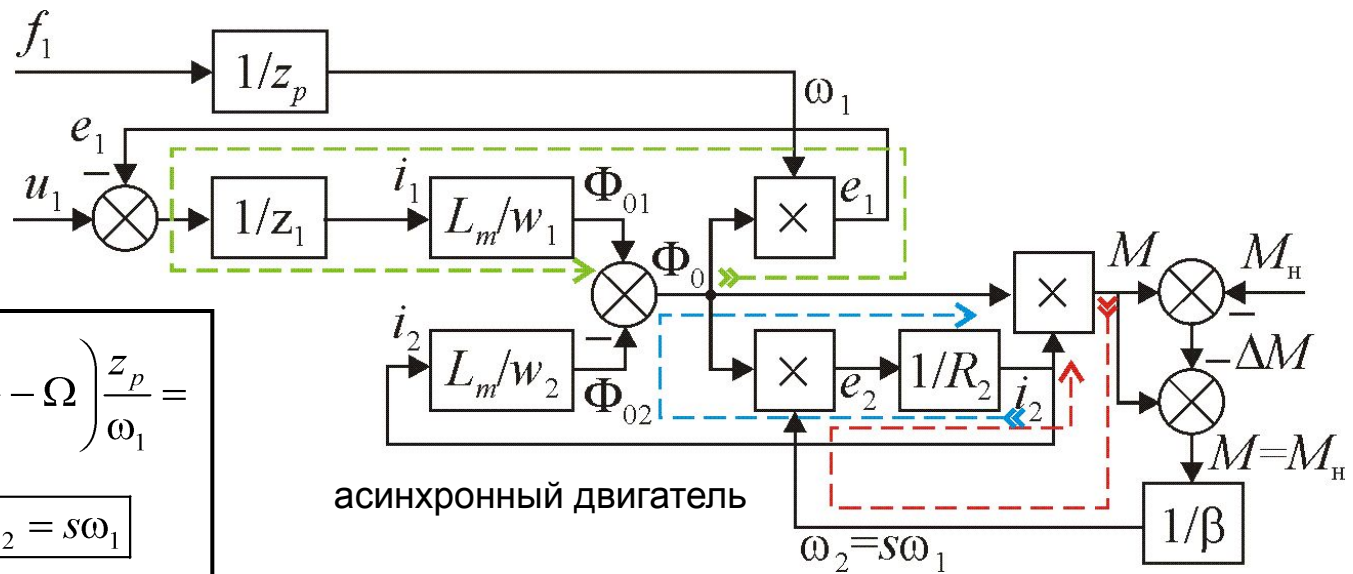
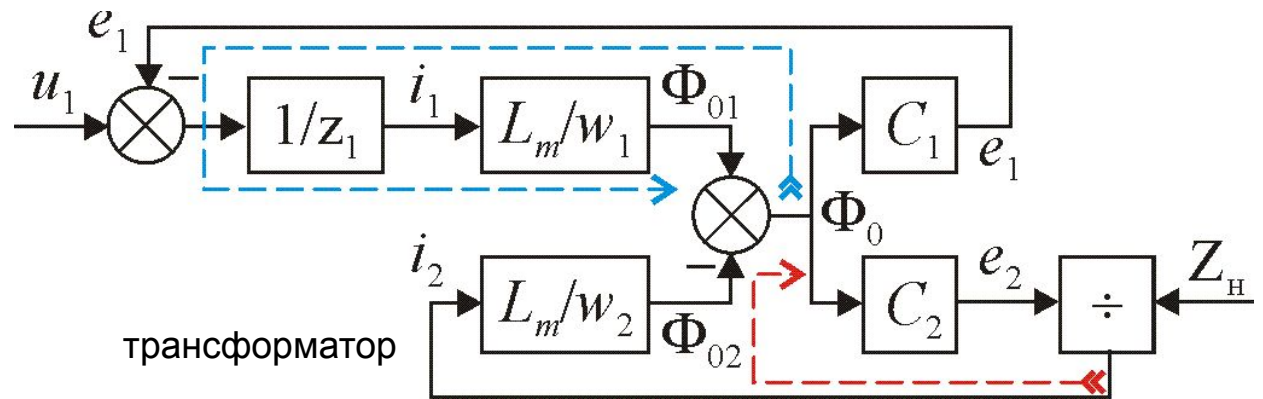
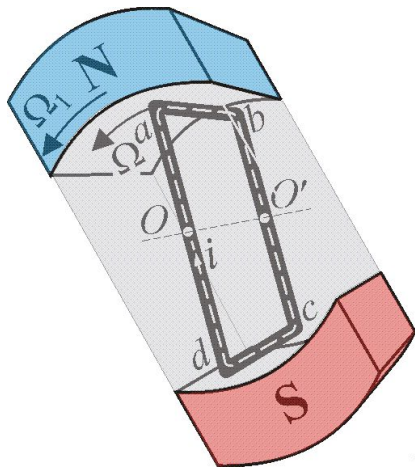


