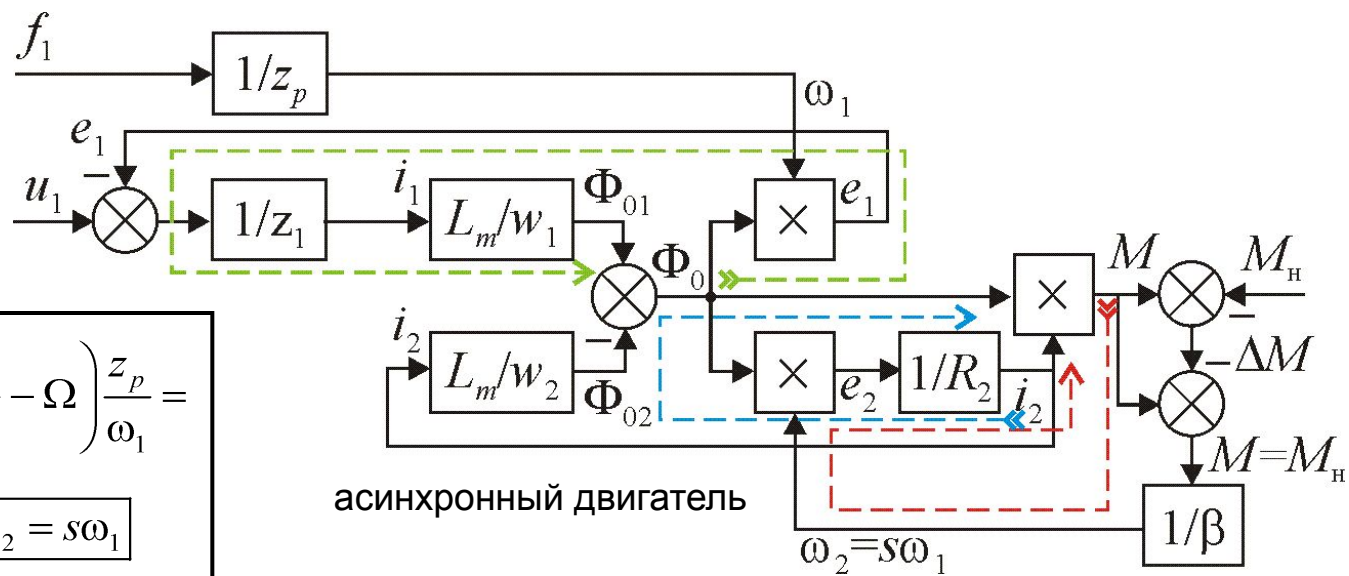
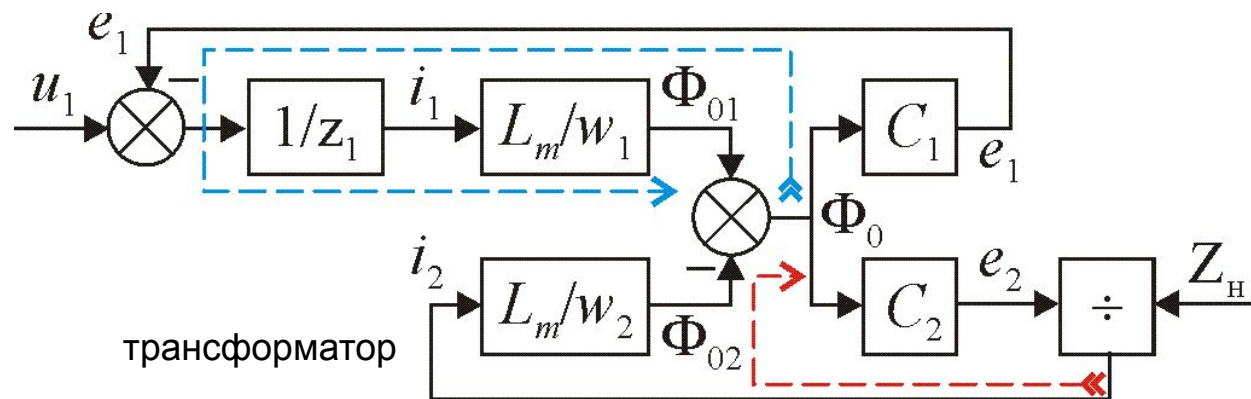
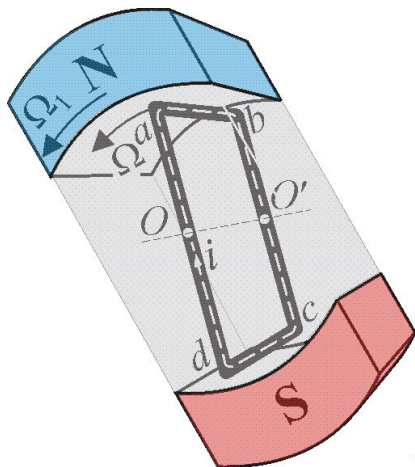


Принцип действия асинхронного двигателя

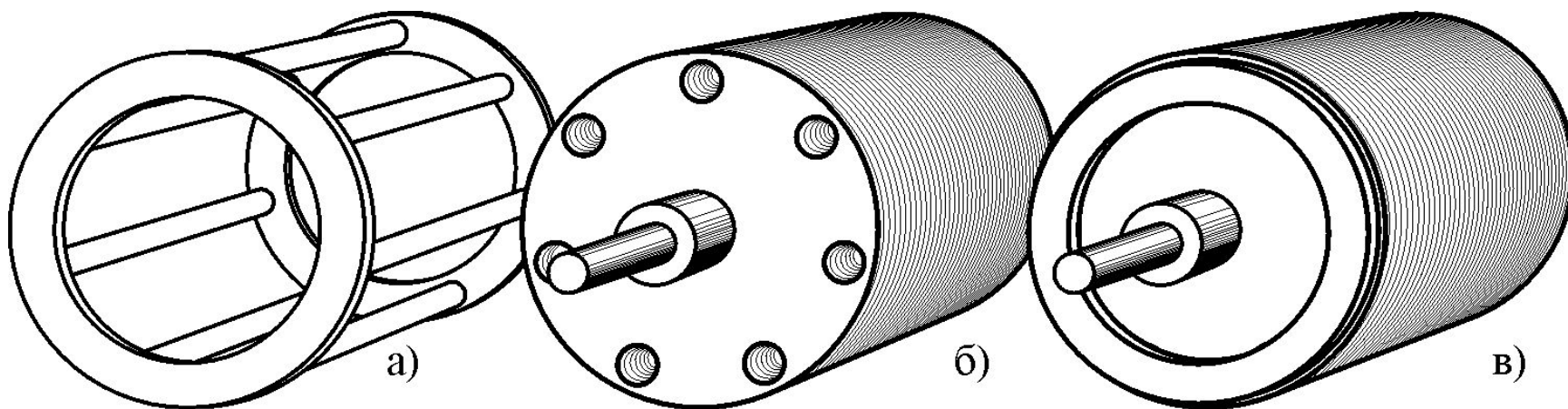


$$s = (\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1 = \left(\frac{\omega_1}{p} - \Omega \right) \frac{z_p}{\omega_1} =$$

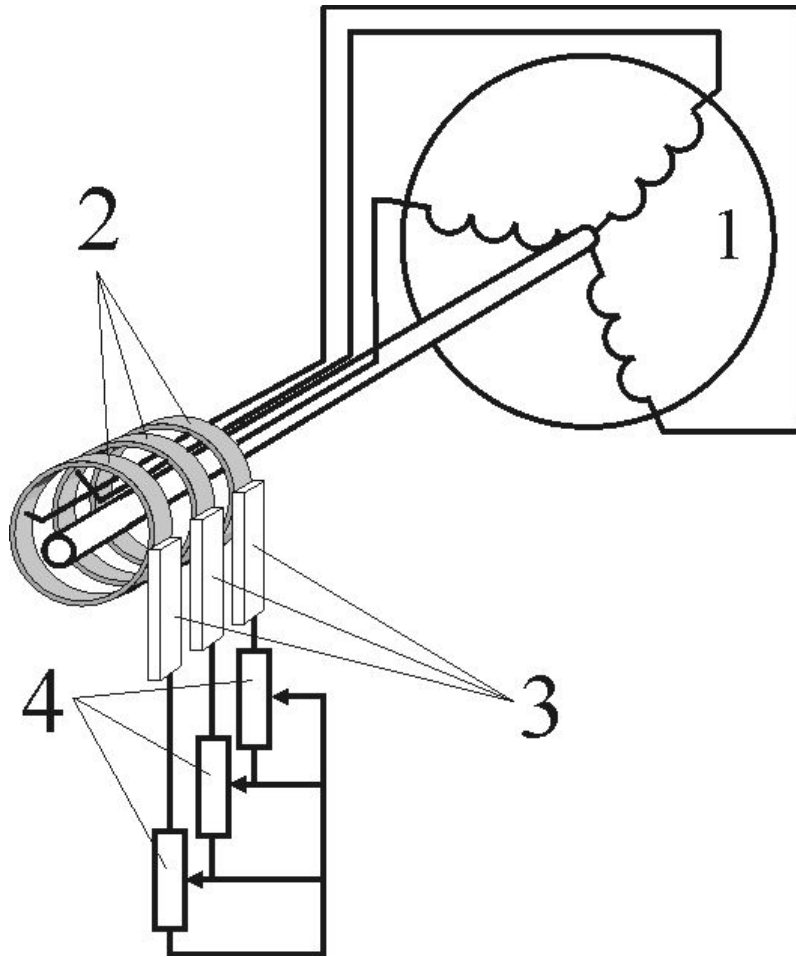
$$= \frac{\omega_1 - \Omega z_p}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad \boxed{\omega_2 = s\omega_1}$$

$$s = (n_1 - n) / n_1$$

Конструкция короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя типа «беличья клетка»

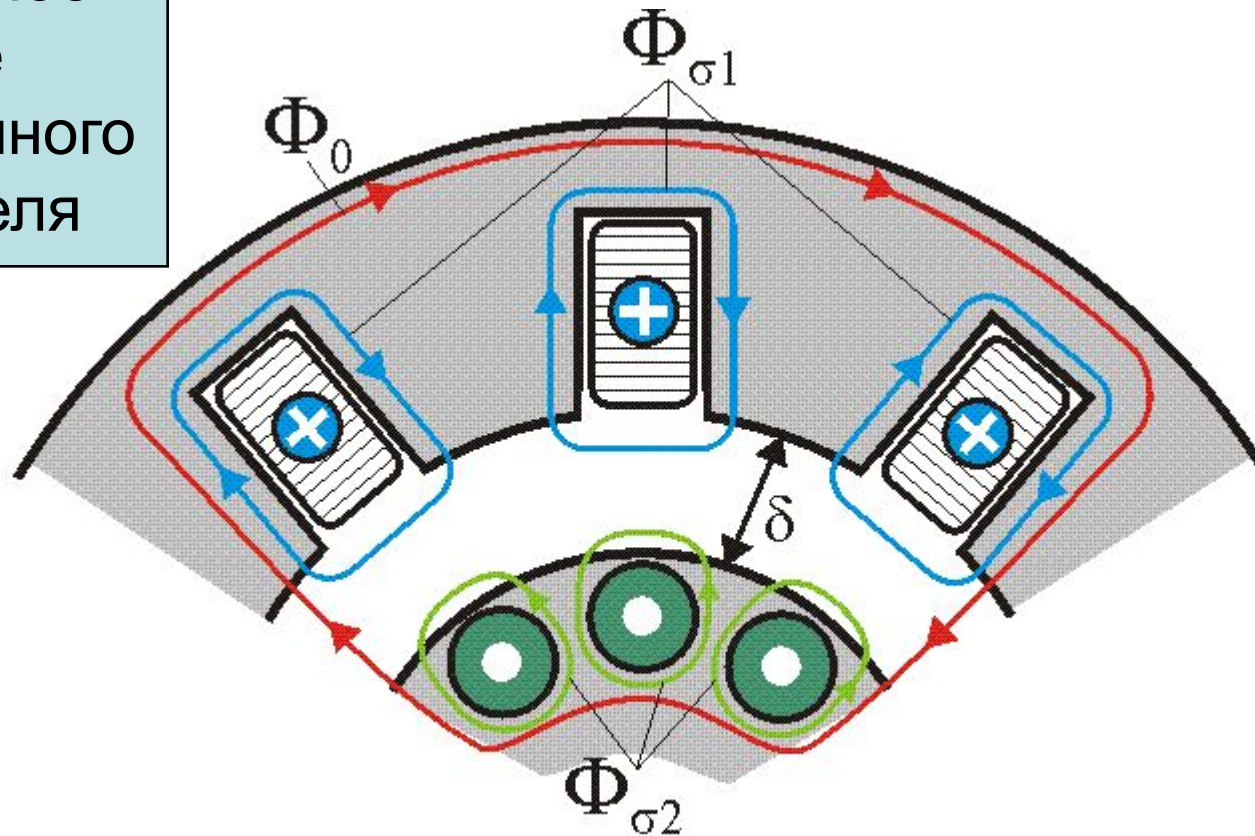


Конструктивная схема фазного ротора асинхронного двигателя



- 1 - фазные обмотки ротора
- 2 - контактные кольца
- 3 - щётки
- 4 - добавочные сопротивления

Магнитное поле асинхронного двигателя

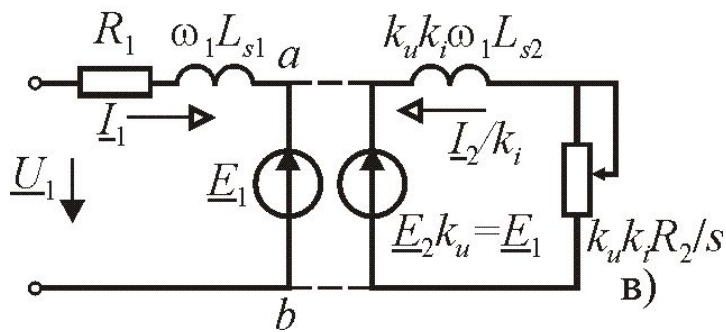
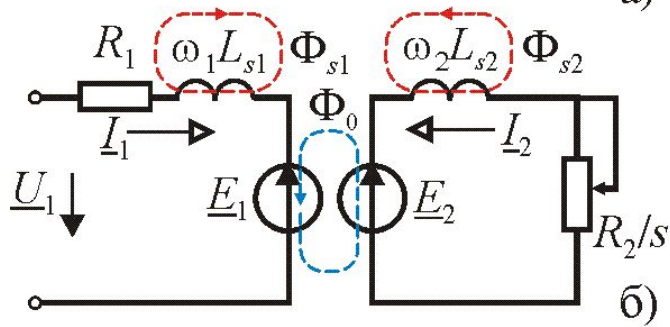
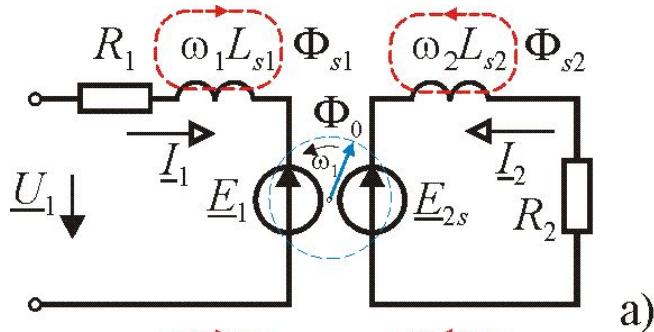


$$\Phi_{\theta} \approx \text{const} \Rightarrow F = m_1 w_1 i + m w i \approx \text{const}$$

$$m_1 w_1 i + m_2 w_2 i \approx m_0 w_0 i \Rightarrow i_2 + i \left(\frac{m_2 w_2}{m_0 w_0} \right) / \left(\frac{m_1 w_1}{m_0 w_0} \right) \approx i$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0; \quad \underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / k_i; \quad k_i = \frac{m_1 k_{\phi 1} w_1}{m_2 k_{\phi 2} w_2} = \frac{m_1 w_1}{m_2 w_2}$$

