

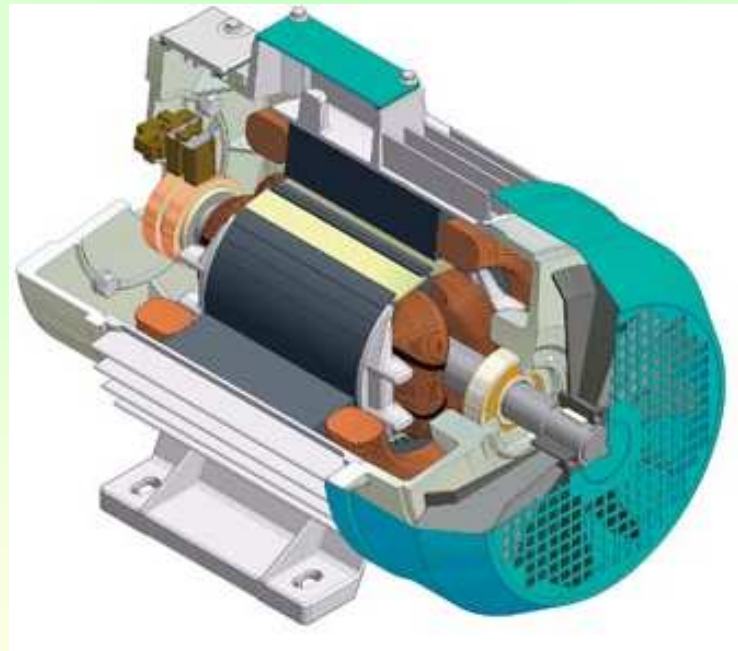
Лекция №8

Синхронные машины

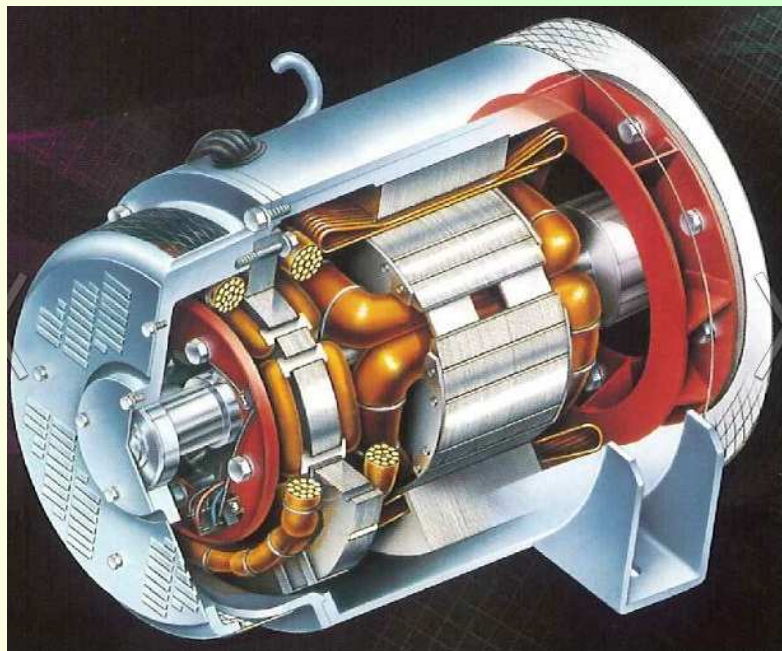
© 2014 Томский политехнический университет, кафедра ЭСиЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

Синхронные машины – это электрические машины переменного тока, в которых ротор и магнитное поле токов статора вращаются синхронно.



Могут работать в режимах **генератора** и **двигателя**. В настоящее время основными источниками электроэнергии остаются синхронные генераторы на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях.



Устройство трехфазной СМ

Основные части: статор и ротор, причем статор (как у АМ).

Сердечник статора собран из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали и укреплен внутри массивного корпуса. В пазах с внутренней стороны статора размещена обмотка переменного тока, в большинстве случаев трехфазная.

Ротор представляет собой явнополюсной или неявнополюсной электромагнит. Ток в обмотку ротора поступает через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока – возбuditеля (самовозбуждающийся ГПТ, установленный на валу СГ) . Его мощность составляет 1–3% мощности СГ.

