



# синхронные машины

## Общие сведения

Синхронные машины работают как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

В зависимости от типа привода синхронные генераторы получили и свои названия.

**Турбогенератор** - это генератор, приводимый в движение паровой турбиной.

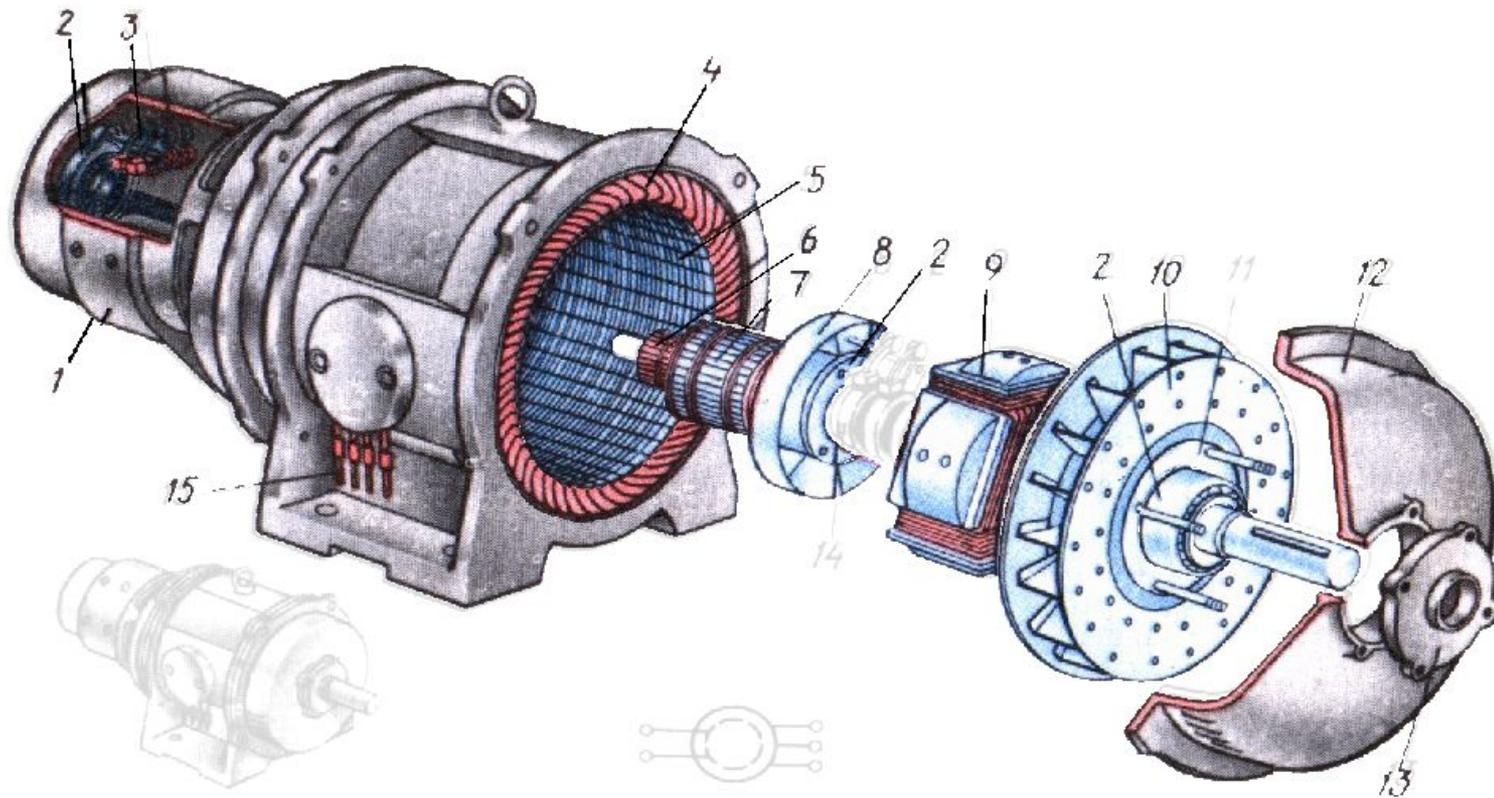
**Гидрогенератор** вращает водяное колесо.

**Дизель** - генератор механически связан с двигателем внутреннего сгорания.

**Синхронные двигатели широко применяют для привода мощных компрессоров, насосов, вентиляторов.**

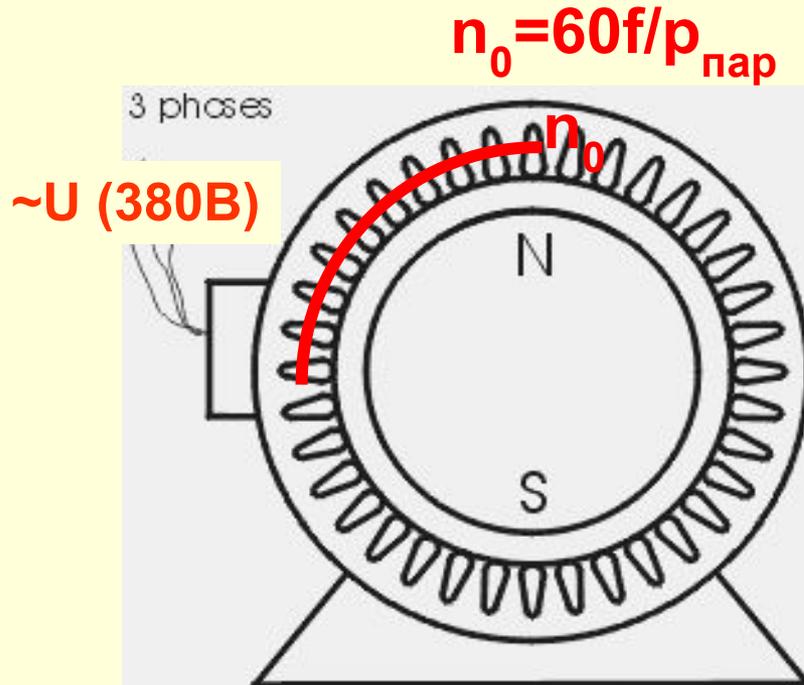
**Синхронные микродвигатели используют для привода лентопротяжных механизмов регистрирующих приборов, магнитофонов и т.д.**

# Устройство синхронной машины



**Синхронная машина (СМ)** – это машина переменного тока, у которой **магнитное поле и ротор** имеют **одинаковую** частоту вращения ( $n_0 = 60f/p$ )

**Статор СМ** аналогичен статору АД и служит для создания вращающегося магнитного поля

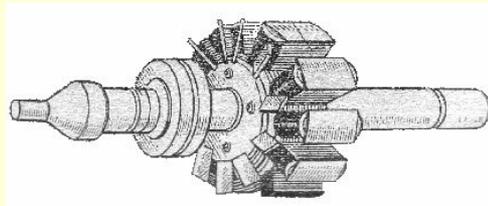
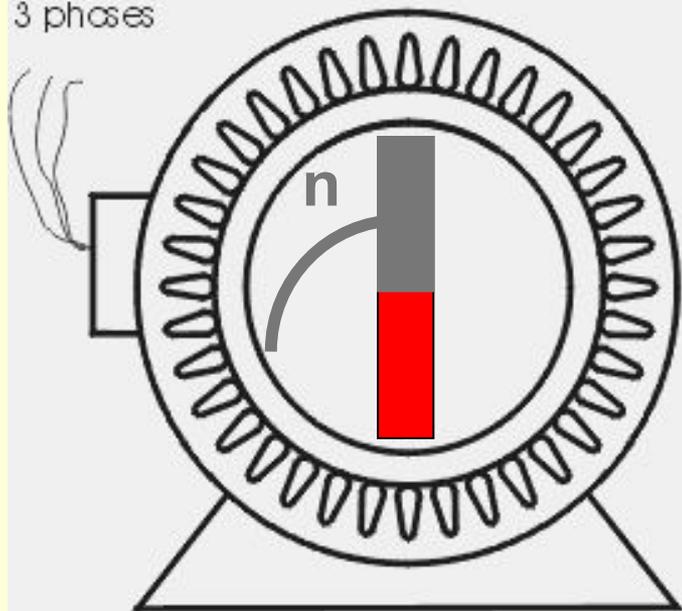


# Устройство ротора СМ

**Ротором** СМ является электромагнит с ОВ (или постоянный магнит), которая получает питание от источника **постоянного тока** через неподвижные щетки и контактные кольца. Ротор СМ имеет свой магнитный поток.

