



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

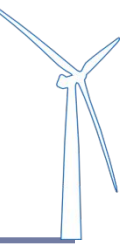


**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ и ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Тема лекции

# Машины переменного тока

**к.т.н., доцент Шайтор Николай Михайлович**



## Вопросы лекции

1. **ТРАНСФОРМАТОРЫ**
2. **АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

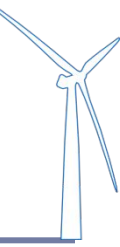




## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА по разделу 5 «Электрооборудование кораблей»

1. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы. –Л: Судостроение, - 1967. – 387с.
2. Вилесов Д.В., Краснов В.В., Мещанинов П.А. и др. Электрооборудование судов. – Л.: Судостроение, 1982 – 264с.
3. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Академия, 2006 – 288с.
4. Чекунов К.А. Судовые электроприводы и электродвижение судов. – Л.: Судостроение, 1986 – 352с.
5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего применения.
6. Справочник судового электротехника. Под редакцией Г.И. Китаенко, том 2 –Л.: судостроение, 1980 – 623с.
7. Электрическая защита судового электрооборудования. Колязин Е.А. и др. – Л.: судостроение, 1983 – 283с.



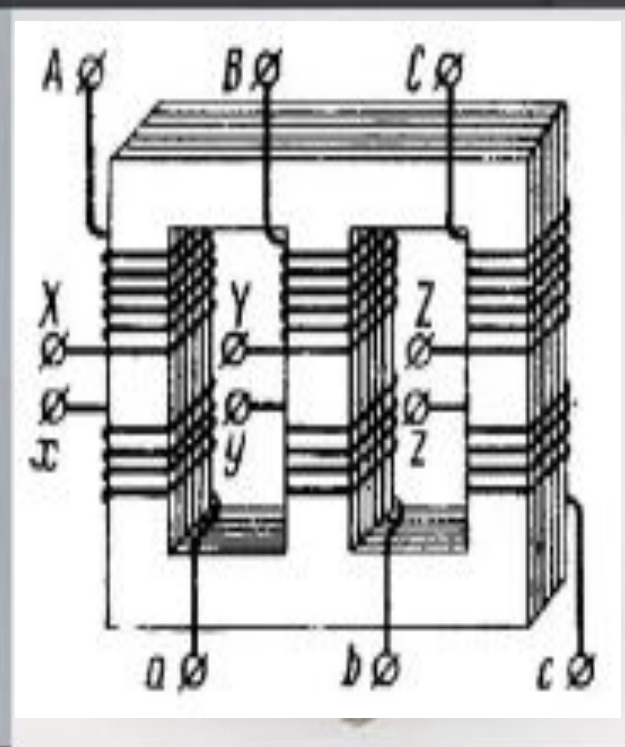


# 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ



# Виды трансформаторов

- В технике нашли широкое применение многие виды трансформаторов ( Силовой трансформатор, автотрансформатор, трансформатор тока, трансформатор напряжения, импульсный трансформатор, разделительный трансформатор и другие)



# Электромагнитная индукция

**Магнитный поток  $\Phi$**  - физическая величина, численно равная произведению модуля магнитной индукции на площадь контура и на косинус угла между нормалью к контуру и вектором магнитной индукции.



**Закон электромагнитной индукции:** в замкнутом контуре, сцепленном с магнитным потоком  $\Phi$ , индуцируется ЭДС, значение которой равно

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

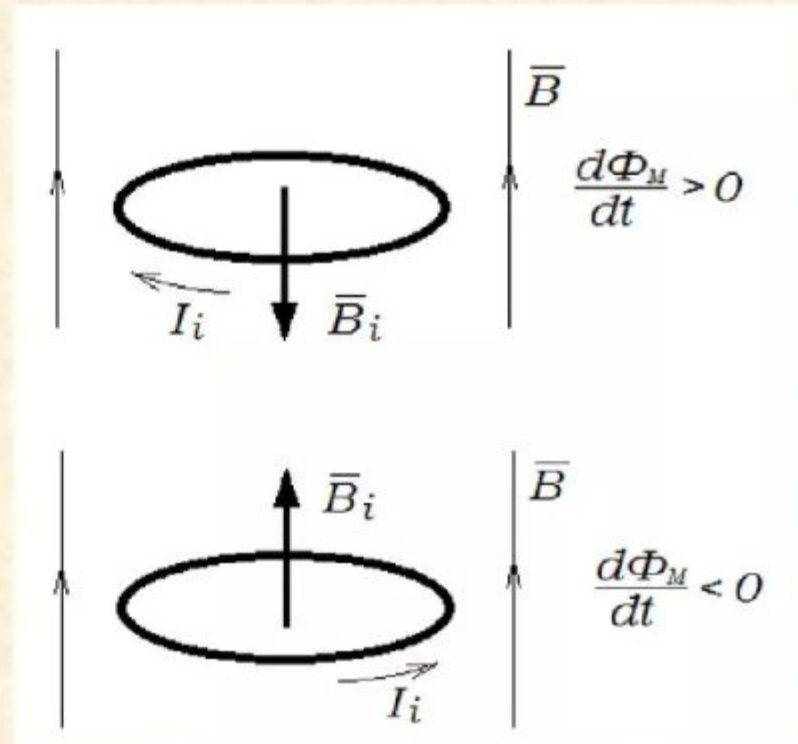
При этом направление ЭДС определяется **правилом буравчика**: при поступательном движении буравчика вдоль магнитных линий направление вращения его рукоятки определяет направление индуцированной ЭДС.

# Правило Ленца:

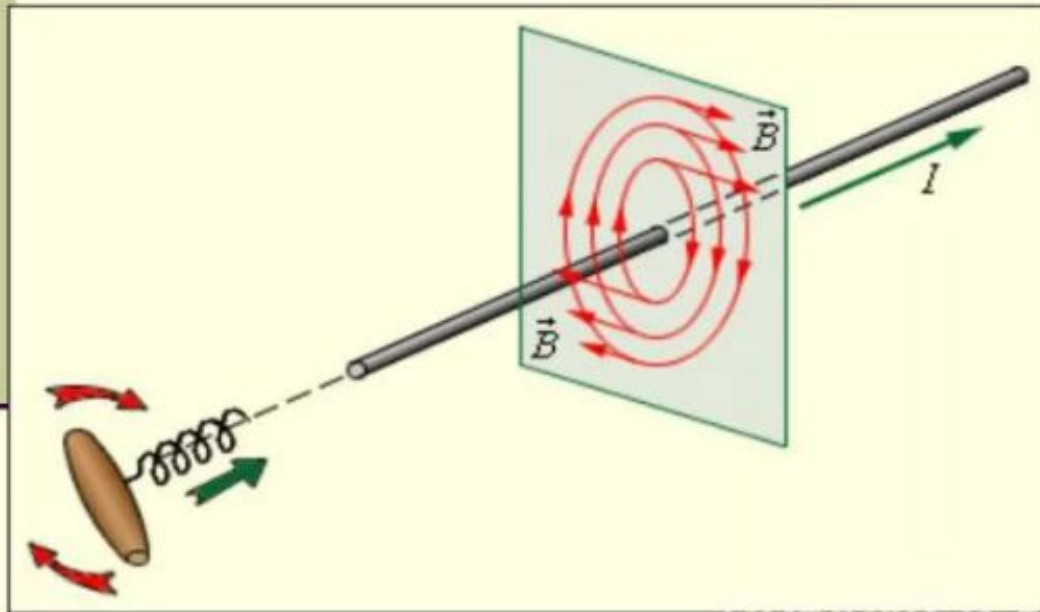
Индукционный ток при электромагнитной индукции всегда направлен так, что созданное им магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, который вызвал этот ток.

*Так система проявляет свойство инерции.*

Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии.

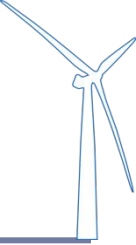


## ПРАВИЛО БУРАВЧИКА

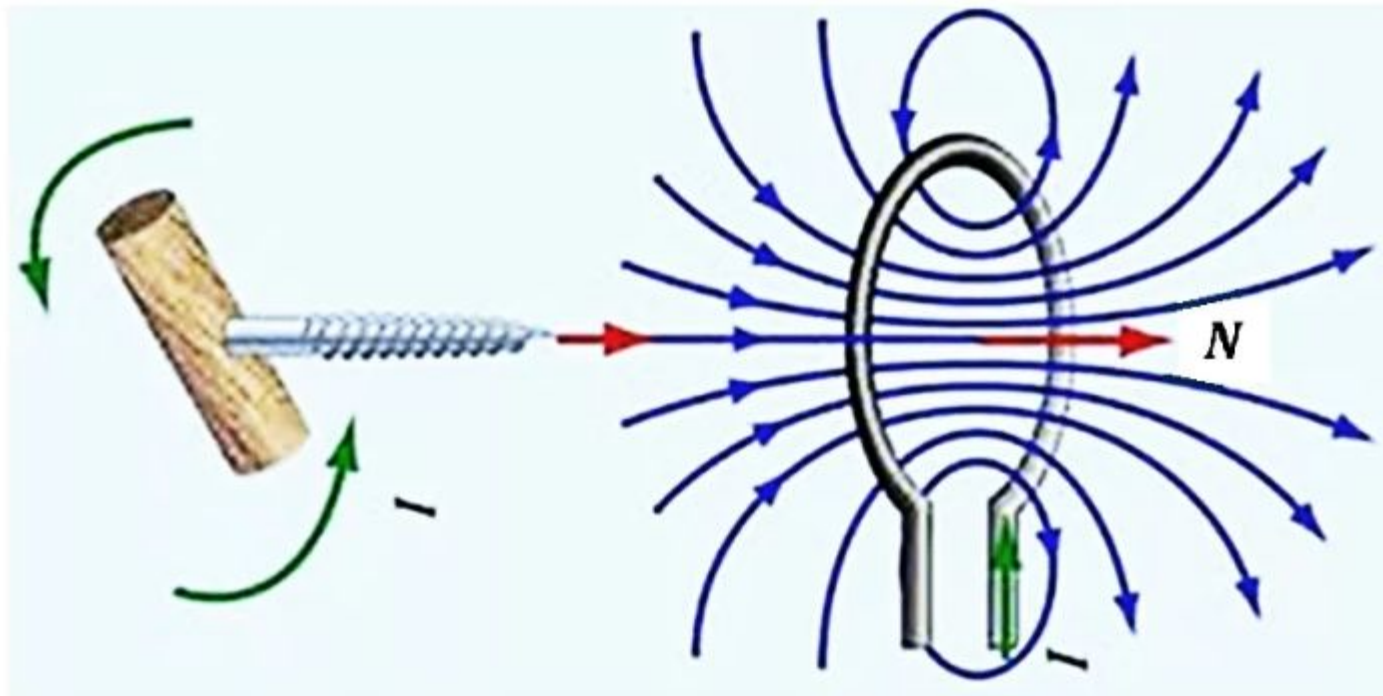


Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.

