

1. Назначение и области применения синхронных машин, принцип действия.

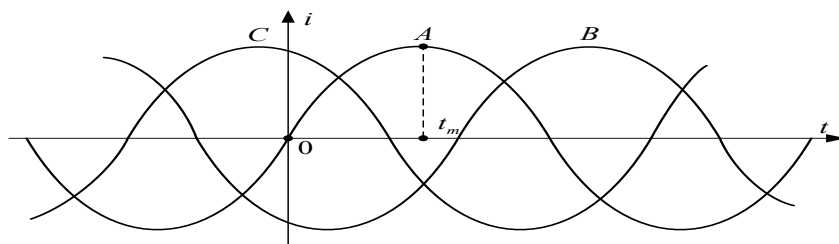
Синхронные машины используют преимущественно в качестве источников электрической энергии переменного тока. Синхронные генераторы различаются типом привода: турбогенераторы (приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами), гидрогенераторы (работают от гидротурбин), дизель-генераторы (приводным является дизельный двигатель или двигатель внутреннего сгорания). Дизель-генераторы используются для автономного электроснабжения жилых и небольших производственных помещений, временных промышленных установок. Синхронные машины мощностью от 100 кВт и выше используют в качестве двигателей в электроприводах промышленных установок, где необходимо поддержание постоянной скорости независимо от нагрузки на валу (прокатные станы, насосы, компрессоры, вентиляторы). Синхронные микродвигатели применяются в системах автоматики (шаговые, реактивные, гистерезисные и др.). Синхронные машины используются также в качестве компенсаторов для генерирования или потребления реактивной мощности в системах электроснабжения для повышения коэффициента мощности промышленных установок и поддержания нормального уровня напряжения в сети.

Трехфазная синхронная машина обычно имеет неподвижный статор и вращающийся ротор. Ротор синхронной машины является индуктором, а статор – якорем. В генераторном режиме индуктор вращается со скоростью n_2 , вместе с ним вращается магнитный поток машины $\bar{\Phi}_\delta$, который пересекает проводники обмотки якоря и индуцирует в них трехфазную эдс \bar{E}_a . Эдс якоря \bar{E}_a меняется с частотой f_1 . При подключении обмотки якоря к какой-либо нагрузке в ней под действием эдс \bar{E}_a возникает ток \bar{I}_a , который создает вращающееся магнитное поле, характеризующееся потоком $\bar{\Phi}_a$. Частоты вращения ротора синхронной машины n_2 и поля статора n_1 равны. Результирующий магнитный поток $\bar{\Phi}$ создается потоками $\bar{\Phi}_\delta$ и $\bar{\Phi}_a$. Магнитное поле потока $\bar{\Phi}$ вращается в зазоре машины с той же частотой, что и ротор.

В двигательном режиме с включением обмотки якоря в трехфазную сеть возникающий в ней ток \bar{I}_a создает круговое поле. Оно вращается с частотой n_1 при частоте тока f_1 . Обмотка возбуждения в свою очередь создает поле полюсов, которое вращается синхронно с ротором и является неподвижным относительно поля статора. Частота вращения ротора находится в строгой зависимости от частоты тока сети. Она равна частоте вращения магнитного поля статора. Взаимодействие потока $\bar{\Phi}$ с током \bar{I}_δ в обмотке возбуждения приводит к образованию электромагнитных сил и момента M , который является тормозным в генераторном режиме и движущим в режиме двигателя.

2. Явление реакции якоря в синхронных машинах. Проявление ее при различных типах нагрузок (привести иллюстрации).

Воздействие магнитодвижущей силы якоря на магнитное поле синхронной машины называется реакцией якоря. Действие реакции якоря существенно



Система трехфазных токов в обмотке статора СМ

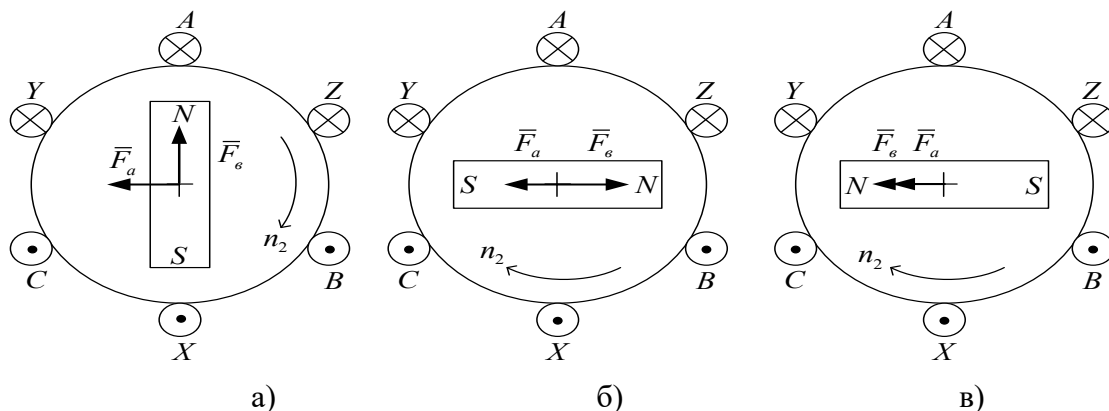
зависит от характера нагрузки. Оно может искажать, ослаблять и усиливать поле машины. Угол ψ

определяется характером нагрузки. Обмотка каждой фазы представлена в виде одного витка.

В случае активной нагрузки ($\psi = 0$) ток \bar{I}_a совпадает по фазе с эдс \bar{E}_0 . Его амплитуда соответствует амплитуде эдс в фазе A в момент времени t_m . При заданной полярности и заданном направлении вращения индуктора амплитудное значение эдс имеет место в фазе A при положении индуктора на рис. а. Магнитодвижущая сила индуктора \bar{F}_e направлена по оси полюсов, а магнитодвижущая сила \bar{F}_a является поперечной и искажает магнитное поле синхронной машины.

Индуктивной нагрузка вызывает отставание тока \bar{I}_a по фазе на угол $\psi = \frac{\pi}{2}$ от эдс \bar{E}_0 в момент времени t_m ($\psi > 0$). Эдс в фазе A имела максимальное значение при положении индуктора на рис. а. К тому времени, когда ток в фазе A достигает амплитудного значения, индуктор успевает повернуться на 90° и занять

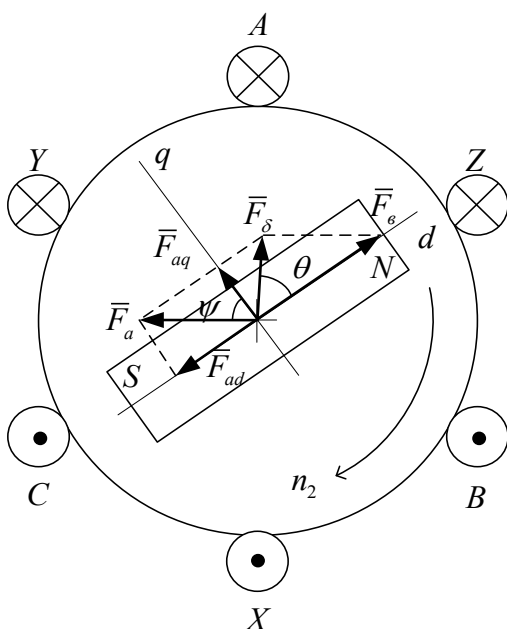
положение на рис. б.



Действие магнитодвижущей силы реакции якоря \bar{F}_a на магнитное поле машины при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках

Магнитодвижущие силы индуктора \bar{F}_e и якоря \bar{F}_a направлены встречно, сила \bar{F}_a

является в данном случае продольно размагничивающей.



Действие магнитодвижущей силы реакции якоря \bar{F}_a на магнитное поле машины при активно-индуктивной нагрузке

При емкостной нагрузке ток \bar{I}_a опережает по фазе на угол $\psi = \frac{\pi}{2}$ эдс \bar{E}_0 в момент времени t_m ($\psi < 0$). Максимальное значение эдс в фазе A определяется положением индуктора рис.а. Ток в фазе A достигает амплитудного значения, когда положение индуктора соответствует рис.в. Магнитодвижущие силы индуктора \bar{F}_ϵ и якоря \bar{F}_a направлены согласно, а сила \bar{F}_a является в данном случае продольно намагничивающей.

Нагрузка синхронных генераторов в большинстве случаев носит активно-индуктивный характер ($0 < \psi < \frac{\pi}{2}$). В момент времени t_m ток в фазе A достигает амплитудного значения, а индуктор относительно положения рис.а успевает повернуться на угол ψ .

