



# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

# Конструкция синхронных машин

Как следует из названия синхронных машин, скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля, и ротор вращается в сторону вращения поля. Следовательно, скольжение синхронных машин в установившемся режиме работы и частоту токов в роторе можно выразить в следующем виде

$$s = (n_1 - n_2)/n_1 = 0, \quad f_2 = s f_1 = 0.$$

# Конструкция синхронных машин

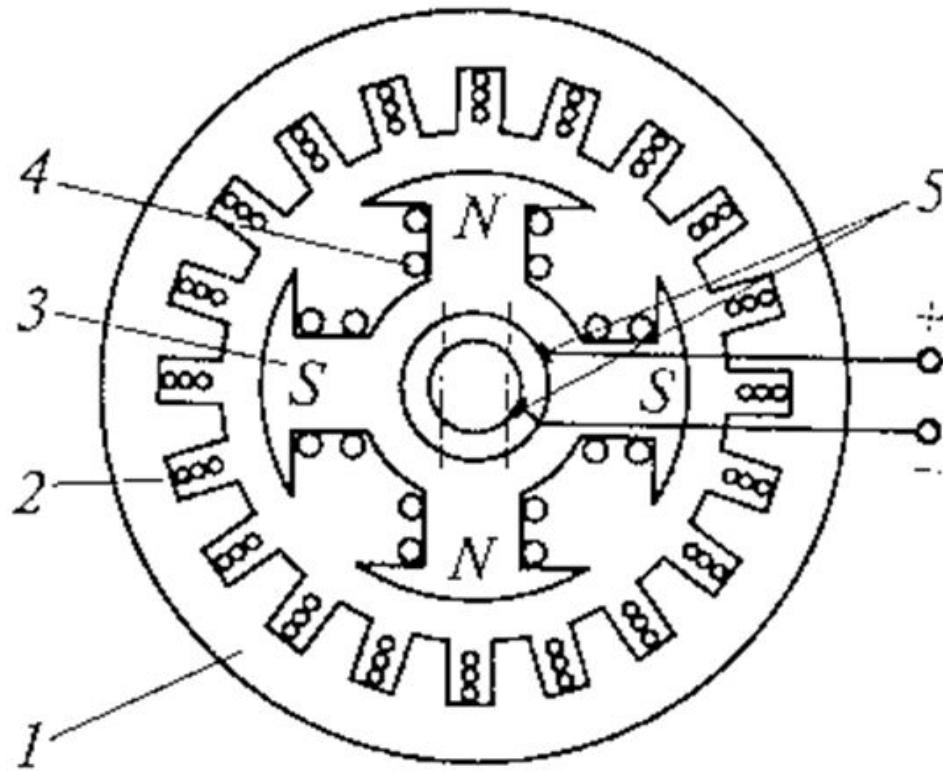
Таким образом, цепь ротора синхронной машины является цепью постоянного тока, а ЭДС наводится только в обмотке статора.

Поэтому в синхронных машинах помимо разделения активной части на неподвижную и подвижную (статор и ротор) применяется другое разделение. Та часть машины, в обмотке которой наводится ЭДС, называется *якорем*, а часть машины постоянного тока – *индуктором*.

# Конструкция синхронных машин

Статор (якорь) синхронной машины не отличается от статора машины асинхронной. Ротор – это часть постоянного тока, поэтому его магнитопровод может выполняться как массивным, так и шихтованным. Обмотка ротора питается от источника постоянного тока и является однофазной. Эта обмотка называется *обмоткой возбуждения*.

# Конструкция синхронных машин

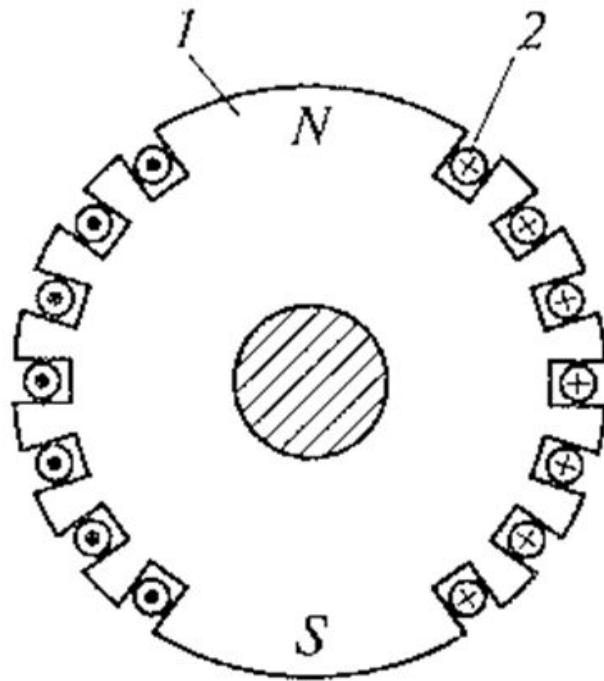


Конструктивная схема машины: 1 - якорь, 2 - обмотка якоря, 3 - полюса индуктора, 4 - обмотка возбуждения, 5 - щетки и контактные кольца

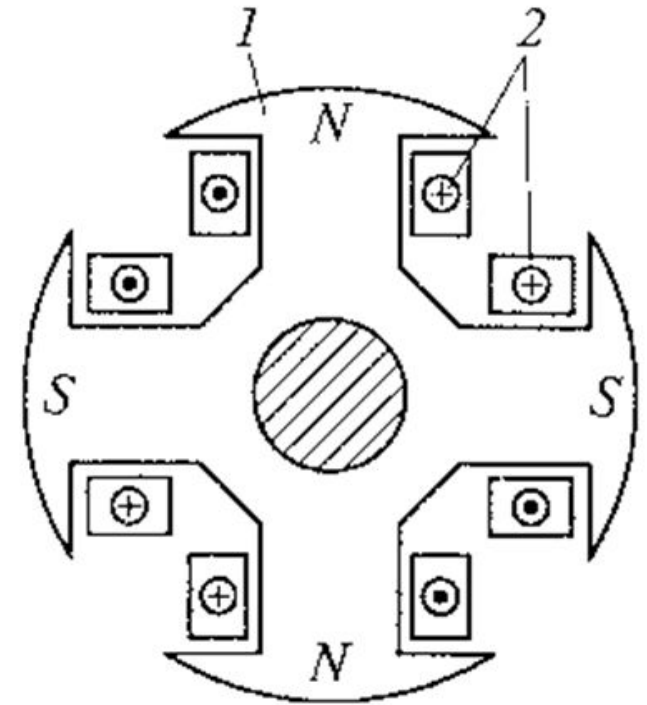
# Конструкция синхронных машин

В зависимости от конструкции магнитопровода ротора синхронные машины делятся на два класса : явнополюсные (ЯСМ) и неявнополюсные (НСМ). Явнополюсный ротор синхронных машин имеет выступающие полюсы, сердечник которых в крупных машинах шихтуется из пластин конструкционной стали толщиной 1- 2 мм, а в машинах небольшой мощности - из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 -1 мм.

# Конструкция синхронных машин



*a*



*б*

Поперечные разрезы роторов неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) машин:  
1 - сердечник, 2 - обмотка возбуждения

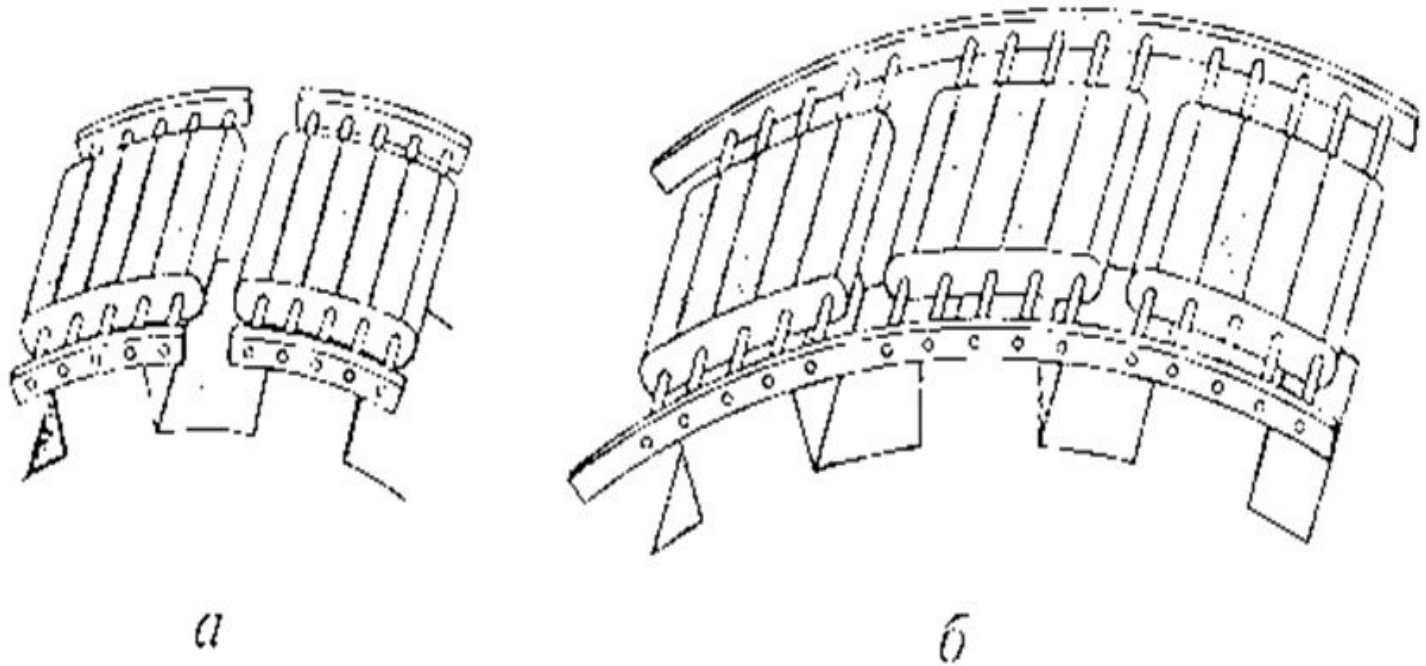
# Конструкция синхронных машин

В магнитном отношении ротор имеет две оси симметрии: продольную  $d$ , совпадающую с осью полюсов и обмотки возбуждения, и поперечную  $q$ , ей перпендикулярную (смещенную на электрический угол  $90^\circ$ ).

На полюсах ротора часто устанавливают демпферную обмотку. Ее размещают в пазах полюсных наконечников. Медные или латунные стержни этой обмотки, уложенные в пазы, по торцам замыкают сегментами так, что образуется короткозамкнутая клетка. Демпферные обмотки делятся на продольные и продольно-поперечные.