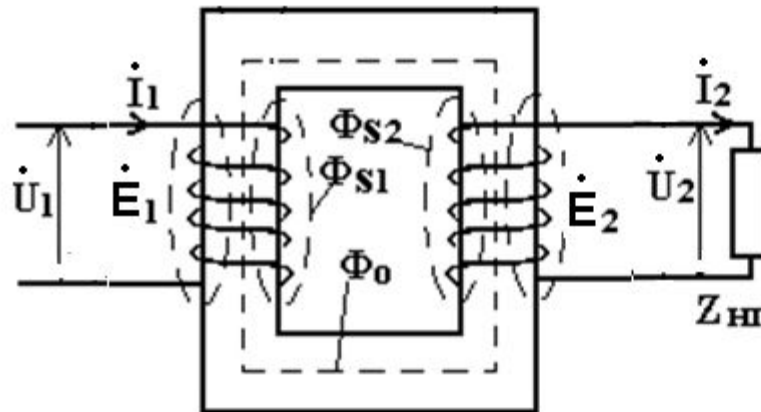




# Определение направления силовых линий магнитного поля ТОКА (правило буравчика)



## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



коэффициент  
трансформации:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin \omega t$  — магнитный поток трансформатора

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -W_1 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t = 2\pi f W_1 \Phi_{0m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -W_2 \omega \Phi_{0m} \cos \omega t = 2\pi f W_2 \Phi_{0m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

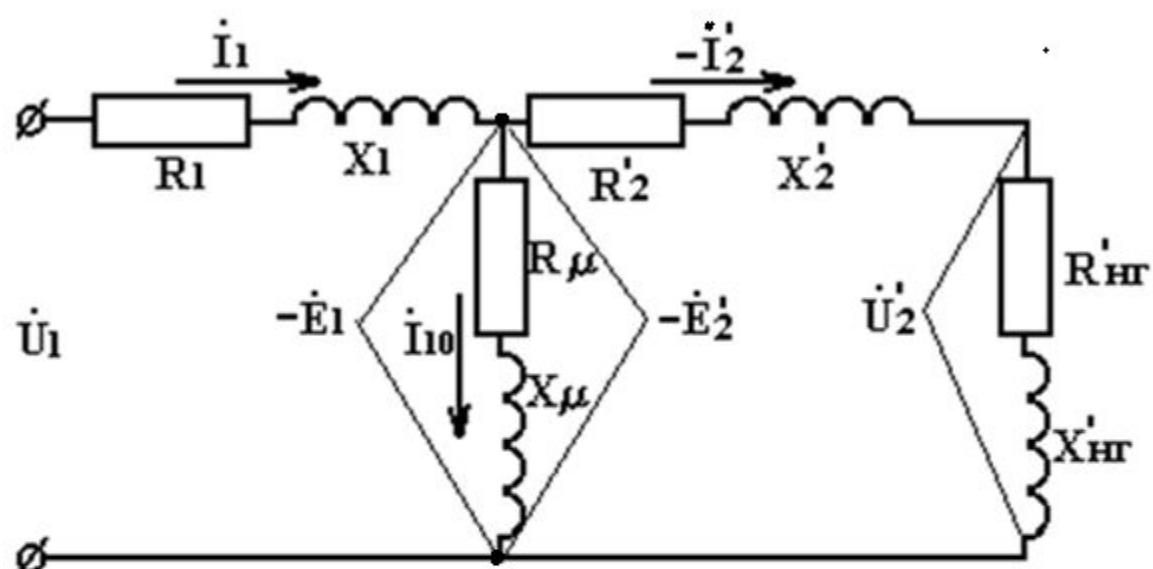
$$E_{1m} = 2\pi f W_1 \Phi_{0m};$$

$$E_{2m} = 2\pi f W_2 \Phi_{0m};$$

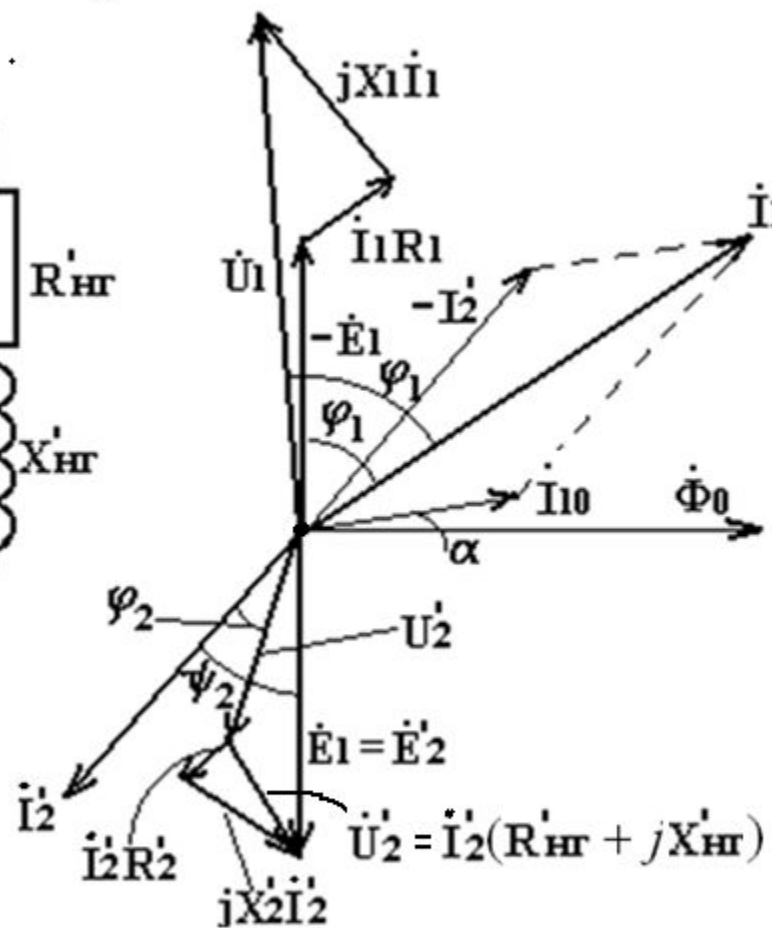
$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f W_1 \Phi_{0m};$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f W_2 \Phi_{0m}$$

## Векторная диаграмма и схема замещения приведенного трансформатора

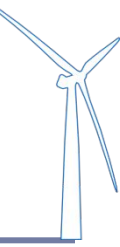


$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_2) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} - \dot{I}'_2 \end{aligned}$$



$$E'_2 = E_1 = KE_2; \quad I'_2 = \frac{I_2}{K}; \quad U'_2 = KU_2;$$

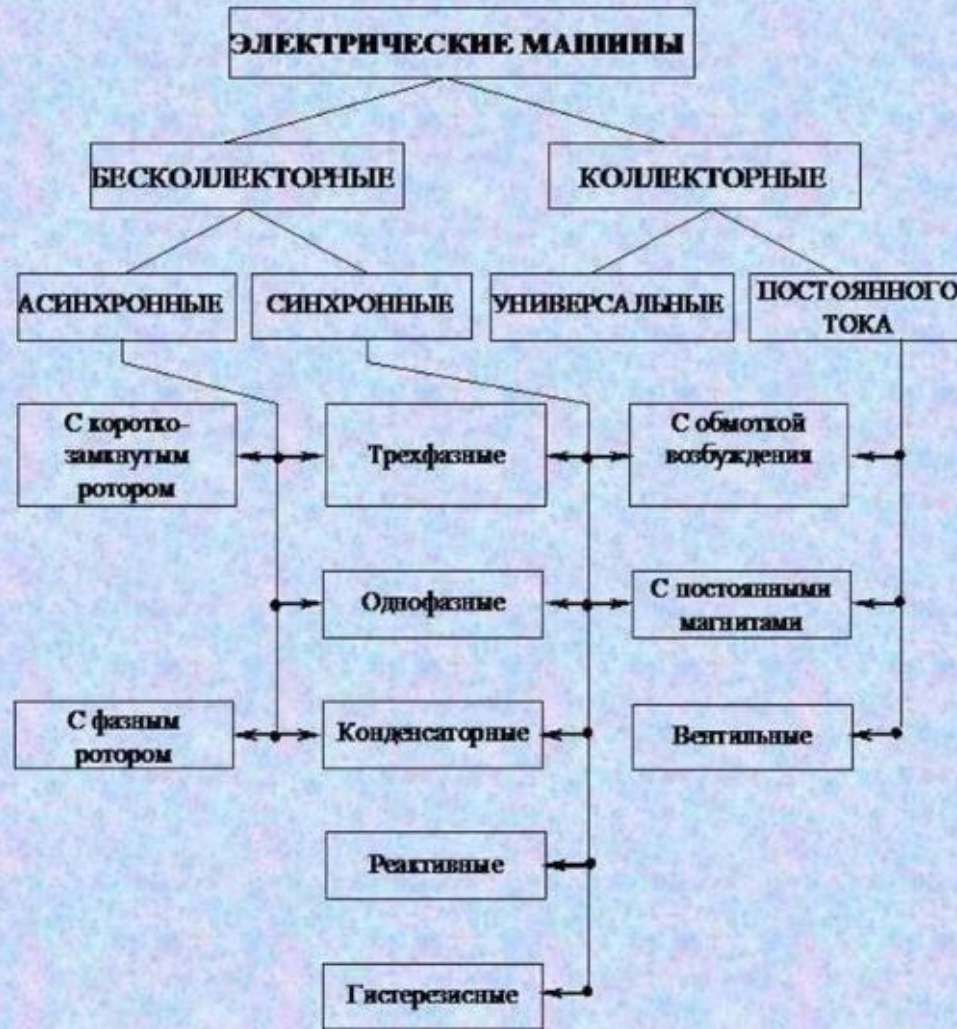
$$R'_2 = R_2 K^2; \quad X'_2 = X_2 K^2; \quad Z'_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} K^2 = Z_2 K^2$$



# 1. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ



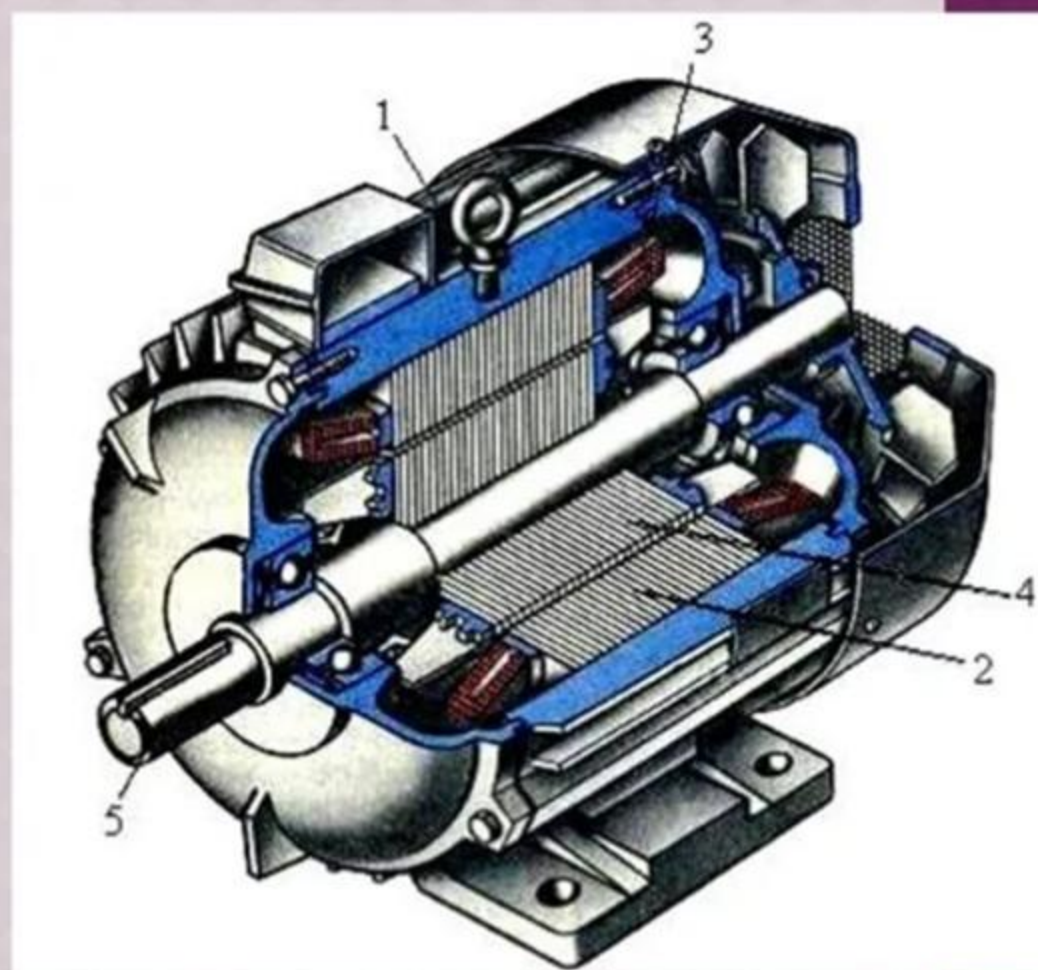
# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН





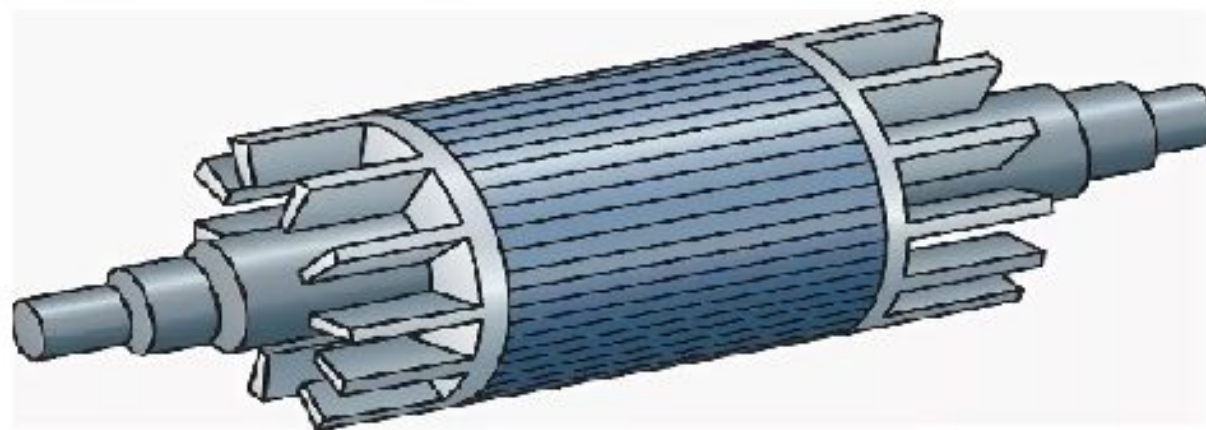
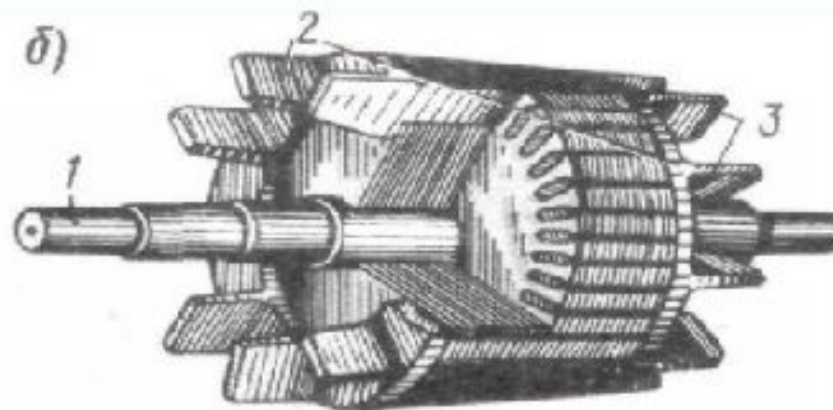
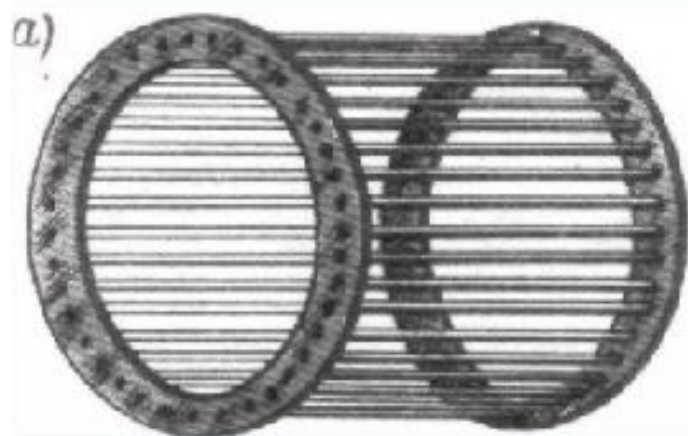
## **ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ**

- 1 - СТАНИНА;**
- 2 - СЕРДЕЧНИК  
СТАТОРА;**
- 3 - ОБМОТКА  
СТАТОРА;**
- 4 - СЕРДЕЧНИК  
РОТОРА;**
- 5 - ВАЛ.**

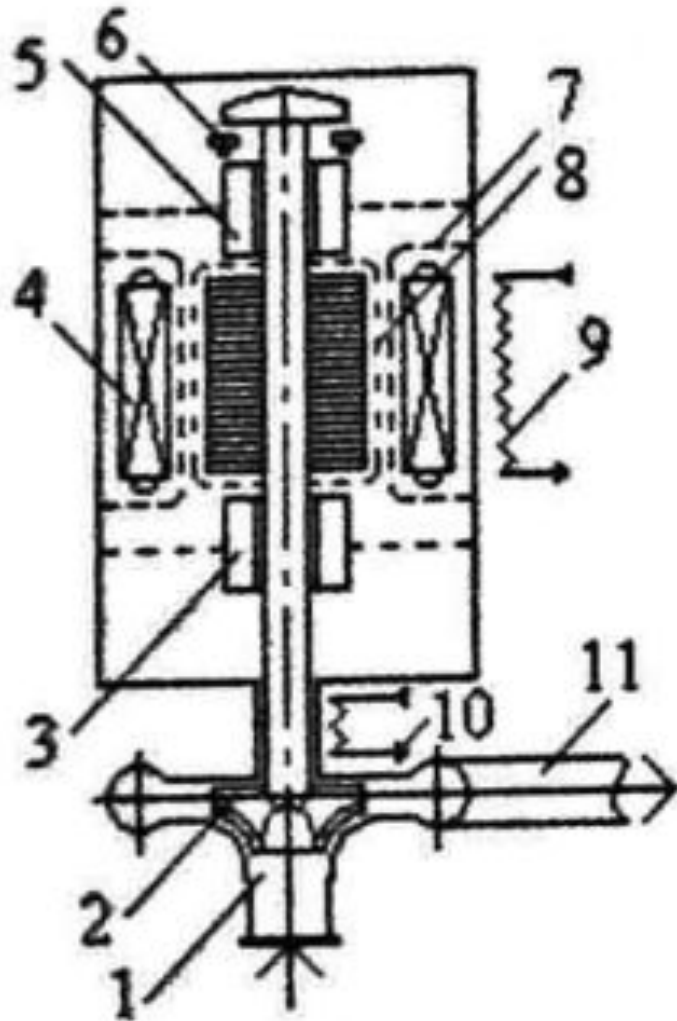


## Короткозамкнутый ротор:

**а** — обмотка «беличья клетка»; **б** — ротор с обмоткой, выполненной методом литья под давлением; **1** — вал; **2** — короткозамыкающие кольца; **3** — вентиляционные лопапки



# Двухскоростной ЦНПК-АД атомного судна



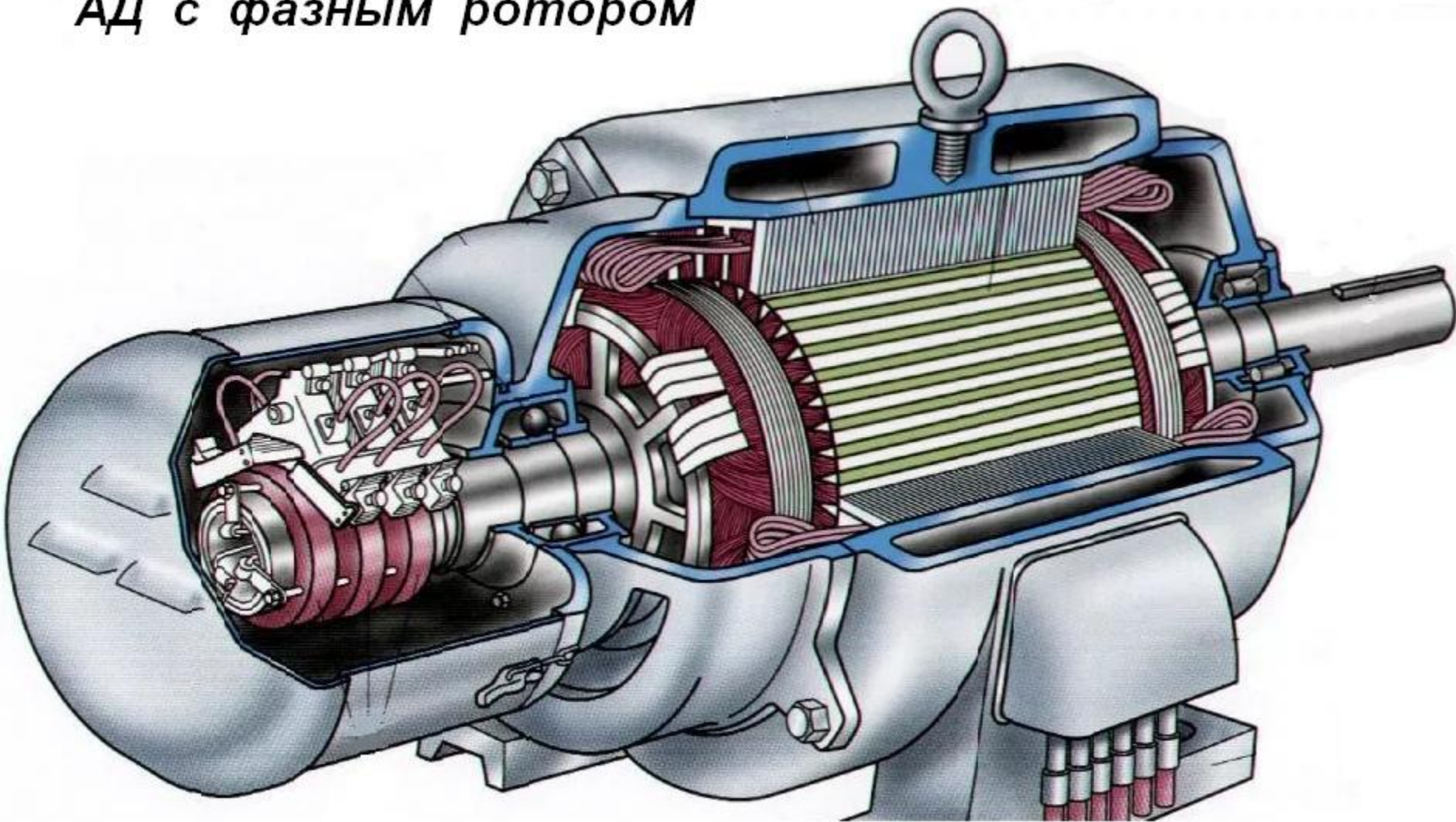
1 – всасывающий патрубок;  
2 – рабочее колесо; 3, 5 – радиальные подшипники;  
4 – статор электродвигателя; 6 – осевой подшипник;  
7 – экранирующая перегородка статора; 8 – экранирующая перегородка ротора; 9, 10 – система охлаждения; 11 – напорный патрубок