3. Векторные диаграммы синхронного генератора (неявно- и явнополюсные машины).

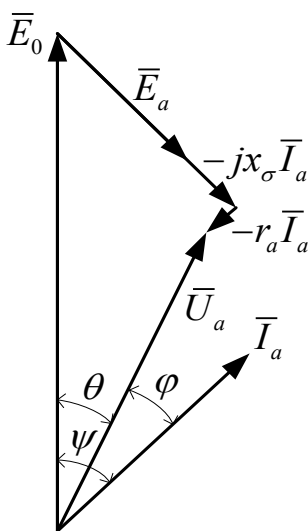
Для цепи якоря неявнополюсного синхронного генератора имеет место уравнение:

$$\bar{U}_a = \bar{E}_\delta + \bar{E}_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_\delta - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a,$$

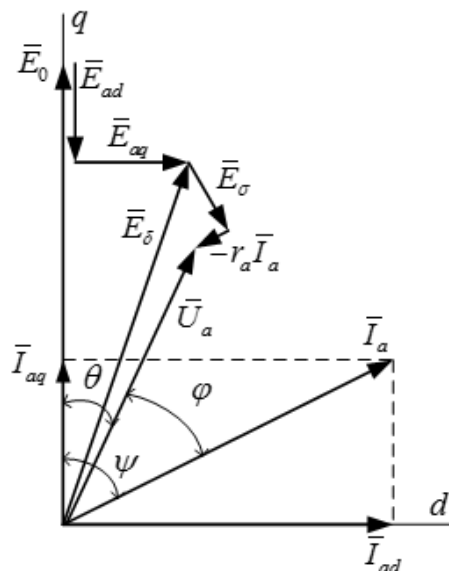
где \bar{E}_σ – эдс, наводимая в обмотке якоря потоком рассеяния; x_σ – индуктивное сопротивление, обусловленное этим потоком.

Т.к. $\bar{E}_\delta = \bar{E}_0 + \bar{E}_a$, то $\bar{U}_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_a - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 - j\bar{I}_a x_a - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a$.

Величина $x_c = x_a + x_\sigma$ называется полным или синхронным индуктивным сопротивлением машины. Величина эдс \bar{E}_0 получается несколько завышенной без учета насыщения.



Упрощенная векторная диаграмма синхронного неявнополюсного генератора



При работе

машины в генераторном режиме напряжение \bar{U}_a всегда отстает от эдс \bar{E}_0 . В этом случае угол θ считается положительным. Чем больше нагрузка генератора, т.е. отдаваемая им мощность, тем больше угол θ . Цепь якоря явнополюсного синхронного генератора в общем случае описывается уравнением $\bar{U}_a = \bar{E}_\delta + \bar{E}_\sigma - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq} - j\bar{I}_a x_\sigma - \bar{I}_a r_a$, где $\bar{E}_{ad} = -j\bar{I}_{ad} x_{ad}$; $\bar{E}_{aq} = -j\bar{I}_{aq} x_{aq}$.

x_d и x_q – сопротивления называются синхронными (полными) индуктивными сопротивлениями обмотки якоря по продольной d и поперечной q осям. Эдс \bar{E}_σ , индуцируемую в обмотке якоря потоком рассеяния, можно представить в виде суммы двух составляющих, ориентированных по осям d и q:

$$\bar{E}_\sigma = \bar{E}_{\sigma d} + \bar{E}_{\sigma q} = -j\bar{I}_{ad} x_\sigma - j\bar{I}_{aq} x_\sigma.$$

$$\bar{U}_a = \bar{E}_0 - j\bar{I}_{ad} x_d - j\bar{I}_{aq} x_q - \bar{I}_a r_a = \bar{E}_0 + \bar{E}_d + \bar{E}_q - \bar{I}_a r_a.$$

Упрощенная векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора

4. Характеристики синхронных генераторов (привести зависимости). Для каких целей используются каждая из них?

Характеристики служат для определения параметров синхронной машины, необходимых для эксплуатации и при ее испытаниях.

1) Хар-ка Х.Х: $E_0 = f(I_B)$ при $n_2 = \text{const} = n_H$ и $I_a = 0$.

Хар-ка Х.Х. в основном строится в относительных единицах: $E_0^* = f(I_0^*)$.

Здесь $E_0^* = \frac{E_0}{U_{aH}}$, а $I_0^* = \frac{I_B}{I_{B0H}}$.



Еост — эсд вызванная остаточным магнитным потоком.

Экспериментальная характеристика сравнивается с универсальной характеристикой холостого хода синхронной машины.

Характеристика холостого хода используется для выявления дефектов в обмотках и магнитной системы синхронной машины, определения степени ее насыщения, эксплуатационных параметров.

2) Внешняя хар-ка: $U_a = f(I_a)$ при $n_2 = \text{const} = n_H$, $I_B = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$

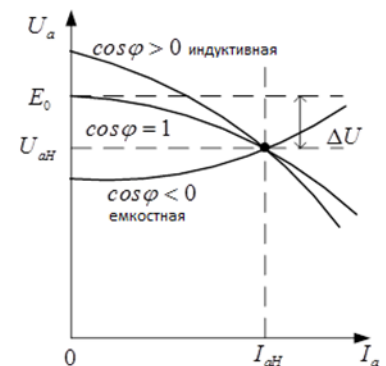
В случае активной и индуктивной нагрузки реакция якоря размагничивает синхронную машину с ростом тока I_a . Когда нагрузка емкостная, то происходит насыщение магнитной цепи.

Используется для определения изменения напряжения ΔU или $\Delta u_{\%}$. Для активной нагрузки величина $\Delta u_{\%}$ рассчитывается $\Delta u_{\%} = \frac{E_0 - U_{aH}}{U_{aH}} \cdot 100\%$

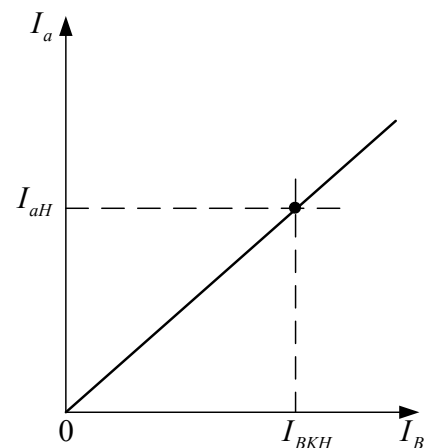
3) Хар-ка КЗ: $I_a = f(I_B)$ при $n_2 = \text{const} = n_H$ и $U_a = 0$.

Характеристика короткого замыкания вместе с характеристикой холостого хода позволяют определить ток возбуждения синхронного генератора при заданном режиме нагрузки, а так же предопределить величину эдс E_0 в случае отключения генератора от сети.

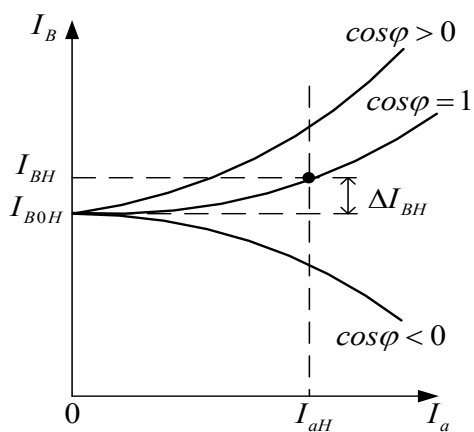
4) Регулировочная характеристика $I_B = f(I_a)$ при $n_2 = \text{const} = n_H$, $U_a = \text{const} = U_{aH}$, $\cos\varphi = \text{const}$



Внешняя характеристика синхронного генератора при различных видах нагрузки



Характеристика короткого замыкания



Регулировочная характеристика при различных видах нагрузки

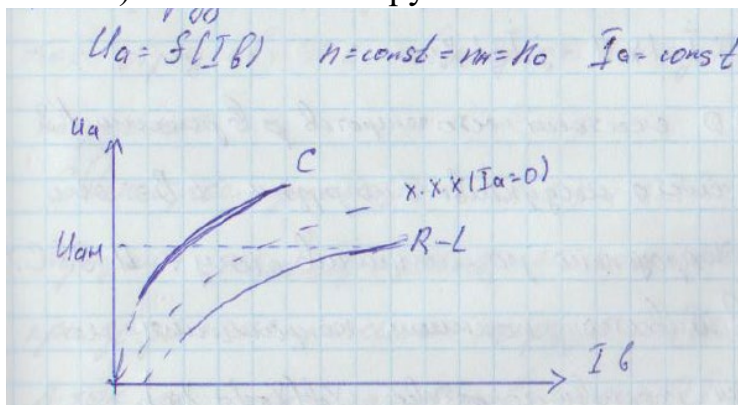
$I_{\text{вон}}$ – ток возбуждения, когда $E_0 = U_{\text{ан}}$

При активной и индуктивной нагрузке для компенсации размагничивающего действия реакции якоря требуется увеличивать ток возбуждения. Емкостная нагрузка наоборот требует снижения тока возбуждения для предотвращения насыщения магнитной цепи машины.

