

*Раздел 4.*  
*Синхронные машины*

# 4.1. Устройство и принцип действия

- ***Синхронными*** называют электрические машины, в которых ротор вращается с той же скоростью, что и магнитное поле статора
- Синхронная машина может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора

#### 4.1. Устройство и принцип действия

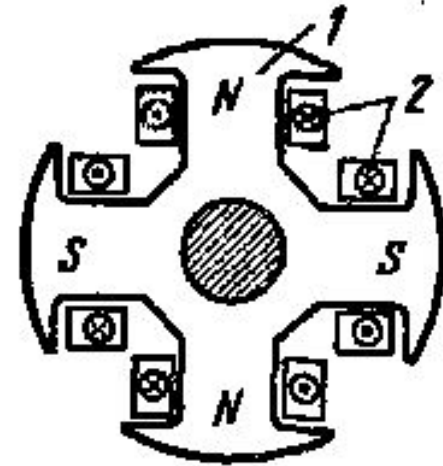
*Статор* СМ точно такой же, как у асинхронных машин, представляет собой полый цилиндр с пазами, в которые уложена трехфазная обмотка.

*Ротор* представляет собой электромагнит (обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, подключаемая к источнику с помощью контактных колец). Ротор может быть *явнополюсным* и *неявнополюсным*.

## 4.1. Устройство и принцип действия

- Явнополюсный ротор

Часто имеет 2 пары полюсов. В силу конструкции менее прочный, поэтому применяется в машинах с большим числом пар полюсов и малой частотой вращения ротора (чаще всего в гидрогенераторах).



*1 - ротор*

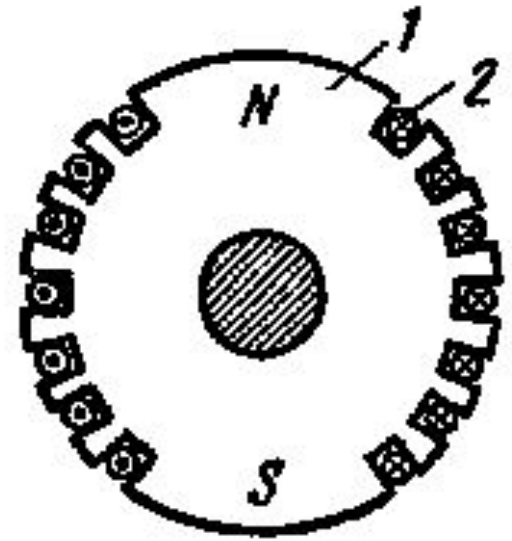
*2 - обмотки электромагнита*

## 4.1. Устройство и принцип действия

- **Неявнополюсный ротор**

Ротор имеет одну пару полюсов.

Конструкция прочная и может применяться при высокой частоте вращения  
(турбогенераторы ТЭС)



*1 - ротор*

*2 - обмотки электромагнита*

*Любой ротор СМ должен иметь столько же пар полюсов, сколько имеет обмотка статора*

#### 4.1. Устройство и принцип действия

- Принцип действия СГ.

Приведем ротор СГ во вращение и подключим к источнику обмотку возбуждения ротора, по обмотке потечет ток. Ток создаст магнитное поле ротора, вращающееся с той же скоростью, что и сам ротор.

Вращающееся поле наводит в обмотках статора ЭДС. Т.к. обмотки сдвинуты в пространстве на  $120^{\circ}$ , ЭДС в них будут отличаться по фазе также на  $120^{\circ}$ . В результате мы получили трехфазную ЭДС.

#### 4.1. Устройство и принцип действия

Частота ЭДС равна частоте вращения ротора

$$f = \frac{p \cdot n_2}{60}$$

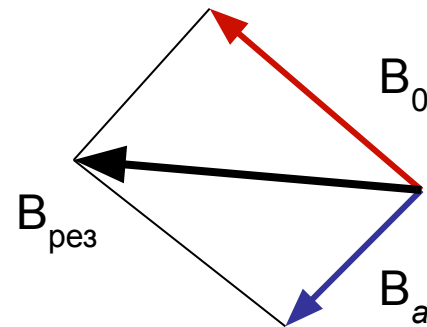
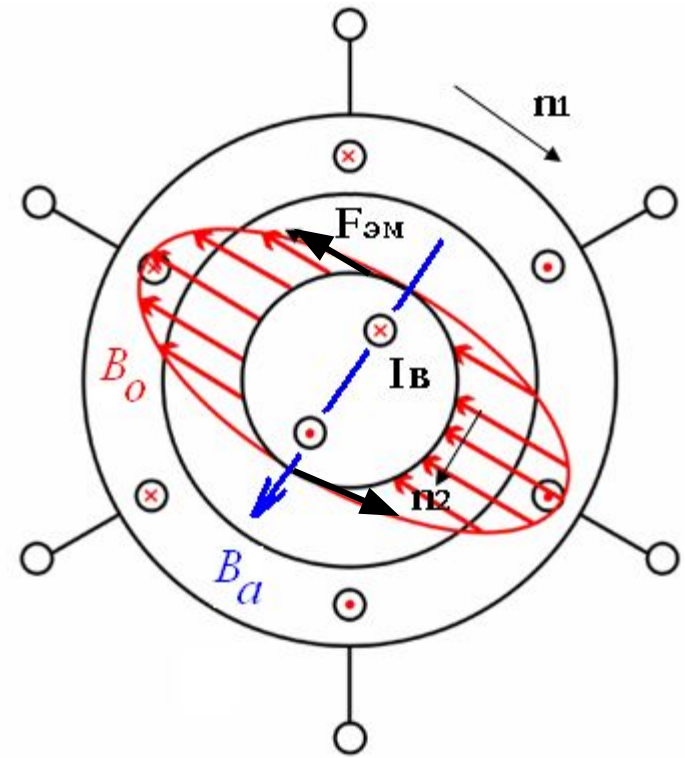
Если подключить обмотки статора к приемнику, потечет ток статора. Если приемник симметричный, ток в фазах статора будет одинаков. Трехфазный ток создает вращающееся магнитное поле статора. Частота его вращения равна частоте вращения ротора.

$$n_1 = \frac{60 f}{p}$$

Поля ротора и статора вращаются синхронно. В сумме они образуют результирующее магнитное поле СГ.