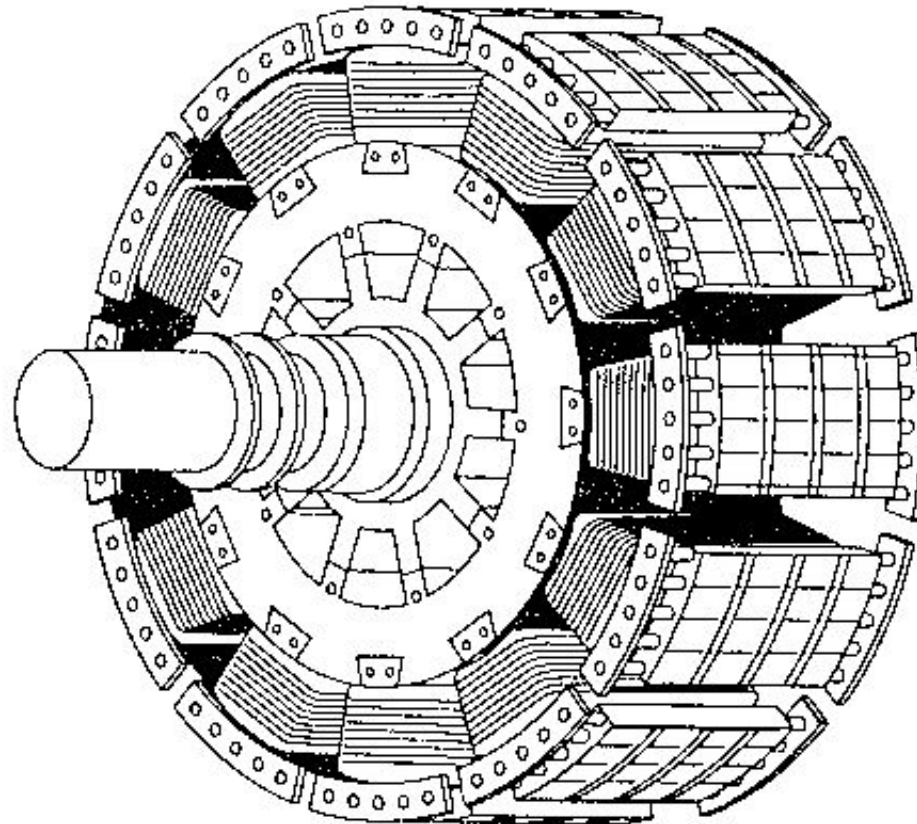


# Конструкция синхронных машин



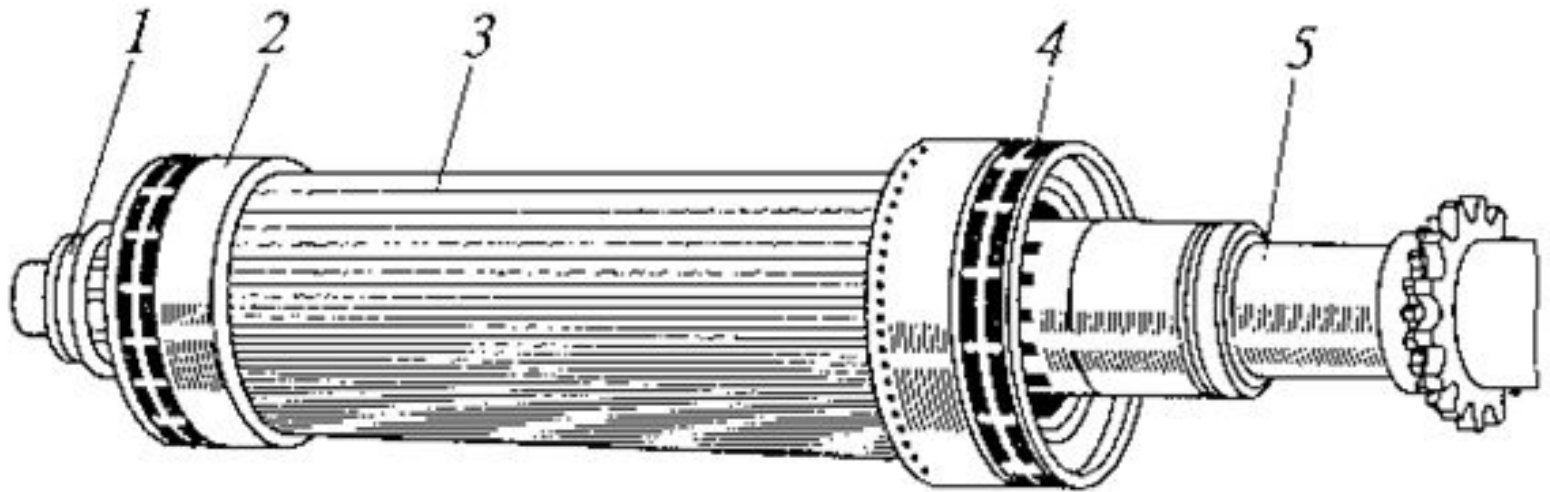
Продольная (а) и продольно-поперечная (б)  
демпферная обмотка ЯСМ

# Конструкция синхронных машин



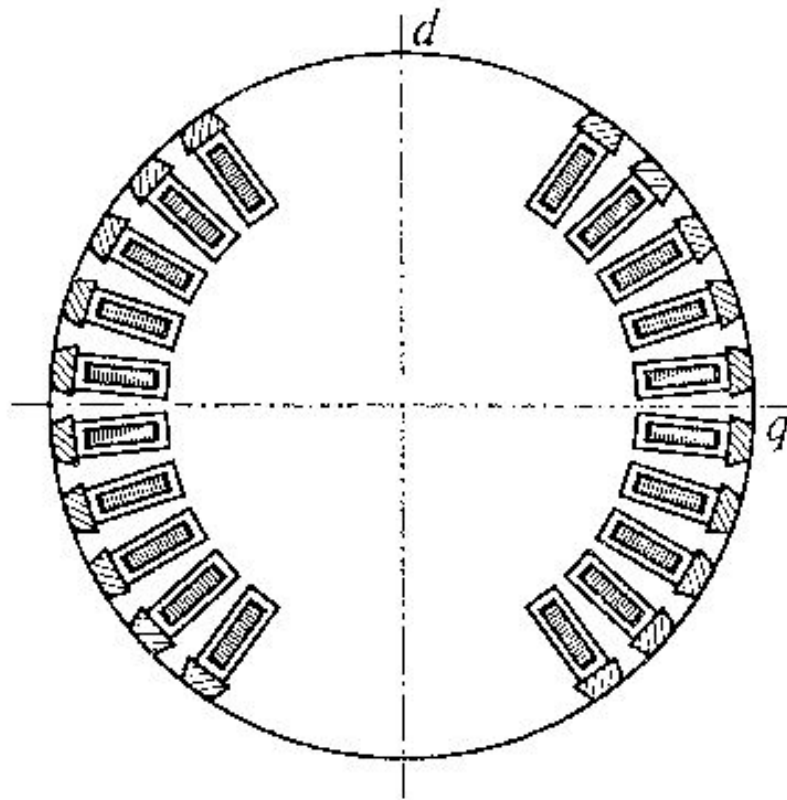
Ротор горизонтальной ЯСМ

# Конструкция синхронных машин



Ротор НСМ (турбогенератора): 1 - контактные кольца, 2 - бандажы обмотки возбуждения, 3 - бочка ротора, 4 - вентилятор, 5 - вал

# Конструкция синхронных машин



Поперечный разрез ротора двухполюсного турбогенератора (НСМ)

# Принцип работы синхронных машин

Если по обмотке возбуждения пропустить постоянный ток, то он создаст постоянное во времени и неподвижное относительно ротора магнитное поле с чередующейся полярностью. При вращении ротора (индуктора) посторонним двигателем его магнитное поле будет вращаться относительно неподвижной обмотки статора (якоря) и наводить в ней переменную ЭДС.

# Принцип работы синхронных машин

Если на якоре уложена симметричная трехфазная обмотка (магнитные оси фаз сдвинуты в пространстве на электрический угол  $120^\circ$ , электрические сопротивления и числа витков фаз одинаковы), то в этой обмотке индуцируется симметричная система ЭДС (равны по модулю и сдвинуты во времени на угол  $120^\circ$ ).

Частота  $f_1$  индуцируемых в обмотках ЭДС равна

$$f_1 = pn_2/60$$

# Принцип работы синхронных машин

Если теперь к трехфазной обмотке якоря синхронного генератора подключить симметричное внешнее сопротивление, то по обмотке будет протекать симметричная система токов, создающих круговое вращающееся магнитное поле якоря (см. раздел 5.3). Частота вращения этого поля относительно статора равна

$$n_1 = 60f_1/p.$$

# Принцип работы синхронных машин

## Работа при холостом ходе

Под холостым ходом синхронного генератора понимается такой режим его работы, при котором ротор вращается приводным двигателем, а ток в обмотке якоря равен нулю. В этом случае магнитное поле машины создается обмоткой возбуждения. Это поле можно разложить на две составляющие: основное поле, магнитные линии которого пронизывают обмотку якоря, и поле рассеяния, магнитные линии которого сцеплены только с обмоткой возбуждения.



# Принцип работы синхронных машин

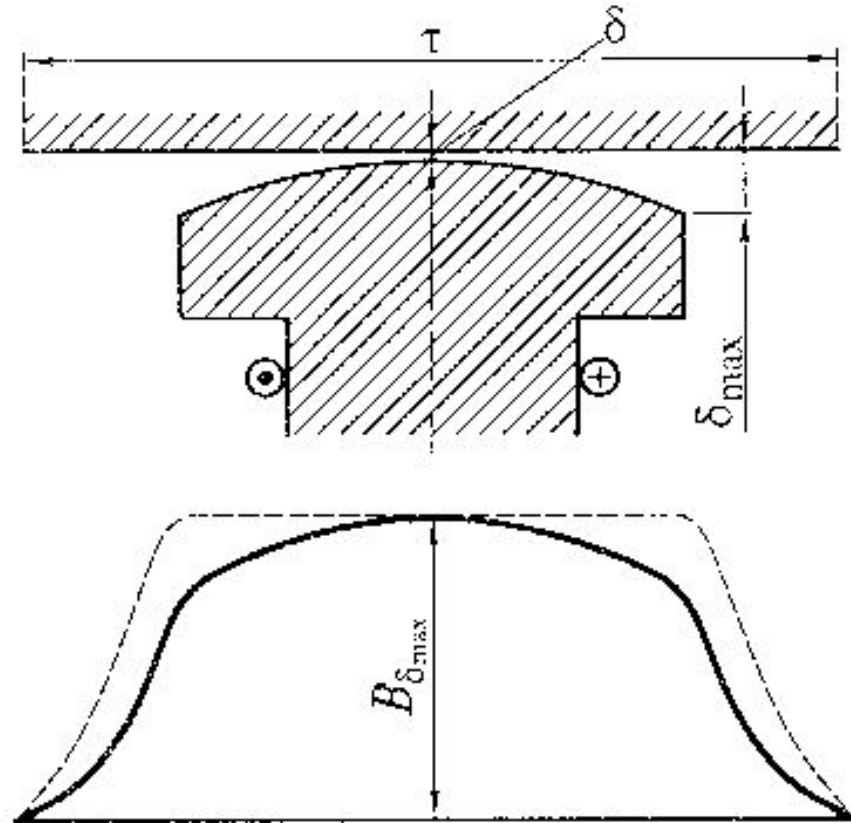
Магнитный поток основного поля при вращении ротора индуцирует в обмотке якоря ЭДС, форма изменения которой во времени должна быть максимально приближена к синусоиде. Это требование обусловлено стандартом качества электрической энергии (ГОСТ 13109-97). Критерием для оценки служит коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, равный

$$K_{\text{НСУ}} = 100 (\sqrt{\sum U_n^2}) / U_{\text{H}}, (\%)$$

# Принцип работы синхронных машин

В явнополюсной синхронной машине МДС постоянна на полюсном делении (обмотка возбуждения сосредоточенная). Поэтому для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы магнитное сопротивление рабочему потоку изменялось обратно пропорционально закону синуса. Для этого зазор между полюсом и статором делают неравномерным, под краями полюса зазор  $\delta_{\max}$  обычно в 1,5 - 2,5 раза больше, чем под его серединой (ось  $d$ ).

# Принцип работы синхронных машин



Распределение индукции в воздушном зазоре явнополюсной синхронной машины

# Принцип работы синхронных машин

В неявнополюсной синхронной машине неизменным остается магнитное сопротивление, так как воздушный зазор постоянен. Поэтому для обеспечения синусоидальности распределения магнитного потока необходимо, чтобы МДС возбуждения изменялась по синусоидальному закону. Для этого обмотку возбуждения делают распределенной. Пренебрегая влиянием пазов можно считать, что МДС обмотки возбуждения и магнитное поле распределены по окружности по трапецеидальному закону.