**~U (380В)**

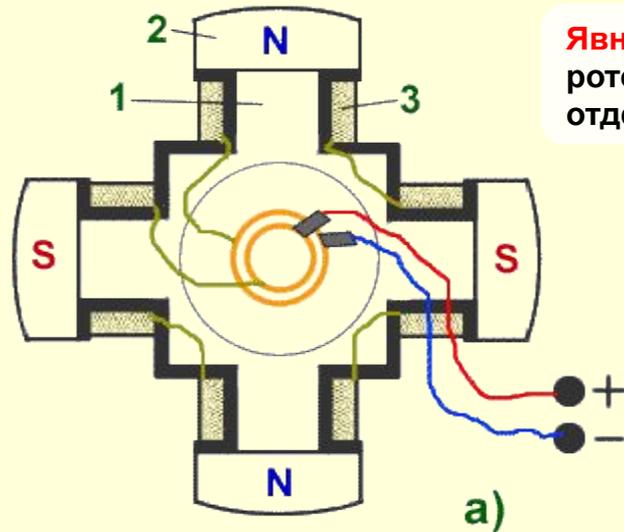
3 phases



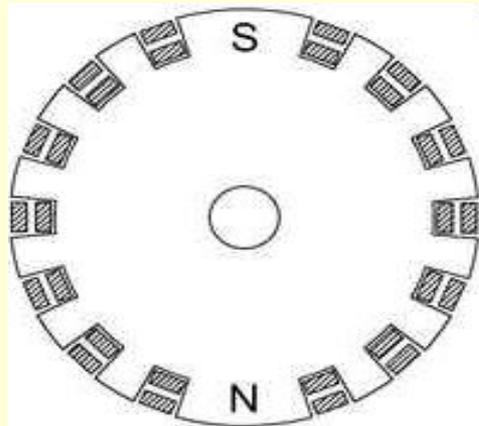
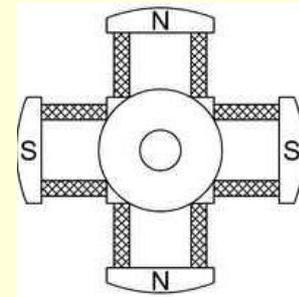
Название «**синхронная машина**» связано с тем, что ротор вращается **с такой же** скоростью, с какой вращается магнитное поле, т.е. **синхронно** с полем.

# Явнополюсный и неявнополюсный роторы СМ

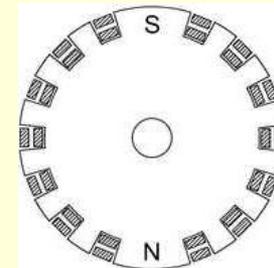
1 – полюс ротора; 2 – полюсный наконечник; 3 – обмотка возбуждения;



**Явнополюсный** – полюса ротора располагаются отдельно



**Неявнополюсный** – полюса ротора сформированы обмоткой распределенной в пазах цилиндрического ротора



**Быстроходными** бывают, как правило, турбогенераторы. Количество пар магнитных полюсов у них равно единице. Чтобы такой генератор вырабатывал электрический ток стандартной частоты  $f = 50$  Гц, его необходимо вращать с частотой

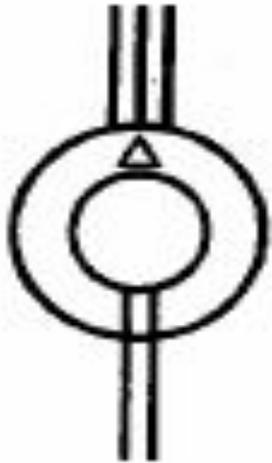
$$n = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ об/мин}$$

На гидроэлектростанциях вращение ротора зависит от движения водяного потока. Но и при медленном вращении такой генератор должен вырабатывать электрический ток стандартной частоты  $f = 50$  Гц. Поэтому для каждой гидроэлектростанции конструируется свой генератор на определенное число магнитных полюсов на роторе.

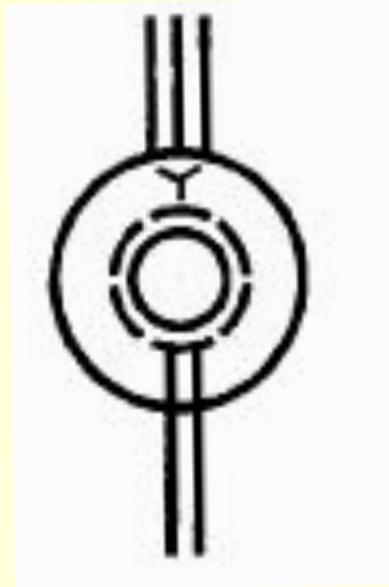
В качестве примера приведем параметры синхронного генератора, работающего на Днепровской гидроэлектростанции. Водяной поток вращает ротор генератора с частотой  $n = 33,3$  об / мин. Задавшись частотой  $f = 50$  Гц, определим число пар полюсов на роторе:

$$p = 60 \cdot f / n = 60 \cdot 50 / 33,3 = 96 \text{ пар}$$

# Обозначения СМ на электрической схеме



Трёхфазная синхронная  
неявнополюсная машина.

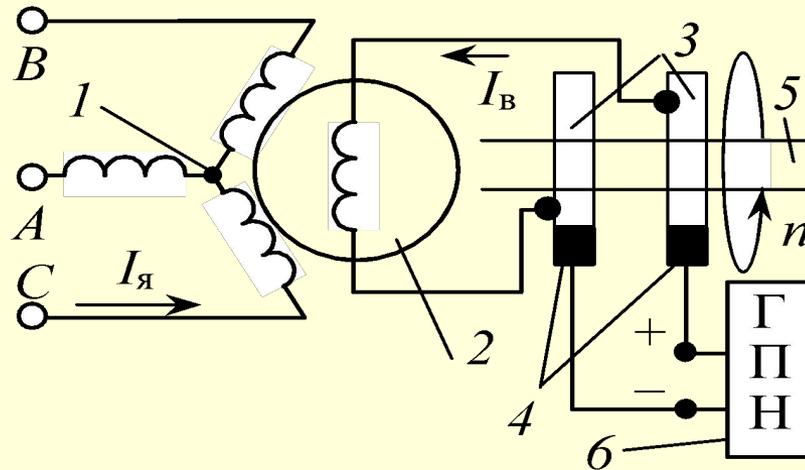


Трёхфазная синхронная  
явнополюсная машина.