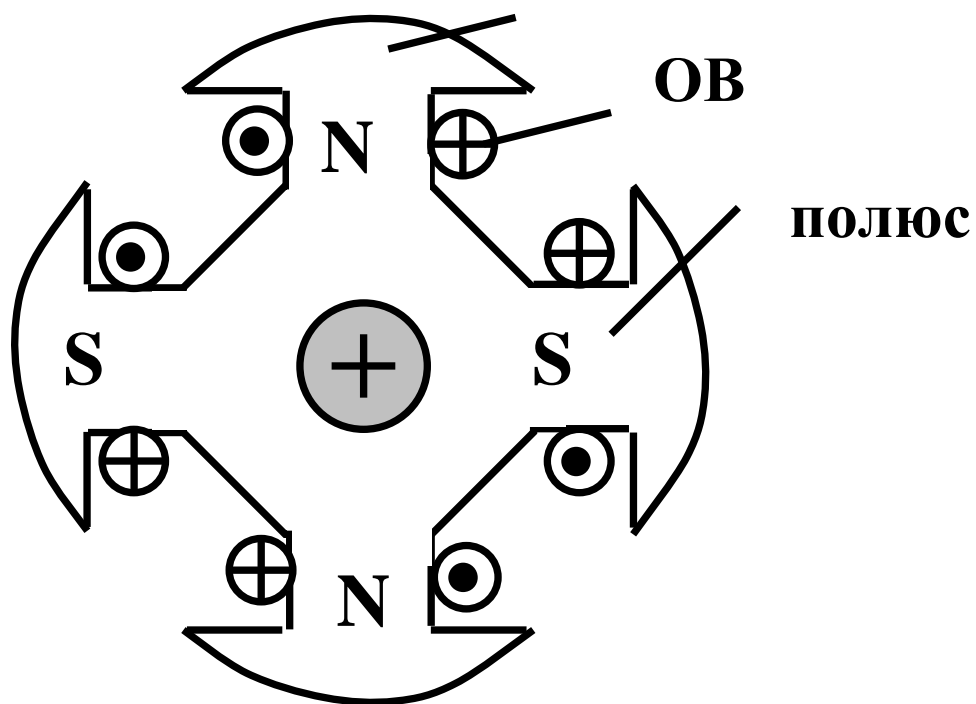
С увеличением единичной мощности СГ возбuditель с коллектором стал ненадежным (истираются щетки, возрастает опасность искрения на коллекторе), поэтому в последнее время все большее применение находят вентильные системы возбуждения с диодами и тиристорами.

У многополюсной СМ ротор имеет p пар полюсов, а токи в обмотке статора образуют тоже p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как АМ). Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная частота вращения

$$\mathbf{n} = \frac{60f}{p}$$

Явнополюсной ротор

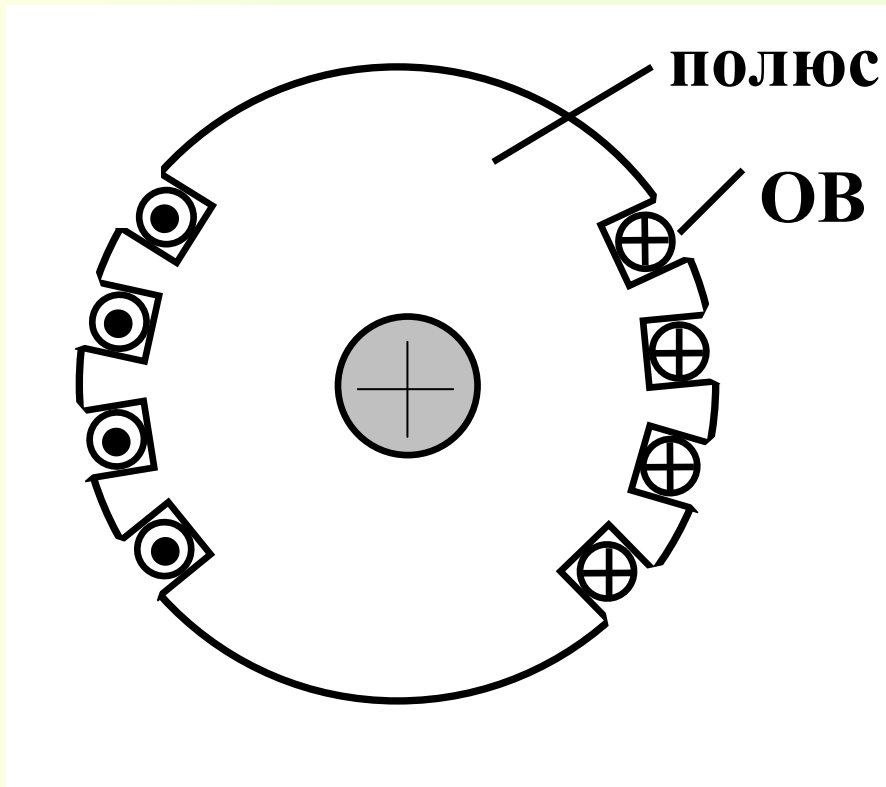
полюсной наконечник



Применяются в СМ с
большим числом
полюсов и
соответственно
относительно низкой n .

Такие роторы имеют СГ, предназначенные для непосредственного соединения с гидравлическими турбинами на ГЭС (гидрогенераторы). Гидравлическая турбина вращается относительно медленно, поэтому частота вращения гидрогенераторов от 60 до нескольких сотен оборотов в минуту, чему соответствует несколько десятков пар полюсов. Самые мощные гидрогенераторы имеют диаметр ротора около 12 м при относительно небольшой длине – 2,5 м, число полюсов – 42 и частоту вращения 143 об/мин.

