

Машины переменного тока ч.2

(продолжение)

Синхронные машины (СМ) (продолж.).

**Параллельная работа СГ с сетью бесконечно
большой мощности**

Условия включения на параллельную работу СГ

Методы синхронизации

Регулирование активной мощности

Регулирование реактивной мощности

U-образные характеристики СГ

Качания СМ

Особенности работы СГ на сеть большой мощности.

Обычно на ЭС устанавливают несколько СГ для параллельной работы на общую электрическую сеть.

Это:

- 1.обеспечивает увеличение общей мощности ЭС (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней СГ),**
- 2.повышает надежность энергоснабжения потребителей**
- и 3.позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов.**

ЭС, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии.

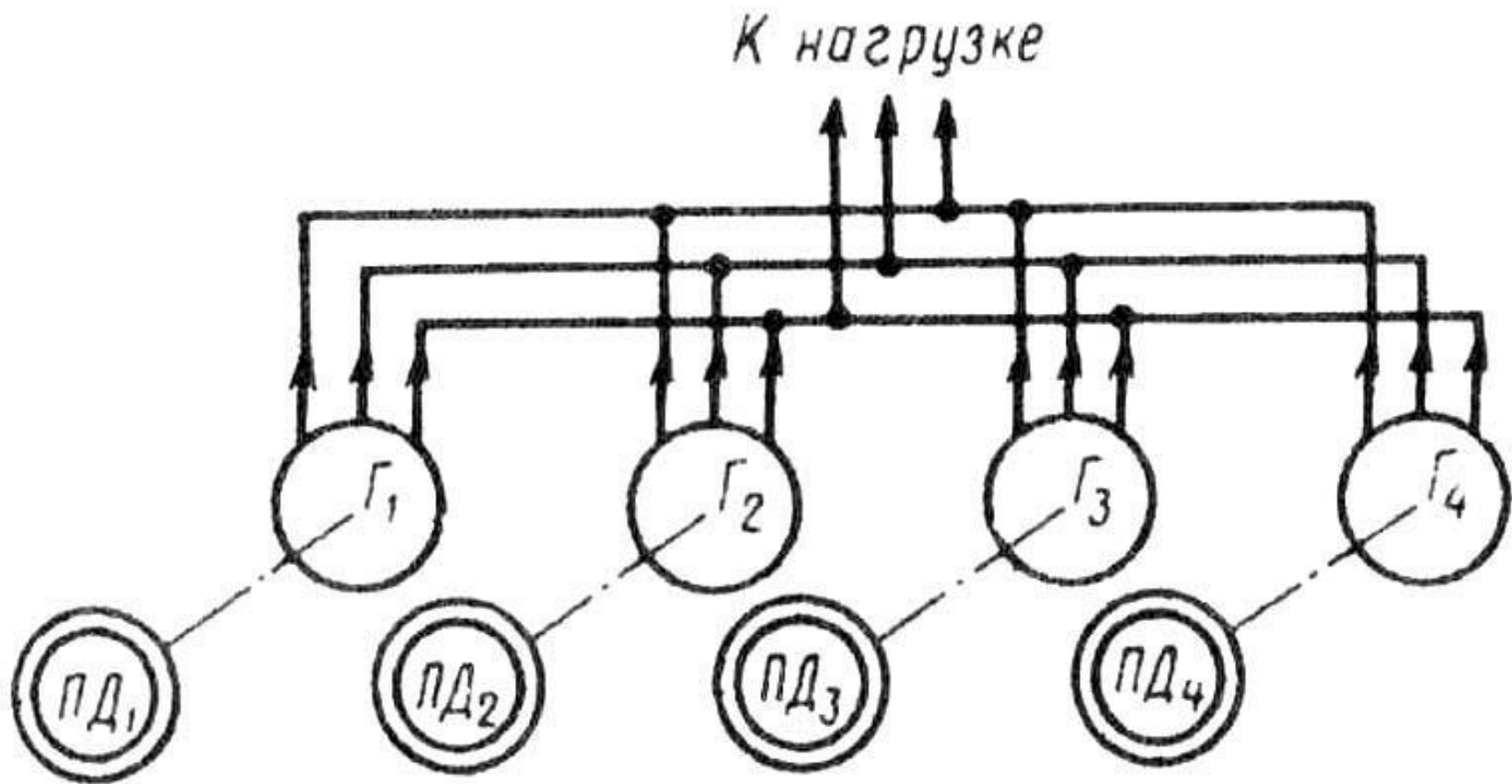


Рис. 1. Включение СГ на параллельную работу:
 $\Gamma_1 - \Gamma_4$ – синхронные генераторы, $\text{ПД}_1 - \text{ПД}_4$ – приводные двигатели

Таким образом, для СМ, установленной на ЭС, или на каком-либо объекте, подключенном к энергосистеме, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность СГ является очень малой.

