

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

Работают в режимах генератора и двигателя. Являются основными источниками электроэнергии (СГ на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях).

Трехфазные СГ – самые мощные электрические машины. Единичная мощность - СГ, на ГЭС - 640 МВт, а на ТЭС – 8 ÷ 1200 МВт; СД достигает нескольких десятков мегаватт.

Устройство трехфазной СМ

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

Ротор - 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 мощности СГ возбудитель с коллектором стал ненадежным, 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 p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как АМ). Ротор должен вращаться с частотой, равной частоте вращения поля:

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

Явнополюсной ротор

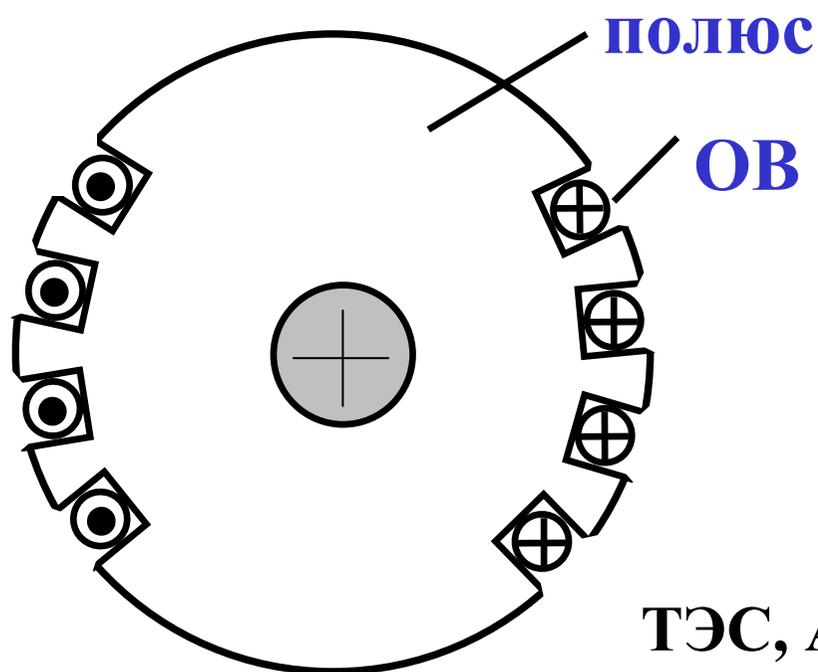


Применяются в СМ с большим числом полюсов и соответственно относительно низкой n .

ГЭС (гидрогенераторы).

частота вращения от 60 до нескольких сотен об/мин (несколько десятков пар полюсов). Самые мощные гидрогенераторы имеют диаметр ротора около 12 м при длине – 2,5 м, число полюсов – 42 и частоту вращения 143 об/мин.

Неявнополюсной ротор



Стальной поковка – “бочка”.
Обмотка постоянного тока укрепляется в пазах ротора.
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.

ТЭС, АЭС (турбогенераторы)