Регулировочная и внешняя хар-ки определяются характером нагрузки и действием реакции якоря.

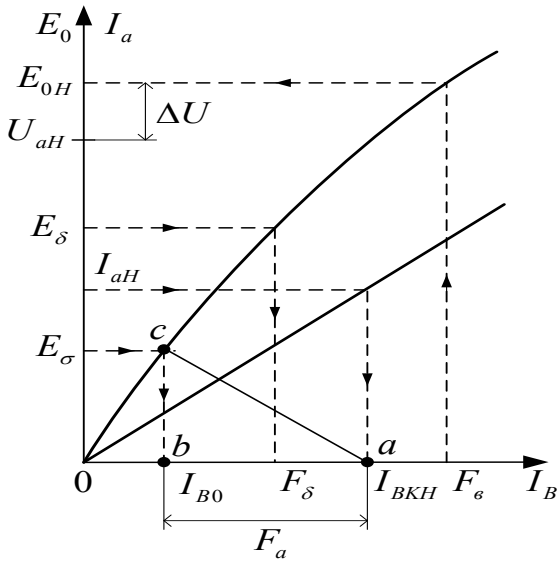
5)

Нагрузочная хар-ка

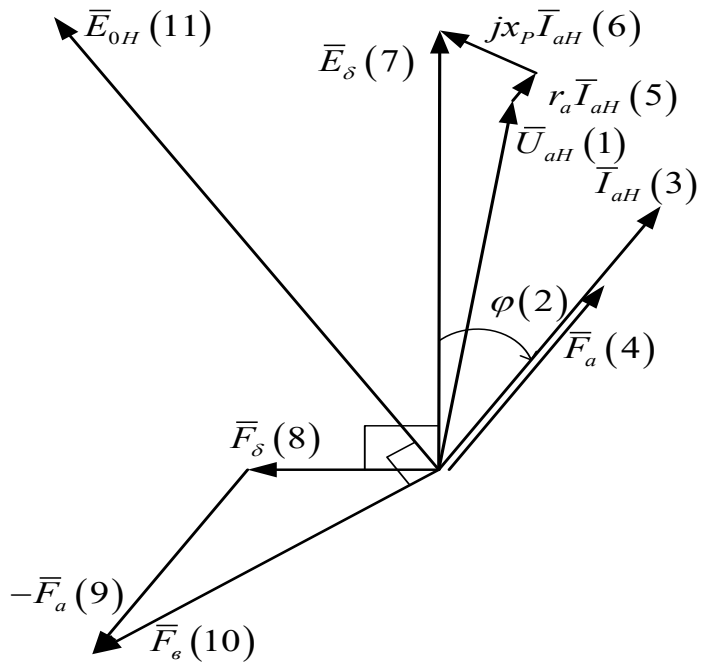


5. Треугольник Потье (реактивный/характеристический). Построение диаграммы Потье.

Диаграмма Потье строиться преимущественно для неявнополюсных синхронных генераторов с использованием характеристик холостого хода и короткого замыкания. Сочетание этих характеристик позволяет определить размагничивающее действие реакции якоря. В режиме короткого замыкания для создания номинального тока в обмотке якоря I_{aH} требуется ток возбуждения I_{BKH} (отрезок $0a$). Ток I_{BKH} соответствует эдс в режиме короткого замыкания $E_\sigma = x_\sigma I_{aH}$ (отрезок bc). Для создания такой же эдс на холостом ходу требуется ток



a)



6)

Построение диаграммы Потье

возбуждения I_{B0} (отрезок Ob). Отрезок ab в масштабе тока возбуждения характеризует размагничивающее действие продольной реакции якоря при условии $r_a \approx 0$. Треугольник abc называется треугольником Потье, а также реактивным или характеристическим треугольником.

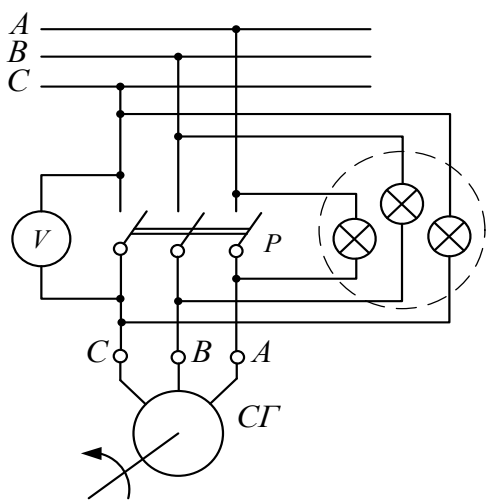
Вектор \bar{U}_{aH} откладывается на плоскости произвольно, а вектор \bar{I}_{aH} – под углом φ . Затем к вектору \bar{U}_{aH} достраиваются падения напряжения $r_a \bar{I}_{aH}$, $jx_P \bar{I}_{aH}$ и устанавливают значение эдс \bar{E}_δ , соответствующая магнитодвижущей силе \bar{F}_δ в масштабе тока возбуждения (а). Вектор \bar{F}_δ опережает по фазе \bar{E}_δ на $\frac{\pi}{2}$. Для получения магнитодвижущей силы \bar{F}_e к вектору \bar{F}_δ следует достроить вектор $-\bar{F}_a$, находящийся в противофазе с вектором \bar{I}_{aH} . Он определяемый из треугольника Потье.

$\bar{F}_\epsilon = \bar{F}_\delta - \bar{F}_a$ Магнитодвижущей силе \bar{F}_ϵ соответствует эдс холостого хода \bar{E}_{0H}

(а), вектор которой отстает на диаграмме на угол $\frac{\pi}{2}$ от вектора \bar{F}_ϵ . Величина \bar{F}_ϵ

характеризует ток возбуждения синхронного генератора, необходимый для обеспечения данного режима его нагрузки. Номинальное изменение напряжения ΔU часто определяется в процентном отношении при известных значениях U_{aH} и E_{0H} , где $E_0 = E_{0H}$

6. Параллельная работа синхронных генераторов. Условия включения на параллельную работу методами точной синхронизации и самосинхронизации. Схема простейшего синхроскопа. Перевод нагрузки с одного генератора на другой.



Включение на параллельную работу

Параллельная работа синхронных генераторов обеспечивает:

- увеличение общей мощности электростанции;
- повышение надежности энергоснабжения потребителей;
- снижение резерва мощности при аварии или ремонте;
- возможность переадресации энергии в другие районы при изменениях нагрузки.

При включении генераторов в сеть на параллельную работу с другими генераторами необходимо избегать чрезмерно большого толчка тока в замкнутом контуре, образованном сетью и обмоткой статора генератора, а также возникновения ударных электромагнитных

моментов, которые могут вывести из строя сам генератор, работающее с ним электрооборудование, приводной агрегат, нарушить работу сетей и энергосистемы. Подключение генераторов на параллельную работу с сетью требует соблюдения следующих условий:

- напряжения генератора $U_{ген}$ и сети U_c должны быть одинаковыми;
- частоты генератора $f_{ген}$ и сети f_c должны быть одинаковыми;
- напряжения генератора $U_{ген}$ и сети U_c необходимо, чтобы совпадали по фазе;
- чередование фаз генератора и сети должно быть одинаковым.

