

**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).

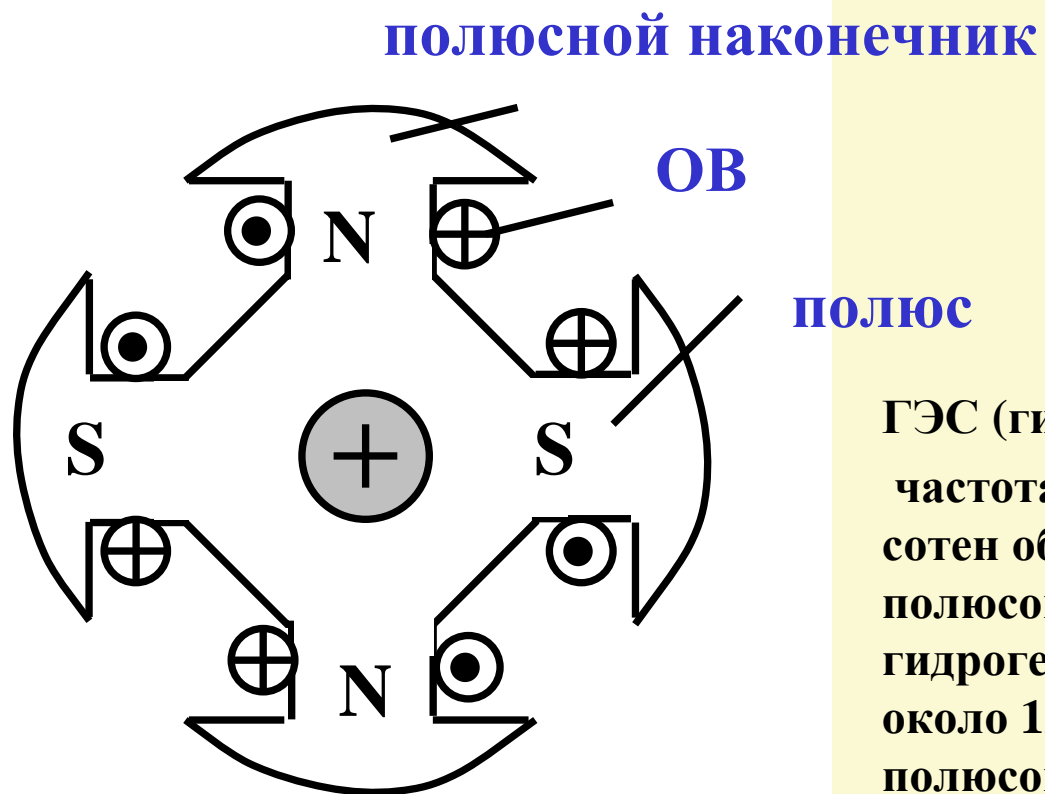
**Ротор - явнополюсной или неявнополюсной электромагнит. Ток в обмотку ротора поступает через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока – возбuditеля (самовозбуждающийся ГПТ, установленный на валу СГ) . Его мощность составляет 1–3% мощности СГ.**