Что же из этого следует?

В этом случае с большой степенью точности можно принять, что СГ работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности, т. е. что напряжение сети U_{ϵ} и ее частота f_{ϵ} являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного СГ.

Условия включения СГ на параллельную работу

В момент присоединения СГ к сети необходимо обеспечить как можно меньший бросок тока. В противном случае возможны: срабатывание защиты, поломка СГ или первичного двигателя.

Ток в момент подключения СГ к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети U_c и СГ U_Γ :

$$U_{cm} \sin (\omega_c t - \alpha_c) = U_{\Gamma m} \sin (\omega_\Gamma - \alpha_\Gamma)$$

Выполнение этого условия сводится к обеспечению трех равенств:

1. $U_{cm} = U_{\Gamma m}$ или $U_c = U_\Gamma$ (равенство напряжений сети и СГ);
2. $\omega_c = \omega_\Gamma$ или $f_c = f_\Gamma$ (равенство частот сети и СГ);
3. $\alpha_c = \alpha_\Gamma$ (совпадение по фазе векторов $\dot{U}_c$ и $\dot{U}_\Gamma$, т.е. полярность сети и СГ должны быть одинаковы).

Для трехфазных СГ соблюдают ещё и порядок чередования фаз.

Совокупность операций, проводимых при подключении СГ к сети, называют синхронизацией.

Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот $f_c \approx f_r$ а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения $U_c = U_r$.

Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ($\alpha_c = \alpha_r$) контролируют специальными приборами — *ламповым и стрелочными синхроноскопами*.

