$) ток в фазе обмотки статора $1-1'$ отстает от ЭДС фазы на угол 90° и поэтому достигает максимума в тот момент времени, когда полюс ротора N_o уже повернулся на 90° по направлению вращения и занял положение (рис.2, б)
- В этом случае МДС статора F_a оказывается направленной навстречу МДС ротора F_B и размагничивает магнитное поле машины:

$$\dot{F}_{PE3} = \dot{F}_\sigma - \dot{F}_a$$

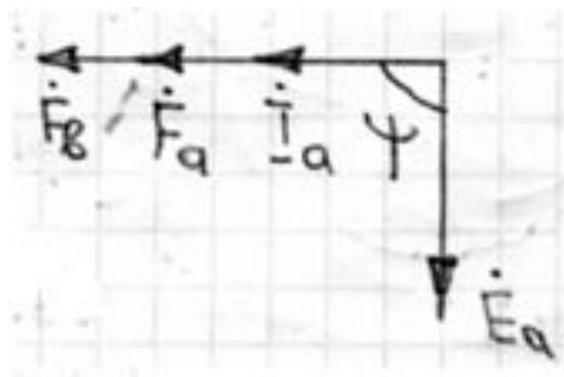




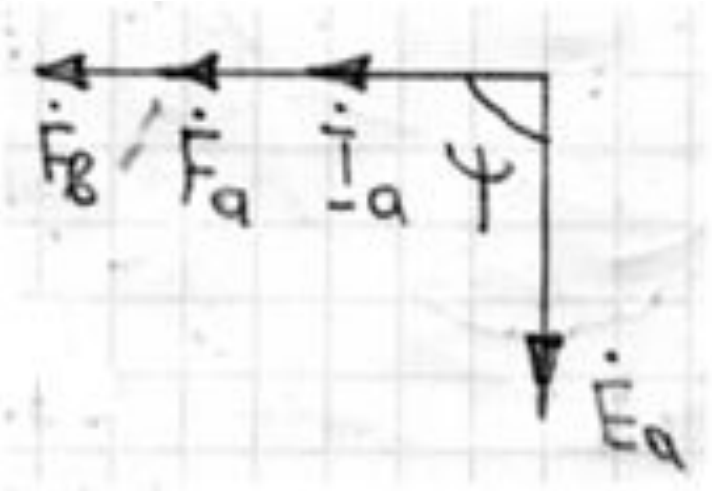
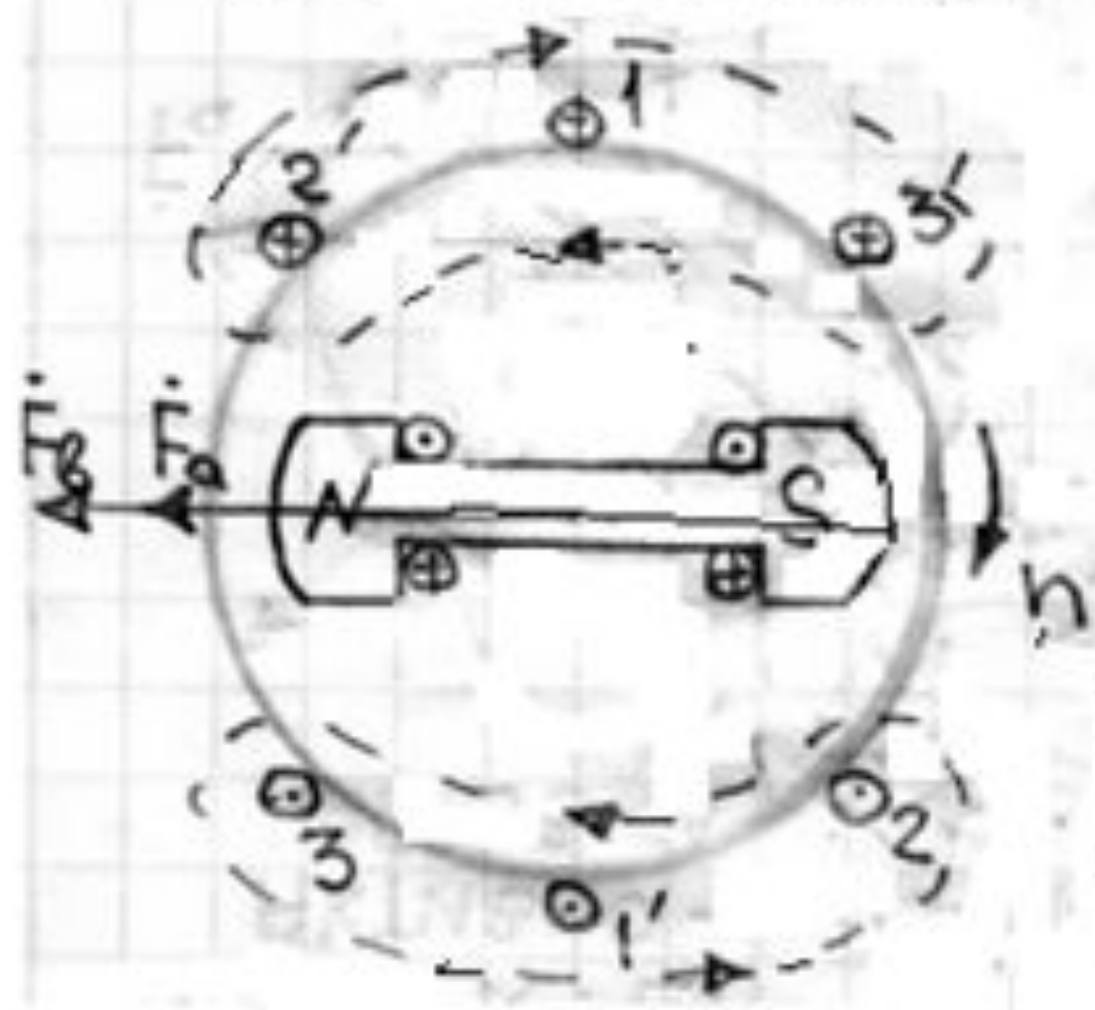
Реакция якоря в СМ при емкостной нагрузке

- При емкостной нагрузке генератора $Z=C$ ток в фазе $1-1'$ статора опережает ЭДС фазы на 90° и поэтому достигает максимума в тот момент, когда полюс ротора N_o еще не повернулся на 90° по направлению вращения и занимает пока положение (рис.2, в).
- В этом случае МДС статора F_a оказывается направленной согласно с МДС ротора F_B и усиливает магнитное поле машины:

$$\dot{F}_{PE3} = \dot{F}_B + \dot{F}_a$$

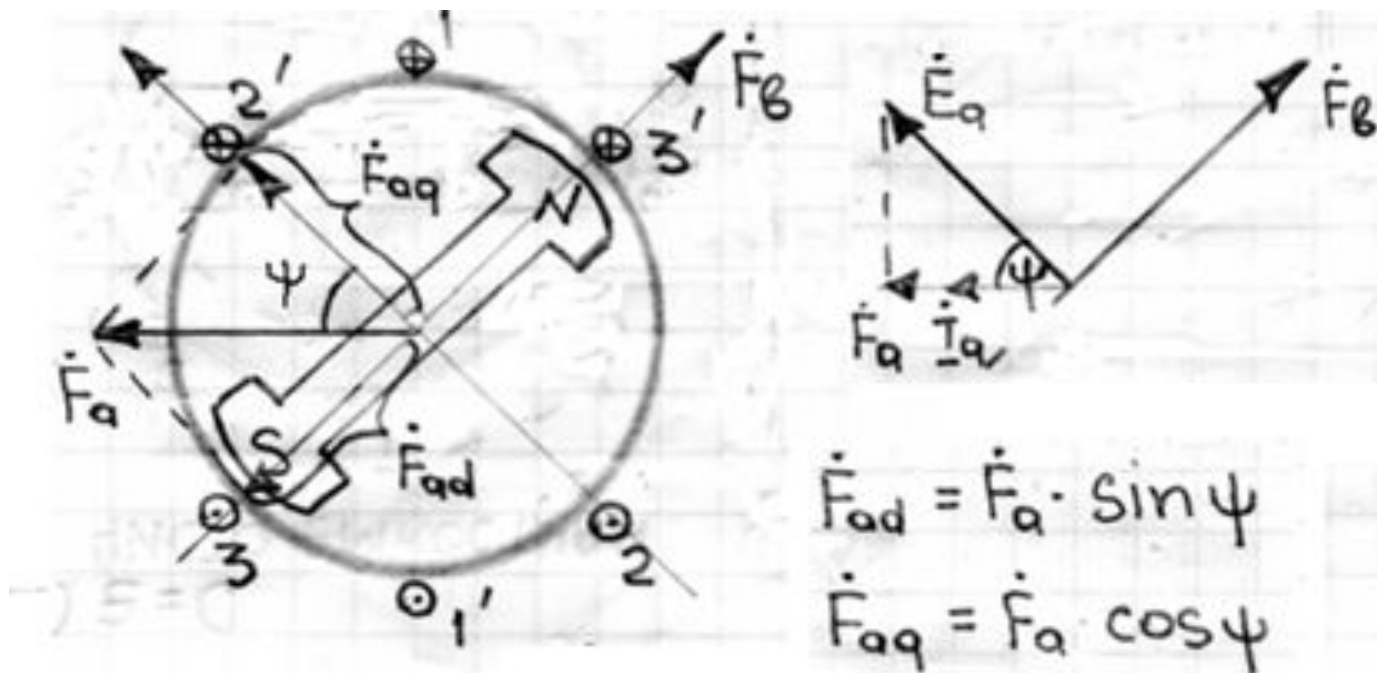


ЧИСТО ЁМКОСТНАЯ



Реакция якоря в СГ при смешанной активно-индуктивной нагрузке (рис.2,г)

При активно-индуктивной нагрузке СГ $Z=C$ ток в фазе 1-1' статора отстаёт от ЭДС фазы на угол $\Psi \neq 90$ и поэтому его раскладывают на две составляющие продольную \dot{F}_{ad} и поперечную \dot{F}_{aq} (рис.2, г), проецируя, соответственно, на продольную и поперечную оси полюсов ротора



Потоки и ЭДС нагруженного СГ

- В нагруженном синхронном генераторе существуют три магнитных потока:
- Φ_o - основной поток ротора (Φ_B),
- $\Phi_я$ - поток статора и
- Φ_S - поток рассеяния статора.
- Эти магнитные потоки индуцируют в катушке фазы, соответственно, три ЭДС:
- E_o — от магнитного потока ротора,
- $E_я$ — от потока статора и
- E_s — от магнитного потока рассеяния.
- Следует отметить, что ЭДС $E_я$ и E_s пропорциональны вызвавшему их току фазы статора I_a .

ЭДС в комплексной форме

$$\dot{E}_Я = -jX_Я \cdot \dot{I} ,$$

$$\dot{E}_S = -jX_S \cdot \dot{I} ,$$

где $X_Я$ и X_S - соответственно индуктивное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора.

Уравнение ЭДС для фазной катушки статора
неявнополюсной СМ

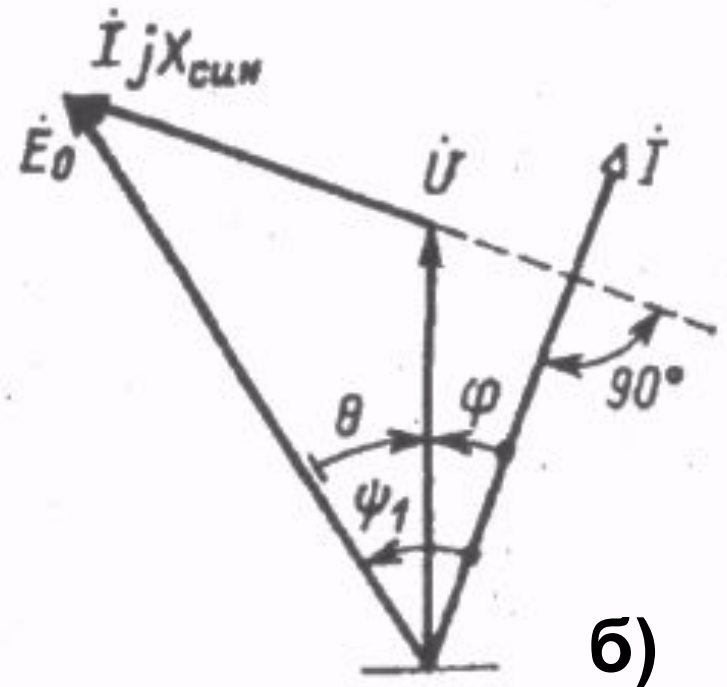
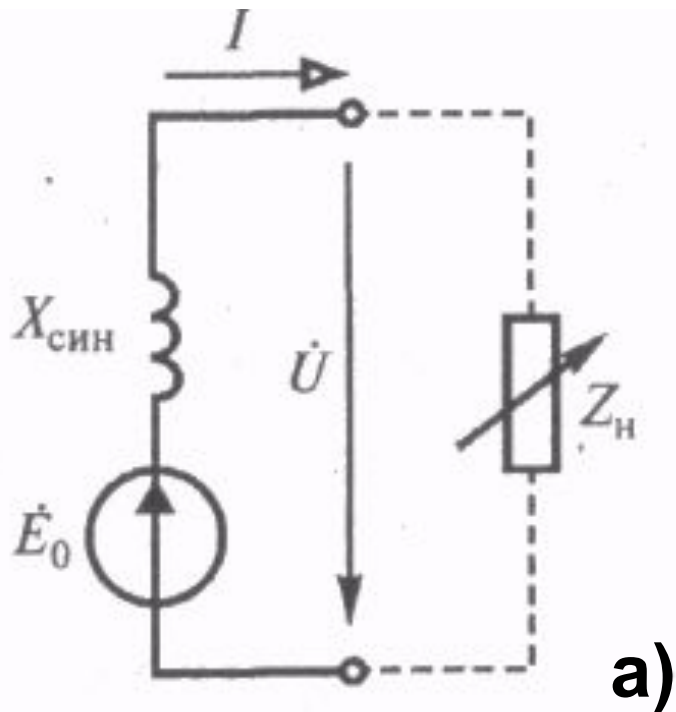
$$\dot{E}_0 + \dot{E}_Я + \dot{E}_S = \dot{U} + \dot{I}R_\phi \text{ или } \dot{E}_0 - jX_Я\dot{I} - jX_S\dot{I} = \dot{U} + \dot{I}R_\phi,$$
$$\text{или } \dot{U} = \dot{E}_0 - j(X_Я + X_S)\dot{I} - \dot{I}R_\phi,$$

- U - фазное напряжение статора;
- R_ϕ - активное сопротивление фазы статора R_1 .

Реактивное синхронное сопротивление

- Сумму реактивных сопротивлений фазы называют *реактивным синхронным сопротивлением*
- $X_{\text{СИН}} = X_{\text{я}} + X_{\text{с}}$.
- Обычно для фазы обмотки статора $R_{\phi} \ll X_{\text{СИН}}$, поэтому падением напряжения на активном сопротивлении фазы можно пренебречь.
- Тогда уравнение для фазы статора будет $\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_{\text{СИН}} \dot{I}$ или $\dot{E}_0 = \dot{U} + jX_{\text{СИН}} \dot{I}$

Рис.4. а)схема замещения и б)векторная диаграмма фазы обмотки статора СГ



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + jX_{\text{син}} \dot{I}$$

Пояснение к векторной диаграмме

- Если нагрузка генератора активно-индуктивная, то вектор тока \dot{I} отстает по фазе от напряжения \dot{U} на угол Φ , а вектор индуктивного падения напряжения $jX_{\text{СИН}} \dot{I}$ опережает вектор тока на угол 90° . Сумма векторов \dot{U} и $jX_{\text{СИН}} \dot{I}$ создаёт вектор ЭДС \dot{E}_0 .
- Угол θ между векторами \dot{U} и \dot{E}_0 называют углом нагрузки, а угол между векторами \dot{E}_0 и \dot{I} обозначают ψ_I .