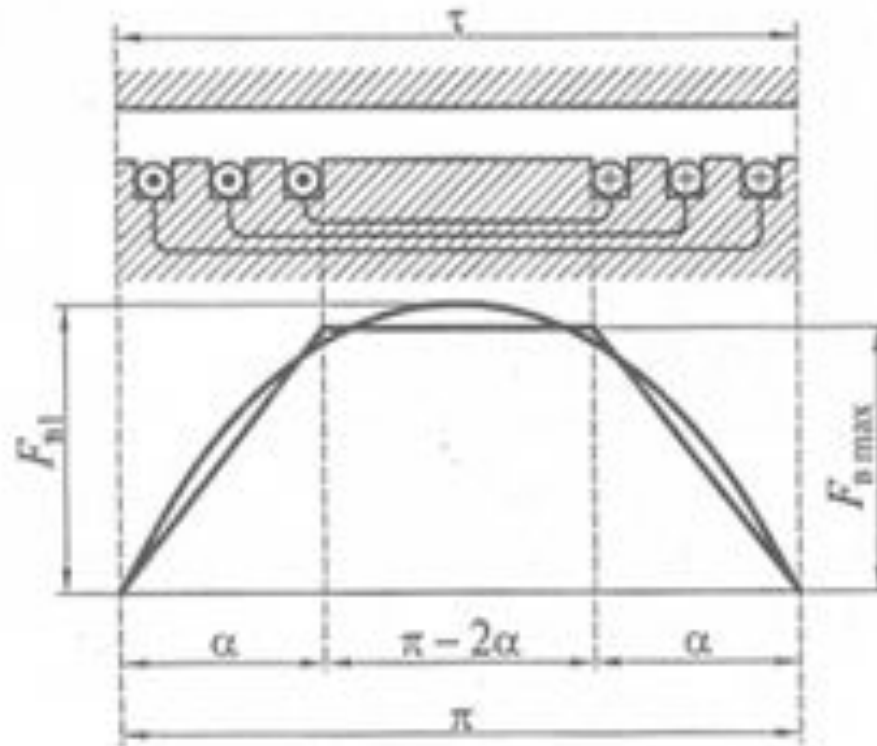
# Принцип работы синхронных машин

Амплитудные значения основных гармоник МДС и индукции поля возбуждения соответственно равны

$$F_{B1} = (4/\pi) (\sin\alpha/\alpha) F_{Bmax} = (4/\pi) (\sin\alpha/\alpha) I_B w_B ,$$

$$B_{\delta m1} = (4/\pi) (\sin\alpha/\alpha) B_{\delta max}$$

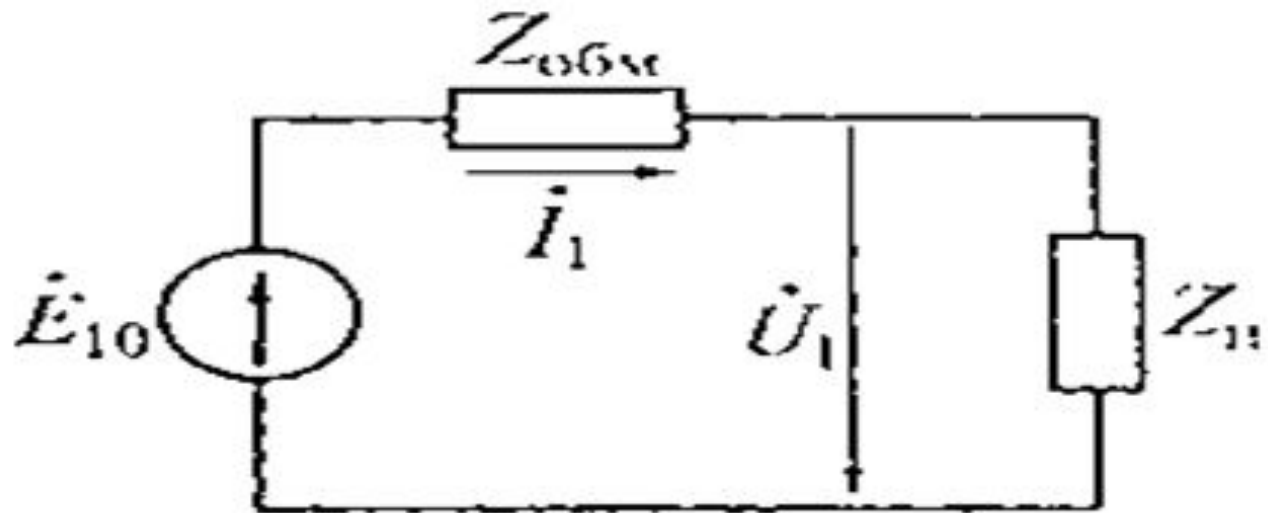
# Принцип работы синхронных машин



Распределение МДС в НСМ

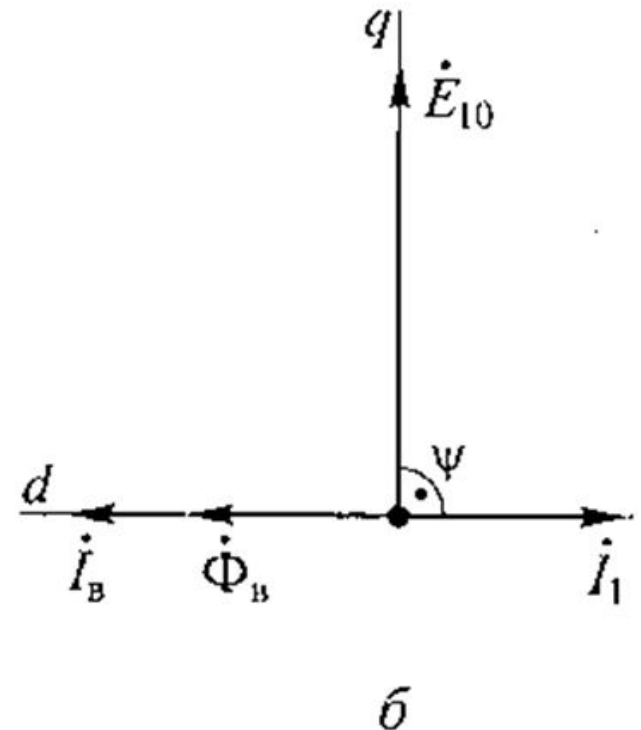
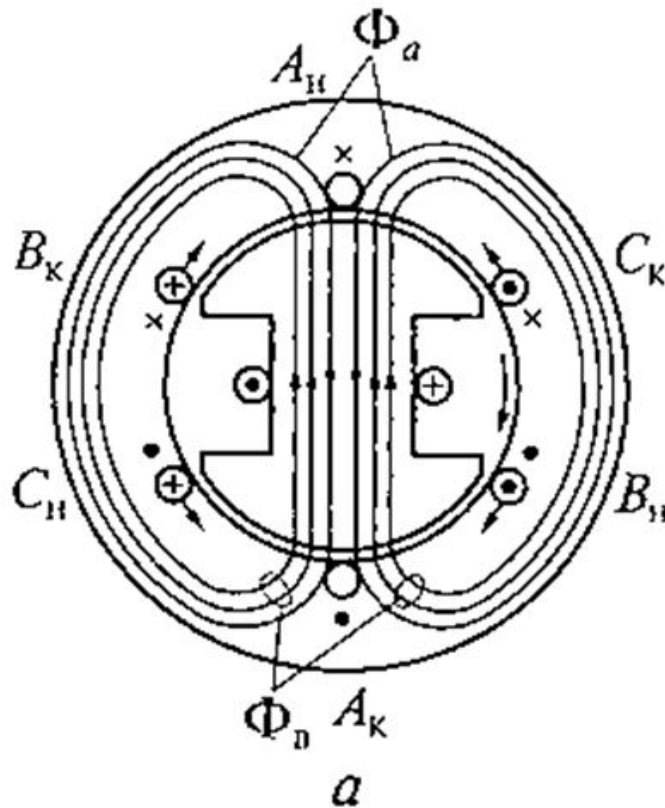
# Реакция якоря

Воздействие МДС якоря на поле возбуждения машины называется реакцией якоря.



Электрическая схема замещения фазы обмотки якоря

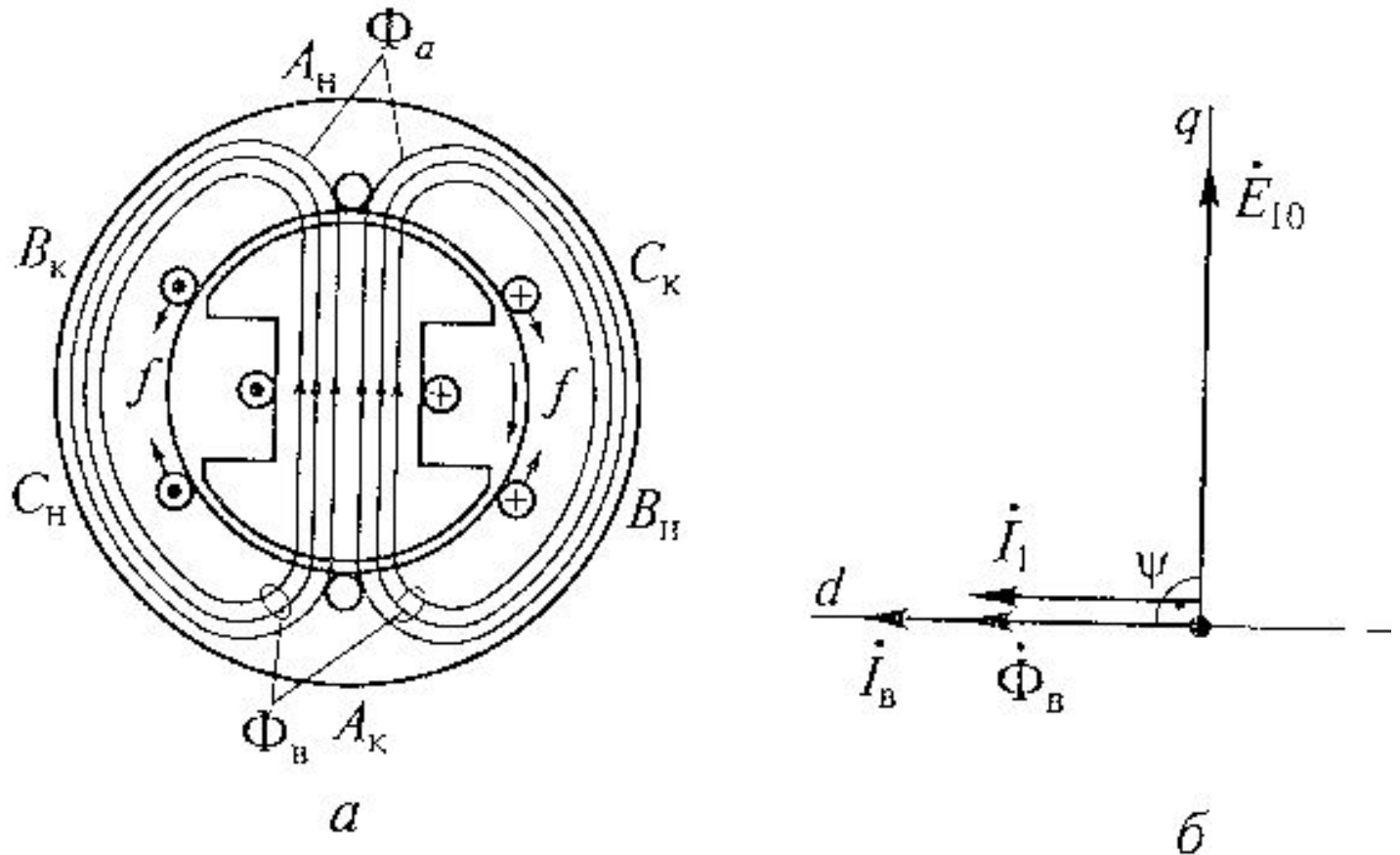
# Реакция якоря



Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при индуктивной нагрузке

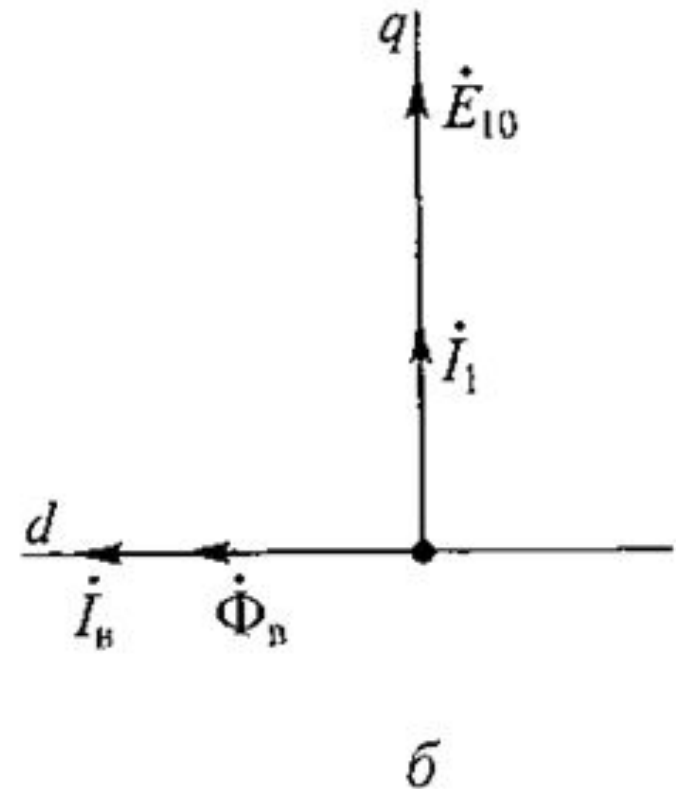
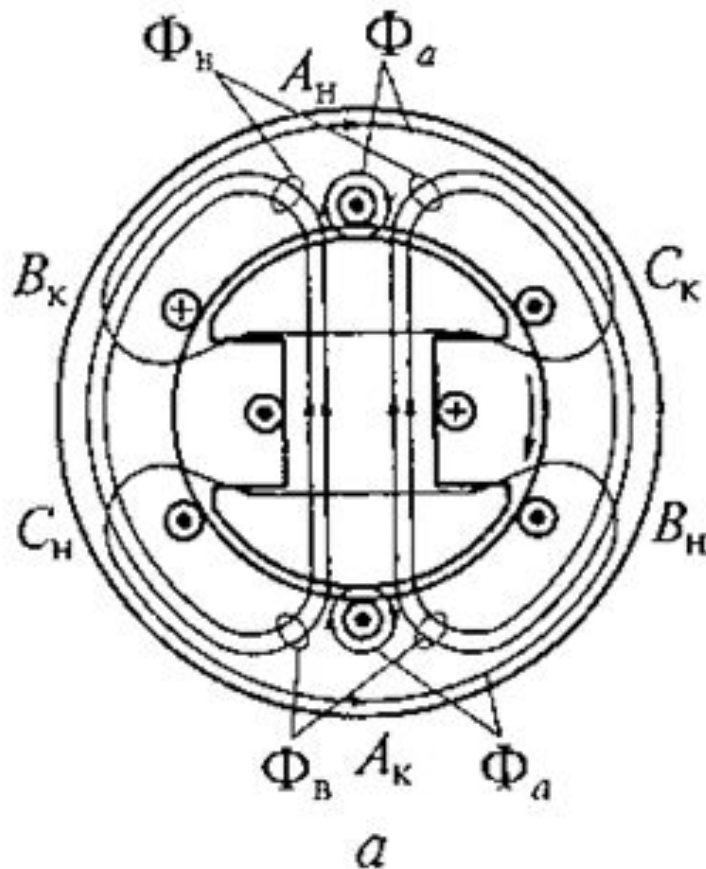