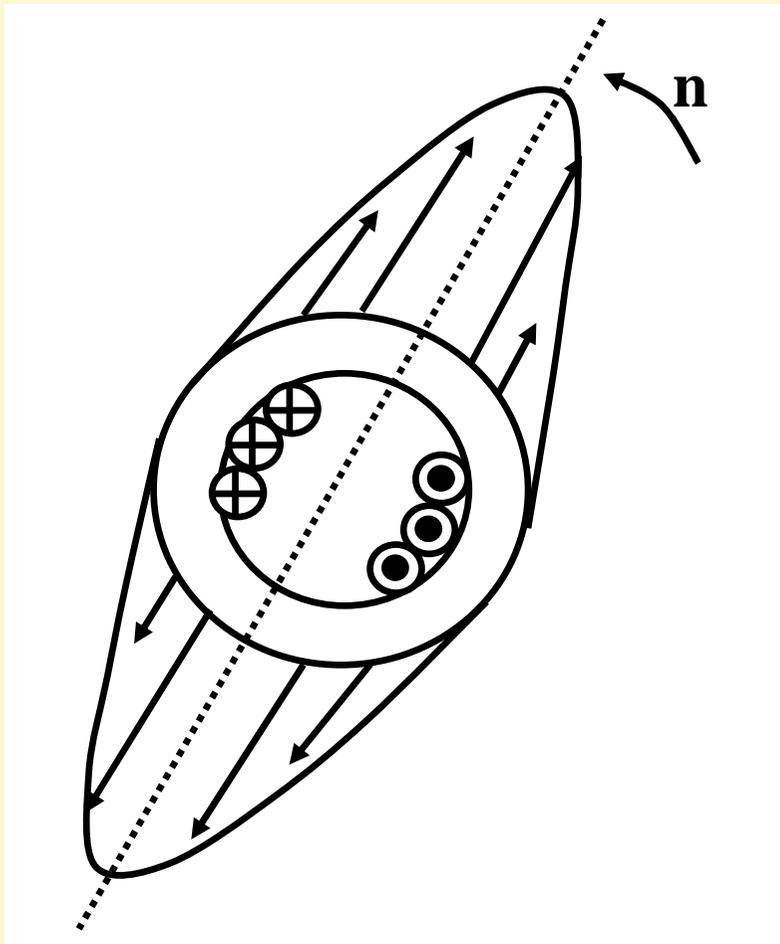
$S=500\ 000$ кВА в одной машине

$n=3000$ или 1500 об/мин (1 или 2 пары полюсов).