Номинальные данные СМ

К числу номинальных данных синхронных машин, указанных на табличке, укрепленной на корпусе машины, относятся:

- 1) номинальная мощность (для генераторов и компенсаторов — полная мощность, кВ·А; для двигателей — мощность на валу, кВт);
- 2) коэффициент мощности (при перевозбуждении);
- 3) схема соединения обмоток;
- 4) линейное напряжение, В;
- 5) частота вращения, об/мин (для гидрогенераторов указывается и угонная частота вращения);
- 6) частота тока якоря, Гц;
- 7) линейный ток якоря, А;
- 8) напряжение и ток обмотки возбуждения для номинального режима.

На табличке указывается также завод-изготовитель машины и год выпуска.

Угонной частотой вращения называют частоту, которая проявляется при сбросе нагрузки на полном напряжении.

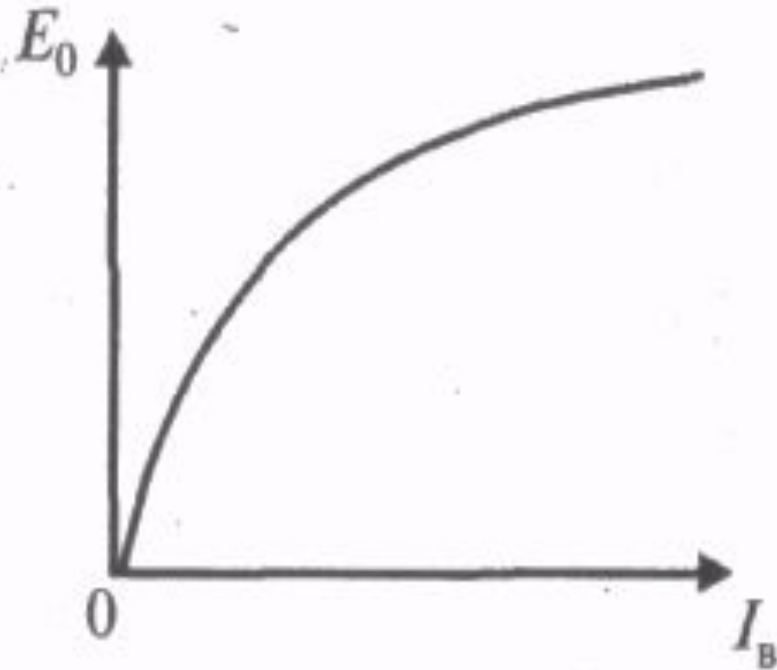
Она не должна превышать 1,45-1,7 от номинальной частоты вращения.

Последствия превышения угонной частоты: деформация ротора и другие отрицательные пагубные явления для гидрогенераторов..

Характеристики СГ

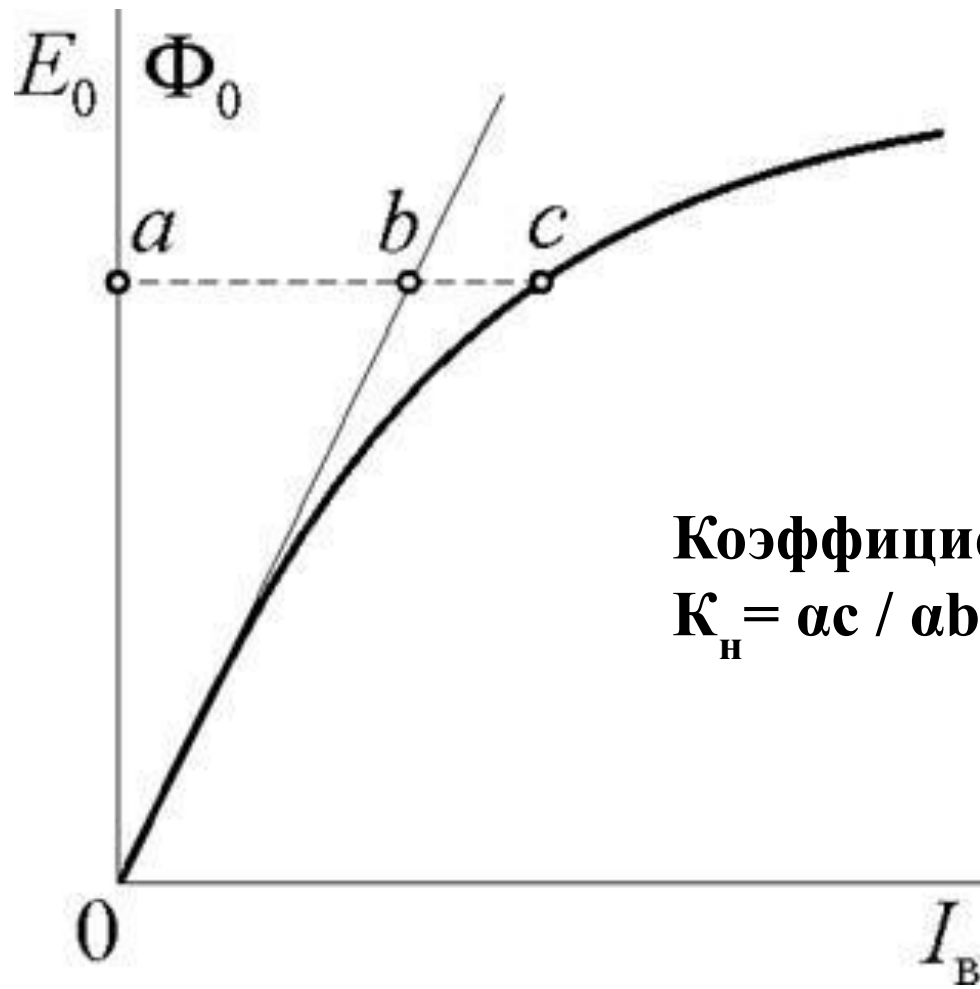
- *Характеристика холостого хода*
- *Внешняя характеристика*
- *Регулировочная характеристика*
- *Короткого замыкания*
- *Индукционная*

Характеристика холостого хода



- Характеристика холостого хода - зависимость ЭДС генератора (фазы) E_0 от тока возбуждения ротора I_B при токе фазы статора $I_a = 0$ и частоте вращения ротора $n_0 = const$ (что равносильно $I_a = const$).