# Принцип действия асинхронного двигателя

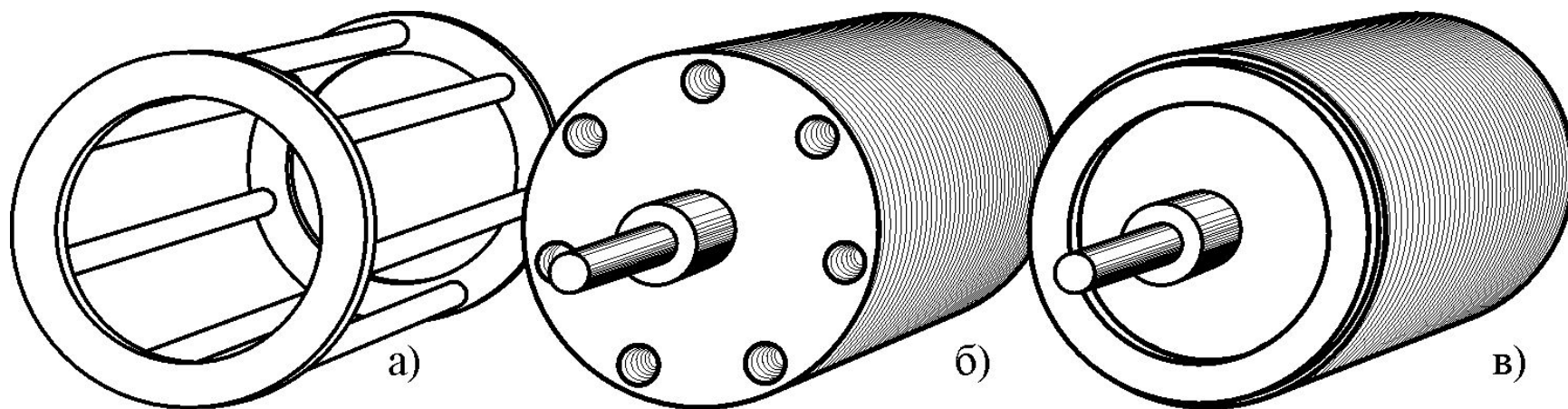


$$s = (\Omega_1 - \Omega) / \Omega_1 = \left( \frac{\omega_1}{p} - \Omega \right) \frac{z_p}{\omega_1} =$$

