

Конспект лекций по электротехнике

Подготовлен:

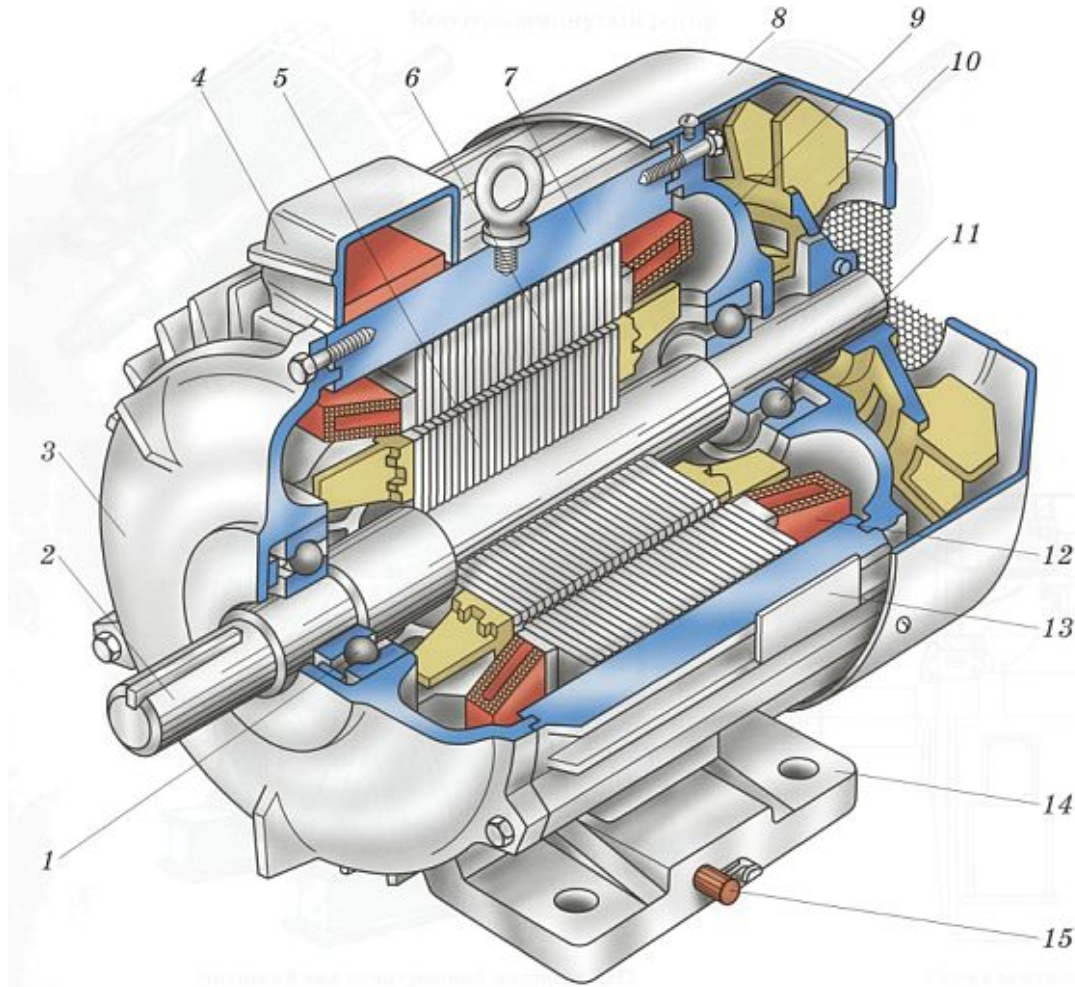
Степановым К.С., Беловой Л.В.,
Кралиным А.А., Панковой Н.Г.

**Кафедра теоретической и общей
электротехники.**

• Лекция 12

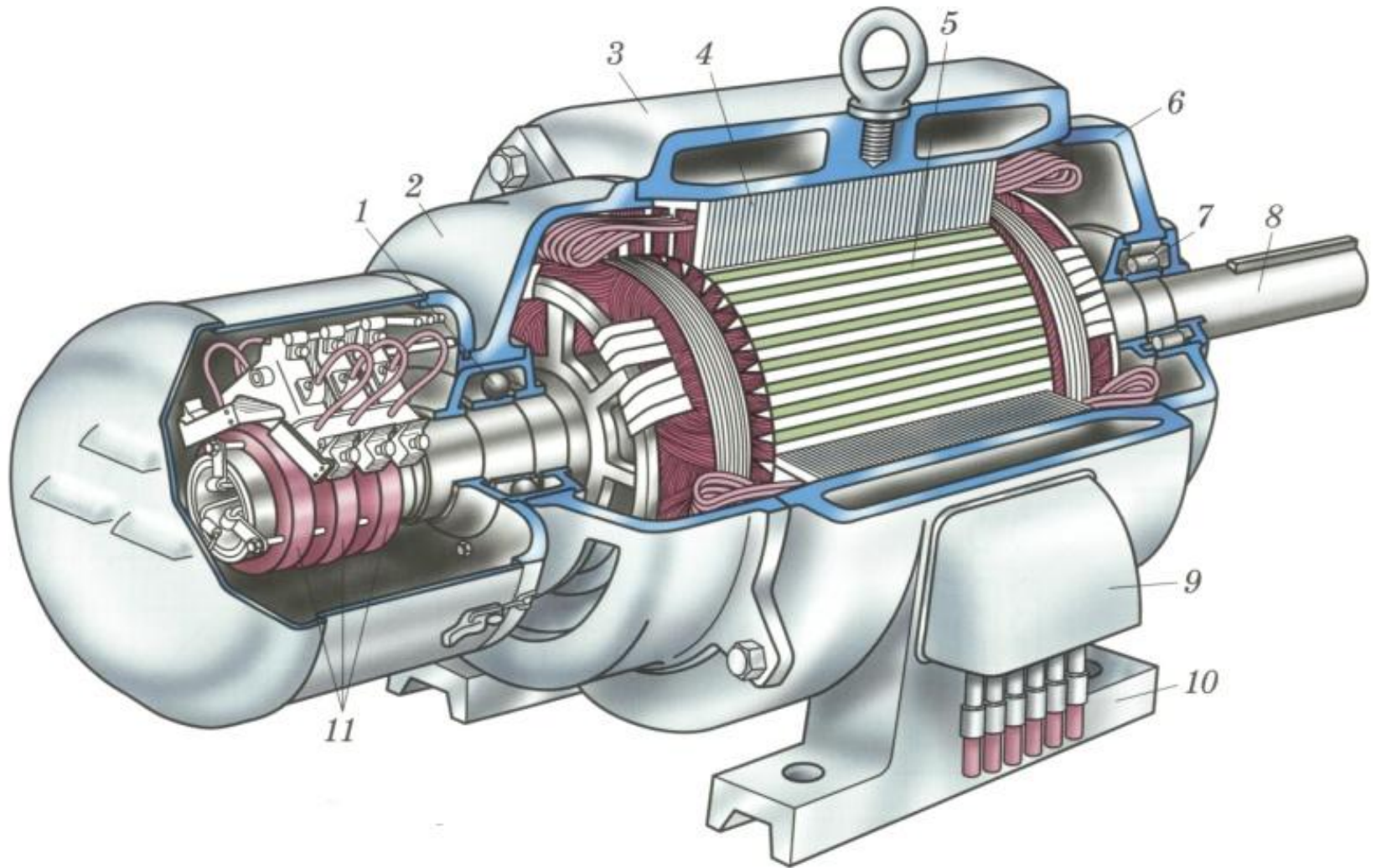
Машины переменного тока

Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором



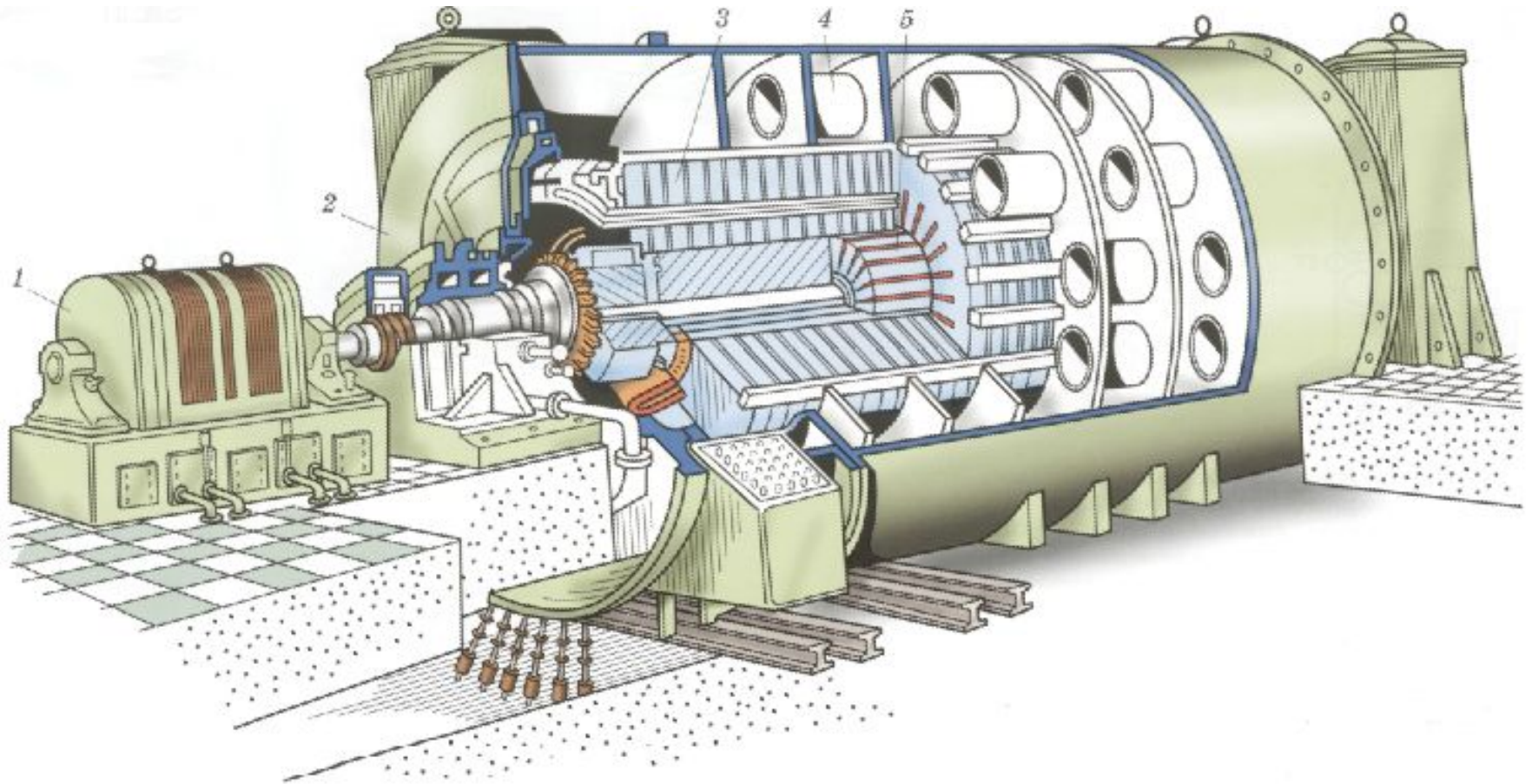
1 – подшипник 2 – вал 3 – подшипниковый щит 4 – коробка выводов 5 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой 6 – сердечник статора с обмоткой 7 – корпус 8 – кожух вентилятора 9 – подшипниковый щит 10 – вентилятор 11 – подшипник 12 – обмотка статора 13 – табличка с паспортными данными 14 – лапы 15 – болт заземления