Равенство напряжений $U_{ген}$ и U_c достигается путем регулирования тока возбуждения. Изменение частоты синхронного генератора $f_{ген}$ и фазы его напряжения достигается изменением частоты вращения ротора. Совпадение напряжений $U_{ген}$ и U_c по фазе контролируется с помощью ламп, нулевых вольтметров, синхроскопов. Чередование фаз проверяется после монтажа генератора или сборки схемы. При неодинаковом чередовании фаз генератора и сети лампы включены на линейное напряжение и будут гореть наиболее ярко. При различных частотах генератора $f_{ген}$ и сети f_c лампы одновременно мигают. Чем ближе совпадение частот $f_{ген}$ и f_c , тем частота мигания ламп $(f_{ген} - f_c)$ меньше. При одновременно невыполнении обоих этих условий в схеме происходит движение света. Подключение генератора к сети происходит в следующем порядке:

- невозбужденный ротор разгоняют до подсинхронной скорости $(0,95 - 0,98)n_1$;

- плавно увеличивают ток возбуждения, добиваясь одинаковых значений напряжений генератора $U_{ген}$ и сети U_c ;
- чередование фаз верное, если лампы мигают одновременно;
- частоту вращения ротора генератора подгоняют до значения, при котором частота мигания ламп $(f_{ген} - f_c)$ минимальна. В середине «темного» полупериода замыкают рубильник P (более точно момент включения можно определить по вольтметру V).

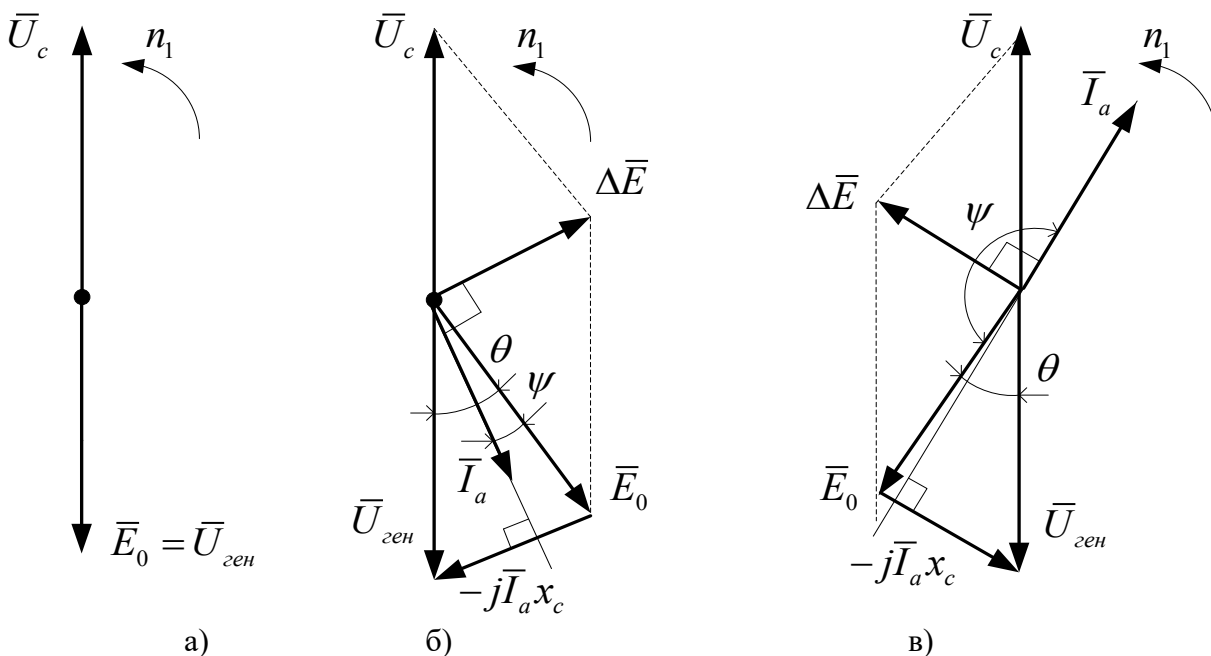
После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения происходит автоматически.

7. Особенности работы синхронного генератора с сетью бесконечной мощности.

Мощность каждого генератора, подключаемого к сети, незначительна по сравнению с мощностью энергосистемы. Поэтому принято считать, что генератор работает на сеть бесконечно большой мощности. Такая сеть характеризуется постоянным по величине и синусоидальным по форме напряжением U_c и постоянной по величине частотой f_c . Эти параметры не зависят от нагрузки данного генератора.

После включения синхронного генератора в сеть его напряжение $U_{ген}$ становится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения $U_{ген}$ и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор – сеть» находятся в противофазе: $\bar{U}_{ген} = -\bar{U}_c$. тока I_a для неявнополюсного генератора регулируют изменением эдс E_0 по величине или по фазе: $\bar{I}_a = \frac{(\bar{E}_0 - \bar{U}_c)}{jx_c} = -j \frac{(\bar{E}_0 - \bar{U}_c)}{x_c}$

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью бесконечной

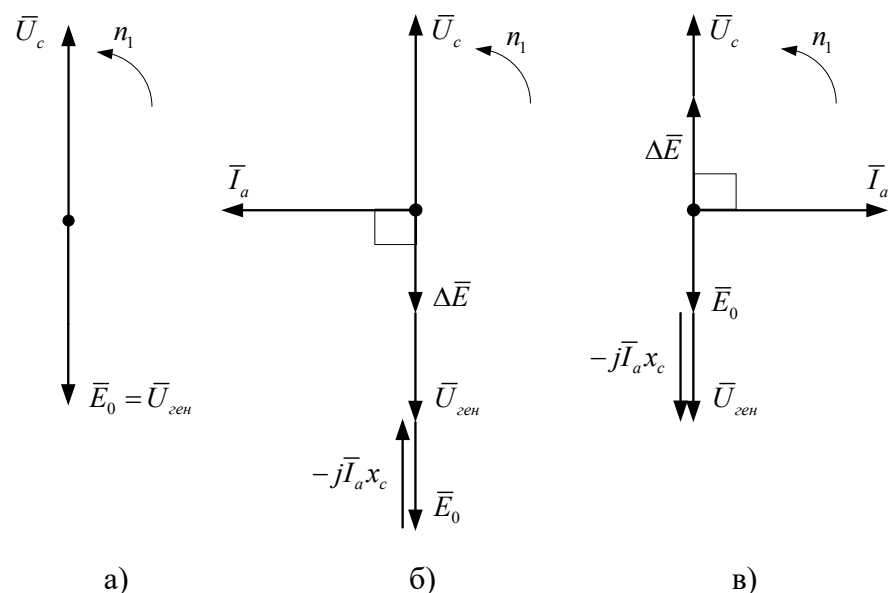


Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

мощности, стремиться поддержать синхронную частоту вращения n_1 в некотором диапазоне изменения момента на валу. Машина работает вхолостую, затем возрастает момент приводного двигателя, и ротор получает ускорение, при этом $n_2 > n_1$. Возникающая небалансная эдс $\Delta \bar{E} = -j\bar{I}_a x_c$ приводит к появлению тока I_a . Коэффициент мощности $\cos \psi > 0$. Машина генерирует в сеть активную мощность и развивает тормозной момент. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , ток и мощность, отдаваемые им в сеть.

Если к валу синхронного генератора приложить внешний тормозной момент, ротор замедляется ($n_2 < n_1$). Коэффициент мощности $\cos\psi < 0$, машина потребляет из сети активную мощность, находится в двигательном режиме, развивает вращающий момент.

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью бесконечной мощности, стремится сохранить неизменным магнитный поток при изменении в некотором диапазоне тока обмотки возбуждения. Машина работает холостую (а). Возрастание тока возбуждения приводит к образованию эдс $\Delta\bar{E}$. В контуре



Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

«генератор – сеть» возникает ток I_a . Эдс \bar{E}_0 превышает напряжение $\bar{U}_{ген}$ на величину $\Delta\bar{E} = -j\bar{I}_a x_c$. При условии $r_a \approx 0$ ток I_a считается чисто индуктивным по отношению к $\Delta\bar{E}$ (б). Возникает продольно размагничивающая реакция якоря, в результате чего поток машины стабилизируется.

Относительно напряжения сети U_c ток

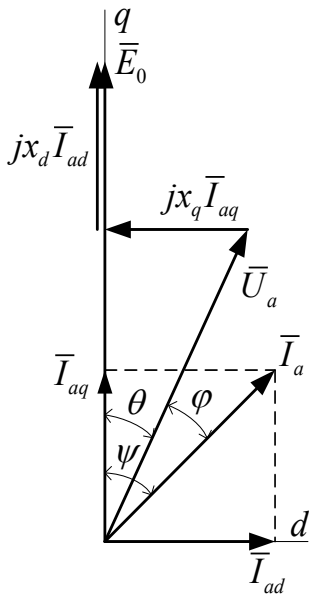
I_a является чисто емкостным. Синхронная машина при $E_0 > U_{ген}$ называется перевозбужденной.