## 4.1. Устройство и принцип действия

- **Резистивная нагрузка**
- Ось результирующего поля смещена относительно оси магнитного поля ротора на некоторый угол  $\Theta$  (угол рассогласования);
- *возникает тормозной электромагнитный момент, который тем больше, чем больше ток нагрузки*
- *в СТ магнитное поле ротора является ведущим (в СД – наоборот)*

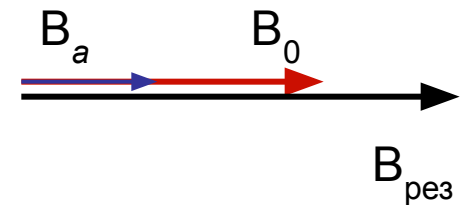




#### 4.1. Устройство и принцип действия

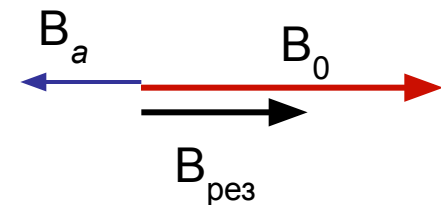
- **Емкостная нагрузка**

- угол рассогласования равен нулю;
- тормозной момент не создается;
- результирующее магнитное поле больше поля ротора.



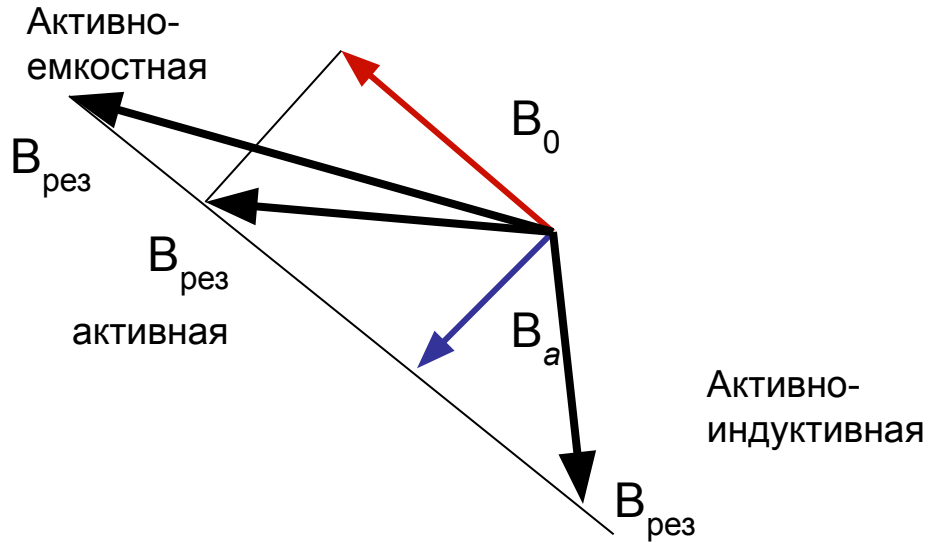
- **Индуктивная нагрузка**

- угол рассогласования равен нулю;
- тормозной момент не создается;
- результирующее магнитное поле меньше поля ротора.



# Активно-реактивная нагрузка

Тормозящий момент СГ зависит от величины результирующего поля и синуса угла рассогласования!



Реактивная нагрузка приводит к появлению реактивной мощности (изменению поля СГ), но не приводит к появлению момента сопротивления СГ. Активная нагрузка (появление активной мощности) приводит к появлению момента сопротивления.

#### 4.1. Устройство и принцип действия

##### *Выводы:*

- При подключении нагрузки изменяется магнитное поле СГ.
- Чем больше активная мощность потребляемая от СГ, тем больше угол рассогласования и тормозной момент и тем выше должен быть момент вращения приводного двигателя.
- При потреблении реактивной мощности тормозной момент не возникает, угол рассогласования равен нулю, изменяется лишь величина результирующего поля СГ.

#### 4.1. Устройство и принцип действия

- **Принцип действия СД**

Статор подключается в трехфазной сети, т.о. создается вращающееся магнитное поле статора.

Пусть ротор вращается с частотой, равной частоте вращения поля статора, обмотка возбуждения ротора подключена к источнику и создает постоянное поле возбуждения ротора.

Если нет трения, то угол рассогласования будет равен нулю, вращающий момент отсутствует.

Создадим тормозной момент. Частота вращения ротора должна снижаться, при этом растет угол рассогласования и увеличивается вращающий момент. При моменте вращения, равном тормозному моменту, угол рассогласования перестанет увеличиваться, ротор продолжит вращаться с частотой вращения поля статора, СД перейдет в новый установившийся режим.

#### 4.1. Устройство и принцип действия

- СД автоматически создает момент вращения, равный моменту сопротивления;
- Чем больше момент сопротивления, тем больше угол рассогласования, тем больший активный ток потребляет СД.
- Ток возбуждения ротора не влияет на величину момента СД, он влияет лишь на величину результирующего поля СД (а, следовательно, на реактивную мощность, потребляемую СД).