Рис.5. $E_0 = f(I_B)$ при $I_a = const$ и $n_0 = const$



Коэффициент насыщения
 $K_n = ac / ab$

Рис. 6. Характеристика холостого хода СГ. Определение коэффициента насыщения K_n

Рис.7. Универсальная кривая намагничивания

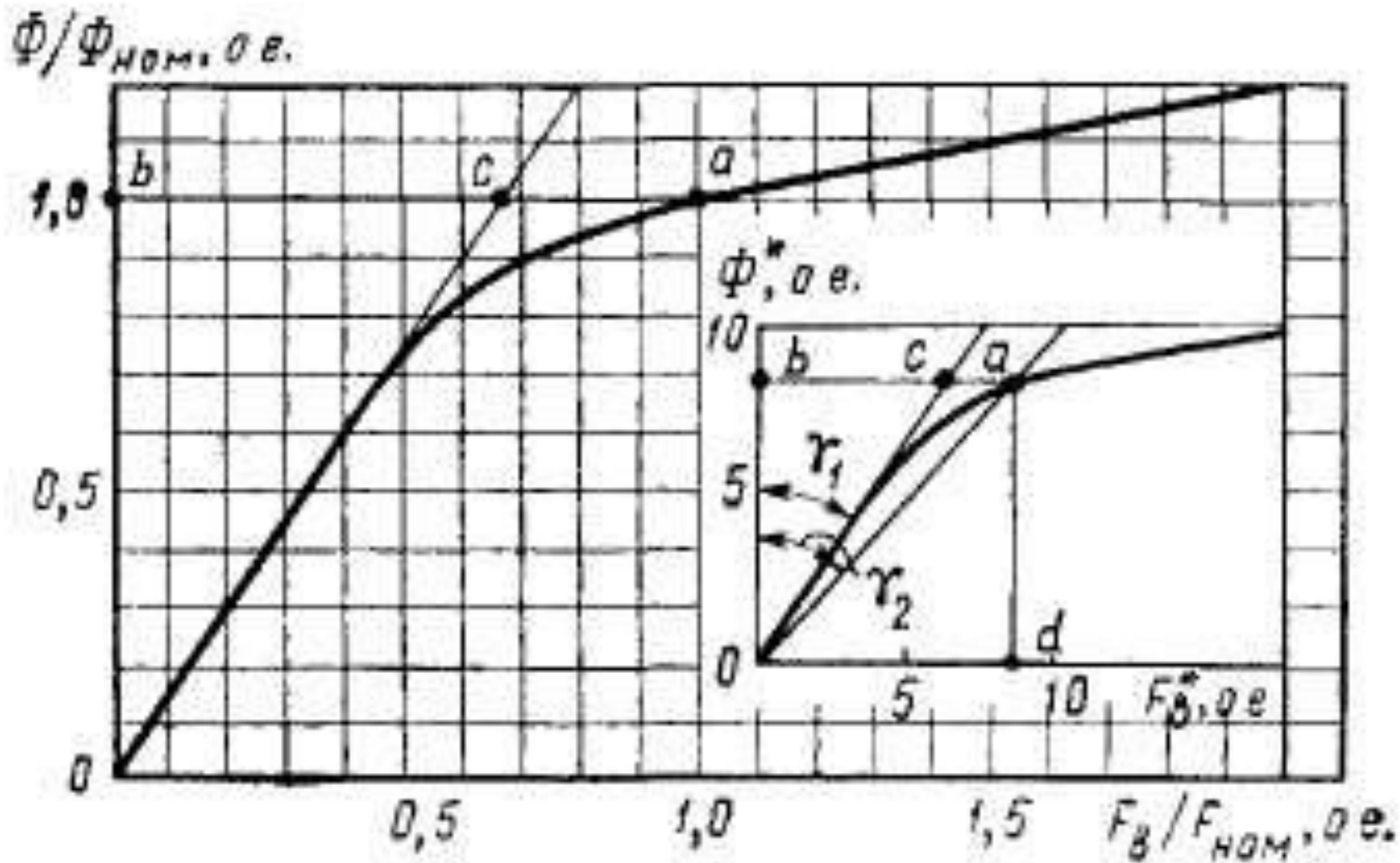


Рис.8. Внешняя характеристика СГ

- Внешней характеристикой называют зависимость напряжения фазы обмотки статора U от тока статора I_a ,
- т. е. $U = f(I_a)$, при $I_B = const$,
- $f = const$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi = const$ или
- $\varphi = const$.
- Обычно выбирают такое значение тока возбуждения, чтобы при номинальном
- токе статора $I_{ном}$ напряжение также было номинальным $U_{ном}$.

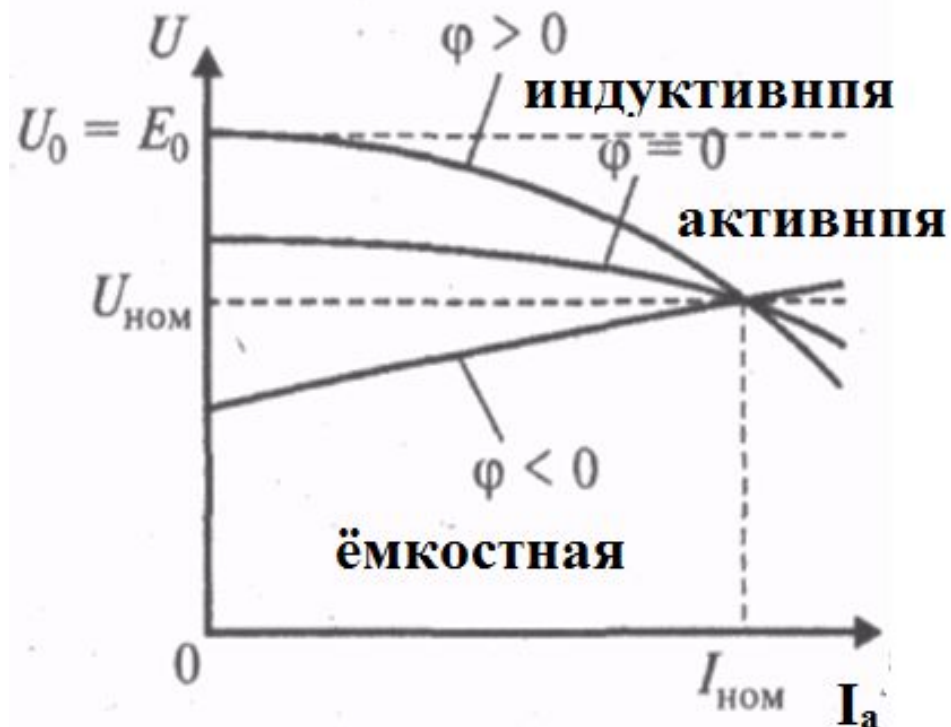
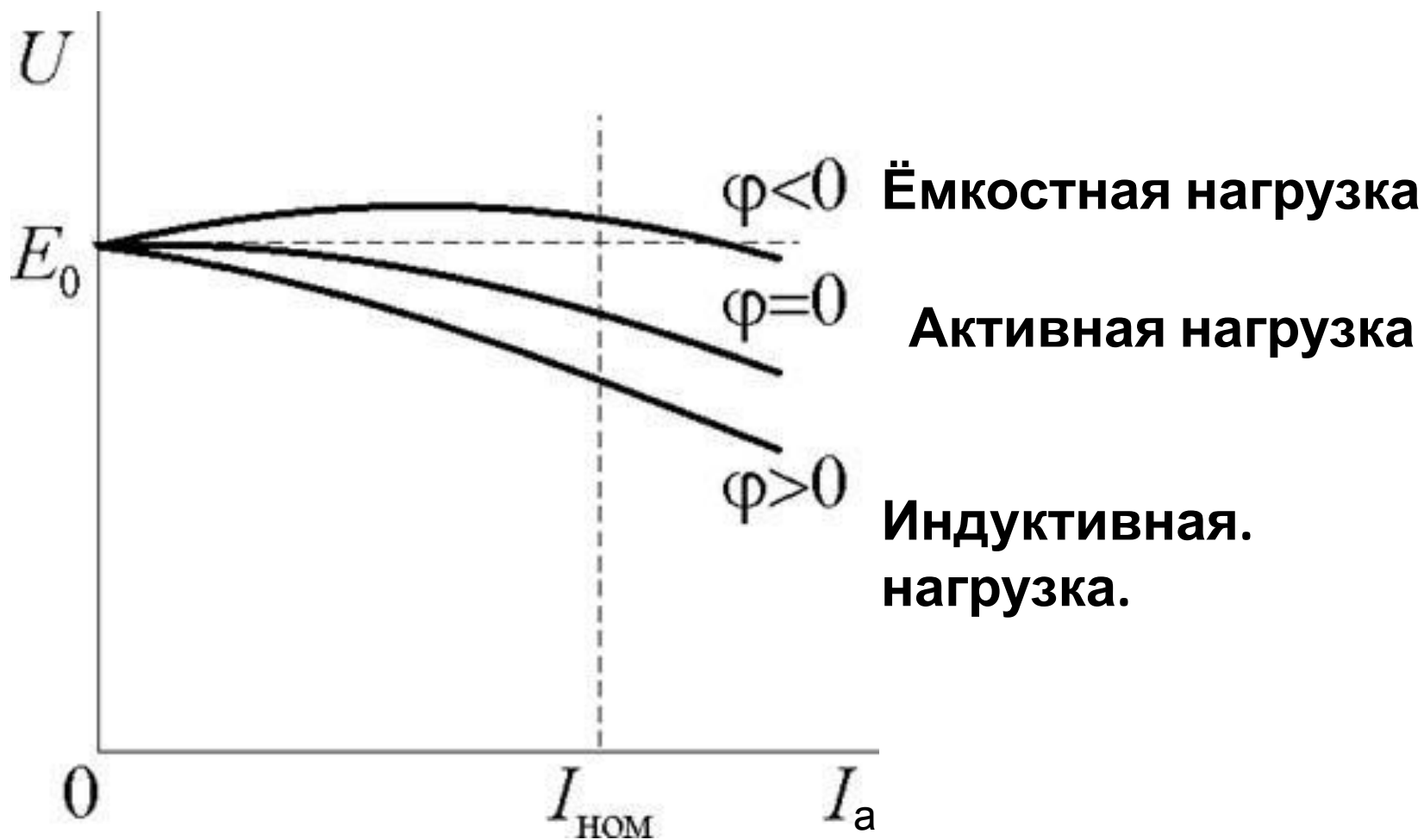