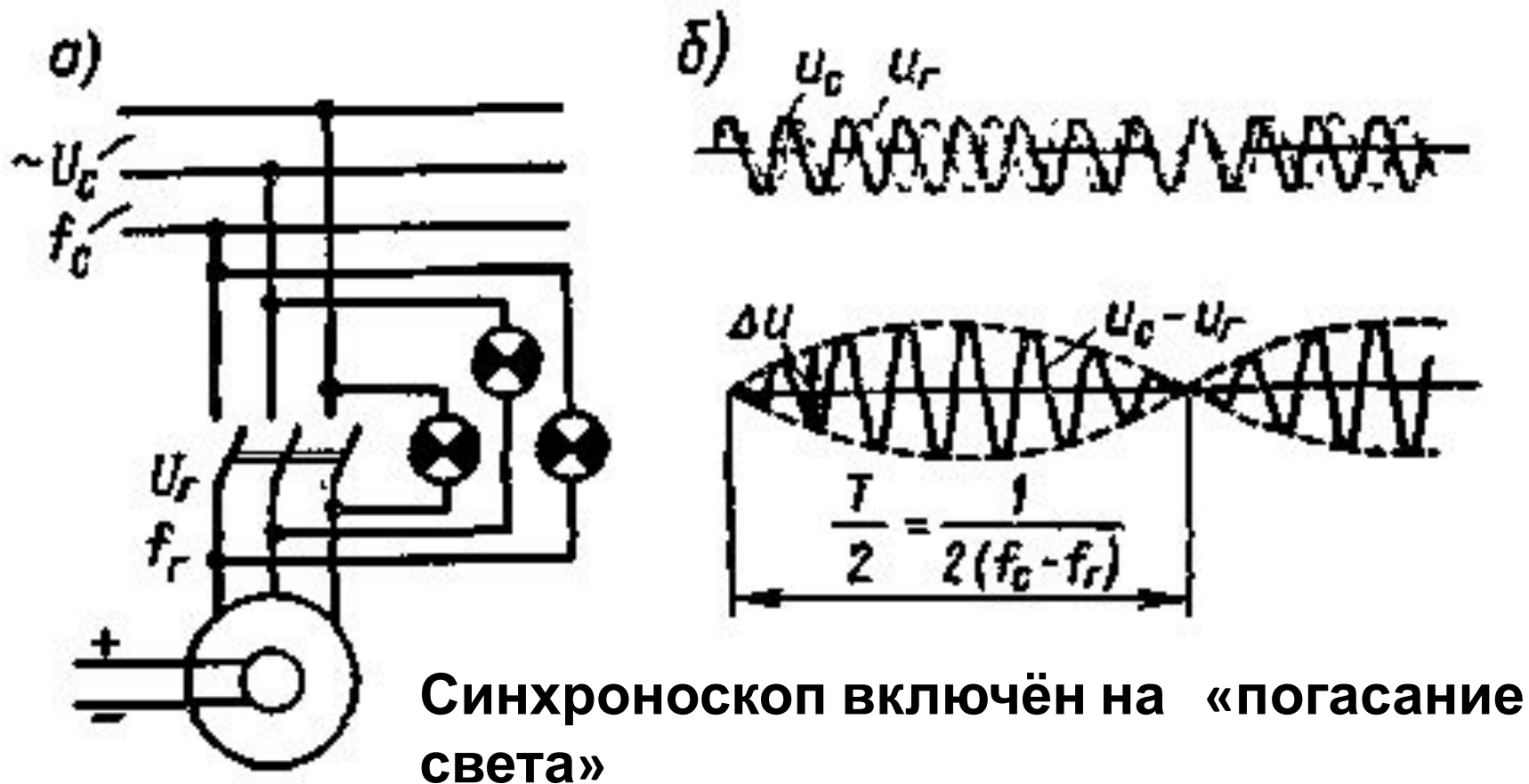


Рис. 2. Схема подключения СГ к сети с помощью лампового синхроскопа (а) и кривые изменения напряжений U_c и U_r перед включением СГ (б)

Ламповые синхроскопы применяют для синхронизации СГ малой мощности, поэтому обычно их используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампы, включенные между фазами генератора и сети (рис. 2, а).

На каждую лампу действует напряжение $\Delta u = u_c - u_r$, которое при $f_c \neq f_r$ изменяется с частотой $\Delta f = f_c - f_r$, называемой частотой биений (рис. 2,б). В этом случае лампы мигают. При $f_c \approx f_r$ разность Δu изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.

Метод точной синхронизации занимает довольно много времени (до 10мин).

В настоящее время на электрических станциях применяются более сложные синхроскопы, позволяющие автоматизировать процесс включения генератора на параллельную работу.

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений Δu на короткое время становится близкой нулю, т. е. в середине периода погасания ламп.

В этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов $\dot{U}_c$ и $\dot{U}_r$.

Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля.

После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения, т. е. обеспечение условия $n_2 = n_1$, происходит автоматически.

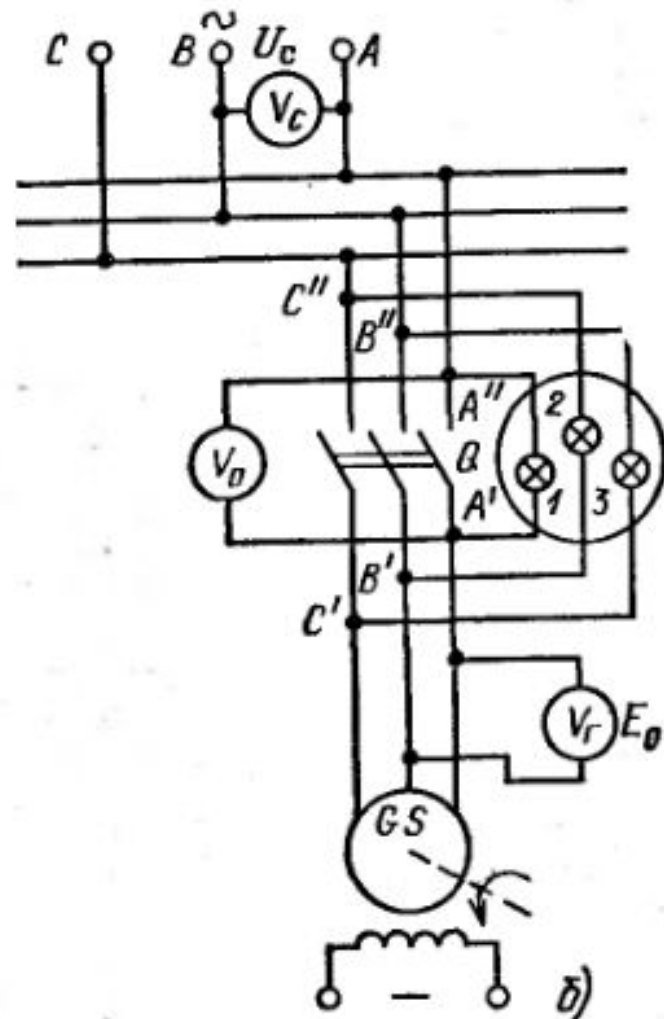


Рис.3.Схемы включения СГ на параллельную работу
а)на погасание света и б) на вращение света