# Реакция якоря



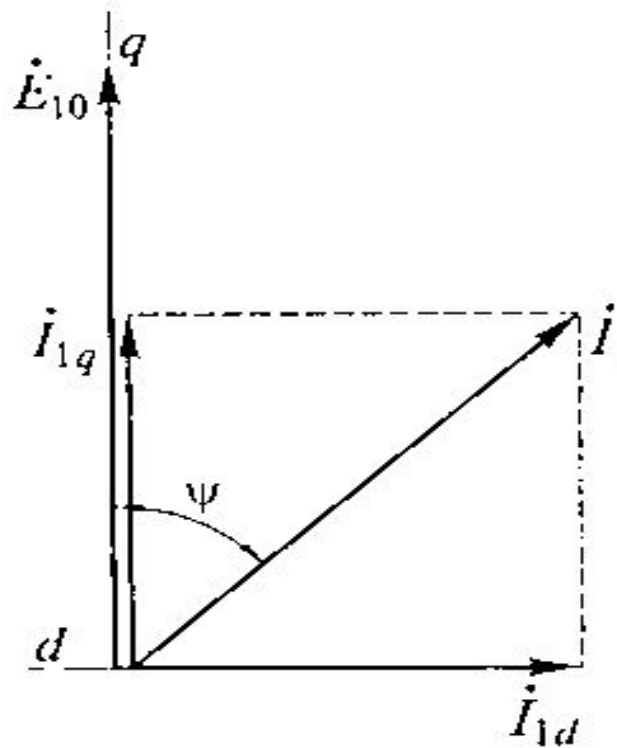
Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при емкостной нагрузке

# Реакция якоря



Реакция якоря (а) и векторная диаграмма (б) синхронного генератора при  $\psi = 0$

# Реакция якоря



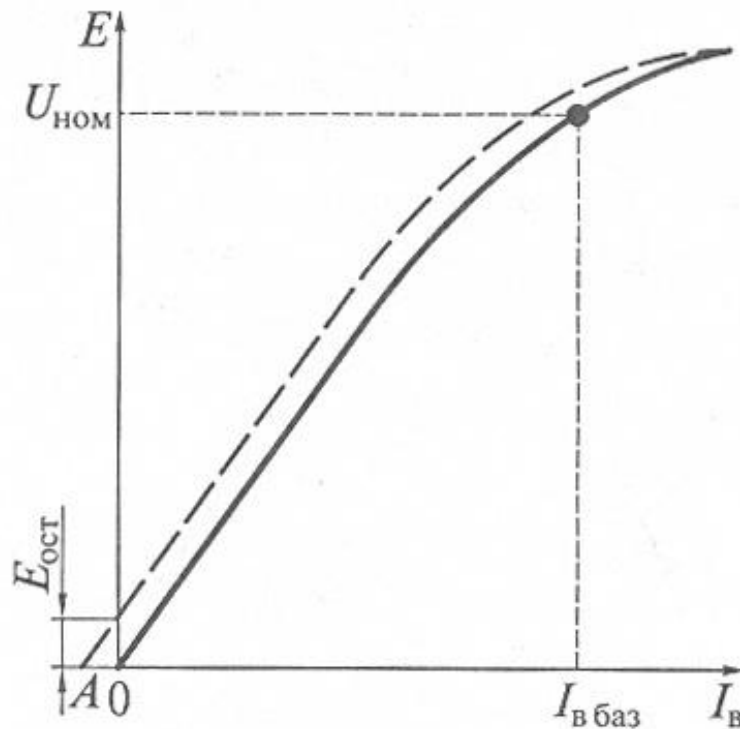
Разложение тока якоря на продольную и поперечную составляющие

# Характеристики синхронного генератора

Рабочие свойства синхронного генератора оценивают его характеристиками, важнейшими из которых являются следующие:  
характеристика холостого хода, трехфазного короткого замыкания, индукционная нагрузочная, внешние и регулировочные.

*Характеристика холостого хода* - это зависимость ЭДС холостого хода от тока (или МДС) возбуждения, т.е.  $E_{10} = f(I_B)$  при неизменной частоте вращения ( $n_2 = n_1 = \text{const}$ ).

# Характеристики синхронного генератора



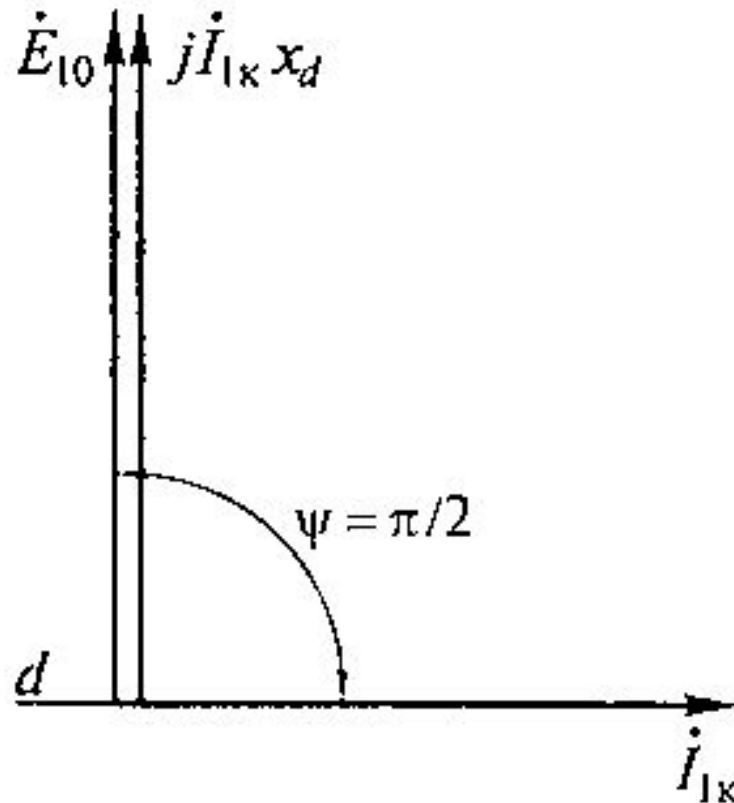
Опытная (пунктирная линия) и расчетная (сплошная линия) характеристика холостого хода

# Характеристики синхронного генератора

*Характеристика трехфазного короткого замыкания* представляет собой зависимость тока обмотки якоря при коротком замыкании от тока возбуждения, т. е.  $I_{1к} = f(I_B)$  при неизменной скорости ротора  $n_2 = n_1 = \text{const}$ .

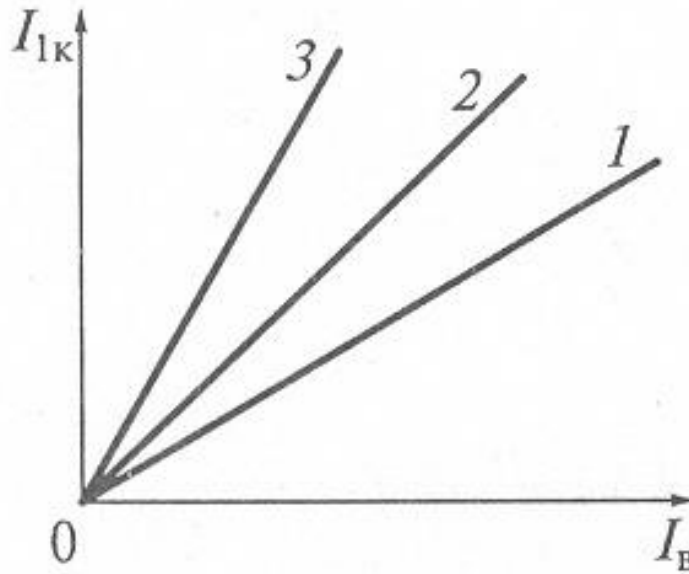
$$\underline{E}_{10} = j \underline{I}_{1к} X_d$$

# Характеристики синхронного генератора



Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора при коротком замыкании

# Характеристики синхронного генератора

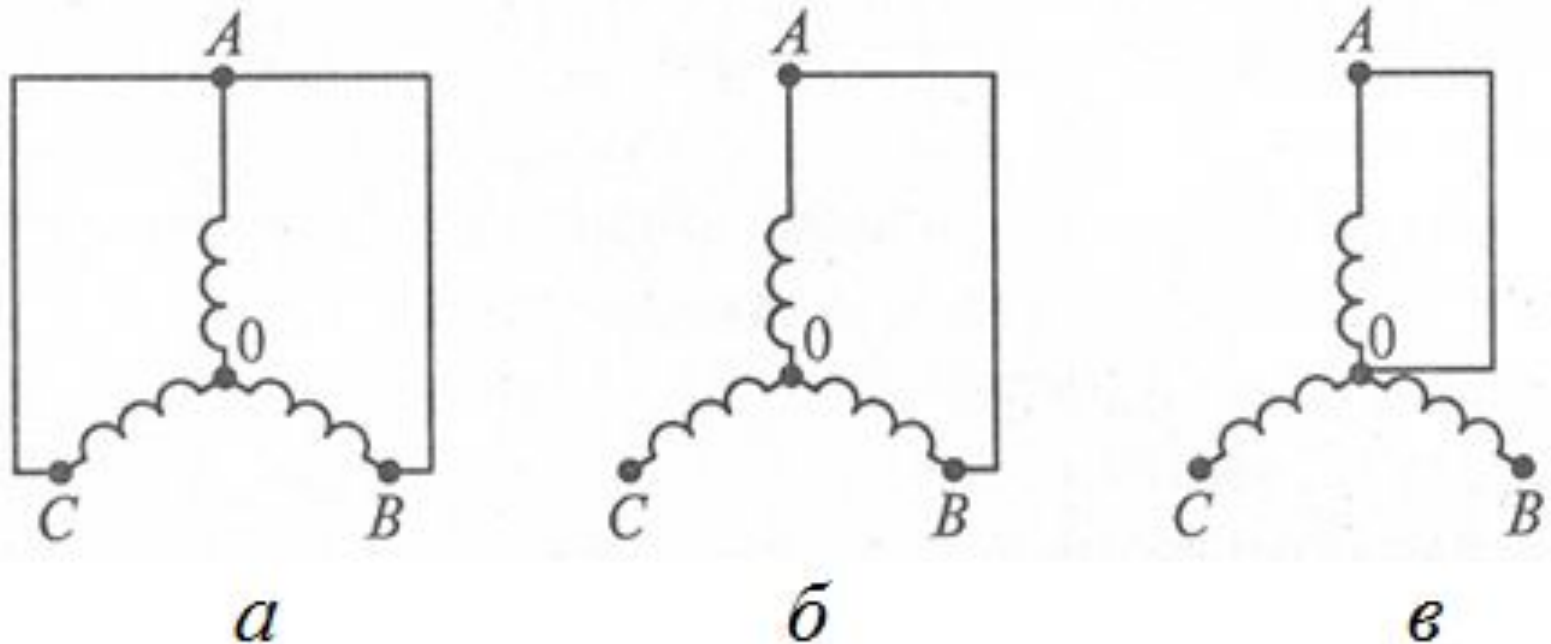


Характеристики короткого замыкания синхронного генератора:

1 - трехфазное КЗ, 2 - двухфазное КЗ, 3 - однофазное КЗ



# Характеристики синхронного генератора

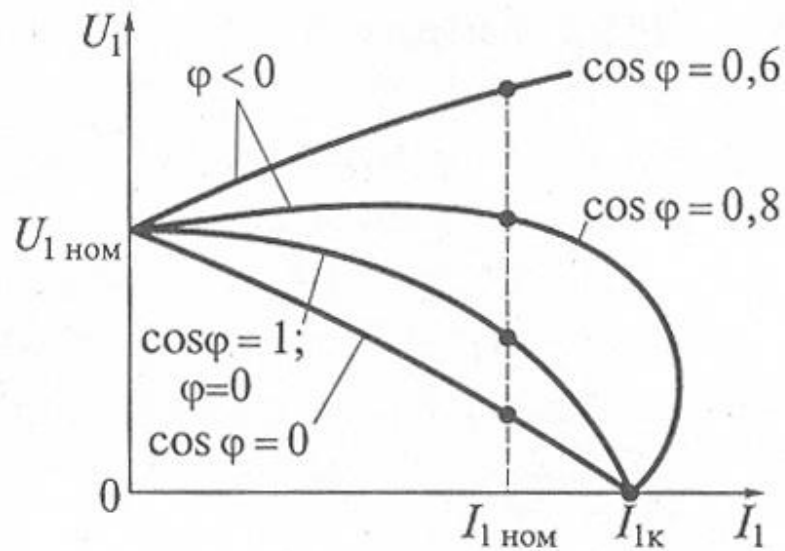


Схемы короткого замыкания обмотки якоря:  
*a* - трехфазное, *б* - двухфазное, *в* -  
однофазное

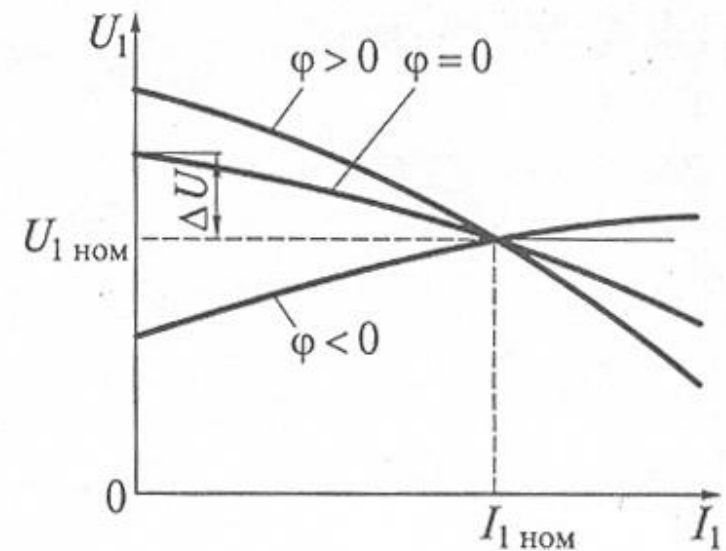
# Характеристики синхронного генератора

*Внешние характеристики* представляют собой зависимости напряжения генератора от тока якоря  $U_1 = f(I_1)$  при  $I_B = \text{const}$ ,  $n_2 = n_1 = \text{const}$  и  $\cos\phi = \text{const}$ . Они являются основными эксплуатационными характеристиками генератора и показывают, как изменяется напряжение  $U_1$  на выводах генератора с ростом тока нагрузки  $I_1$ , если ток возбуждения и характер нагрузки остаются неизменными.

# Характеристики синхронного генератора



*a*



*б*

Внешние характеристики синхронного генератора: *a* - при увеличении нагрузки, *б* - при уменьшении нагрузки

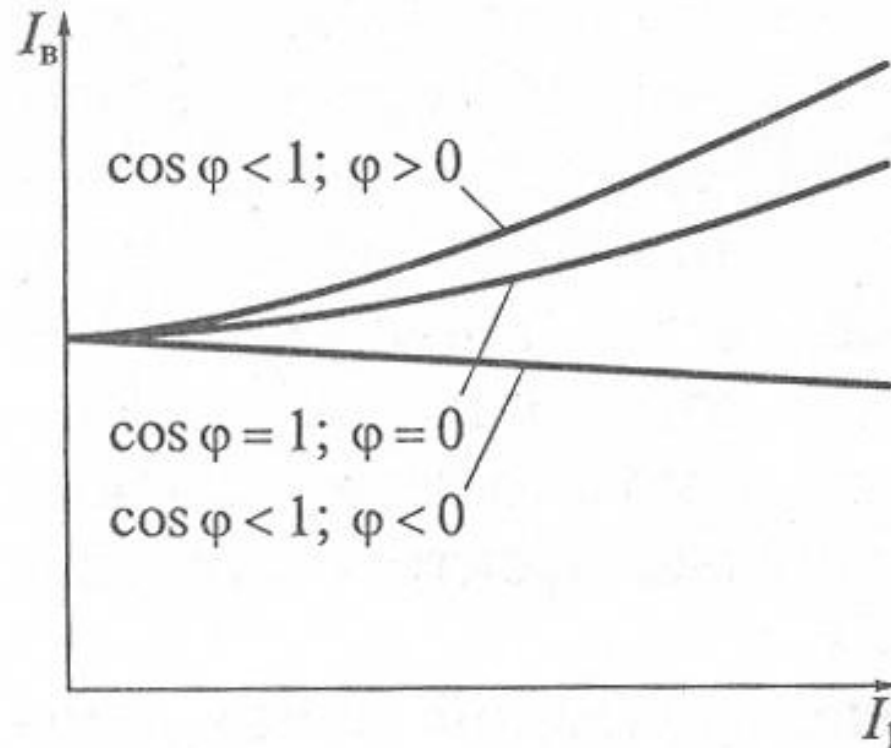
# Характеристики синхронного генератора

*Регулировочные характеристики*

представляют собой зависимости  $I_{\text{в}} = f(I_1)$  при  $U_1 = \text{const}$ ,  $n_2 = n_1 = \text{const}$  и  $\cos\phi = \text{const}$ .

Регулировочные характеристики определяют закон изменения тока возбуждения синхронного генератора, который необходим для поддержания неизменным напряжения на выводах машины при изменяющемся токе нагрузки и неизменном ее характере ( $\cos\phi = \text{const}$ ).

# Характеристики синхронного генератора



Регулировочные характеристики синхронного генератора

# Параллельная работа СГ с сетью

## Способы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью

Процесс включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью называется синхронизацией. Существуют два способа синхронизации: *точная синхронизация* и *самосинхронизация*.

# Параллельная работа СГ с сетью

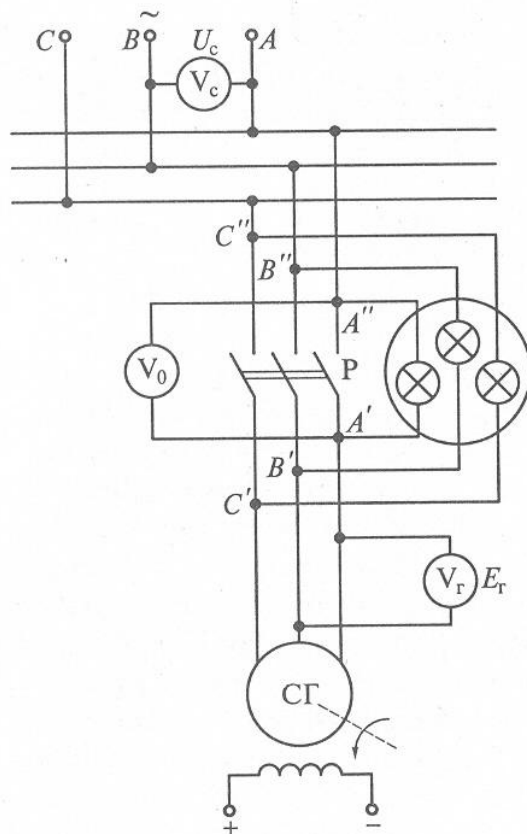
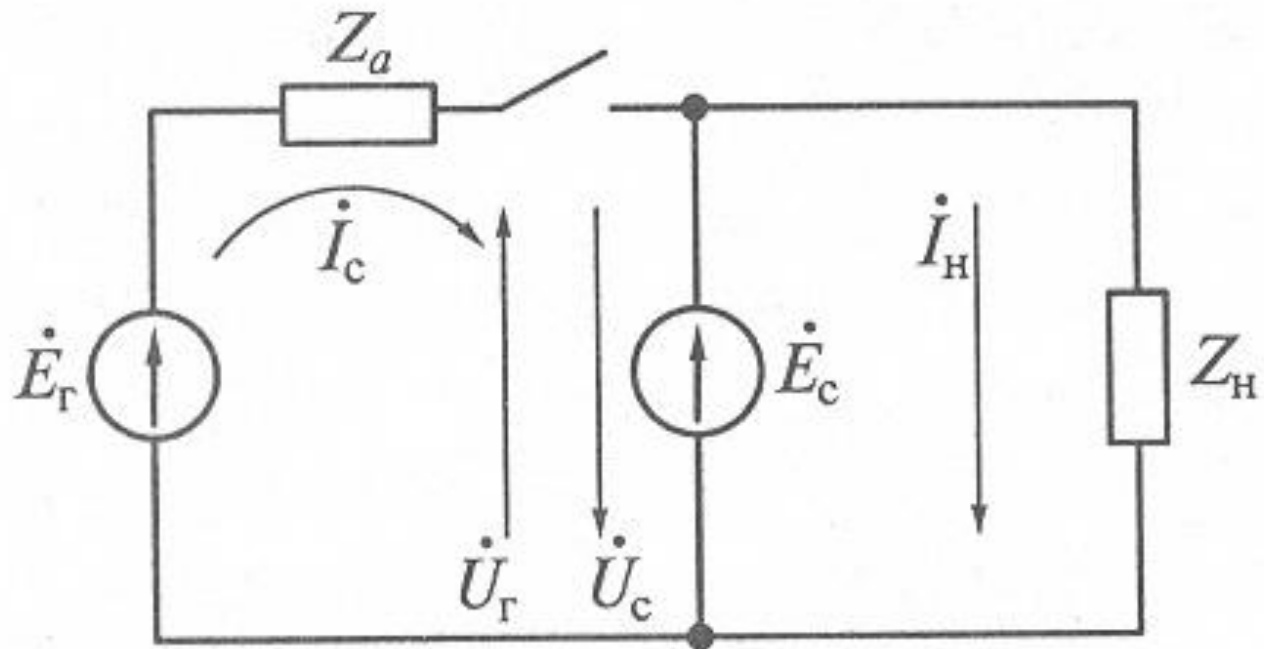


Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью

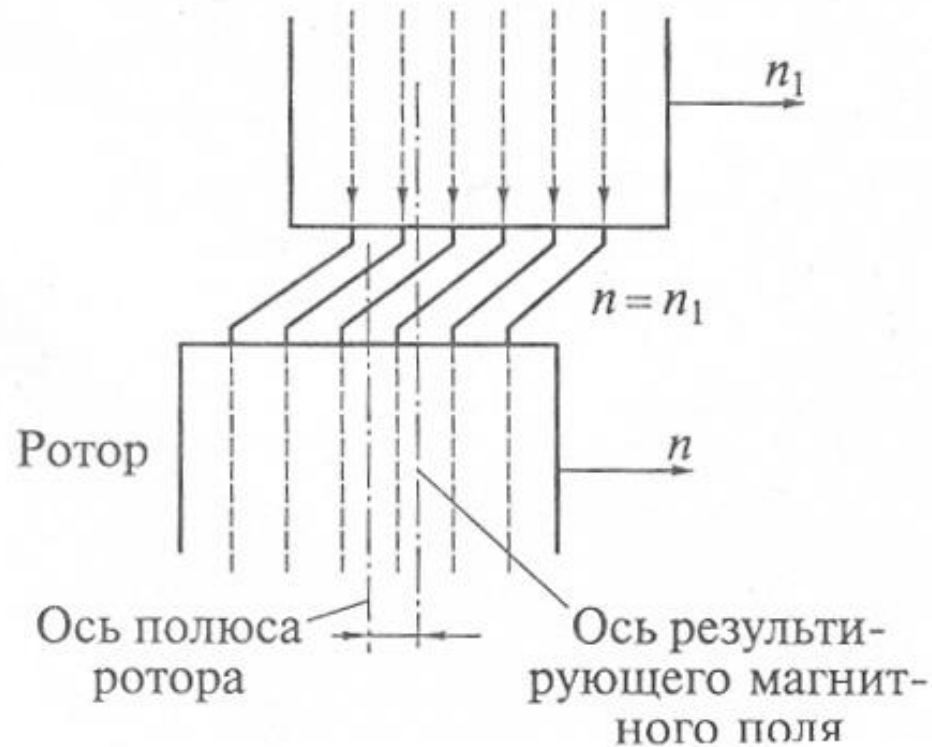
# Параллельная работа СГ с сетью



Электрическая схема для расчета тока синхронизации  $I_c$  (для одной фазы)

