



## Содержание раздела

1. Устройство синхронных машин
2. Работа синхронного генератора при холостом ходе
3. Реакция якоря синхронной машины
4. Внешняя характеристика синхронного генератора
5. Регулировочная характеристика синхронного генератора
6. Угловая характеристика синхронной машины
7. Работа синхронной машины в режиме двигателя
8. Механические характеристики производственных механизмов
9. Механические характеристики электрических двигателей
10. Пуск в ход синхронного двигателя
11. Потери энергии и КПД синхронных машин
12. Рабочие характеристики синхронного электродвигателя
13. Заключение
14. Вопросы для самоконтроля
15. Литература по разделу

# Устройство синхронных машин

**Синхронной машиной** называют такую машину переменного тока, частота вращения которой в установившемся режиме равна синхронной  $n_1 = 60 f_1 / p$  и не зависит от нагрузки.

*Применение: синхронные генераторы* – в качестве источников электрической энергии на электростанциях, транспортных средствах

*Синхронные двигатели* – в установках не требующих регулирования скорости, при мощности 100 кВт и выше (насосы, вентиляторы, компрессоры и т.д.), а также в схемах автоматики и электробытовых приборах (СД с постоянными магнитами, индукторные, гистерезисные, шаговые и т.д.).

**Статор** синхронной машины выполнен также как асинхронной: в пазах сердечника статора расположена *трехфазная обмотка*

**Обмотка ротора** питается от постороннего источника постоянного тока через контактные кольца и щетки и называется *обмоткой возбуждения*.

Она создает в синхронной машине *основной магнитный поток  $\Phi_0$*

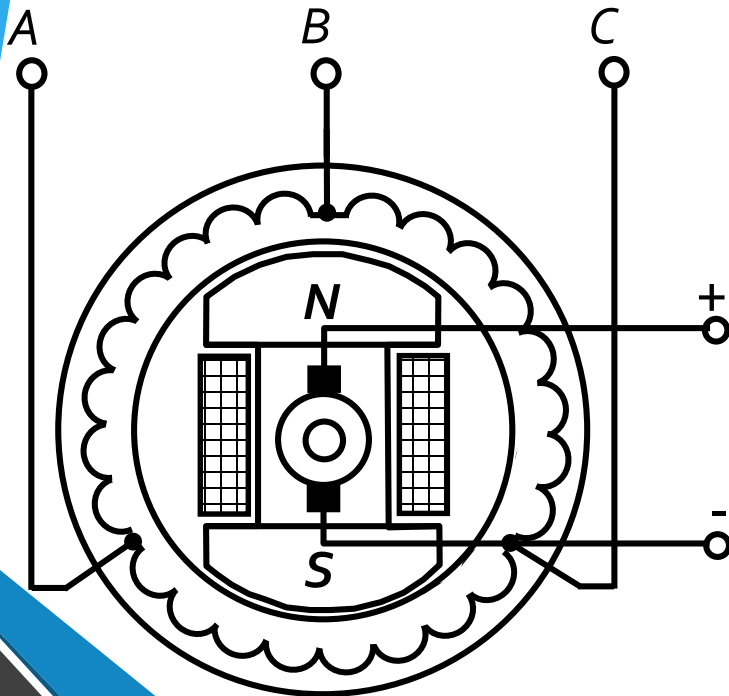
Существуют две конструкции ротора: *явнополюсная* и *неявнополюсная*

# Устройство синхронных машин

При вращении ротора с частотой  $n_1$  поток  $\Phi_0$  индуцирует в обмотках статора переменные ЭДС с частотой  $f_1 = p n_1 / 60$ .

При подключении к обмотке статора нагрузки, в ней возникает ток, который создает вращающееся магнитное поле с частотой  $n_1 = 60 f_1 / p$ .

Таким образом *ротор вращается с такой же частотой, что и магнитное поле статора*. Поэтому машину называют **синхронной**.

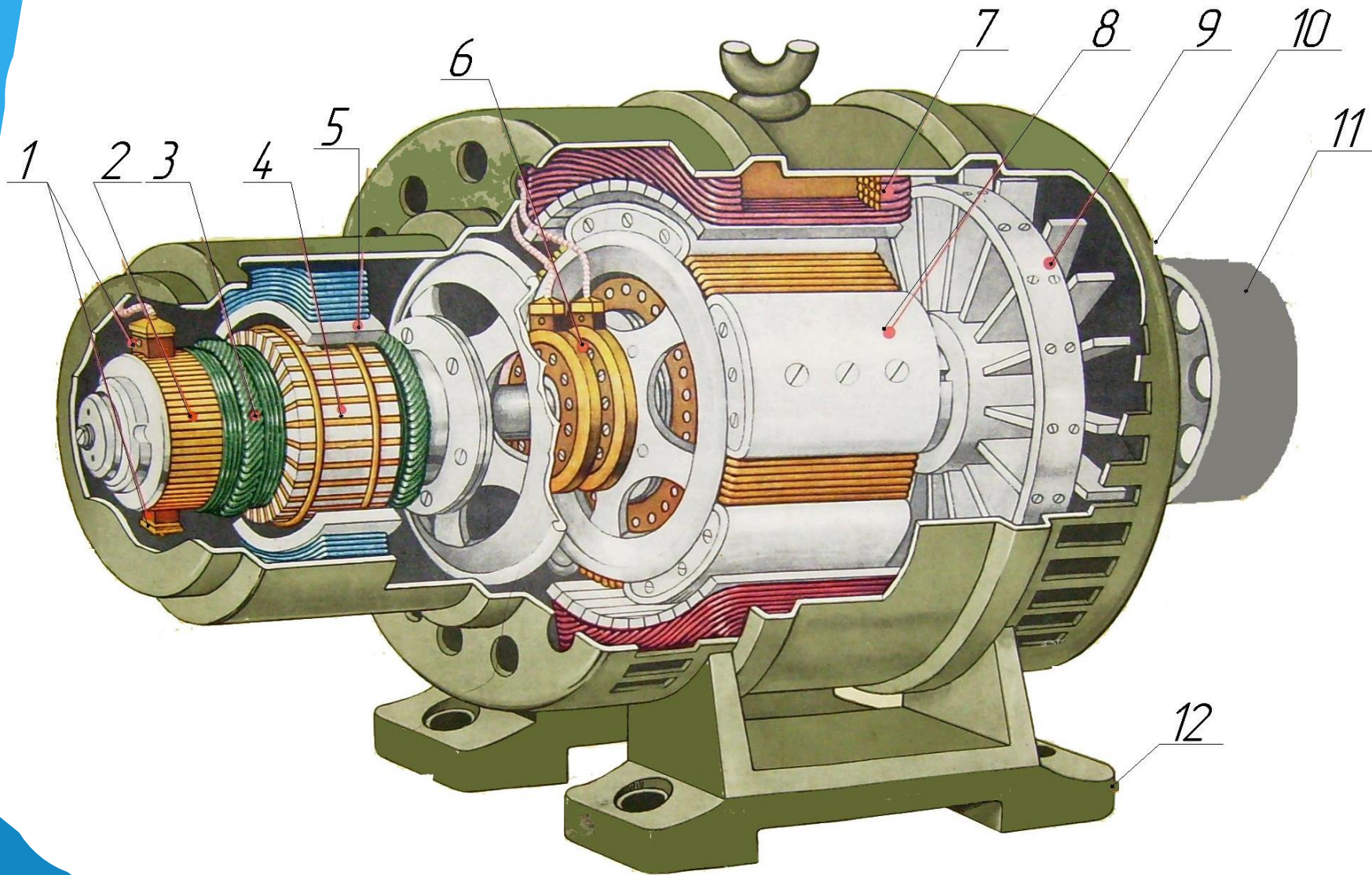


В синхронных машинах обмотку статора, в которой наводится ЭДС и проходит ток нагрузки, называют **обмоткой якоря**.