На рис.3 показаны две схемы синхронизации: «на погасание света», что было рассмотрено ранее и «на вращение света».

Во втором случае при синхронизации лампы загораются и гаснут попеременно, создавая эффект вращения света. При этом если $\Omega_{\Gamma} < \Omega_{\Sigma}$, то вращение света происходит в одну сторону, а если $\Omega_{\Gamma} > \Omega_{\Sigma}$, то в другую сторону. Моменту синхронизации соответствует горение двух ламп с одинаковой яркостью и погасание третьей лампы.

Здесь также для более точного определения момента включения применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором СГ подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотку возбуждения замыкают на активное сопротивление).

При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуктированием тока в демпферной обмотке (беличьей клетке, расположенной в башмаках полюсов ротора).

После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм.

При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать $3,5I_{a\text{ ном}}$.

Регулирование реактивной мощности.

Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 4, а), увеличить ток возбуждения I_b , то возрастет ЭДС E_0 (рис. 4, б), возникнет небалансная ЭДС $\Delta \dot{E} = -jI_a X_{сн}$ и по обмотке якоря будет проходить ток I_a , который согласно (1) определяется только индуктивным сопротивлением $X_{сн}$ машины. Следовательно, ток $\dot{I}_a$ реактивный: он отстает по фазе от напряжения СГ $\dot{U}$ на угол 90° или опережает на тот же угол напряжение сети $\dot{U}_c$.

Если уменьшить ток возбуждения, то ток $\dot{I}_a$ изменит свое направление – будет опережать на 90° напряжение СГ $\dot{U}$ (рис. 4, в) и отставать на 90° от напряжения $\dot{U}_c$.

Вывод: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность Q . Активная составляющая тока I_a в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность $P = 0$, и машина работает в режиме х.х.