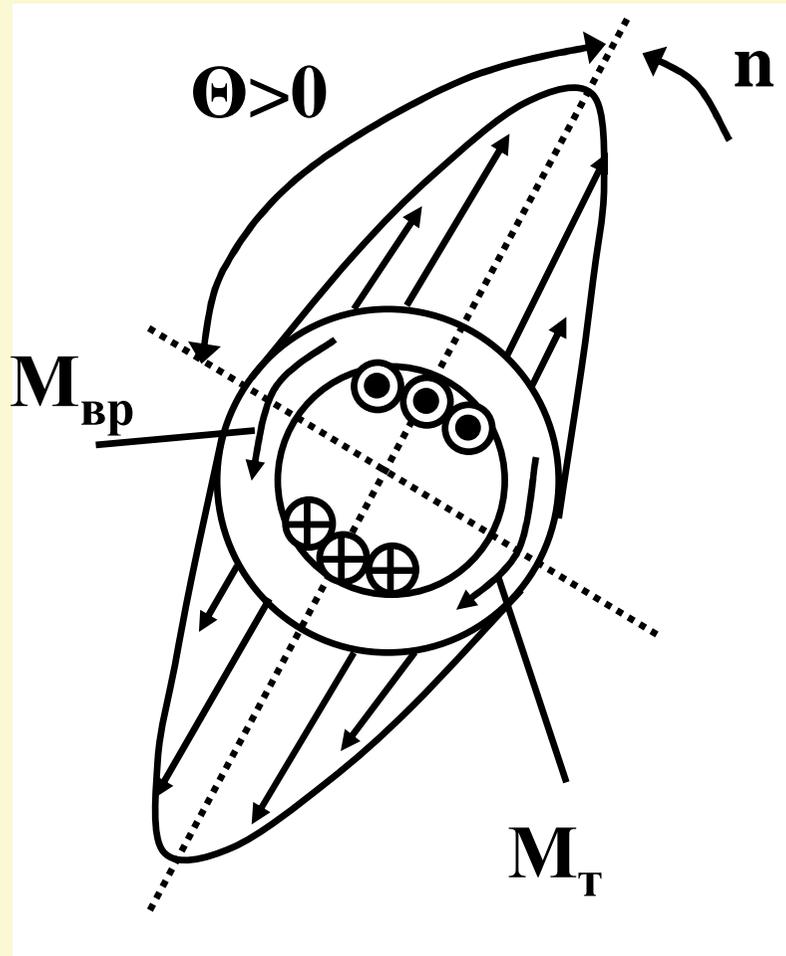
Режимы работы СМ

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



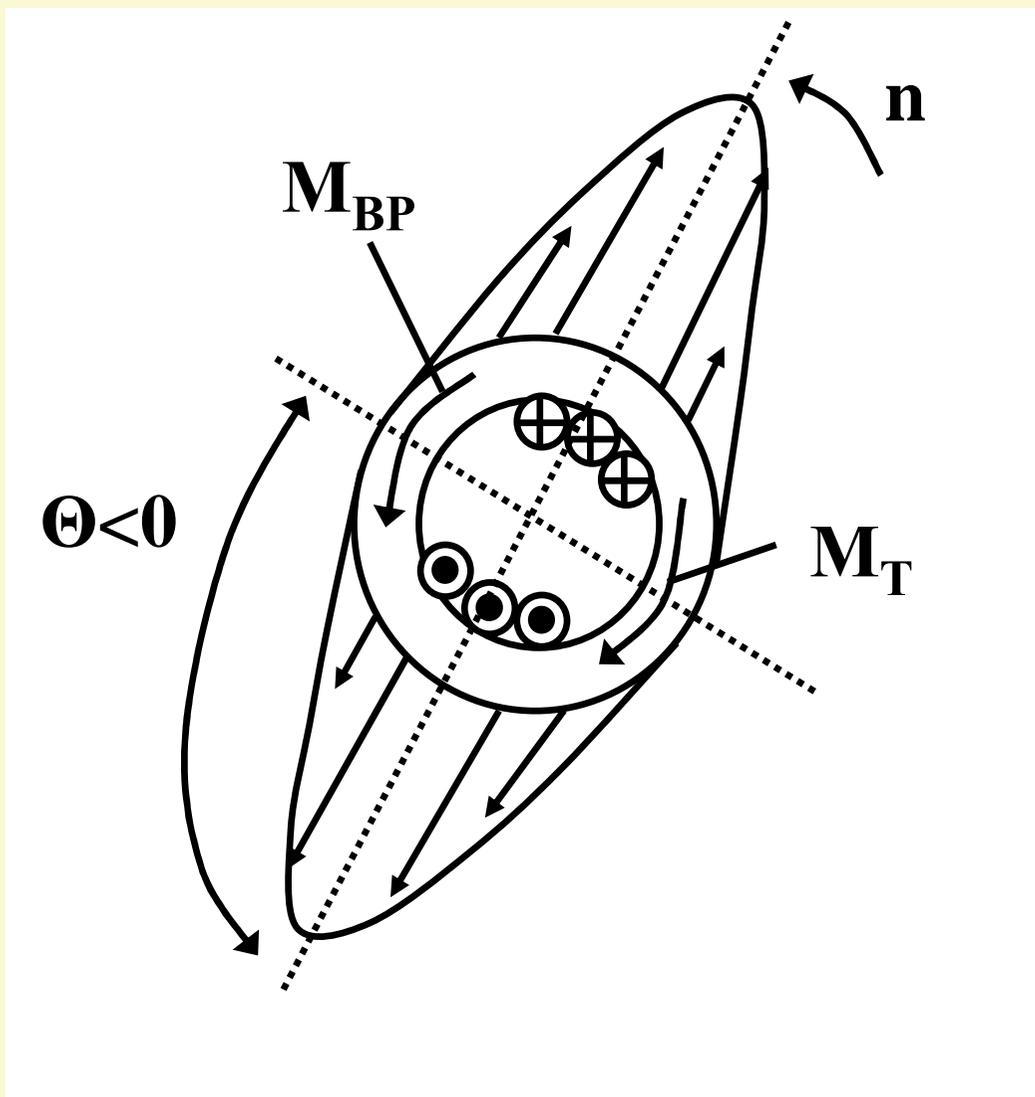
На обмотку статора подается симметричная система токов, создается вращающееся магнитное поле. В ОВ протекают постоянные токи. Если пренебречь всеми видами потерь энергии в СМ, то при отсутствии момента на валу (режим холостого хода), ось полюсов ротора совпадает с осью полюсов статора

Режим генератора



Увеличиваем $M_{вр}$ (двигателем), ось полюсов ротора поворачивается на угол θ относительно оси полюсов статора в направлении вращения. Результирующее магнитное поле (наложение полей статора и ротора) изменится, ток в обмотках статора изменится и его взаимодействие с магнитным полем ротора создаст M_T – режим генератора.

Режим двигателя



Прикладываем к валу M_T , ось полюсов ротора поворачивается на θ против направления вращения. Изменяются токи в обмотках статора и возникают электромагнитные силы, взаимодействия токов статора и магнитного поля ротора, которые увлекают ротор в направлении вращения. Эти силы создают $M_{вр}$.