Схема замещения асинхронного двигателя



$$s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1 = \omega_2 / \omega_1 \Rightarrow \omega_2 = s\omega_1$$

$$E_{2s} = \omega_2 w_2 \Phi_{m1} / \sqrt{2} = s\omega_1 w_2 \Phi_{m1} / \sqrt{2} = sE_1$$

$$a) \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\omega_1 L_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ \underline{E}_{2s} = \underline{I}_2 R_2 + j\omega_2 L_{s2} \underline{I}_2 = \underline{I}_2 R_2 + js\omega_1 L_{s2} \underline{I}_2 = sE_2 \end{cases}$$

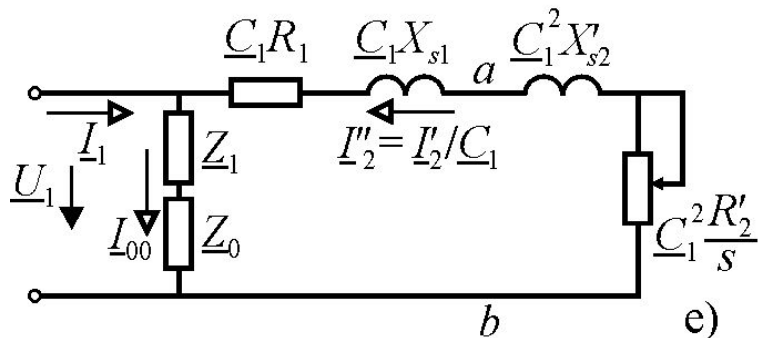
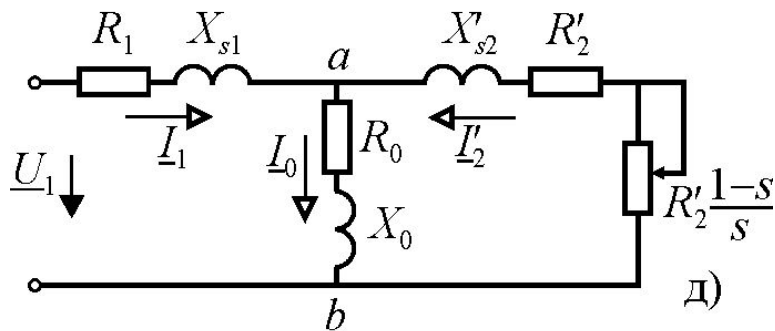
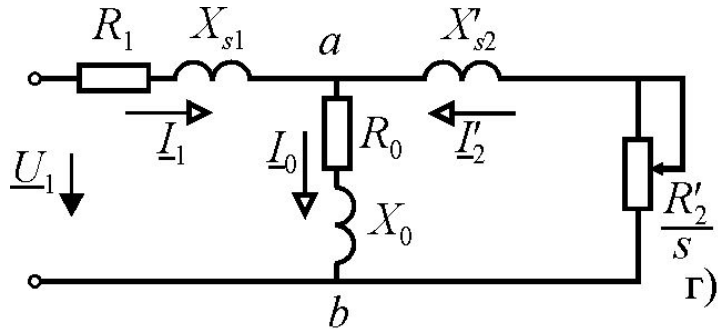
$$б) \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + j\omega_1 L_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 = \underline{I}_1 R_1 + jX_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 = \underline{I}_2 R_2 / s + j\omega_1 L_{s2} \underline{I}_2 = \underline{I}_2 R_2 / s + jX_{s2} \underline{I}_2 \end{cases}$$

$$B) \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + jX_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ \underline{E}'_2 = \underline{E}_2 k_u = \underline{E}_1 = \underline{I}'_2 R'_2 / s + jX'_{s2} \underline{I}'_2 \end{cases}$$

$$R'_2 = k_u k_i R_2; \quad X'_{s2} = k_u k_i X_{s2}; \quad \underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / k_i$$

$$k_u = \frac{E_{\phi 61} \frac{k}{w}}{E_{\phi 62} \frac{k}{w}}; \quad k_i = \frac{m \frac{k}{w}}{m \frac{k}{w}}$$

Схема замещения асинхронного двигателя



$$\Gamma) \begin{cases} I_1 + I'_2 = I_0 \\ \underline{U}_1 = R_1 I_1 + jX_{s1} I_1 - \underline{E}_1 = R_1 I_1 + jX_{s1} I_1 + I_0 (R_0 + jX_0) \\ \underline{E}'_2 = E_1 = -\underline{U}_{ab} = -I_0 (R_0 + jX_0) = R'_2 I'_2 / s + jX'_{s2} I'_2 \end{cases}$$

$$\Delta) \begin{cases} I_1 + I'_2 = I_0 \\ \underline{U}_1 = R_1 I_1 + jX_{s1} I_1 + I_0 (R_0 + jX_0) \\ -\underline{U}_{ab} = -I_0 (R_0 + jX_0) = R'_2 I'_2 / s + R'_2 I'_2 - R'_2 I'_2 + jX'_{s2} I'_2 = \\ = R'_2 I'_2 + jX'_{s2} I'_2 + R'_2 I'_2 (1-s) / s \end{cases}$$

$$\epsilon) \begin{cases} I_{00} = \underline{U}_1 / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0) = I_1 + I''_2 = \text{const} \\ -\underline{U}_1 = \underline{C}_1 R_1 I''_2 + j\underline{C}_1 X_{s1} I''_2 + j\underline{C}_1^2 X'_{s2} I''_2 + \underline{C}_1^2 R'_2 I''_2 / s = \\ = I'_2 [(R_1 + \underline{C}_1 R'_2 / s) + j(X_{s1} + \underline{C}_1 X'_{s2})] \end{cases}$$

$$\underline{C}_1 = 1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_0 \approx 1 + X_{s1} / X_0 = c_1$$

$$P_{\text{mx}} = m_1 (I'_2)^2 R'_2 (1-s) / s = m_1 I_2^2 R_2 (1-s) / s =$$

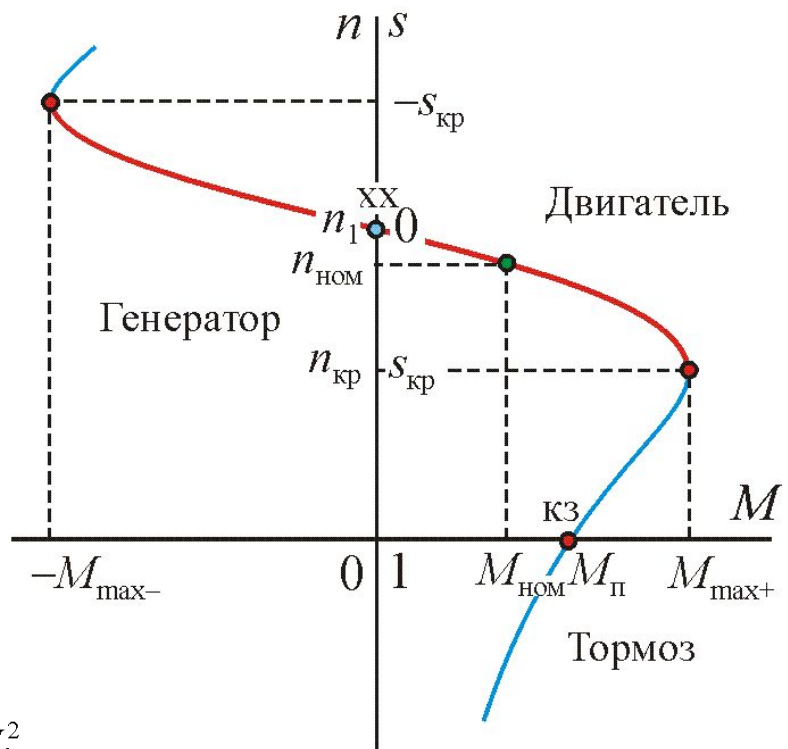
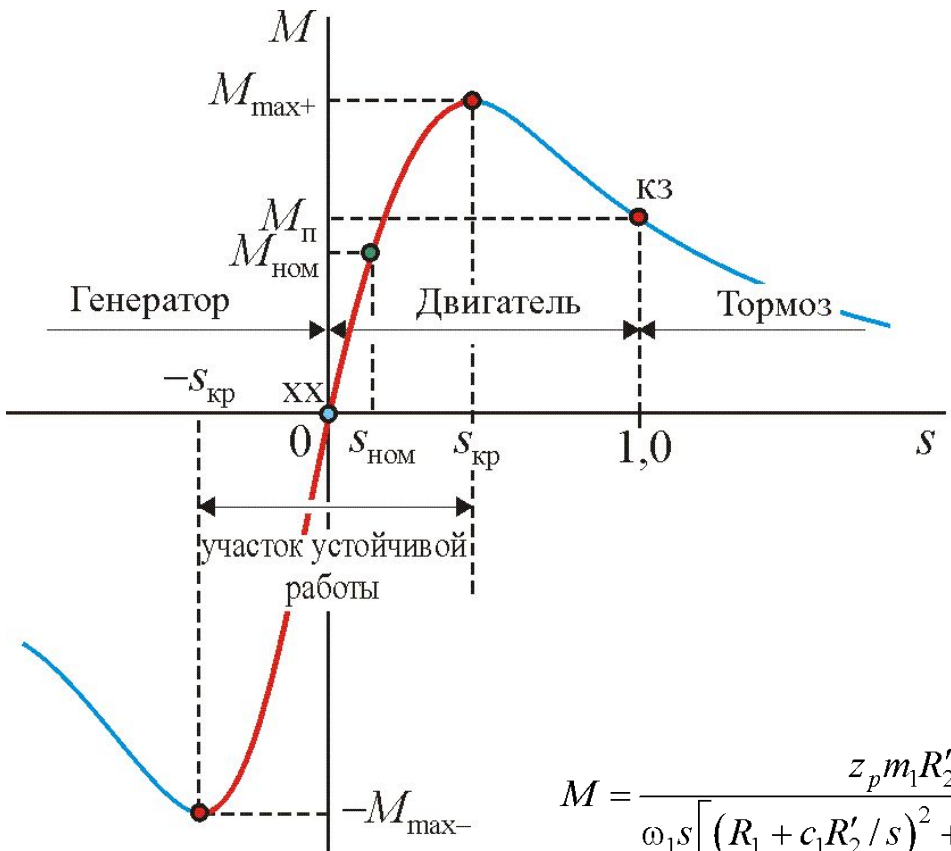
$$= m_1 (I'_2)^2 R'_2 \Omega / (\Omega_1 s) = m_1 (I'_2)^2 R'_2 \Omega z_p / (\omega_1 s)$$

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}}$$

$$M = P_{\text{mx}} / \Omega = m_1 (I'_2)^2 R'_2 z_p / (\omega_1 s) =$$

$$= \frac{z_p m_1 R'_2 U_1^2}{\omega_1 s [(R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2]}$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя

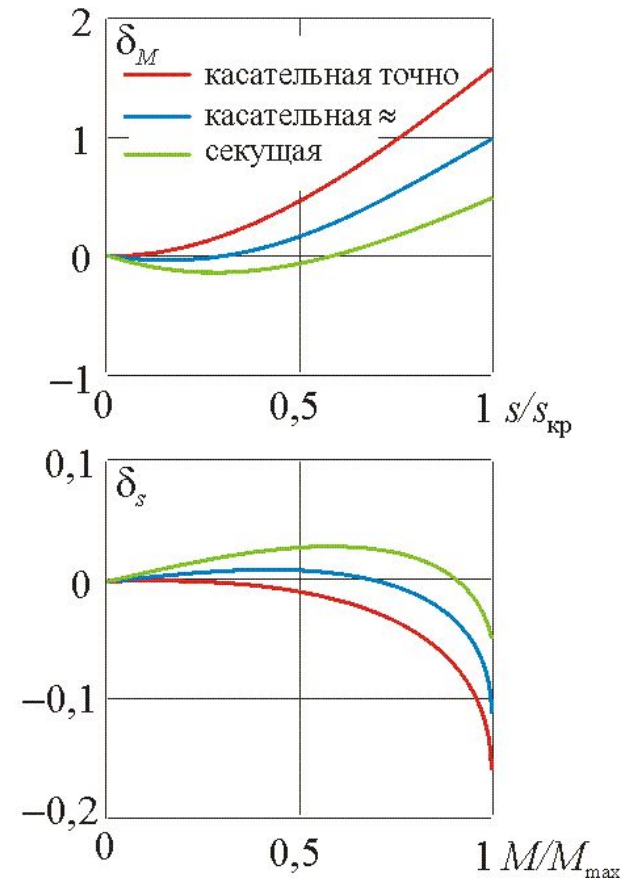
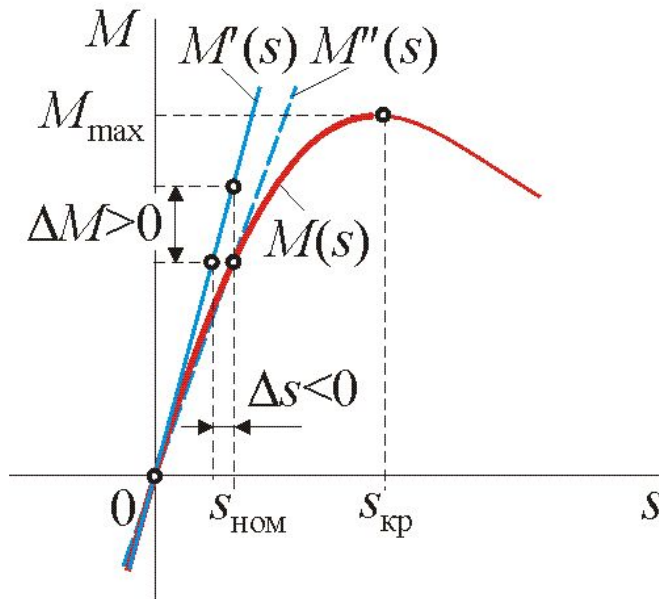


$$M = \frac{z_p m_1 R'_2 U_1^2}{\omega_1 s \left[(R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2 \right]}$$

$$M_{\text{max}} = \frac{z_p m_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2} \right]} \approx \frac{z_p m_1 U_1^2}{2\omega_1 (X_{s1} + X'_{s2})}; \quad s = \pm \frac{c_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}} \approx \pm \frac{R'_2}{X_{s1} + X'_{s2}}$$

$$M = M_{\text{max}} \frac{2(1 + as_{\text{kp}})}{\frac{s}{s_{\text{kp}}} + \frac{s_{\text{kp}}}{s} + 2as_{\text{kp}}} \approx \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{kp}}} + \frac{s_{\text{kp}}}{s}}; \quad a = R_1 / R'_2$$