Неявнополюсной ротор



Изготавливается из массивной стальной поковки – “бочки”. Обмотка постоянного тока укрепляется в пазах, выфрезированных в роторе по всей его длине.

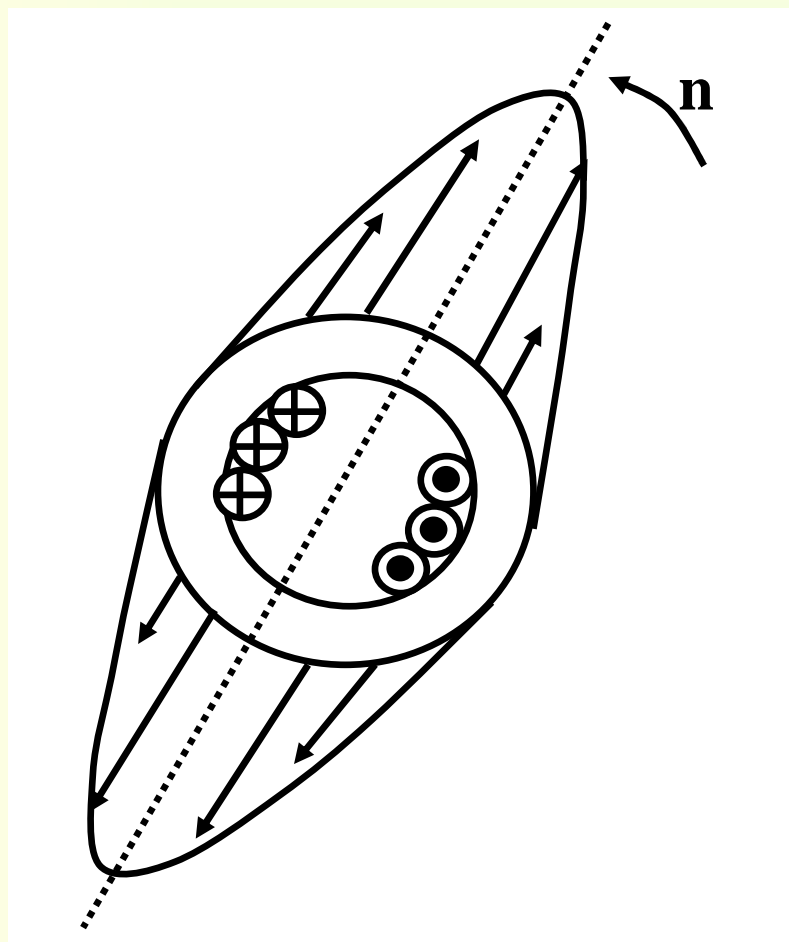
По условиям механической прочности диаметр ротора при $n=3000$ об/мин не должен превышать 1,2 – 1,3 м, а активная длина ротора должна быть не более 6,5 м.

Применяются в СМ большой мощности до 500 000 кВА в одной машине, имеющих одну или две пары полюсов и соответственно частоту вращения 3000 или 1500 об/мин. Это СГ, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами на ТЭС и АЭС (турбогенераторы).



Режимы работы СМ

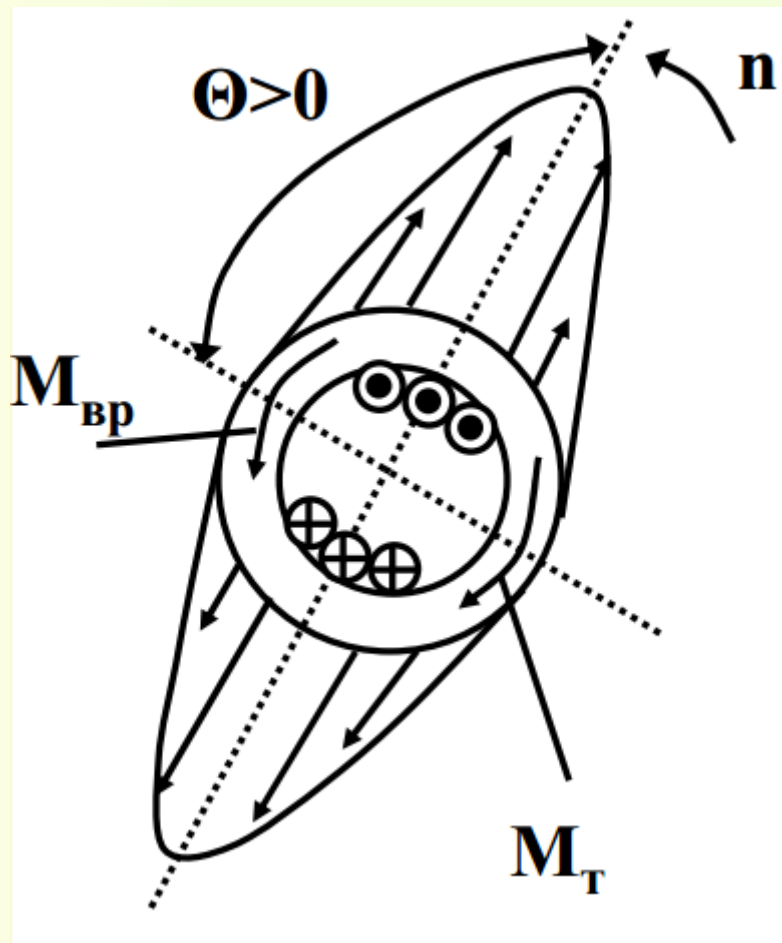
Режим работы определяется взаимодействием магнитных полей, создаваемых токами в обмотках статора и ротора. СМ переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающийся (генератор) или тормозной (двигатель) момент.