**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

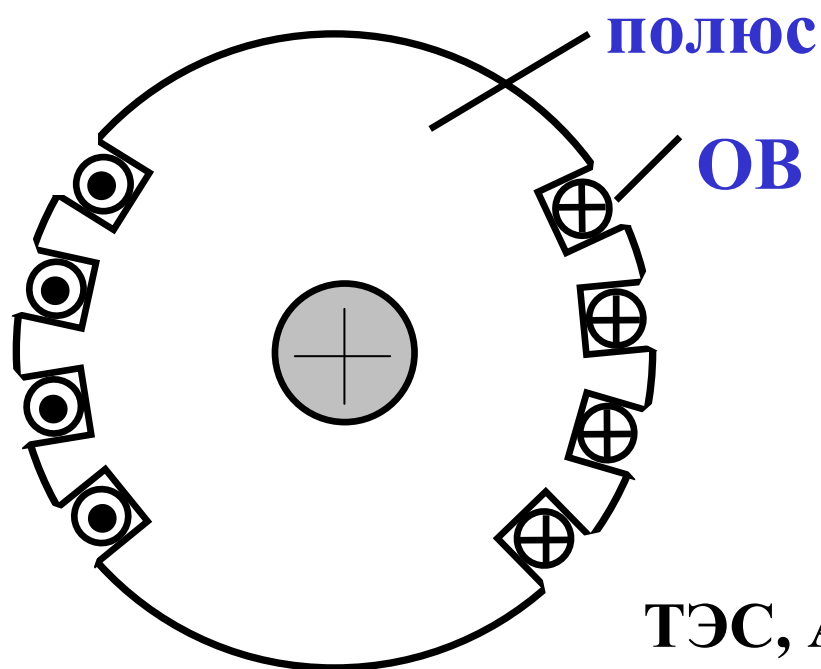


Применяются в СМ с большим числом полюсов и соответственно относительно низкой  $n$ .

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

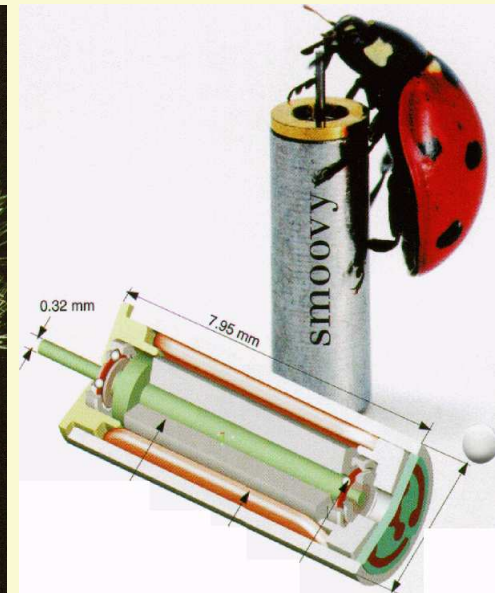


Стальной поковка – “бочка”.  
Обмотка постоянного тока укрепляется в пазах ротора.  
По условиям механической прочности диаметр ротора при  $n=3000$  об/мин не должен превышать 1,2 – 1,3 м, а активная длина ротора должна быть не более 6,5 м.