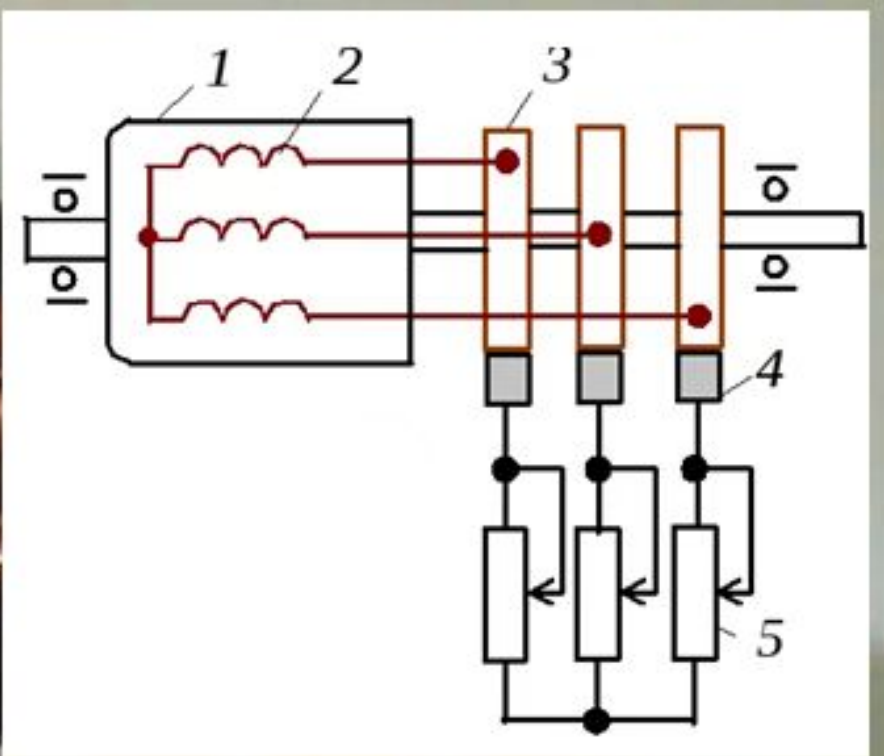
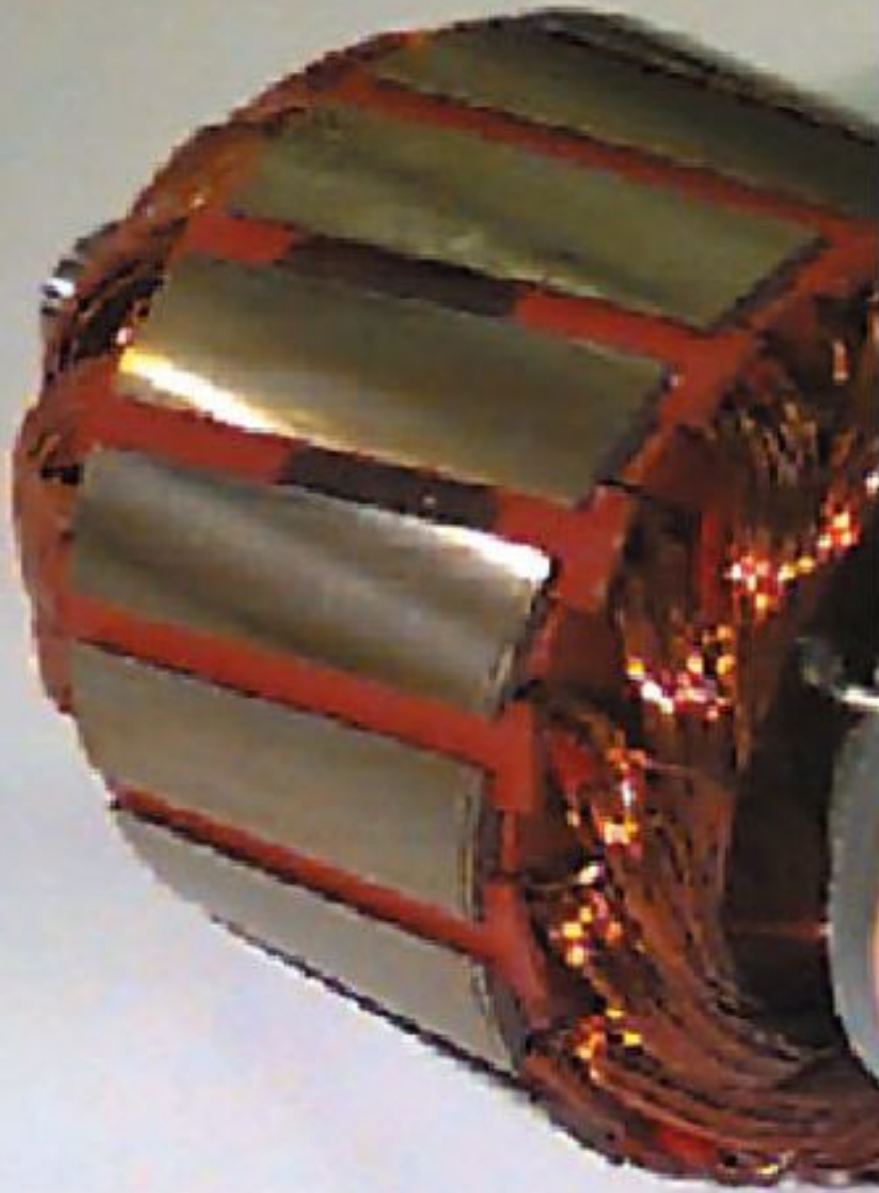
ОБС –  $3\,000\text{ мин}^{-1}$

ОМС –  $1\,000\text{ мин}^{-1}$



# АД с фазным ротором





# ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СТАТОРА

Трёхфазная система при подключении:

$$U_A = U_m \sin \omega t$$

$$U_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

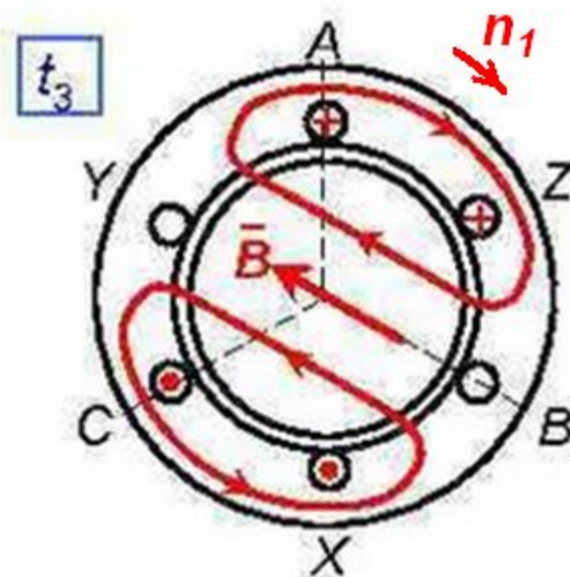
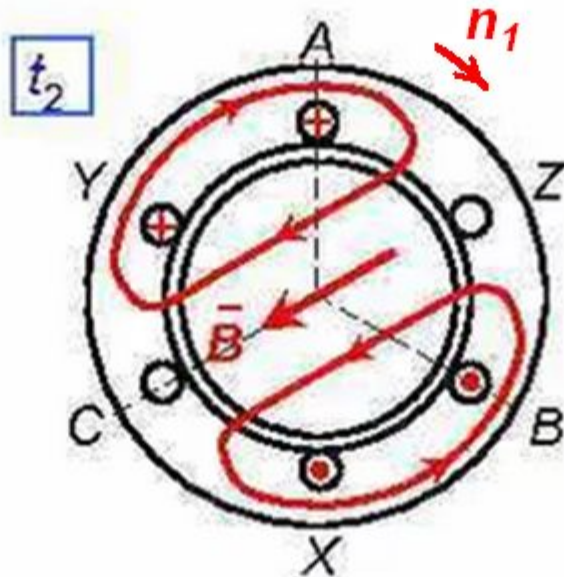
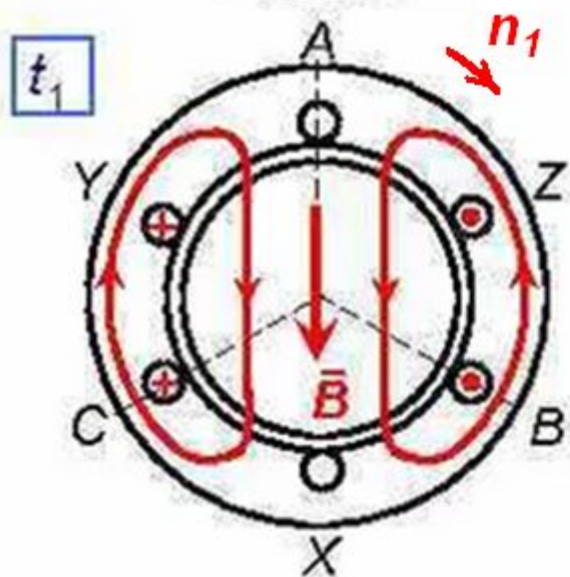
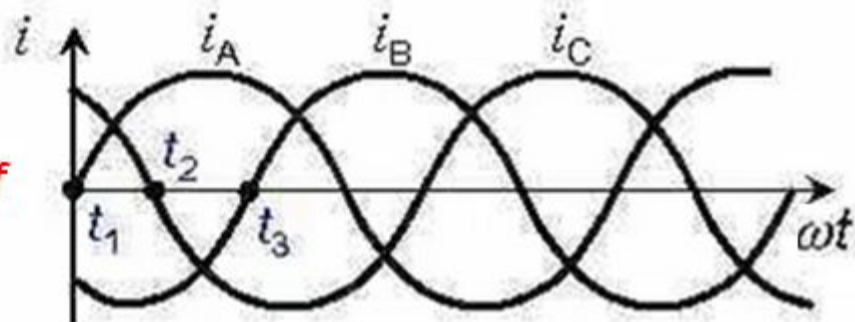
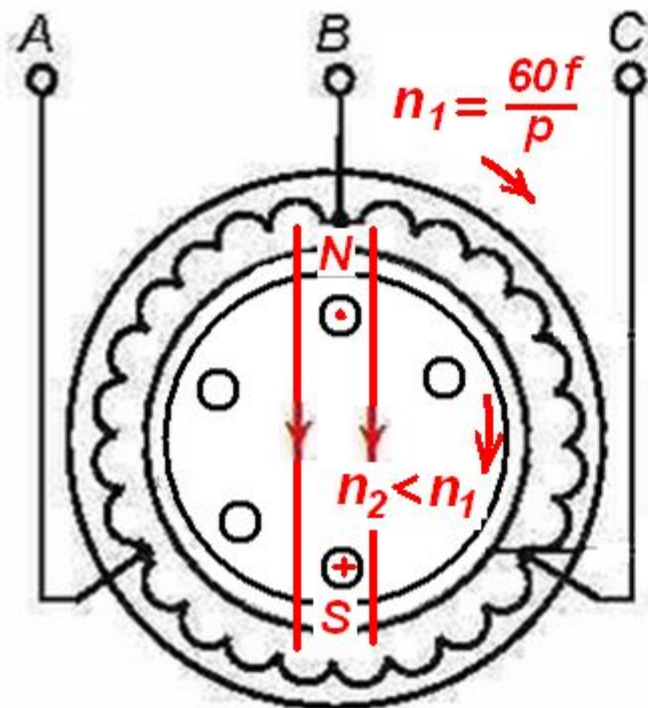
$$U_C = U_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