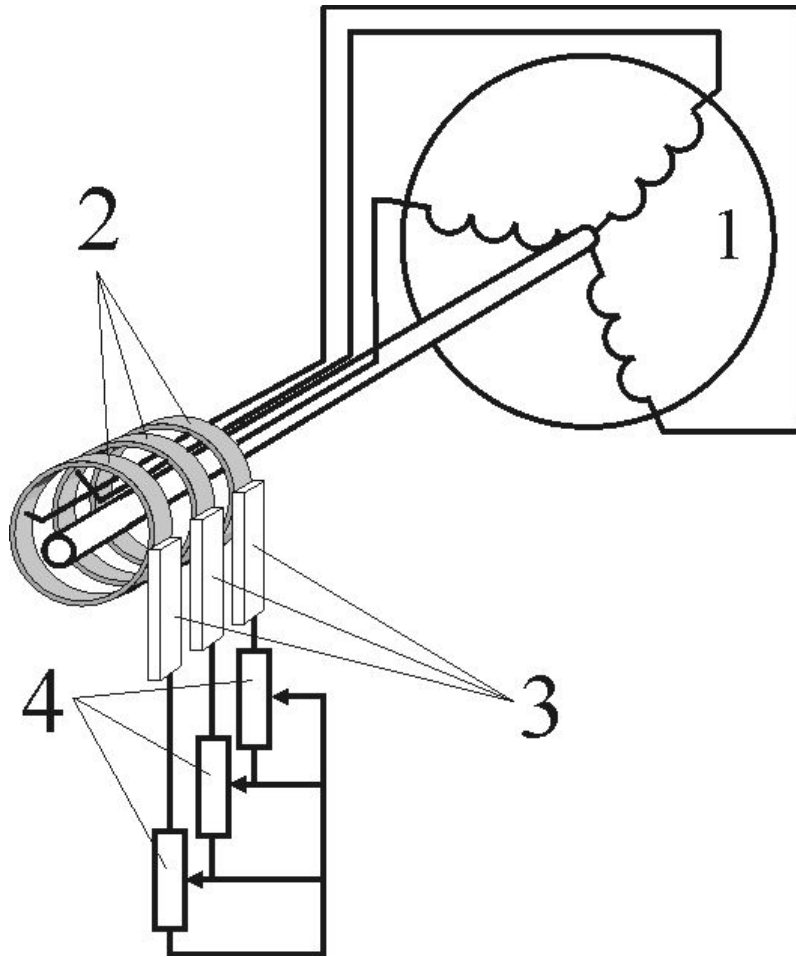
$$= \frac{\omega_1 - \Omega z_p}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad \boxed{\omega_2 = s\omega_1}$$