**ТЭС, АЭС (турбогенераторы)**

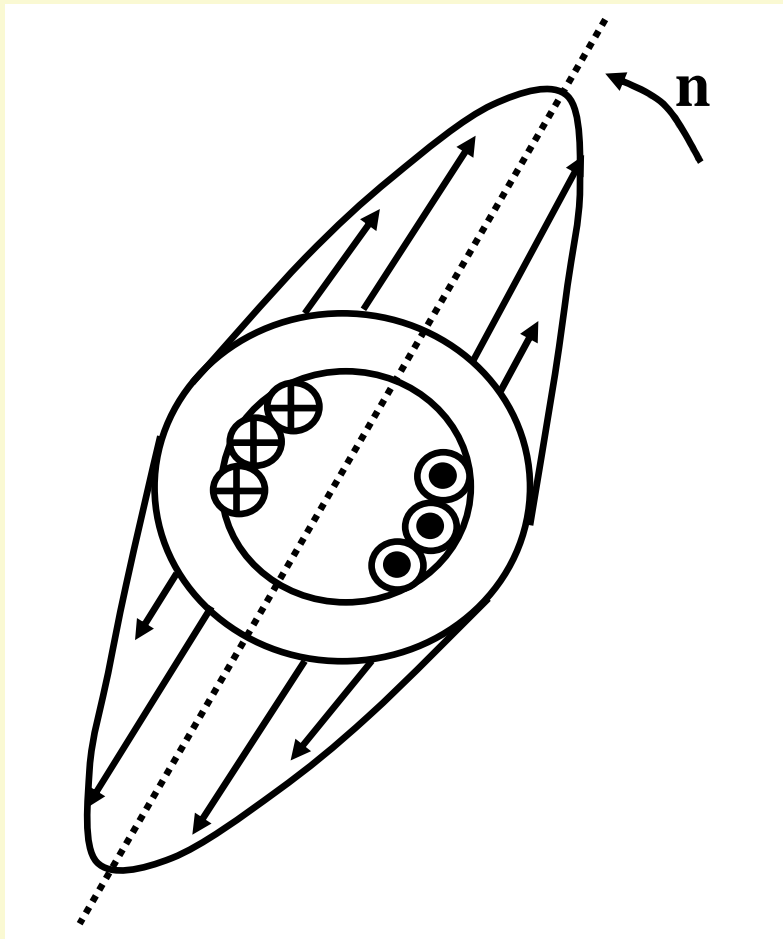
**$S=500\ 000$  кВА в одной машине**

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



# **Режимы работы СМ**

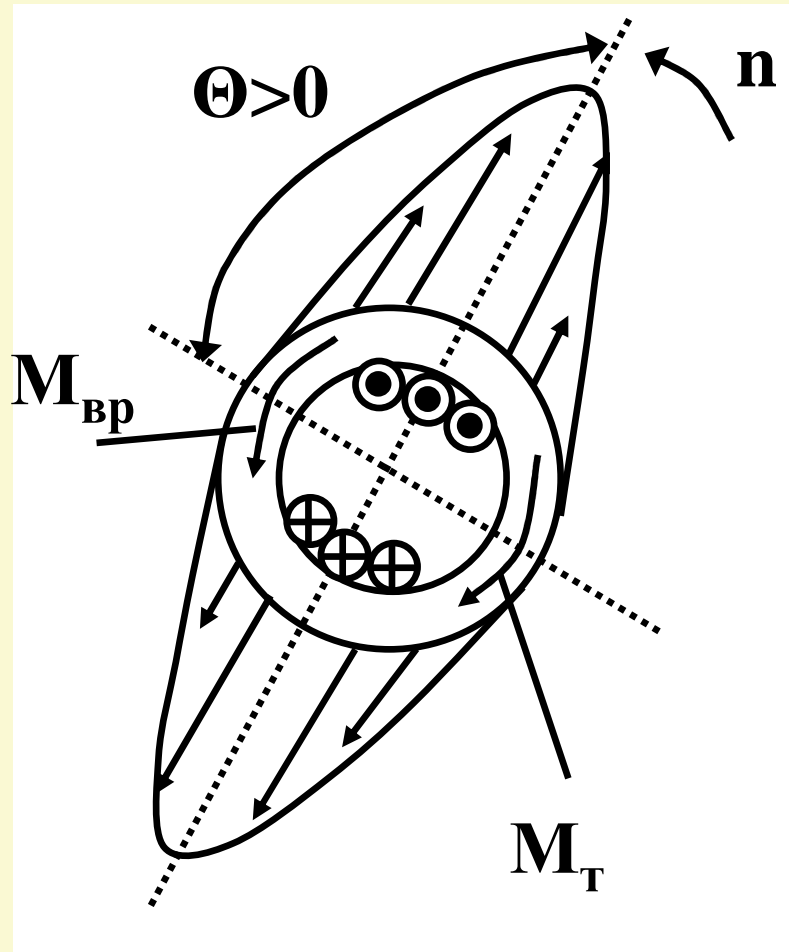
**Режим работы определяется взаимодействием магнитных полей токов статора и ротора. СМ переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающий (генератор) или тормозной (двигатель) момент.**