Асинхронный двигатель с фазным ротором



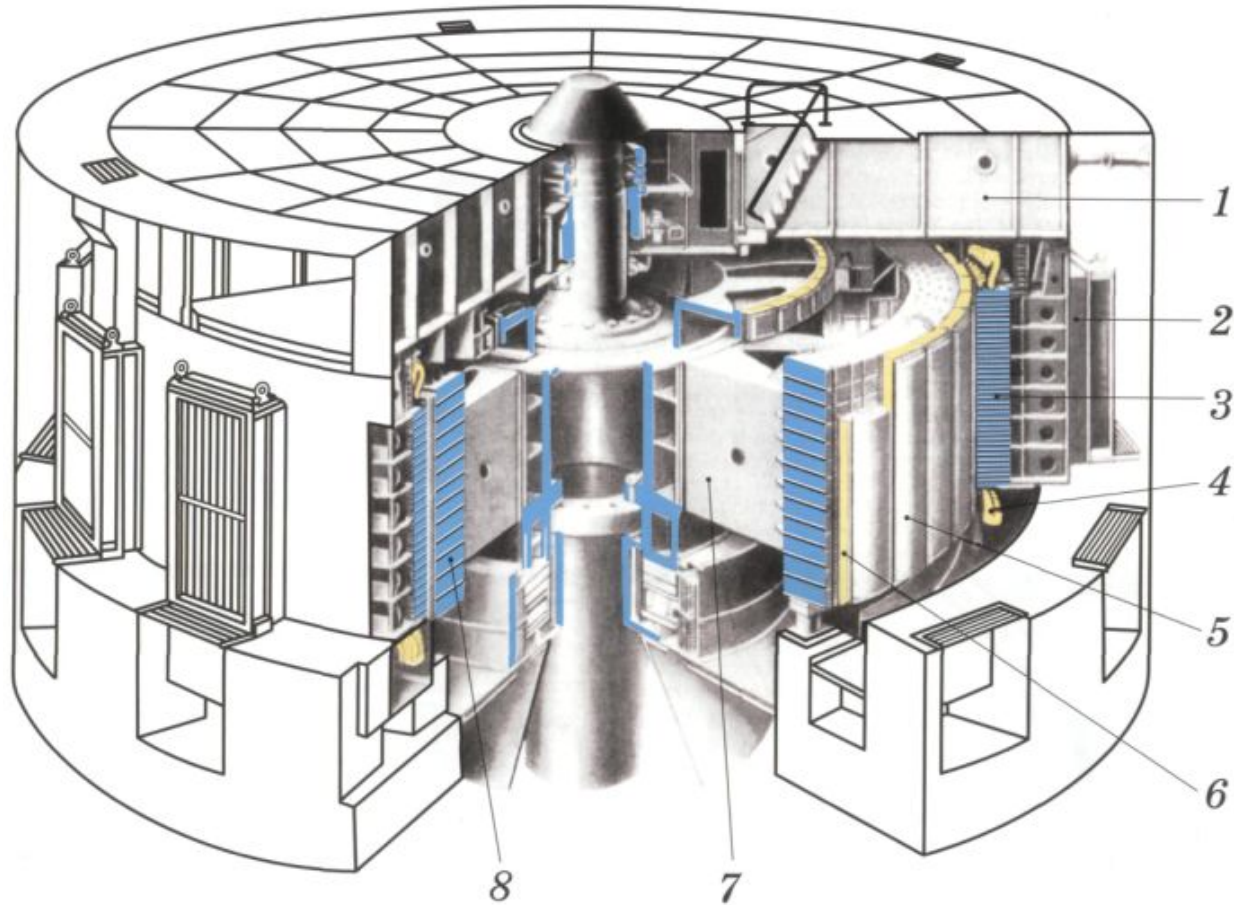
1,7 – подшипники 2,6 – подшипниковые щиты 3 – корпус 4 – сердечник статора с обмоткой
5 – сердечник ротора с обмоткой 8 – вал 9 – коробка выводов 10 – лапы 11 – контактные кольца

Турбогенератор



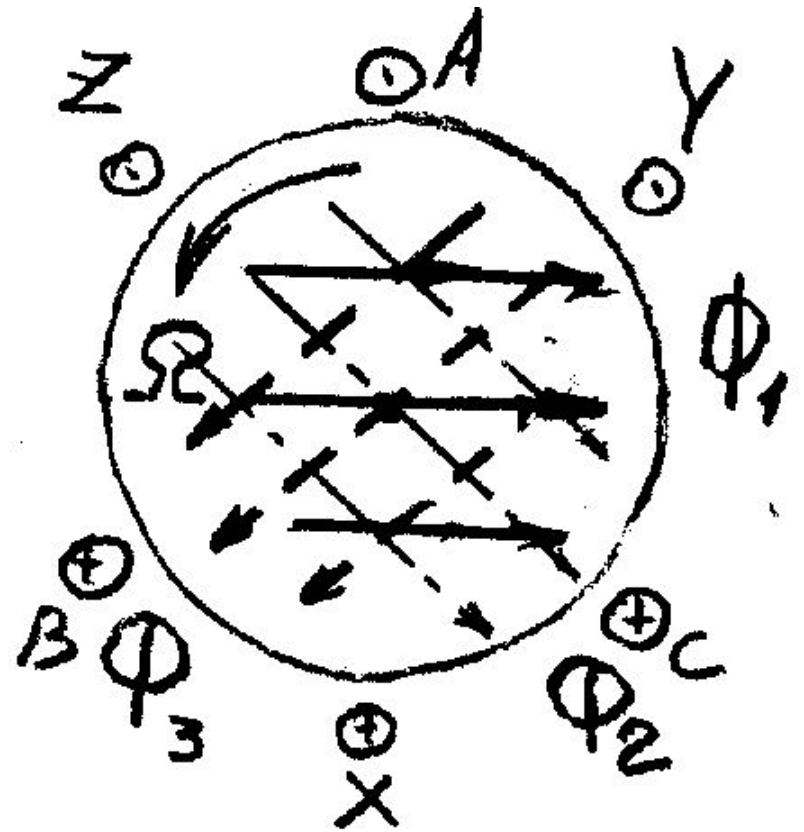
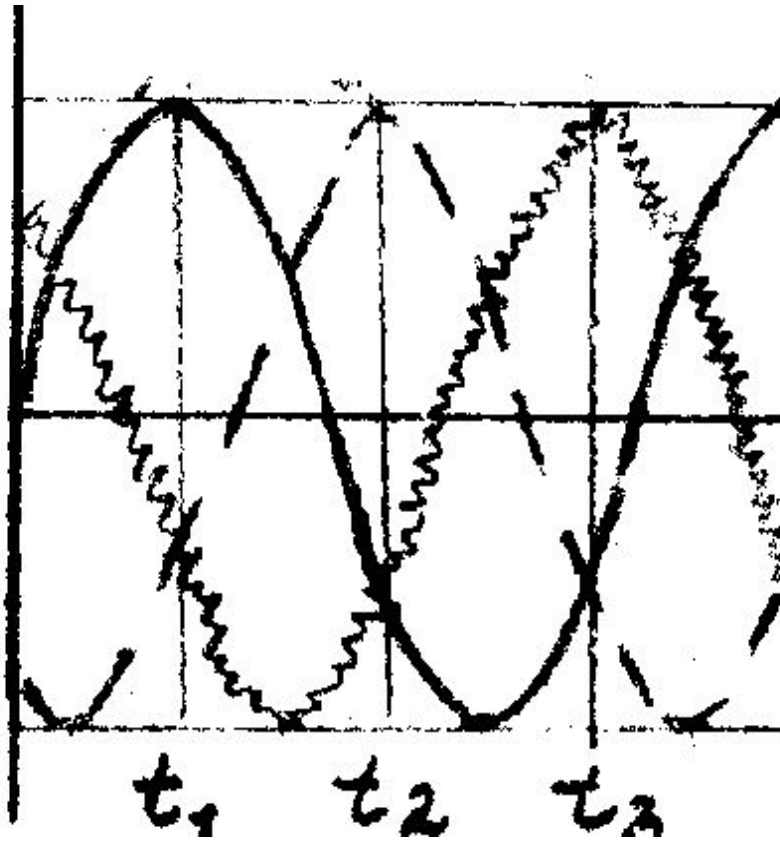
1 – возбудитель 2 - корпуса, 3 - сердечника статора,
4 - секций водородного охлаждения, 5 - ротора.

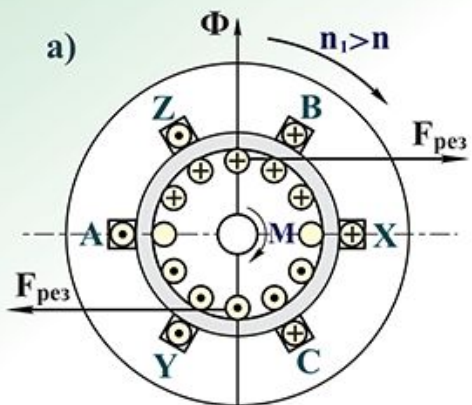
Гидрогенератор



1 - грузонесущей крестовины, 2 - корпус статора, 3 - сердечник статора, 4 - обмотки статора, 5 - полюса ротора, 6 - обмотки ротора, 7 - спицы ротора, 8 - обод ротора.