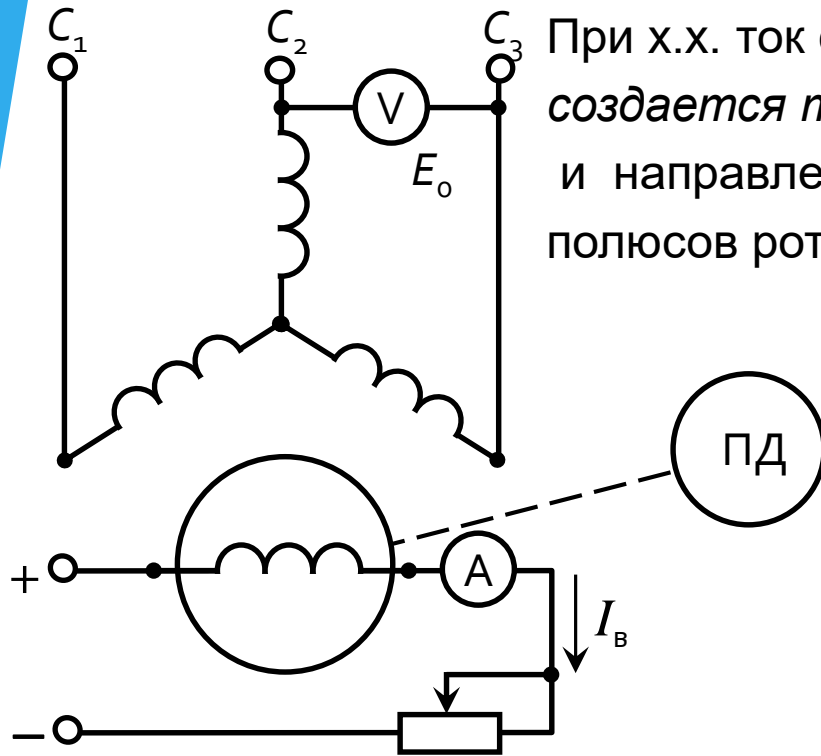
Часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, называется **индуктором**.

Взаимодействие вращающегося магнитного поля статора с основным магнитным потоком  $\Phi_0$  создает **электромагнитный момент  $M$** , который при работе синхронной машины генератором, является **тормозным моментом**, а при работе двигателем **вращающим**.

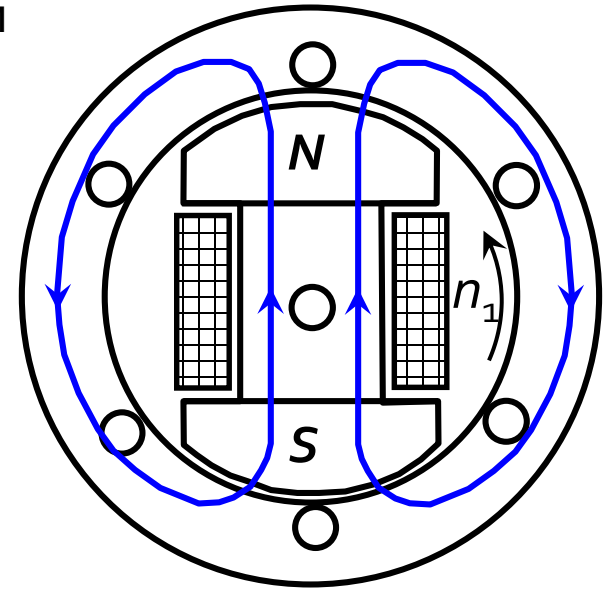
# Устройство синхронных машин



# Работа синхронного генератора при холостом ходе



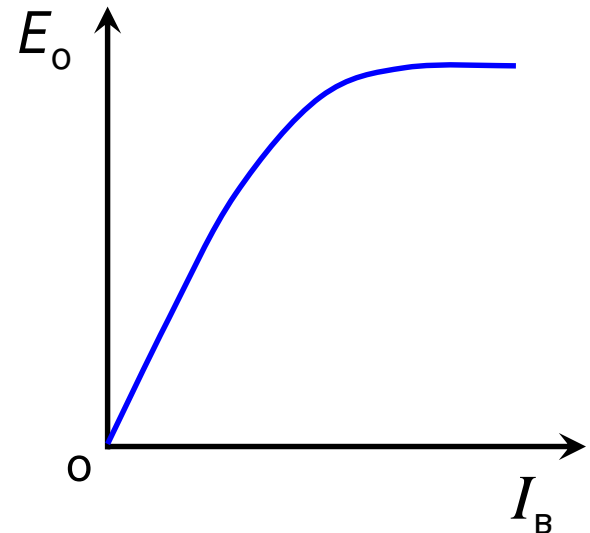
При х.х. ток статора  $I = 0$  и магнитный поток  $\Phi_0$  создается только обмоткой возбуждения и направлен по оси полюсов ротора.



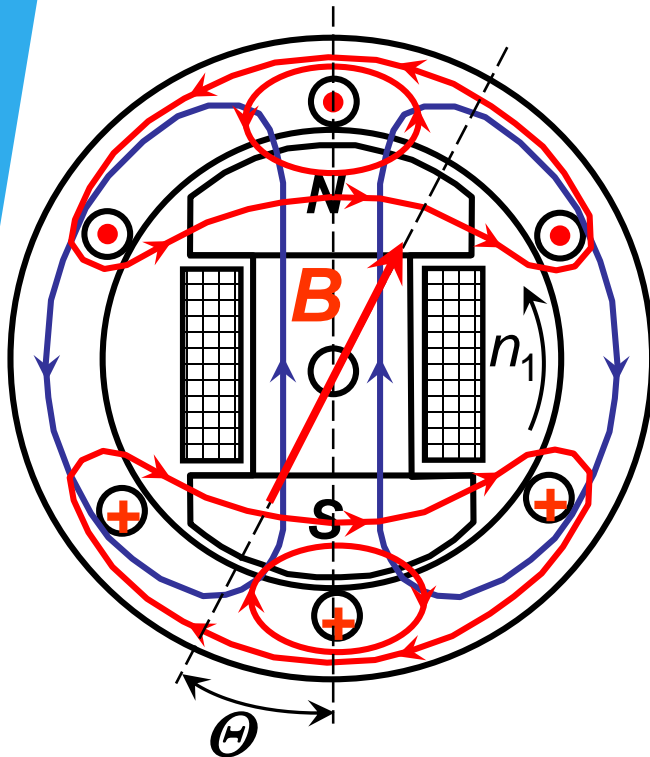
При вращении ротора поток  $\Phi_0$  наводит в обмотке статора ЭДС  $E_0 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_0$ .