Снижение тока возбуждения $E_0 < U_{ген}$ приводит к возникновению емкостного тока I_a по отношению к $\Delta\bar{E}$ (в). Возникает продольно намагничивающая реакция якоря, в результате чего поток машины стабилизируется. Относительно напряжения сети U_c ток I_a является чисто индуктивным. Синхронная машина при этом называется недовозбужденной. Она для сети эквивалентна индуктивности.

Изменение тока возбуждения синхронной машины приводит к изменению только реактивной составляющей тока \bar{I}_a , а следовательно ее реактивной мощности. Возникновение реактивной составляющей тока \bar{I}_a физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток $\bar{\Phi}_\Sigma = \bar{\Phi}_\delta + \bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_\sigma$, сцепленный с каждой из фаз, не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, поскольку $\bar{U}_{ген} = \bar{E}_0 + \bar{E}_a + \bar{E}_\sigma = -\bar{U}_c = const$.

8. Мощность и электромагнитный момент синхронной машины (формулы, характеристики).

Выражения для мощности P и электромагнитного момента M могут быть получены с помощью упрощенной векторной диаграммы явнополюсного генератора при допущении $r_a \approx 0$. Активная мощность, вырабатываемая генератором



Упрощенная векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

$$P = m U_a I_a \cos \varphi = m U_a I_a \cos (\psi - \theta).$$

$$\cos (\psi - \theta) = \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta.$$

$$P = m U_a I_a (\sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \theta) = m U_a I_{ad} \sin \theta + m U_a I_{aq} \cos \theta.$$

$$I_{ad} = \frac{E_0 - U_a \cos \theta}{x_d}; \quad I_{aq} = \frac{U_a \sin \theta}{x_q}.$$

$$P = \frac{m U_a E_0}{x_d} \sin \theta - \frac{m U_a^2}{x_d} \sin \theta \cos \theta + \frac{m U_a^2}{x_q} \sin \theta \cos \theta,$$

$$\text{где } \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta.$$

$$P = \frac{m U_a E_0}{x_d} \sin \theta - \frac{m U_a^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Для машин с неявнополюсным ротором

$$x_d = x_q = x_c$$

и
тогда

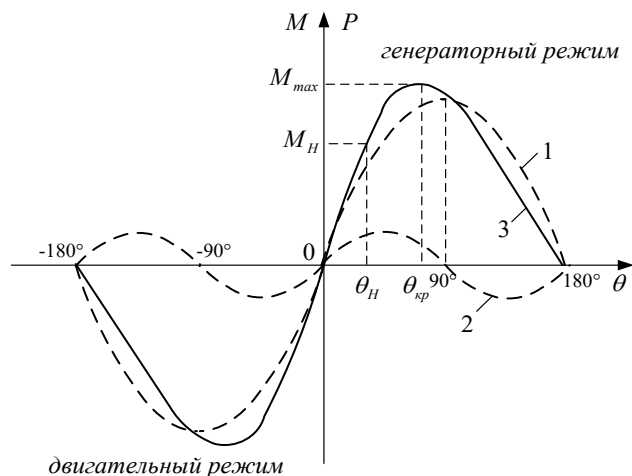
$$a: P = \frac{m U_a E_0}{x_c} \sin \theta.$$

Пренебрегая потерями можно считать, что электромагнитная мощность машины $P_{\text{эм}}$ и мощность P равны. Электромагнитный момент M пропорционален мощности $P_{\text{эм}} = P$, поэтому:

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{m U_a E_0}{x_c \omega_1} \sin \theta$$

неявнополюсной

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{m U_a E_0}{x_d \omega_1} \sin \theta - \frac{m U_a^2}{2 \omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_{\text{осн}} + M_p, \quad \text{для явнополюсной}$$



Угловые характеристики синхронной машины

Зависимости $P = f(\theta)$ и $M = f(\theta)$, полученные при условиях $U_a = \text{const}$ и $E_0 = \text{const}$, называются угловыми характеристиками синхронной машины.: 1 — график основной составляющей $M_{\text{осн}} = f(\theta)$, который является также графиком момента неявнополюсной машины; 2 — график реактивной составляющей $M_p = f(\theta)$; 3 — график результирующего момента явнополюсной машины.

9. Статическая устойчивость и перегрузочная способность синхронной машины.

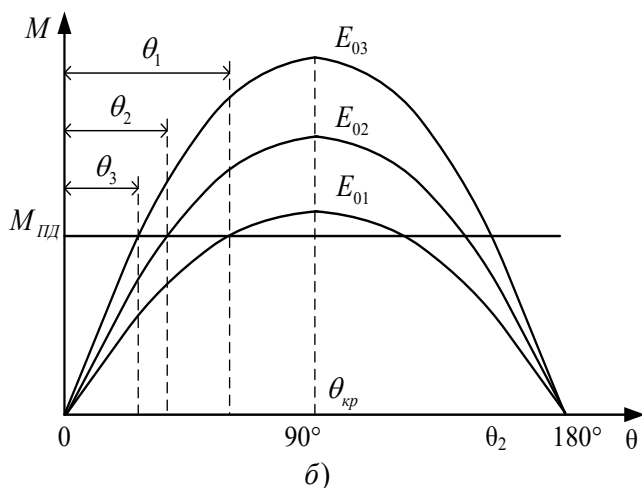
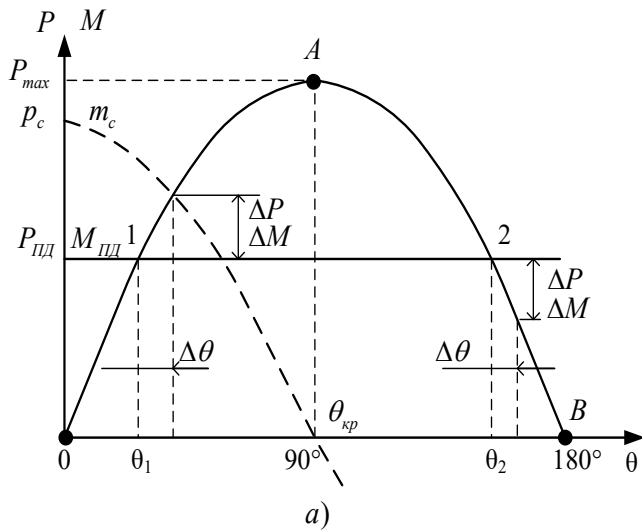


Рис. 5.28. К понятию статической устойчивости и перегрузочной способности синхронной машины

Под статической устойчивостью синхронной машины понимают ее способность восстанавливать прежний режим работы ($n_2 = n_1$) после окончания действия внешних возмущений. Статическая устойчивость обеспечивается только при углах θ , соответствующих $M < M_{\max}$.

На рис. приведены угловые характеристики неявнополусной машины в режиме генератора. Мощность $P_{\text{ПД}}$ и момент $M_{\text{ПД}}$ приводного двигателя от угла нагрузки θ не зависят. Вращающий момент приводного двигателя $M_{\text{ПД}}$ и тормозной момент генератора M уравновешены в точках 1 и 2, однако работа агрегатов в этих точках неодинакова. В результате случайного приращения угла нагрузки $\Delta\theta$ в точке 1 электрическая мощность генератора P превысит мощность приводного двигателя $P_{\text{ПД}}$ на величину ΔP . На валу генератора будет действовать тормозной момент $\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega_1}$, замедляющий вращение ротора генератора.

В результате случайного приращения угла нагрузки $\Delta\theta$ в точке 2 электрическая мощность генератора P будет меньше мощности приводного двигателя $P_{\text{ПД}}$ на величину ΔP , в результате чего ротор получит ускорение, а угол θ возрастет еще больше, в результате чего происходит выпадение генератора из синхронизма с сетью. Выпадение из синхронизма является аварийным режимом, поскольку сопровождается прохождением по обмотке якоря больших токов.