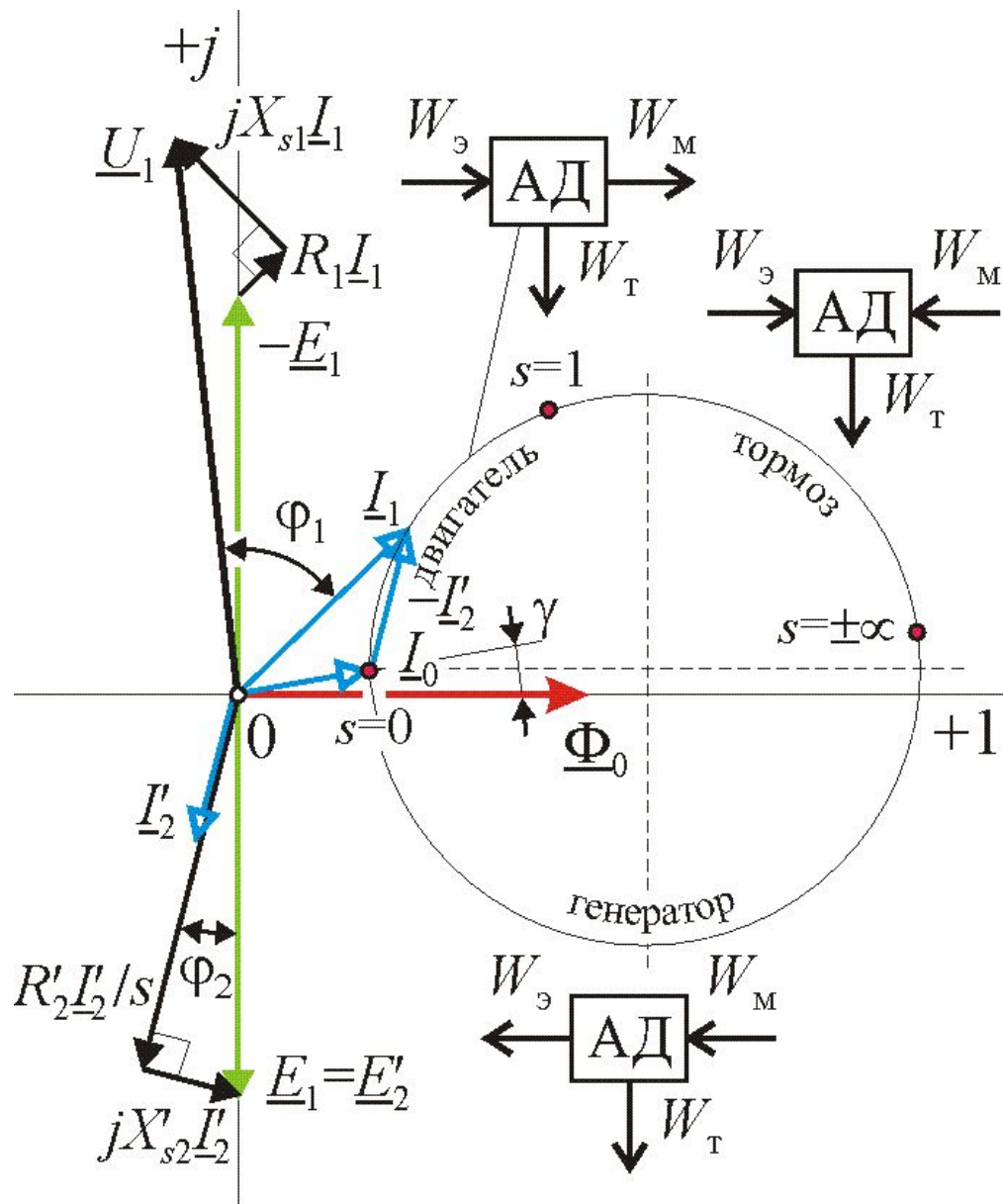
Линеаризация механической характеристики АД



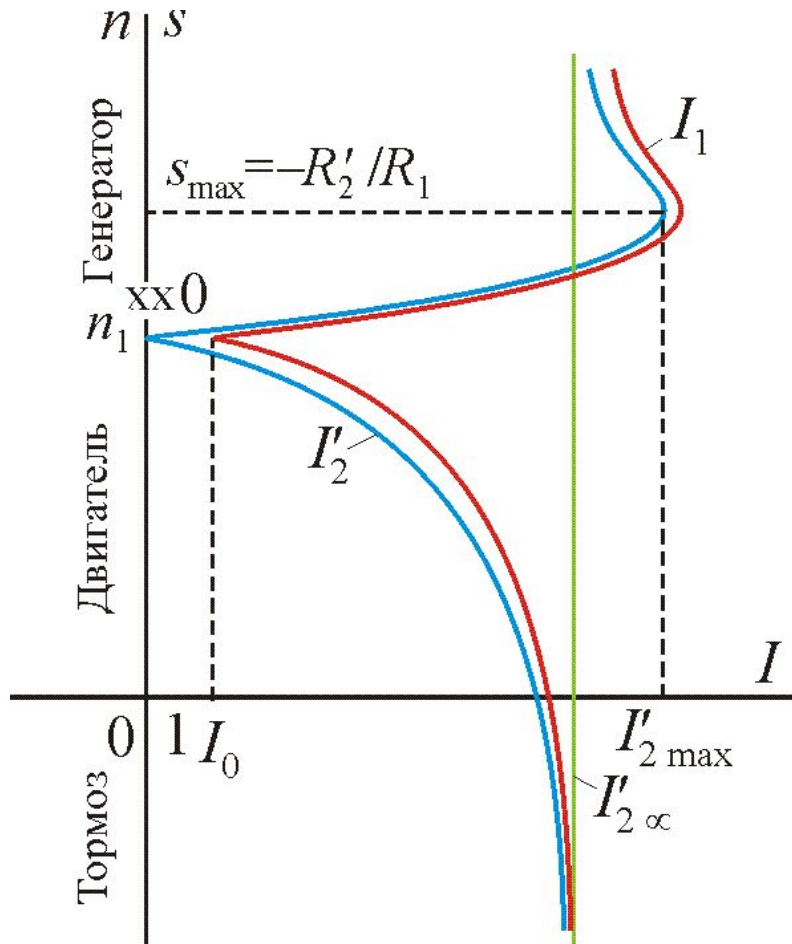
$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{2M_{\text{нрмах}}(1 + as_{\text{кр}})}{\left(\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2as_{\text{кр}}\right)^2} \left(\frac{s}{s^2} - \frac{1}{s_{\text{кр}}}\right); \quad \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{\partial M_{\text{нрмах}}}{\partial s}\right) = \frac{2M_{\text{кр}}(1 + as)}{s_{\text{кр}}} \approx \frac{2M_{\text{нрмах}}}{s_{\text{кр}}} \Big|_{R_1 \approx 0 \rightarrow a \approx 0}$$

$$M'(s) = \frac{\partial M}{\partial s} s = \frac{2M_{\text{нрмах}}(1 + as)}{s_{\text{кр}}} s \approx \frac{2M_{\text{нрмах}}}{s_{\text{кр}}} s; \quad M''(s) = \frac{M}{s_{\text{НОМ}}} s$$

Векторная диаграмма асинхронного двигателя



Электромеханическая (скоростная) характеристика

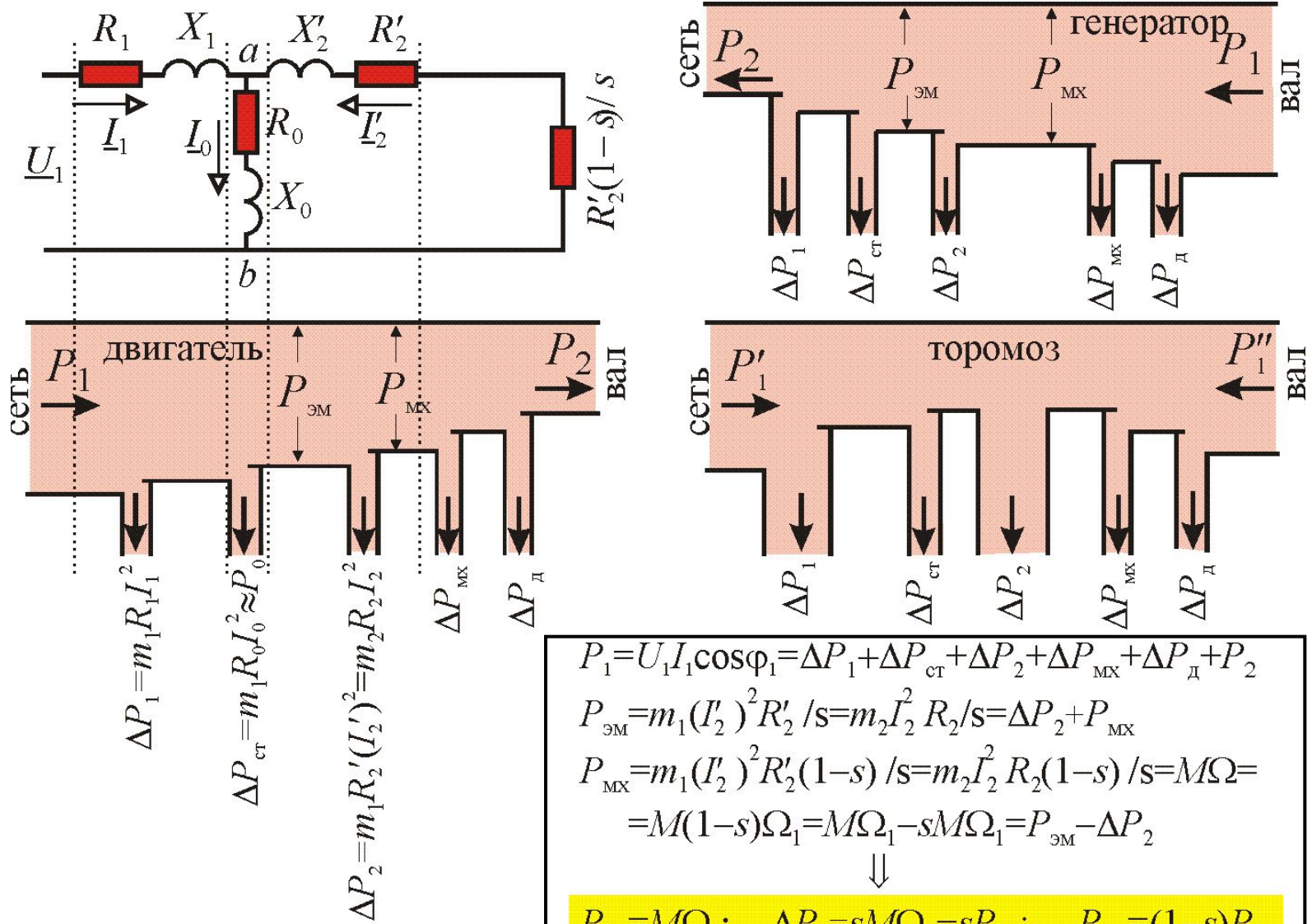


$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}}$$

$$I'_{\text{кpo}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}} \Big|_{s \rightarrow \pm\infty} = U_1 s / (c R')$$

$$I'_{2\max} = \frac{U_1}{X_{\text{ст}} + c_1 X'_{s2}} = \frac{U_1}{X}; \quad s_{\max} = -R'_2 / R_1$$

Диаграмма активной мощности



$$\Delta P_1 = m_1 R_1 I_1^2$$

$$\Delta P_{ст} = m_1 R_0 I_0^2 \approx P_0$$

$$\Delta P_2 = m_1 R_2 (I_2')^2 = m_2 R_2 I_2'^2$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \Delta P_1 + \Delta P_{ст} + \Delta P_2 + \Delta P_{МХ} + \Delta P_{Д} + P_2$$

$$P_{эм} = m_1 (I_2')^2 R_2' / s = m_2 I_2'^2 R_2 / s = \Delta P_2 + P_{МХ}$$

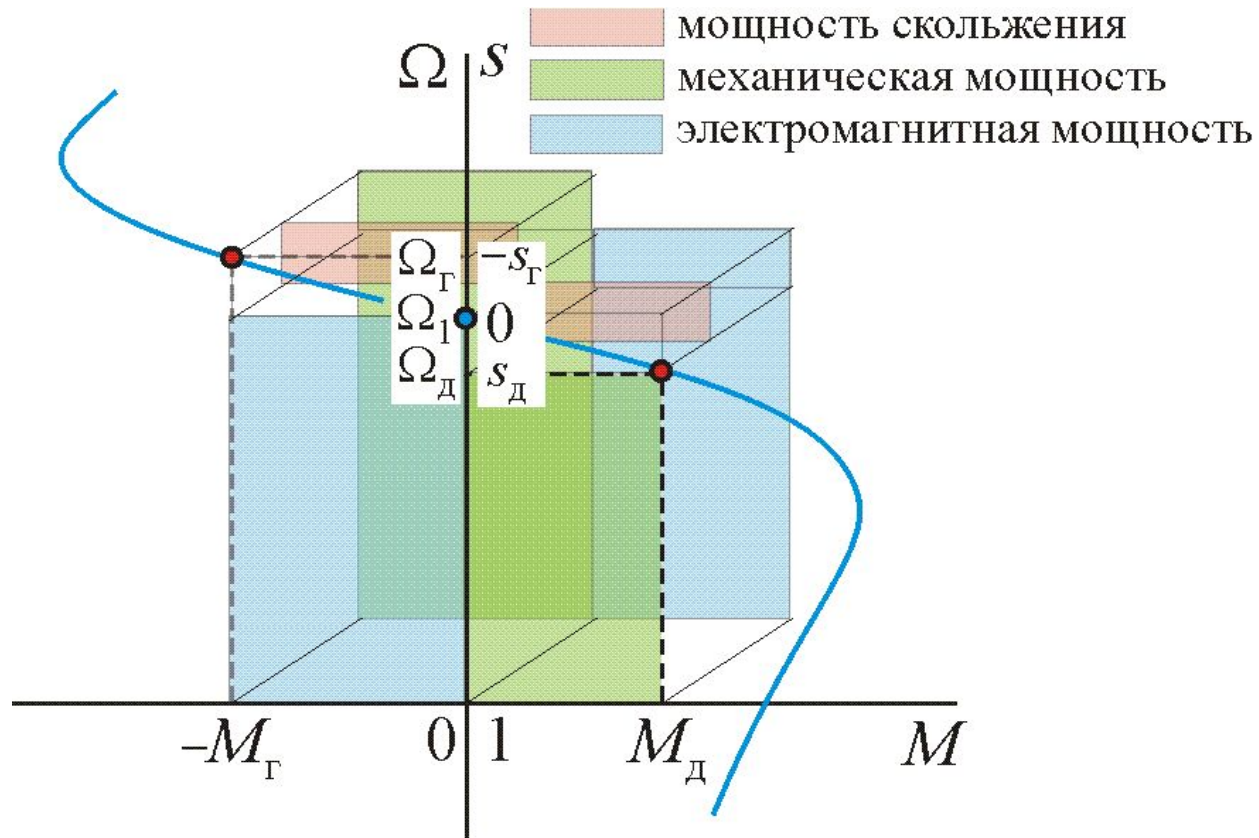
$$P_{МХ} = m_1 (I_2')^2 R_2' (1-s) / s = m_2 I_2'^2 R_2 (1-s) / s = M \Omega = M(1-s) \Omega_1 = M \Omega_1 - s M \Omega_1 = P_{эм} - \Delta P_2$$

$$\Downarrow$$

$$P_{эм} = M \Omega_1; \quad \Delta P_2 = s M \Omega_1 = s P_{эм}; \quad P_{МХ} = (1-s) P_{эм}$$

$$P_2 = P_{МХ} - \Delta P_{МХ} - \Delta P_{Д}$$

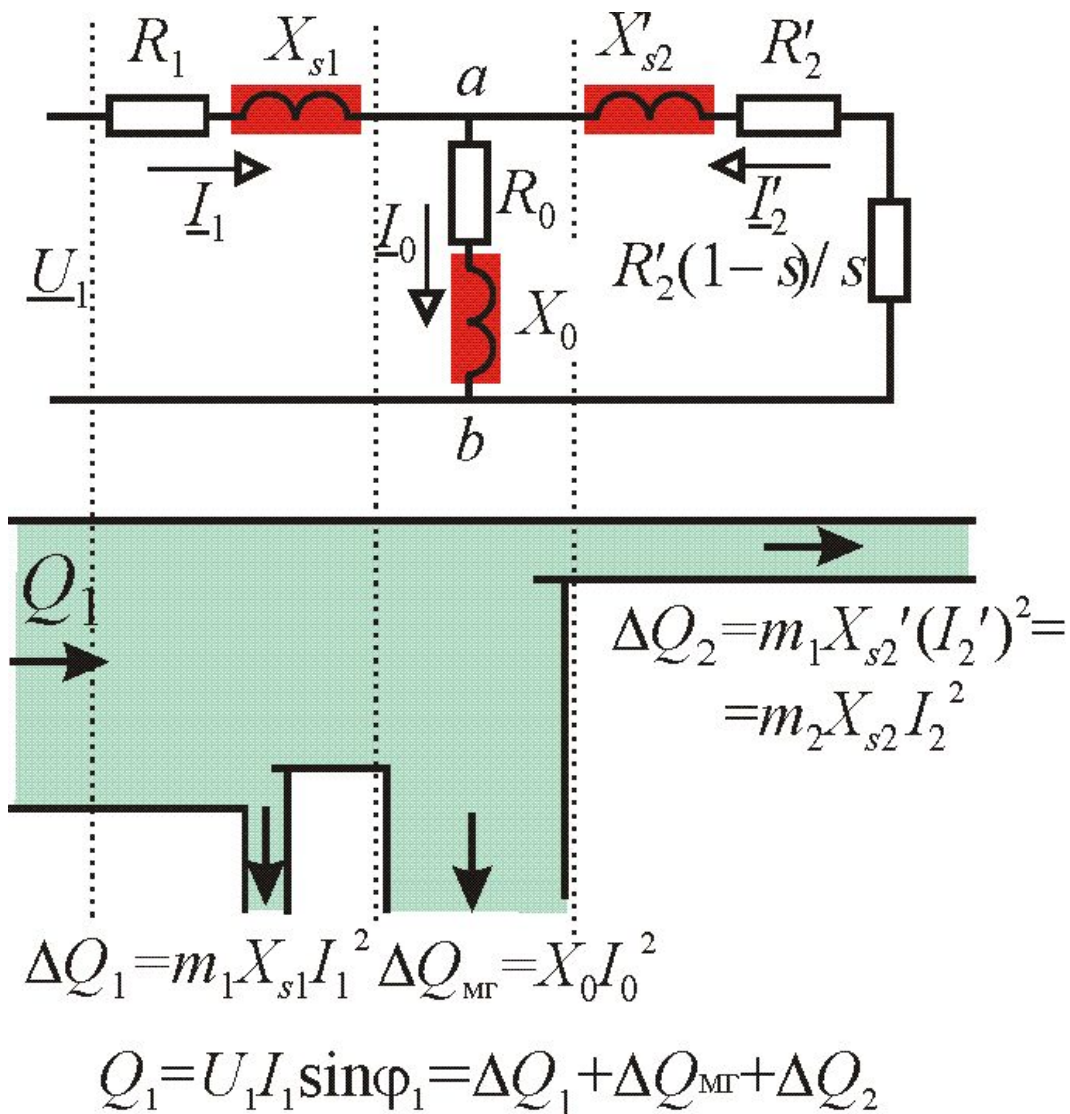
Графическое представление составляющих мощности на механической характеристике