Характеристика холостого хода

$$E_0 = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ и } n_1 = const.$$



# Реакция якоря синхронной машины



В машине, работающей под нагрузкой, то есть при токах статора  $I \neq 0$ , магнитное поле создается не только МДС ротора, но и МДС токов статора.

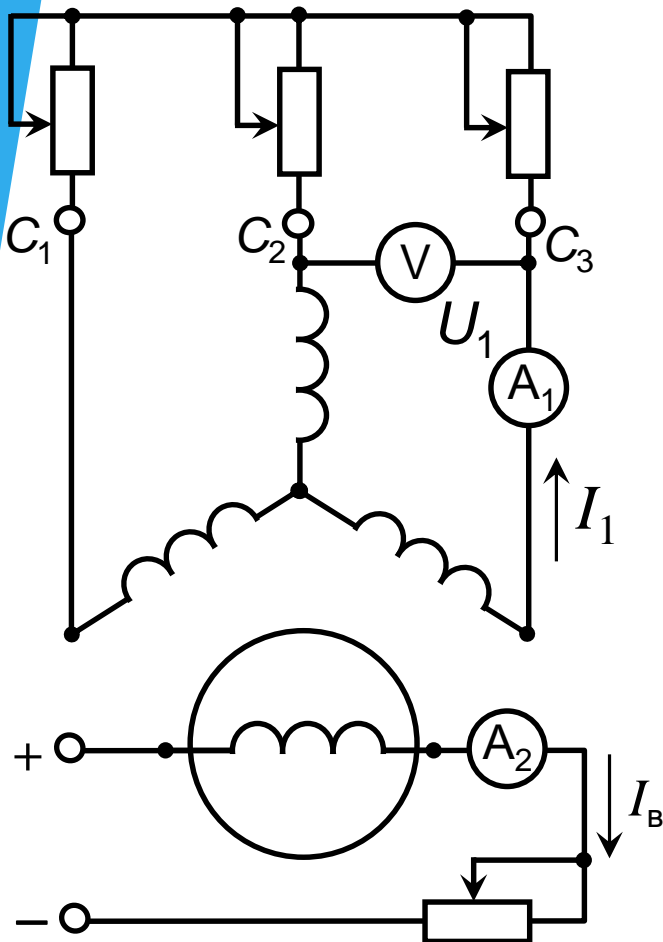
*Воздействие МДС якоря на магнитное поле ротора называют реакцией якоря.*

В ненасыщенной машине в результате действия реакции якоря одна половина полюса размагничивается а другая – подмагничивается; кривая распределения магнитной индукции  $B$  сдвигается навстречу направления вращения на угол  $\theta$ , но результирующий магнитный поток  $\Phi$  остается неизменным.

В насыщенной машине размагничивающее действие реакции якоря под одной половиной полюса сказывается сильнее, чем подмагничивающее - под другой половиной полюса. В результате снижается поток  $\Phi$ , а, следовательно, и ЭДС, и электромагнитный момент.

При индуктивном характере тока нагрузки размагничивающее действие реакции якоря усиливается, а при достаточной емкостной нагрузке якоря оказывает подмагничивающее воздействие

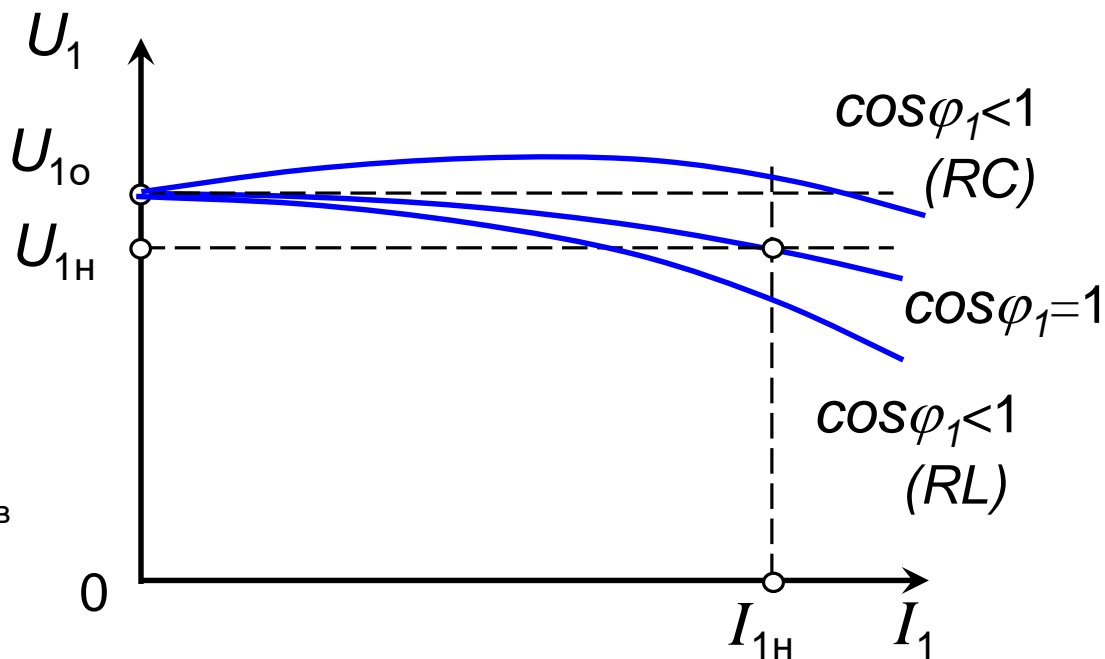
# Внешняя характеристика синхронного генератора



Внешняя характеристика

$$U_1 = f(I_1).$$

при  $I_B = const$ ,  $\cos \varphi_1 = const$  и  $n_1 = const$ .