Участок угловой характеристики OA определяет устойчивую область работы синхронного генератора ($0 < \theta < 90_{\text{эл}}^0$), а участок AB — неустойчивую область. Неявнополусная машина имеет $\theta_{\text{кр}} = 90_{\text{эл}}^0$, у явнополусной машины устойчивая область работы меньше, поскольку $\theta_{\text{кр}} = 60 - 80_{\text{эл}}^0$ в зависимости от отношения

моментов $M_{осн}$ и M_p . Критический угол скольжения $\theta_{кр} = \arccos(\sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta)$;

$$\beta = \frac{E_0}{4U_a \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}.$$

Синхронные генераторы, включенные на параллельную работу, обладают синхронизирующей способностью. Физический смысл синхронизирующей способности заключается в электрической связи обмоток статоров синхронных генераторов между собой при параллельной работе в сети в том, что связанными оказываются результирующие магнитные поля генераторов, вращающихся с синхронной скоростью n_1 . Электрическая связь между обмотками статоров параллельно работающих машин переходит в магнитную связь роторов этих машин, аналогичную эластичной механической связи, которая позволяет роторам смещаться друг относительно друга в пределах угла нагрузки $\theta < \theta_{кр}$. Роторы при этом продолжают вращаться с синхронной скоростью. При смещении ротора какой-либо из параллельно работающих машин на угол $\theta > \theta_{кр}$ связь ротора этой машины с роторами других машин нарушается и машина выходит из синхронизма. Для количественной оценки синхронизирующей способности синхронной машины используют понятие удельной синхронизирующей мощности $p_c = \frac{\Delta P}{\Delta \theta}$ и удельного синхронизирующего момента $m_c = \frac{\Delta M}{\Delta \theta}$. Устойчивая работа синхронной машины

соответствует положительным значениям p_c и m_c . Наибольшая синхронизирующая способность у машины при $\theta = 0$, с ростом угла θ синхронизирующая способность снижается и при $\theta = \theta_{кр}$ исчезает ($p_c = 0, m_c = 0$). Синхронизирующей способностью обладают не только синхронные генераторы, но и синхронные двигатели.

Синхронная машина развивает максимальный момент M_{max} и максимальную мощность P_{max} при угле $\theta = \theta_{кр}$. Величина, выражающая запас по моменту (мощности) называется перегрузочной способностью синхронной машины и выражается коэффициентом: $k_m = \frac{M_{max}}{M_H} = \frac{P_{max}}{P_H}$.

$$\text{Для неявнополюсной машины } k_m = \frac{mU_a E_0}{x_c} \cdot \frac{x_c}{mU_a E_0 \sin \theta_H} = \frac{1}{\sin \theta_H} \approx 2,$$

где $\theta_H = 20 - 35^\circ_{эл}$ соответствует номинальному моменту M_H .

Повышения перегрузочной способности синхронной машины можно достичь снижением величин x_d или x_c , увеличивая воздушный зазор δ , поскольку $x_d \sim \frac{1}{\delta}$.

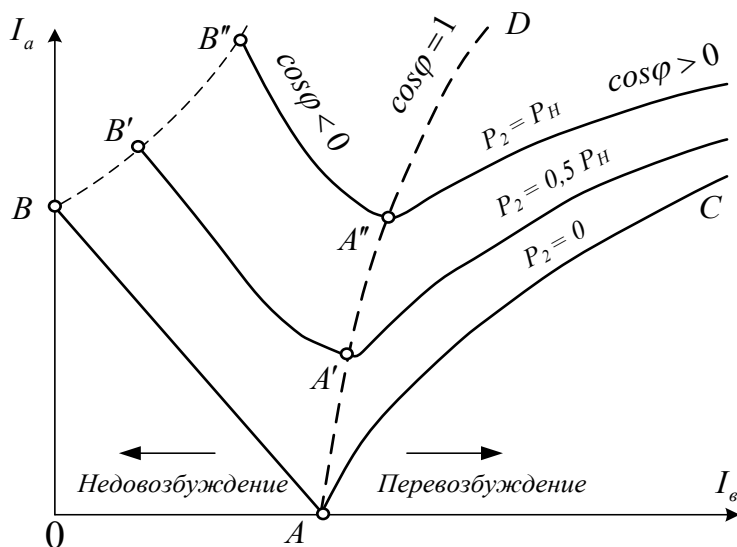
Устойчивость синхронного генератора при заданном значении отдаваемой в сеть активной мощности P зависит от тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения возрастает эдс E_0 , момент M_{max} , увеличивается устойчивость машины. На рис. 6 показано, что при различных возмущениях перевозбужденная синхронная машина ($E_0 > U_a$)

в большей степени способна сохранять устойчивый режим работы, чем недовозбужденная ($E_0 < U_a$) за счет увеличения перегрузочной способности. Электрическая сеть, на которую работают синхронные генераторы, является для них преимущественно активно-индуктивной нагрузкой. Синхронные генераторы должны работать с некоторым перевозбуждением, обеспечивающим повышение перегрузочной способности. При наличии в сети большого числа статических или вращающихся компенсаторов реактивной мощности генератор для поддержания стабильного напряжения в сети должен работать с недовозбуждением. Такой режим неблагоприятен для генератора, т.к. с уменьшением тока возбуждения при заданной активной мощности P возрастает угол θ и снижается перегрузочная способность, определяющая устойчивость машины.

Динамической устойчивостью синхронной машины называется ее способность сохранять синхронный режим работы с сетью при больших возмущениях, например, при коротких замыканиях.

10. U-образные характеристики синхронного генератора

Зависимость тока якоря I_a от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при условии $P = \text{const}$ называется U – образной характеристикой. U-образная характеристика синхронных машин позволяет определить ток возбуждения, при котором для заданной нагрузки ток якоря минимален.



U – образная характеристика синхронного генератора

В точке A генератор работает холостую. Участок AB линейный, поскольку магнитная цепь машины ненасыщена. В этом режиме ток в обмотке якоря является индуктивным по отношению к напряжению сети $U_{\text{с}}$ и емкостным по отношению к напряжению генератора $U_{\text{ген}}$. Возникает размагничивающая реакция якоря, в результате чего $U_{\text{ген}} = \text{const}$. Синхронная машина работает с отстающим коэффициентом мощности ($\cos \varphi < 0$), т.е. в режиме недовозбуждения. Участок AC

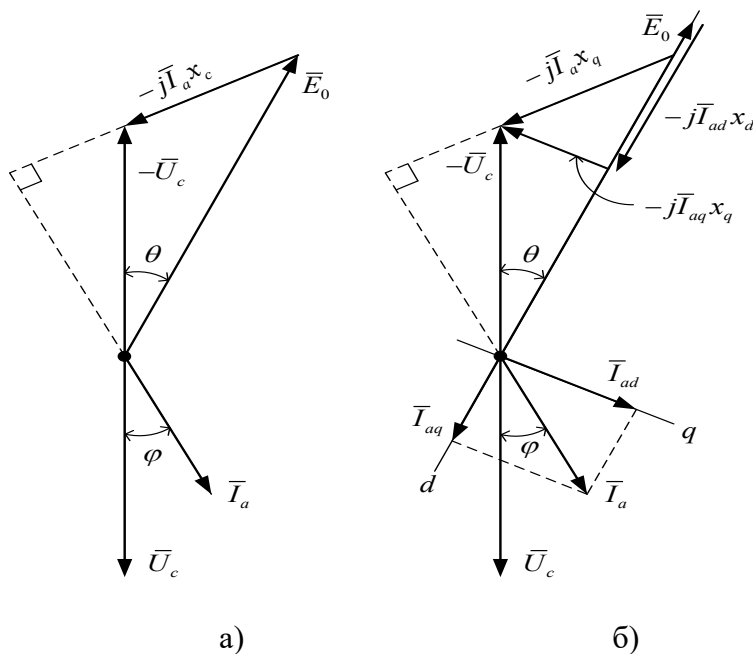
нелинеен, поскольку магнитная цепь насыщена. Ток якоря является емкостным по отношению к напряжению сети и индуктивным по отношению к напряжению генератора. Для соблюдения условия $U_{\text{ген}} = \text{const}$ возникает намагничивающая реакция якоря. Синхронная машина работает с опережающим коэффициентом мощности ($\cos \varphi > 0$), т.е. в режиме перевозбуждения, выполняя роль компенсатора реактивной мощности, что способствует повышению коэффициента мощности в сети. В точках A , A' , A'' ток якоря становится чисто активным ($\cos \varphi = 1$). Участки U – образной характеристики AD , AC и AB представляет собой регулировочные характеристики соответственно при чисто активной, емкостной и индуктивной нагрузках. Совместный анализ угловой, U-образной и регулировочных характеристик синхронного генератора позволяет сделать выводы:

- регулирование активной мощности синхронной машины может идти только путем изменения момента, приложенного к ее валу;
- одновременно с регулированием активной мощности следует изменять ток возбуждения в соответствии с регулировочной характеристикой;
- изменение реактивной мощности производится регулированием тока возбуждения, при этом перевозбужденная машина потребляет из сети индуктивный ток, а недовозбужденная – емкостной;
- потребление из сети индуктивного тока равносильно генерированию в сеть тока емкостного и наоборот.