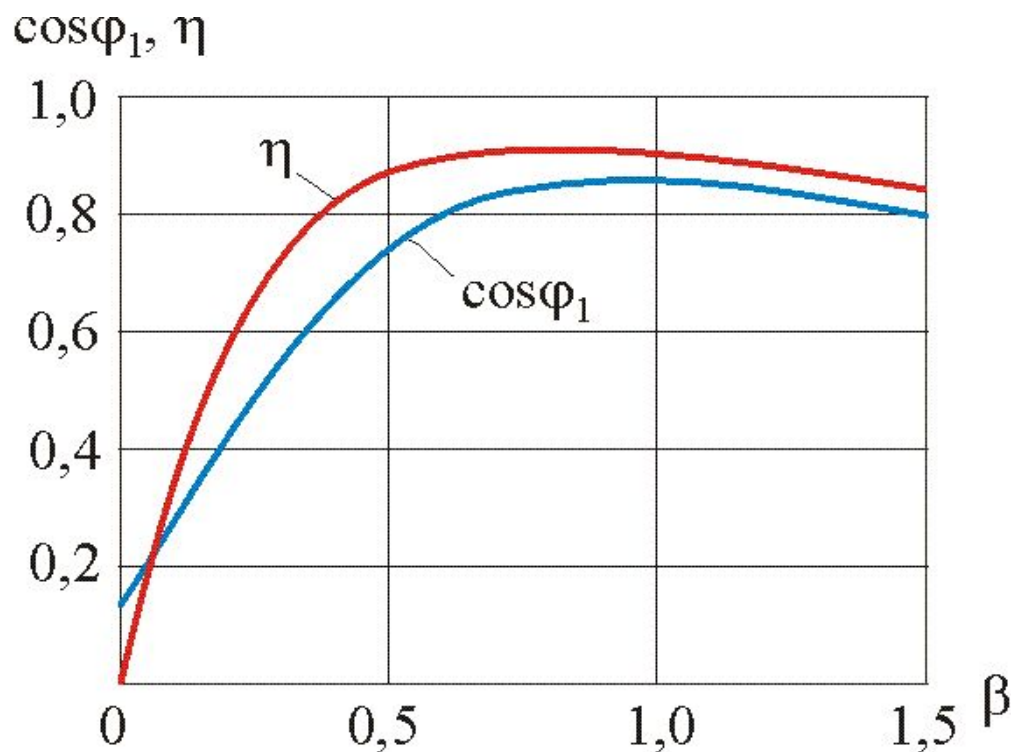
$$P_{\text{эм д}} = M_{\text{д}} \Omega_1 = P_{\text{мх д}} + \Delta P_{2\text{д}}; \quad P_{\text{мх д}} = M_{\text{д}} \Omega_{\text{д}}; \quad \Delta P_{2\text{д}} = s_{\text{д}} M_{\text{д}} \Omega_1$$

$$P_{\text{эм г}} = -M_{\text{г}} \Omega_1 = P_{\text{мх г}} + \Delta P_{2\text{г}}; \quad P_{\text{мх г}} = -M_{\text{г}} \Omega_{\text{г}}; \quad \Delta P_{2\text{г}} = s_{\text{г}} M_{\text{г}} \Omega_1 > 0$$

Диаграмма реактивной мощности



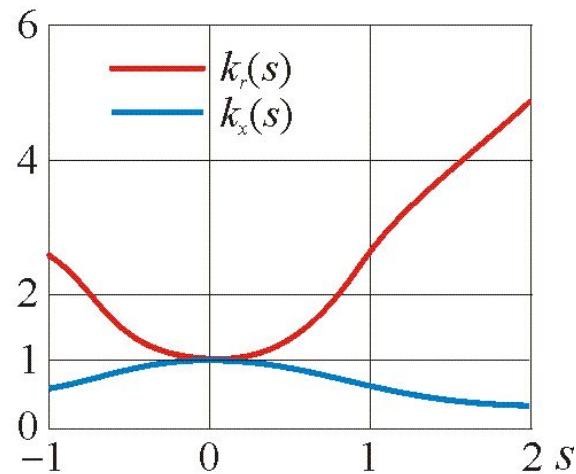
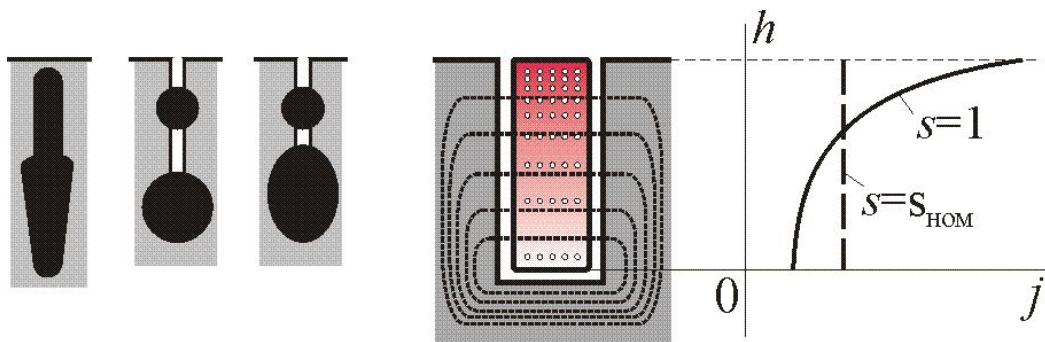
Зависимость КПД и коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки



$$\eta = \frac{\beta P_{\text{НОМ}}}{\beta P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{с}} + \beta^2 \Delta P_{\text{м}}} \Big|_{\Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{д}} \approx 0}$$

$$\beta = P_{\text{в}} / P_{\text{НОМ}}$$

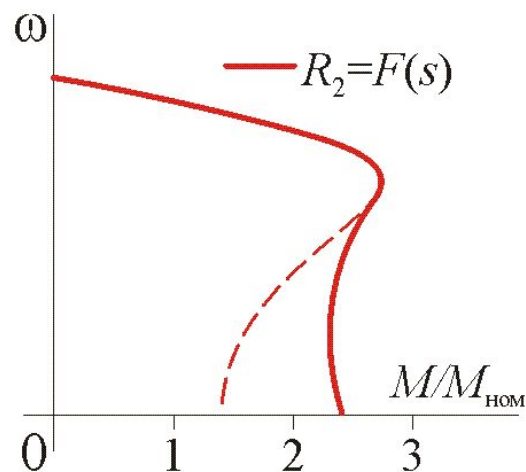
Влияние вытеснения тока на характеристики двигателя



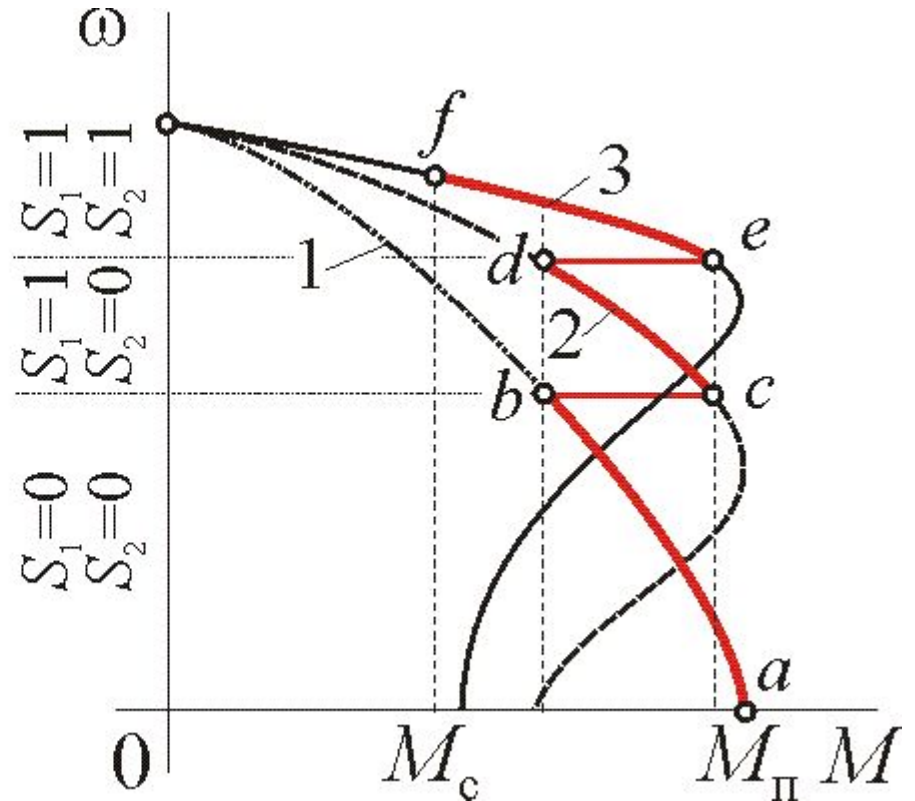
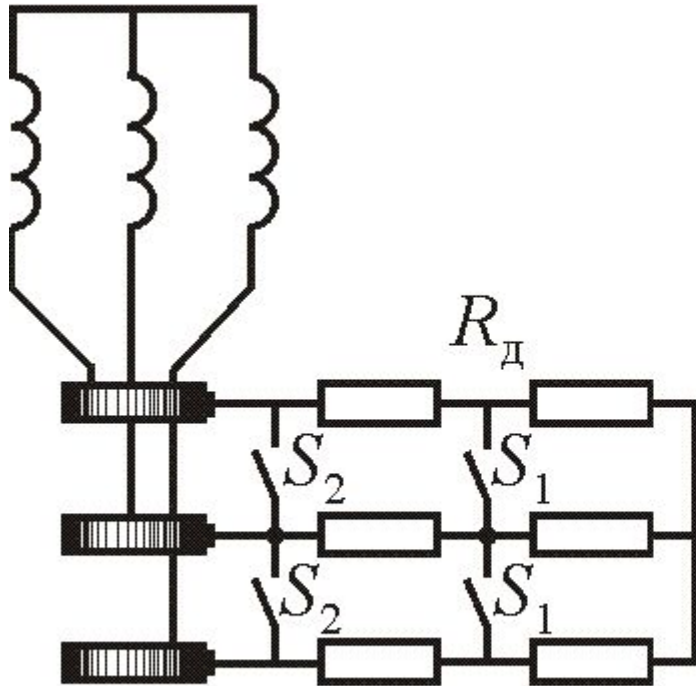
$$R_{\text{в}} = R_2 k_r + R_2 ; X_{2\text{п}} = X k_x + X$$

$$k_r = \xi \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi} ; k_x = \frac{3}{2\xi} \frac{\text{sh } 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}$$