$$I_A = I_m \sin \omega t$$

$$I_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

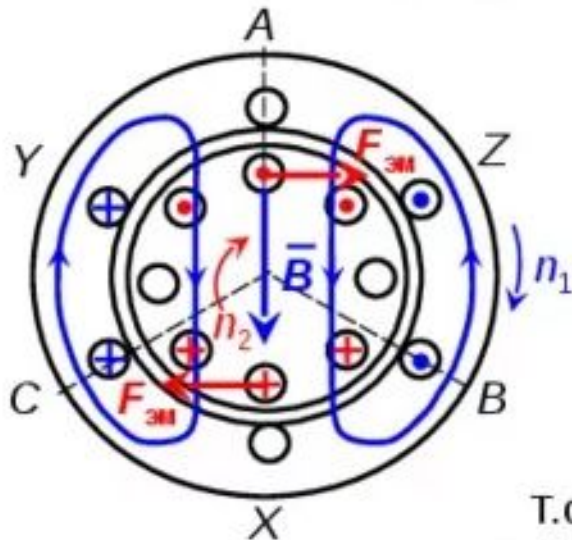
$$I_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

$$\omega = 2\pi f$$





## Принцип действия асинхронного двигателя



Частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения):

$$n_1 = 60 f_1 / p$$

Совокупность сил  $F_{эм}$  создает электромагнитный момент  $M_{эм}$ , приводящий во вращение ротор с частотой

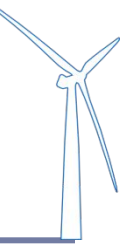
$$n_2 < n_1$$

Т.о. электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора

Направление вращения магнитного поля, а, следовательно и направление вращения ротора АД, зависят от порядка чередования фаз напряжения  $U_1$ .

Частота вращения ротора  $n_2$  в АД всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ , так как только в этом случае происходит наведение ЭДС в обмотке ротора





## Работа АД при вращающемся роторе

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad \text{Скольжение ротора.}$$

Обмотка ротора пересекается магнитным потоком с частотой  $n_s = n_1 - n_2$ .

Частота индуцируемой в роторе ЭДС:

$$f_2 = \frac{p \cdot n_s}{60} = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60} = \frac{p \cdot n_1 \cdot (n_1 - n_2)}{60 n_1};$$

$$f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60};$$

$$f_2 = f_1 \cdot s.$$

ЭДС в обмотке вращающегося ротора:

$$E_{2S} = 4,44 \cdot f_2 \cdot W_2 \cdot K_{об2} \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f_1 \cdot s \cdot W_2 \cdot K_{об2} \cdot \Phi_m.$$

Учитывая, что ЭДС при заторможенном роторе:

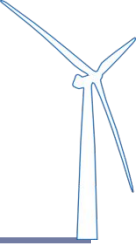
$$E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot W_2 \cdot K_{об2} \cdot \Phi_m, \quad \text{получаем:}$$

$$E_{2S} = E_2 \cdot s.$$

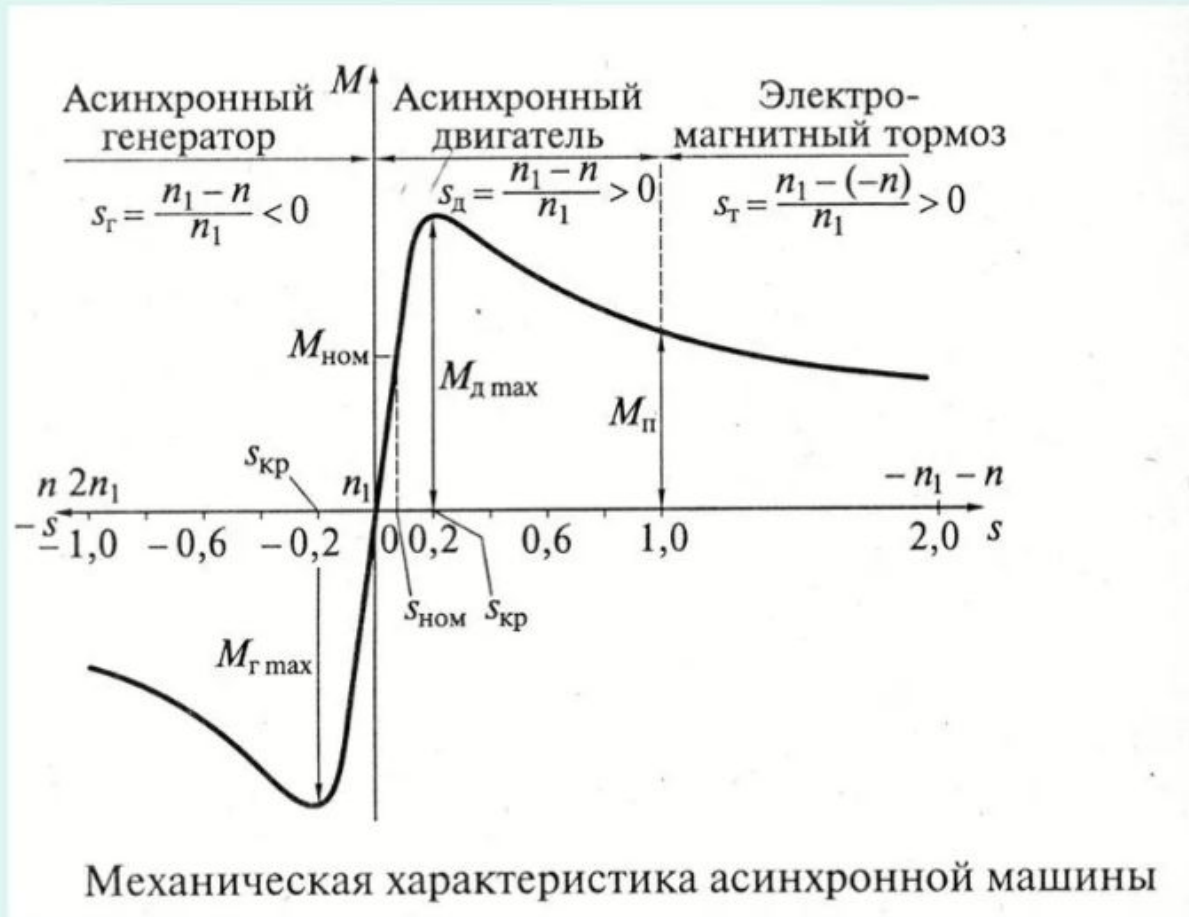
## 2. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя:

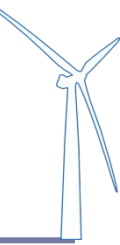
$$n_2 = (1 - s) \frac{60 \cdot f}{p}$$

- Изменением скольжения, для этого в фазном двигателе в цепь обмотки ротора включают регулировочный реостат, но при этом будут большие тепловые потери.  $S$  можно менять с помощью напряжения питания.
- Изменяя количество пар полюсов, переключая секции обмотки статора, но регулирование будет ступенчатое.
- Изменением частоты питающего тока, для этого применяют преобразователи частоты.
- Чтобы осуществить реверс меняют местами две фазы обмотки статора.



## Вращающий электромагнитный момент

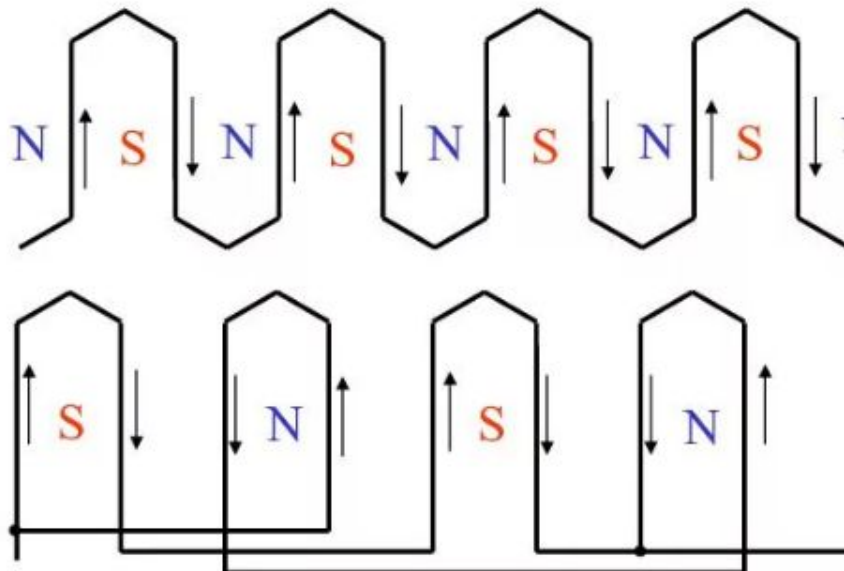
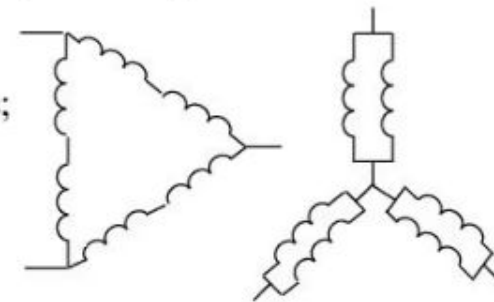




## РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АД с короткозамкнутым ротором

*Переключением числа пар полюсов:*

- несколько обмоток с разным числом пар полюсов;
- одна обмотка с переключением полуобмоток



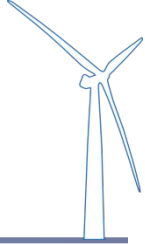
*Преимущества:*

- простота реализации;
- отсутствие дополнительных потерь энергии

*Недостатки:*

- малый диапазон регулирования;
- низкая плавность регулирования;
- удорожание двигателя





Можно считать, что

$$E_1 \approx U_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1};$$

$$\text{При } \Phi = const : \quad \frac{U_1}{f_1} = const;$$

$$\frac{n_{max}}{n_{min}} = 20 \div 30.$$

$$\text{При } K_M = \frac{M_{max}}{M_n} = const;$$

$$M_{max} \approx \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot x_k} = \frac{A \cdot U_1^2}{f_1^2};$$

$$K_M = \frac{A \cdot U_1^2}{f_1^2 \cdot M_n} = const, \quad \text{следовательно} \quad \frac{U_1}{f_1} = const.$$