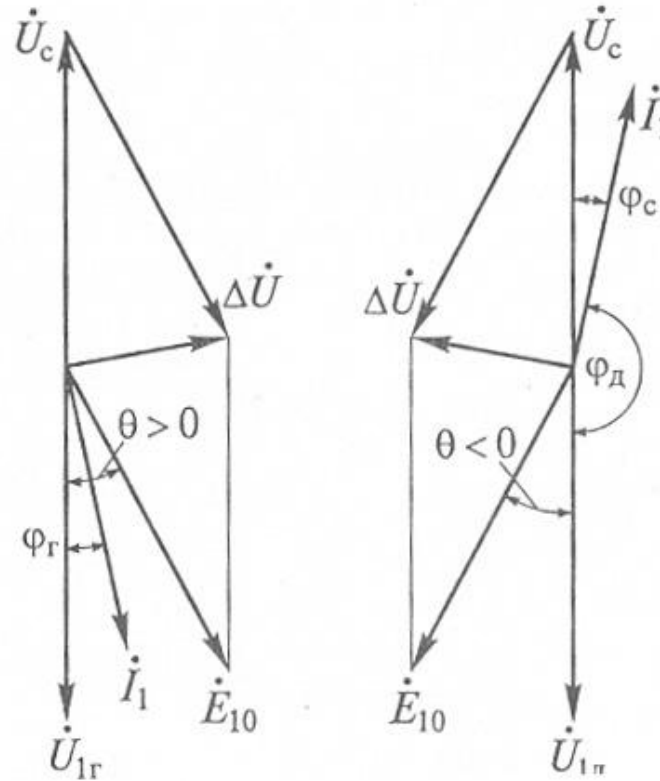


# Синхронный двигатель



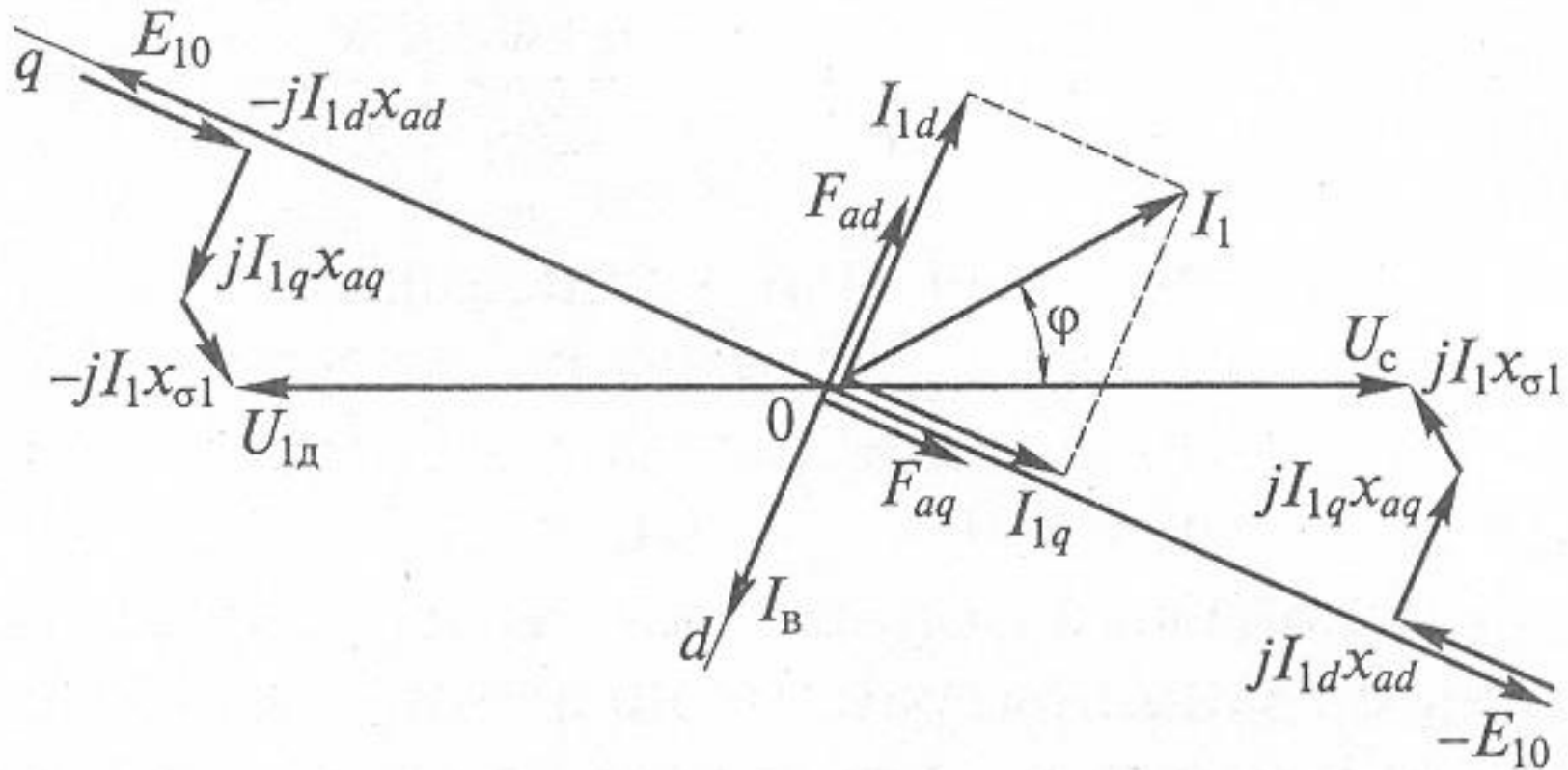
Магнитное поле в воздушном зазоре двухполюсного синхронного двигателя при нагрузке

# Синхронный двигатель



Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины для генераторного (а) и двигательного (б) режима работы

# Синхронный двигатель



Векторная диаграмма явнополюсного синхронного двигателя

# Характеристики СД

Синхронный двигатель потребляет электрическую мощность  $P_1$  из сети. Часть этой мощности расходуется на электрические потери в обмотке якоря  $P_{эл1}$  и магнитные потери в стали якоря  $P_m$ . Оставшаяся ее часть - электромагнитная мощность  $P_{эм}$  передается вращающимся магнитным полем на ротор

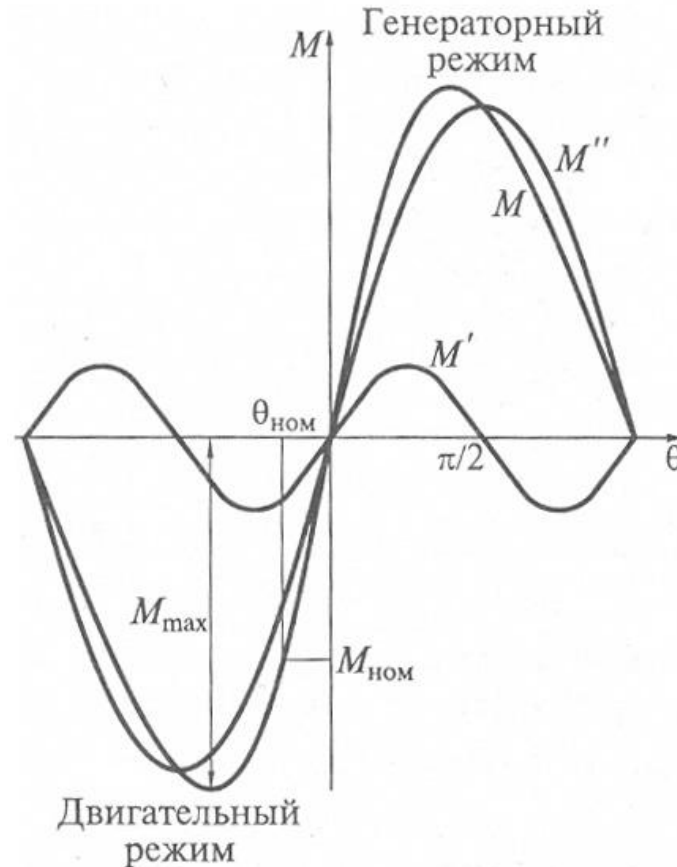
$$P_{эм} = P_1 - P_{эл1} - P_m$$

# Характеристики СД

Уравнения для электромагнитной мощности синхронного двигателя можно получить из векторных диаграмм. Если пренебречь потерями в статоре ( $P_{эл1}$  и  $P_M$ ), то для двигателя с независимой системой возбуждения будут справедливы те же выражения, что и для генератора (см. тему 11). Так, если принять, что  $P_1 = P_{эм} = P$ , то для явно- и неявнополюсного двигателя можно записать соответственно

$$P_{эм} = P' + P'' = (m_1 U_1 E_{10} / x_d) \sin\theta + (m_1 U_1^2 / 2) (1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta$$
$$P_{эм} = (m_1 U_1 E_{10} / x_c) \sin\theta$$

# Характеристики СД

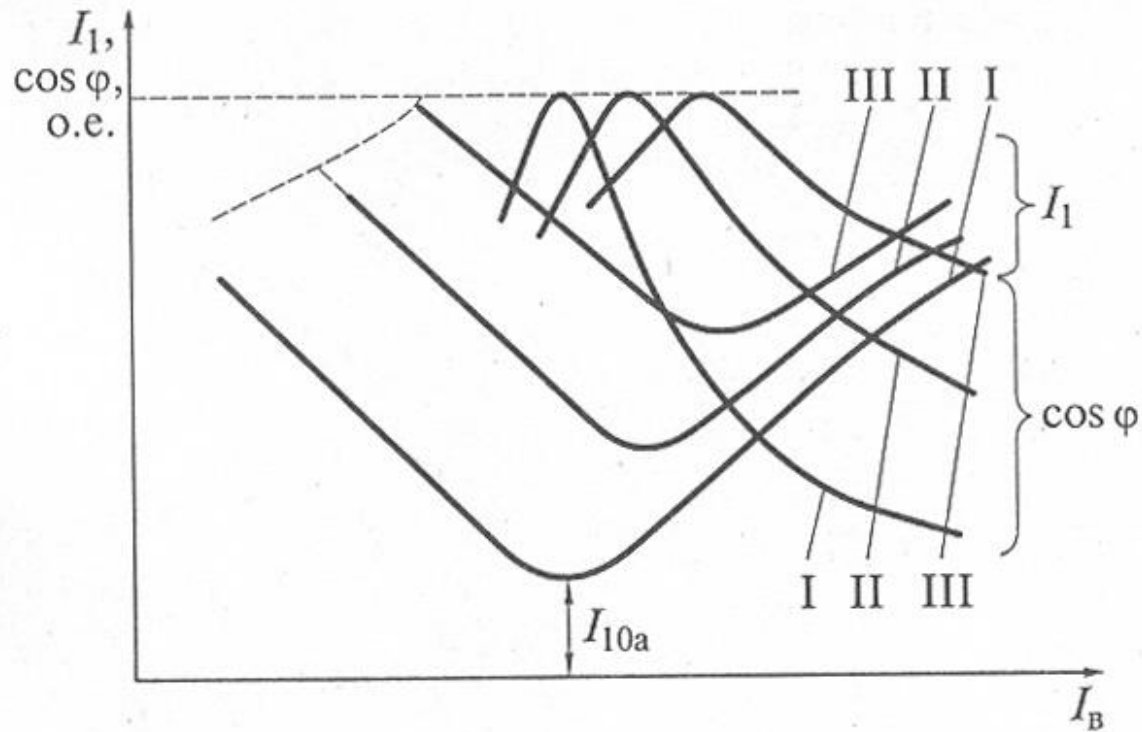


Угловая характеристика электромагнитного момента явнополюсной синхронной машины

# Характеристики СД

***U-образные характеристики*** двигателя, так же как и генератора, представляют зависимости  $I_1 = f(I_B)$  при  $P = \text{const}$ ,  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ . Они могут быть построены по векторным диаграммам машины.