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

# Конструкция короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя типа «беличья клетка»

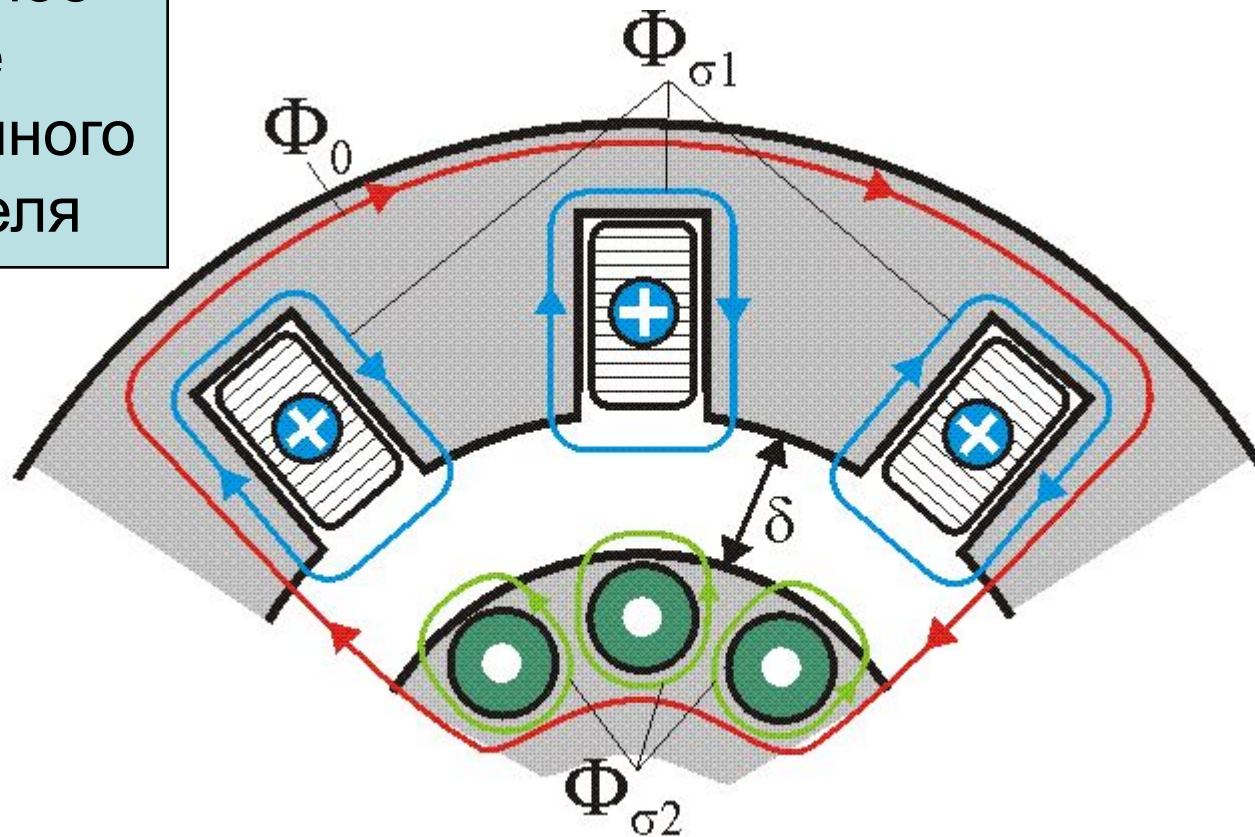


# Конструктивная схема фазного ротора асинхронного двигателя



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

Магнитное поле асинхронного двигателя

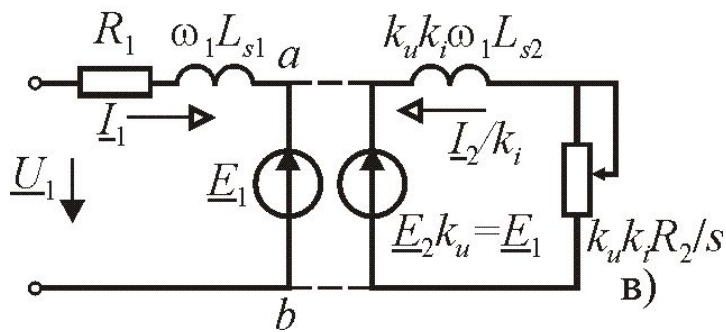
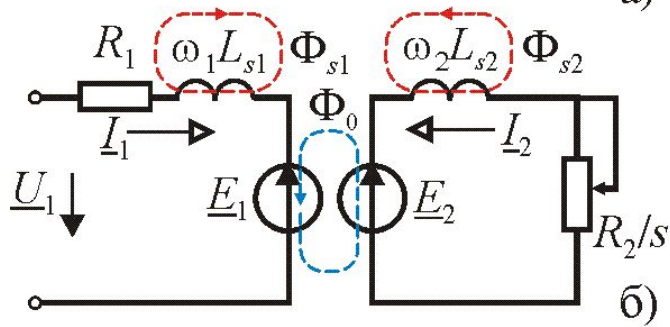
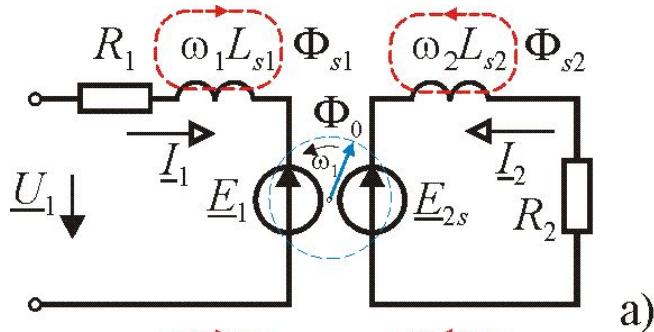


$$\Phi_{\theta} \approx \text{const} \Rightarrow F = m_1 w_1 i + m w i \approx \text{const}$$