Относительное изменение напряжения генератора при номинальном токе

$$\Delta U_H = \frac{U_{10} - U_{1H}}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

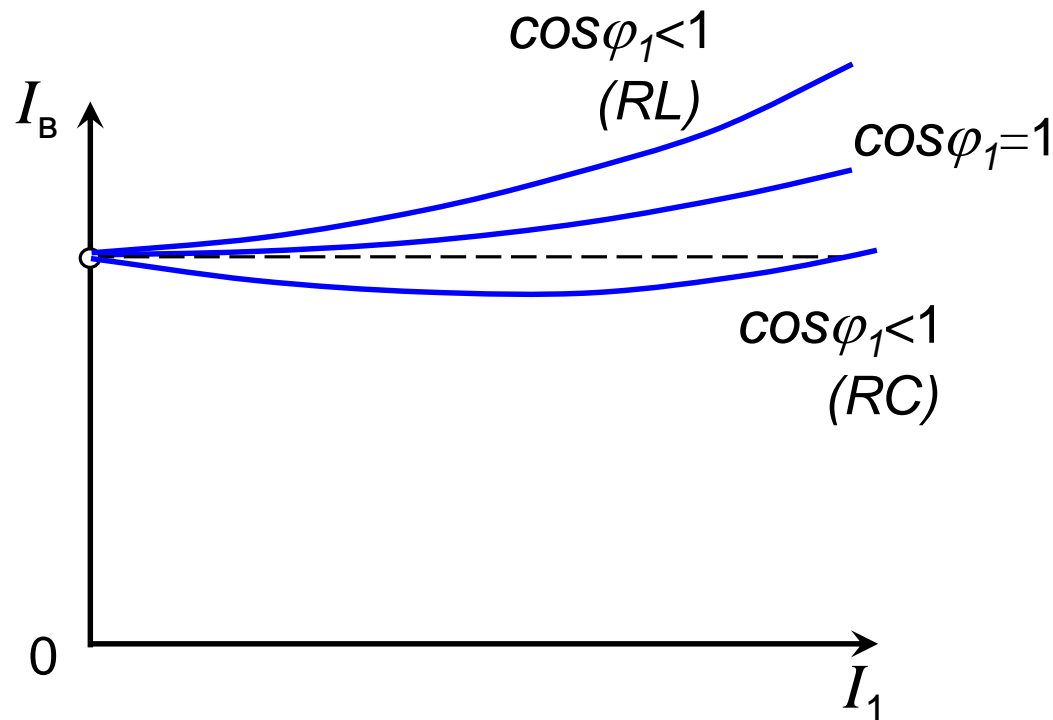
называют **номинальным изменением напряжения**.

## Регулировочная характеристика синхронного генератора

**Регулировочная характеристика** показывает, как следует изменять (регулировать) ток возбуждения генератора при изменениях нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменно равным номинальному.

**Регулировочная характеристика:**

$$I_B = f(I_1). \quad \text{при } U_1 = U_{1H} = \text{const}, \cos \varphi_1 = \text{const} \text{ и } n_1 = \text{const}.$$



# Угловая характеристика синхронной машины

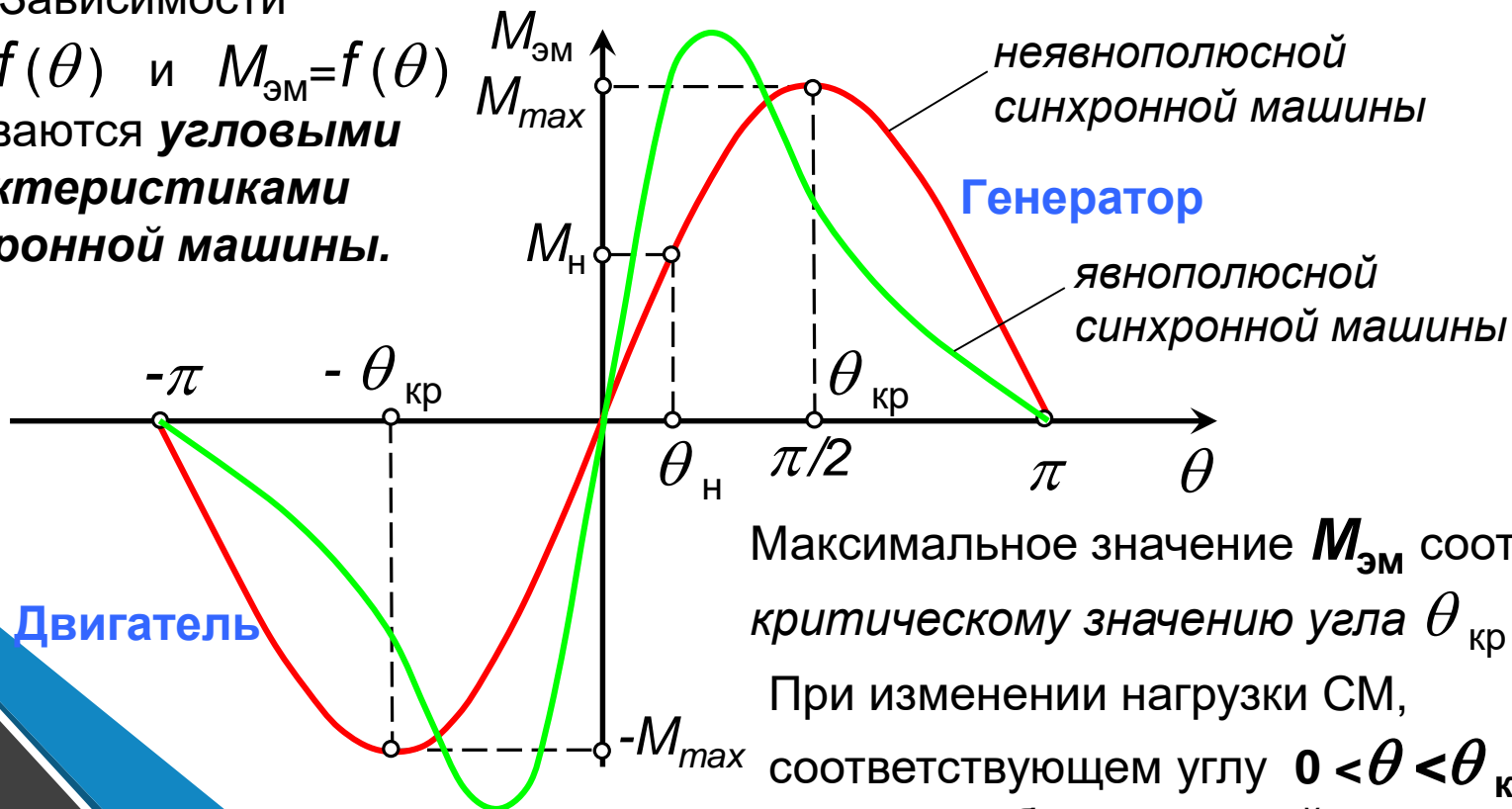
Электромагнитный момент  $M_{эм}$  синхронной машины создается в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с основным магнитным потоком ротора  $\Phi_0$

$$M_{эм} = P_{эм} / \omega_1, \quad \omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = 2\pi f_1 / p.$$

где  $\omega_1$  - угловая синхронная скорость вращения

Зависимости

$P_{эм} = f(\theta)$  и  $M_{эм} = f(\theta)$   
называются **угловыми характеристиками синхронной машины.**



## Работа синхронной машины в режиме двигателя

При нагрузке СМ, соответствующем углу  $\theta > \theta_{кр}$ , электромагнитный момент уменьшается, что ведет к нарушению равенства вращающего и противодействующего момента; частота вращения при этом увеличивается, машина **выходит из синхронизма**.