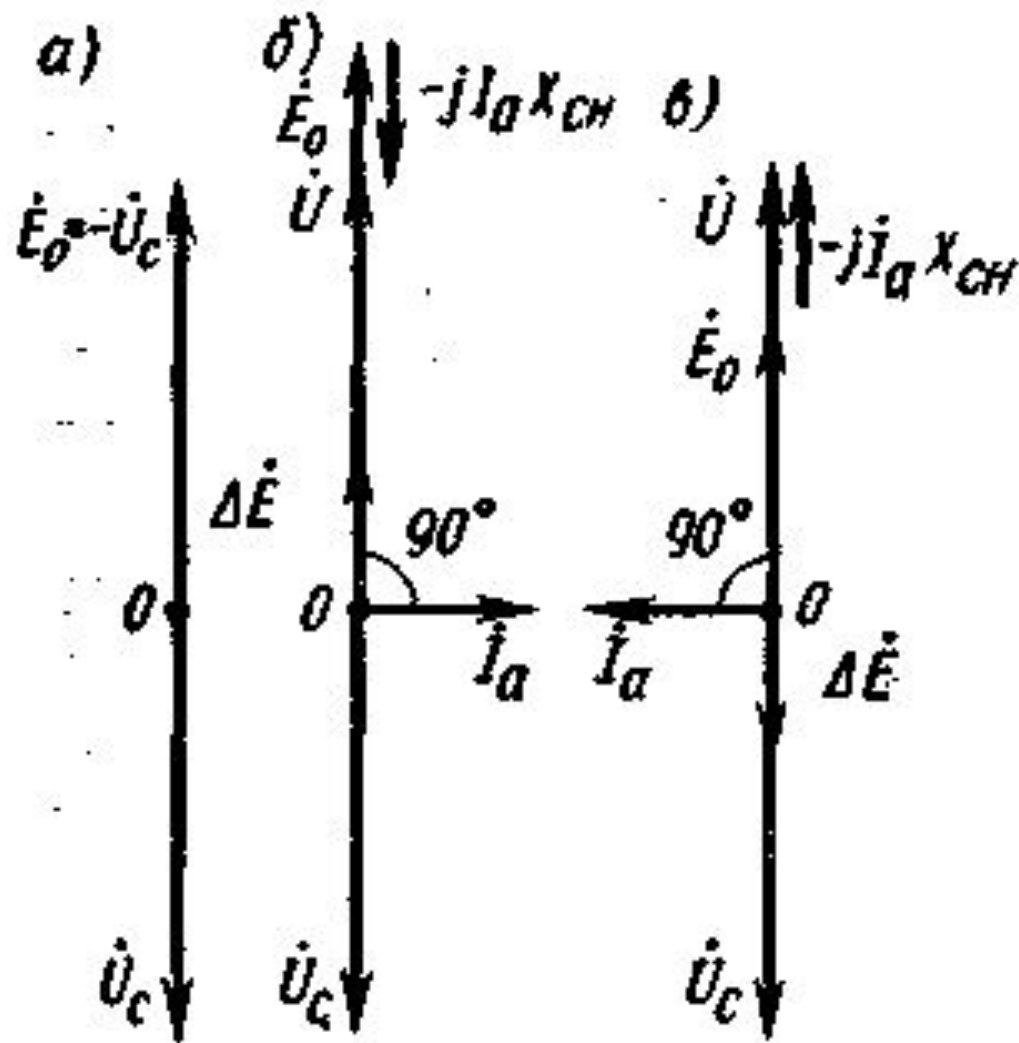


Рис. 4. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного СГ при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{CH}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{CH} \quad (1)$$

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока I_a , т. е. реактивная мощность машины Q .

Режим возбуждения СМ с током $I_{в.н}$, при котором реактивная составляющая тока I_a равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения.

Если ток возбуждения I_v больше тока $I_{в.н}$, при котором осуществляется режим полного возбуждения, то ток I_a содержит отстающую от U реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке СГ. Такой режим называют режимом перевозбуждения.

Если ток возбуждения $I_{\text{в}}$ меньше тока $I_{\text{в.п}}$, то ток $I_{\text{а}}$ содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение СГ U , что соответствует активно-ёмкостной нагрузке СГ. Такой режим называют режимом недовозбуждения.

Перевозбужденная СМ, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна ёмкости.

СМ, специально предназначенную для работы в таком режиме, называют синхронным компенсатором и используют для повышения коэффициента мощности электрических установок и стабилизации напряжения в электрических сетях.

Недовозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна индуктивности

Возникновение реактивной составляющей

тока I_a физически объясняется тем, что при работе СМ на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток, сцепленный с каждой из фаз,

$\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi_{\sigma} = \Phi_{в} + \Phi_{a} + \Phi_{\sigma}$ не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так $U = E + E_{\sigma} = -U = const.$

Выводы: если ток возбуждения I_v больше тока, требуемого для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока I_a , которая создает размагничивающий поток реакции якоря Φ_a ;

если ток I_v меньше тока, необходимого для полного возбуждения, то возникает опережающая составляющая тока I_a , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря Φ_a .

Во всех случаях суммарный поток СМ $\Sigma\Phi$ автоматически поддерживается неизменным.