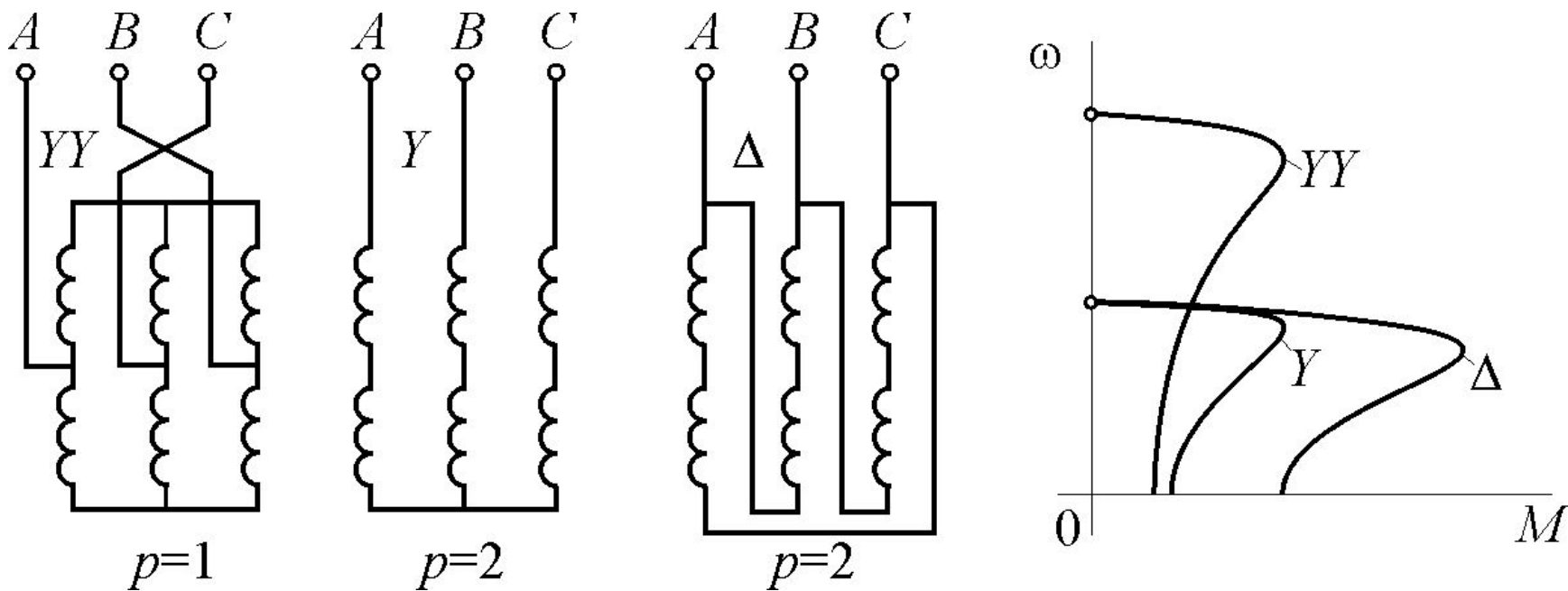
$$\xi \approx h / \sqrt{s}$$



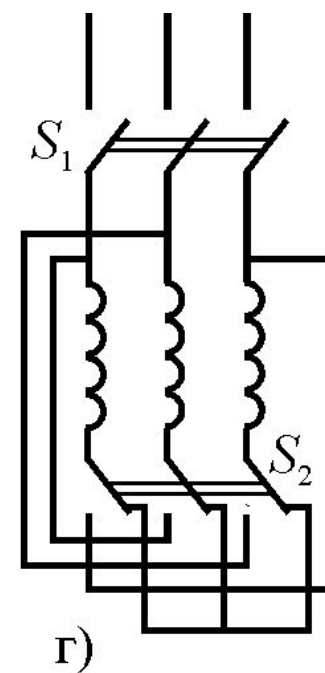
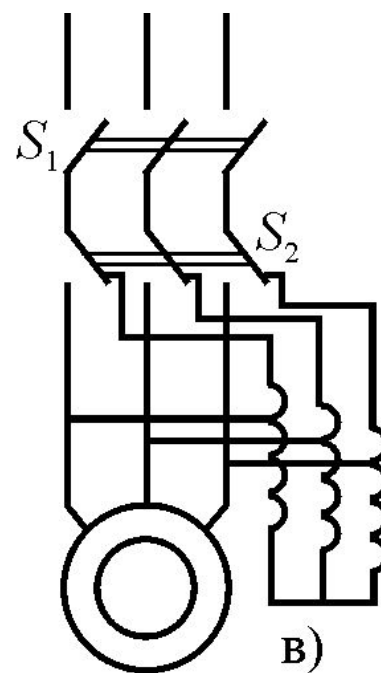
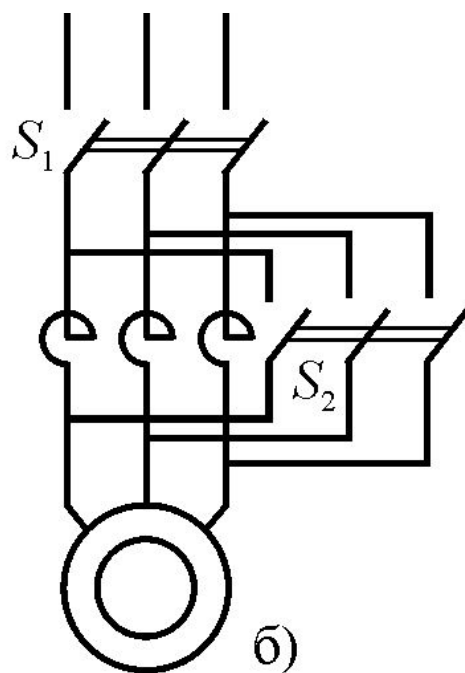
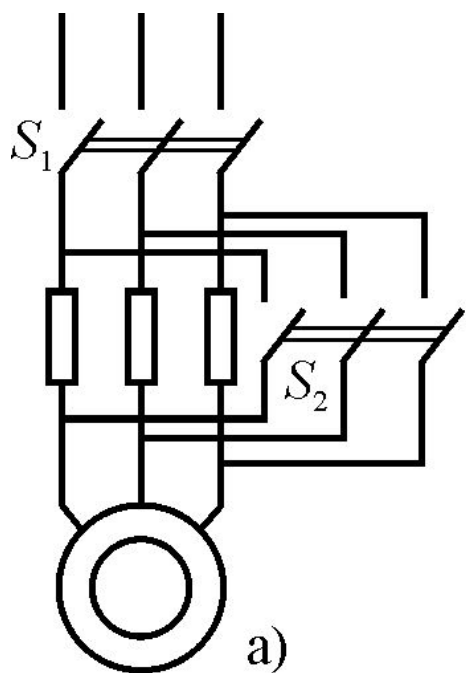
Реостатный пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

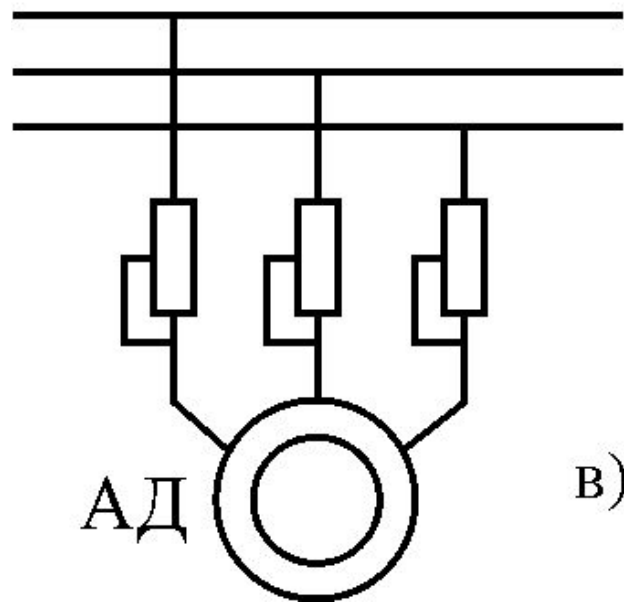
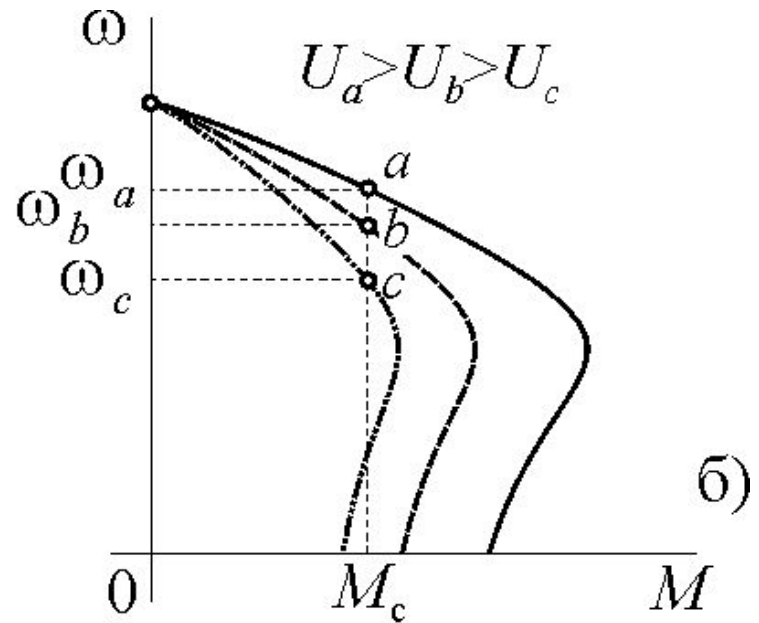
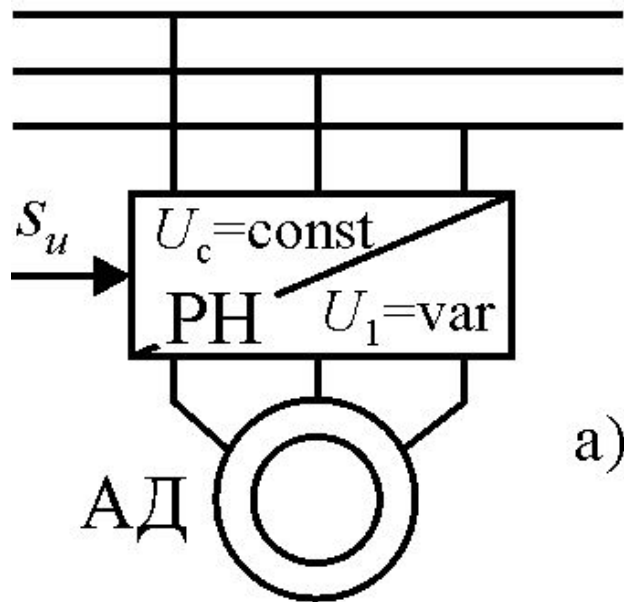


Изменение скорости вращения асинхронного двигателя переключением схемы соединения обмоток

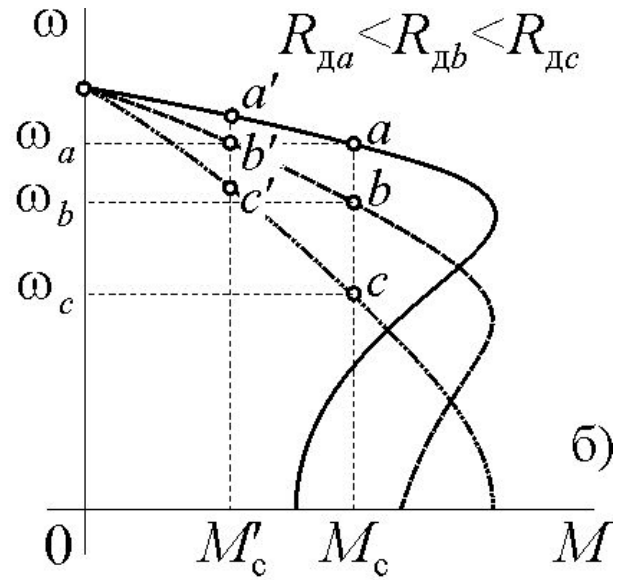
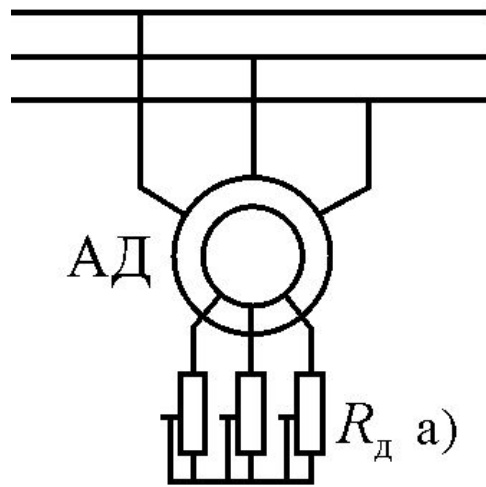


Схемы управления пуском АД

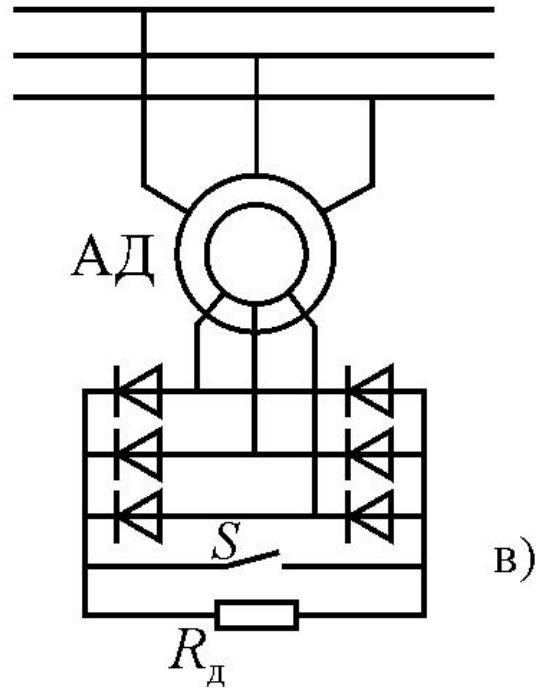




Регулирование скорости вращения изменением напряжения питания



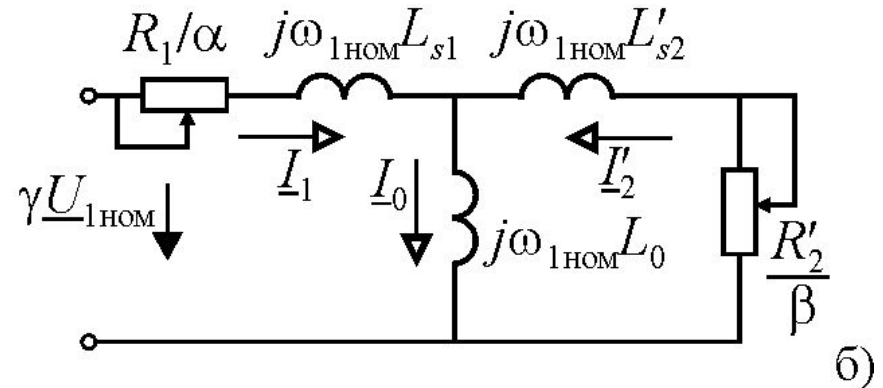
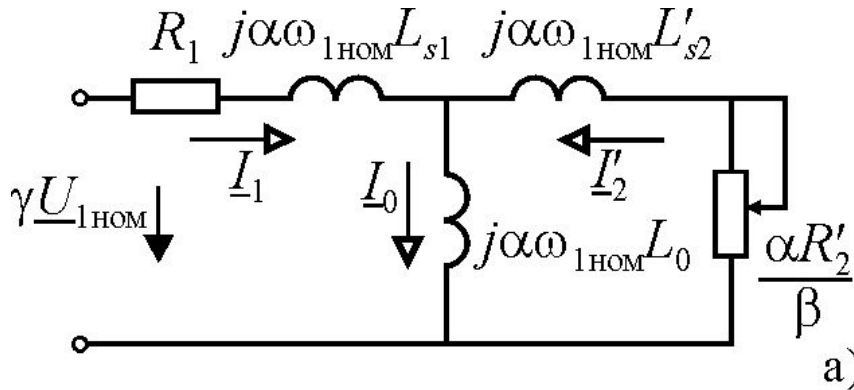
Регулирование скорости вращения изменением сопротивления цепи ротора



Частотное управление АД

$$\alpha = f_{\text{НОМ}}/f_1 \quad ; \quad \beta_2 = f_{1\text{НОМ}}/f \quad ; \quad \gamma_1 = U_{1\text{НОМ}}/U$$

$$\mu = M/M_{\text{НОМ}} \quad ; \quad s = f_2/f_1 = \beta/\alpha$$



Закон М.П.Костенко

$$M_{\text{max}} \approx c_m \left(\frac{U_1}{f_{\text{НОМ}}} \right)^2 \approx c'_m \Phi_{0\text{НОМ}}^2; \quad \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_m} = \left(\frac{\Phi_{0m}}{\Phi_m} \right)^2 = \text{const}$$

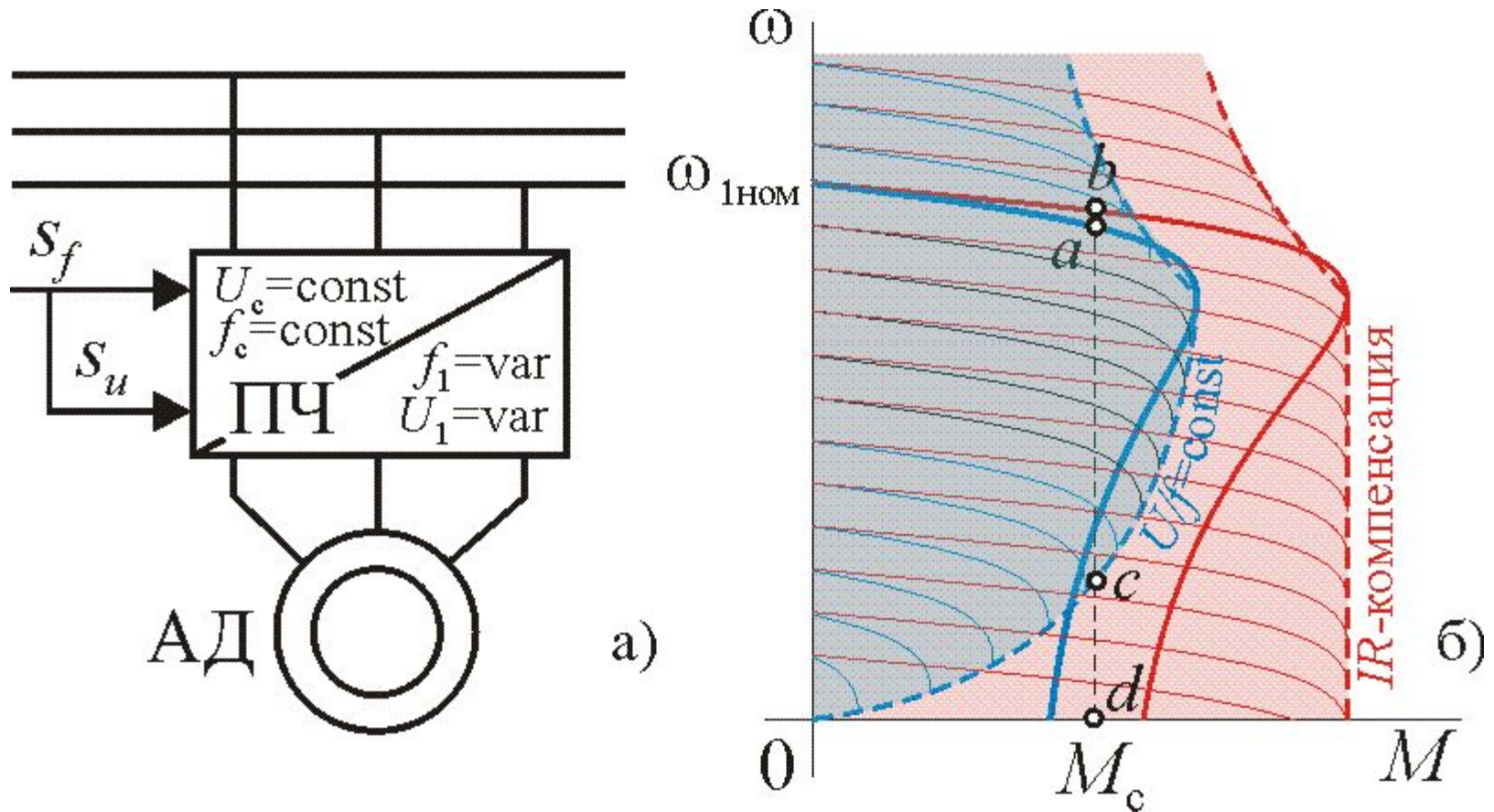
$$\frac{U_1}{U_{\text{НОМ}}} \approx c_u \frac{f_1 \Phi_{0m}}{f_{\text{НОМ}} \Phi_{\text{НОМ}}}; \quad \frac{U_1}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{M_1}{M_{1\text{НОМ}}}}; \quad \boxed{\gamma = \alpha \sqrt{\mu}}$$

$$M_{\text{H}} = \text{const} \Rightarrow \gamma = \alpha \Leftrightarrow U_1/f_1 = \text{const}$$