Рис.9. Вид внешних характеристик при снятии их от холостого хода до номинальной нагрузки



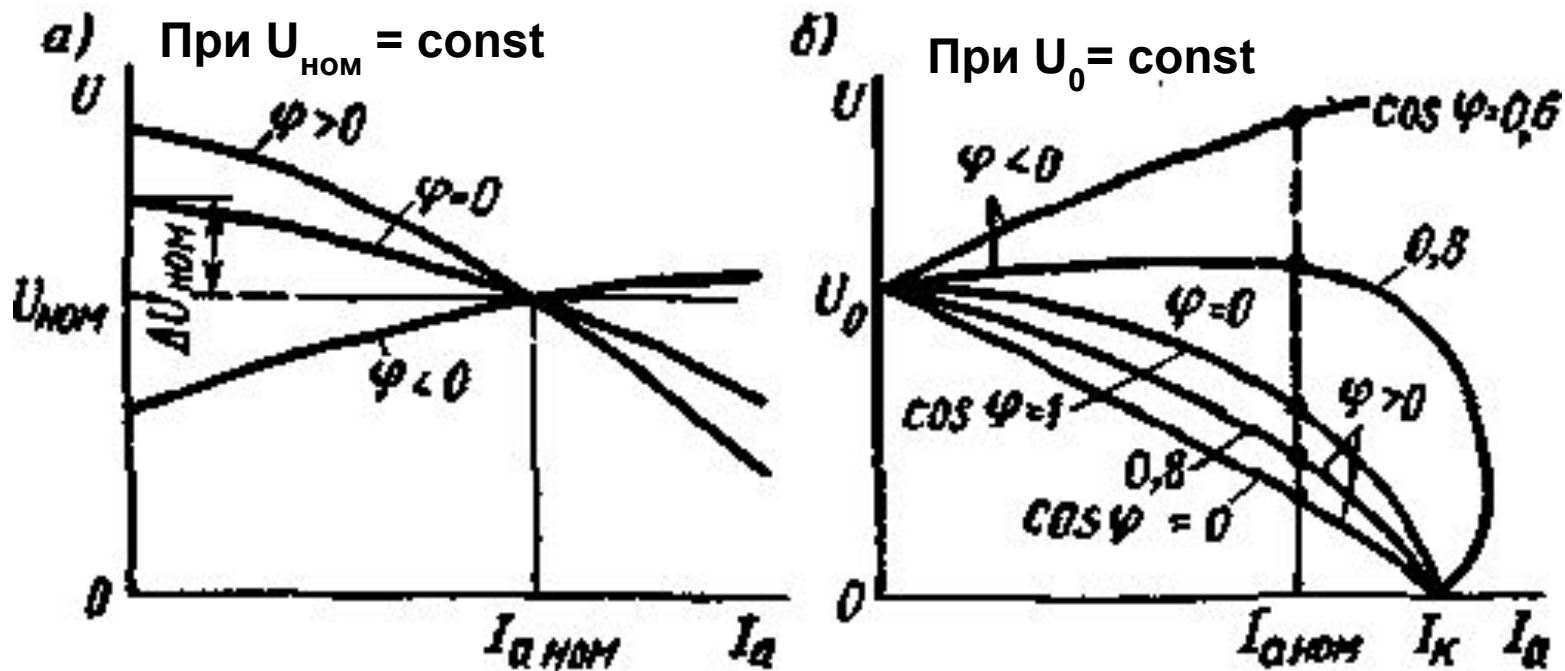


Рис.9а. Внешние характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки

При $U = 0$ (короткое замыкание) все характеристики пересекаются в одной точке, соответствующей значению тока $I_{\text{к}}$

При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки изменение напряжения характеризуется величиной (%)

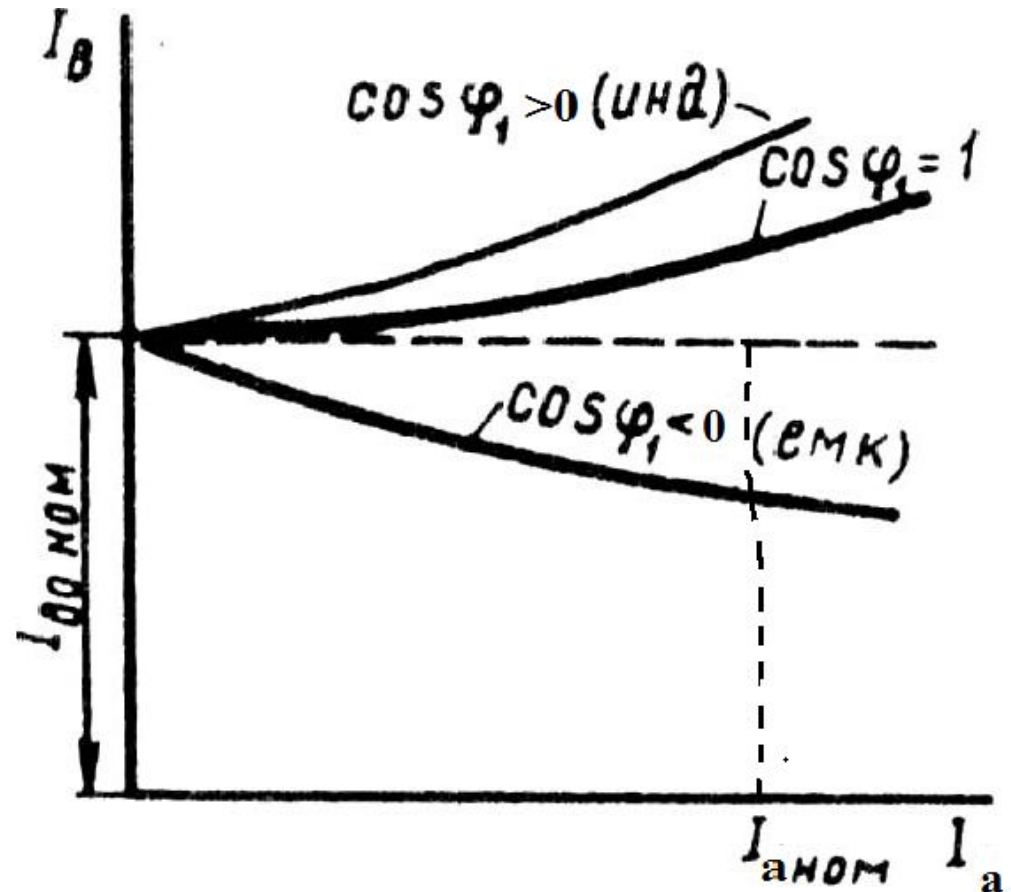
$$\Delta u = \left[(U_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}} \right] 100. \%$$

Обычно генераторы работают с $\cos \varphi = 0,9 \div 0,85$ при отстающем токе (активно-индуктивная нагрузка). В этом случае $\Delta u = 25 \div 35 \%$.