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

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

# Схема замещения асинхронного двигателя



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

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

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

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

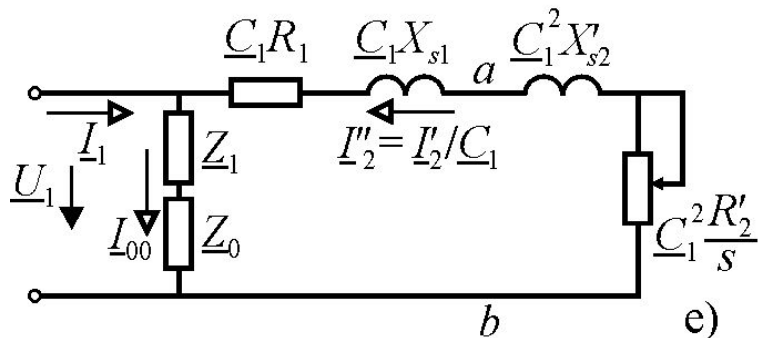
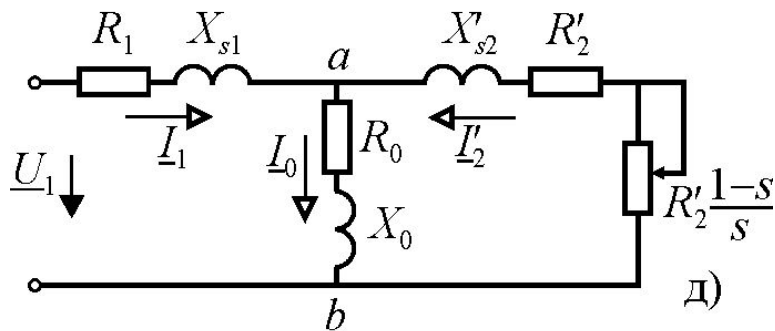
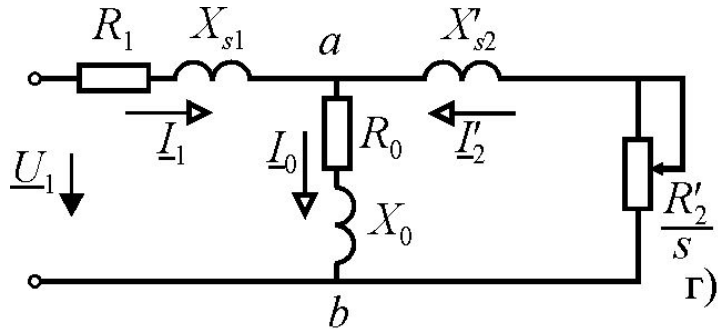
$$B) \begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + jX_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ \underline{E}'_2 = \underline{E}_2 k_u = \underline{E}_1 = \underline{I}'_2 R'_2 / s + jX'_{s2} \underline{I}'_2 \end{cases}$$

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

$$k_u = \frac{E_{\text{об1}}}{E_{\text{об2}}} = \frac{k_1 w_1}{k_2 w_2}; \quad k_i = \frac{I_{\text{об1}}}{I_{\text{об2}}} = \frac{m_1 k_1 w_1}{m_2 k_2 w_2}$$