Трёхфазный ток и положение вектора Φ в пространстве статора в моменты времени t_1, t_2, t_3 .





$n_1 = \frac{60f_1}{p}$ - синхронная частота вращения;

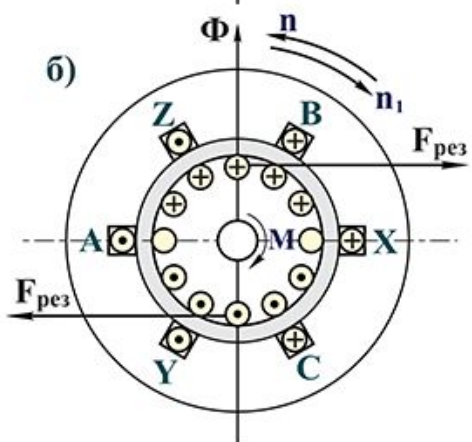
n - частота вращения ротора;

$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{2\pi f_1}{p}$ - синхронная угловая частота вращения;

$\Omega = \frac{\pi n}{30}$ - угловая частота вращения ротора;

$n_1 - n$ - частота скольжения;

$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ - скольжение.



Режим двигателя (а)

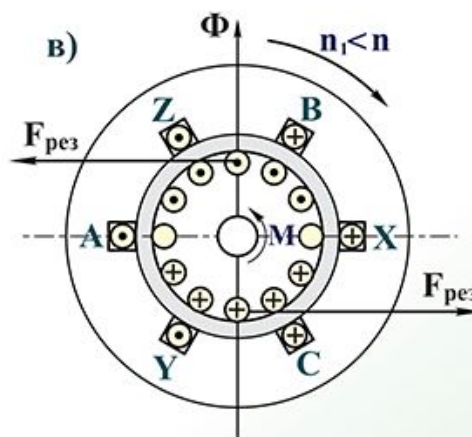
$n_1 > n > 0$

$0 < S < 1$

Режим электромагнитного тормоза (б)

$0 < n < -\infty$

$1 < S < +\infty$



Режим генератора (в)

$+\infty > n > n_1$

$-\infty < S < 0$

Мгновенные значения токов в фазах обмотки статора на рисунках а), б), в);

$i_A = I_m$; $i_B = i_C = -\frac{1}{2} I_m$.

Основные соотношения АД

- $n_1 = 60f_{\text{сети}}/p$, где p – число пар полюсов.
- $f_{\text{сети}} = 50$ Гц
- $p = 1$ $n_1 = 3000$
- $p = 2$ $n_1 = 1500$
- $p = 3$ $n_1 = 1000$
- $p = 4$ $n_1 = 750$
- $\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$ - абсолютное скольжение
- $s = (n_1 - n_2)/n_1$ - относительное скольжение
- $[s = \Delta\Omega/\Omega_1 = (\Omega_1 - \Omega_2)/\Omega_1]$
- Ω_1 (n_1) - скорость вращения магнитного поля статора
- Ω_2 (n_2) - скорость вращения ротора

Основные соотношения АД

- $M = M_K / (S_K / S + S / S_K)$
- $M_K = 3U_{\Phi 1} / 2\omega_0 (X_1 + X_2')$ – критический момент
- где: $\omega_0 = 2\pi f_{\text{сети}} / p$ - круговая частота сети,
- p – число пар полюсов,
- U_{Φ} – фазное напряжение,
- X_1 – реактивное сопротивление статора, активным сопротивлением ротора пренебрегаем,
- X_2' – реактивное сопротивление короткозамкнутого ротора, приведённое к статору, при частоте тока в роторе $f_2 = f_1 * S$.

Основные соотношения АД

- $S_K = R'_2 \Sigma / \sqrt{(R_1^2 + X_K^2)}$ - критическое скольжение
- где: $R'_2 \Sigma = R_p' + R_d'$ - сопротивление обмоток ротора
- X_K - реактивное сопротивление при короткозамкнутом роторе.
- R_1 - активное сопротивление статора
- Критическое скольжение можно вычислить приближенно.
- $S_K \approx R_2' / (X_1 + X_2')$
- где: $R_2' = R_p k^2$ - активное сопротивление в цепи ротора, приведённое к статору.
- X_1 - реактивное сопротивление статора, активным сопротивлением обмотки ротора пренебрегаем,
- X_2' - реактивное сопротивление короткозамкнутого ротора, приведённое к статору.
- $f_2 = f_1 * S$ - частота тока в роторе.
- Когда скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора, тогда S равно 0, частота равна нулю, следовательно, ток в роторе - постоянный.

Основные уравнения АД

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1;$$

$$0 = \dot{E}_2^1 - \dot{I}_2^1 \underline{Z}_{2\exists}^1 = \dot{E}_2^1 - \dot{I}_2^1 (r_2^1 + j x_2^1 + r_2 \frac{1-S}{S});$$

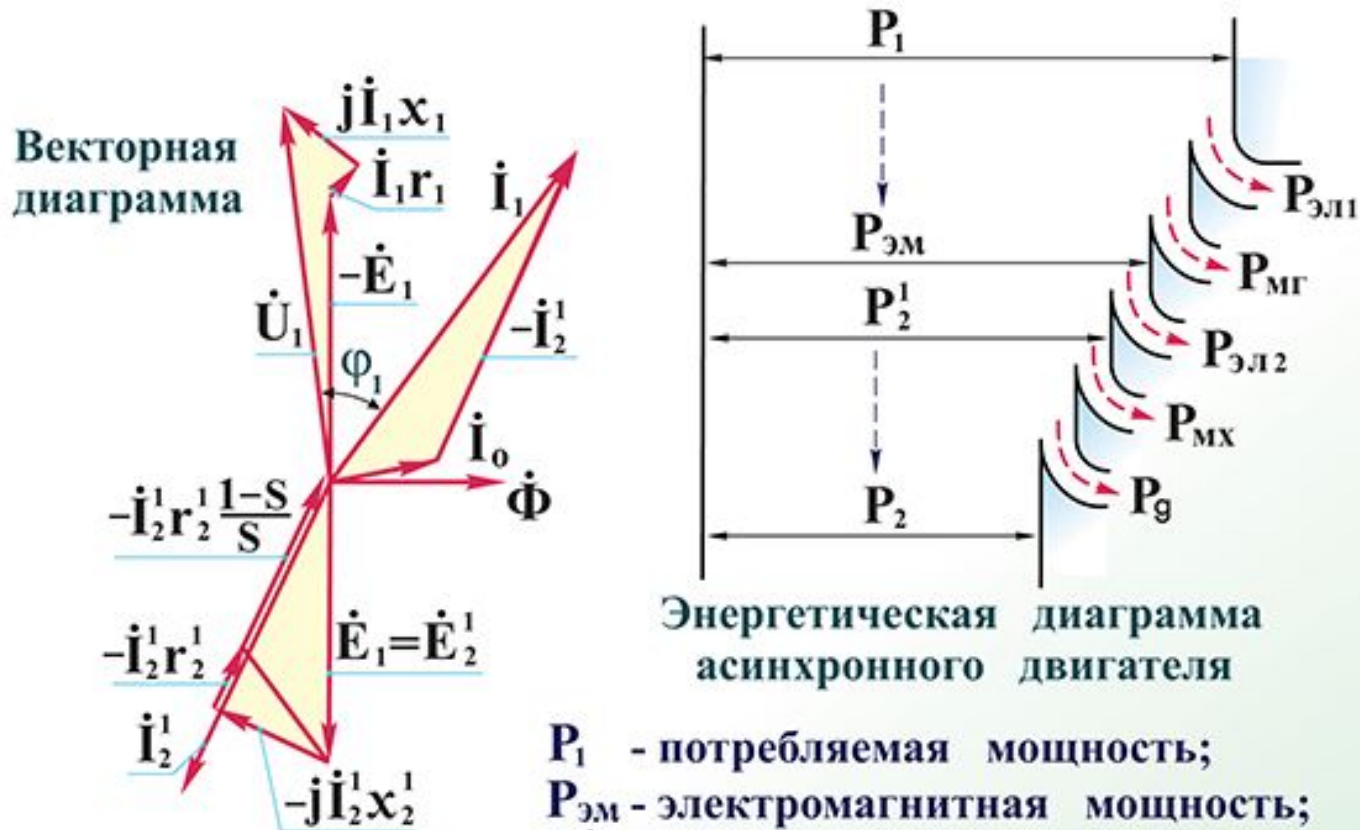
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2^1,$$

$$\text{где } E_2^1 = \frac{k_0 \delta_1 W_1}{k_0 \delta_2 W_2} E_2 = k_e \cdot E_2 = E_1; \quad I_2^1 = \frac{I_2}{\frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{k_0 \delta_1 W_1}{k_0 \delta_2 W_2}} = \frac{I_2}{k_j};$$

$$r_2^1 = k_e k_j r_2; \quad x_2^1 = k_e k_j x_2;$$

$$\underline{Z}_{2\exists}^1 = r_2^1 + j x_2^1 + r_2 \frac{1-S}{S} = \underline{Z}_2^1 + r_2 \frac{1-S}{S}.$$

Векторная и энергетическая диаграммы АД



P_1 - потребляемая мощность;
 $P_{эм}$ - электромагнитная мощность;
 P_2^1 - полная механическая мощность;
 P_2 - мощность на валу;

$P_{эл1}$ - электрические потери в обмотке статора;
 $P_{мг}$ - магнитные потери в пакете статора;
 $P_{эл2}$ - электрические потери в обмотке ротора;
 $P_{мх}$ - механические потери;
 P_g - добавочные потери.