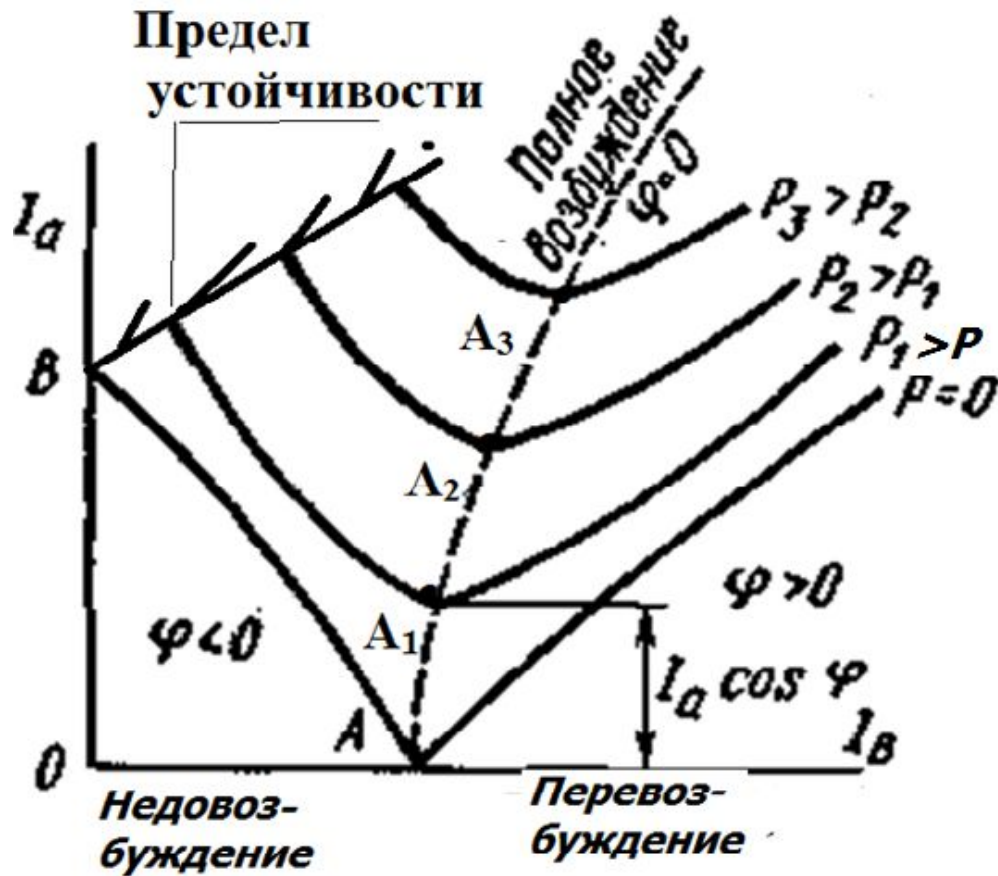


Рис. 5. U -образные (или V – образные) характеристики СГ

$$I_a = f(I_v) \quad f_n = \text{const}, \\ P = \text{const}, \quad U_n = \text{const}$$

Для каждой мощности существует I_v , которому соответствует минимум тока якоря. Чем больше мощность, тем больше ток возбуждения, соответствующий минимальному току якоря.

Штриховая кривая, проведенная через точки минимумов A, A_1, A_2, A_3 , соответствует режимам работы СГ при $\cos \varphi = 1$.

Н.В. $U = E_o - j I X_{сн}$

$X_{сн}$

Объяснить: почему штриховая кривая отклоняется вправо?

Почему точка A при $X.X.$ находится на оси абсцисс?

Регулирование активной мощности.

После включения генератора в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор — сеть» находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$ (рис. 6, а).

При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации СГ, его ток I_a после подключения машины к сети равняется нулю.

Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток I_a при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополюсного генератора.

Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного СГ, можно определить из уравнения (1):

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{сн}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{сн}$$