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

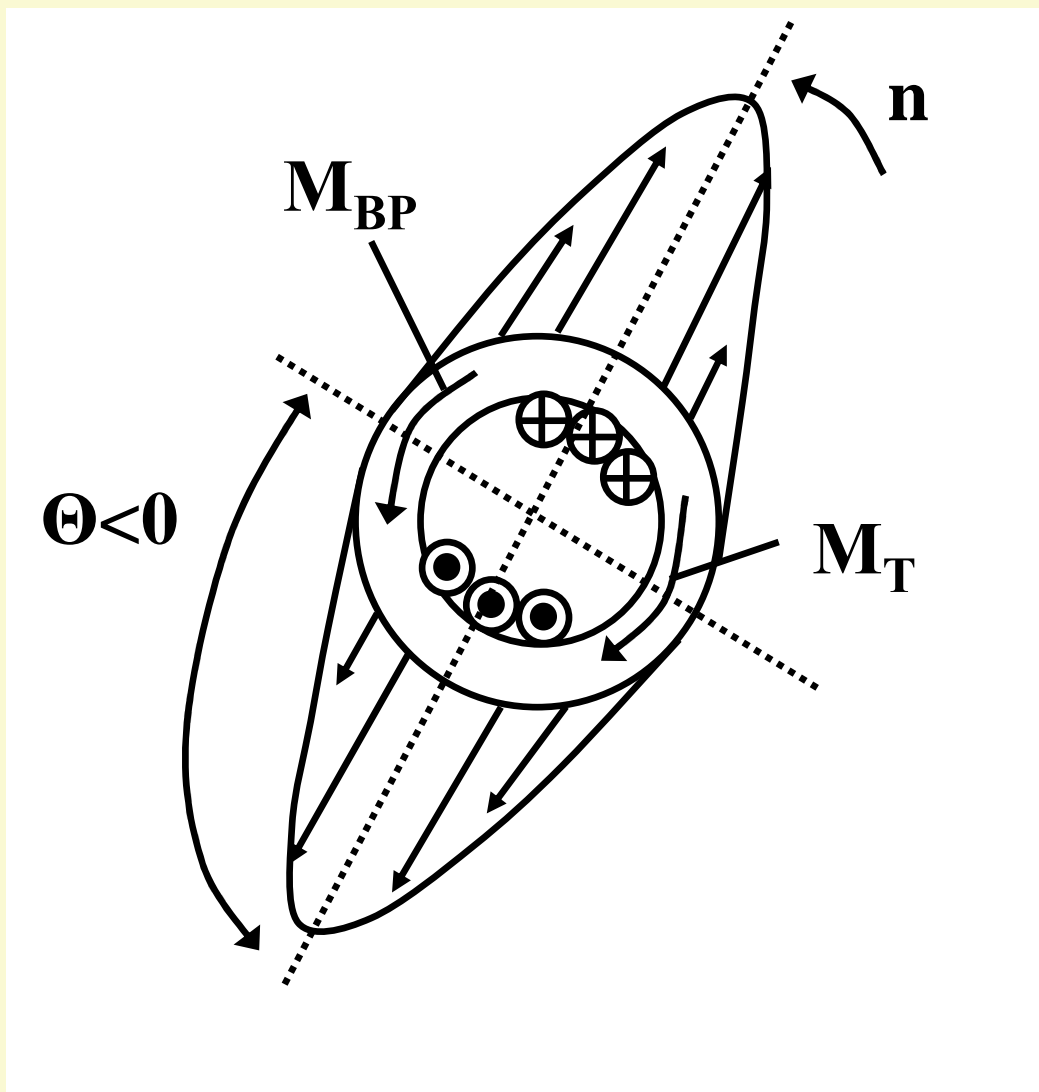


# Режим генератора



Увеличиваем  $M_{вр}$  (двигателем), ось полюсов ротора поворачивается на угол  $\theta$  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  $\theta$  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  $M_{вр}$ .

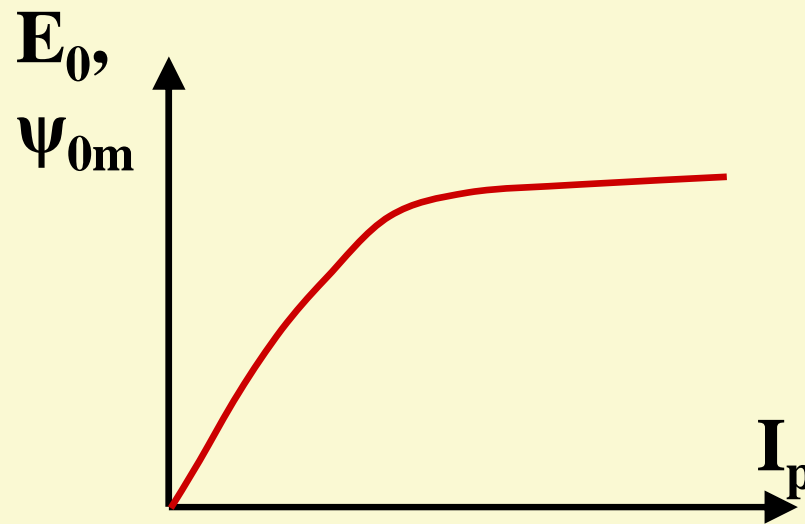
# Уравнение электрического состояния фазы СГ