На обмотку статора подается симметричная система токов и в машине создается вращающееся магнитное поле. В ОВ протекают постоянные токи. Если пренебречь всеми видами потерь энергии в СМ, то при отсутствии момента на валу (режим холостого хода), ось полюсов ротора будет совпадать с осью полюсов статора.

Режим генератора

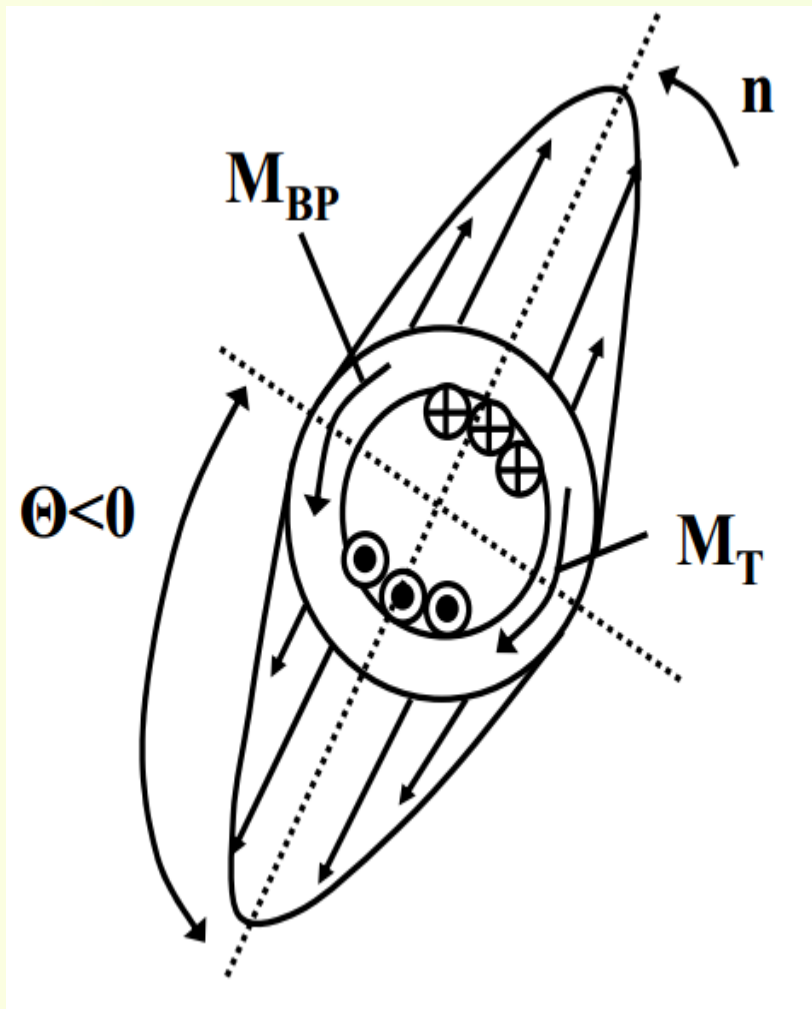
Увеличиваем $M_{вр}$, приложенный двигателем к валу машины. Тогда ось магнитных полюсов ротора повернется на некоторый угол θ относительно оси полюсов статора в направлении вращения. При этом результирующее магнитное поле, создаваемое наложением магнитных полей статора и ротора, изменится, следовательно ток в обмотках статора также изменится.



Взаимодействие тока статора с магнитным полем ротора создает тормозной момент M_T , действующий на ротор. Это и означает преобразование энергии механического движения первичного двигателя в электрическую энергию генератора.