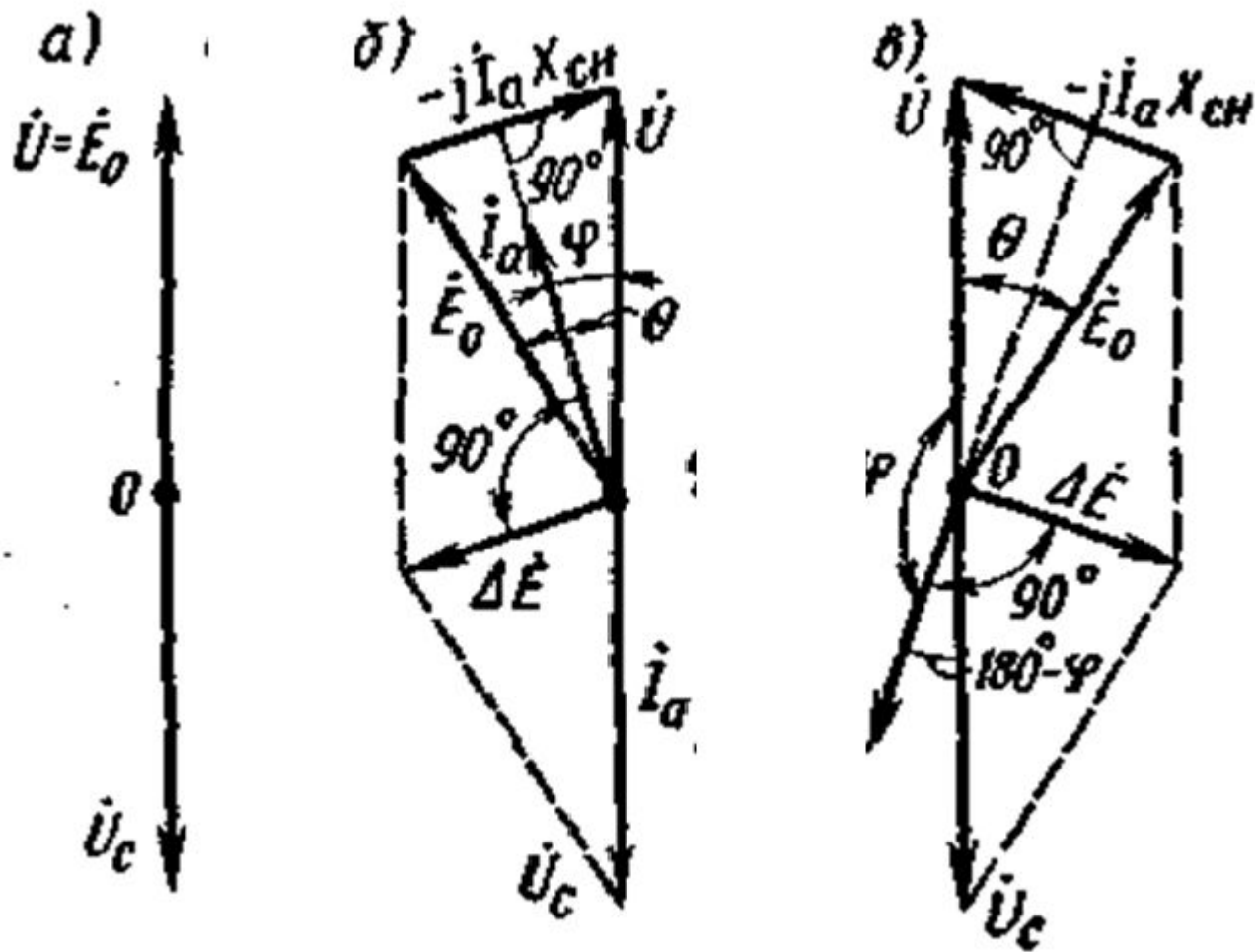


Рис. 6. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного СГ при параллельной работе с сетью

Так как $U = U_c = \text{const}$, то силу тока I_a можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС E_0 по величине или по фазе.

Если к валу СГ приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор $\dot{E}_0$ смещается относительно вектора $\dot{U}$ на некоторый угол θ в направлении вращения векторов (рис. 6,б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС ΔE , приводящая согласно (1) к появлению тока I_a .

Возникающая небалансная ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c = j\dot{I}_a X_{\text{сн}}$ показана на векторной диаграмме (рис. 6, б).

Вектор тока I_a отстает от вектора ΔE на 90° , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением $X_{\text{сн}}$

При работе в рассматриваемом режиме СГ отдает в сеть активную мощность $P = mUI_a \cos \varphi$ и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной $n_2 = n_1 = \text{const}$.

Чем больше внешний момент, приложенный к валу СГ, тем больше угол θ , а, следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор $\dot{E}_0$ будет отставать от вектора напряжения $\dot{U}$ на угол θ (рис. 6, в). При этом возникают небалансная ЭДС $\Delta\dot{E}$ и ток $\dot{I}_a$, вектор которого отстает от вектора $\Delta\dot{E}$ на 90° .

Так как угол $\varphi > 90^\circ$, активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора.

Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность $P = mUI_a \cos \varphi$ забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т. е. вращающий момент первичного двигателя - добавить пара - в ТГ, увеличить напор воды - в ГГ и т.д.), а для уменьшения нагрузки — уменьшать внешний момент.

При изменении направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного в двигательный режим.

Качание СМ

При параллельной работе с сетью на ротор синхронной машины действуют упругие и инерционные силы, поэтому изменение нагрузки у синхронной машины, переход от одного установившегося значения угла θ к другому происходят путем колебаний около нового своего значения. Так как угол θ зависит от положения оси полюсов относительно оси результирующего магнитного поля, то колебания угла θ связаны с механическими колебаниями всей вращающейся системы — машины и соединенного с ней механизма.