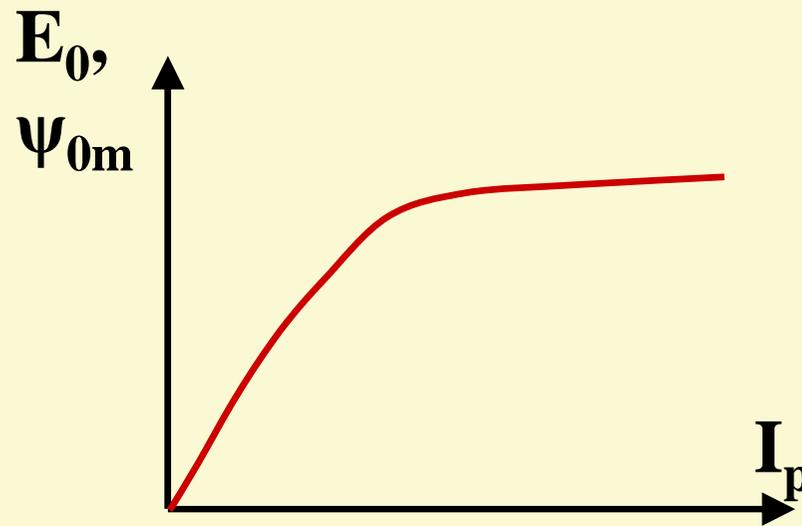
Уравнение электрического состояния фазы СГ

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 обмотке статора $e_0(t)$

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

Характеристика ХХ аналогична В(Н)



Токи обмотки статора создают вращающееся м.п. и потокосцепление этого поля $\Psi_0(t)$ индуцирует в обмотке статора $e_0(t)$

Результирующая ЭДС статорной обмотки

$$e_{\text{рез}} = e_0 + e_a$$

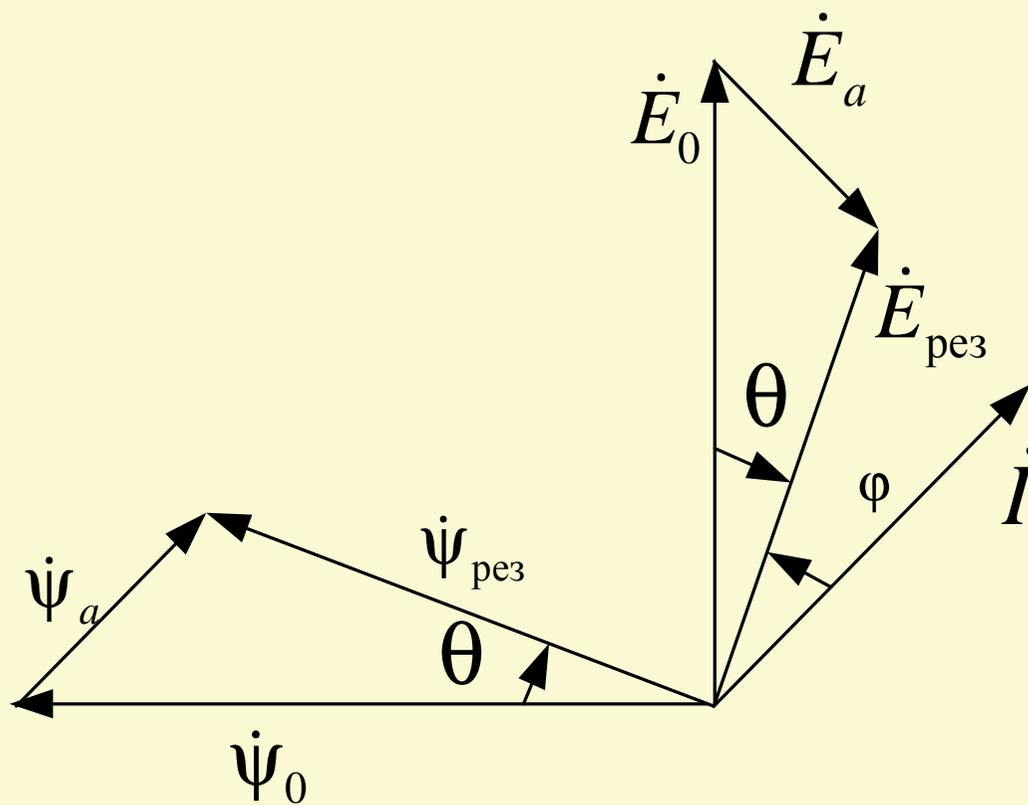
или в комплексной форме

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

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;