## Схема замещения асинхронного двигателя



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

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

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

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

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

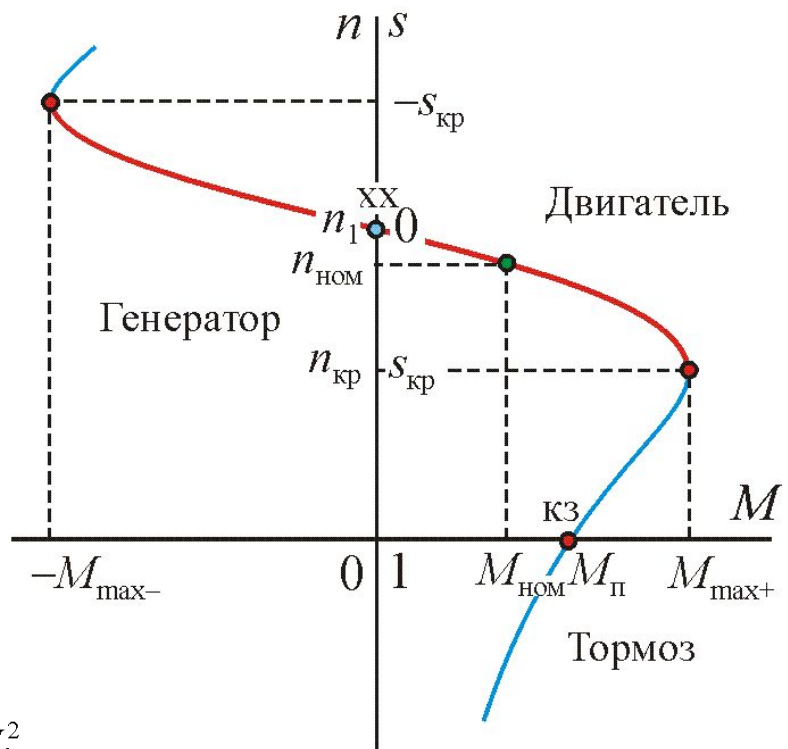
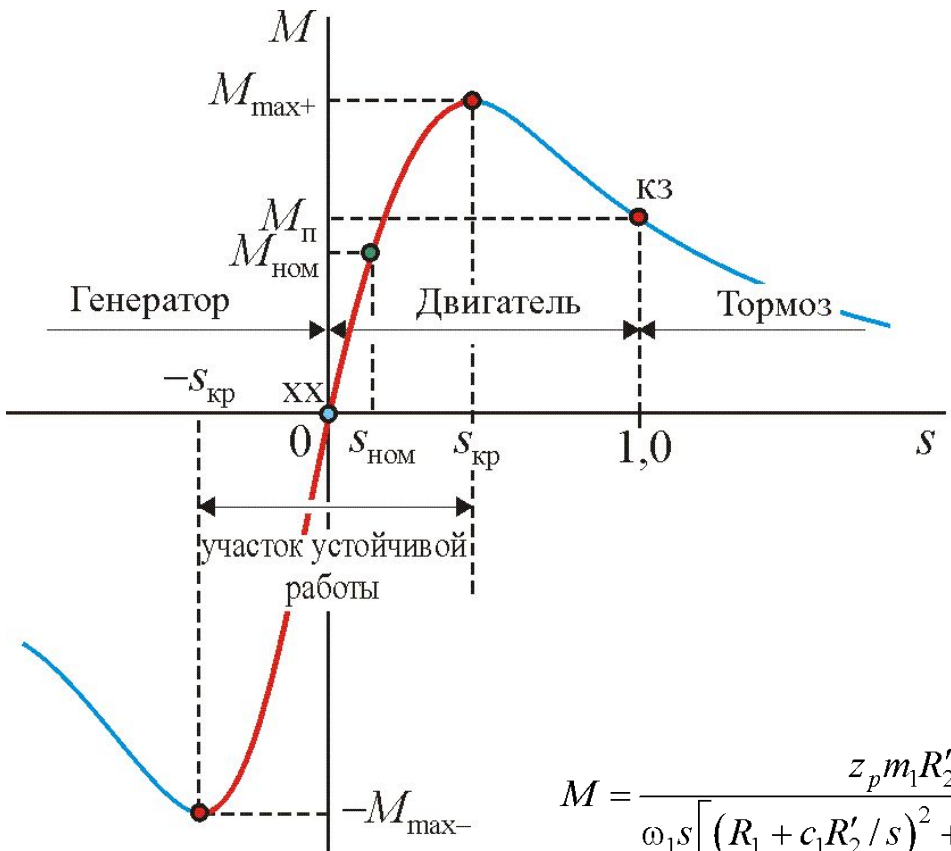