Отношение максимального электромагнитного момента  $M_{max}$  к номинальному  $M_H$  называется **перегрузочной способностью синхронной машины**

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_H}$$

В режиме двигателя СМ потребляет энергию из сети и преобразует ее в механическую энергию.

*Электромагнитный момент  $M_{эм}$  при этом является вращающим, а не тормозящим, как в режиме генератора.*

*Угол  $\theta$  между осью ротора и продольной осью магнитного поля машины становится отрицательным  $\theta < 0$ , т.е. полюсы ротора отстают от вращающего поля.*

*Однако частота вращения остается постоянной, равной синхронной частоте  $n_1$ .*

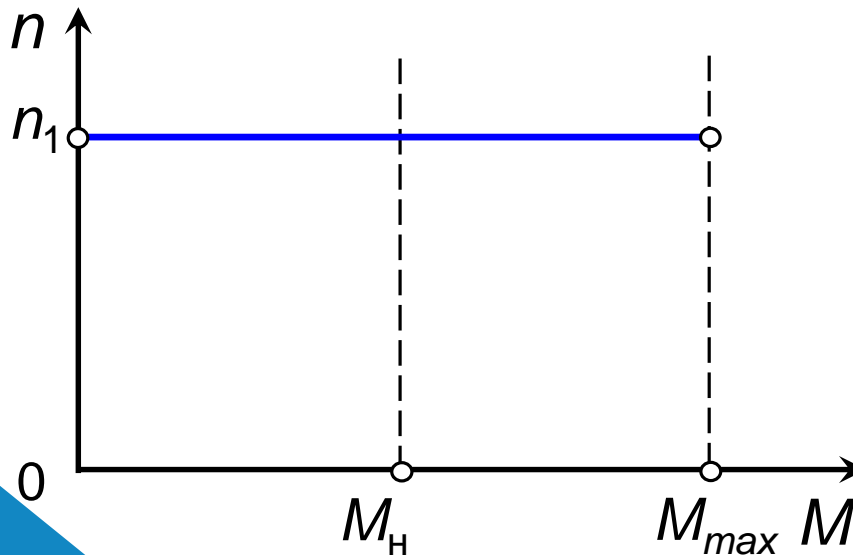
# Работа синхронной машины в режиме двигателя

Если *момент нагрузки* на валу будет больше  $M_{max}$ , то поддержание синхронной частоты вращения  $n_1$  будет невозможно, и двигатель *выпадет из синхронизма*:

– скорость начнет падать, возникнут недопустимые колебания тока и вращающего момента, при этом двигатель необходимо отключить от сети.

Обычно при *номинальной* нагрузке угол  $\theta_H = (20-30)^\circ$ , *номинальный* момент  $M_H \leq 0,5M_{max}$

**Механическая характеристика** синхронного двигателя является **абсолютно жесткой**



Частота вращения синхронного двигателя не зависит от момента нагрузки и равна синхронной частоте  $n_1$ .

Зависимость между приведенными к валу двигателя скоростью и моментом сопротивления  $\omega = f(M_c)$  называют **механической характеристикой производственного механизма**.

Для анализа и классификации различных механических характеристик воспользуемся следующей эмпирической формулой

$$M_c = M_0 + (M_{c_{\text{ном}}} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^x,$$

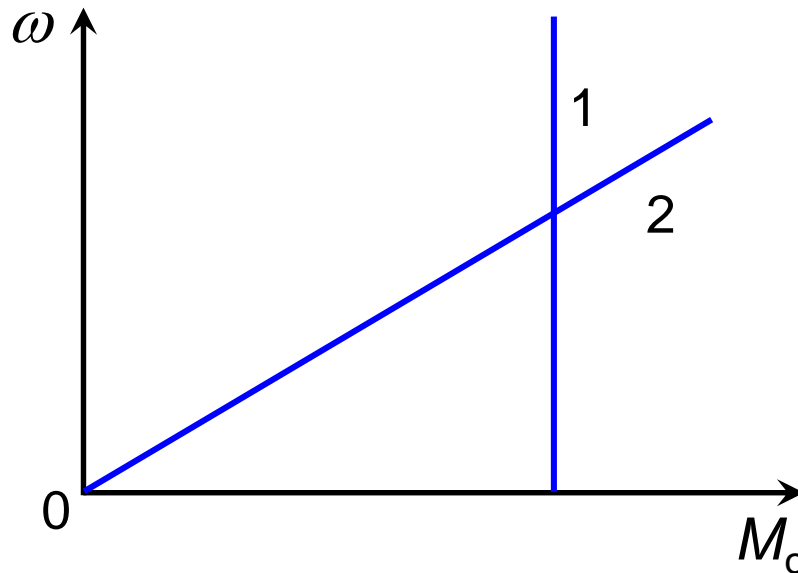
где  $M_c$  - момент сопротивления механизма при скорости  $\omega$  ;

$M_0$  - момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

$M_{c_{\text{ном}}}$  - момент сопротивления механизма при скорости  $\omega_{\text{ном}}$ .

Приведенная формула позволяет *классифицировать* механические характеристики производственных механизмов *на следующие основные категории*:

## 1. Механическая характеристика, независящая от скорости ( $x=0$ )



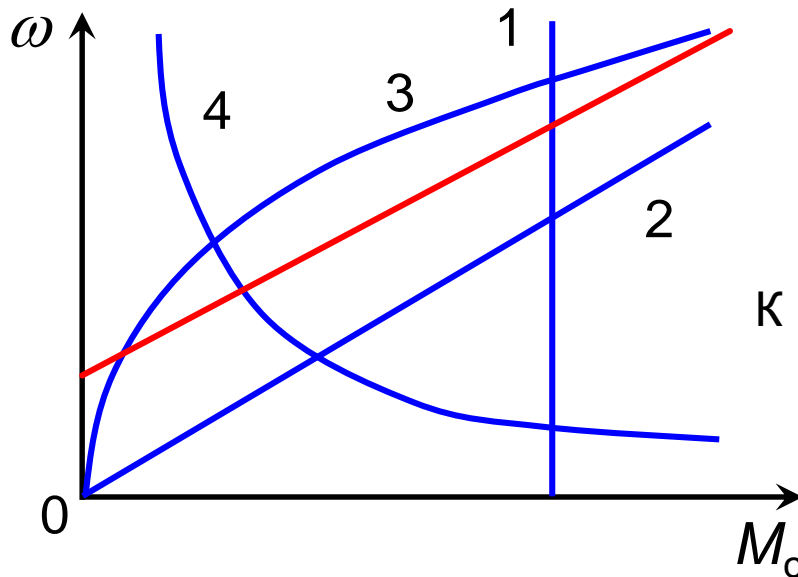
При этом  $M_C = M_{C_{НОМ}}$

## 2. Линейно-возрастающая механическая характеристика ( $x=1$ )

В этом случае *момент сопротивления линейно зависит от скорости* (на рисунке  $M_0 = 0$  )

Такая характеристика получится в приводе ГПТ независимого возбуждения, при его работе на постоянный внешний резистор.