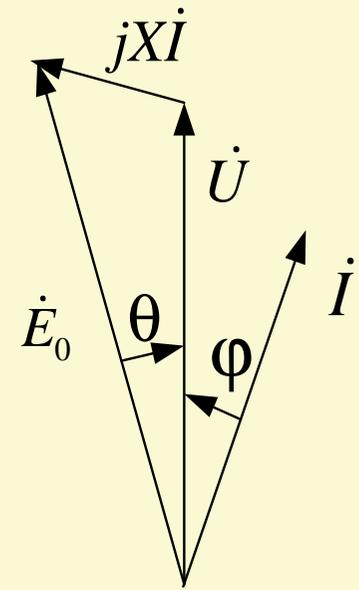
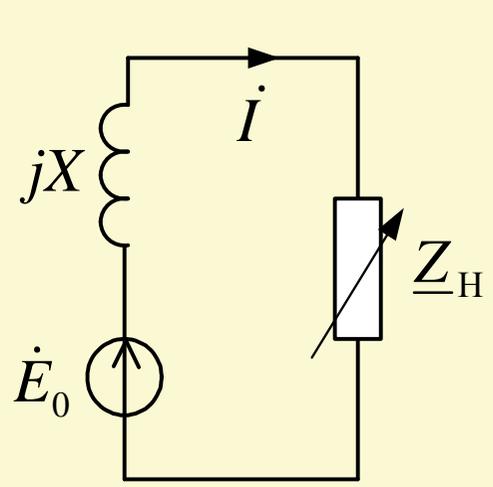
$\dot{I}R$ – падение напряжения в активном сопротивлении

$$\dot{E}_a = -jX\dot{I}$$

X – синхронное индуктивное сопротивление $R \ll X$

$$\dot{E}_0 = U + jX\dot{I}$$

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

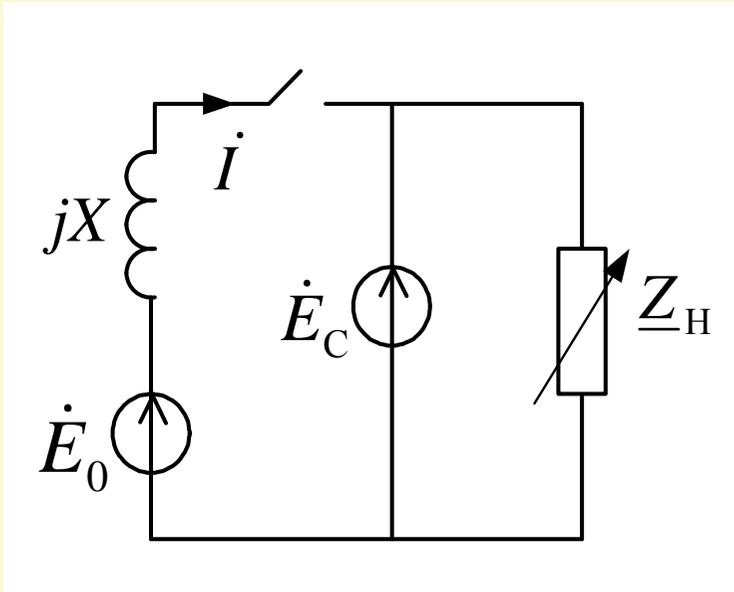


Синхронизация и включение генератора на параллельную работу

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.