$$= m_1 (I'_2)^2 R'_2 \Omega / (\Omega_1 s) = m_1 (I'_2)^2 R'_2 \Omega z_p / (\omega_1 s)$$

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

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

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

# Механическая характеристика асинхронного двигателя

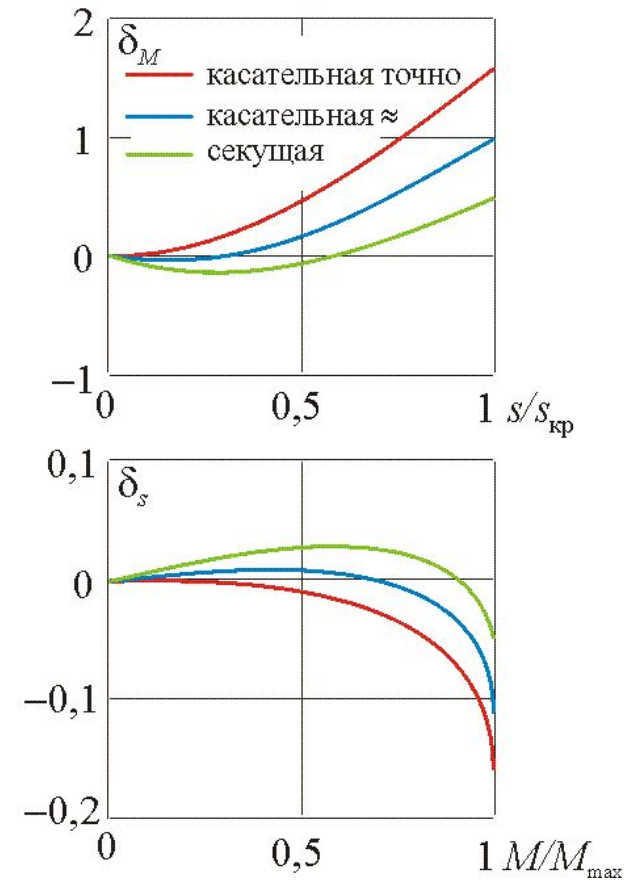
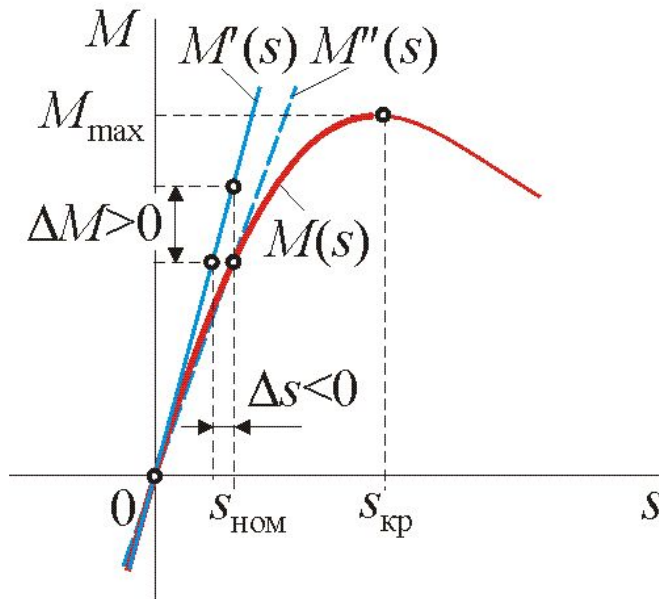