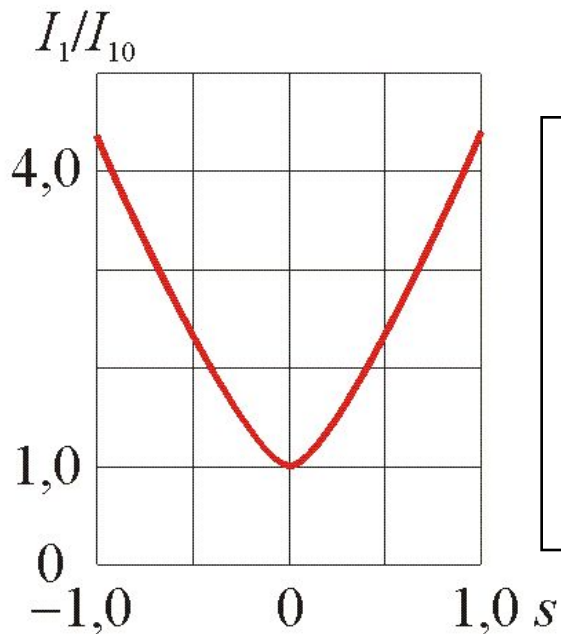
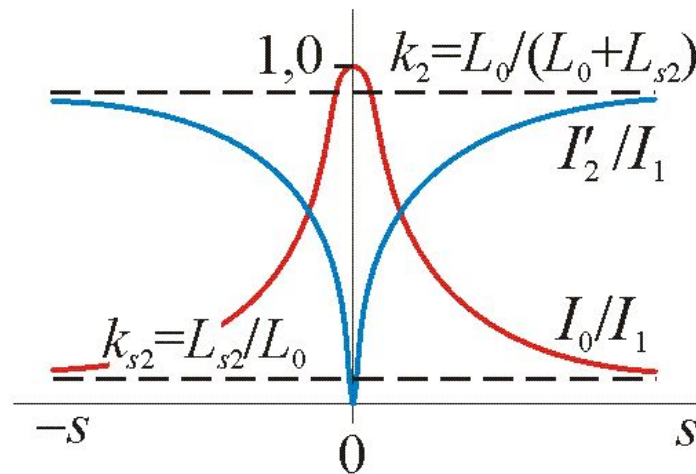
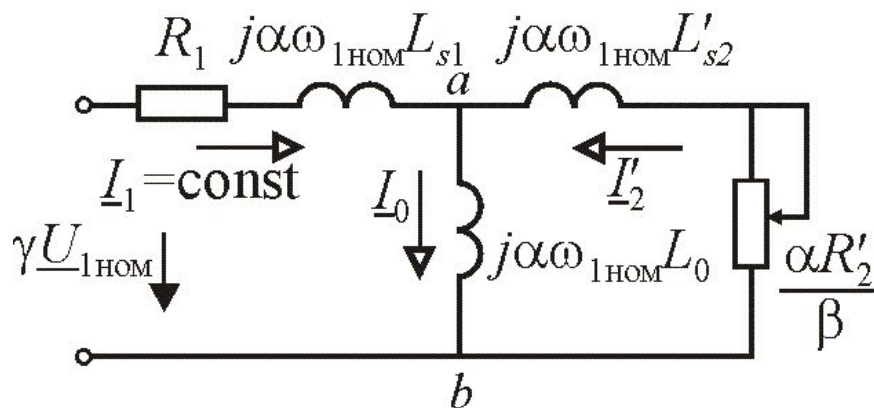
$$P_{\text{H}} \approx c_p M_{\text{H}} f_1 \Rightarrow \gamma = \sqrt{\alpha}$$

$$M_{\text{H}} \approx c_w f_1^n \Rightarrow \gamma = \alpha^{1+n/2} \Rightarrow \gamma = \alpha^2 \Big|_{n=2}$$

Регулирование скорости вращения изменением частоты питания (частотное регулирование)



Электромеханические характеристики АД при питании от источника тока

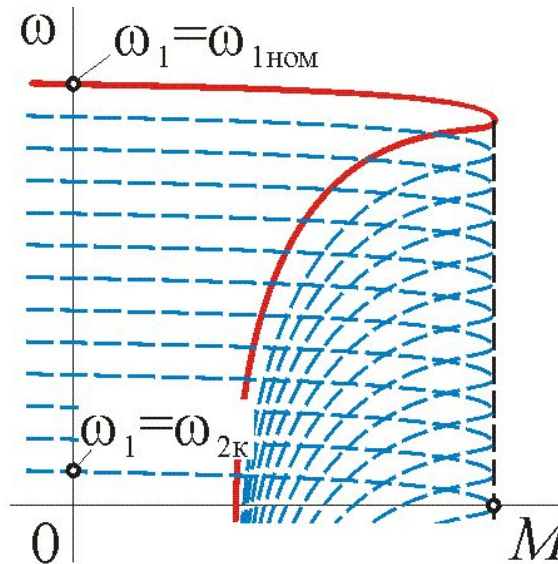
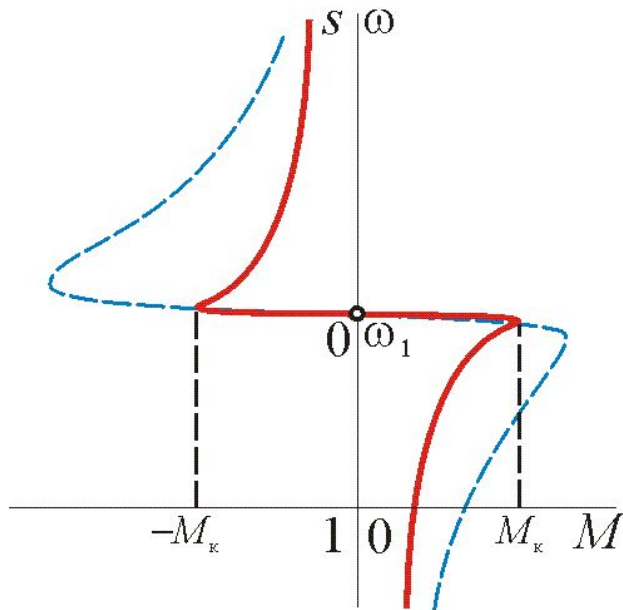


$$z_{ab} = X_0 \sqrt{\frac{1 + (s\omega_1 L'_{s2} / R'_2)^2}{1 + (s\omega_1 L_2 / R'_2)^2}} = X_0 \zeta_{ab}; \quad L_2 = L'_{s2} + L_0$$

$$I_0 = U_{ab} / X_0 = I_1 X_0 \zeta_{ab} / X_0 = I_1 \zeta_{ab} = \text{const} = I_{10} \Big|_{I_1=I_1(s)=I_{10} / \zeta_{ab}}$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{\sqrt{(R'_2 / s)^2 + (s\omega_1 L'_{s2})^2}} = I_1 \frac{s\omega_1 L_0}{R'_2 \sqrt{1 + (s\omega_1 L_2 / R'_2)^2}}$$

Механические характеристики АД при питании от источника тока



$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

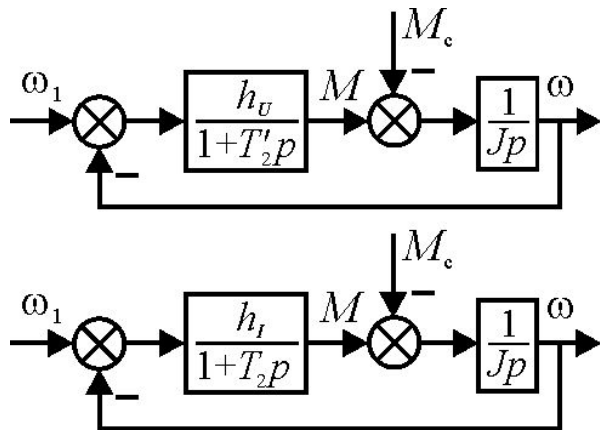
$$M_{\max} = \frac{m_1 p L_0^2}{2 L_2} I_1^2$$

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{X'_{s2} + X_0}$$

$$\frac{M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}I}} = \frac{U_1^2}{I_{1\text{НОМ}}^2} \frac{L'_{s2} + L_0}{\omega_1^2 L_2^2 (L_s + L'_s)} = 3 \dots 1$$

$$\frac{s_{kU}}{s_{kI}} = \frac{X'_{s2} + X_0}{\sqrt{R_1^2 + (X_{s1} + X'_{s2})^2}} = 3 \dots 20$$

Линеаризованные динамические МХ АД



$$M_U(p) = \frac{2M_{\max U}}{(1+T_2'p) \left[\frac{s_{kU}}{\beta} (1+T_2'p) \right] + \frac{\beta}{s_{kU}}} \Rightarrow M_U(p) = \frac{h_U}{1+T_2'p} (\omega_1 - \omega)$$

$$M_{\max U} = \frac{3z_p k_1^2 k_2}{2 \sigma L_0} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \approx \frac{3z_p}{2(L_{s1} + L'_{s2})} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2; s_U = \frac{R'_2}{X_{s1} + X'_{s2}}$$

$$T_2' = \sigma T_2 = \frac{(1 - k_1 k_2) L_2}{R'_{\text{ном} 2}} = \frac{k_1 L_{s1} + L'_{s2}}{R'_k} \approx \frac{X_{s1} + X'_{s2}}{\omega_1 R'} = \frac{1}{\omega s_U}$$

$$h_U = \frac{2M_{\max U}}{\omega_{\text{ном}} s_U} \approx 2M_{\max U} T_2'$$

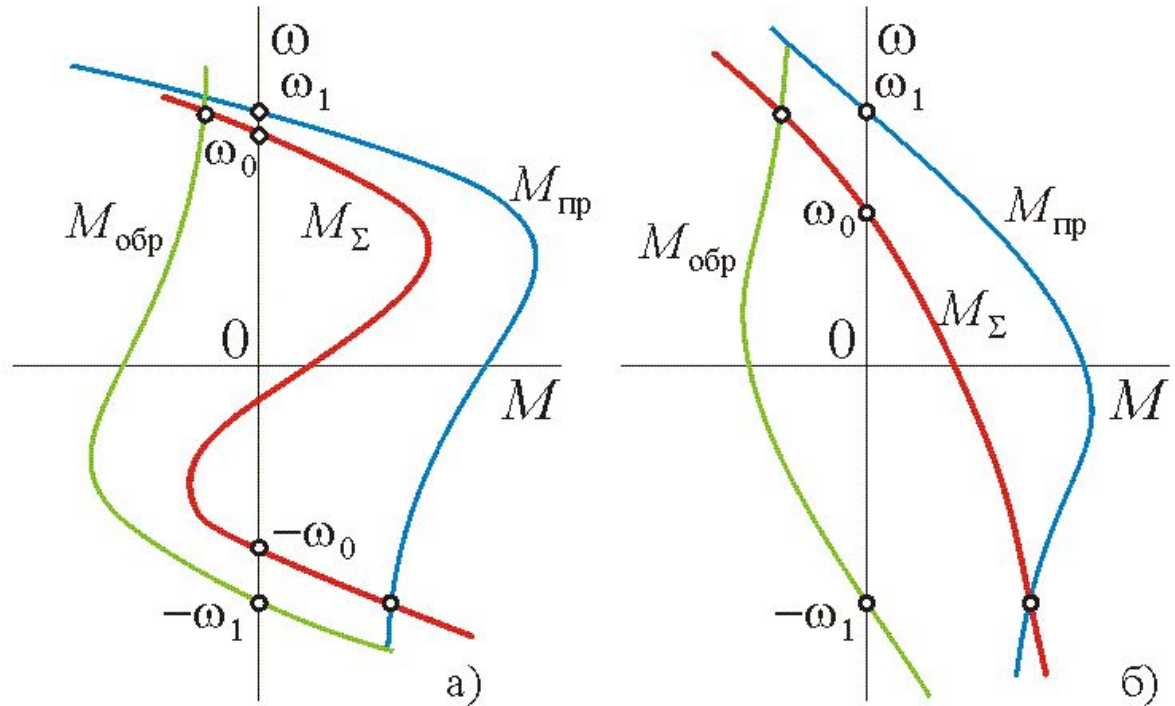
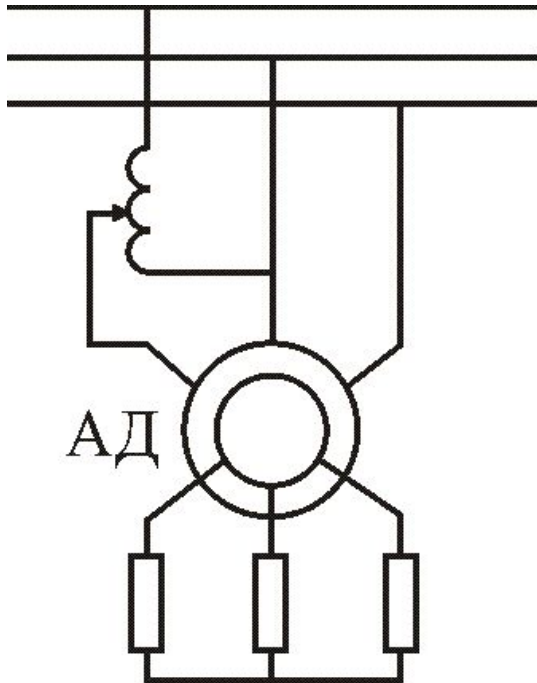
$$k_{\text{ном}} = L_{s2} / L_0; k_1 = L'_{s2} / L_0; \sigma = 1 - k_1 k_2; \beta = \omega_2 / \omega_1; L = L'_s + L$$

$$M_I(p) = \frac{2M_{\max I}}{(1+T_2 p) \left[\frac{s_{kI}}{\beta} (1+T_2 p) \right] + \frac{\beta}{s_{kI}}} \Rightarrow M_I(p) = \frac{h_I}{1+T_2 p} (\omega_1 - \omega)$$

$$M_{\max I} = \frac{3z_p L_0^2}{2 L_2} I_1^2; s_I = \frac{R'_2}{\omega_{\text{ном}} L_2}; T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$$