# Характеристики СД



U-образные характеристики синхронного двигателя и соответствующие им зависимости коэффициента мощности от тока возбуждения:

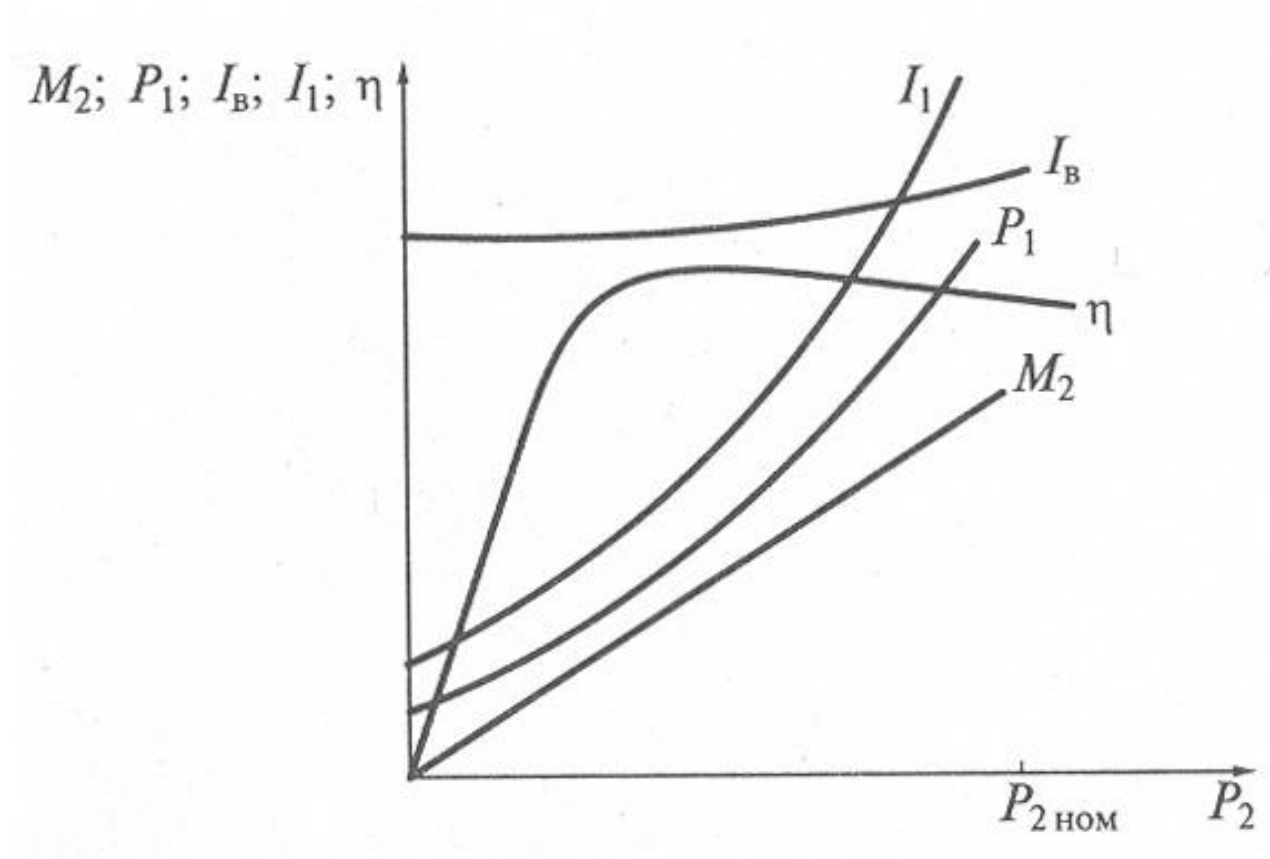
□ —  $P = 0$ , □□ —  $P = 0,25 P_{\text{НОМ}}$ , □□□ —  $P = 0,5 P_{\text{НОМ}}$



# Характеристики СД

**Рабочие характеристики синхронного двигателя** могут быть построены или при постоянном возбуждении ( $I_B = \text{const}$ ), или при постоянном коэффициенте мощности ( $\cos\phi = \text{const}$ ). На рис. 12.6 показаны рабочие характеристики — зависимости  $M, P_1, I_B, I_1, \eta = f(P_2)$  при  $f_1 = \text{const}, \cos\phi = \cos\phi_{\text{ном}} = \text{const}$ .

# Характеристики СД



Рабочие характеристики синхронного двигателя  
при  $\cos\phi = \text{const}$

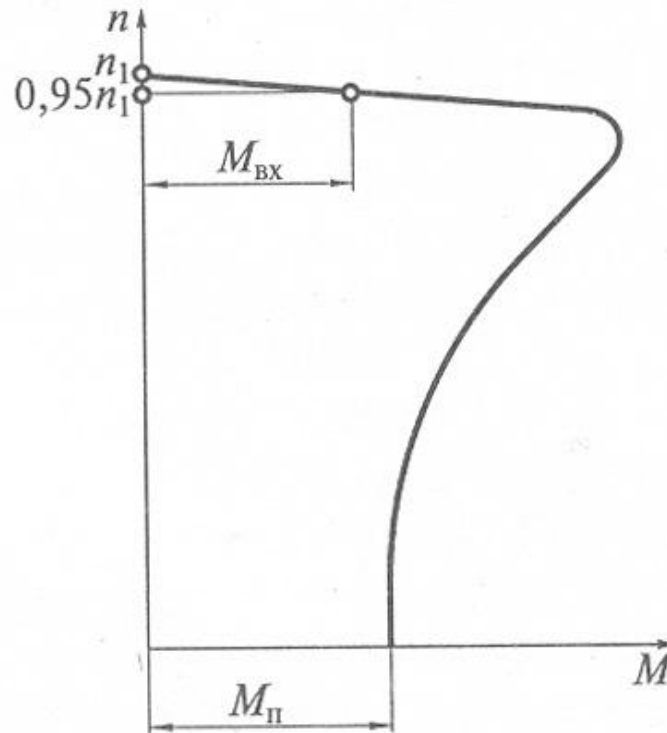
# Способы пуска синхронных двигателей

Существуют следующие способы пуска синхронных двигателей: асинхронный, частотный и пуск с помощью разгонного двигателя.

Наибольшее распространение получил *асинхронный пуск*. Этот способ пуска аналогичен пуску асинхронного двигателя.

Механическая характеристика синхронного двигателя в этом случае аналогична механической характеристике асинхронного двигателя

# Способы пуска синхронных двигателей



Механическая характеристика синхронного двигателя при асинхронном пуске с разомкнутой обмоткой возбуждения

# Способы пуска синхронных двигателей

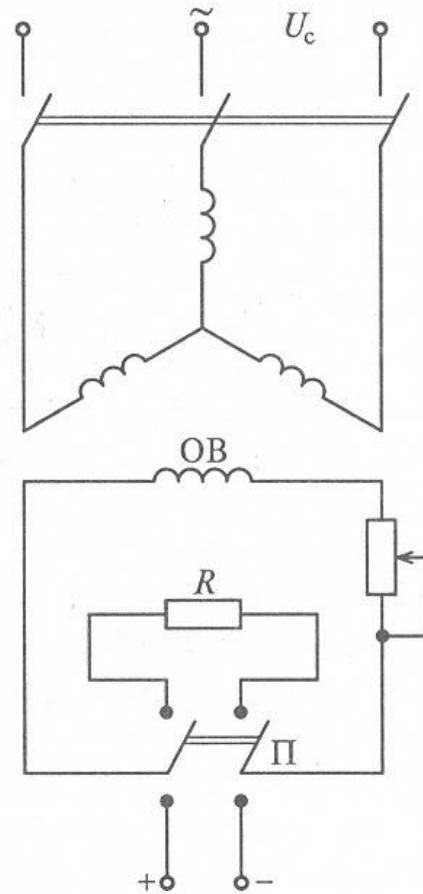
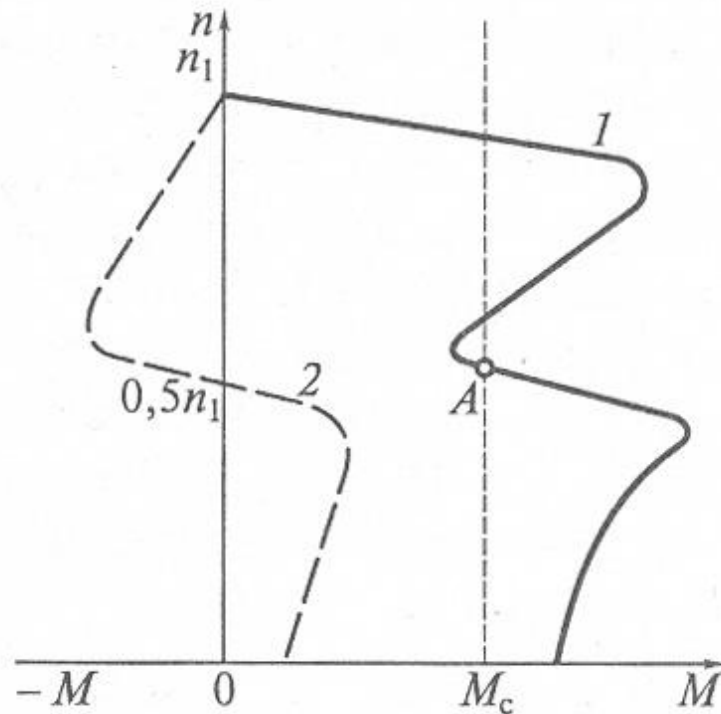


Схема включения обмотки возбуждения при асинхронном пуске

# Способы пуска синхронных двигателей



Результирующая механическая характеристика 1 и механическая характеристика от обратного поля обмотки возбуждения 2 при асинхронном пуске синхронного двигателя

# Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы используются для поддержания заданного напряжения в узлах электрической сети, поддерживая в ней баланс реактивной мощности (генерируемой и потребляемой). В часы максимальных нагрузок они работают как источники реактивной мощности, а в часы минимума нагрузок - в режиме потребления реактивной мощности. Кроме того, синхронные компенсаторы включаются в конце линии электропередачи непосредственно у потребителя. Компенсируя частично или полностью реактивную составляющую тока, они уменьшают общий ток в линии и соответственно потери в ней.

# Синхронные компенсаторы

По существу синхронный компенсатор является синхронным двигателем, работающим при холостом ходе, т. е. без механической нагрузки на валу. Синхронный компенсатор потребляет из сети активную мощность, равную его потерям. Основной характеристикой синхронного компенсатора является U-образная характеристика. Она мало отличается от аналогичной характеристики синхронного двигателя при холостом ходе ( $P = 0$ ).



# Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы имеют некоторые конструктивные отличия от синхронных двигателей. Они не имеют выходного конца вала, поэтому корпус компенсатора может быть выполнен герметичным. Так как синхронный компенсатор не приводит в движение приводной механизм и момент, действующий на вал, незначителен, то и вал синхронного компенсатора может иметь существенно меньший диаметр, чем вал синхронного двигателя.

# Синхронные компенсаторы

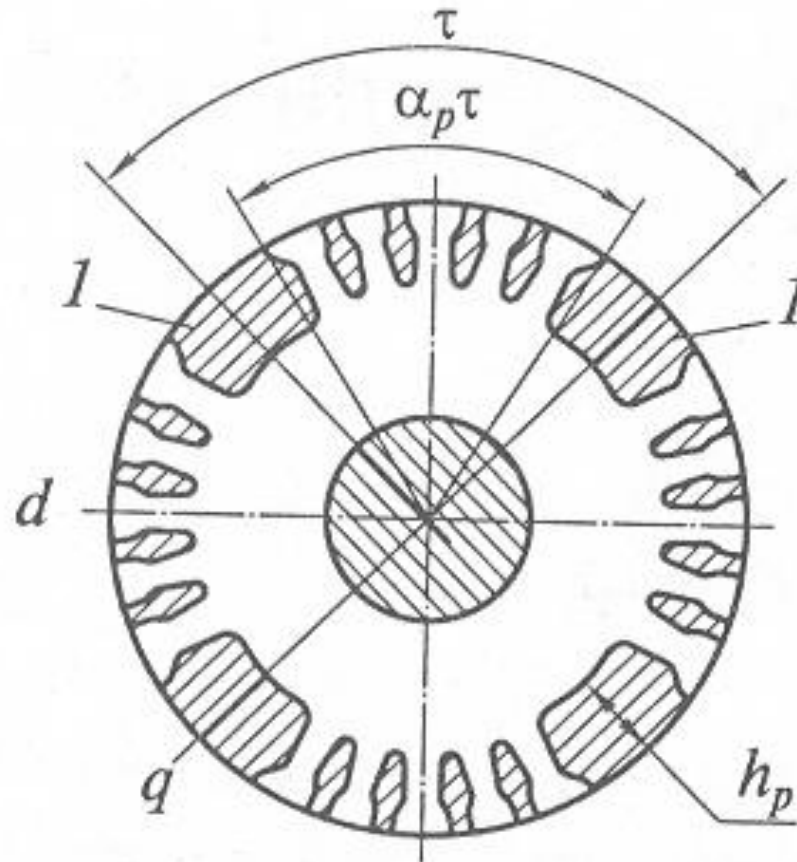
Синхронным компенсаторам не нужно иметь большую перегрузочную способность (максимальный момент  $M_{max}$ ), и он у них может быть снижен за счет уменьшения зазора между статором и ротором (при этом увеличиваются индуктивные сопротивления взаимной индукции обмотки статора -  $x_d$  и  $x_q$ ). Уменьшение зазора способствует уменьшению размеров обмотки возбуждения. Все это приводит к уменьшению габаритов синхронных компенсаторов по сравнению с синхронными двигателями.