Трёхфазная синхронная  
машина с возбуждением  
от постоянных магнитов

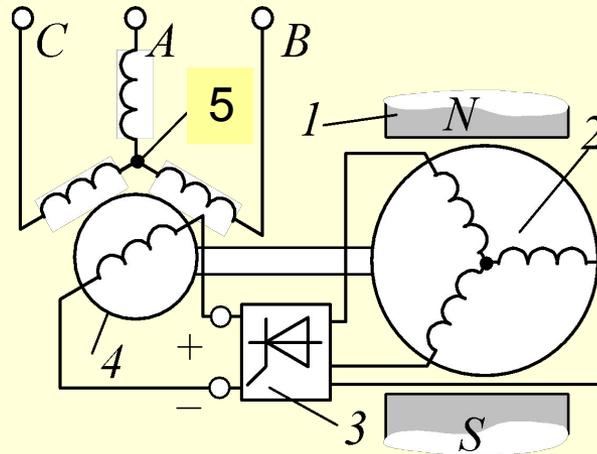
# Электрическая схема синхронной машины



- 1 – трехфазная обмотка якоря (статора);
- 2 – обмотка возбуждения;
- 3 – контактные кольца;
- 4 – щетки;
- 5 – вал ротора;
- 6 – генератор постоянного напряжения.

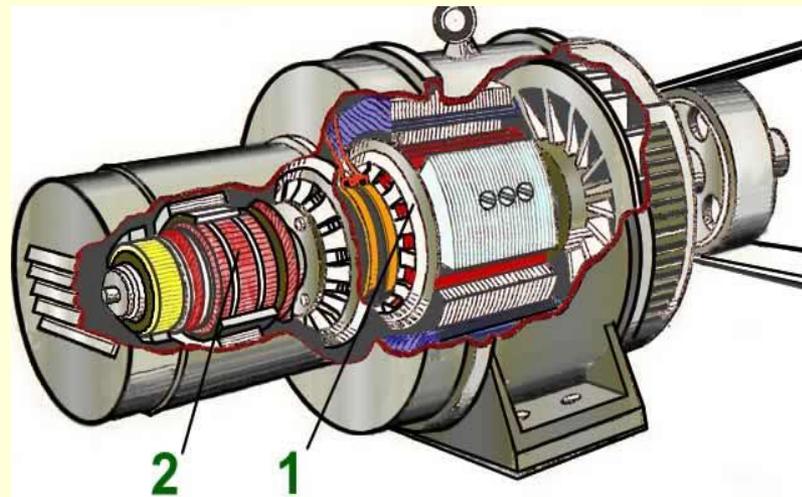
Мощность системы возбуждения составляет 1–3% от мощности якоря.

## Схема машины с «бесщеточным» возбуждением



- 1 - неподвижные постоянные магниты маломощного СГ;
  - 2 - трехфазная обмотка маломощного СГ;
  - 3 – трехфазный выпрямитель;
  - 4 – обмотка возбуждения основной синхронной машины.
  - 5 – обмотка статора (якоря) основной СМ.
- Отсутствие скользящего контакта щетки – кольца повышает надежность системы возбуждения.

# Принцип работы синхронного генератора



От приводного двигателя

← Мвр

Ротор генератора приводится во вращение с постоянной частотой  $n$  от приводного двигателя, в качестве которого может выступать паровая или газовая турбина, двигатель внутреннего сгорания или электрический двигатель. Если в обмотку ротора подается ток возбуждения, то вместе с ротором вращается магнитное поле возбуждения, которое согласно закону электромагнитной индукции наводит в неподвижной трехфазной обмотке якоря (статора) трехфазную синусоидальную систему ЭДС с действующим значением  $E_0$ :

$$E_0 = 4,44K_{об} f w \Phi_{мв}$$

где  $K_{об}$  – обмоточный коэффициент якоря;

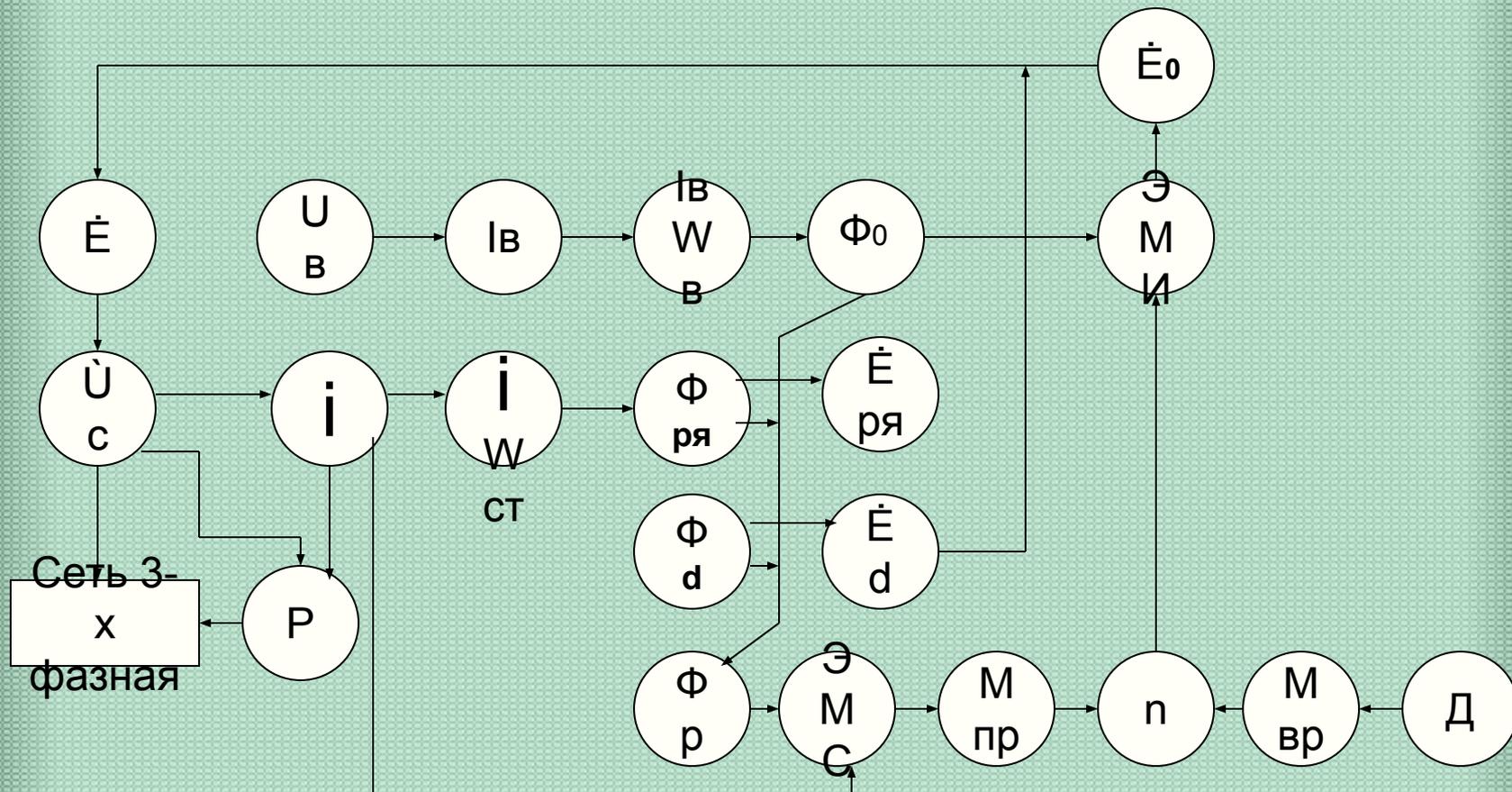
$f = pn/60$  – частота синусоидальных ЭДС якоря;

$w$  – число витков одной фазы обмотки якоря;

$\Phi_{мв}$  – амплитуда потока возбуждения.

Действующее значение каждой фазной ЭДС –  $E_A, E_B, E_C$  равны по значению и отстают друг от друга на угол  $120^\circ$ .