Режим двигателя

Если приложить к валу машины вместо $M_{вр}$ тормозной момент механической нагрузки, то ось полюсов ротора повернется на некоторый угол θ (угол нагрузки) относительно оси полюсов статора против направления вращения. Вновь изменятся токи в обмотках статора и возникнут электромагнитные силы взаимодействия токов обмоток статора и магнитного поля ротора, но на этот раз эти силы будут стремиться увлечь ротор в направлении вращения.



Электромагнитные силы создадут теперь M_{BR} . Электрическая энергия сети будет преобразовываться в механическую энергию на валу машины, т.е. синхронная машина перейдет в режим двигателя.

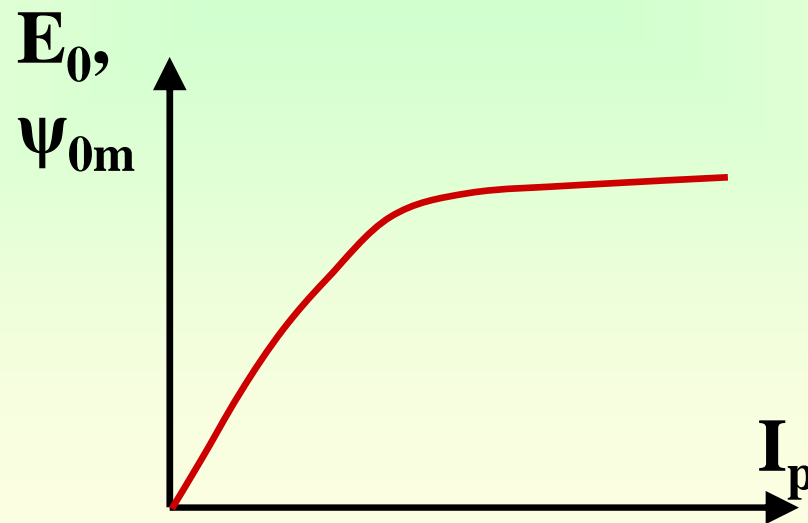
Уравнение электрического состояния фазы СГ

В СМ существует магнитное поле возбуждения и магнитное поле токов статора. Каждое из них индуцирует в обмотке статора ЭДС. Примем, что магнитная цепь машины не насыщена, тогда магнитные поля можно считать независимыми и использовать принцип наложения.

Ток возбуждения (ротора) создает основное магнитное поле и потокосцепление $\psi_0(t)$ индуцирует в фазной обмотки статора $e_0(t)$

$$E_0 = 4,44f\psi_{0m}$$

Характеристика ХХ аналогична В(Н)



Токи обмотки статора создают вращающееся магнитное поле и потокосцепление этого поля $\psi_a(t)$ наводит в фазе обмотки статора $e_a(t)$