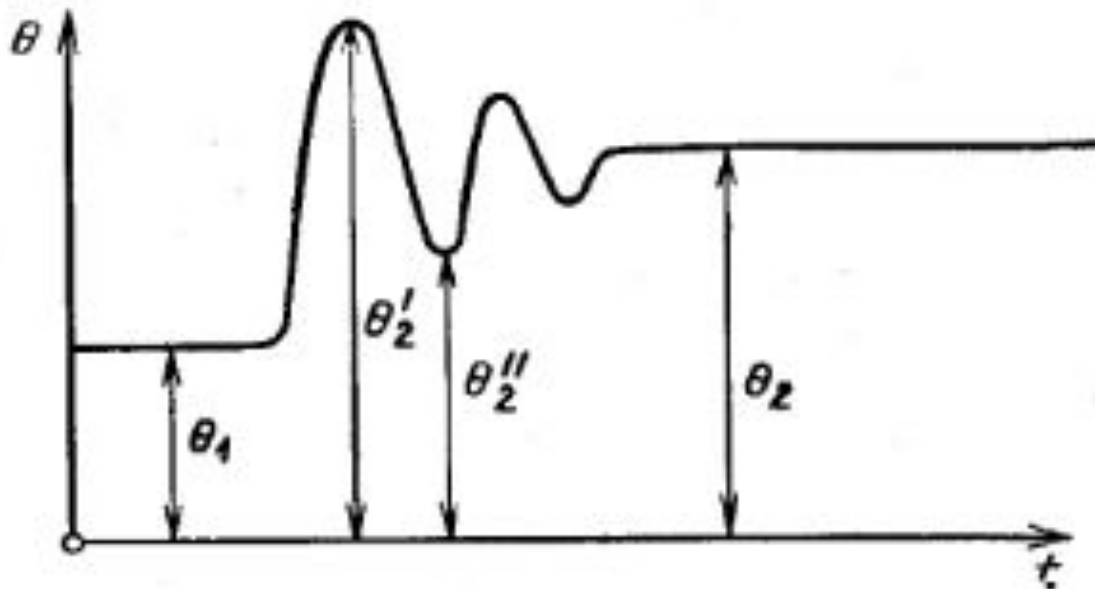


Рис.7.Качание СТ

Возникновение качаний в синхронном генераторе можно объяснить следующим образом. Предположим, что момент, приложенный к валу синхронного генератора, резко возрос от M_1 до значения M_2 и в дальнейшем остается неизменным. С возрастанием момента угол θ должен возрасти с θ_1 до θ_2 (рис. 7). Однако при увеличении угла θ из-за инерционных сил вращающихся частей синхронной машины

и механизма ротор повернется на угол $\theta'_2 > \theta_2$. При угле θ'_2 электромагнитный момент, оказывающий тормозящее действие, станет больше момента M_2 , в результате чего ротор начнет замедлять скорость, а угол θ будет уменьшаться. Но и в этом случае из-за сил инерции ротор перейдет в положение $\theta''_2 < \theta_2$. Здесь электромагнитный момент станет меньше M_2 и ротор начнет вновь увеличивать скорость, а угол снова начнет возрастать. В результате этого ротор совершит еще одно колебание относительно установившегося значения угла θ_2 .

Как правило, качания в синхронных машинах носят затухающий характер, поэтому амплитуда колебаний будет постепенно уменьшаться, и через некоторое время угол θ установится равным θ_2 . Причиной затухания качаний являются токи, индуцируемые в контурах ротора, при его перемещении относительно магнитного поля. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем машины, создают тормозной момент. Для увеличения тормозного момента и, следовательно, для снижения качаний в полюсных наконечниках синхронной машины размещается специальная демпферная обмотка (см пред. лек). Рассмотренные колебания ротора называют собственными.

Кроме собственных колебаний синхронный генератор может испытывать вынужденные колебания, если внешний момент, приложенный к его валу, периодически изменяется, что наблюдается при сочленении его с поршневой машиной (паровая машина или двигатель внутреннего сгорания).

Периодически изменяющийся внешний момент на валу синхронного генератора нарушает нормальные условия его работы, а при равенстве частот собственных и вынужденных колебаний возникает резонанс, и работа генератора становится невозможной. Если частоты собственных и вынужденных колебаний оказываются близкими или равными, то для исключения возможного резонанса изменяют частоту собственных колебаний путем установки на валу агрегата маховика (изменения момента инерции J).

Качания возникают как при работе генератора, так и при работе двигателя.