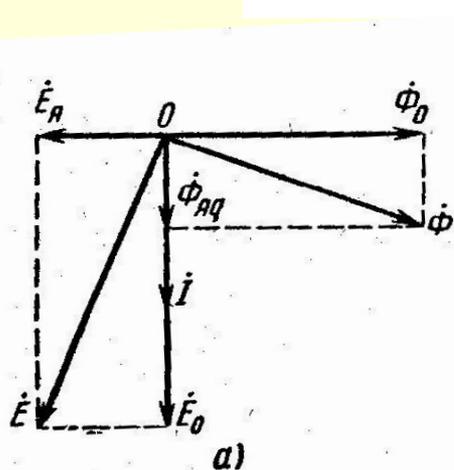
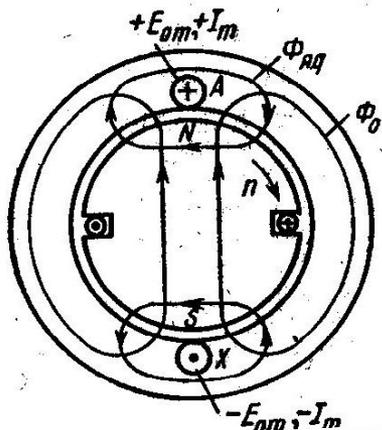
# Условно-логическая схема синхронного генератора



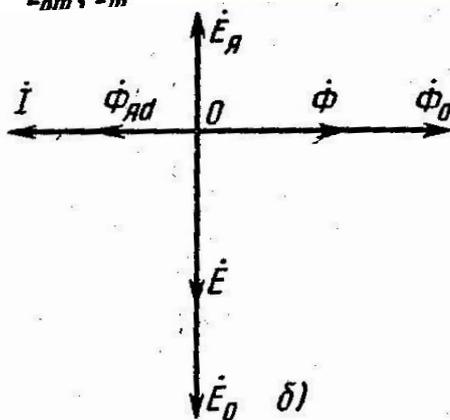
# Реакция якоря синхронного генератора

При подключении обмотки якоря к трехпроводной сети под действием ЭДС по её обмотке протекает ток якоря  $I_a$ , создающий магнитный поток  $\Phi_a$ .

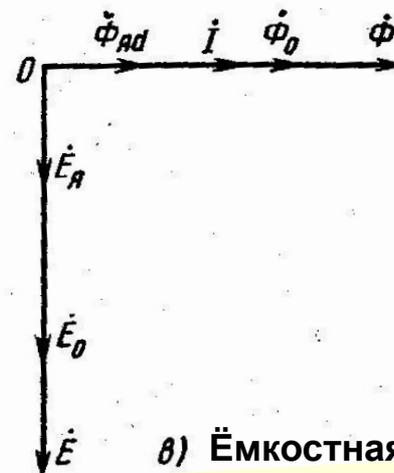
Воздействие магнитного потока якоря на основной магнитный поток называется реакцией якоря и зависит от характера нагрузки, т. е. от угла сдвига фаз между ЭДС и током якоря.



Активная нагрузка  
 $\varphi = 0^\circ$

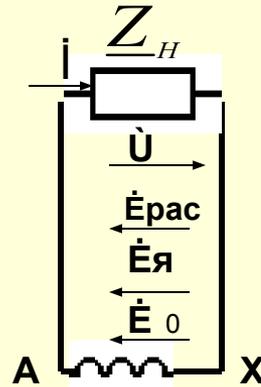


Индуктивная нагрузка  
 $\varphi = 90^\circ$



Ёмкостная нагрузка  
 $\varphi = -90^\circ$

# Упрощенная схема и векторная диаграмма синхронного генератора. Уравнение ЭДС синхронного генератора



По второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи фазы обмотки статора:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_я + \dot{E}_{рас} = \dot{U} + R_я \dot{I}, \text{ где}$$

$$\dot{E}_{рас} = -jX_{рас} \dot{I};$$

$$\dot{E}_я = -jX_я \dot{I}$$

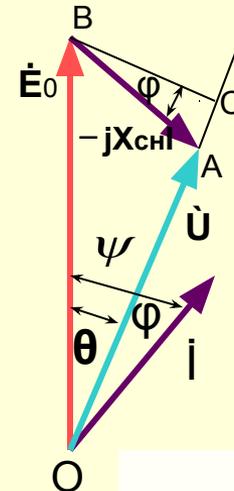
$X_{рас} + X_я = X_{сн}$  - синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора

## Упрощенное уравнение ЭДС СГ

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jX_{сн} \dot{I}$$

Опустив перпендикуляр из точки B на продолжение вектора напряжения  $\dot{U}$  получаем два прямоугольных треугольника:  $\Delta ABC$  и  $\Delta OBC$ .

## Векторная диаграмма СГ



## Электромагнитная мощность, момент и угловая характеристика синхронного генератора

Можно считать, что электромагнитная мощность СГ равна полезной мощности:

$$P_{эм} = P_1 = 3UI \cos \varphi$$

Из прямоугольных  $\Delta \Delta$  ABC и OBC векторной диаграммы СГ имеем:

$$|BC| = |AB| \cos \varphi \text{ или } |BC| = E_0 \sin \theta = jX_{сн} I \cos \varphi$$

Тогда:

$$P_{эм} = 3UE_0 \sin \theta / X_{сн}, \text{ где}$$

$\theta$  – угол между осевыми линиями полюсов ротора и статора

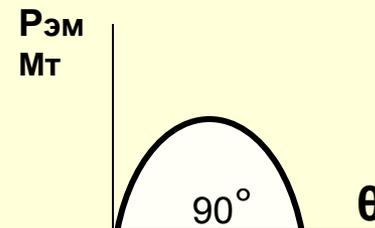
$$\theta_{ном} = 20^\circ \dots 35^\circ$$