Чтобы подключенные к генератору потребители работали при напряжении, близком к номинальному, применяют специальные устройства, стабилизирующие его выходное напряжение U , например, быстродействующие регуляторы тока возбуждения.

Рис.10.Регулировочная характеристика СТ

- Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток возбуждения ротора при изменении тока нагрузки генератора, чтобы напряжение генератора оставалось постоянным, т. е.
- $I_B = f(I)$ при $U = const$,
- $\cos \varphi = const$ или
- $\varphi = const$ и
- f (или n) = $const$.



N.B.

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_{\text{син}} \dot{I}_a$$

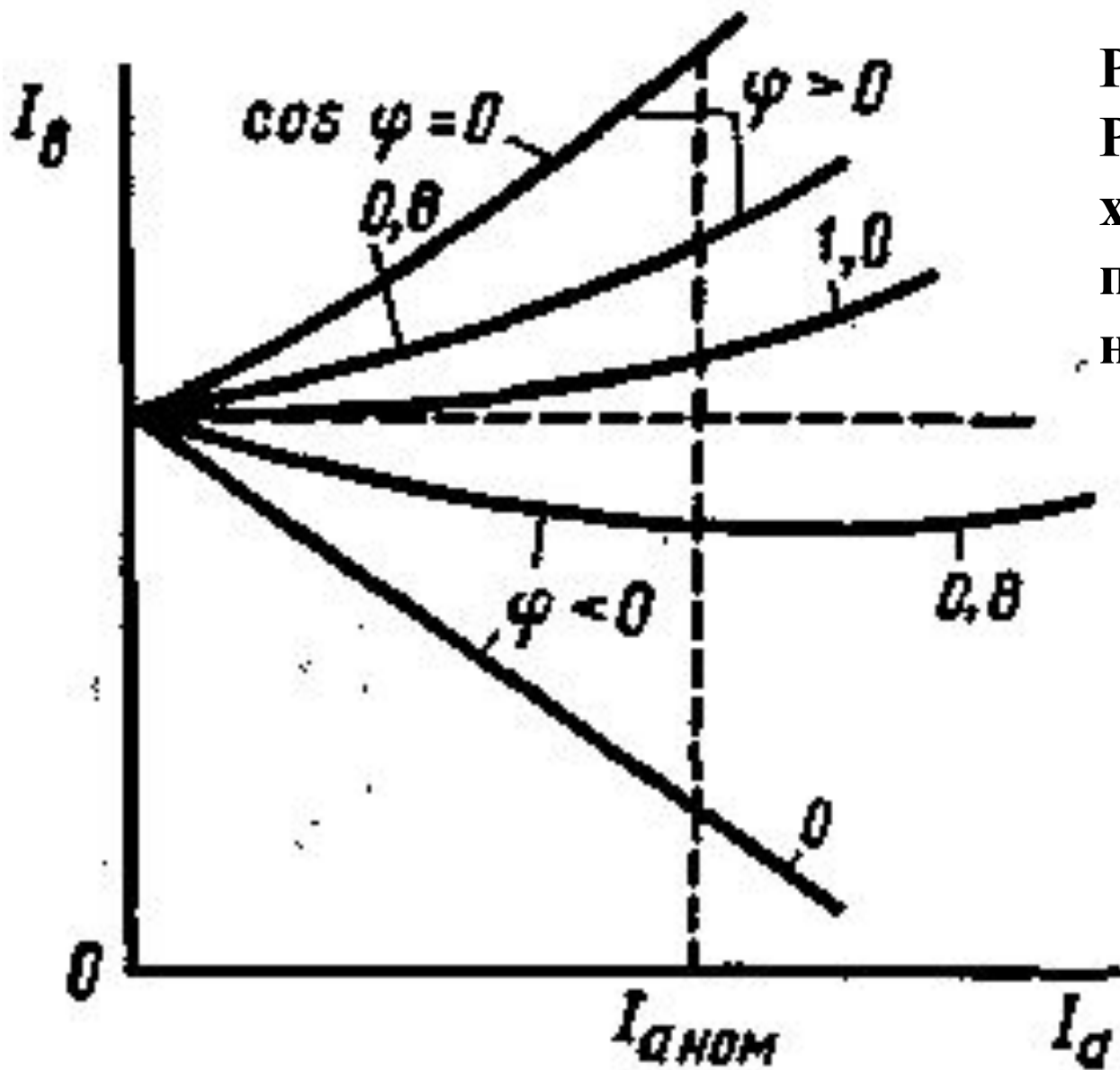
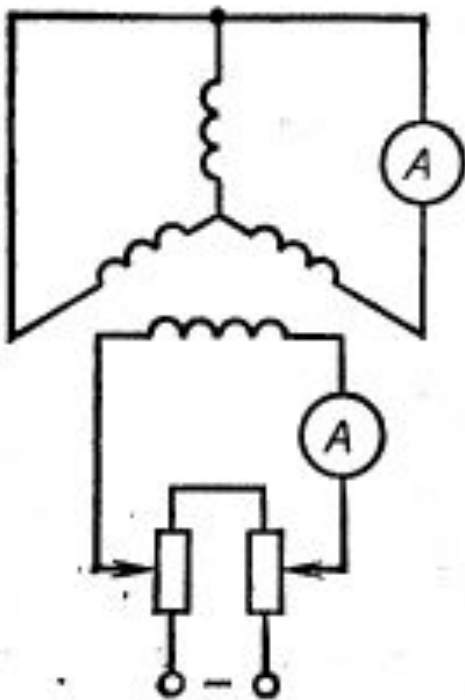
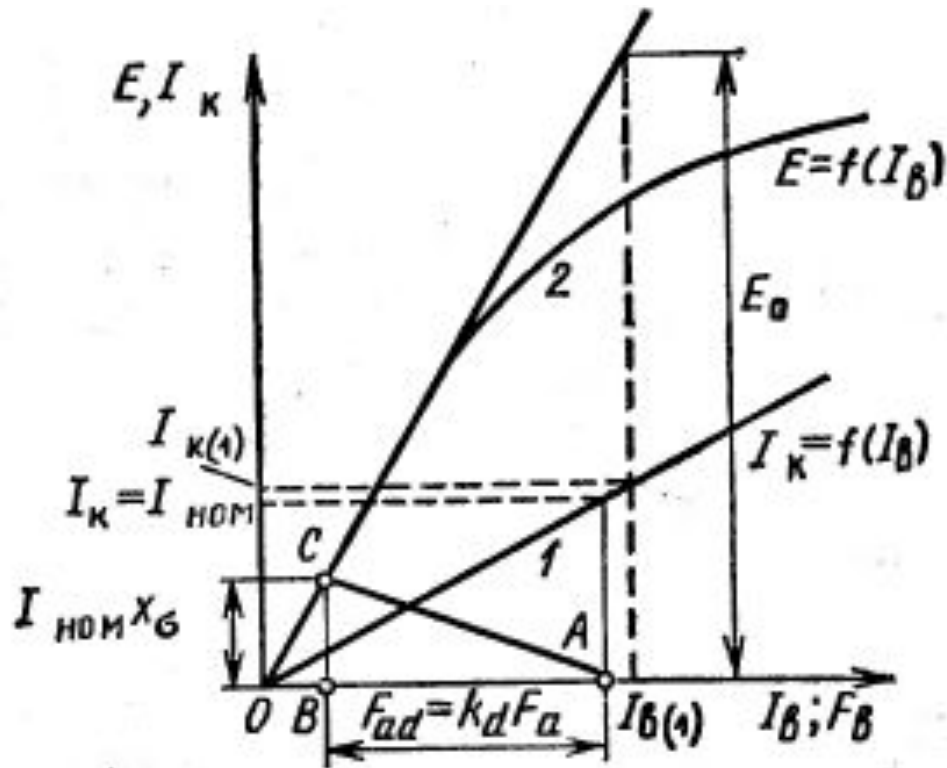


Рис.10а
 Регулировочные
 характеристики
 при разной
 нагрузке



а)



б)

Рис.11. Характеристика короткого замыкания а) схема опыта, б) характеристика к.з. совместно с характеристикой холостого хода

Из-за размагничивающего действия

реакции якоря при коротком замыкании машина слабо насыщена, и поэтому характеристика $I_k = f(I_B)$ представляет собой линейную зависимость. Рис.11.б) кривая 1

Практическое значение этой характеристики состоит в том, что при совместном ее рассмотрении с характеристикой холостого хода по ним можно определить ненасыщенное значение x_d , МДС реакции якоря и отношение короткого замыкания.