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

$$e_{\text{рез}} = e_0 + e_a$$

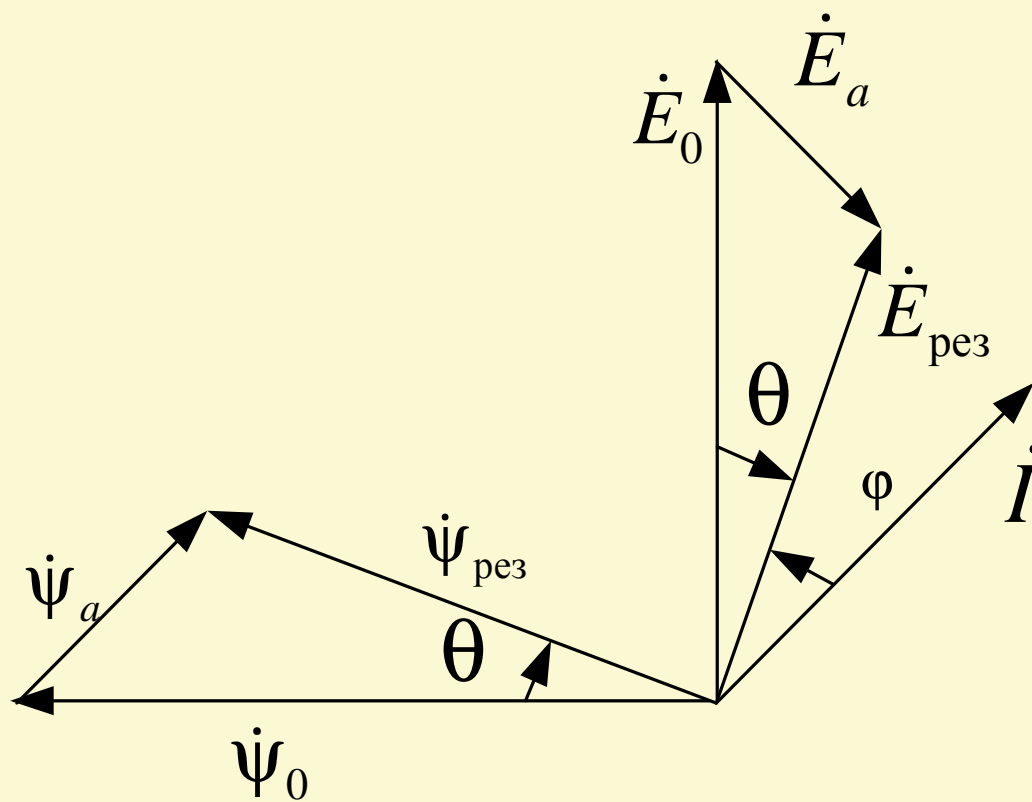
или в комплексной форме

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

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;

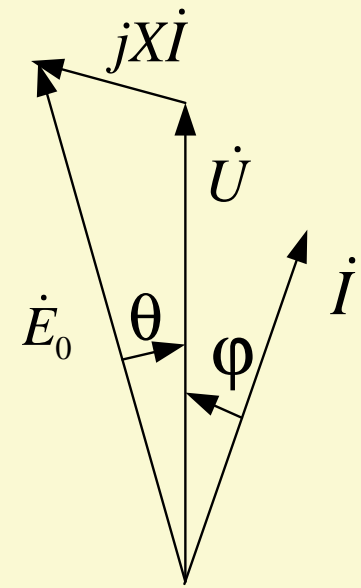
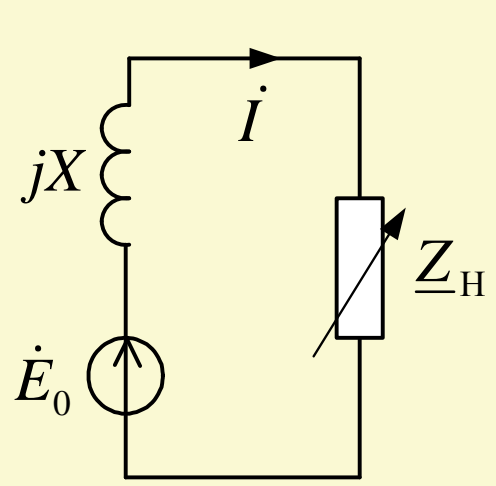
$\dot{I}R$  – падение напряжения в активном сопротивлении