Электромагнитный (тормозной) момент СГ

$$M = P_{эм} / \Omega$$

$$M = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_{сн}}$$

Угловая характеристика

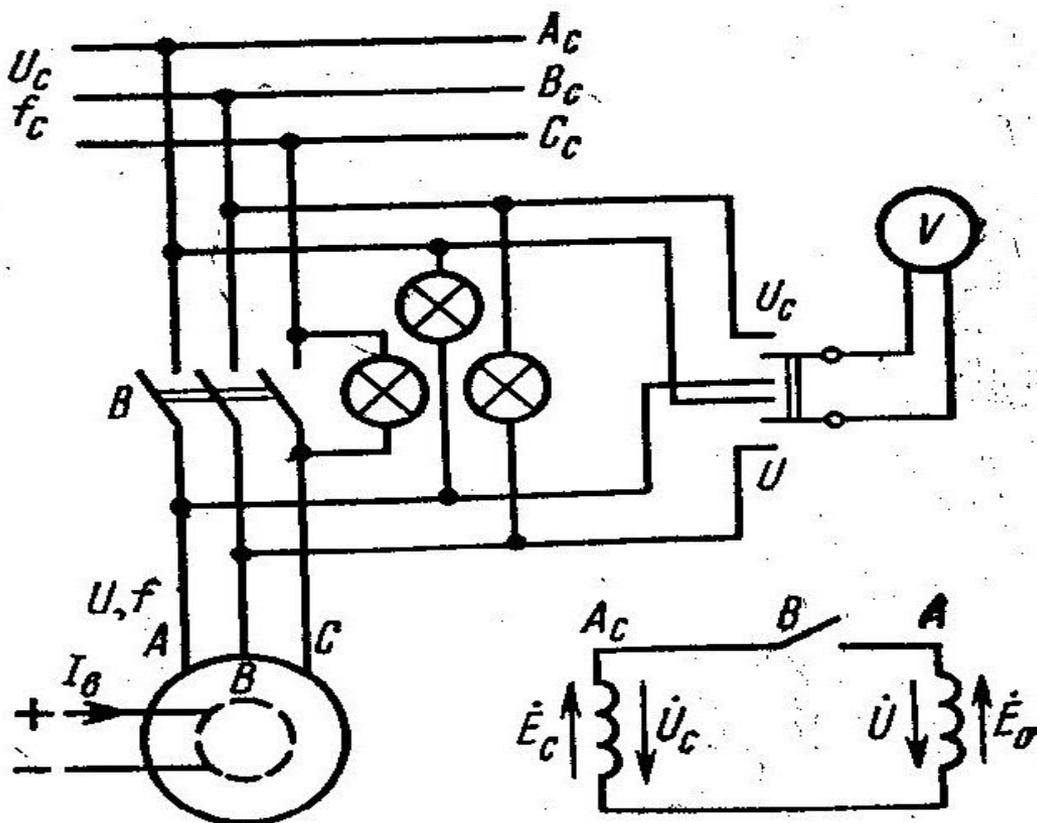


# Параллельная работа синхронной машины с сетью

В режиме холостого хода машины напряжение  $U = E_0$ . Включают машину выключателем в тот момент, когда мгновенное значение напряжения сети и напряжение обмотки статора синхронной машины после включения будет оставаться равным нулю. Условие включения:

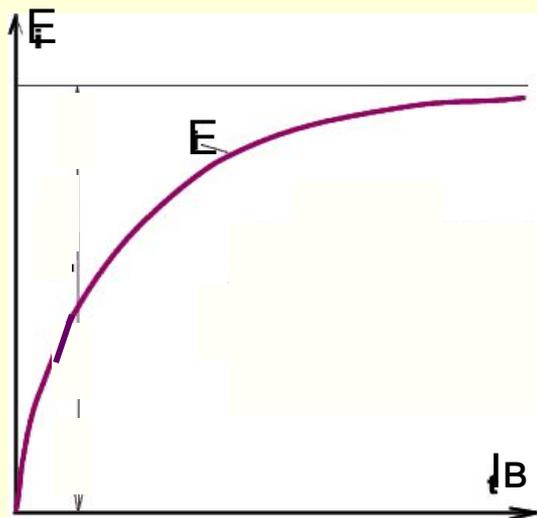
$$u_c = U_{c\max} \sin(\omega c t + \Psi_{uc}) ; u_r = U_{r\max} \sin(\omega r t + \Psi_{ur}) \text{ выполняется, если:}$$

- 1) значения напряжения синхронного генератора и сети равны;
- 2) начальные фазы напряжения сети и генератора равны;
- 3) частота напряжения синхронного генератора равна частоте напряжения сети;
- 4) чередование фаз синхронного генератора и сети одинаковы..

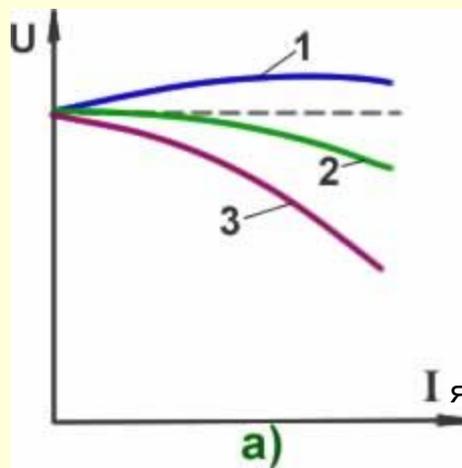


# Характеристики синхронного генератора

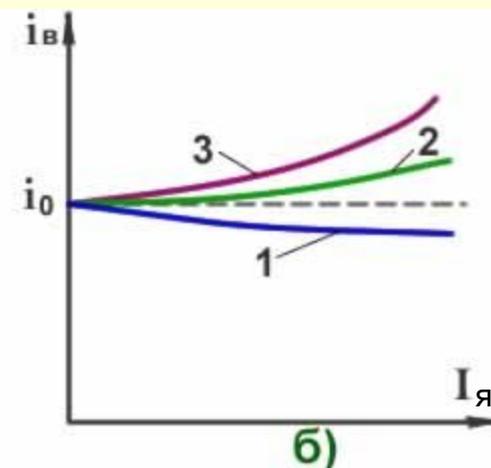
Характеристика х.х.  
 $E = f(I_B)$  при  $I_A = 0$ ;  
 $n = \text{const}$



Внешняя характеристика  
 $U = f(I_A)$  при  $I_B = \text{const}$ ;  
 $\varphi = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$



Регулировочная характеристика  
 $I_B = f(I_A)$  при  
 $U = \text{const}$ ;  $\varphi = \text{const}$ ;  
 $f = \text{const}$