$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \cdot \frac{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{об2}}{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{об1}} ; \quad \dot{I}_1 = -\frac{\dot{I}_2}{K_i} ;$$

$K_i$  - коэффициент трансформации токов,

$$K_i = \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{об1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{об2}} .$$

Второй закон Кирхгофа для статора:  $u_{1K} + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 \cdot R_1 ;$

для ротора:  $e_2 + e_{\sigma 2} = i_2 \cdot R_2 ;$

$$-\dot{E}_{\sigma 1} = j \cdot \dot{I}_1 \cdot X_1 ; \quad -\dot{E}_{\sigma 2} = j \cdot \dot{I}_2 \cdot X_2 ;$$

$$\dot{U}_{1K} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1) ;$$

$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_2) ;$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + j \cdot X_2} .$$

ток неподвижного ротора

$$P_K = P_{эл1} + P_{эл2} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 .$$

$K_E$  – коэффициент трансформации ЭДС:

$$K_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 \cdot K_{об1}}{W_2 \cdot K_{об2}}.$$

Второй закон Кирхгофа для обмотки статора:

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_o \cdot R_1;$$

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_o \cdot R_1;$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_o \cdot R_1;$$

$$-\dot{E}_{\sigma 1} = j \cdot \dot{I}_o \cdot X_1;$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_o \cdot (R_1 + jX_1).$$

$$I_o = (20 \div 40\%) \cdot I_{1H}; \quad P_o = 3 \cdot I_o^2 \cdot R_1 + P_{CT1} + P_{CT2}.$$



## Асинхронные машины

### Основные уравнения асинхронного двигателя

Напряжение  $U_1$ , приложенное к фазе обмотки статора, уравнивается основной ЭДС  $E_1$ , ЭДС рассеяния и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора

$$U_1 = (-E_1) + I_1 x_1 + I_1 r_1$$

В роторной обмотке аналогичное уравнение будет иметь вид:

$$U_2 = E_{2s} + I_2 x_{2s} + I_2 r_2$$

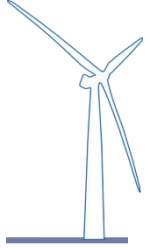
Но т.к. роторная обмотка замкнута, то напряжение  $U_2=0$ , и если учесть еще, что  $E_{2s}=SE_2$  и  $x_{2s}=Sx_2$ , то уравнение можно переписать в виде:

$$0 = E_2 - I_2 x_2 - I_2 \frac{r_2}{S}$$

Уравнение токов асинхронного двигателя повторяет аналогичное уравнение трансформатора:

$$I_1 = I_{01} + (-I'_2) = I_{01} + \left( -I_2 \frac{w_2}{w_1} \right)$$





При  $s = 1$  приведенная ЭДС ротора:

$$E_1 = K_e \cdot E_2 = \frac{W_1 \cdot K_{об1}}{W_2 \cdot K_{об2}} \cdot E_2,$$

где  $K_e = \frac{W_1 \cdot K_{об1}}{W_2 \cdot K_{об2}}$  – коэффициент трансформации напряжения

в асинхронной машине при неподвижном роторе.

Приведенный ток ротора:

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_i},$$

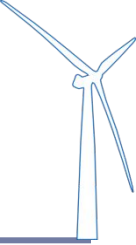
где  $K_i = \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{об1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{об2}}$  – коэффициент трансформации тока

асинхронной машины.

В отличие от трансформаторов в асинхронных двигателях коэффициенты трансформации напряжения и тока не равны:

$$K_e \neq K_i.$$





## Схема замещения асинхронной машины и основные уравнения

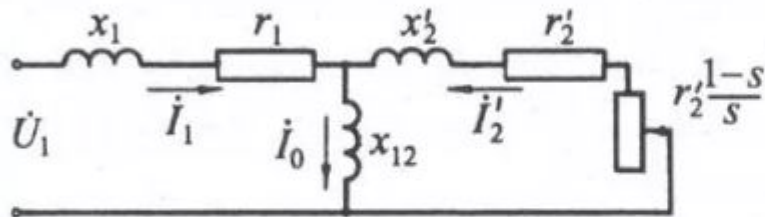
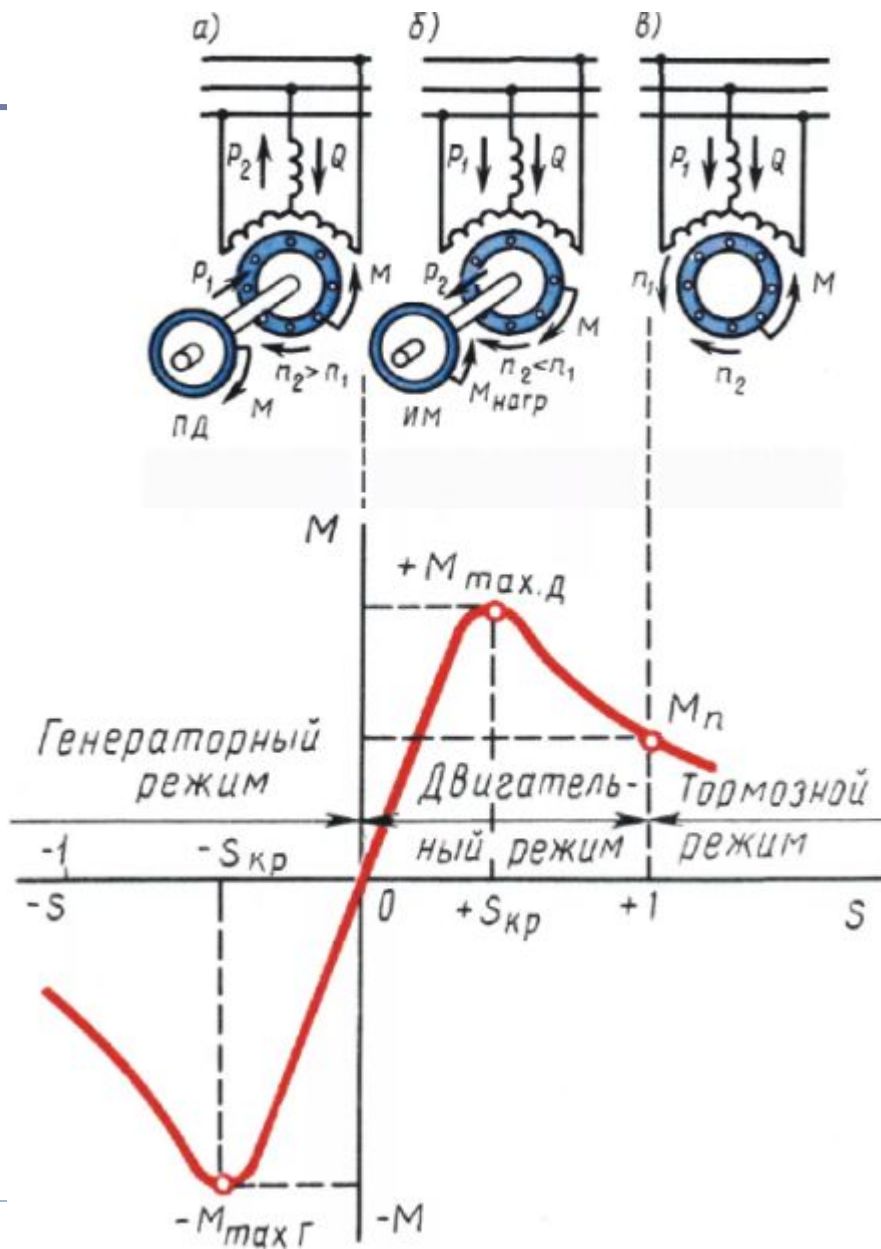
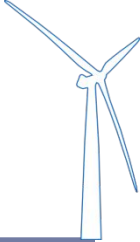


Схема замещения асинхронной машины, соответствующая уравнениям

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\
 0 &= \dot{E}'_2 = -j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 \frac{r'_2}{s}; \\
 \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2.
 \end{aligned} \right\}$$



## УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ АД ДЛЯ ОБМОТКИ СТАТОРА

*Основной магнитный поток  $\Phi$ , вращающийся с частотой  $n1$ , наводит в неподвижной обмотке статора ЭДС  $E1$ :*

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{об1}$$

*Магнитный поток рассеяния  $\Phi\sigma1$  наводит в обмотке статора ЭДС*

$$E_{\sigma1} = -jI_1 x_1$$

где  $x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора.



8

## УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ АД ДЛЯ ОБМОТКИ СТАТОРА

*Для цепи обмотки статора АД, с  
напряжением  $U_1$*

$$U_1 + E_1 + E_{\sigma 1} = I_1 r_1$$

где  $I_1 r_1$  – падение напряжения на активном  
сопротивлении обмотки статора

*Уравнение напряжений  
обмотки статора АД:*

$$U_1 = (-E_1) + jI_1 x_1 + I_1 r_1$$

9 **УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ АД  
ДЛЯ ОБМОТКИ РОТОРА**

*Основной магнитный поток  $\Phi$ , обгоняя ротор с частотой  $n_s=(n_1-n_2)$ , индуцирует в обмотке ротора ЭДС:*

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi w_2 k_{об2}$$

*Частота скольжения:*

$$f_2 = pn_s / 60 = p(n_1 - n_2) / 60;$$

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = f_1 s$$

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s \Phi w_2 k_{об2} = E_2 s$$

10

**УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ АД  
ДЛЯ ОБМОТКИ РОТОРА**  
*Поток рассеяния ротора  $\Phi_{\sigma 2}$  индуцирует  
в обмотке ротора ЭДС*

$$E_{\sigma 2} = -jI_2 x_2 s$$

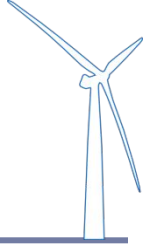
где  $x_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки ротора.

*Для цепи ротора АД:*  $E_{2s} + E_{\sigma 2} = I_2 r_2$

где  $r_2$  – активное сопротивление обмотки ротора.

**Уравнение напряжений  
обмотки ротора АД:**

$$E_2 - jI_2 x_2 - I_2 r_2 / s = 0$$



11

**УРАВНЕНИЯ МДС И ТОКОВ АД**  
*Основной магнитный поток  $\Phi$  в АД  
создается совместным действием МДС  
обмоток статора  $F_1$  и ротора  $F_2$ :*

$$\Phi = (F_1 + F_2) / R_m = F_0 / R_m$$

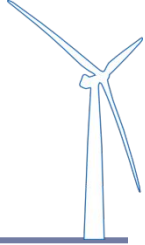
$R_m$  – сопротивление магнитной цепи двигателя;

$F_0$  – результирующая МДС двигателя численно равная  
МДС обмотки статора в режиме ХХ

$$F_0 = 0,45m_1 I_0 w_1 k_{об1} / p;$$

$$F_1 = 0,45m_1 I_1 w_1 k_{об1} / p;$$

$$F_2 = 0,45m_2 I_2 w_2 k_{об2} / p$$



12

## УРАВНЕНИЯ МДС И ТОКОВ АД

$$U_1 = const \Rightarrow U_1 \approx (-E_1) \Rightarrow$$

$$F_0 = F_1 + F_2 = const$$

$$0,45m_1 I_0 w_1 k_{об1} / p = 0,45m_1 I_1 w_1 k_{об1} / p + 0,45m_2 I_2 w_2 k_{об2} / p$$

**Уравнение токов АД:**

$$I_0 = I_1 + I_2 \frac{m_2 w_2 k_{об2}}{m_1 w_1 k_{об1}} = I_1 + I_2';$$

$$I_2' = I_2 \frac{m_2 w_2 k_{об2}}{m_1 w_1 k_{об1}};$$

$$I_1 = I_0 + (-I_2')$$

2

## ПРЯМОЙ ПУСК АД С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

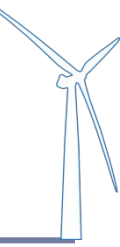
*Включение обмотки статора АД непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора  $U_c = U_{1НОМ}$*

*Пусковой ток АД:*

$$I_{1п} = U_{1Н} / \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = (4 \div 7) I_{1Н}$$

$r_k = r_1 + r_2'$  - активное сопротивление фазы АД при коротком замыкании

$x_k = x_1 + x_2'$  - индуктивное сопротивление фазы АД при коротком замыкании



## Электромагнитный момент и механические характеристики асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный момент  $M$  пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1},$$

где

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}$$

– угловая скорость вращения поля статора.