Согласно энергетической диаграмме

$$P_{ЭМ} - P_2^1 = P_{эл2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2^{12} r_2^1.$$

или $P_{эл2} = M \Omega_1 - M \Omega = M(\Omega_1 - \Omega) \frac{\Omega_1}{\Omega_1} = M \Omega_1 s = P_{ЭМ} s.$

Следовательно,

$$M = \frac{P_{эл2}}{\Omega_1 s} = \frac{m_1 I_2^{12} r_2^1}{\Omega_1 s}.$$

и после подстановки I_2^1

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2^1}{\Omega_1 s [(r_1 + c_1 \frac{r_2^1}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2]}.$$

$$M = \frac{1}{2} B_{\delta m} I_{2m} \ell N_2 \frac{\mathcal{D}}{2} \cos \Psi_2.$$

$$N_2 = 2m_2 W_2; \quad B_{\delta m} = \frac{\pi}{2} B_{\delta cp}; \quad \frac{\pi \mathcal{D}}{2p} = \tau; \quad B_{\delta cp} \cdot \tau \ell = \Phi; \quad I_{2m} = \sqrt{2} I_2.$$

$$M = \frac{N_2 p}{2\sqrt{2}} \Phi I_2 \cos \Psi_2.$$

$$M = \frac{m_2 p}{\sqrt{2}} k_{0\delta_2} W_2 \Phi_2 I_2 \cos \Psi_2 = C_M \Phi_2 I_2 \cos \Psi_2.$$

$$S_K = \pm \frac{c_1 r_2^1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2}}.$$

$$M_m = \pm \frac{m_1 U^2}{2\Omega_1 c_1 (\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2})}.$$

$$\left. \begin{aligned} S_K &\approx \pm \frac{c_1 r_2^1}{x_1 + c_1 x_2^1} \\ M_m &\approx \pm \frac{m_1 U^2}{2\Omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2^1)} \end{aligned} \right\} r_1 = 0$$

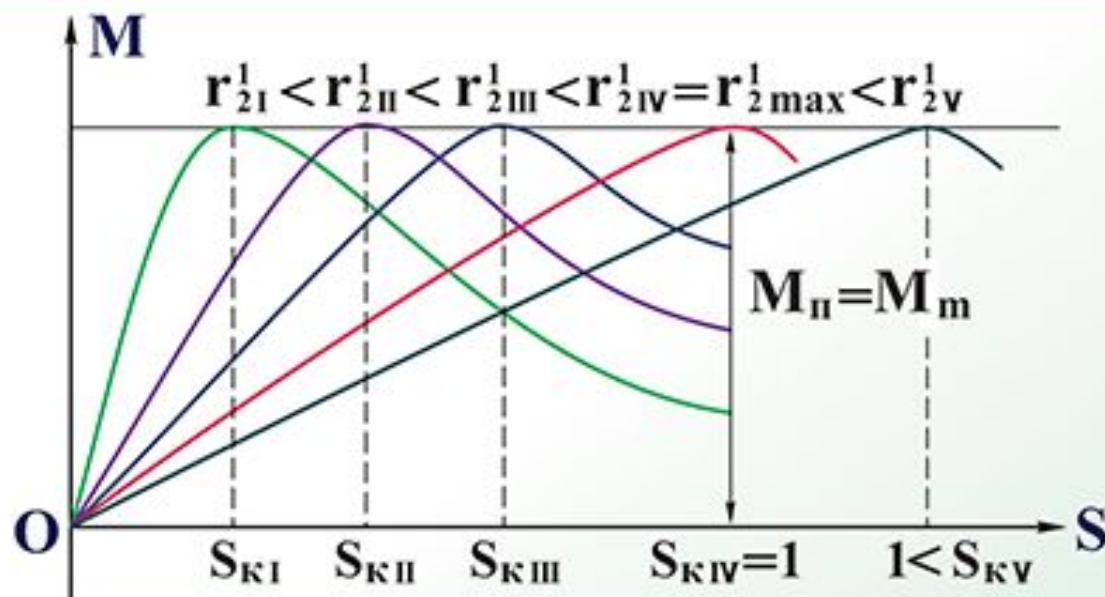
При $c_1 = 1$ и $r_1 = 0$ $S_K = \pm \frac{r_2^1}{x_1^2 + x_2^1} = \pm \frac{r_2}{x_K}; \quad M_m = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 x_K}.$

Начальный пусковой момент

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_1 [(r_1 + c_1 r_2^1)^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2]} \cdot$$

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = 0,7 \dots 1,8 ;$$

$$k_{\text{пi}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}} = 5 \dots 7.$$



$$r_{2\text{max}}^1 = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_2^1 + (x_1 c_1 x_2^1)^2}.$$

При $r_1 = 0$ $r_{2\text{max}}^1 = \frac{1}{c_1} (x_1 + c_1 x_2^1).$

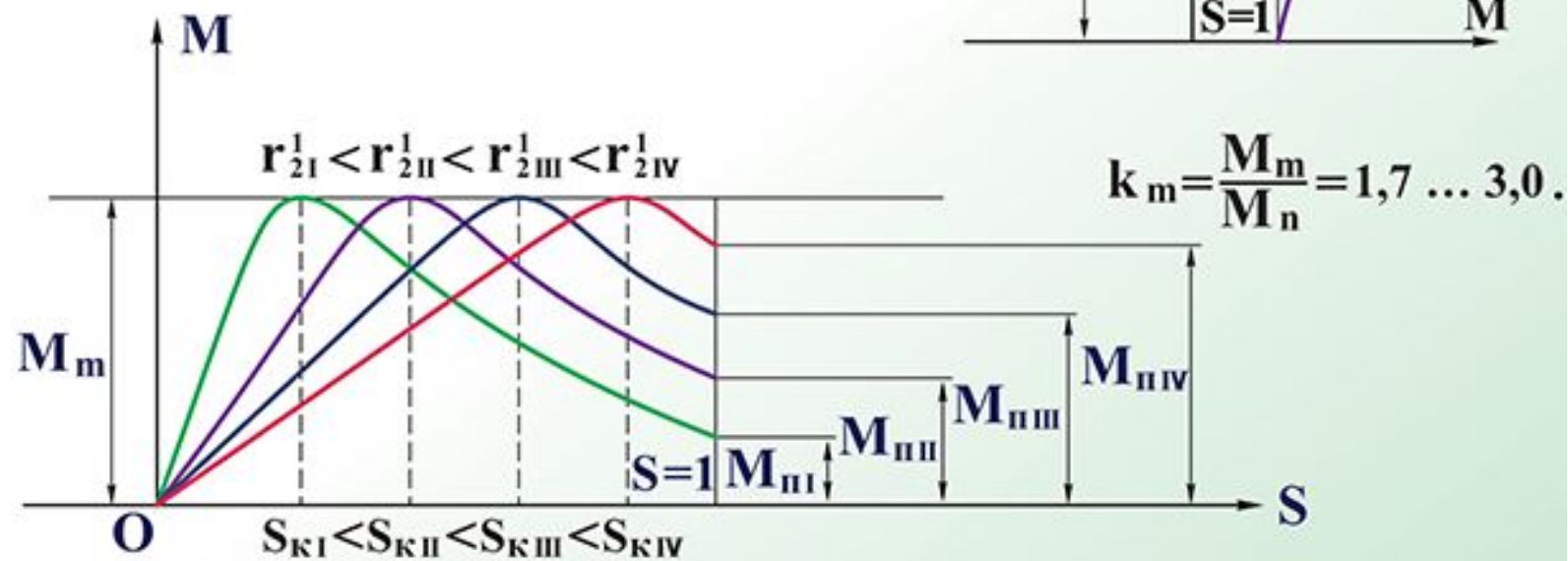
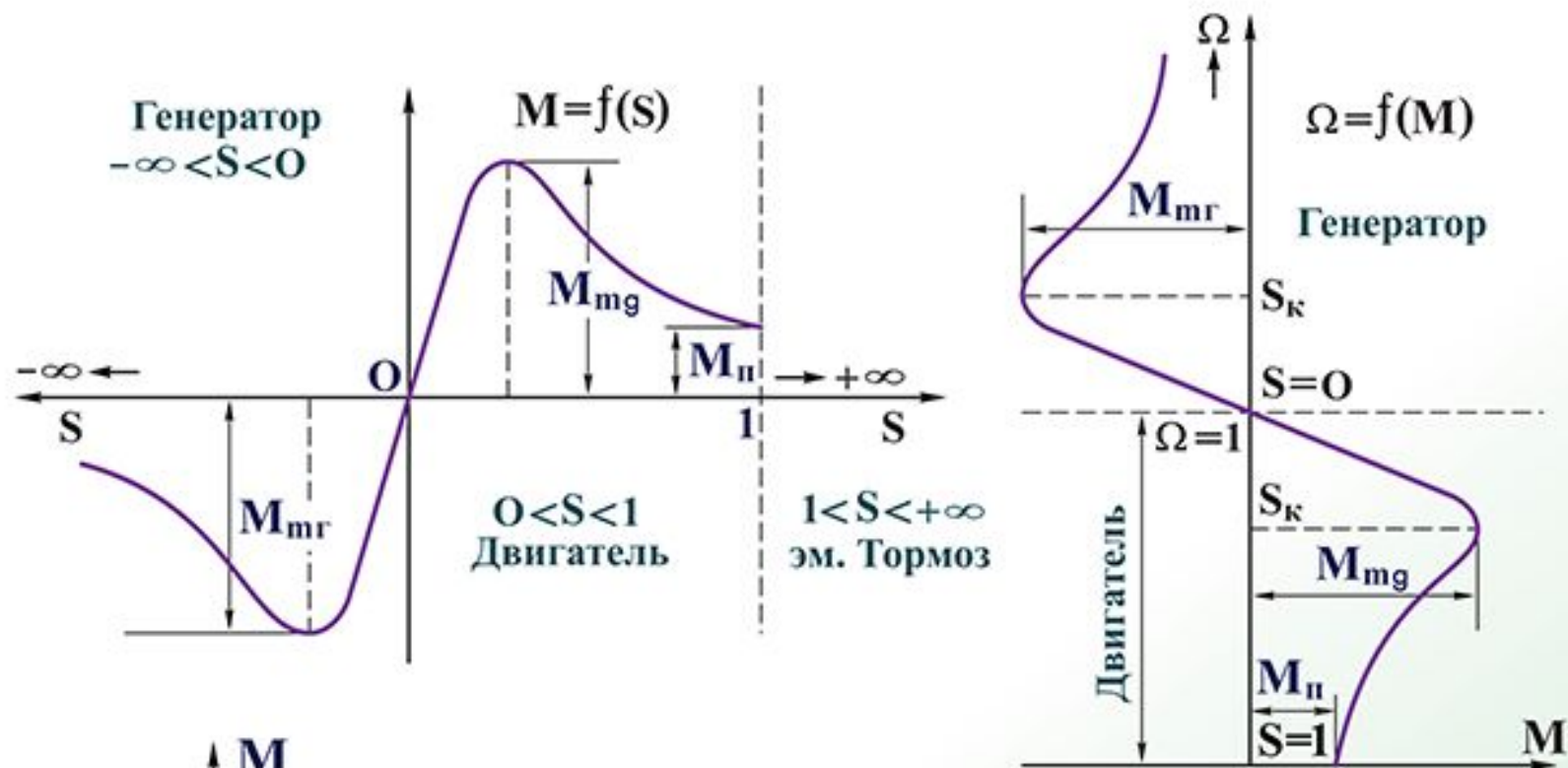
Если $c_1 = 1$, то $r_{2\text{max}}^1 = x_1 + x_2^1 = x_{\text{к}}.$