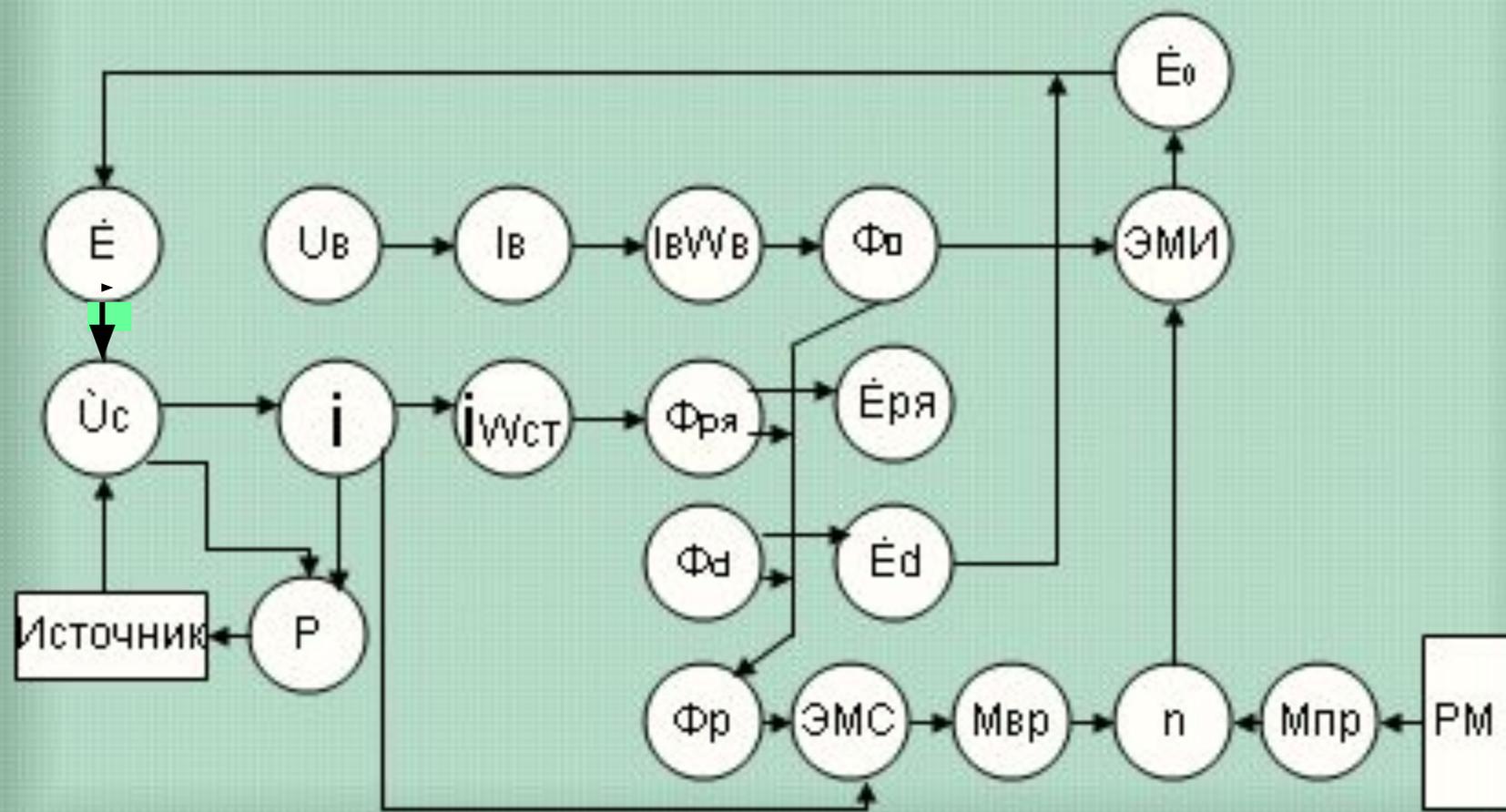


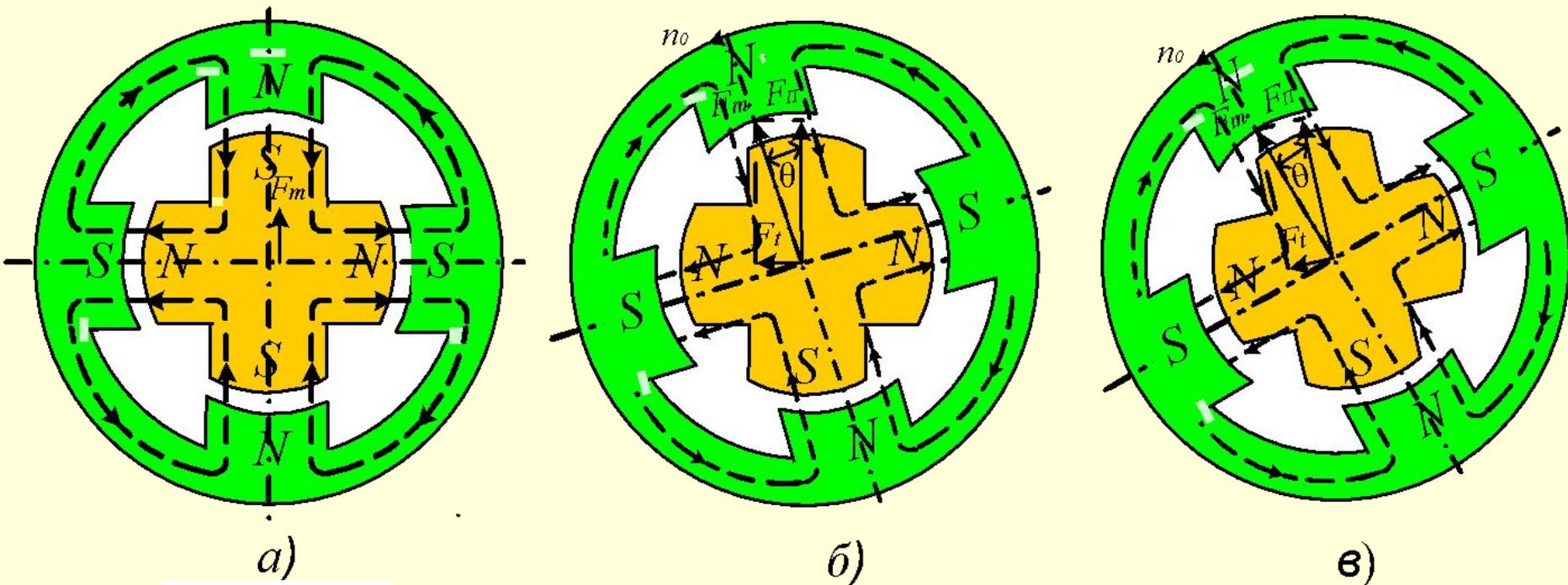
- 1 – емкостная нагрузка
- 2 – активная нагрузка
- 3 – индуктивная нагрузка

# Синхронный двигатель



# Условно-логическая схема синхронного двигателя





Упрощенная модель синхронного двигателя (а),  
возникновение электромагнитного момента на роторе (б), (в)

На модели представлены две разделенные воздушным зазором магнитные системы. Внешняя система имитирует вращающееся магнитное поле статора. Будем полагать, что эта система может вращаться относительно своего центра. Внутренняя система модели имитирует ротор и его магнитное поле.

**Предположим, что внешняя система полюсов (магнитное поле статора) неподвижна.**

**Благодаря силам магнитного притяжения ротор расположится так, что его полюсы будут находиться под противоположными полюсами внешней системы (а).**

**При таком расположении силы магнитного притяжения  $F_m$  направлены по оси полюсов и не создают электромагнитного момента.**

**Пусть внешняя система полюсов начала вращение с частотой  $n_0$ . В начальный момент эта система сместится относительно ротора на некоторый угол  $\theta$  (б).**

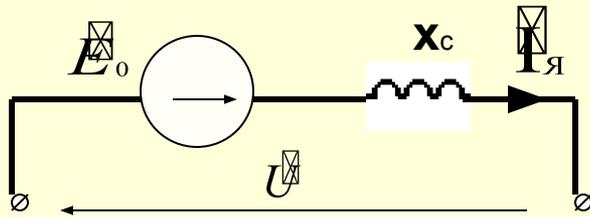
**Тогда вектор силы магнитного притяжения  $F_m$  также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь  $F_m = F_n + F_t$ . Сила  $F_n$  – сила притяжения индуктора.**

**Сила  $F_t$  называется тангенциальной. Она направлена перпендикулярно оси полюса.**

**Совокупность составляющих  $F_t$ , действующих на все полюсы ротора, создает вращающий момент  $M$ . Под действием момента  $M$  ротор приходит в движение и в дальнейшем вращается синхронно с внешней системой, с частотой  $n_0$  (в).**

**Обязательным условием возникновения вращающего момента в синхронном двигателе является отставание магнитного поля ротора от вращающегося магнитного поля статора на угол  $\theta$ .**

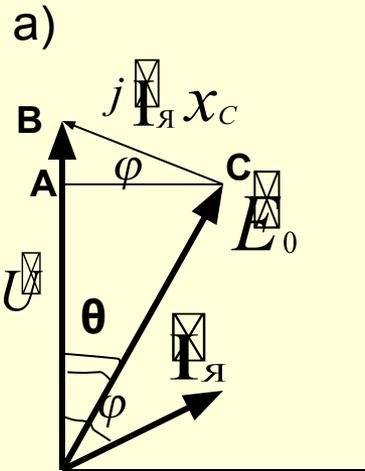
# Упрощенная схема замещения (а), векторная диаграмма (б), уравнение ЭДС, электромагнитный момент и угловая характеристика (в) синхронного двигателя



В двигательном режиме ток якоря потребляется из сети, ЭДС  $E_0$  направлена навстречу току  $I_{я}$  (противоЭДС  $E_0$ ).

Схема замещения фазной обмотки якоря показана на рисунке а и для нее:

$$U = E_0 + jI_{я} X_{сн}$$



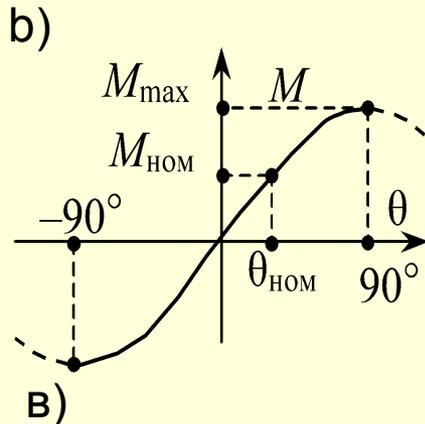
Пренебрегая потерями, можно приближенно считать, что механическая мощность  $P_{мех}$  на валу двигателя равна активной мощности  $P$ , потребляемой двигателем из сети, т. е.

$$M\Omega = 3UI_{я} \cos\varphi$$

где  $M$  – вращающий электромагнитный момент двигателя;  
 $\Omega = \pi n/30$  – угловая скорость ротора;  
 $U$  – фазное напряжение статора.