### 3. Нелинейно-возрастающая (параболическая) механическая характеристика ( $\chi = 2$ ).



В этом случае *момент сопротивления зависит от квадрата скорости.*

Такие механизмы называют иногда механизмами с **вентиляторным моментом**.

К ним относятся: - вентиляторы;  
- центробежные насосы;  
- гребные винты и т.д.

### 4. Нелинейно-спадающая механическая характеристика ( $\chi = -1$ ).

*Момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность, потребляемая механизмом, остается постоянной.*

Такой характеристикой обладают некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки.

# Механические характеристики электрических двигателей

**Механической характеристикой** электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента, т. е.  $\omega = f(M)$ .

Почти все электродвигатели обладают падающей механической характеристикой.

Степень изменения угловой скорости с изменением момента характеризуется **жесткостью механических характеристик**:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$

**Жесткость механических характеристик** – это отношение разности электромагнитных моментов двигателя к соответствующей разности угловых скоростей.

Обычно на рабочих участках механической характеристики электрические двигатели имеют **отрицательную жесткость** т. е.  $\beta < 0$ .

В случае нелинейных механических характеристик жесткость определяется в каждой точке, как производная момента по угловой скорости

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}.$$

# Механические характеристики электрических двигателей

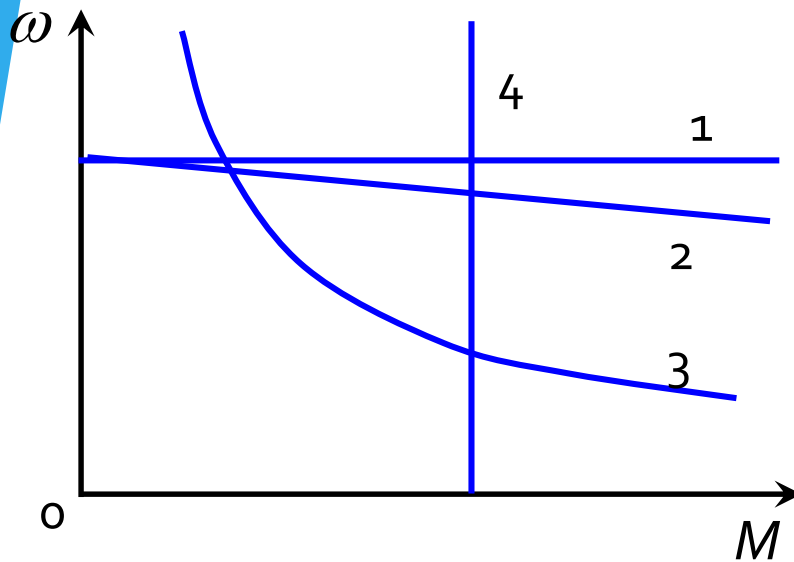
Существует *четыре основных категории механических характеристик* электрических двигателей:

**1. Абсолютно жесткая характеристика** ( $\beta = \infty$ , т.е.  $\omega = const$ )

Такой характеристикой обладают *синхронные двигатели*.

**2. Жесткая механическая характеристика** (незначительные изменения  $\omega$  при изменении  $M$ )

Такой характеристикой обладают:  
- *ДПТ независимого и параллельного возбуждения;*  
- *асинхронные двигатели* в пределах рабочей части характеристики.



**3. Мягкая механическая характеристика**

(при изменении момента  $M$  скорость  $\omega$  значительно изменяется)

Такой характеристикой обладают *ДПТ последовательного возбуждения*.

**4. Абсолютно мягкая механическая характеристика** ( $\beta = 0$ , т.е. при изменении скорости  $\omega$  момент двигателя остается неизменным:  $M = const$ )

Такой характеристикой обладают *ДПТ независимого возбуждения* при питании их от источника тока, т. е. при  $I_a = const$ .

## Пуск в ход синхронного двигателя

***Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента***

При неподвижном роторе за период изменения тока в статоре (0,02 с при  $f_1=50$  Гц) электромагнитный момент  $M_{эм}$  будет дважды менять свое направление, т.е.  $M_{эм}=0$ .

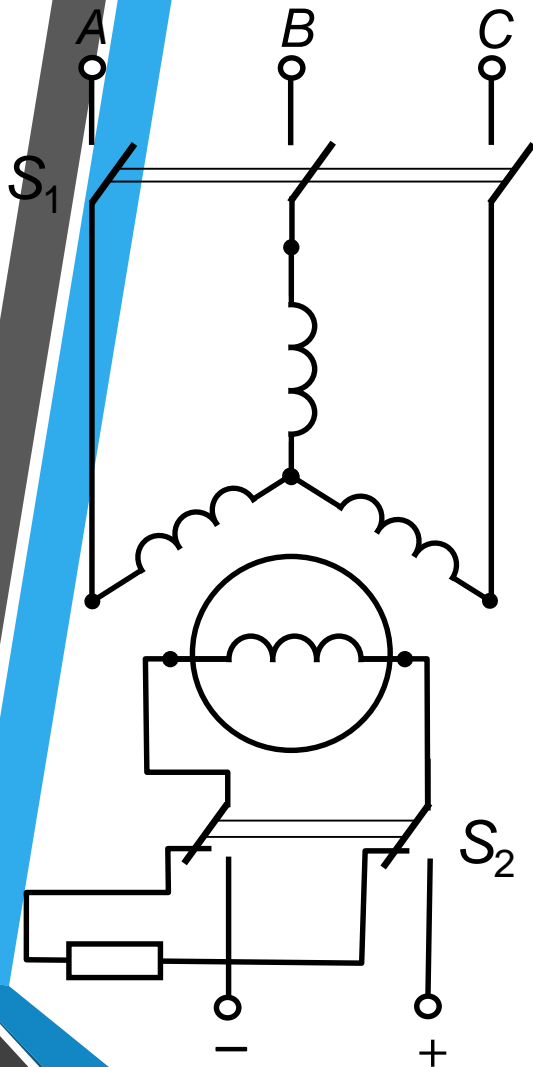
Ротор, обладающий определенной инерцией, не может разогнаться в течении полупериода (0,01 с) до синхронной частоты вращения  $n_1$ .

*Следовательно, для пуска СД необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до скорости близкой к синхронной.*

Для этой цели применяют *метод асинхронного пуска*: СД запускают как асинхронный, для чего *снабжают ротор специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой*, выполненной из латуни по типу беличьей клетки.

После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной  $n_2 = n_1(1-S)$ , подают ток в обмотку возбуждения и *ротор втягивается в синхронизм*.

## Пуск в ход синхронного двигателя



Перед включением обмотки статора в сеть *обмотка ротора замыкается на сопротивление*, а постоянный ток в нее не подается.

После включения обмотки статора в сеть возникает *вращающееся магнитное поле*, которое индуцирует токи в пусковой обмотке.

В результате возникает *асинхронный вращающий момент*, разгоняющий ротор до частоты вращения  $n_2 = n_1(1-S)$ , близкой к синхронной.