..

Индукционная нагрузочная характеристика представляет собой зависимость $U=f(I_B)$ при $I=\text{const}$, $n=\text{const}$, $\cos\varphi=0$. Она показывает, как изменяется напряжение генератора U с изменением тока возбуждения I_B при постоянном индуктивном токе нагрузки. Обычно индукционная нагрузочная характеристика снимается при $I=I_{\text{ном}}$.

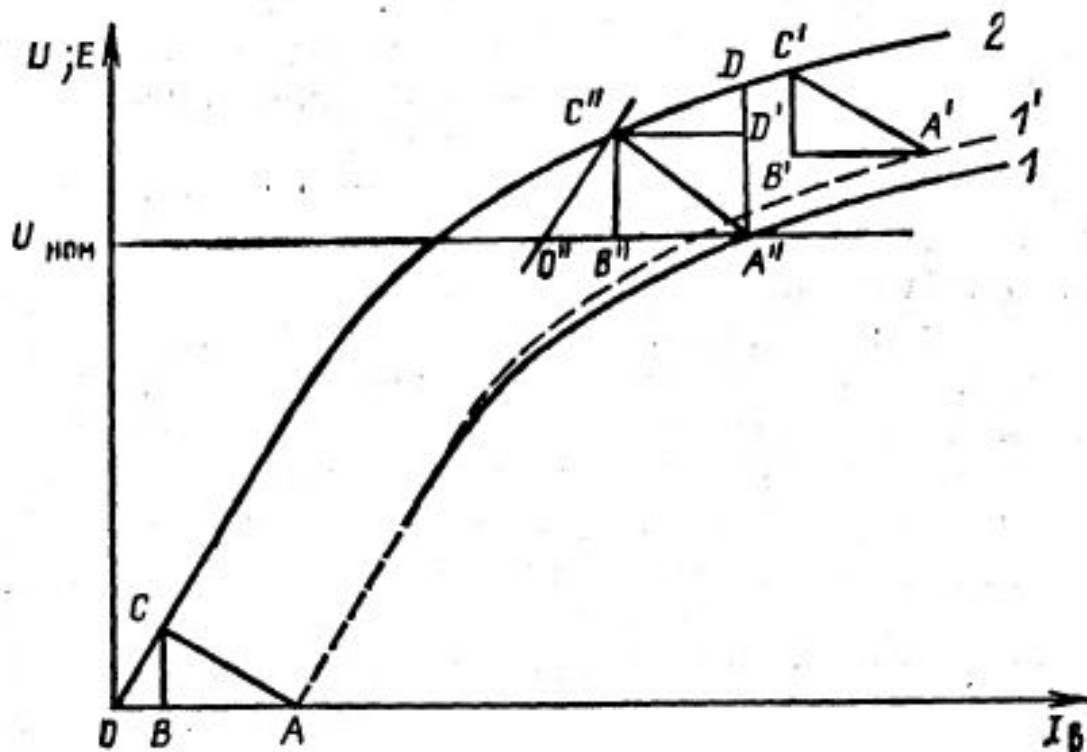


Рис.12.
Индукционная
нагрузочная
характеристика
 $U=f(I_B)$
1- опытная,
1'- расчётная,
2- характеристика
холостого хода.

Векторные диаграммы СГ

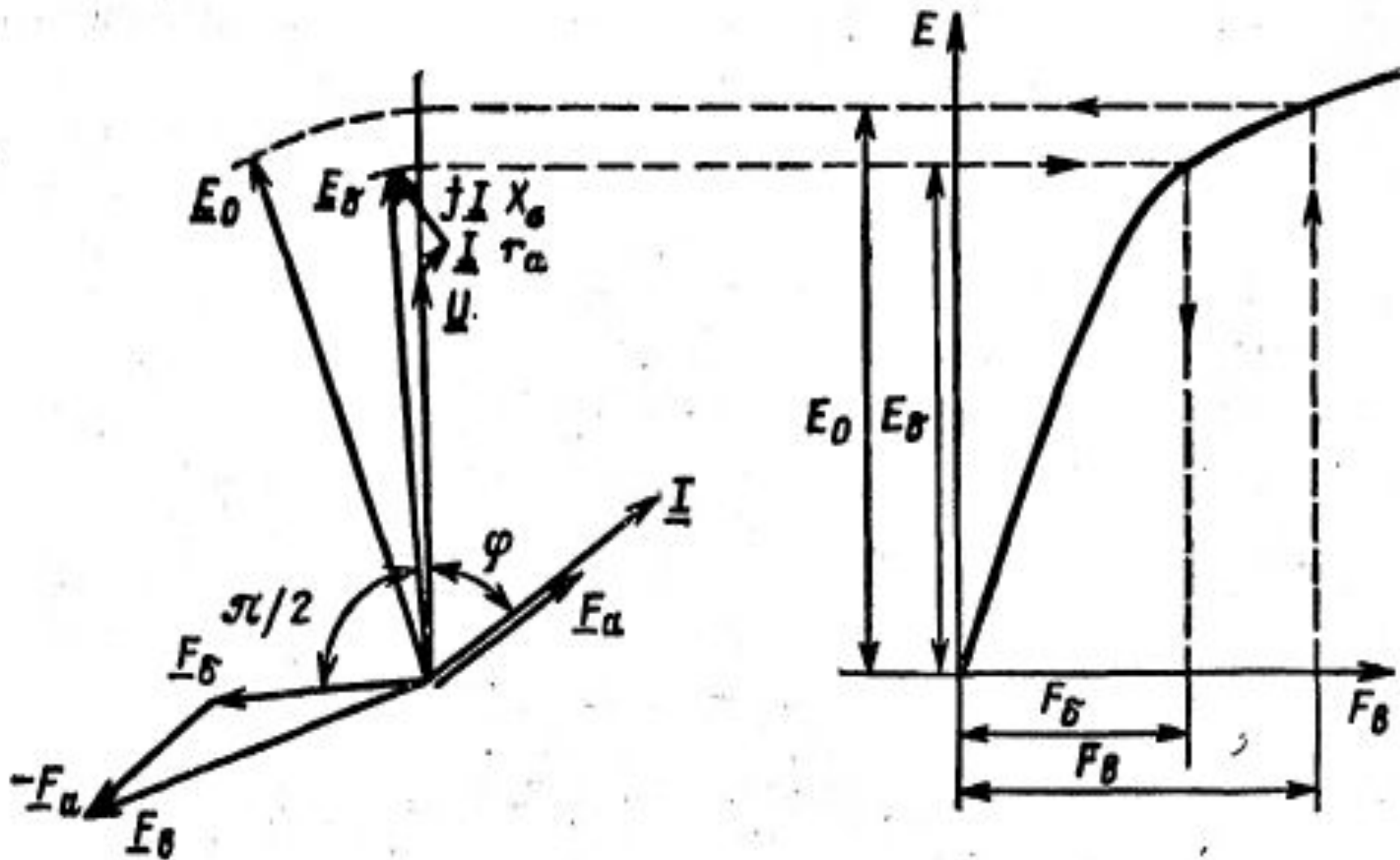


Рис.13. Построение векторной диаграммы неявнополюсного СГ при акт.-инд. нагрузке с учётом насыщения магнитной цепи (диаграмма Потье)