11. Синхронные двигатели. Конструктивное исполнение. Способы пуска. Механическая характеристика. Векторные диаграммы. Рабочие характеристики.

Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент. При этом машина начинает потреблять из сети активную мощность, приводящую к созданию электромагнитного вращающего момента. Синхронные двигатели по конструкции принципиально не отличаются от синхронных генераторов.

Для неявнополусной и явнополусной машин в двигательном режиме:

$$-\bar{U}_c = \bar{E}_0 - j\bar{I}_a x_c \quad -\bar{U}_c = \bar{E}_0 - j\bar{I}_{ad} x_d - j\bar{I}_{aq} x_q.$$


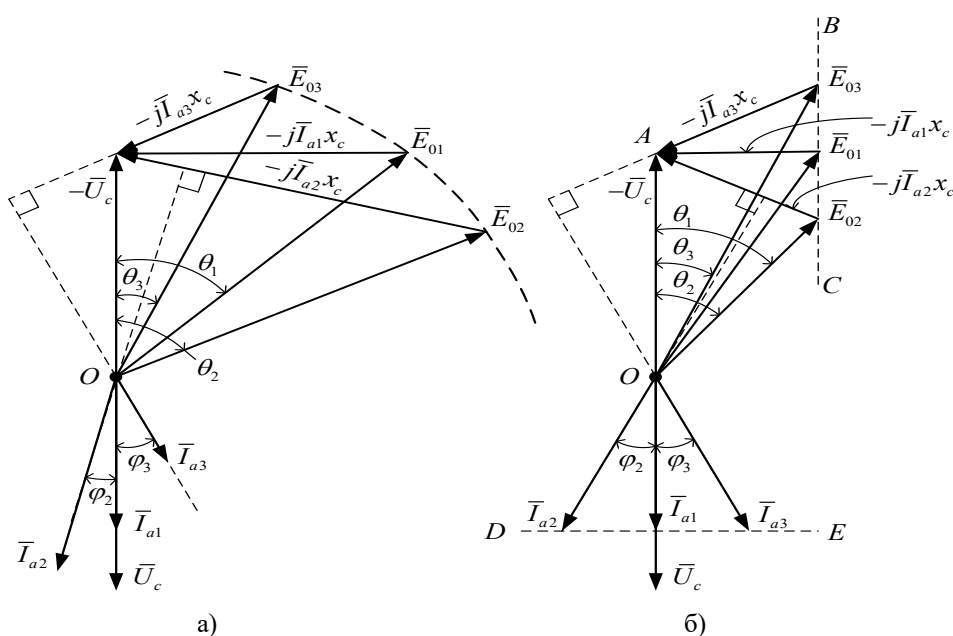
Упрощенные векторные диаграммы синхронного неявнополусного (а) и явнополусного (б) двигателя

Повышение нагрузки приводит к росту угла между векторами \bar{E}_0 и $-\bar{U}_c$ до значения θ_2 . Если нагрузка двигателя уменьшается по сравнению с исходной, то угол θ уменьшается до значения θ_3 . И тогда ток двигателя \bar{I}_{a3} имеет

опережающую реактивную составляющую.

Рассмотрим работу синхронного двигателя при изменении тока возбуждения и постоянном нагрузочном моменте M_c . При уменьшении тока возбуждения эдс \bar{E}_0 снижается до \bar{E}_{02} , угол θ_2 возрастает.

При увеличении тока возбуждения эдс \bar{E}_0 возрастает до величины \bar{E}_{03} , угол $\theta_3 < \theta_1$. При постоянной активной



Упрощенные векторные диаграммы синхронного неявнополусного двигателя при изменении нагрузочного момента на валу M_c (а) и тока

мощности имеет место равенство $I_{a1}\cos\varphi_1 = I_{a2}\cos\varphi_2 = I_{a3}\cos\varphi_3$. Если при неизменной активной мощности изменять ток возбуждения, то будет изменяться только $\cos\varphi$, т.е. реактивная мощность.

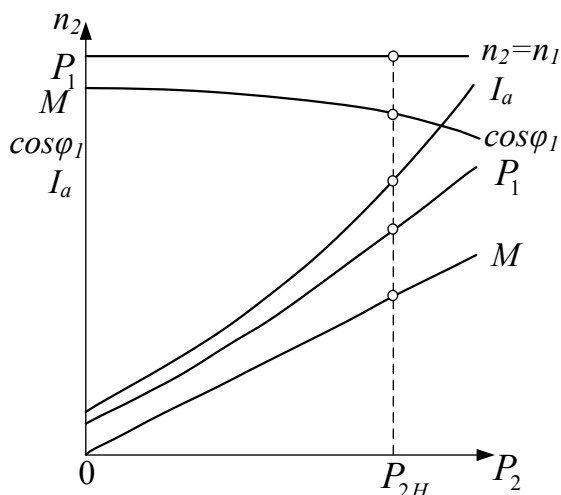
Синхронный двигатель является генератором реактивного тока: в режиме недовозбуждения – индуктивного (ток \bar{I}_a отстает от напряжения сети \bar{U}_c , происходит потребление реактивной мощности из сети), в режиме перевозбуждения – емкостного (ток \bar{I}_a опережает напряжение сети \bar{U}_c , происходит отдача реактивной мощности в сеть).

По своей конструкции синхронные двигатели практически не отличаются от синхронных генераторов. Они преимущественно выполняются явнополюсными и имеют меньший воздушный зазор, что способствует снижению пускового тока.

Пуск синхронного двигателя путем непосредственного включения в сеть невозможен. Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести ротор во вращение с частотой, близкой к частоте вращения поля статора. В этих условиях поле статора медленно перемещается относительно полюсов вращающегося ротора, что при подключении обмотки возбуждения к источнику питания между магнитными системами ротора и статора устанавливается магнитная связь. Она обеспечивает возникновение синхронного электромагнитного момента, под действием которого ротор начинает вращаться с синхронной частотой, т.е. втягивается в синхронизм.

Пуск синхронных двигателей проводится преимущественно асинхронным способом. Обмотка статора включается в трехфазную сеть. Вращающееся магнитное поле наводит в пусковой обмотке эдс. По стержням обмотки протекают токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем статора на каждый стержень ротора действует электромагнитная сила \bar{F}_A . Совокупность таких сил создает на роторе асинхронный электромагнитный момент M_a . Под действием M_a ротор начинает вращаться в ту же сторону, что и поле статора. После разгона ротора до подсинхронной частоты вращения ($n_2 \approx 0,95n_1$) обмотку возбуждения подключают к источнику питания. При этом образуется синхронный момент и двигатель втягивается в синхронизм с сетью. В пусковой обмотке ротора больше не наводится эдс, асинхронный момент $M_a = 0$. Пусковая обмотка при синхронном вращении ротора выполняет роль успокоительной обмотки, ограничивая возможные колебания (качания) ротора. На неявнополюсном роторе короткозамкнутая пусковая обмотка не может быть размещена. Ее роль играет обмотка возбуждения, замкнутая на гасящий резистор.

При асинхронном пуске синхронного двигателя возникает большой пусковой ток. Прямой пуск применяется в мощных сетях, если это не вызовет значительных просадок напряжения. Если сеть не достаточно мощная, то применяются реакторный, трансформаторный (автотрансформаторный) способы пуска. В настоящее время применяется на производстве частотный пуск синхронных двигателей.

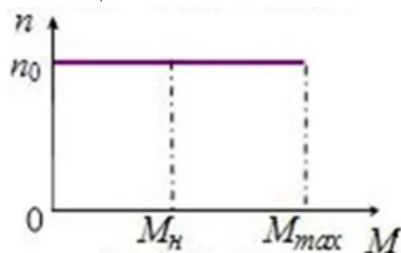


Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочие характеристики синхронного двигателя являются зависимостями частоты вращения ротора n_2 , потребляемой мощности P_1 , полезного момента M , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока в обмотке статора I_a от полезной мощности P_2 . Рабочие характеристики получаются при условиях $U_a = \text{const} = U_{aH}$, $f_1 = \text{const} = f_{1H}$ и $I_B = \text{const}$.

Полезный момент на валу $M = \frac{P_2}{\omega_1}$ имеет линейную зависимость; зависимость $P_1 = f(P_2)$

нелинейная. Ток двигателя I_a при холостом ходе практически реактивный. По мере роста нагрузки возрастает активная составляющая тока I_a и его зависимость от мощности P_2 является нелинейной.