Результирующая ЭДС статорной обмотки

$$\mathbf{e}_{\text{рез}} = \mathbf{e}_0 + \mathbf{e}_a$$

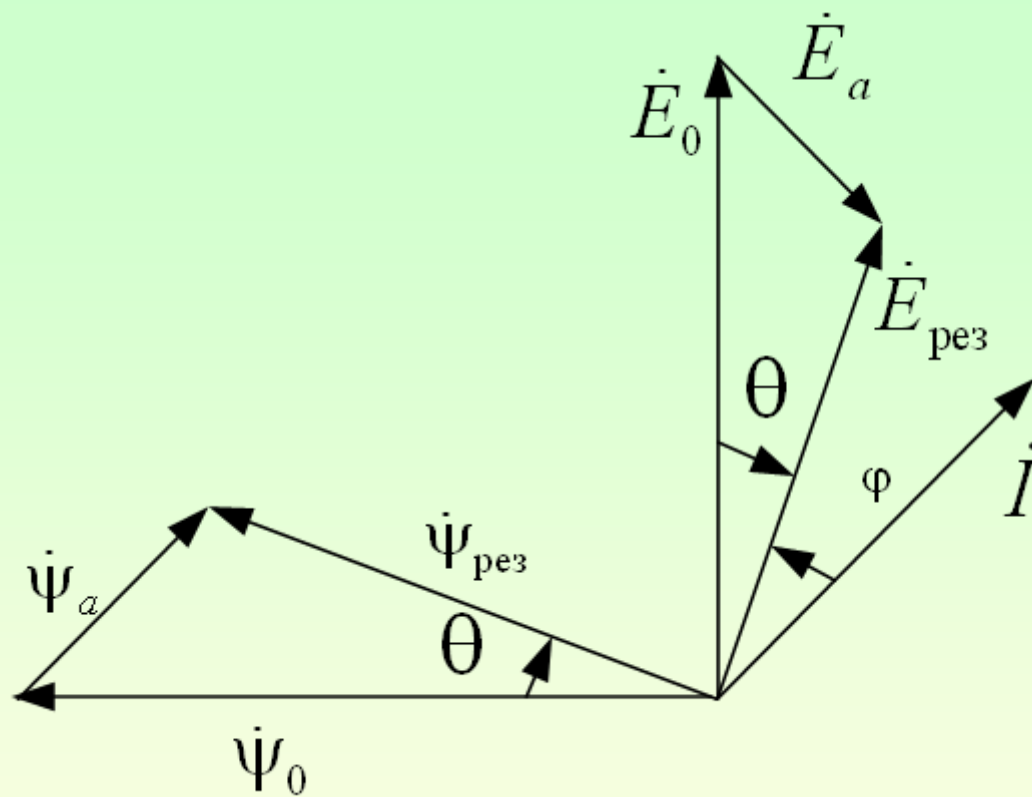
или в комплексной форме

$$\dot{\mathbf{E}}_{\text{рез}} = \dot{\mathbf{E}}_0 + \dot{\mathbf{E}}_a$$

Эта ЭДС определяется результирующим потокосцеплением

$$\dot{\Psi}_{\text{рез}} = \dot{\Psi}_0 + \dot{\Psi}_a$$

Векторная диаграмма



$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = U + \dot{I}R,$$

где U – напряжение фазы обмотки статора;

$\dot{I}R$ – падение напряжения в активном сопротивлении

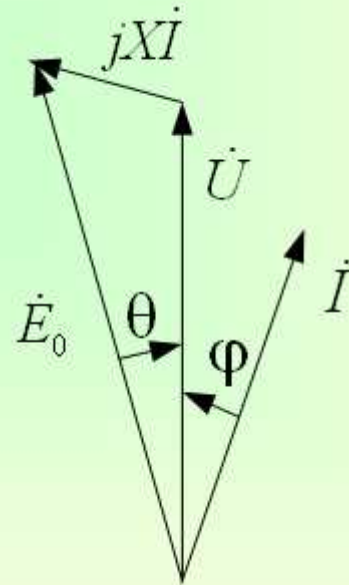
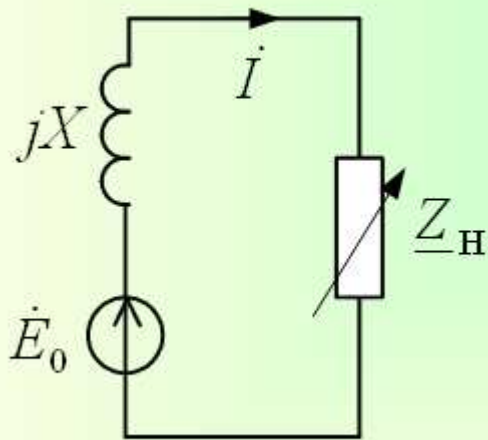
$$\dot{E}_a = -jXI$$

X – синхронное индуктивное сопротивление

$$R \ll X$$

$$\dot{E}_0 = U + jXI$$

СГ – это источник ЭДС, внутреннее сопротивление которого имеет индуктивный характер

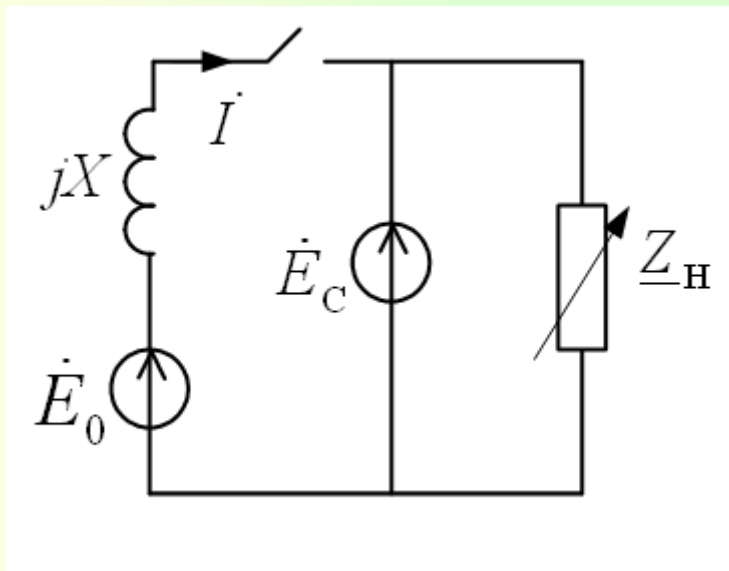


Синхронизация и включение генератора на параллельную работу

Энергосистема – множество электростанций и потребителей, объединенных общей электрической сетью.

Для рассмотрения работы отдельного СГ нужно заменить множество параллельно включенных генераторов системы одним ЭГ, внутреннее сопротивление которого мало, а мощность – велика.

Схема замещения



Изменение рабочих режимов СГ не может влиять на напряжение и частоту сети, так как они поддерживаются в сети постоянными.