Режимы работы и механическая характеристика АД

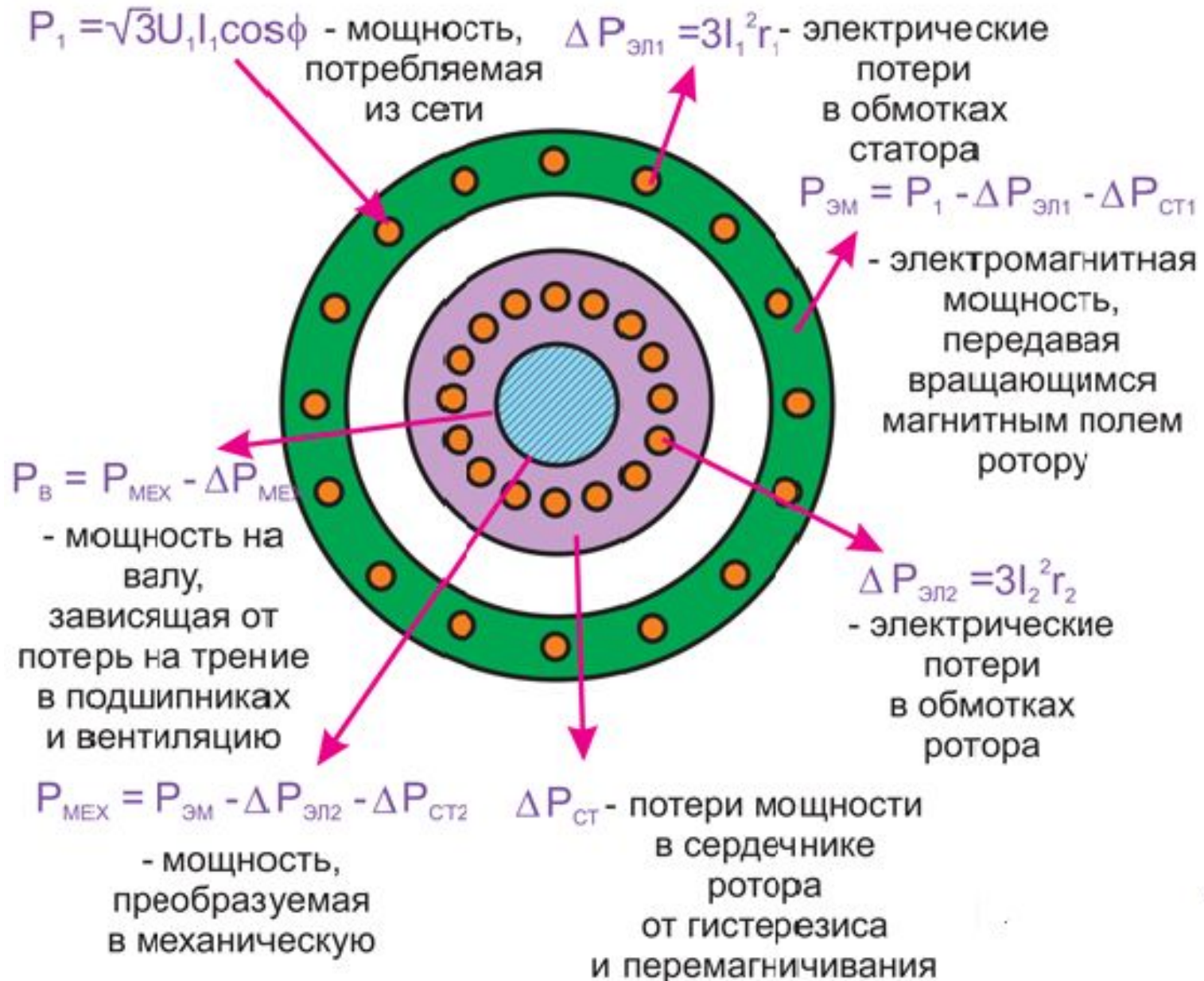
- Если скольжение меняется от 0 до 1 то машина работает в режиме **двигателя**, если **$S < 0$** – в режиме **генератора**, **$S > 1$** – в режиме **электромагнитного тормоза**.
- Характеристики бывают:
- **естественные** – когда электрические параметры равны номинальным величинам и в цепях обмоток нет дополнительных сопротивлений,

Режимы работы и механическая характеристика АД

- **искусственные характеристики**, когда один или несколько параметров отличаются от номинальных, или в цепи обмоток есть дополнительное сопротивление.
- Характеристики бывают:
- **жесткими**, когда рабочий участок почти параллелен оси моментов, скорость почти не зависит от момента,
- **мягкими**, когда рабочий участок имеет наклон к оси моментов, скорость зависит от величины момента.



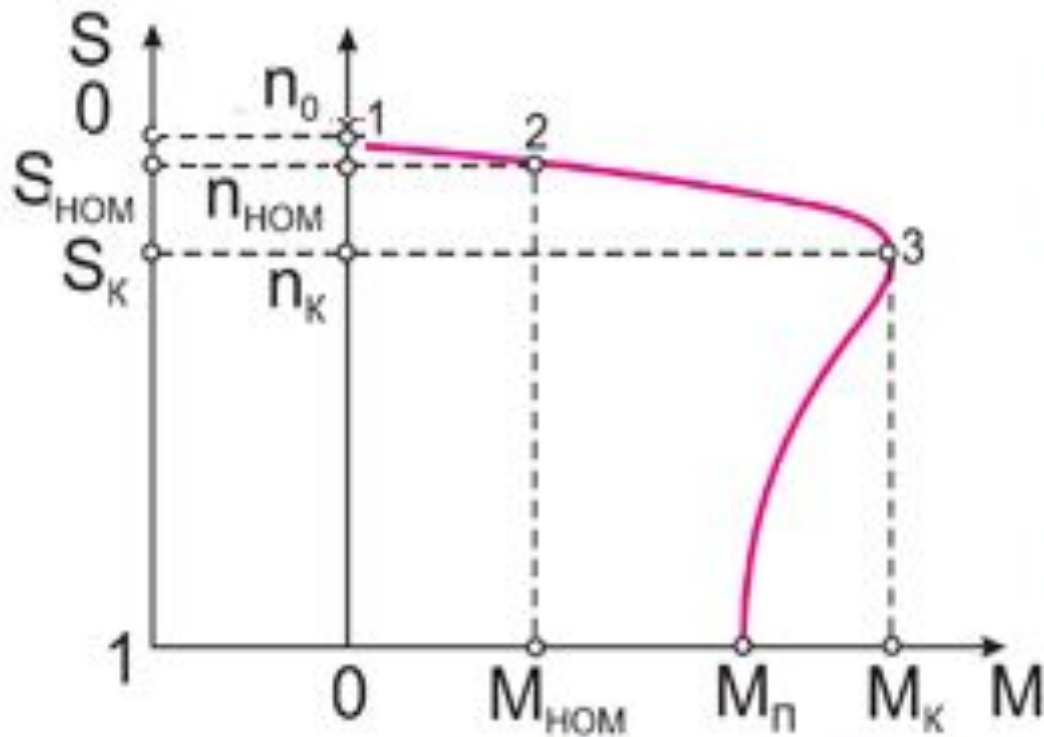
Энергетическая диаграмма и момент на валу АД



Паспортные данные АД

- Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ (кВт)
- Номинальное напряжение $U_{\text{ном,лин}}$ (В), 380/220, Y/Δ
- Номинальный ток $I_{\text{ном. Лин}}$ (А)
- Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ (об/мин)
- Коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$
- Кратность пускового момента $\beta = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$
- Кратность максимального момента $\lambda = M_{\text{к}} / M_{\text{ном}}$
- Кратность пускового тока $I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$
- Для АД с фазным ротором ещё даётся $U_{2\text{к}}$ и $I_{2\text{ном}}$

Естественная механическая характеристика



т.1 $n = n_{0HOM} = \frac{60f}{p}; M=0$

т.2 $n = n_{HOM}; M = M_{HOM} [H \cdot M]$

$$M_{HOM} = 9550 \frac{P_{HOM} [кВт]}{n_{HOM} [об/мин]}$$

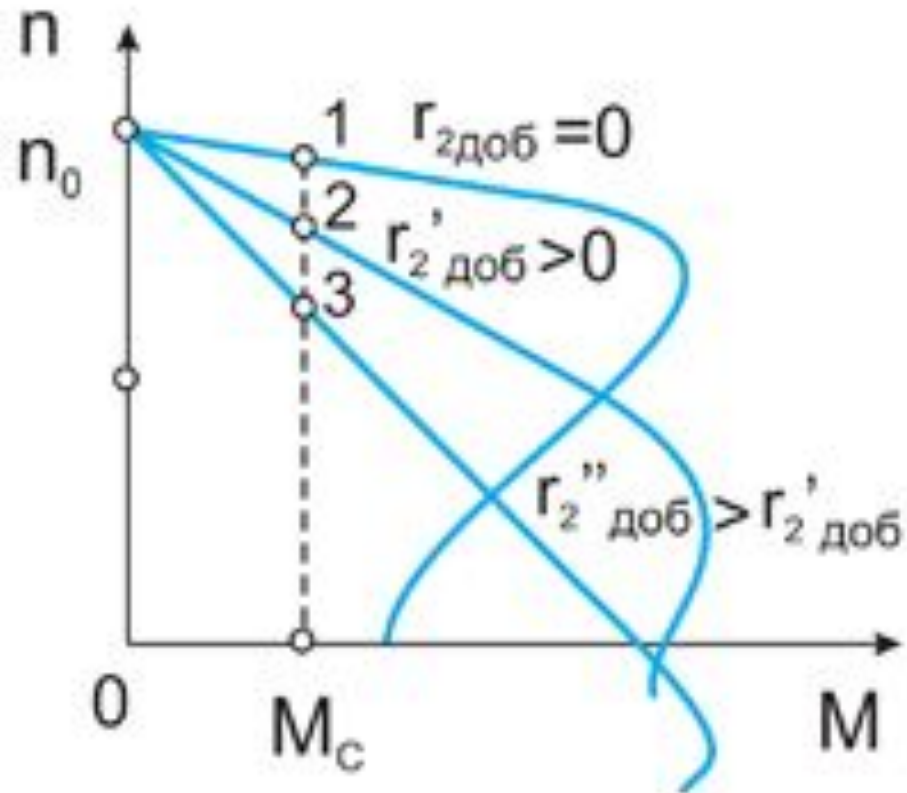
т.3 $n = n_K; M = M_K = M_{т.з}$

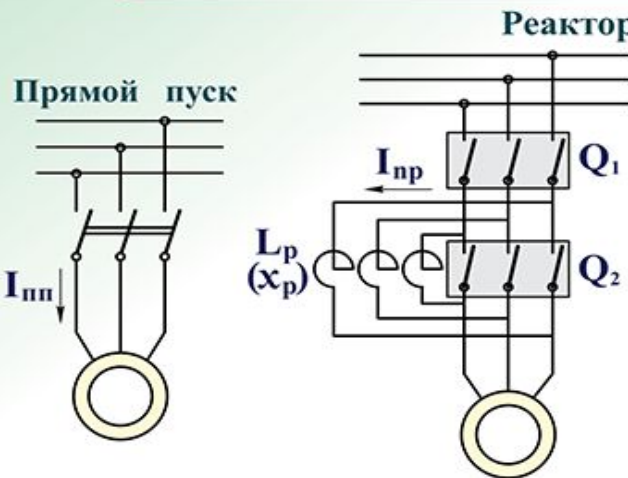
$$n_K = n_{0HOM} (1 - S_K)$$

$$S_K = S_{HOM} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}), S_{HOM} = (n_{0HOM} - n_{HOM}) / n_{0HOM}$$