## 4.2. Схема замещения и уравнение электрического состояния обмотки статора СГ

Обозначения:

$E_0$  – ЭДС, наводимая в обмотке статора вращающимся полем ротора;

$E_\sigma$  – ЭДС, наводимая потоком рассеяния вращающегося поля статора

$E_a$  – ЭДС, наводимая в обмотке статора основным полем статора (проходящим через ротор)

*$E_\sigma$  и  $E_a$  зависят от тока статора,  $E_0$  – зависит от тока возбуждения ротора*

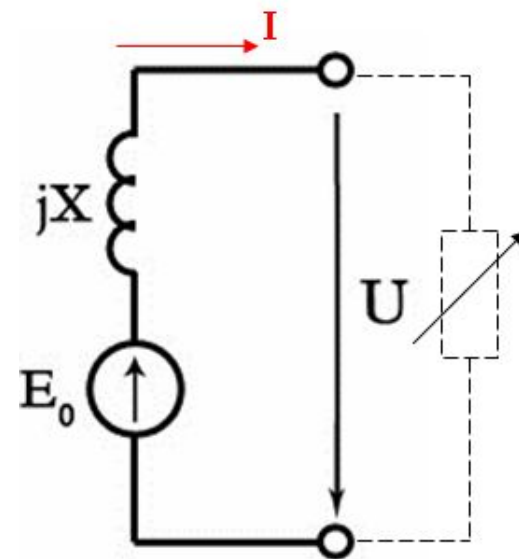
#### 4.2. Схема замещения и уравнение электрического состояния обмотки статора СГ

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I} \cdot R_{ст}$$

ЭДС самоиндукции  $E_a$  можно заменить падением напряжения на индуктивном сопротивлении обмотки статора  $X$

*Уравнение электрического состояния обмотки статора:*

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j \cdot X \cdot \dot{I}$$



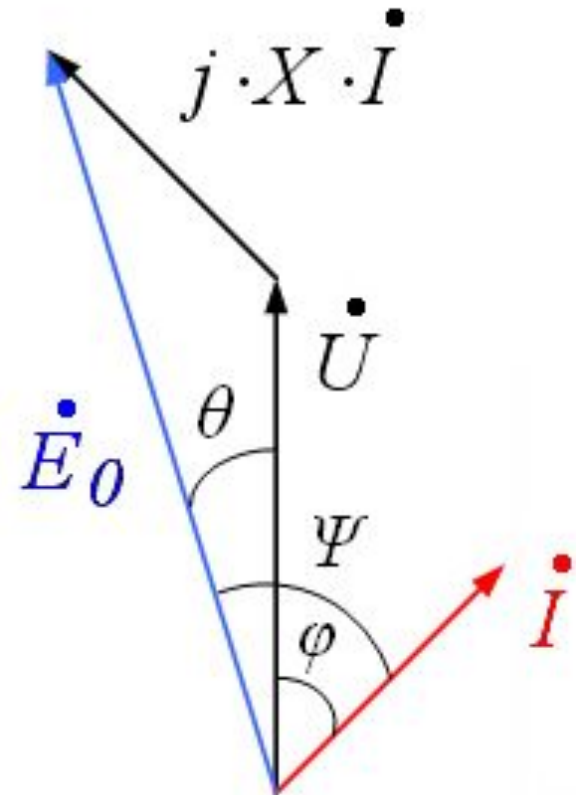
## 4.3. Момент и угловая характеристика СМ

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_a$$

$I_a$  – активная составляющая тока статора

$\Phi$  – поток ротора

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{3 \cdot E_0 \cdot I \cdot \cos \Psi}{\Omega} = \frac{3 \cdot E_0 \cdot I_a}{\Omega}$$

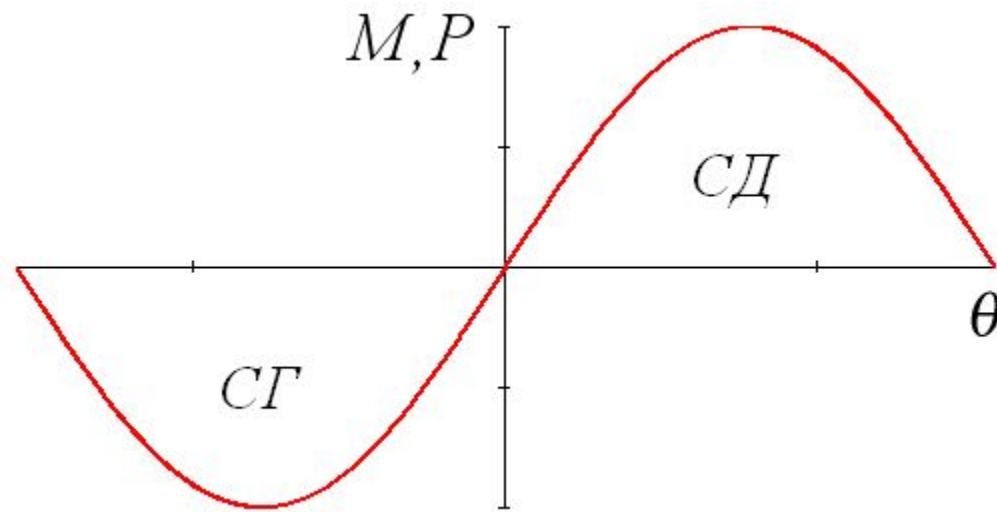




### 4.3. Момент и угловая характеристика СМ

$$M = \frac{3 \cdot E_0 \cdot U \cdot \sin \theta}{X \cdot \Omega} = M_{max} \cdot \sin \theta$$