При включении генератора на параллельную работу с другими генераторами необходимо избегать бросков тока в статорной цепи и возникновения ударных электромагнитных моментов на валу, способных вызвать повреждение генератора и другого оборудования, а также нарушить работу энергосистемы. Чтобы этого не происходило необходимо определенным образом отрегулировать режим работы генератора на холостом ходу и в определенный момент времени включить генератор в сеть. Совокупность этих действий называется *синхронизацией генератора*.

Чтобы синхронизировать генератор с сетью, необходимо обеспечить:

- **Равенство ЭДС E_0 генератора и напряжения сети U .**
- **Равенство частот напряжений генератора f_G и сети f_C .**
- **Совпадение по фазе напряжений генератора и сети.**
- **Одинаковый порядок чередования фаз генератора и сети.**

Равенства $E_0 = U$ добиваются путем регулирования тока возбуждения СГ. Изменение частоты и фазы напряжения генератора достигается изменением частоты вращения турбины.

Выполнение первого условия проверяют по вольтметрам, подключенным к сети и выводам генератора. Остальные условия проверяют с помощью автоматики.

Угловые характеристики СГ

Рассмотрим особенности работы СГ параллельно с сетью бесконечной мощности

$$U_c = \text{const}, f_c = \text{const}$$

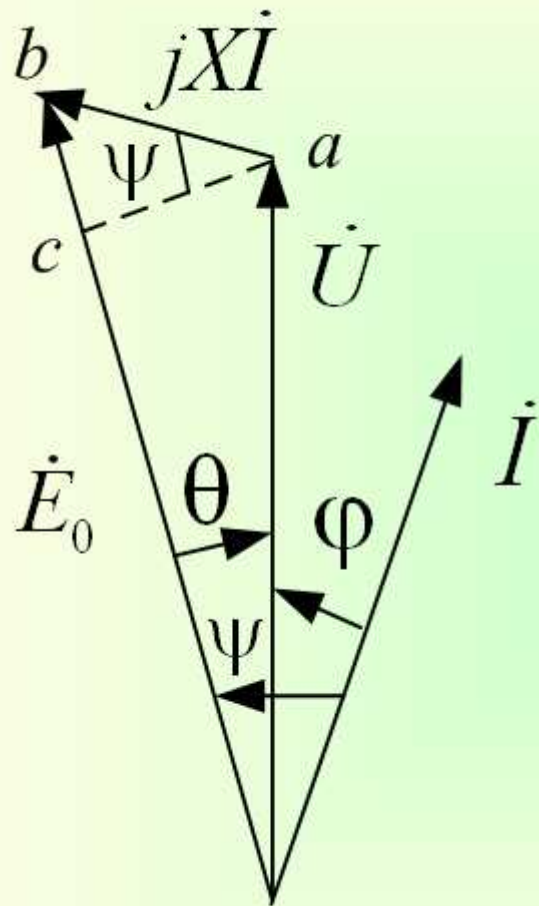
Активная мощность СГ

$$P = 3UI \cos \varphi$$

Электромагнитная мощность $P_{ЭМ}$ больше полезной активной мощности P на относительно малую мощность электрических потерь в обмотке статора. Пренебрегая этими потерями, получим

$$P \approx P_{ЭМ} = 3E_0 I \cos \psi$$

Выразим активную мощность через угол рассогласования



$$\cos \psi = \frac{ac}{ab} = \frac{U \sin \theta}{XI}$$

$$P = \frac{3E_0 U}{X} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta$$

где

$$P_{\max} = \frac{3E_0 U}{X}$$

Электромагнитный момент, создаваемый СМ

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{3E_0 U}{X\Omega_1} \sin \theta = M_{\text{max}} \sin \theta,$$

где

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n}{60} - \text{угловая скорость магнитного поля статора,}$$