т.4 $n=0; M=M_{\Pi} = \beta M_{HOM}$

Искусственные механические характеристики

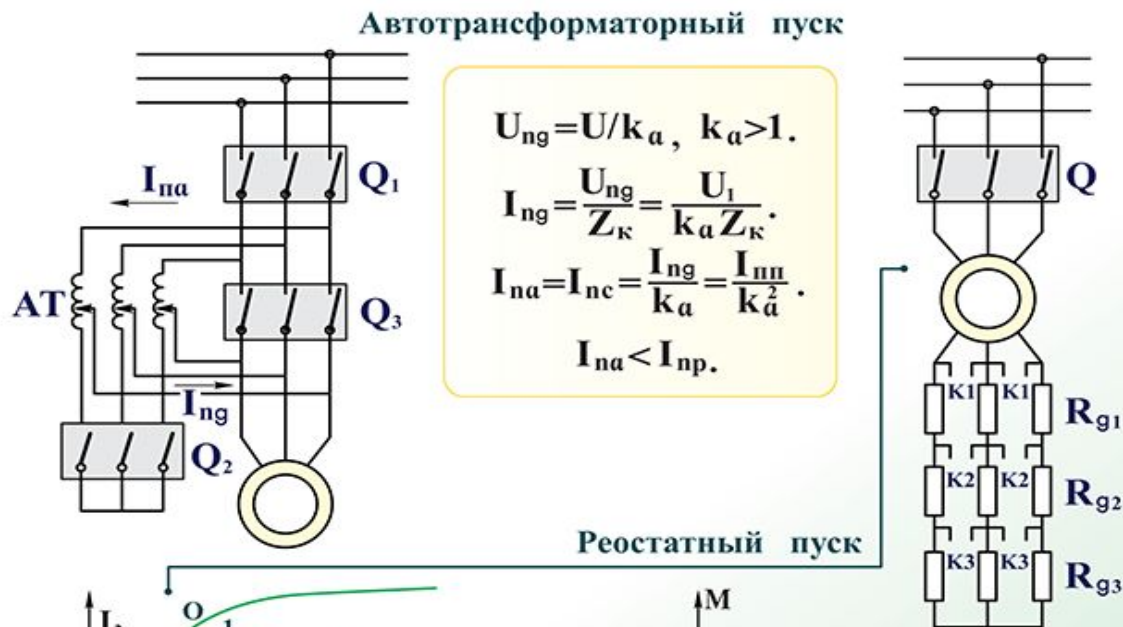




$$I_{np} = I_{nc} \sqrt{\frac{U_1}{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}$$

$$\frac{I_{nm}}{I_{np}} = \frac{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$$

$$\frac{M_{nm}}{M_{np}} = \frac{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}{r_k^2 + x_k^2}$$

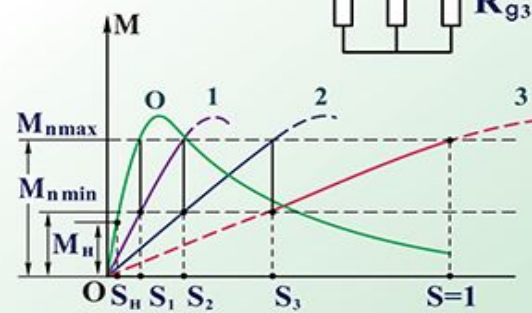
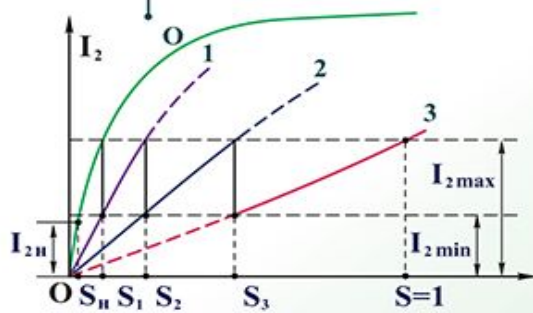


$$U_{ng} = U / k_a, \quad k_a > 1.$$

$$I_{ng} = \frac{U_{ng}}{Z_k} = \frac{U_1}{k_a Z_k}$$

$$I_{na} = I_{nc} = \frac{I_{ng}}{k_a} = \frac{I_{nm}}{k_a^2}$$

$$I_{na} < I_{np}.$$



РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

$$n = n_1(1-S) = \frac{60f_1}{p}(1-S); \quad \Omega = \Omega_1(1-S) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-S).$$

1. Частотное регулирование. Закон Костенко.

Если принять $c_1 = 1$ и $r_1 = 0$, то $M_m \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 x_k} = \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 x_k}$
или $M_m = \frac{m_1 U_1^2 p}{8\pi^2 f_1^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}^1)} = c \frac{U_1^2}{f_1^2}$.

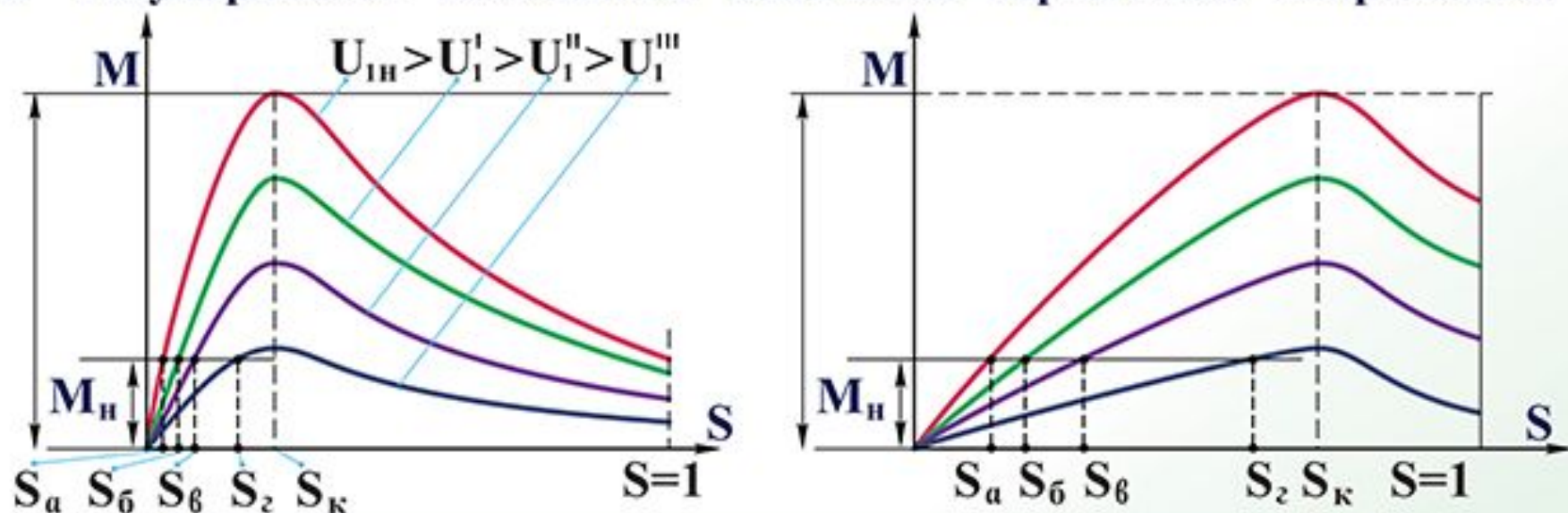
Из условия $M_{m1}/M_{H1} = M_{m2}/M_{H2} = \text{const}$

$$M_{m1}/M_{m2} = (U_{11}^2/U_{12}^2) \cdot (f_{12}^2/f_{11}^2) \quad \text{и} \quad U_{12}/U_{H1} = (f_{12}/f_{11}) \sqrt{M_{H2}/M_{H1}}$$

При $M = \text{const}$: $U_{12}/U_{11} = f_{12}/f_{11}$ или $U_{12}/f_{12} = U_{11}/f_{11}$.

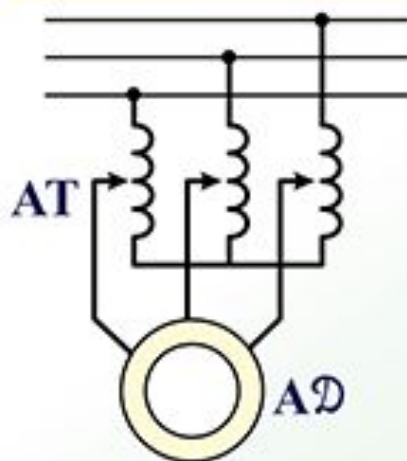
При $P = \text{const}$: $U_{12}/U_{11} = \sqrt{f_{12}/f_{11}}$.

2. Регулирование изменением величины первичного напряжения.