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

$X$  – синхронное индуктивное сопротивление  $R \ll X$

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

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



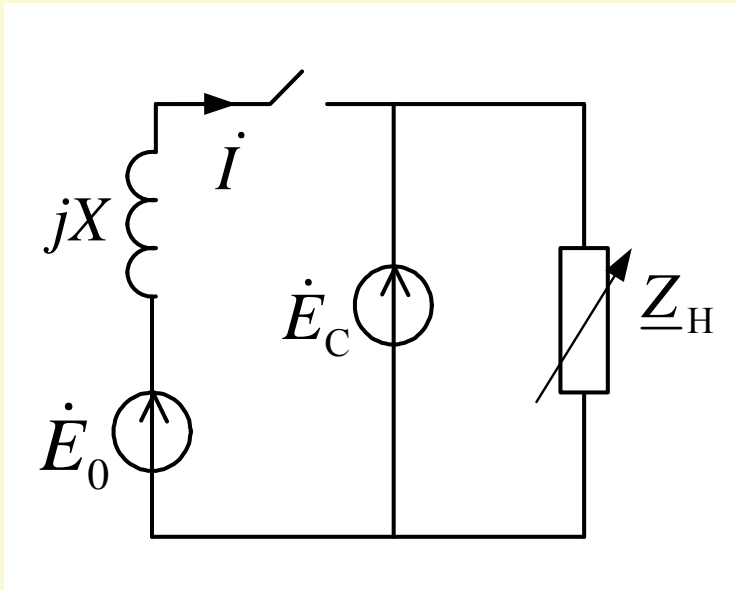


# Синхронизация и включение генератора на параллельную работу

**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

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

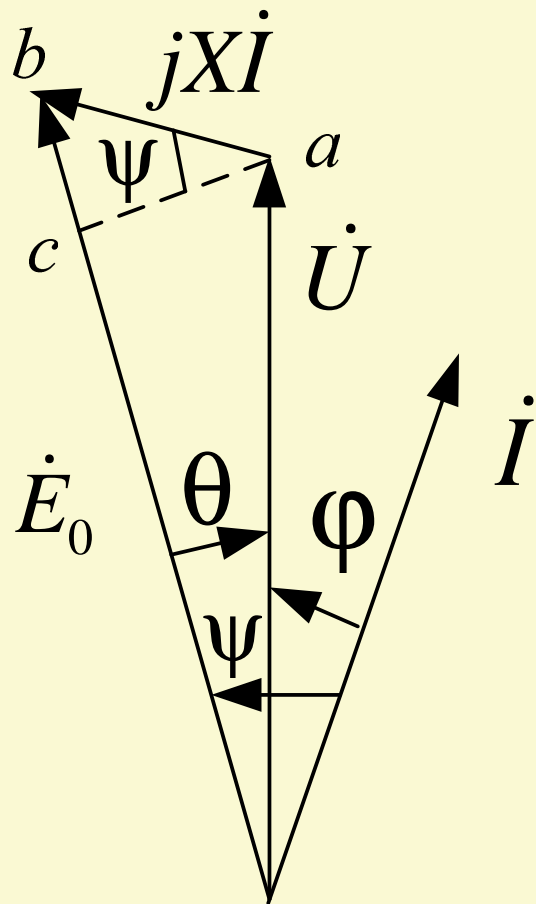
Активная мощность СГ

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

**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

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