Итак, при угле $\Theta < \pi/2$ механическая характеристика СД $n_0 = f(M)$ абсолютно жесткая (рис.11). Она представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс. Такая зависимость определяется характерной особенностью СД: их ротор может вращаться только с синхронной частотой $n_0 = 60f_1/p$.

12. Синхронные компенсаторы.

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, который работает без нагрузки на валу. Он служит для генерирования реактивной мощности, которая необходима для работы различных приемников электроэнергии (асинхронных двигателей, трансформаторов и т.д.). Синхронный компенсатор применяется в режимах повышения коэффициента мощности и стабилизации напряжения в сети.

Если генераторы электростанций и линии электропередачи загружены отстающим реактивным током, то синхронный компенсатор работает в режиме перевозбуждения. После подключения параллельно нагрузке Z перевозбужденного синхронного компенсатора $СК$ с опережающим реактивным током \bar{I}_K в цепи возникает ток $\bar{I}_c = \bar{I}_Z + \bar{I}_K$. Угол φ_c между векторами \bar{U}_c и \bar{I}_c будет значительно меньше угла φ_Z . Величина тока в сети будет меньше ($I_c < I_Z$). Генераторы электростанций и линии электропередачи разгружаются, потери энергии уменьшаются. Мощность синхронного компенсатора определяется величиной реактивной мощности, которую он должен компенсировать. Реактивная мощность компенсатора $Q_K = mU_c I_K$ отличается от его полной мощности S_K на величину потерь. Эти потери близки к потерям холостого хода P_0 . Активная мощность, потребляемая из сети, идет на покрытие потерь в компенсаторе. Номинальной мощностью синхронного компенсатора является мощность при перевозбуждении, поскольку при опережающем токе наблюдается повышенный нагрев его обмоток.

В режиме стабилизации напряжения ток возбуждения синхронного компенсатора устанавливается постоянным. При этом значение эдс E_0 равняется номинальному напряжению сети $U_{сн}$. Падение напряжения в сети $\Delta U \approx I_c R_c \cos \varphi_c + I_c X_c \sin \varphi_c$, где R_c и X_c – активное и индуктивное сопротивление сети.

Если напряжение в сети несколько понижается из-за возрастания тока нагрузки и становится меньше номинального, то компенсатор работает в режиме перевозбуждения. Он забирает из сети реактивный опережающий ток \bar{I}_a . Падение напряжения в сети уменьшится на величину $I_a X_c$. При малых нагрузках под влиянием емкостных сопротивлений линии напряжение у потребителей может быть выше, чем на подстанции. Для стабилизации напряжения в сети компенсатор работает в режиме недовозбуждения и загружает сеть реактивным отстающим током \bar{I}_a . Падение напряжения в сети увеличится на величину $I_a X_c$. Недостатком данного метода стабилизации напряжения является, то, что синхронный компенсатор загружает линию реактивным током. Это увеличивает потери в ней [9].

Синхронные компенсаторы не развивают активной мощности. В связи с этим отпадает необходимость в решении вопросов об их статической устойчивости при работе в сети и перегрузочной способности. Поэтому компенсаторы выполняются с меньшим воздушным зазором, чем синхронные генераторы и двигатели.

14. Шаговые двигатели.

Шаговый электродвигатель — это синхронный бесщеточный двигатель постоянного тока с несколькими обмотками, способный делить полный оборот на несколько одинаковых шагов.

При приложении напряжения к клеммам, щетки на самом шаговом двигателе начинают постоянно двигаться. Движок холостого хода при этом преобразовывает входящие импульсы, имеющие преимущественно прямоугольную направленность, в заранее обозначенное положение приложенного ведущего вала.

Каждый из входящих импульсом способен переместить вал под определенным углом. Внешняя цепь управления возбуждает электромагнит. При необходимости повернуть вал двигателя, тот электромагнит, к которому приложена энергия, притягивает к себе зубья колеса. Когда они выравниваются по отношению к электромагниту, они смещены по отношению к последующей магнитной части двигателя.

Первый электромагнит выключается, а затем включается второй, после чего начинает вращаться шестеренка, выравниваясь при этом с предыдущим колесом. Затем такое действие повторяется необходимое количество раз. Каждое из таких вращений называют постоянным шагом, при этом скорость вращения шагового двигателя можно вычислить при подсчете количества шагов, нужных для полного его оборота.

Шаговые двигатели подразделяются на:

- с наличием постоянного магнита;
- синхронный гибридный привод;
- переменный двигатель.

15. Синхронная машина с постоянными магнитами.

Синхронные машины с постоянными магнитами не имеют обмотки возбуждения на роторе, а возбуждающий магнитный поток у них создается постоянными магнитами, расположенными на роторе. Статор этих машин обычной конструкции с двух- или трехфазной обмоткой.

Применяют эти машины чаще всего в качестве двигателей небольшой мощности. Синхронные генераторы с постоянными магнитами применяют реже, главным образом в качестве автономно работающих генераторов повышенной частоты, малой и средней мощности.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами бывают: с радиальным и аксиальным расположением постоянных магнитов.

При радиальном расположении постоянных магнитов пакет ротора с пусковой клеткой, выполненный в виде полого цилиндра, закрепляют на наружной поверхности явно выраженных полюсов постоянного магнита. В цилиндре делают межполюсные прорезы, предотвращающие замыкание потока постоянного магнита в этом цилиндре.

При аксиальном расположении магнитов конструкция ротора аналогична конструкции ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя. К торцам этого ротора прижаты кольцевые постоянные магниты.

Поле постоянного магнита в процессе разгона ротора наводит в обмотке статора ЭДС E_{1n} , частота которой увеличивается пропорционально частоте вращения ротора. Эта ЭДС наводит в обмотке статора ток, взаимодействующий с полем постоянных магнитов и создающий *тормозной* момент M_T , направленный встречно вращению ротора. Таким образом, при разгоне двигателя с постоянными магнитами на его ротор действуют два асинхронных момента: вращающий M_a (от тока I_1 , поступающего в обмотку статора из сети) и тормозной M_T (от тока I_{1n} , наведенного в обмотке статора полем постоянного магнита).

16. Вентильные двигатели.

- бесконтактный двигатель постоянного тока, в котором щеточный аппарат заменен полупроводниковым коммутатором, якорь неподвижен, ротор представляет собой постоянный магнит.

Под вентильным двигателем понимают систему регулируемого электропривода, состоящую из электродвигателя переменного тока, конструктивно подобного синхронной машине, вентильного преобразователя и устройств управления, обеспечивающих коммутацию цепей обмоток электродвигателя в зависимости от положения ротора двигателя.

Этот тип электромотора имеет стандартную конструкцию. Она состоит из ротора, роль которого выполняет магнитный диск, статоров и подшипников. Все детали заключены в прочный корпус. Статор ВД аналогичен тому, что используется в асинхронных приборах. Основным его элементом выступает стальной сердечник, по периметру которого располагается обмотка из меди.

Вентильные двигатели бывают 3 видов: синхронный, асинхронный и индукторный.

17. Вентильно-индукторные двигатели.

Вентильно-индукторный двигатель — это устройство, в котором предусмотрено переключающееся магнитное сопротивление. В нем преобразование энергии происходит за счет изменения индуктивности обмоток, которые располагаются на явно выраженных зубцах статора при передвижении зубчатого магнитного ротора. Питание устройство получает от электрического преобразователя, поочередно переключающего обмотки двигателя в строгости по перемещению ротора.

У индукторной машины (ИМ) магнитная индукция в каждой точке рабочего зазора изменяется только по величине, а ее направление остается постоянным. Отсюда следует, что индукция в зазоре индукторных машин имеет пульсирующий характер и содержит переменную (рабочую) и постоянную (нерабочую) составляющие.

Статор и ротор электрической машины выполнены шихтованными явнополусными, причем число полюсов статора и ротора неодинаково: 6/4, 8/6 и т.д. На статоре расположены сосредоточенные обмотки (катушки), соединенные через электронный коммутатор с источником питания постоянного тока (выпрямитель, аккумулятор).

Электромеханическое преобразование энергии (создание момента) в таком приводе основано на принудительном изменении магнитного сопротивления R_M по угловой координате машины q за счет переключения токов в катушках статора.

Изменение магнитного сопротивления обуславливает создание момента

$$M = -\Phi^2 \frac{dR_M}{d\theta}.$$