Подставив в уравнение электромагнитного момента значение электромагнитной мощности, получим:

$$M = \frac{P_{эл2}}{s \cdot \omega_1} = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{s \cdot \omega_1}.$$



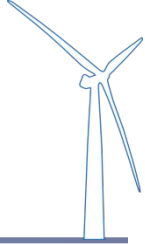
Таким образом *электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора.*

Если значение тока ротора из Г-образной схемы замещения подставить в последнее выражение, то получим формулу электромагнитного момента асинхронной машины:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot r_2' \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ (r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}.$$

Параметры схемы замещения асинхронной машины  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$  и  $x_2'$ , входящие в последнюю формулу, являются *постоянными* параметрами, так как их значения при изменениях нагрузки машины остается практически неизменным. Также постоянными можно считать напряжение на обмотке фазы статора  $U_1$  и частоту  $f_1$ . В выражении момента единственная переменная величина – скольжение  $s$ , которое для различных режимов работы асинхронной машины может принимать разные значения в диапазоне от  $+\infty$  до  $-\infty$ .





Рассмотрим зависимость момента от скольжения  $M = f(s)$  при  $U_1 = const$ ,  $f_1 = const$  и постоянных параметрах схемы замещения. Эту зависимость принято называть *механической характеристикой* асинхронной машины. Анализ формулы момента, представляющей аналитическое выражение механической характеристики  $M = f(s)$ , показывает, что при значениях скольжения  $s = 0$  и  $s = \infty$  электромагнитный момент  $M = 0$ . Из этого следует, что механическая характеристика  $M = f(s)$  имеет максимум.

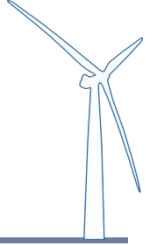
Для определения величины критического скольжения  $s_{кр}$ , соответствующего максимальному моменту, необходимо взять первую производную момента по скольжению и приравнять ее нулю:

$$\frac{dM}{ds} = 0.$$

В результате:

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$





Подставив значение критического скольжения в выражение электромагнитного момента, после ряда преобразований получим формулу максимального момента:

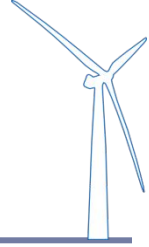
$$M_{max} = \pm \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [\pm r_1^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

В выражениях для критического скольжения и максимального момента знак плюс соответствует двигательному, а знак минус – генераторному режиму работы асинхронной машины.

Для асинхронных машин общего назначения активное сопротивление обмотки статора  $r_1$  намного меньше суммы индуктивных сопротивлений:  $r_1 \ll (x_1 + x_2')$ . Поэтому, пренебрегая величиной  $r_1$ , получим упрощенные формулы критического скольжения:

$$s_{kp} \approx \pm \frac{r_2'}{(x_1 + x_2')}$$





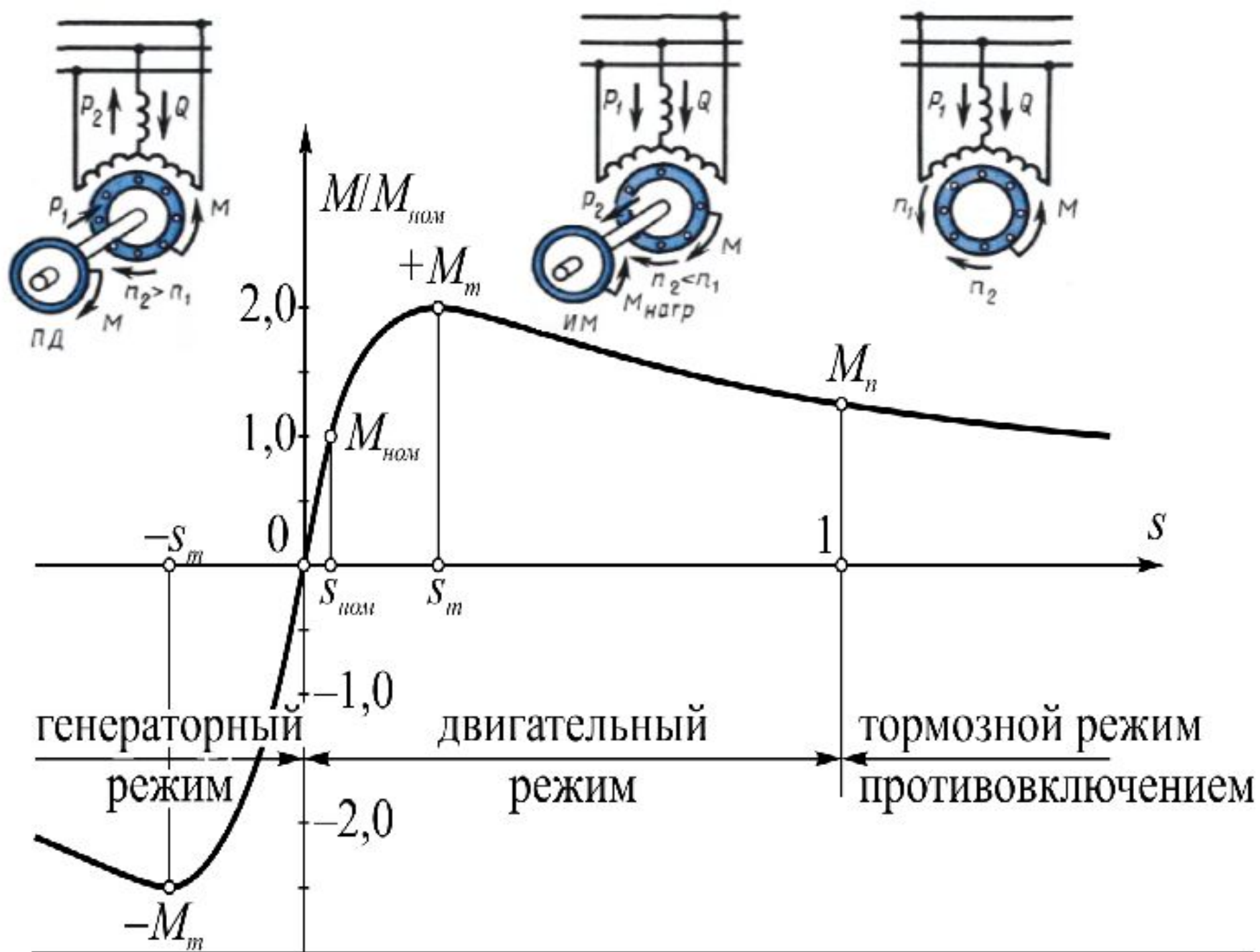
## Практическая формула для построения механической характеристики (формула Клосса)

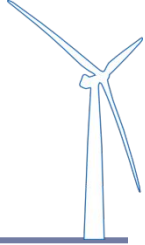
Часто при разработке электропривода проектировщик располагает только каталожными данными двигателя. Но для решения ряда вопросов ему необходимо также иметь механическую характеристику выбранного двигателя.

Если разделить выражение текущего электромагнитного момента (исходная формула) на выражение для определения максимального момента  $M / M_{\max}$ , то после некоторых упрощений получим:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}$$

Эта формула впервые была получена М.Клоссом, поэтому она называется формулой Клосса. Она находит широкое применение в расчетной практике и справедлива при постоянных параметрах машины.



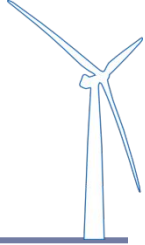


## Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

- Частота вращения определяется по формуле:

$$n = n_1(1 - S) = \frac{60 f_1(1 - S)}{P}$$

- Следовательно, частоту вращения можно изменять, меняя частоту, скольжение и число пар полюсов.
- **Частотное регулирование.** Применяются машинные или полупроводниковые преобразователи.
- **Регулирование изменением числа пар полюсов.** Двигатель выполняют с двумя катушками в каждой фазе и переключают на последовательное  $P=2$  или параллельное  $P=1$  соединение.



## Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Пусковые свойства АД определяются значениями  
пускового тока  $I_{\text{п}}$  и пускового момента  $M_{\text{п}}$ :

В момент  
пуска  $S = 1$

$$I_{\text{п}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

Два пути улучшения пусковых свойств АД:

- 1) Уменьшение  $U_1 \Rightarrow$  снижение  $I_{\text{п}}$  и  $M_{\text{п}}$
- 2) Увеличение  $r_2' \Rightarrow$  снижение  $I_{\text{п}}$  и увеличение  $M_{\text{п}}$

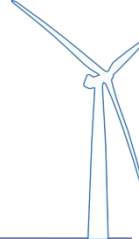
## Пуск асинхронных двигателей с к. з. ротором

а) пуск непосредственным включением в сеть:

пусковой ток  $I_{\text{п}} = (5 \div 7) I_{\text{н}}$ , но значительный  $M_{\text{п}}$

Применяется в АД мощностью до (30+50) кВт





# ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

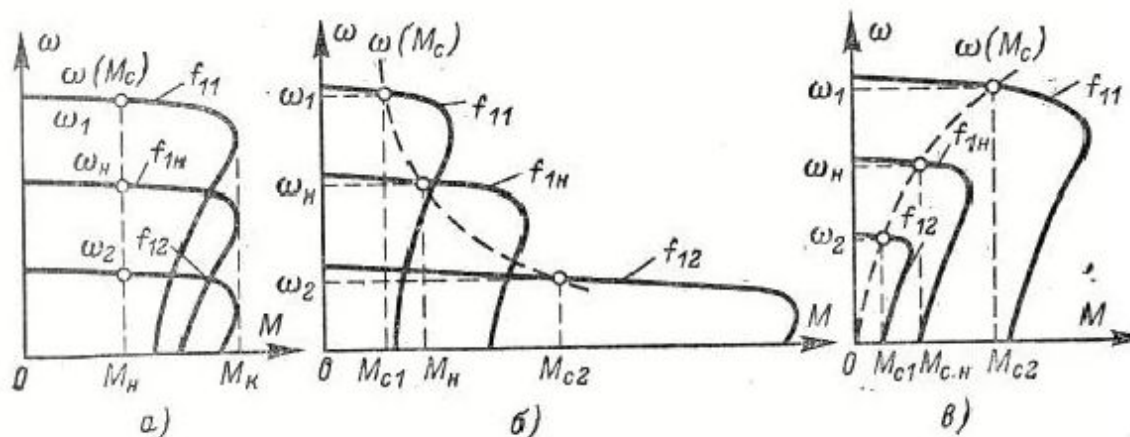


Рис. 6-2. Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости для случая  $\lambda = \text{const}$  при  $M_c = \text{const}$  (а),  $P_c = \text{const}$  (б) и вентиляторной нагрузке (в).