Затем ОВ ротора отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока.

При этом возникает обычный для синхронной машины *момент взаимодействия вращающегося поля статора и полюсов ротора* и СД **втягивается в синхронизм**.

При вращении ротора с частотой  $n_1$  токи в пусковой обмотке не наводятся и она не участвует в работе машины.

*Пускать СД с разомкнутой ОВ нельзя*, т.к. при  $S=1$  и значительном числе витков в ОВ в ней наводится ЭДС, которая может достигать больших значений, что может вызвать *пробой изоляции*.

# Потери энергии и КПД синхронных машин

Потери энергии  $\sum P$ : **основные и добавочные.**

**Основные потери:** электрические, магнитные, механические.

- 1) **Электрические потери** возникают при протекании электрического тока по обмоткам статора и ротора и приводят к их нагреву
- 2) **Магнитные потери:**  $P_M = P_{\text{гист}} + P_{\text{в.т.}}$  - потери на гистерезис и вихревые токи имеют место *только в сердечнике статора* при его перемагничивании. Ротор вращается синхронно с магнитным полем и не перемагничивается.
- 3) **Механические потери**  $P_{\text{мех}}$  - потери на преодоление сил трения в подшипниках, в скользящем контакте и сил трения вращающихся частей о воздух, т.е. вентиляционные потери.

**Добавочные потери**  $P_{\text{доб}}$  - включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных пульсациями магнитного поля, действием высших гармоник, вихревыми токами в ряде частей машины и другими причинами.

**Коэффициент полезного действия**  
для синхронного генератора

$$\eta_{\text{г}} = 1 - \frac{\sum P}{P_{1\text{ном}} + \sum P}$$

где  $P_{1\text{ном}} = m_1 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \cos \varphi_1$  - активная мощность на нагрузке.

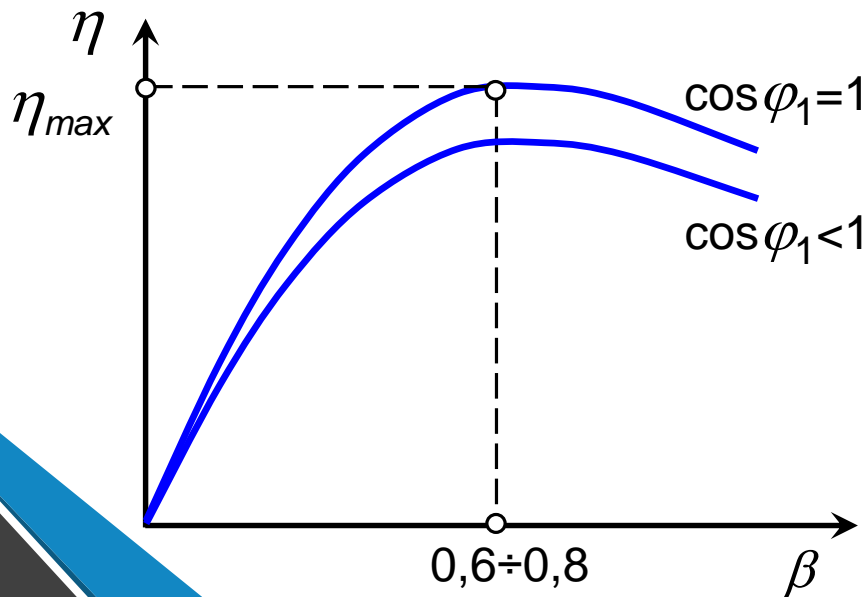
# Потери энергии и КПД синхронных машин

**Коэффициент полезного действия для синхронного двигателя**

$$\eta_r = 1 - \frac{\sum P}{P_{1\text{НОМ}}}$$

где  $P_{1\text{НОМ}}$  - активная мощность потребляемая синхронным двигателем из сети

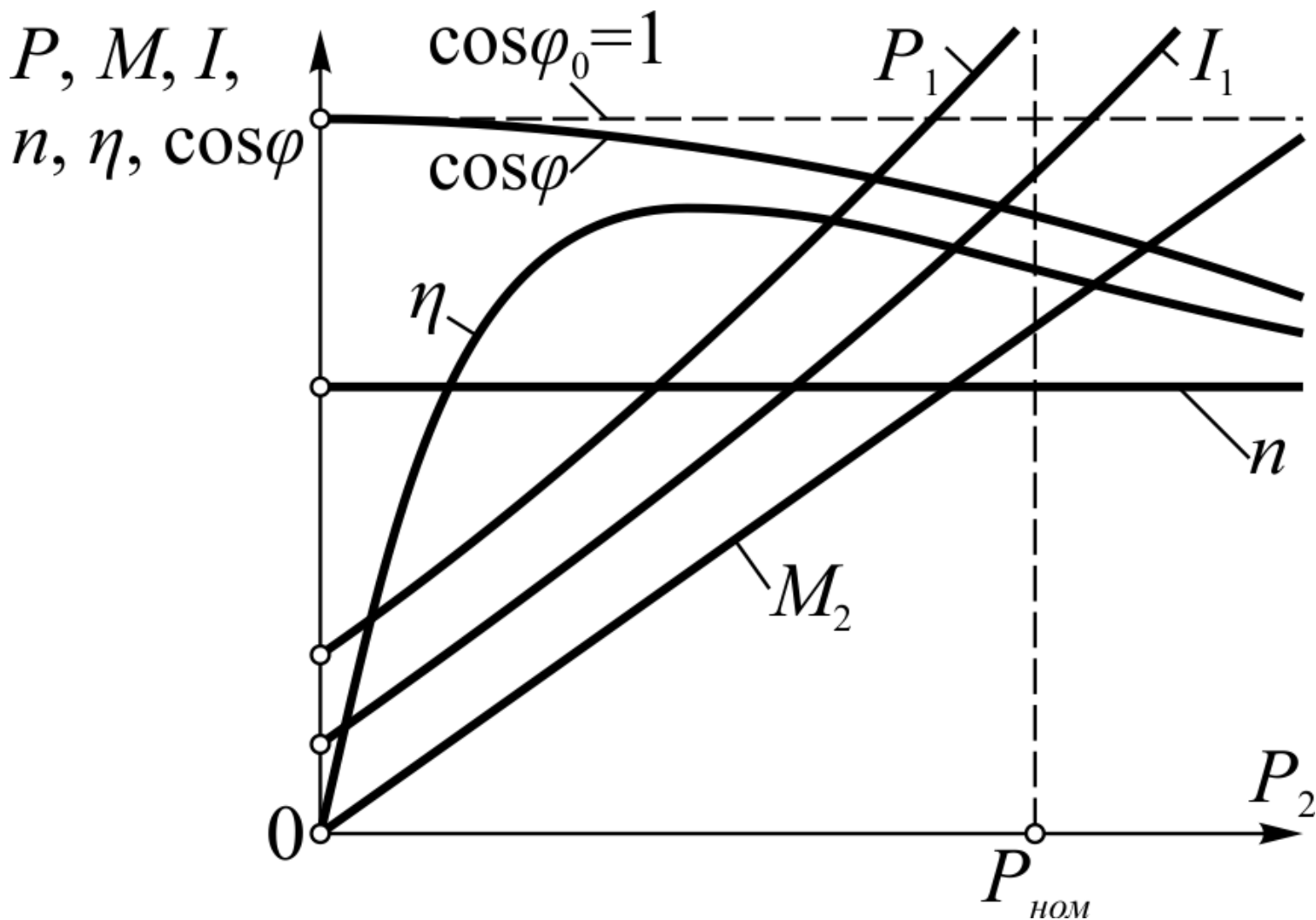
Коэффициент полезного действия синхронной машины зависит как от величины нагрузки (коэффициента нагрузки  $\beta$ ), так и от ее характера ( $\cos \varphi_1$ )



У синхронных машин с  $P_{\text{НОМ}} < 100$  кВт  
 $\eta_{\text{max}} = (80 \div 90)\%$ .