Угловые характеристики СГ

Рассмотрим особенности работы СГ
параллельно с сетью бесконечной мощности

$$U_C = \text{const}, f_C = \text{const}$$

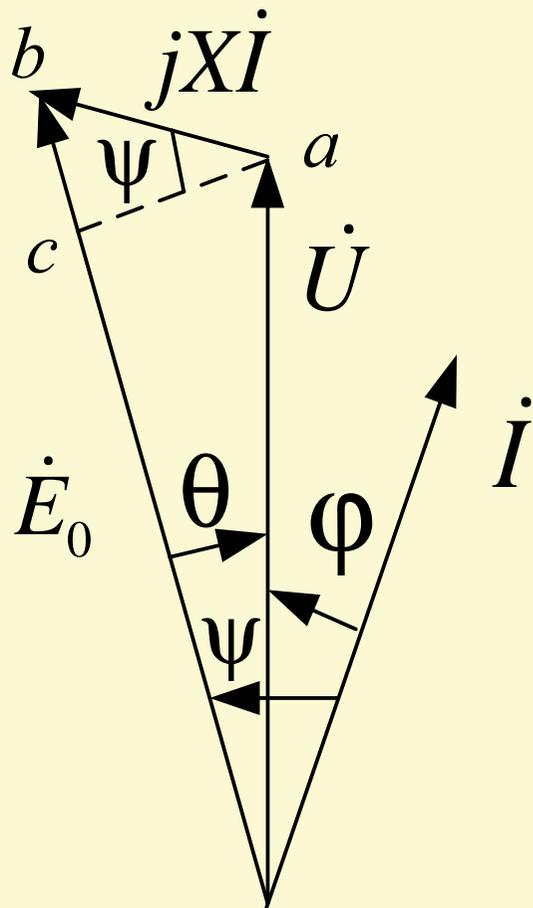
Активная мощность СГ

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

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

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

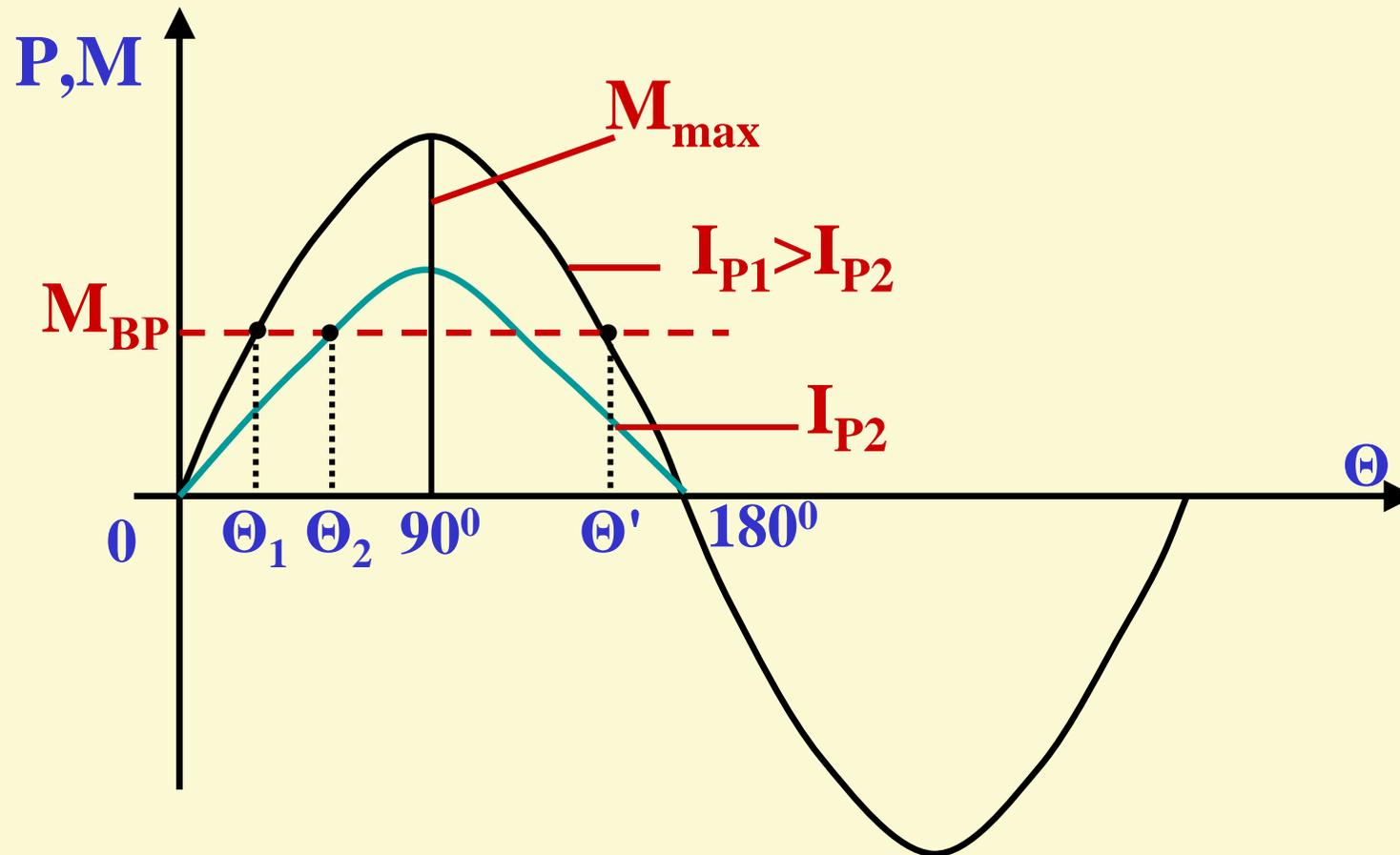
$$M_{\text{max}} = \frac{3E_0 U}{X\Omega_1}.$$

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 удерживать его в синхронизме, «форсируя», т.е. резко увеличивая ток возбуждения ротора (усиливаем магнитное поле и максимальный электромагнитный момент генератора возрастает).**