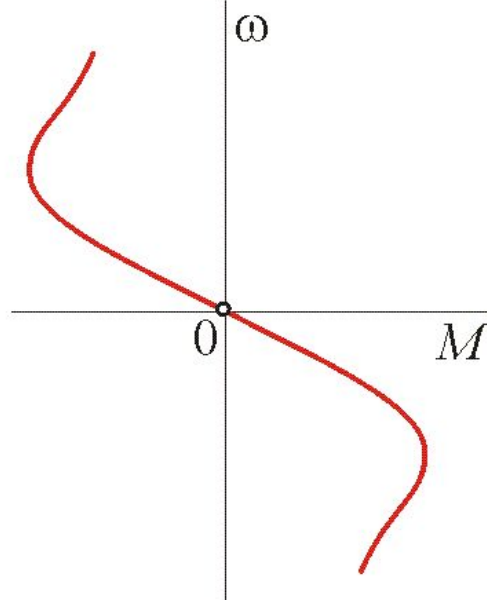
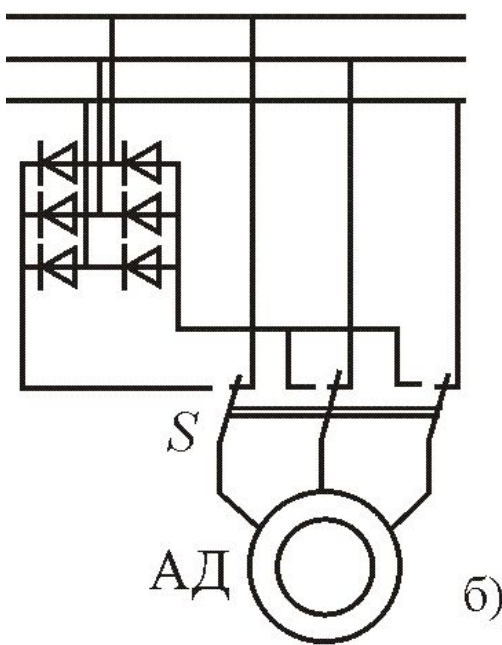
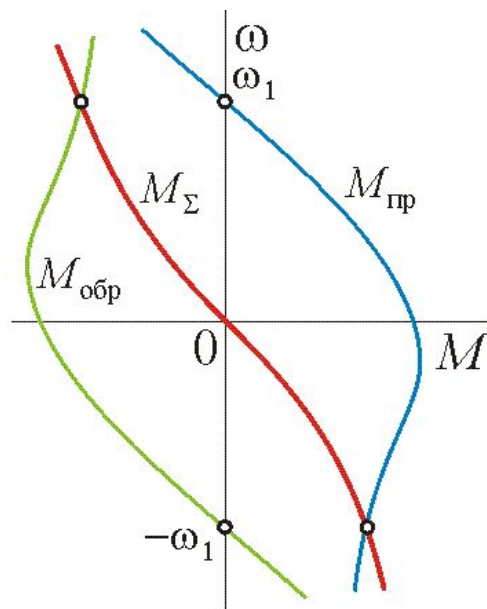
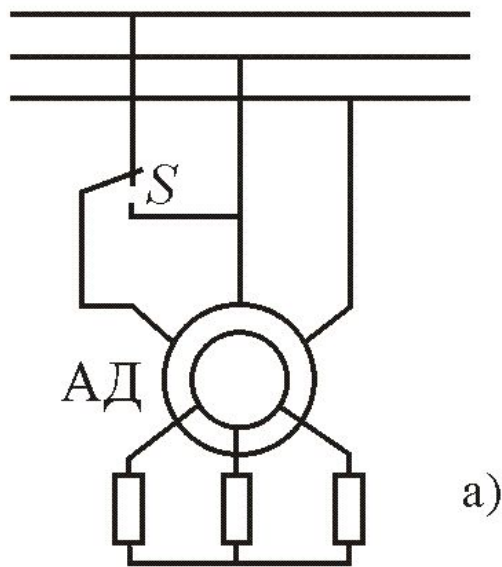
$$h_I = \frac{2M_{\max I}}{\omega_{\text{ном}} s_I} \approx 2M_{\max I} T_2; \frac{h_I}{h_U} = \frac{M_{\max I} T_2}{M_{\max U} T_2'} = \frac{M_{\max I}}{\sigma M_{\max U}} = 1 \dots 20$$

Механические характеристики АД при несимметричном управлении



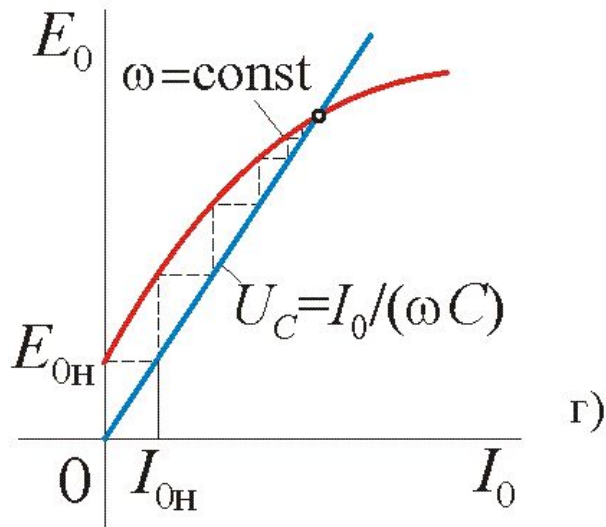
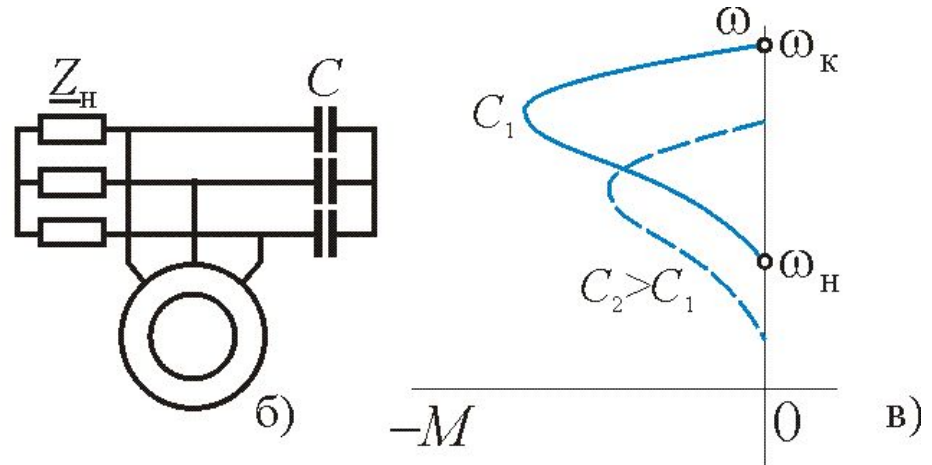
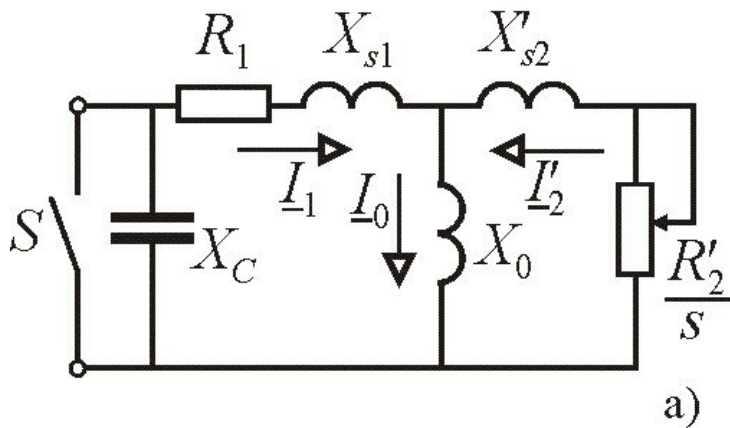
$$M_{\Sigma} = \frac{2M_{\text{max}} (1 + as_{\text{кр}})}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2as_{\text{кр}}} - \frac{2M_{\text{maxобр}} (1 + as_{\text{кр}})}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s} + 2as_{\text{кр}}}$$

$$M_{\text{max}} = M_{\text{max пр}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2; \quad M_{\text{maxобр}} = M_{\text{max обр}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2$$



Торможение при
однофазном
включении (а) и
динамическое
торможение (б)

Магнитное и конденсаторное торможение



$$I_H X_0 \alpha_0 = I \sqrt{R^2 + (X_s \alpha - X_C / \alpha)^2}$$

$$\alpha = \omega_{\text{НОМ}} / \omega_1$$

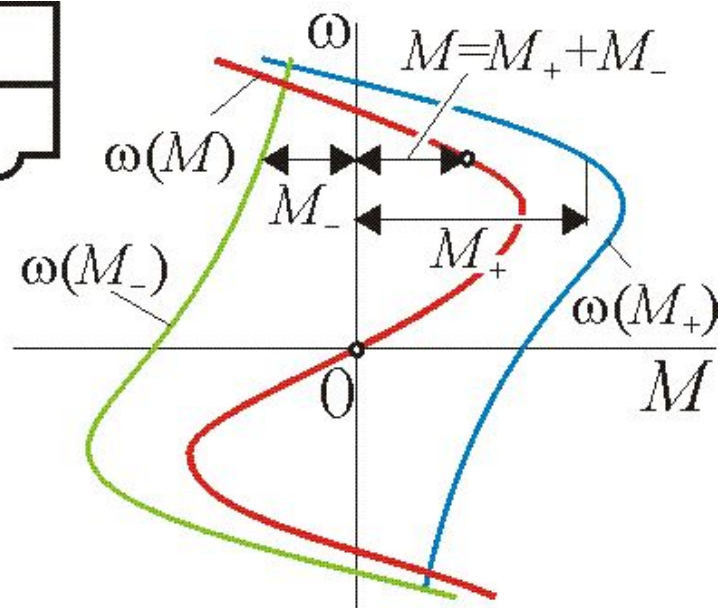
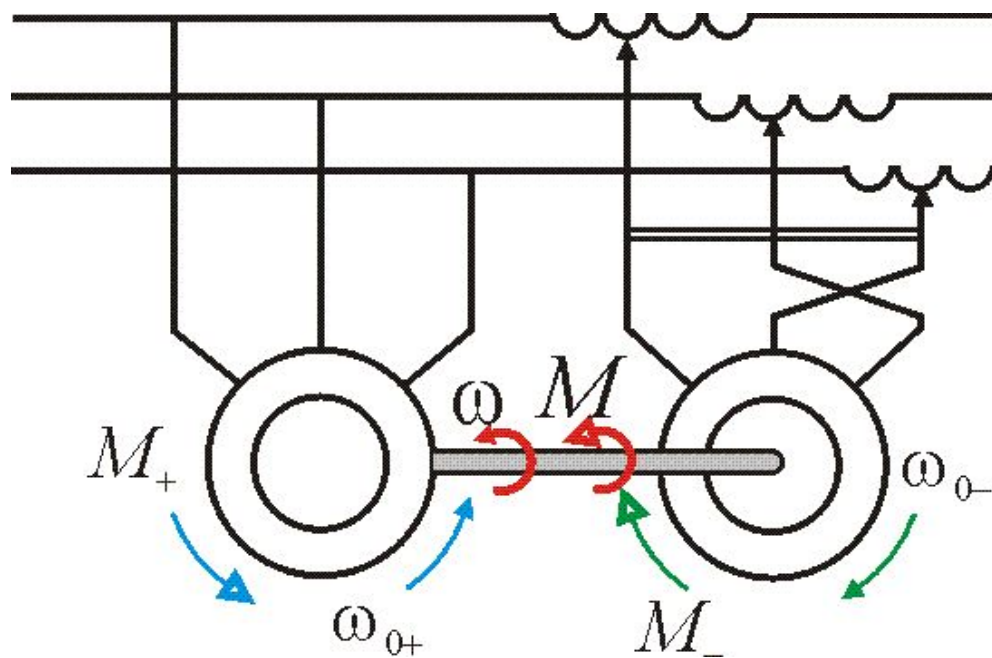
$$\omega_H \approx 1 / \sqrt{CL_0} \Big|_{R_1 \approx 0; X_{s1} \approx 0}$$

$$I_k (X_{s1} \alpha - X_C / \alpha)_2 + I'_k X'_s \alpha = 0 \Big|_{I_0=0}$$

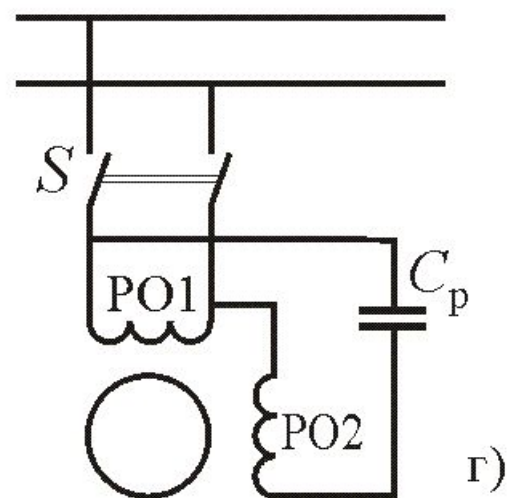
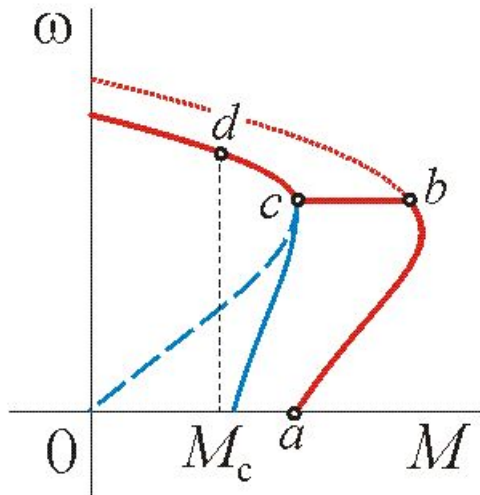
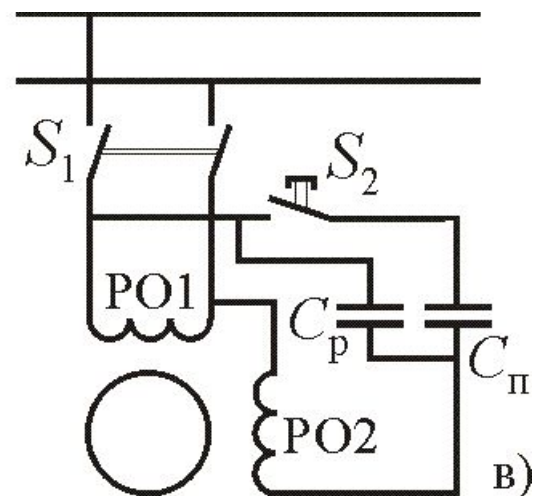
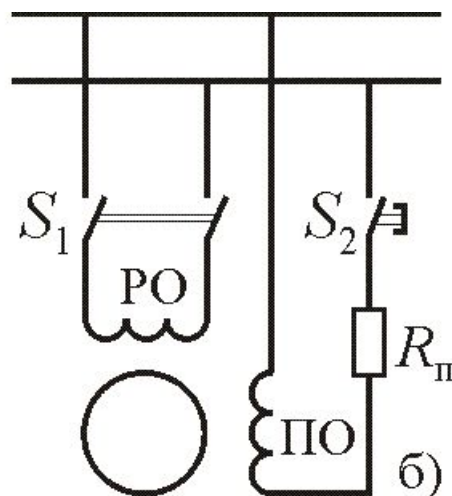
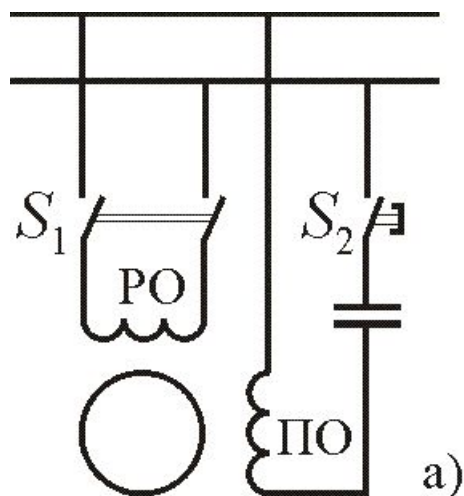
$$\alpha_k \approx \sqrt{X_C / (X_{s1} + X'_{s2})} \Big|_{I_1 \approx I'_2}$$

$$\omega_K = \alpha_K \omega_{\text{НОМ}} (1 + R'_2 / R_1)$$

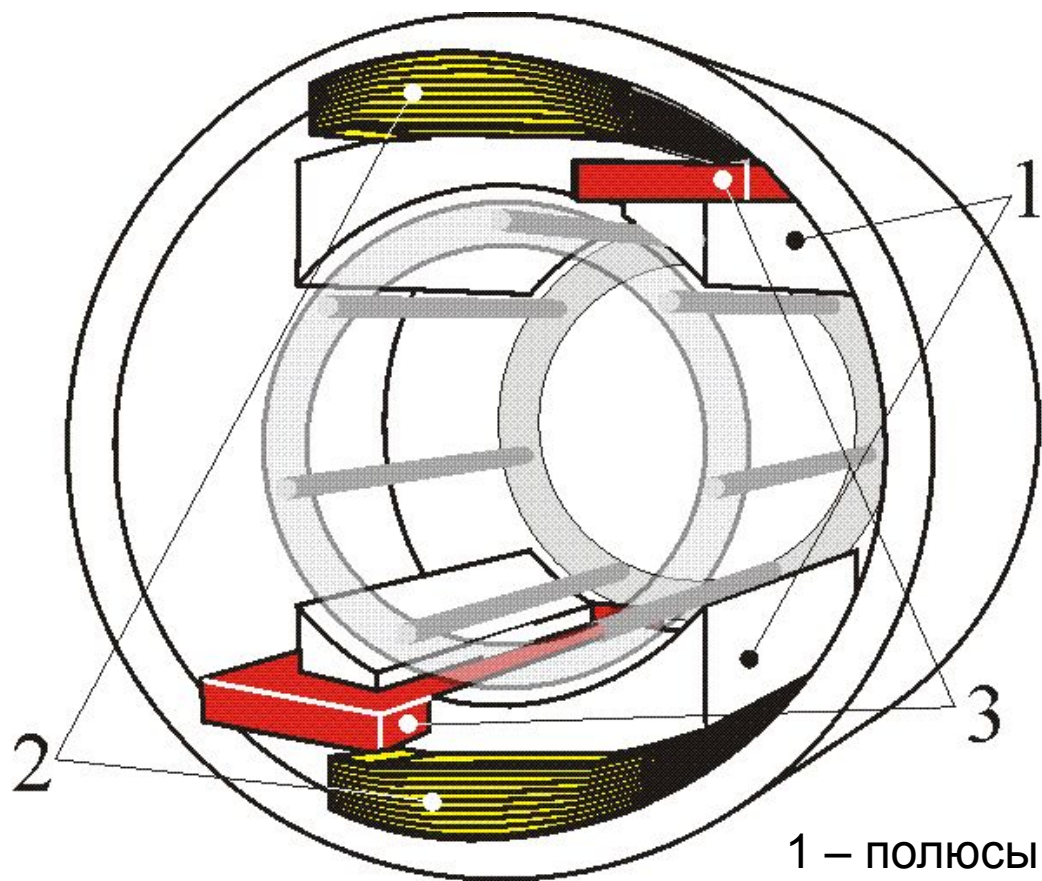
Физическая модель и механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя