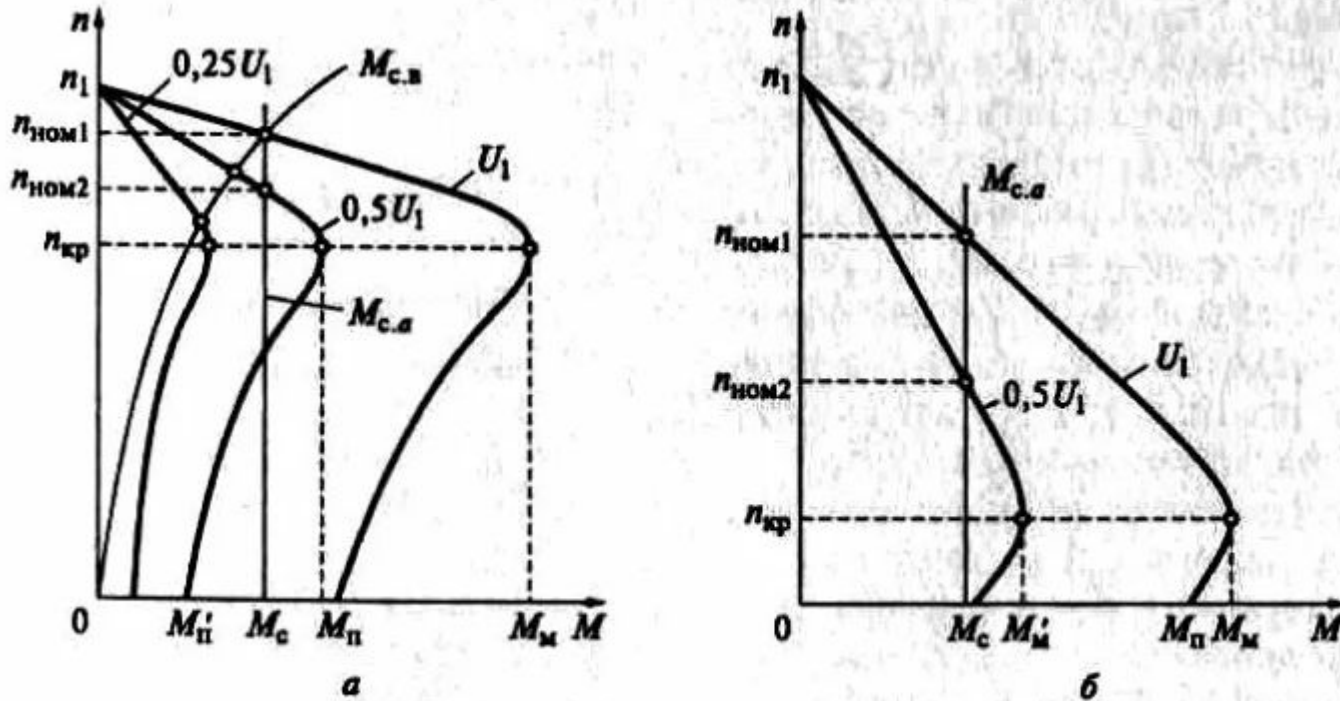
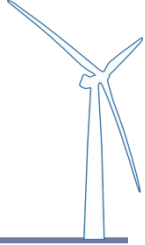
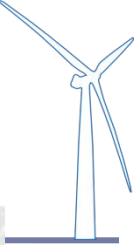
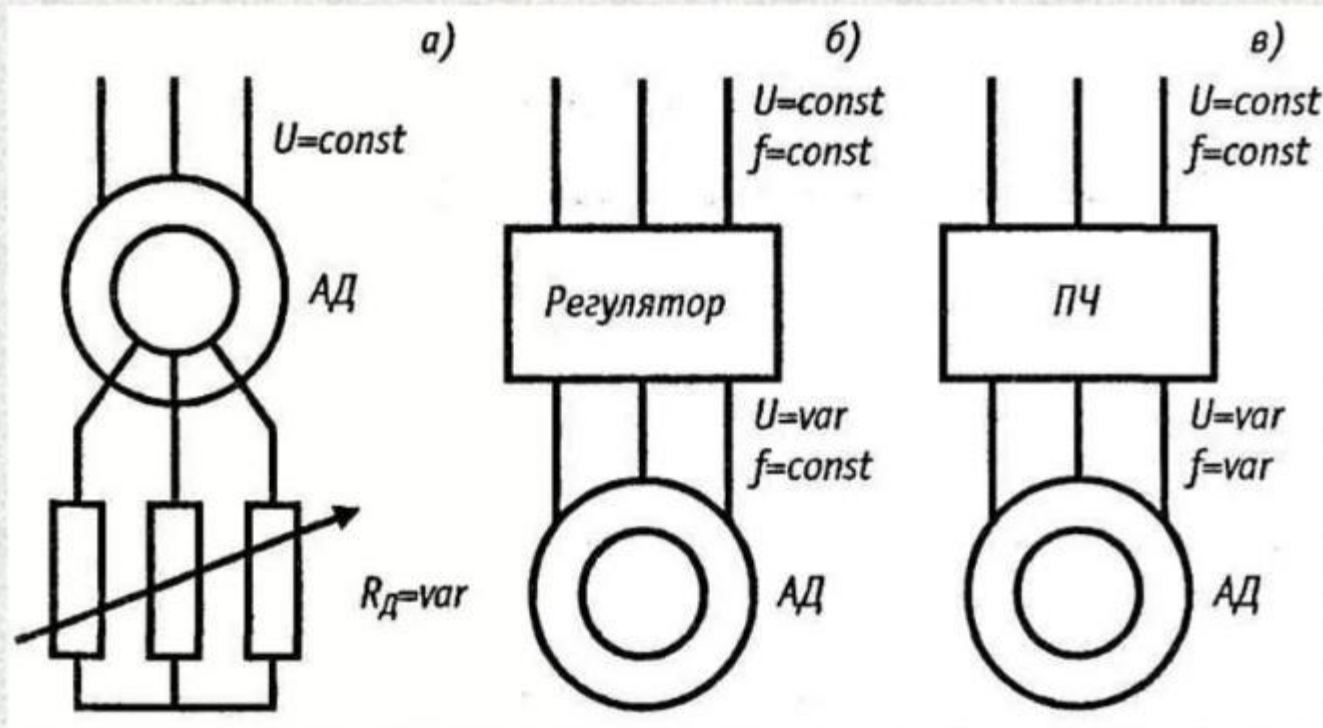


Рис. 4.19. Влияние активного сопротивления обмотки ротора асинхронного двигателя на зависимость частоты вращения от подводимого к обмотке статора напряжения





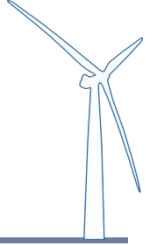
## СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



изменением сопротивления  
ротора

изменением напряжения  
питания

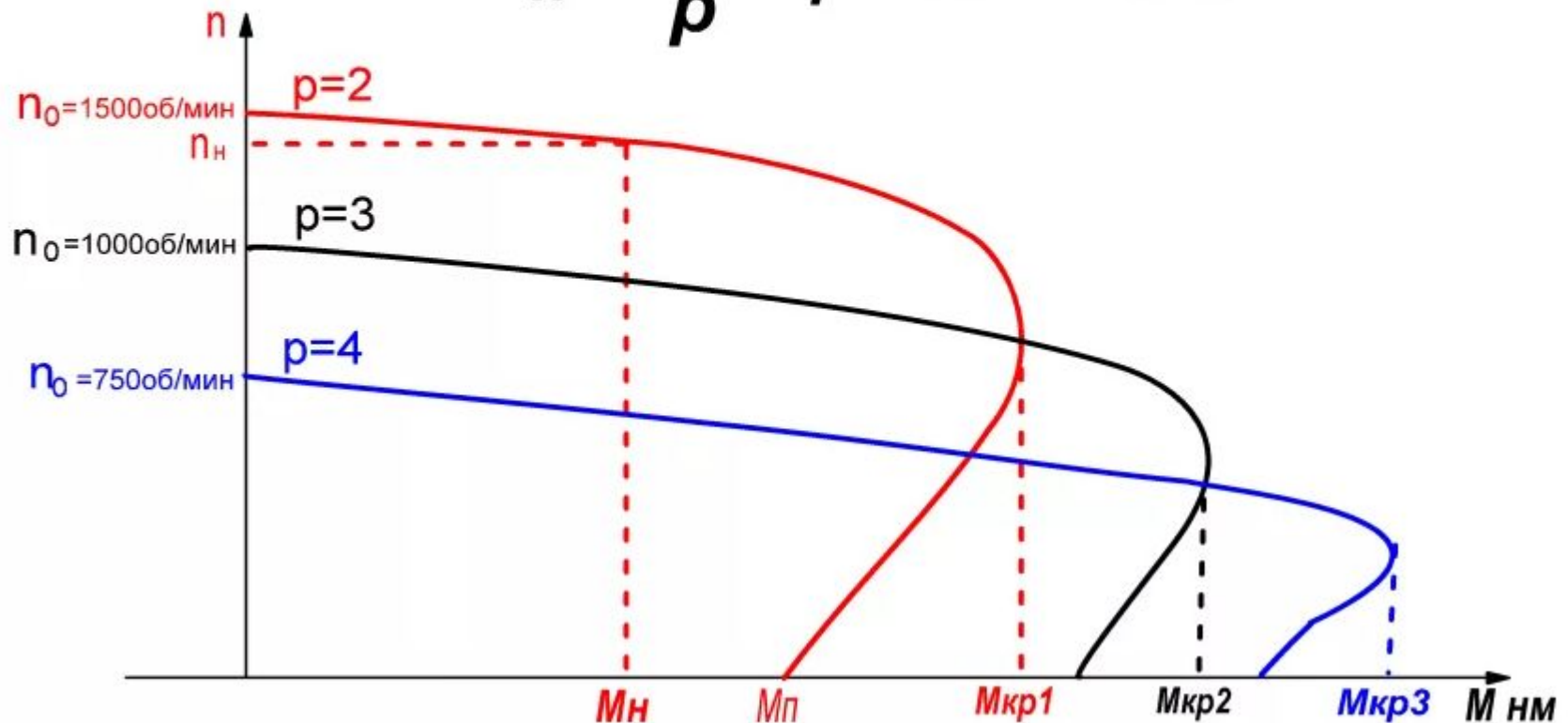
изменением частоты  
питающего напряжения

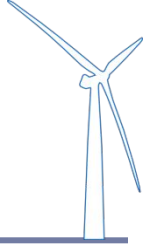


Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении числа пар полюсов ( $p$ )

Регулирование скорости АД определяется формулой

$$n = \frac{60f}{p} \quad p = \text{var} \quad f = \text{const}$$





**СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ**

**заведующий кафедрой ВИЭ и ЭСС  
к.т.н., доцент Шайтор Николай Михайлович**