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



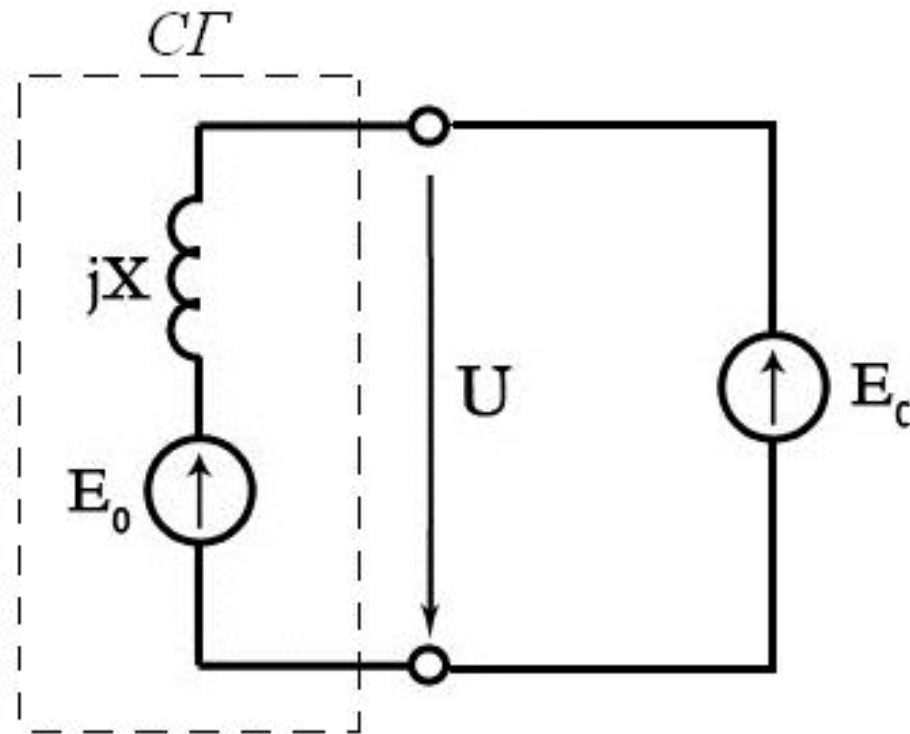
# Работа СГ в мощной энергосистеме

## 4.4. Мощная энергосистема

- Энергосистема – это множество электрических станций и потребителей, объединенных общей сетью.

Частота и напряжение в энергосистеме постоянны, ее можно представить в виде идеального генератора бесконечно большой мощности.

#### 4.4. Мощная энергосистема



*$U = const, f = const$  независимо от режима работы  $CT$*

## 4.5. Включение СГ на параллельную работу с сетью

*При включении генератора в энергосистему не должно возникать бросков тока статора и момента. Поэтому во всех фазах мгновенное значение ЭДС генератора должно равняться мгновенному значению напряжения сети.*

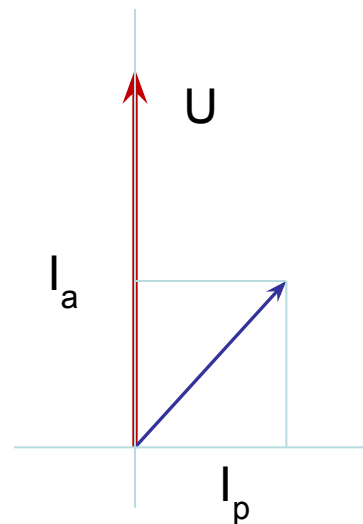
*Условия синхронизации:*

1. Равенство ЭДС генератора  $E_0$  и напряжения сети  $U$ .
2. Равенство частот ЭДС генератора и сети.
3. Последовательность чередования фаз СГ и сети должны совпадать.
4. ЭДС СГ и напряжение сети должны совпадать по фазе.

# Регулирование мощности синхронного генератора, работающего в сети

- У автономно работающего генератора мощность определяется нагрузкой и никак не регулируется
- У СГ, включенного в сеть нет какой-либо определенной нагрузки. Все генераторы питают всю совокупность приемников. Суммарная мощность приемников (активная и реактивная) должна равняться суммарной генерируемой всеми СГ мощности. За этим смотрит диспетчер, перераспределяя между разными СГ (реально, ТЭЦ, АЭС, ГЭС) активную и реактивную вырабатываемые мощности.
- Характер мощности, отдаваемой СГ в сеть можно определить по векторам тока и напряжения сети

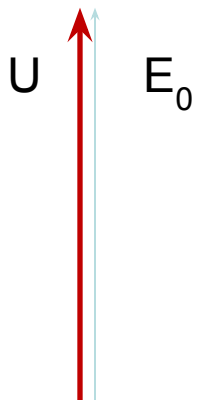
Напряжение сети  $U$  постоянно. Поэтому менять мощность мы можем, изменяя ток статора СГ. Для этого мы можем изменять ток возбуждения ротора (меняется магнитное поле ротора и ЭДС  $E_0$  и реактивная мощность) или момент турбины (при постоянной частоте изменение момента должно вызвать увеличение момента сопротивления, что при постоянном магнитном поле ротора ведет к изменению потребляемого активного тока статора).



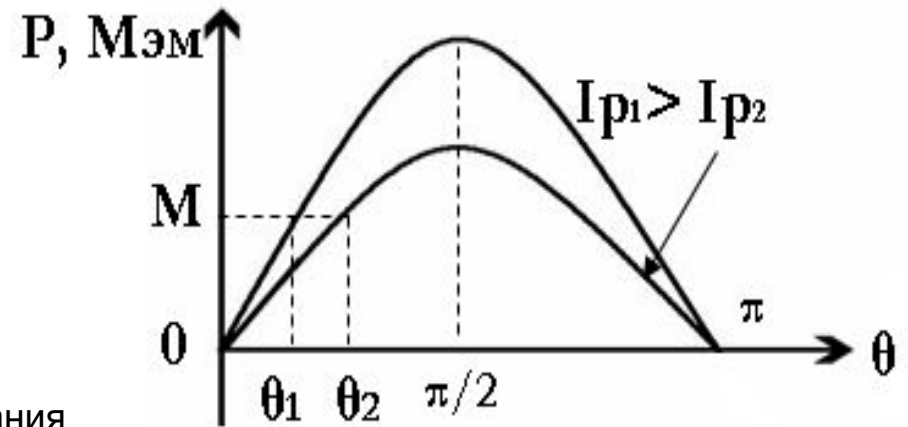
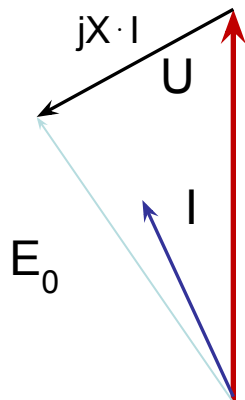
# 4.6. Регулирование активной мощности при работе СГ с сетью

Активная мощность СГ регулируется моментом турбины и не зависит от электрических параметров сети и приемников.