У синхронных машин с  $P_{\text{НОМ}} > 100$  кВт  
 $\eta_{\text{max}} = (90 \div 99)\%$ .

# Рабочие характеристики синхронного электродвигателя



## Заключение

Синхронной машиной называют такую машину переменного тока, частота вращения ротора которой в установившемся режиме равна частоте вращения магнитного поля и не зависит от нагрузки.

Статор синхронной машины выполнен также как асинхронной: в пазах сердечника статора расположена трехфазная обмотка. Обмотка ротора питается от постороннего источника постоянного тока через контактные кольца и щетки и называется обмоткой возбуждения.

В синхронных машинах обмотку статора, в которой наводится ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря. Часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, называется индуктором

В машине, работающей под нагрузкой, магнитное поле создается не только МДС ротора, но и МДС токов статора. Воздействие МДС якоря на магнитное поле ротора называют реакцией якоря.

В ненасыщенной машине в результате действия реакции якоря вектор магнитной индукции сдвигается навстречу направлению вращения на угол  $\theta$ , но результирующий магнитный поток  $\Phi$  остается неизменным.

При индуктивном характере тока нагрузки размагничивающее действие реакции якоря усиливается, а при достаточной емкостной нагрузке – реакция якоря оказывает подмагничивающее воздействие.

Основными характеристиками синхронного генератора являются: характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристика.

## Заключение

Зависимость электромагнитного момента синхронной машины от величины угла сдвига вектора магнитной индукции называется угловой характеристикой.

Максимальное значение момента соответствует критическому значению угла  $\theta_{кр}$ . При изменении нагрузки синхронной машины, соответствующем углу  $0 < \theta < \theta_{кр}$ , машина работает устойчиво.

При нагрузке, соответствующем углу  $\theta > \theta_{кр}$ , электромагнитный момент уменьшается и машина выходит из синхронизма.

Механическая характеристика синхронного двигателя является абсолютно жесткой.

Механические характеристики производственных механизмов подразделяют на: независящие от скорости, линейно-возрастающие, нелинейно-возрастающие и нелинейно-спадающие.

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента.

Жесткость механических характеристик – это отношение разности электромагнитных моментов двигателя к соответствующей разности угловых скоростей.

## Заключение

Существует четыре типа механических характеристик электрических двигателей: абсолютно жесткая, жесткая, мягкая и абсолютно мягкая.

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента, следовательно, для пуска двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до скорости близкой к синхронной.

После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, подают ток в обмотку возбуждения и ротор втягивается в синхронизм.

Потери энергии в синхронных машинах подразделяют на основные потери: электрические, магнитные, механические и добавочные потери.

Коэффициент полезного действия синхронной машины зависит как от величины нагрузки (коэффициента нагрузки  $\beta$ ), так и от ее характера ( $\cos\varphi_1$ ).

## Вопросы для самоконтроля

1. Объясните устройство и принцип работы синхронной машины. Почему при построении теории синхронных машин их подразделяют на явнополюсные и неявнополюсные?
2. Покажите, что синхронная машина обратима, может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Объясните конструктивные отличия двигателей по сравнению с генераторами. Чем они обусловлены?
3. В каких режимах могут работать синхронные машины и где они применяются?
4. В чем состоит явление реакции якоря? Почему влияние реакции якоря расценивается как вредное?
5. Какие магнитные потоки имеют место в синхронной машине?
6. Как проявляется явление реакции якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузке синхронного генератора?
7. Каким образом конструктивно осуществляется токоподвод к обмотке возбуждения синхронной машины?
8. Синхронные машины относятся к машинам переменного тока, но в них шихтуется только магнитная система статора (якоря). Объясните, почему не шихтуется индуктор этих машин?

## Вопросы для самоконтроля

9. Явнополюсные синхронные машины способны развивать активную и реактивную мощности без возбуждения. Объясните природу этого эффекта.
10. Поясните вид характеристики холостого хода синхронного генератора.
11. Что представляет собой внешняя характеристика генератора и при каких условиях она снимается?
12. Что представляет собой регулировочная характеристика и при каких условиях она снимается?
13. Начертить и объяснить угловую характеристику синхронной машины.
14. При каком максимальном угле нагрузки работа синхронного неявнополюсного генератора остается устойчивой?
15. От чего зависит максимальный момент синхронного двигателя? Как повлияет на режим работы двигателя снижение напряжения сети при постоянной нагрузке?
16. Почему частота вращения ротора двигателя остается неизменной при изменении нагрузки?

## Вопросы для самоконтроля

17. Как изменяется коэффициент мощности синхронной машины при изменении тока возбуждения?
18. С какой целью в синхронных генераторах устанавливается демпферная клетка?
19. Перечислите потери, которые возникают при работе синхронного генератора.
20. Перечислите способы пуска синхронных двигателей. Объясните, зачем при асинхронном пуске синхронного двигателя обмотку возбуждения замыкают на активное сопротивление. Почему не на индуктивное? Нельзя ли оставить обмотку возбуждения разомкнутой?
21. Сравните свойства синхронного и асинхронного двигателей. Оцените достоинства и недостатки каждого из них.
22. Что произойдет с синхронным двигателем, если во время работы отключить с помощью муфты нагрузку на валу?
23. Каким образом возможно регулировать скорость вращения синхронного двигателя?
24. Что произойдет с синхронным двигателем, если отключить внезапно источник питания обмотки ротора

1. Касаткин, А.С. Электротехника: учеб. для студентов неэлектротехн. специальностей вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 544 с.
2. Хернер, А. Автомобильная электрика и электроника /А. Хернер, Х-Ю. Риль; перевод с нем. ЧМП РИА «GMM-пресс». – М.: ООО «Издательство «За рулём», 2013. – 624 с.
3. Wyatt, D. Aircraft Electrical and Electronic Systems / D. Wyatt, M. Tooley. – Second Edition – NY, Routledge, 2018. – 439 p.
4. Bell, J.A. Modern Diesel Technology: Electricity & Electronics / J.A. Bell - Second Edition – NY, Delmar, 2014. – 546 p.