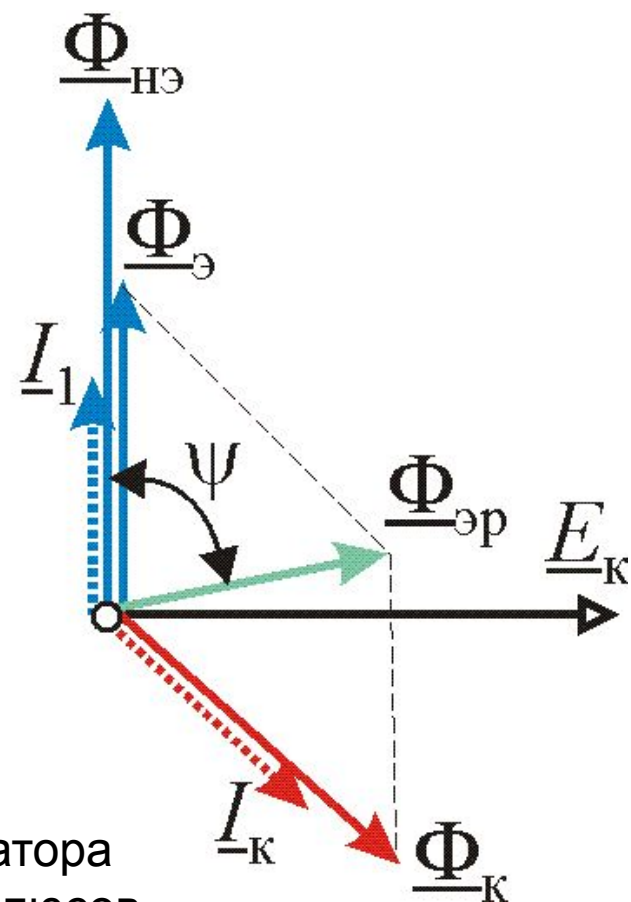
Пуск однофазных асинхронных двигателей



Конструктивная схема однофазного асинхронного двигателя с экранированными (расщеплёнными) полюсами

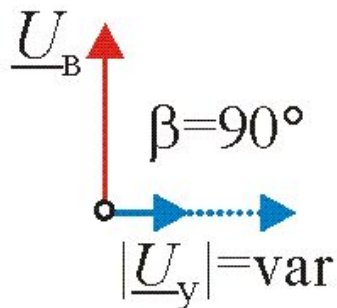
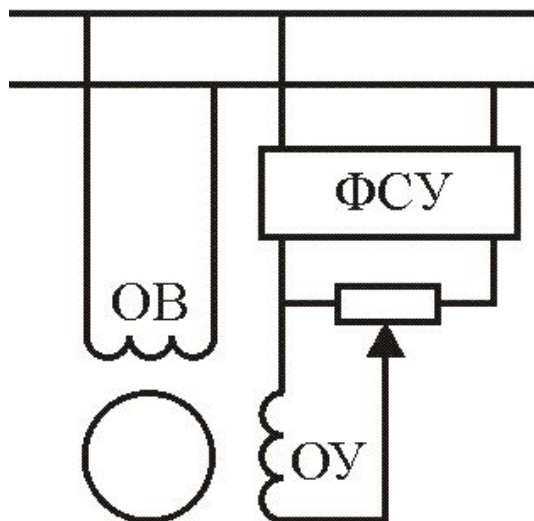


- 1 – полюсы статора
- 2 – обмотка полюсов
- 3 – короткозамкнутые витки

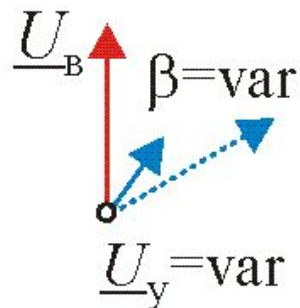
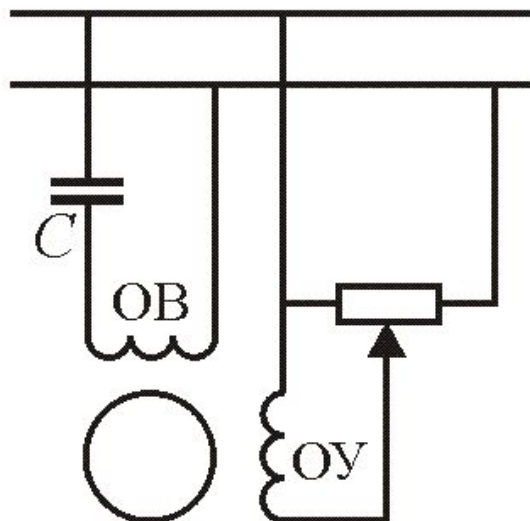


Способы управления двухфазным асинхронным исполнительным двигателем

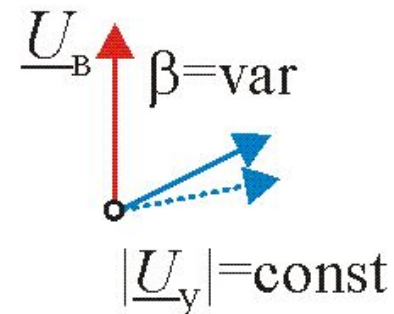
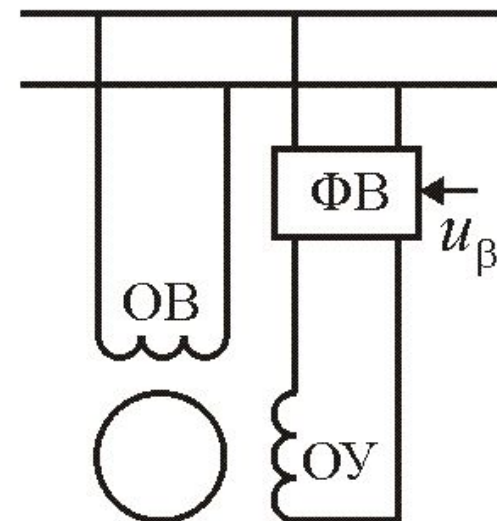
амплитудное



амплитудно-фазовое

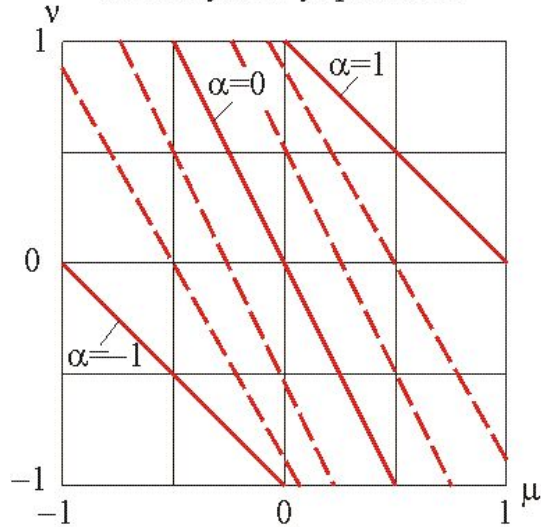


фазовое

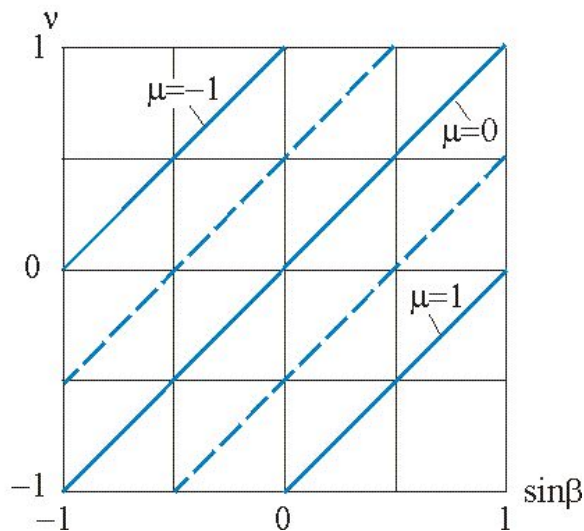
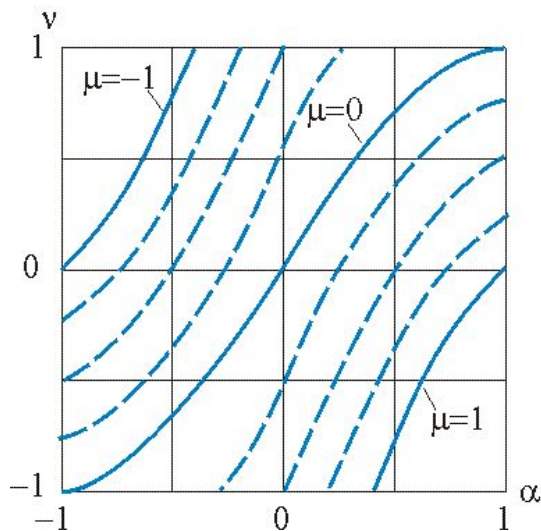
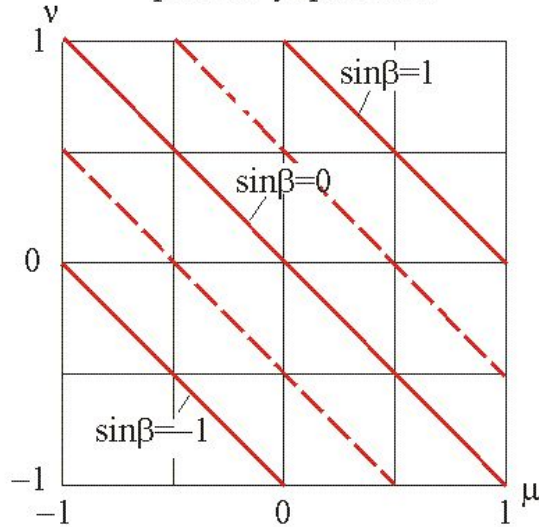


Механические и регулировочные характеристики идеального ДИД

амплитудное управление



фазовое управление



$$v = \frac{2}{1 + \alpha_s^2} (\alpha_s \sin \beta - \mu)$$

$$\mu = \alpha_s \sin \beta - \frac{1 + \alpha_s^2}{2} v$$

$$v = \omega / \omega_{\text{н}} ; \mu = M / M_{\text{нк}}$$

$$\alpha_s = \frac{U_y}{U'_B} = \frac{U_y w_B}{U_B w_y} ; \beta = \psi_{U_B} - \psi_{U_y}$$

$$v = \frac{2(\alpha_s - \mu)}{1 + \alpha_s^2} ; \mu = \alpha_s - \frac{1 + \alpha_s^2}{2} v$$

$$v_{\text{н}} = \frac{2\alpha_s}{1 + \alpha_s^2} ; \mu = \alpha$$

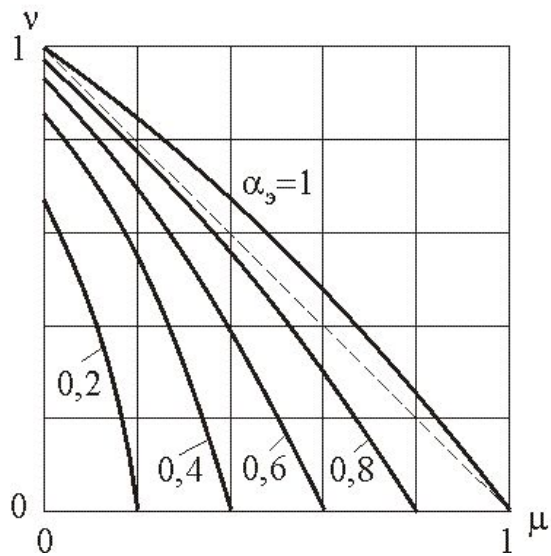
$$-0,5 \geq \eta = -\frac{1 + \alpha_s^2}{2} \geq -1$$

$$v = \sin \beta - \mu ; \mu = \sin \beta - v$$

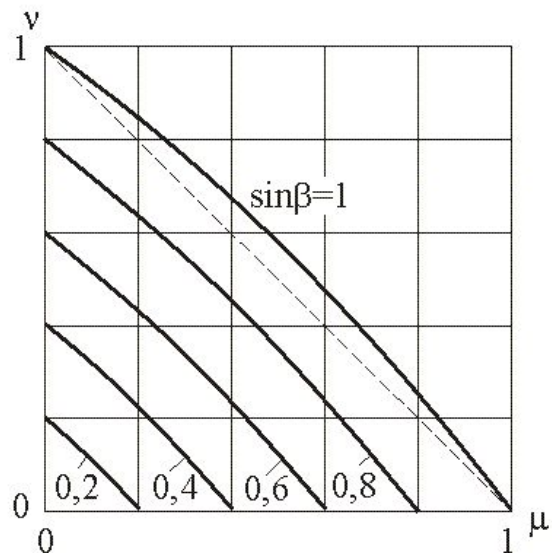
$$v_0 = \sin \beta ; \mu_{\text{н}} = \sin \beta ; \eta = -1$$

Механические характеристики реального ДИД

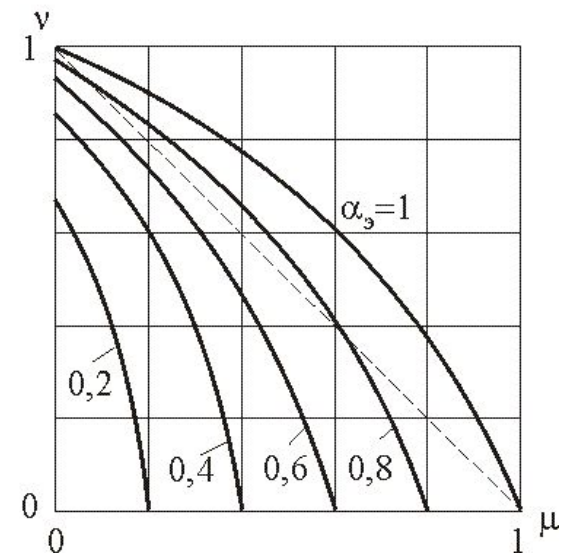
амплитудное управление



фазовое управление



амплитудно-фазовое управление



Торможение и реверсирование АД