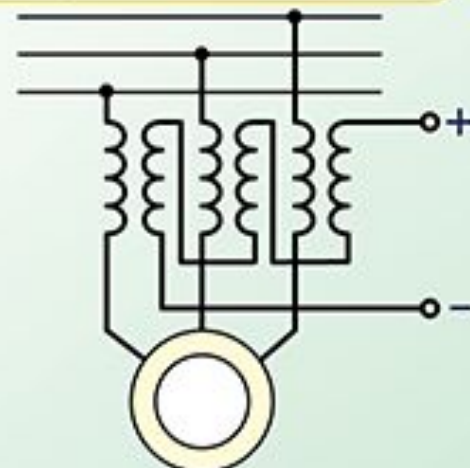


$$n_a = n_1(1 - S_a) > n_б(1 - S_б) > n_б(1 - S_б) > n_2(1 - S_2).$$

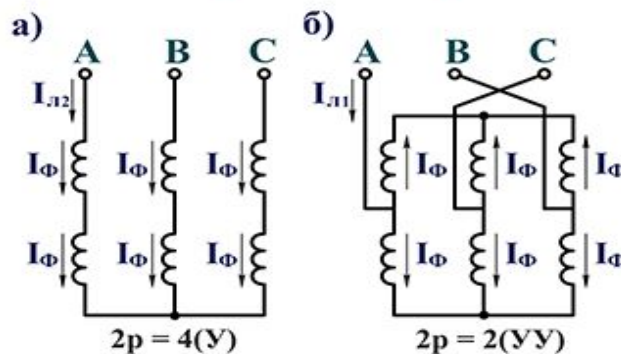
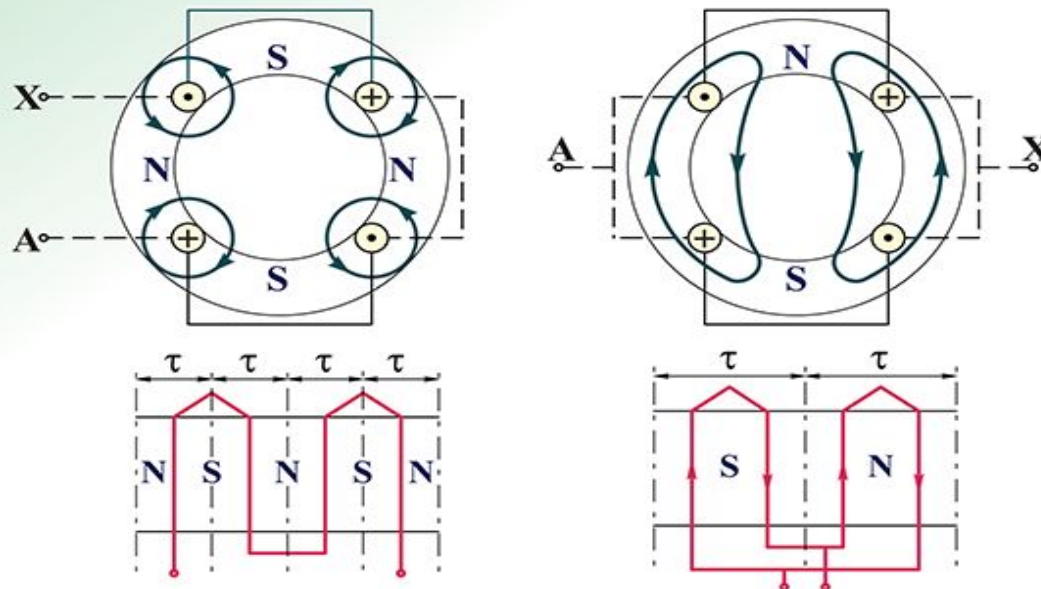
Зависимости $M = f(S)$ при $U_1 = \text{var}$.



Схемы для
изменения
подводимого
напряжения



РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ

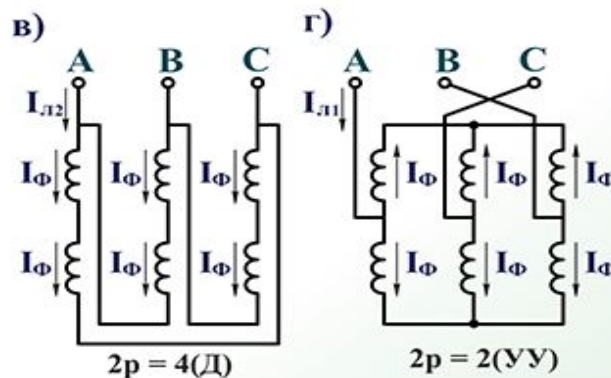
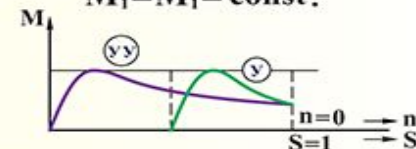


(Схемы а, б)

$$P_2 = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Phi} \eta \cdot \cos \Phi_1;$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\Delta} 2 I_{\Phi} \eta \cdot \cos \Phi_1; \quad \frac{P_2}{P_1} = 2.$$

$$M_1 = M_1 = \text{const.}$$

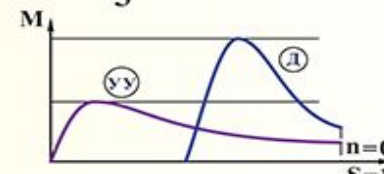


(Схемы в, г)

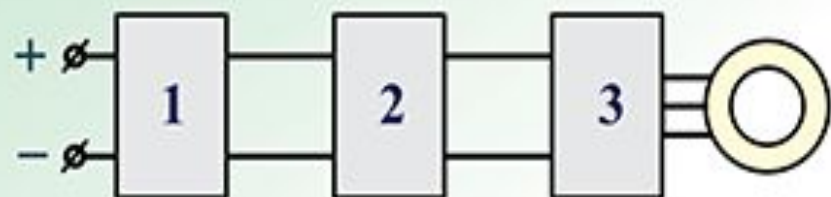
$$P_2 = \sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta} \eta \cos \Phi_1 = 3 U_{\Delta} \cdot I_{\Phi} \eta \cos \Phi_1;$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\Delta} 2 I_{\Phi} \eta \cdot \cos \Phi_1;$$

$$P_1 / P_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2}{3} = 1,15; \quad P \approx \text{const.}$$



СХЕМЫ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ



Структурная схема преобразователя частоты, питающегося от сети постоянного тока

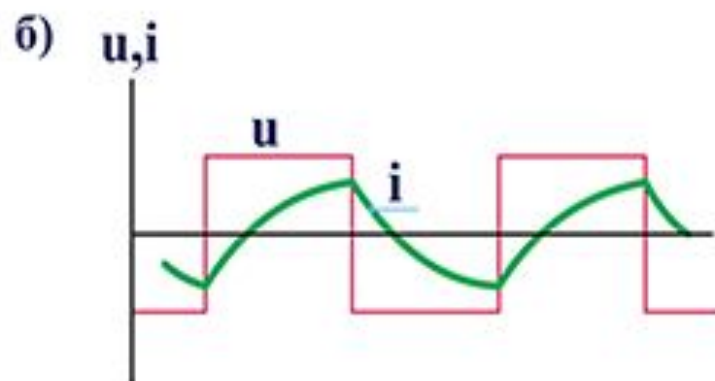
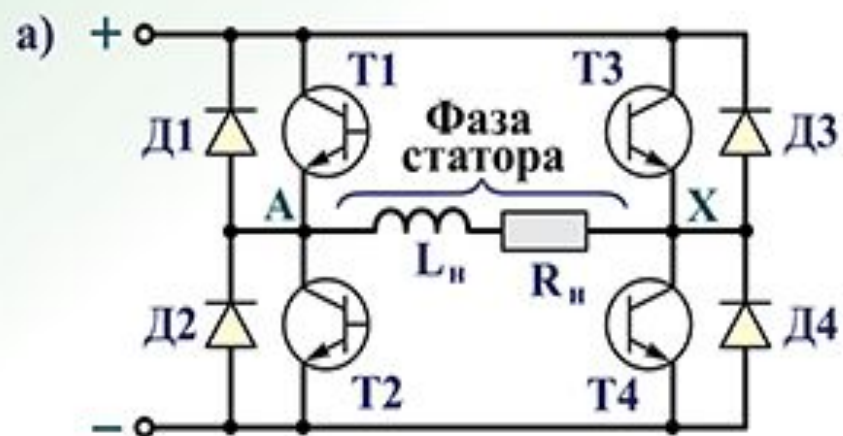


Схема питания одной фазы асинхронного двигателя от транзисторного мостового инвертора (а) и графики изменения напряжения и тока фазы (б)