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

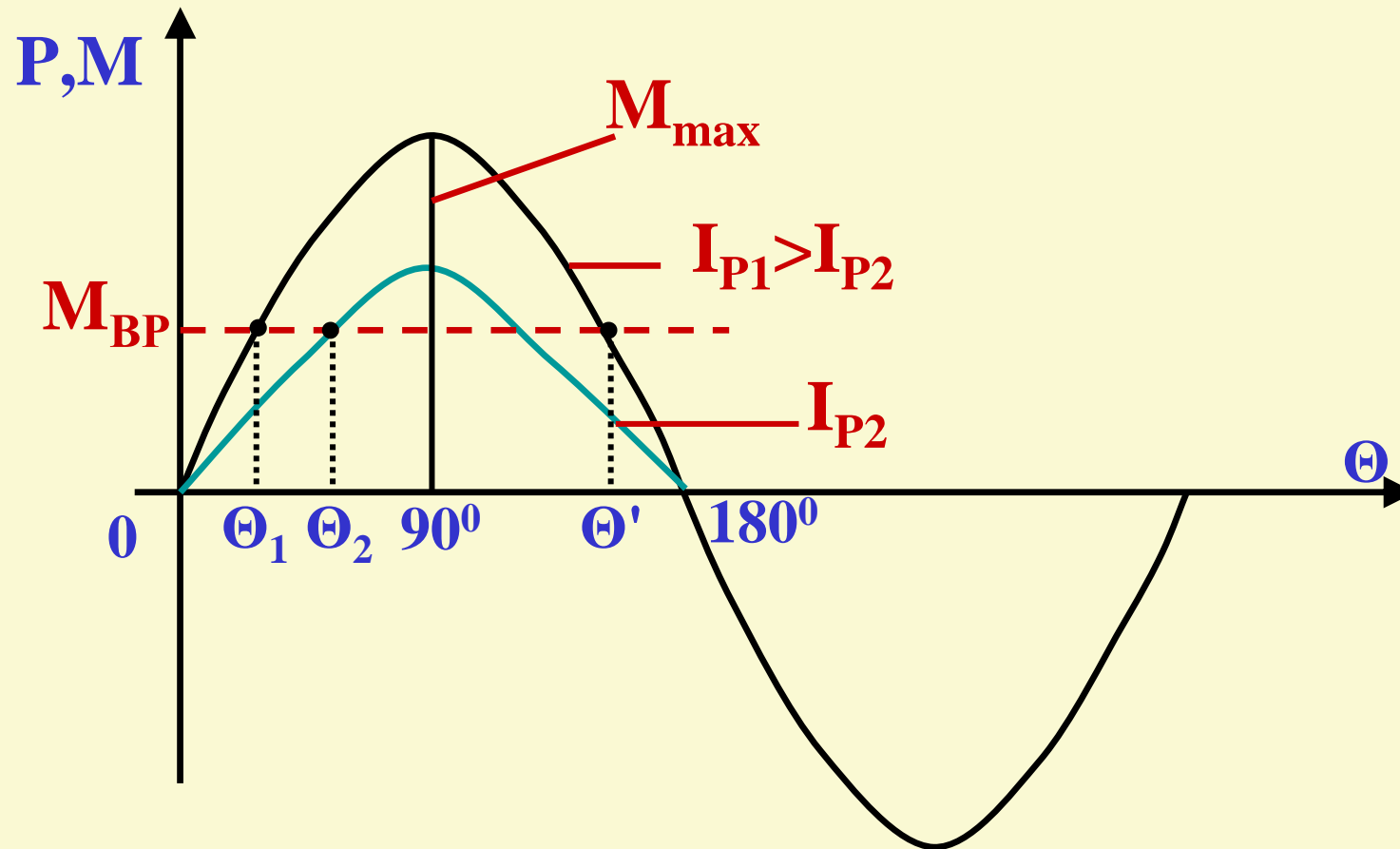


Так как угловая частота постоянна, то  $M \sim P$ .  
*Активная мощность и электромагнитный момент пропорциональны ЭДС и синусу угла рассогласования  $\theta$*

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

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

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  $30^{\circ}$  при номинальной мощности.**

**«Выпадению» из синхронизма предшествует неустойчивое состояние: неравномерное возрастание угла  $\theta$  до  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ,  $360^{\circ}$  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).**