Поскольку проекции векторов  $E_0$  и  $jI_{я} X_{сн}$  на горизонтальную ось одинаковы, т. е.  $X_{сн} I_{я} \cos\varphi = E_0 \sin\theta$ , то момент  $M$

$$M = \frac{3UE_0 \sin\theta}{\Omega X_{сн}}$$



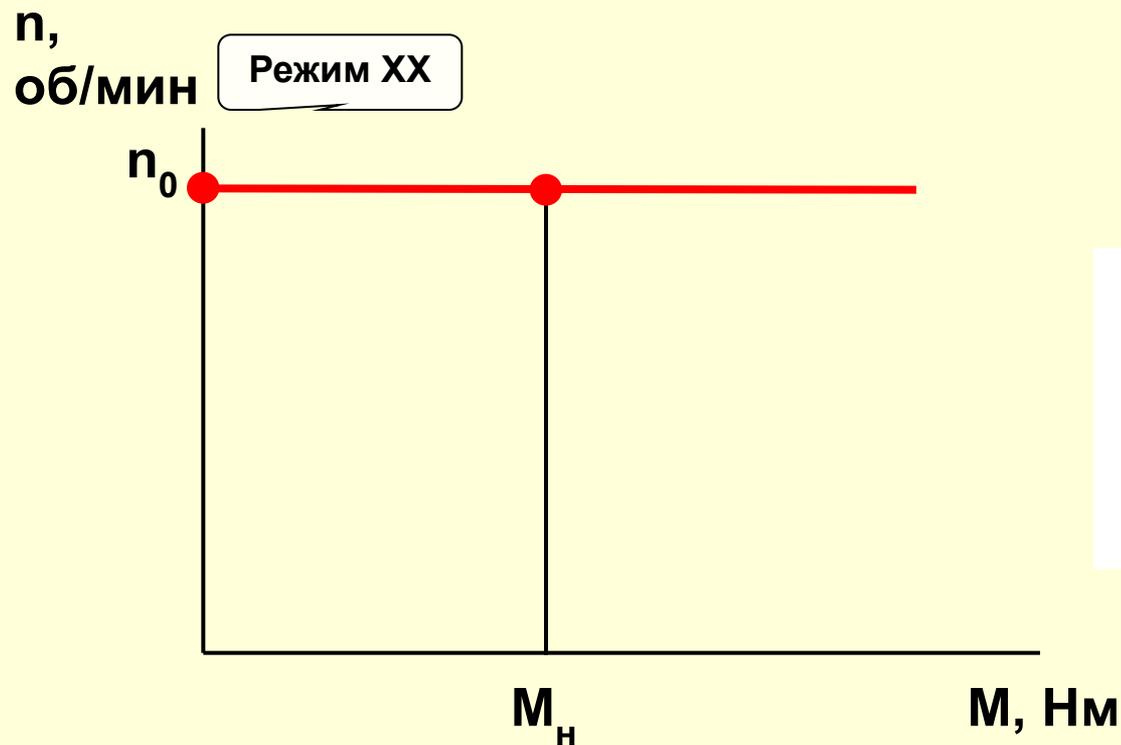
# Изменение угла $\theta$ при увеличении нагрузки на валу СД

В рабочем режиме синхронного двигателя  $U_c = \text{const}$  и  $X_c = \text{const}$ . При этом ток возбуждения  $I_v$  и ЭДС  $E_0$  постоянны, следовательно, электромагнитная мощность определяется только углом  $\theta$ .

$$M = \frac{3UE_0 \sin\theta}{\Omega X_{CH}}$$

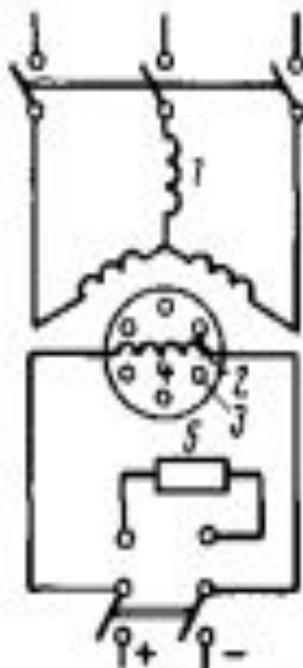
Пусть на валу двигателя имеется какая-то нагрузка, ротор вращается с постоянной частотой  $n$  и между осевыми линиями полюсов сохраняется постоянный угол  $\theta$ . При увеличении нагрузки ротор двигателя начинает тормозиться и угол  $\theta$  увеличивается. Одновременно с этим увеличивается и электромагнитная мощность, которая поступает из сети. При увеличении  $\theta$  электромагнитная мощность уравнивает новую нагрузку на валу и ротор двигателя продолжает вращаться с той же частотой  $n$ , но при новом значении  $\theta$ . При уменьшении нагрузки все происходит в обратном порядке.

# Механическая характеристика СД



**Номинальный**  
момент нагрузки на  
валу

## Асинхронный пуск синхронного двигателя



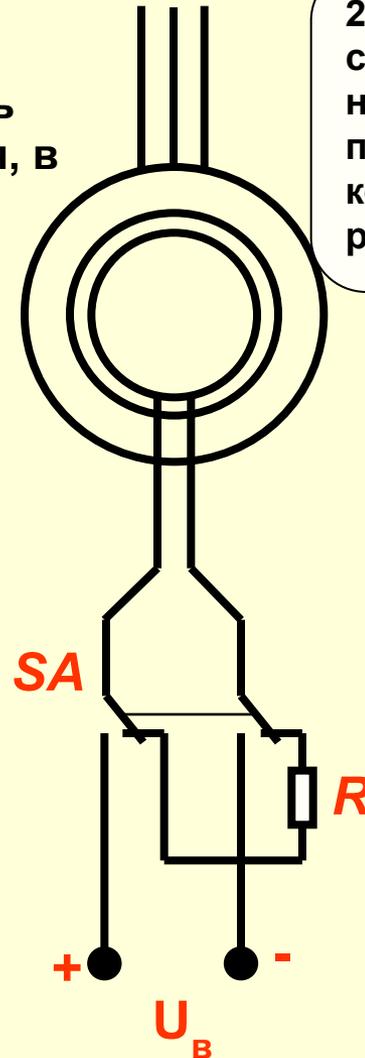
# Асинхронный пуск СД

Запуск СД **невозможен прямым включением**  $\sim U$  (380В) **в сеть** из-за инерционности ротора

Для запуска СД ротору необходимо сообщить скорость, близкую к скорости вращения поля, в результате чего двигателя втянется в синхронизм и ротор будет вращаться с синхронной скоростью  $n_0$