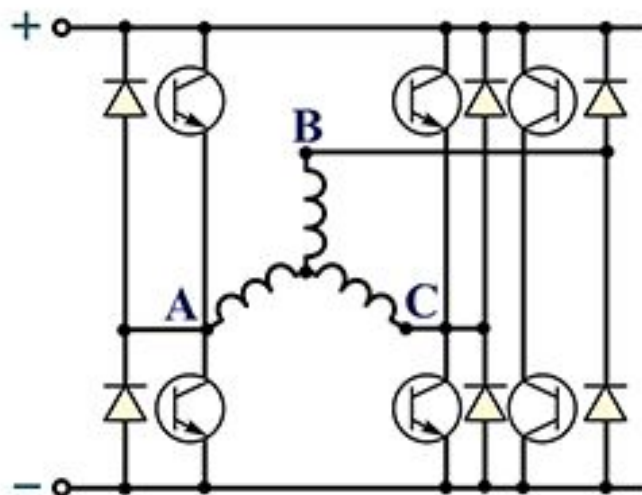
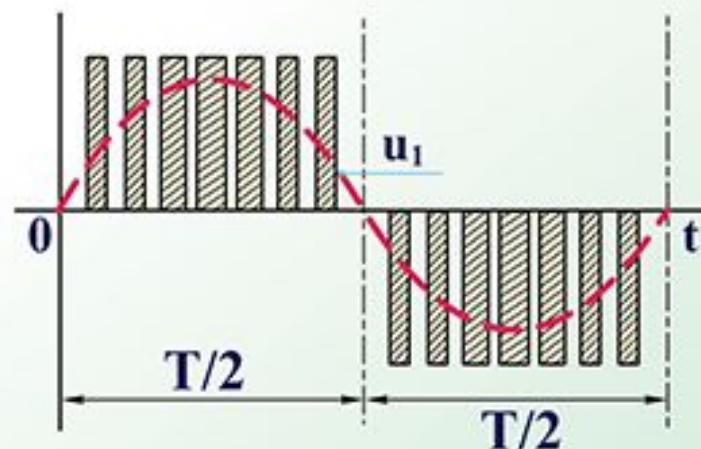
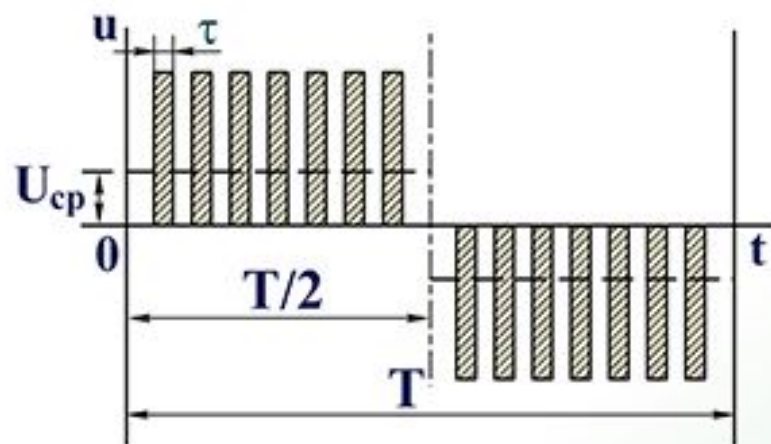
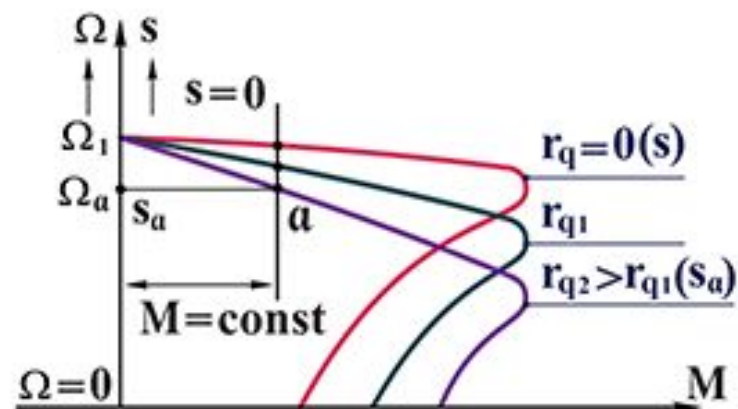
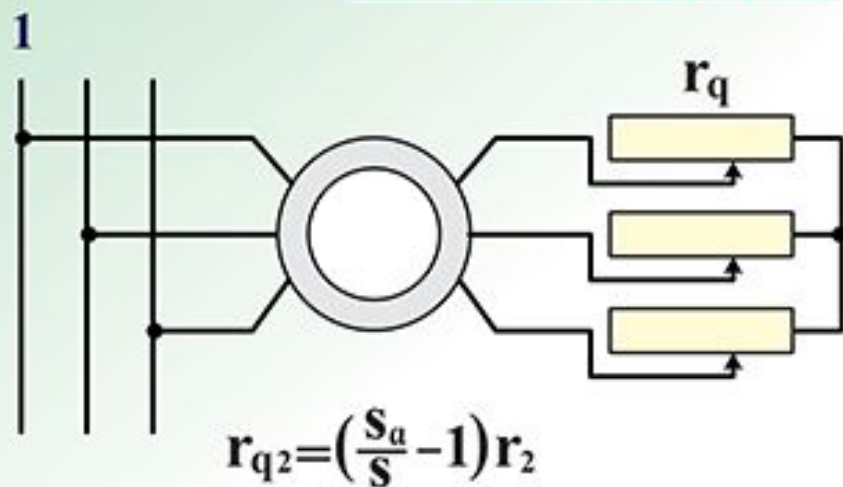


Схема питания трехфазного асинхронного двигателя от мостового транзисторного инвертора



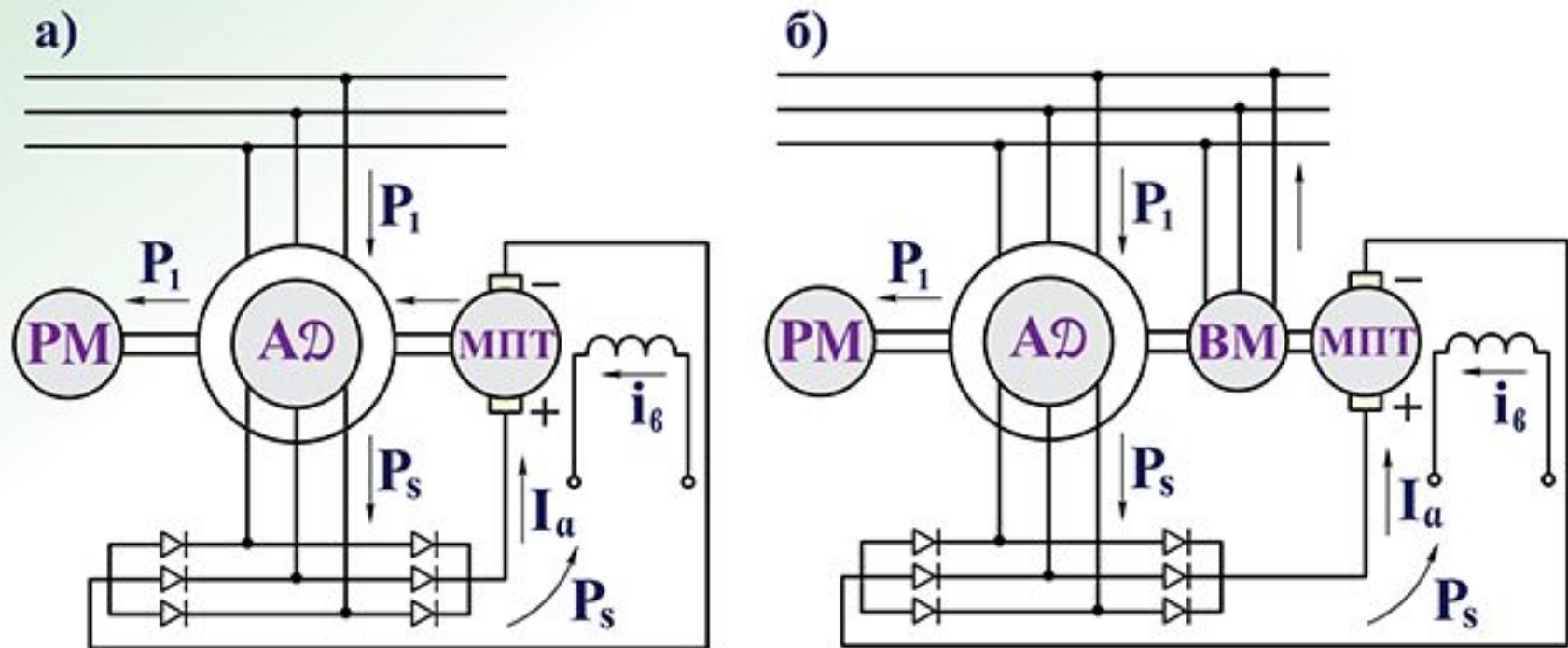
Графики изменения напряжения, подаваемого на обмотку статора двигателя при широтно-импульсном регулировании (а) и при широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону (б)

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Регулирование путем включения реостата в цепь ротора

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Схемы электромеханического каскада (а)
и электрического каскада (б) АД
с машиной постоянного тока (МПТ)

$$P_s = P_{\text{ЭМ}} s; \quad P_{\text{MX}} = P_2^1 = (1-s) P_{\text{ЭМ}}$$

a) $P_{\text{PM}} = P_{\text{MX}} + P_s \approx (1-s) P_H + P_H s = P_H = \text{const.} \quad (P_1 = P_H = \text{const})$

б) $P_{\text{MX}} = (1-s) P_{\text{ЭМ}} \approx (1-s) P_1. \quad (M = \text{const}).$

АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР (АГ)

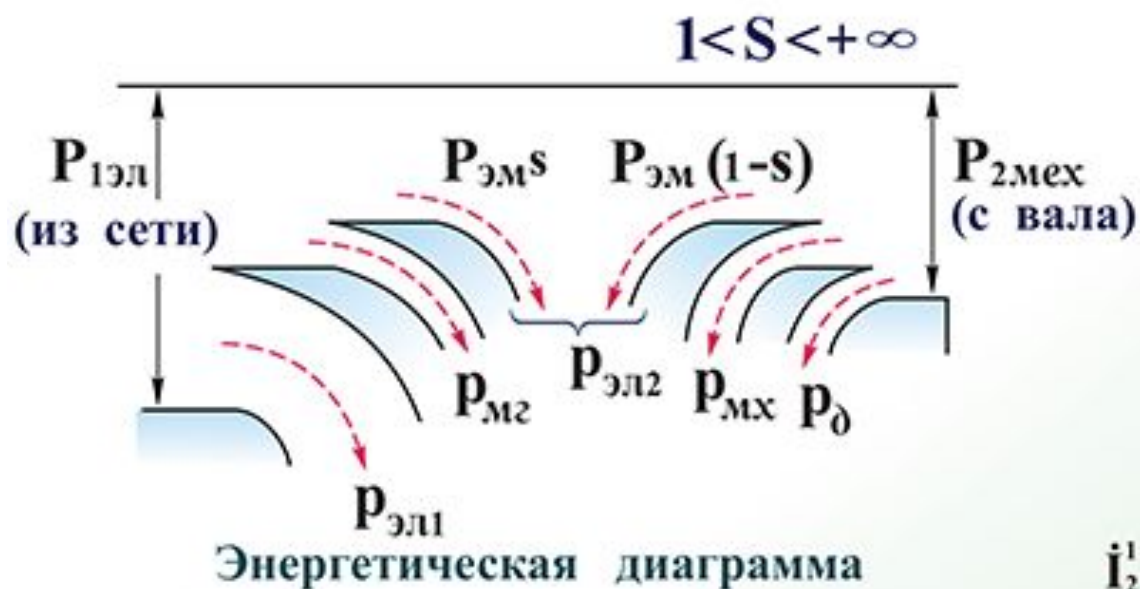


$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \cdot \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} < 0; \quad M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2 < 0.$$

$$I_{2r} = I_2 \sin \psi_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \cdot \frac{x_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} > 0; \quad P_2^1 = m_2 I_2^2 r_2^1 \frac{1-s}{s} < 0.$$

$$\varphi_1 > 90^\circ; \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0; \quad Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 > 0.$$

Режим противовключения (режим электромагнитного тормоза)



$$P_{эл2} = P_{эм} s + P_{эм} (1 - s) = P_{эм}$$

$$P_{эм} (1 - s) = m_2 I^2 r_2 \frac{1 - s}{s}$$



**Благодарю за
внимание**