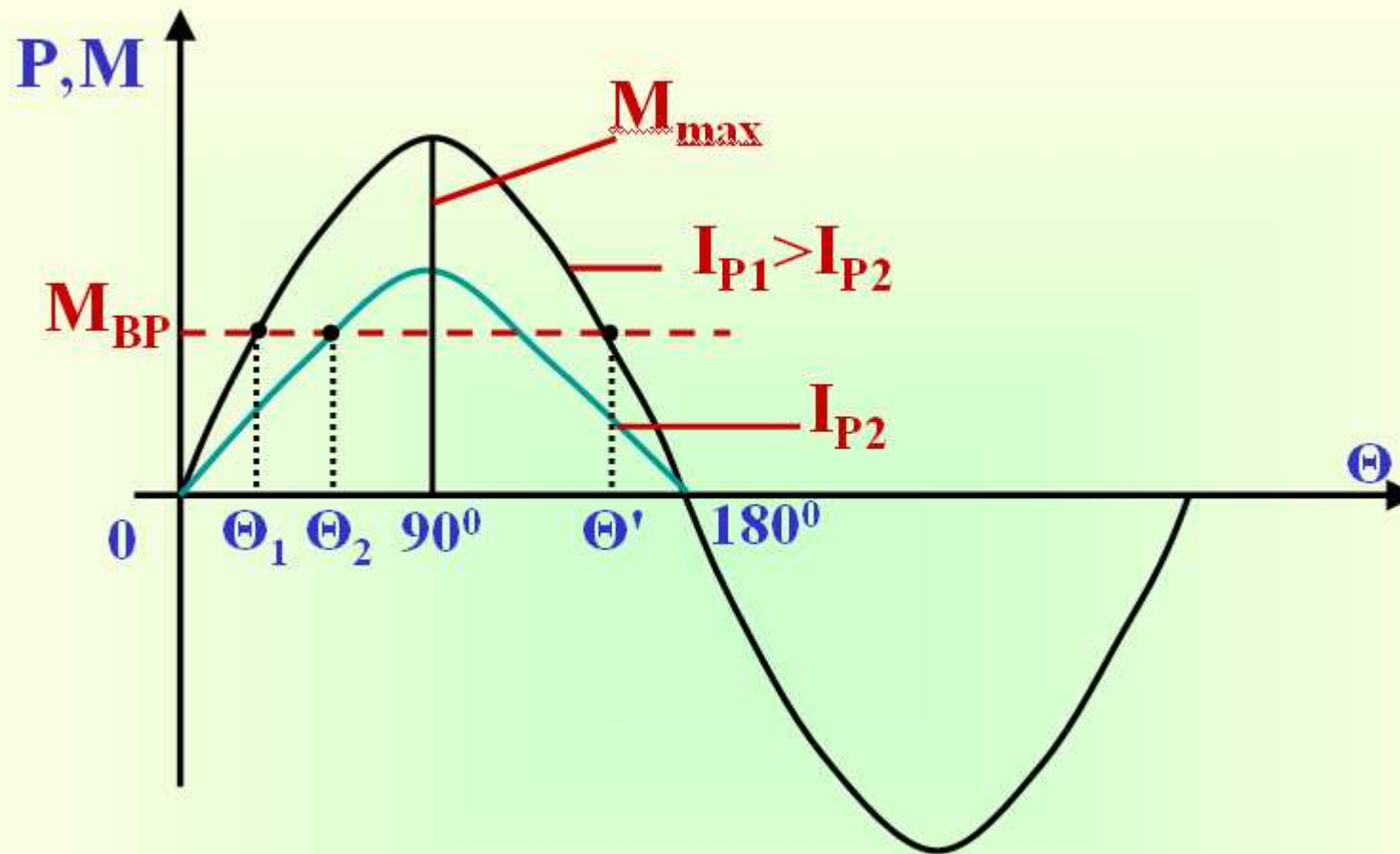
$$M_{\text{max}} = \frac{3E_0 U}{X\Omega_1}.$$

Так как угловая частота постоянна, то $M \sim P$.
Активная мощность и электромагнитный момент пропорциональны ЭДС и синусу угла рассогласования θ

$$P = \frac{3E_0 U}{X} \sin \theta = P_{\max} \sin \theta$$

$$M_{\text{эм}} = \frac{3E_0 U}{X\Omega_1} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta,$$

Эти зависимости представляют собой аналитическое выражение *угловой характеристики* синхронной машины.



Чем больше момент турбины, тем больше активная мощность, отдаваемая генератором в сеть. Мощность максимальна при $\theta=90^\circ$.

Активная мощность генератора на электростанции регулируется моментом турбины или другого первичного двигателя и не зависит от сопротивления электрических приемников в сети.

Синхронизм генератора существует, пока $M_{вр} = M_T$.

При $0 \leq \theta < 90^\circ$ генератор имеет синхронную частоту вращения и работает устойчиво.

$$M_{\text{ВР}} \uparrow \Rightarrow \theta \uparrow \Rightarrow M_{\text{Т}} \uparrow \Rightarrow M_{\text{ВР}} = M_{\text{Т}}$$

При этом увеличатся ток статора I , активная мощность P , но частота вращения ротора останется постоянной.

Амплитудное значение электромагнитного момента (или мощности) называют пределом статической устойчивости СМ в синхронизме.

Для обеспечения динамической устойчивости допускается работа СМ при угле рассогласования, не превышающем 30° при номинальной мощности.

«Выпадению» из синхронизма предшествует неустойчивое состояние: неравномерное возрастание угла θ до 90° , 180° , 360° и т.д., т.е. «проворачивание» ротора относительно магнитного поля токов статора и чередование режимов генератор-двигатель-генератор, броски тока статора достигают значений, соответствующих при $\theta=180^\circ$ двойному току короткого замыкания. Это состояние является аварийным.

Выходы из аварийного состояния:

- **отключить генератор от сети ;**
- **стремиться удержать его в синхронизме, «форсируя», т.е. резко увеличивая ток возбуждения ротора (усиливаем магнитное поле и максимальный электромагнитный момент генератора возрастает).**