# Синхронные машины специального исполнения

*Синхронные реактивные двигатели (СРД)* имеют явнополюсный ротор. Их основное преимущество по сравнению с обычными синхронными двигателями заключается в отсутствии обмотки возбуждения и, следовательно, контактно-щеточного узла. Магнитный поток в такой машине создается только обмоткой якоря. Вращающий момент образуется вследствие явнополюсности ротора ( $x_d \neq x_q$ ) и равен реактивному моменту

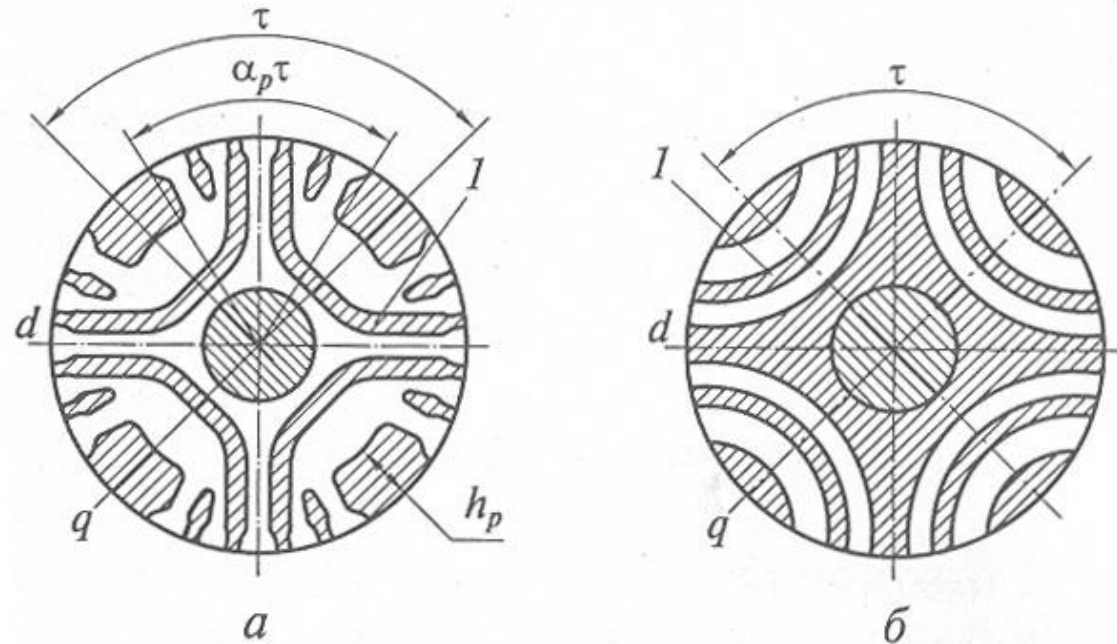
$$M_{\text{эм}} = (mU_1^2/2\omega_1) (1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta.$$

# Синхронные машины специального исполнения



Простой явнополюсный ротор четырехполюсного  
СРД

# Синхронные машины специального исполнения

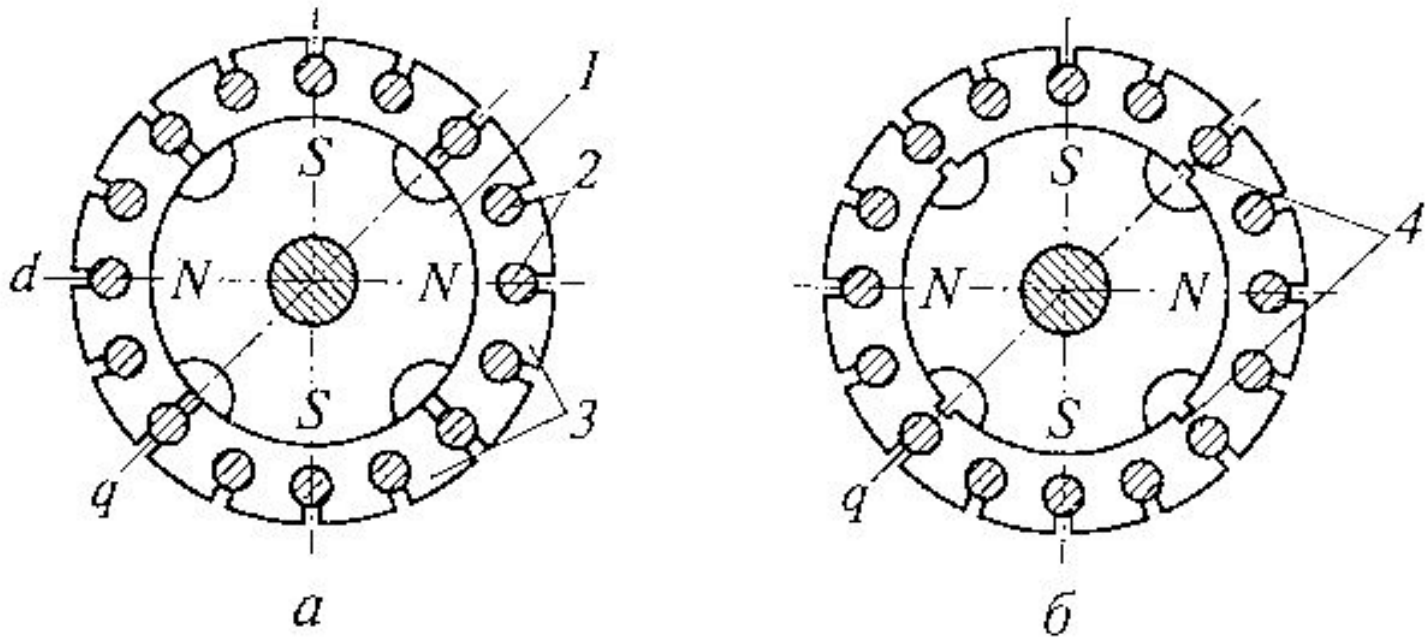


Усовершенствованные роторы  
четырёхполюсного СРД:  
*а* - ротор с внутренними пазами, *б* -  
секционированный ротор

# Синхронные машины специального исполнения

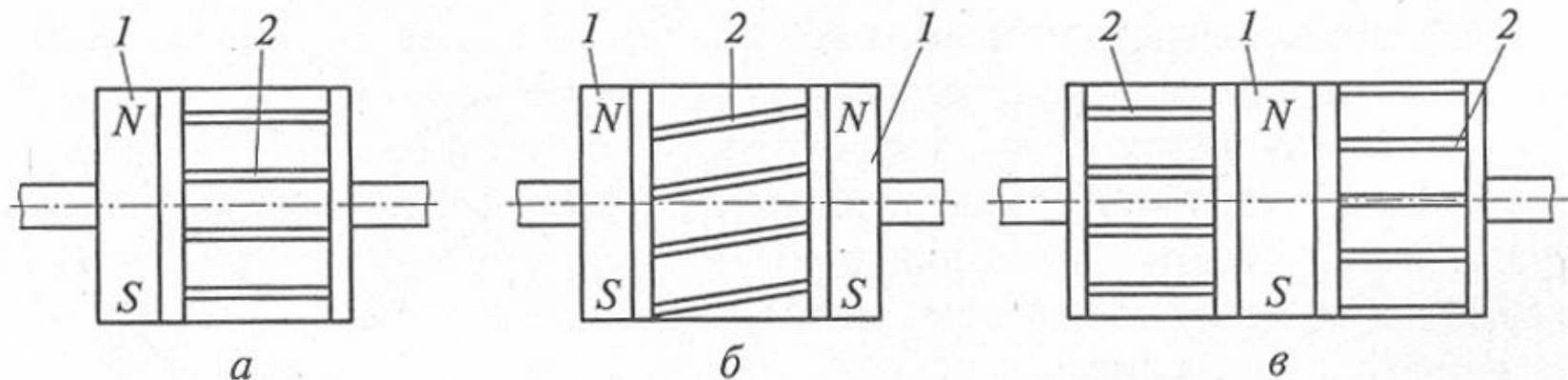
*В синхронных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов* для создания потока возбуждения вместо обмотки возбуждения применяют постоянные магниты, размещенные на роторе. Поэтому необходимость в контактных кольцах отпадает и машина становится бесконтактной. Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов широко используются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей.

# Синхронные машины специального исполнения



Конструкция роторов СДПМ с радиальным расположением постоянных магнитов и пусковой обмотки: *a* - со звездообразным магнитом, *б* - с мостиком насыщения

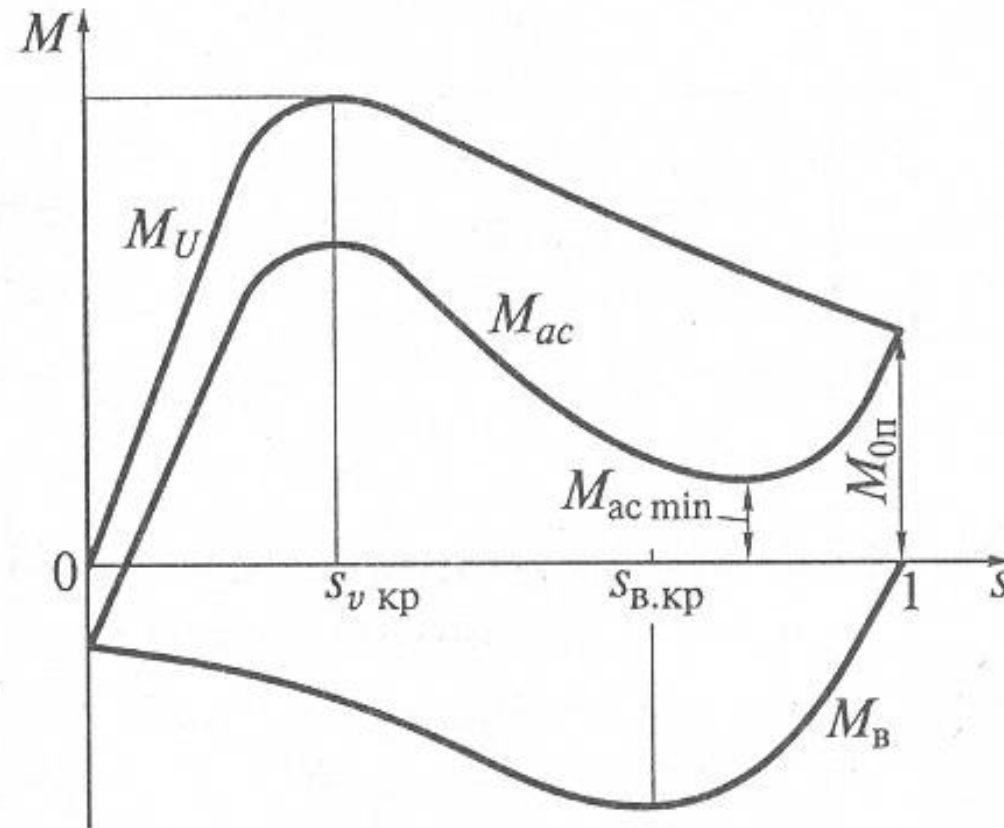
# Синхронные машины специального исполнения



Конструкция роторов СДПМ с аксиальным расположением постоянных магнитов и пусковой обмотки: *a* - с одним торцевым магнитом, *б* - с двумя торцевыми магнитами, *в* - с двумя пусковыми клетками



# Синхронные машины специального исполнения



Механическая характеристика СДПМ в пусковом режиме