Магнитный поток в воздушном зазоре Φ_{δ} при нагрузке машины создается результирующей МДС F_{δ} , равной геометрической сумме МДС обмотки возбуждения $F_{\underline{в}}$ и обмотки якоря $F_{\underline{а}}$. Поток Φ_{δ} индуцирует в обмотке якоря ЭДС E_{δ} . Для результирующей МДС F_{δ} можно записать следующее уравнение:

$$F_{\delta} = F_{\underline{в}} + F_{\underline{а}}; \quad (1)$$

здесь $F_{\underline{а}}$ и $F_{\underline{в}}$ — 1-е гармоники соответствующих МДС:

$$F_{\underline{а}} = 1,35 \frac{\omega k_{\omega 1}}{p} I; \quad F_{\underline{в}} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \alpha}{\alpha} I_{\underline{в}} \omega_{\underline{в}}.$$

Значение F_{δ} для заданного режима работы находят по E_{δ} из характеристики холостого хода $E = f(F_{\underline{в}})$ (рис. 13.):

$$E_{\delta} = U + I(r_{\underline{а}} + jx_{\sigma}).$$

При пренебрежении магнитными потерями МДС и созданный ею магнитный поток совпадают по фазе. Так как

магнитный поток опережает индуцированную им ЭДС на угол $\pi/2$, то \underline{F}_δ и \underline{E}_δ на векторной диаграмме рис. 13 имеют такой же сдвиг.

МДС якоря \underline{F}_a создается током \underline{I} и совпадает с ним по фазе. Если известны обмоточные данные якоря генератора, то F_a определяется расчетным путем.

Исходя из уравнения (1), графическим путем определяется искомая МДС обмотки возбуждения:

$$\underline{F}_v = \underline{F}_\delta - \underline{F}_a.$$

По полученной МДС F_v из характеристики холостого хода находят ЭДС E_0 , которая будет индуцироваться в обмотке якоря при холостом ходе машины. На векторной диаграмме эта ЭДС должна быть отложена под углом 90° к МДС F_v в сторону отставания.

При помощи векторной диаграммы можно определить процентное изменение напряжения генератора ΔU при переходе от заданной нагрузки к холостому ходу:

$$\Delta U \% = \frac{E_0 - U}{U} 100.$$

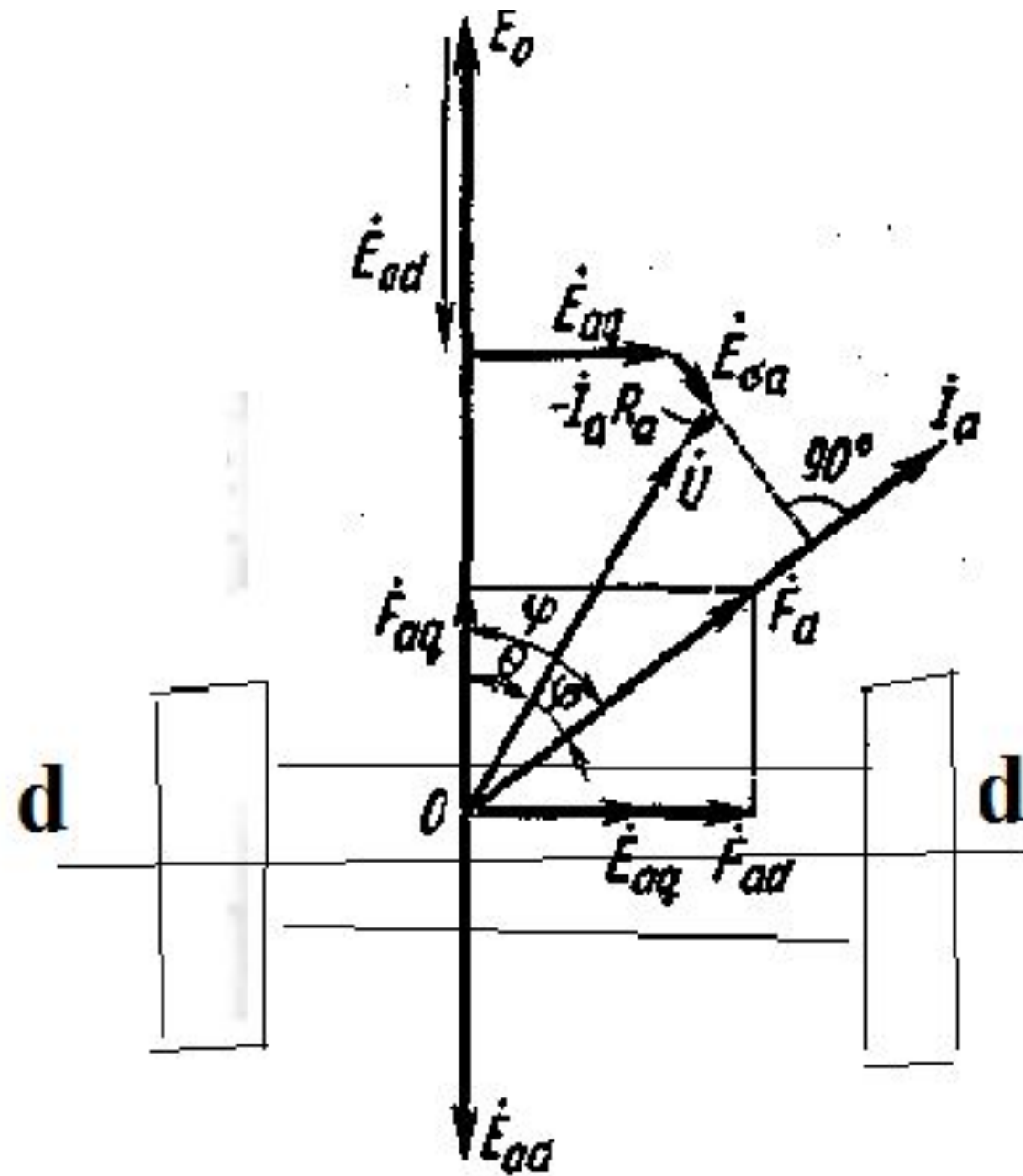


Рис.14. Векторная диаграмма для явнополюсного СГ (диаграмма Blondеля)

$$\varphi = \psi - \theta \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ЭМ}} &= mU_1 I_1 \cos(\varphi - \theta) = mU_1 (I_1 \sin \psi \sin \theta + I_1 \cos \psi \cos \theta) = \\ &= mU_1 (I_d \sin \theta + I_q \cos \theta) \quad (2) \end{aligned}$$

Для определения токов I_d и I_q спроектируем все векторы на соответствующие оси q и d

$$E_{1_0} = U_1 \cos \theta + I_d x_d \qquad I_d = \frac{E_{1_0} - U_1 \cos \theta}{x_d}$$

$$U_1 \sin \theta = I_q x_q \qquad I_q = \frac{U_1 \sin \theta}{x_q} \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим выражение для электромагнитной мощности явнополюсного СГ

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{1_0}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (5)$$

Для неявнополюсной конструкции второе слагаемое исчезает, т.к. в этом случае $x_d = x_q = x_{\text{синх}} (x_c)$.

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_c} \sin \theta \quad (6)$$

Для электромагнитного момента

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_1}$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{10}}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad \text{Явнополюсное исполнение} \quad (7)$$

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{10}}{\omega_1 x_c} \sin \theta \quad \text{Неявнополюсное исполнение} \quad (8)$$