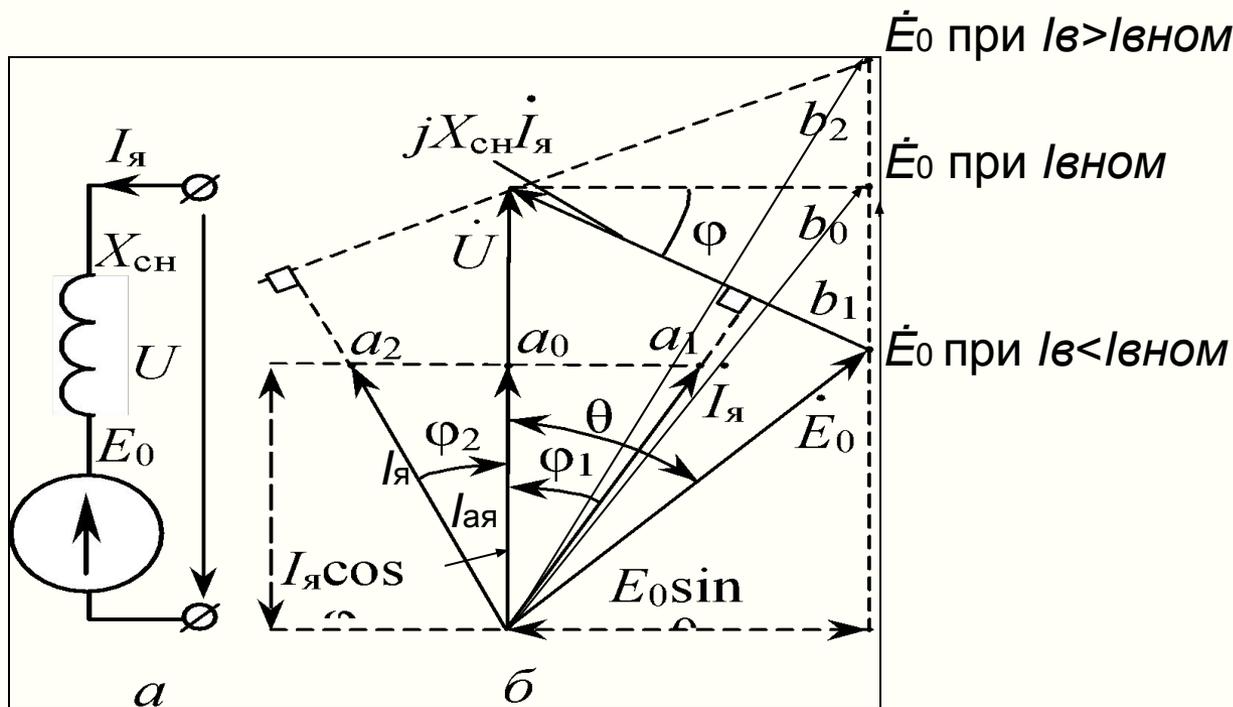
1. Перед пуском переключатель **SA** находится в положении, при котором **ОВ** замыкается на ограничительный резистор **R**

3. После достижения предсинхронной скорости переключателем **SA** подключают обмотку ротора (**ОВ**) к сети постоянного тока  **$U_B$** , в результате чего СД втягивается в синхронизм



2. После подключения статора к сети  $\sim U$  СД начинает разгоняться подобно АД с короткозамкнутым ротором

# Регулирование коэффициента мощности СД

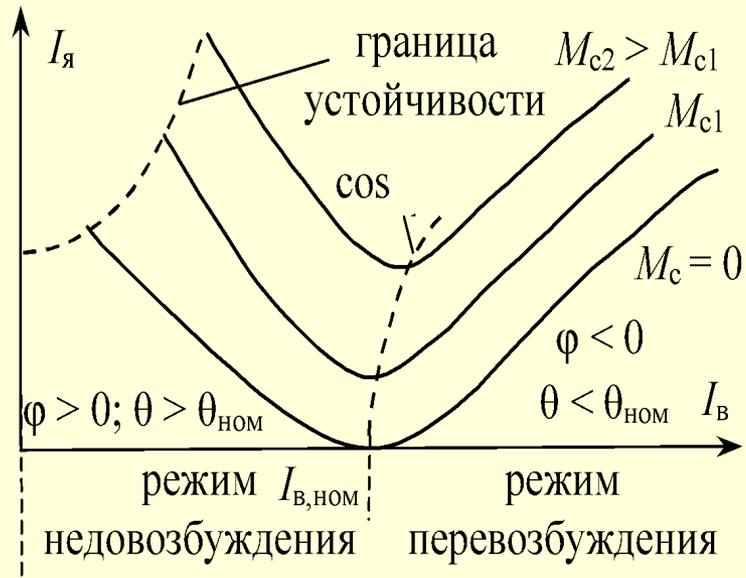


При увеличении тока возбуждения ток якоря увеличивается из-за появления емкостной составляющей тока

При номинальном токе возбуждения ток якоря чисто активный  $I_{я}$

При уменьшении тока возбуждения ток якоря увеличивается из-за появления индуктивной составляющей тока

## U – образные характеристики СД



## Технические данные синхронных двигателей

Тип	<b>P<sub>ном</sub></b> , кВт	<b>U<sub>ном</sub></b> В	<b>n</b> <i>об/мин</i>	<b>η</b>	<b>cos φ</b>	I <sub>п</sub> /I <sub>р</sub>	M <sub>п</sub> /M <sub>н</sub>	Вес, т		
МС321	640	3000	1000	0,936	0,8	4,6	1,2	5,2		
МС322-16/6	2700	6000	1000	0,964	0,8	6,1	1,2	13,0		
МС321-6/10	370	3000	600	0,923	0,8	4,8	1,7	5,4		
МС324-20/10	6550	6000	600	0,968	0,8	<b>5,5</b>	1,2	38,4		
МС322-4-20	175	3000	300	0,875	0,8	4,3	1,6	5,1		
МС324-12/20	1970	6000	300	0,944	0,8	4,5	1,0	27,0		
МС324-4/36	310	3000	167	0,880	0,8	2,4	0,85	9,8		
СТМ-6000-2	6000	6000	3000	0,967	0,9	8,3	2,4	18,8		

# Применение СД



**Трехфазный СД серии  
СД2**



**Трехфазный СД с  
безщеточной системой  
возбуждения серии СДБМ  
(для привода насосов и  
лебедок буровых установок в  
нефтяной и газовой  
промышленности)**

# Достоинства и недостатки СД



## Достоинства

1. Постоянная частота вращения
2. Высокий КПД (90-95%)
3. Коэффициент мощности близок к 1 ( $\cos\varphi \sim 1$ )
4. Возможность использования СД в качестве генератора
5. Возможность регулировки перегрузочной способности двигателя за счет изменения тока возбуждения  $I_v$ ;
5. Абсолютная жесткость механической характеристики;
6. Меньшая зависимость вращающего момента от уровня напряжения сети по сравнению с АД;
8. Работоспособность при большем износе подшипников и менее точном монтаже ротора благодаря большому воздушному зазору между ротором и статором.

## Недостатки

- актных колец и щеток
2. Сложность конструкции и, следовательно, большая стоимость;
  3. Необходимость наличия источника постоянного тока (возбудителя или выпрямителя);
  4. Более сложный пуск и необходимость специальной аппаратуры синхронизации;
  5. Возможность только частотного регулирования частоты

В промышленности синхронные двигатели обычно используют при  $P > 100$  кВт. Широкое применение находят синхронные микродвигатели различной конструкции: гистерезисные, индукторные, шаговые.

# Контрольные вопросы

1. На щитках 2-х похожих двигателей есть следующая информация. Какой из ЭД синхронный, а какой асинхронный?



2. В чем заключаются отличия конструкции синхронного двигателя от асинхронного?
3. Как создается вращающий электромагнитный момент синхронного двигателя?
4. Назовите обязательное условие возникновения вращающего момента в синхронном двигателе.
5. Приведите аналитическое выражение для угловой характеристики.
6. Какие физические величины определяют электромагнитный момент синхронного двигателя?
7. Как реагирует синхронный двигатель на изменение нагрузки на валу?
8. Опишите порядок пуска синхронного двигателя.