При включении СГ в сеть  $E_0 = U$



Увеличим момент турбины: вырастет угол рассогласования



$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j \cdot X \cdot \dot{I}$$

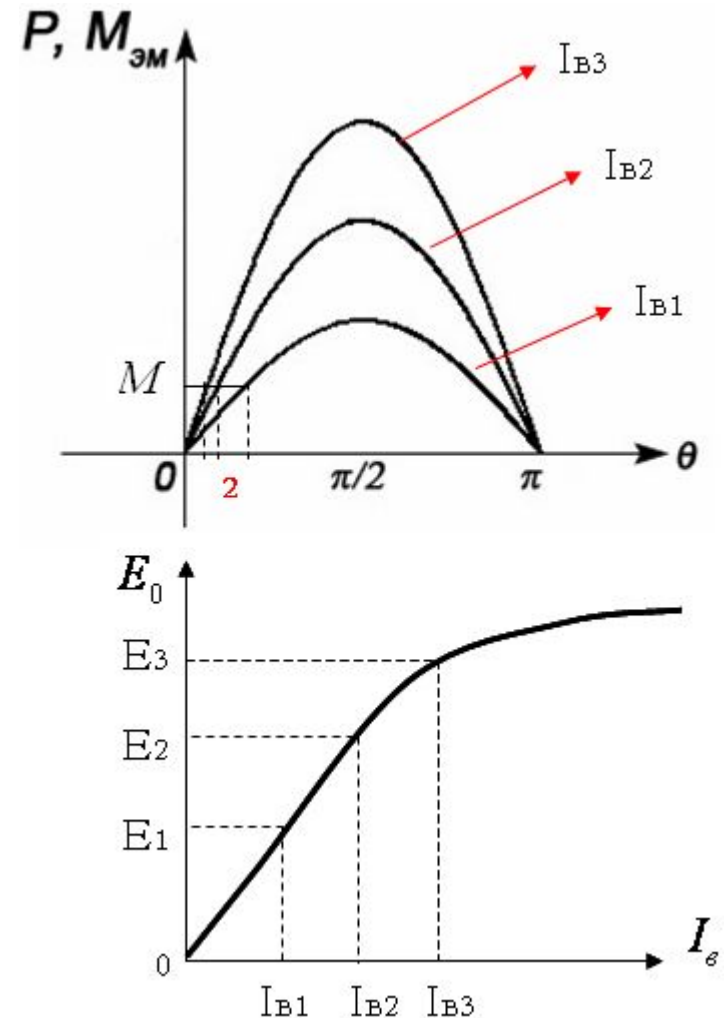
Изменение момента турбины приводит к изменению активной и реактивной мощностей

Предел увеличения мощности:  $\theta = 90^\circ$ ,  $M = M_{max}$ . При  $\theta > 90^\circ$  СГ выпадает из синхронизма!

На практике поддерживают  $\theta < 30^\circ$

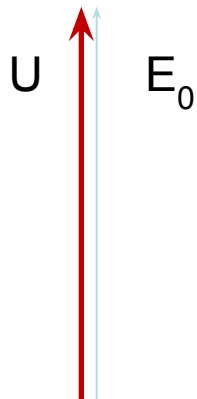
## 4.7. Регулирование реактивной мощности при работе СГ с сетью. V-образные характеристики

Рассмотрим СГ, работающий в сети при постоянном моменте турбины (постоянной активной мощности) и построим диаграммы для трех значений тока возбуждения ротора.



# Регулирование реактивной мощности

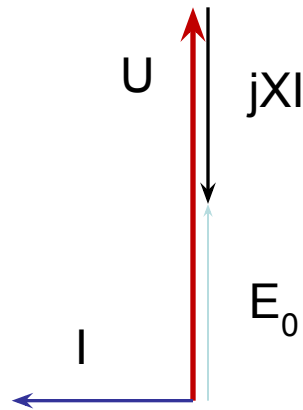
Ток  $I_{p2}$  такой, что выполняются условия согласования СГ с сетью



$$P = 0, Q = 0$$

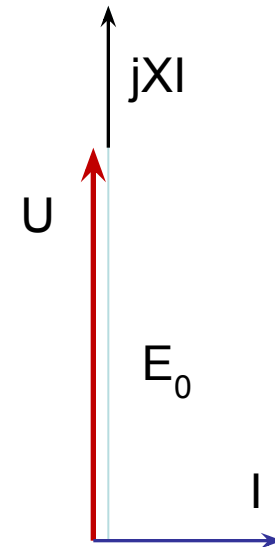
Ток  $I_{p1} < I_{p2} : E_{01} < E_{02}$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + j \cdot X \cdot \dot{I}$$



$$P = 0, Q < 0$$

Ток  $I_{p2} < I_{p3} : E_{01} < E_{02}$



$$P = 0, Q < 0$$



#### 4.7. Регулирование реактивной мощности при работе СГ с сетью. V-образные характеристики

Пусть при  $I_B = I_{B2}$ , мощность СГ чисто активная.

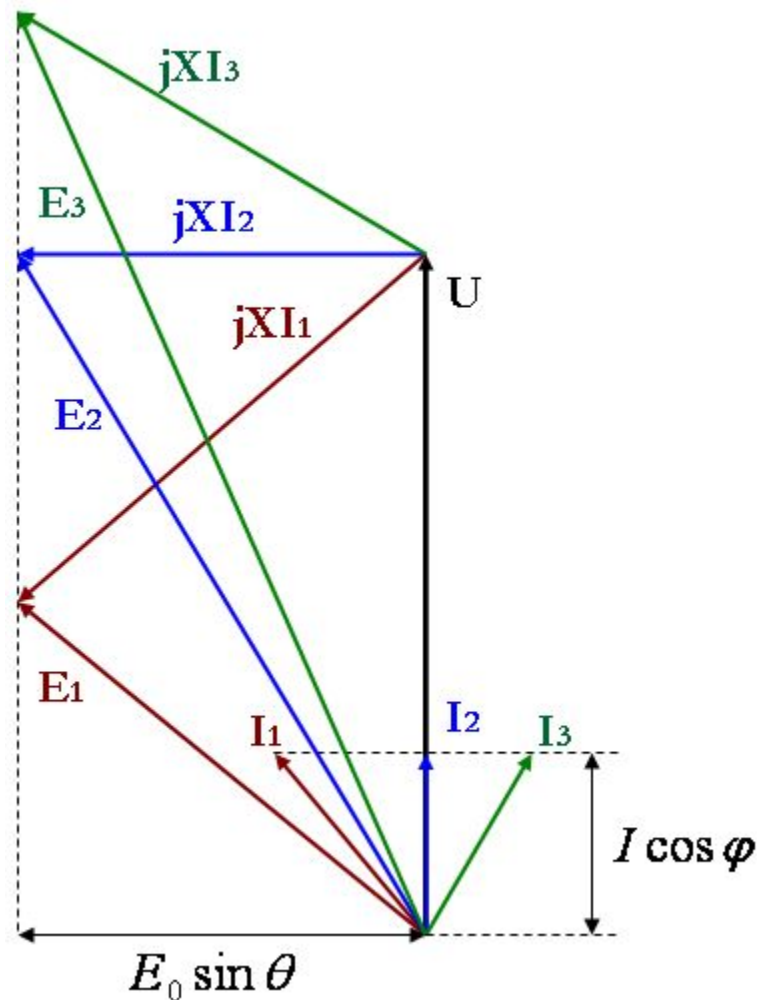
$$U = const$$

$$I \cdot \cos\varphi = const \text{ (м.к. } P = const),$$

$$E_0 \cdot \sin\theta = const \text{ (м.к. } P = const)$$

При изменении тока возбуждения ротора:

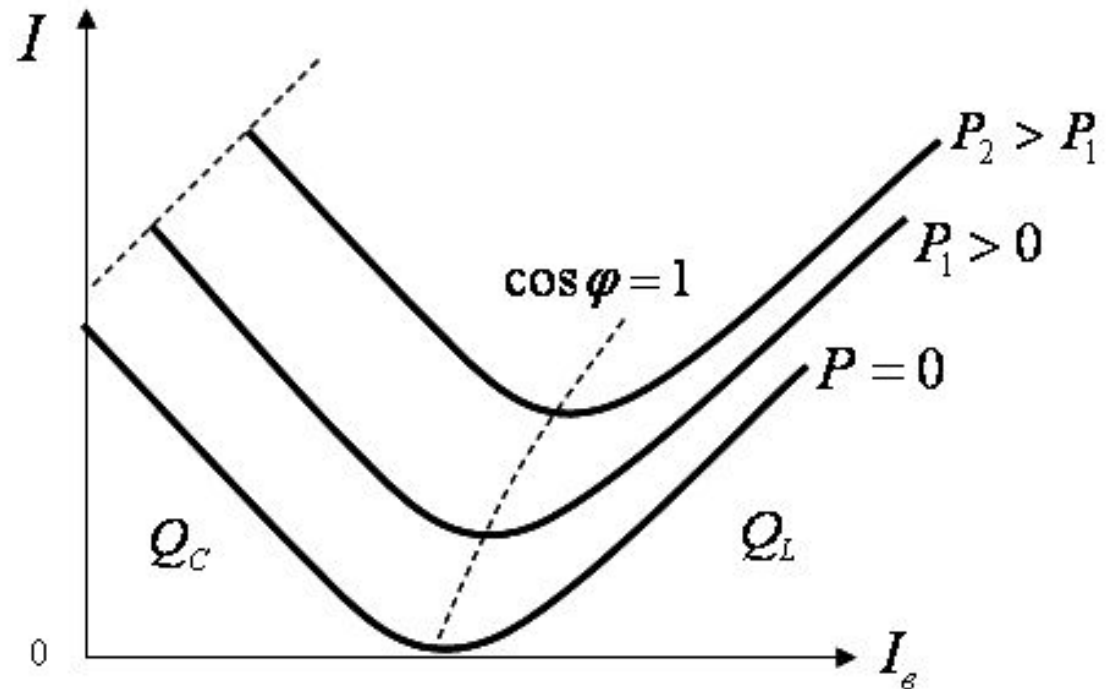
- *меняется величина и фаза тока статора*
- *меняется знак и значение реактивной мощности*
- *активная мощность остается постоянной*
- *существует такой ток возбуждения ротора, при котором ток статора минимален*



#### 4.7. Регулирование реактивной мощности при работе СГ с сетью. V-образные характеристики

### V – образные характеристики

При малых токах возбуждения ротора реактивная мощность СГ имеет емкостной характер, при больших - индуктивный



*При  $P > 0$  и малых токах возбуждения возможен выход СГ из синхронизма*

4.7. Регулирование реактивной мощности при работе СГ с сетью. V-образные характеристики

*Регулирование реактивной мощности изменением тока возбуждения ротора возможно только для СГ, работающего в сети!*

## **Автономный СГ**

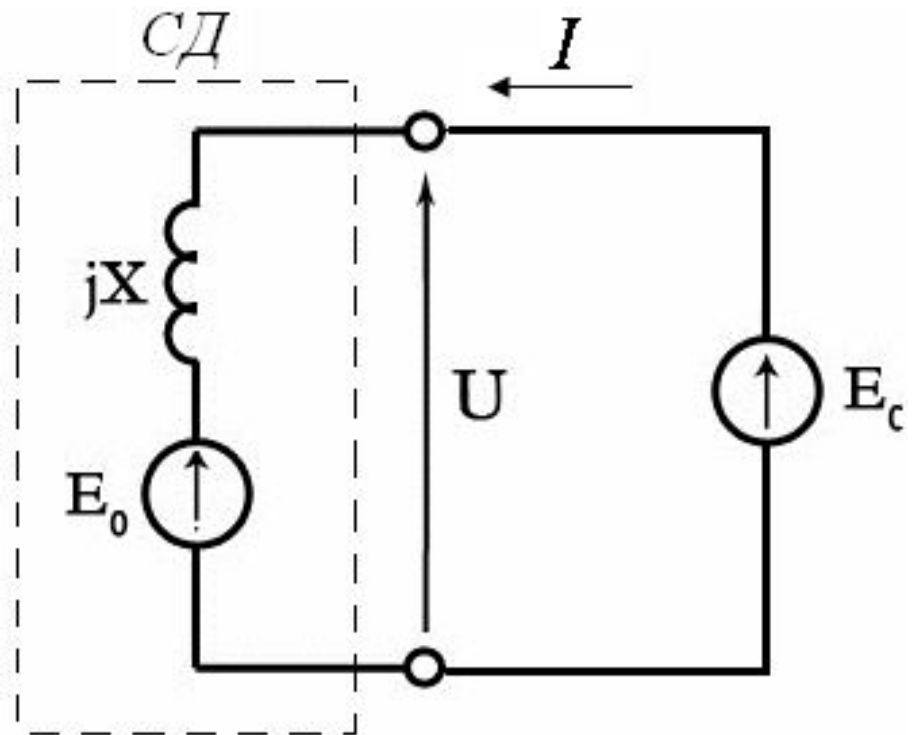
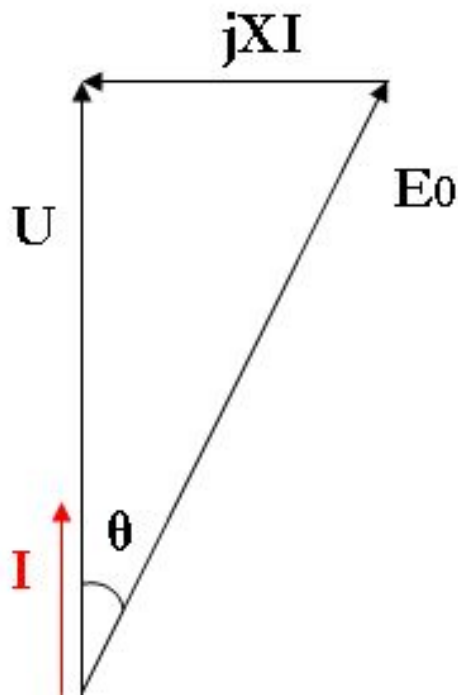
При автономной работе регулирование тока возбуждения ведет к изменению напряжения на приемнике, активная и реактивная мощности, отдаваемые СГ при автономной работе зависят только от приемника!

Регулирование тока возбуждения используют для поддержания постоянного напряжения на нагрузке.

Момент и частота автономного СГ зависит от нагрузки. Чтобы избежать этого явления автономные СГ снабжают автоматическим регулятором момента.

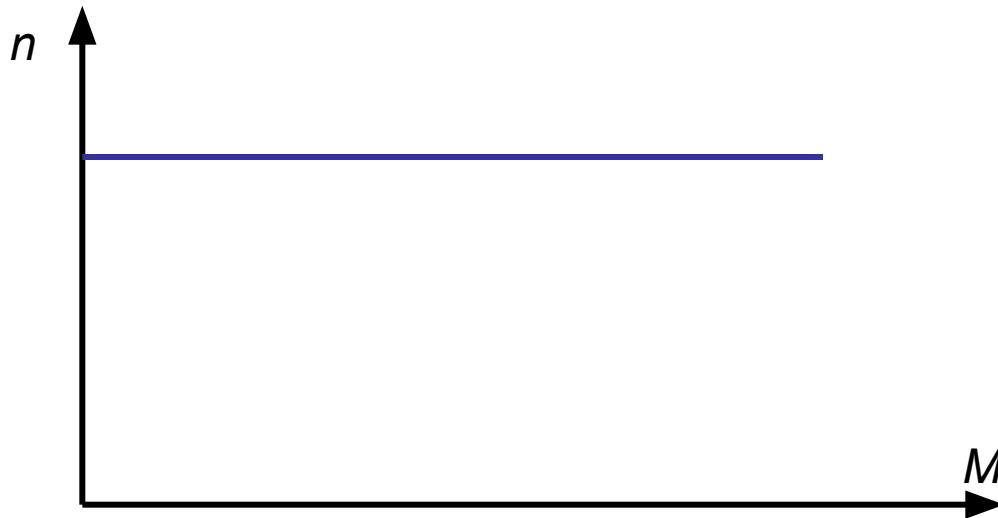
# 4.8. Уравнение электрического состояния и схема замещения фазы статора СД

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + j \cdot X \cdot \dot{I}$$



## 4.9. Механическая характеристика и активная мощность СД

Частота СД, работающего с сетью, не регулируется!



Предел саморегулирования – граница устойчивости СД в синхронизме.  
Момент нагрузки не должен превышать максимального момента СД.

## 4.9. Механическая характеристика и активная мощность СД

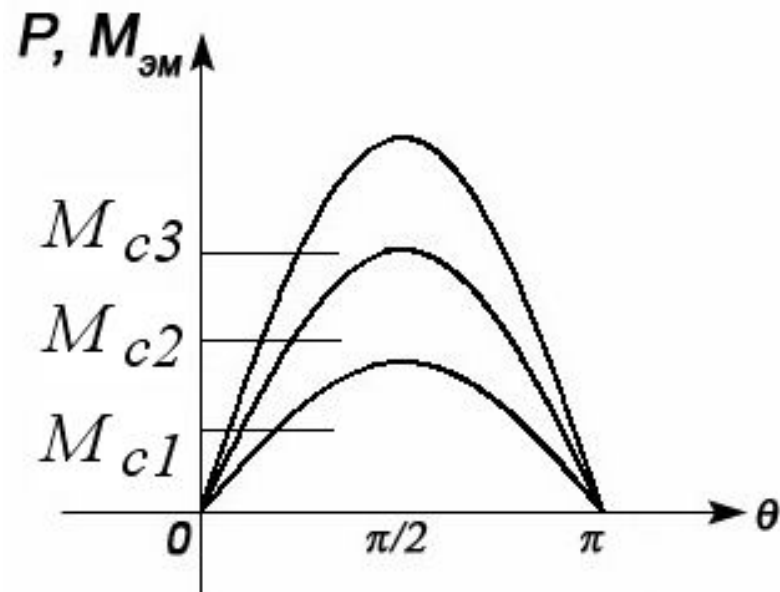
### Активная мощность СД

$$P = M \cdot \Omega$$

$$M_{вр} = M_c$$

*Активная мощность СД зависит только от нагрузки! Мы не можем ее регулировать!*

При увеличении  $M_c$  увеличивается угол рассогласования и  $M_{вр}$  (свойство саморегулирования СД). При больших  $M_c$  СД может выпасть из синхронизма. Чтобы этого не происходило, повышают ток возбуждения ротора.

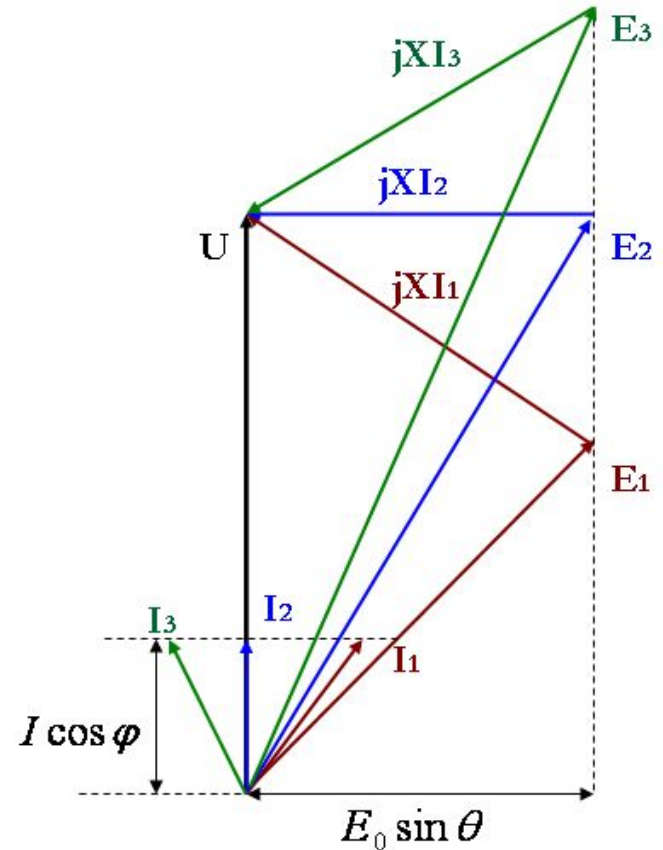


# 4.10. Регулирование реактивной мощности СД

*Реактивная потребляемая СД  
из сети мощность  
регулируется током  
возбуждения ротора (как в СГ)*

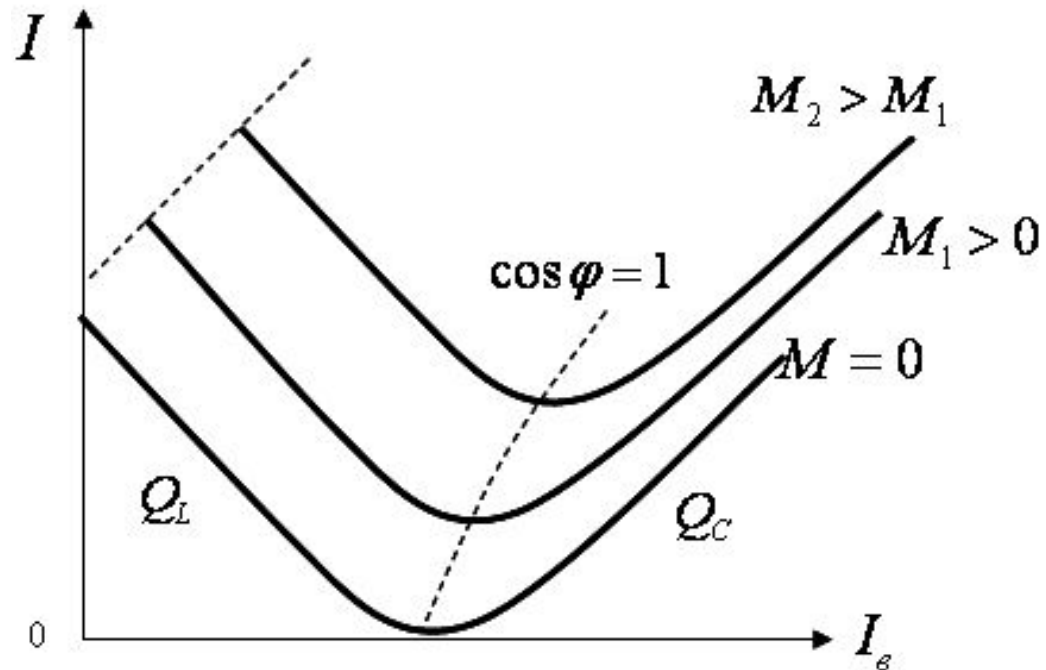
*При  $P = const$  и  $U = const$ :*

$$I \cdot \cos \varphi = const, E_0 \cdot \sin \theta = const$$



## 4.10. Регулирование реактивной мощности СД

- При малом токе возбуждения потребляемая мощность носит индуктивный характер, при большом – емкостной
- Обычно СД работает с перевозбуждением, чтобы улучшить коэффициент мощности энергосистемы (такой СД, работающий без нагрузки на валу называется синхронным компенсатором)





## 4.11. Пуск СД

- СД не имеет пускового момента!
- СД пускают как асинхронный

Во время пуска обмотку возбуждения ротора замыкают на пусковой реостат. После того, как двигатель разгонится до частоты, близкой к синхронной, обмотку ротора подключают к источнику напряжения и СД втягивается в синхронизм.