$$M = \frac{z_p m_1 R'_2 U_1^2}{\omega_1 s \left[ (R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2 \right]}$$

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

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

# Линеаризация механической характеристики АД

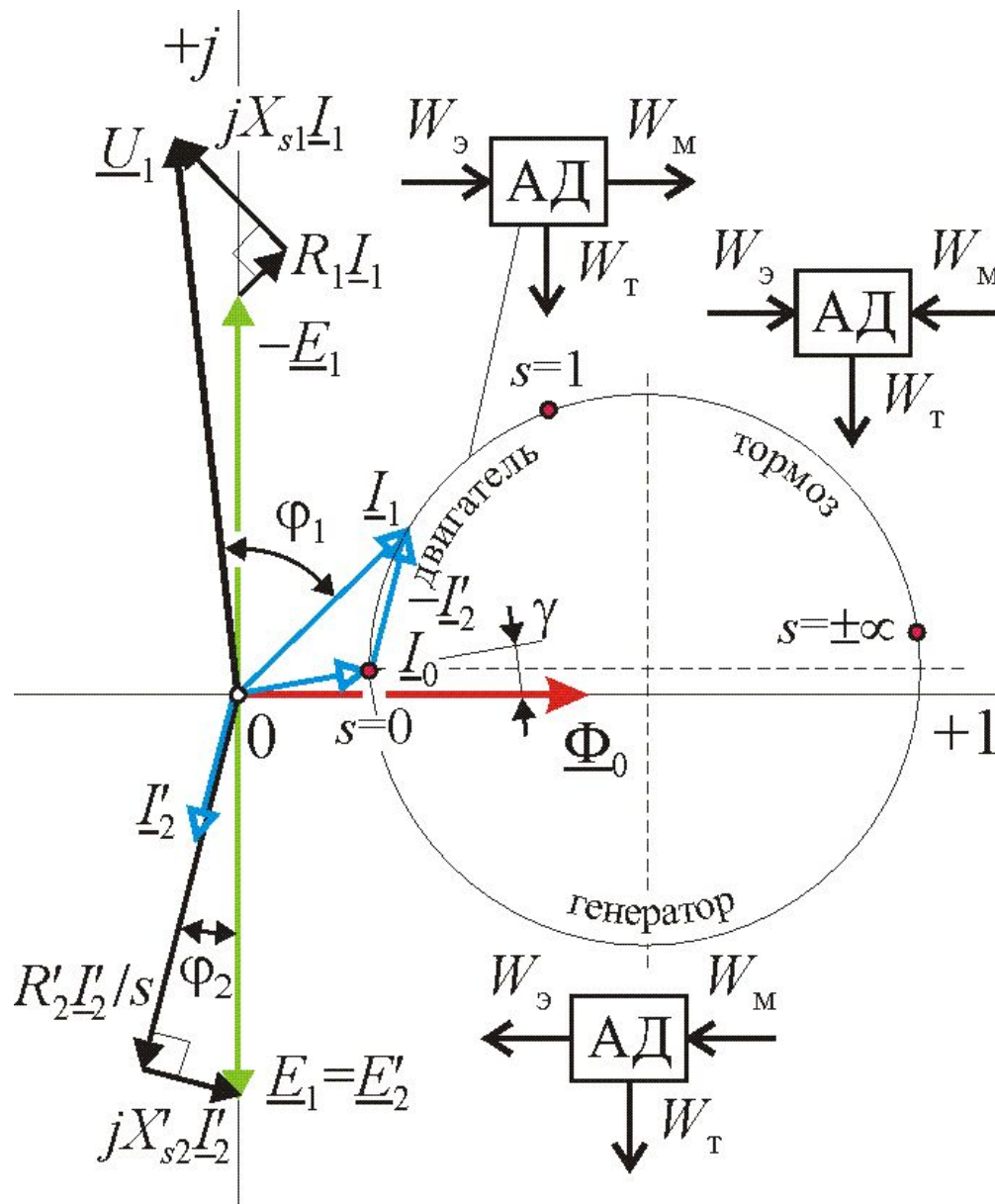


$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{2M_{\text{нрмах}}(1 + as_{\text{кр}})}{\left(\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2as_{\text{кр}}\right)^2} \left(\frac{s}{s^2} - \frac{1}{s_{\text{кр}}}\right); \quad \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{\partial M_{\text{нрмах}}}{\partial s}\right)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

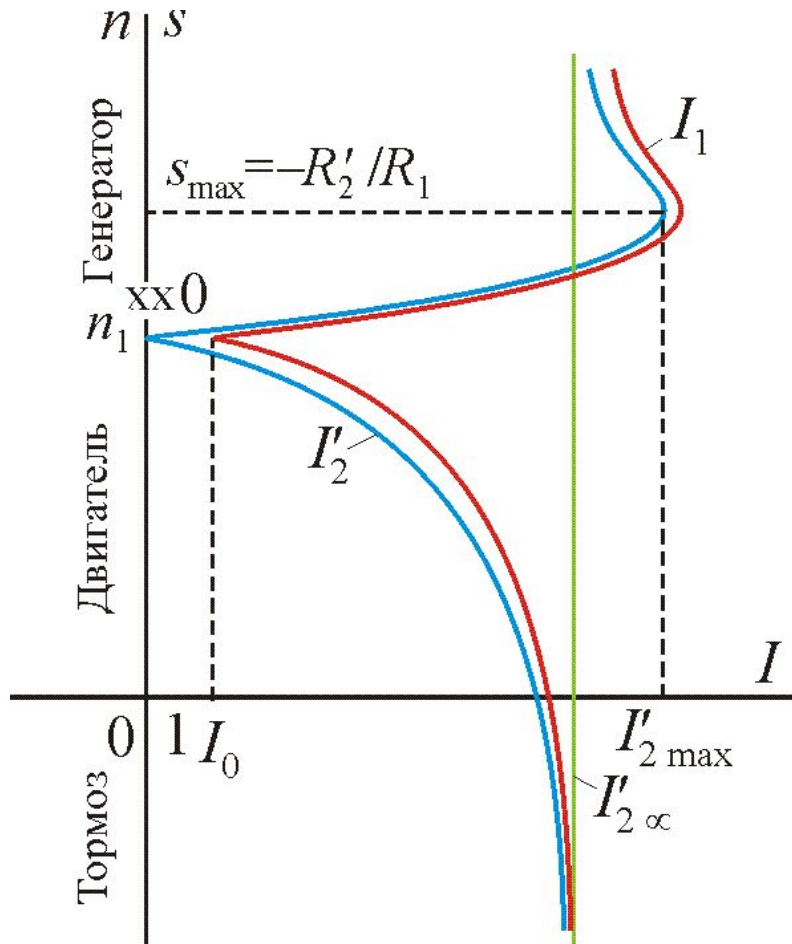
$$M'(s) = \frac{\partial M}{\partial s} s = \frac{2M_{\text{нрмах}}(1 + as)}{s_{\text{кр}}} s \approx \frac{2M_{\text{нрмах}}}{s_{\text{кр}}} s; \quad M''(s) = \frac{M}{s_{\text{НОМ}}} s$$



# Векторная диаграмма асинхронного двигателя



# Электромеханическая (скоростная) характеристика

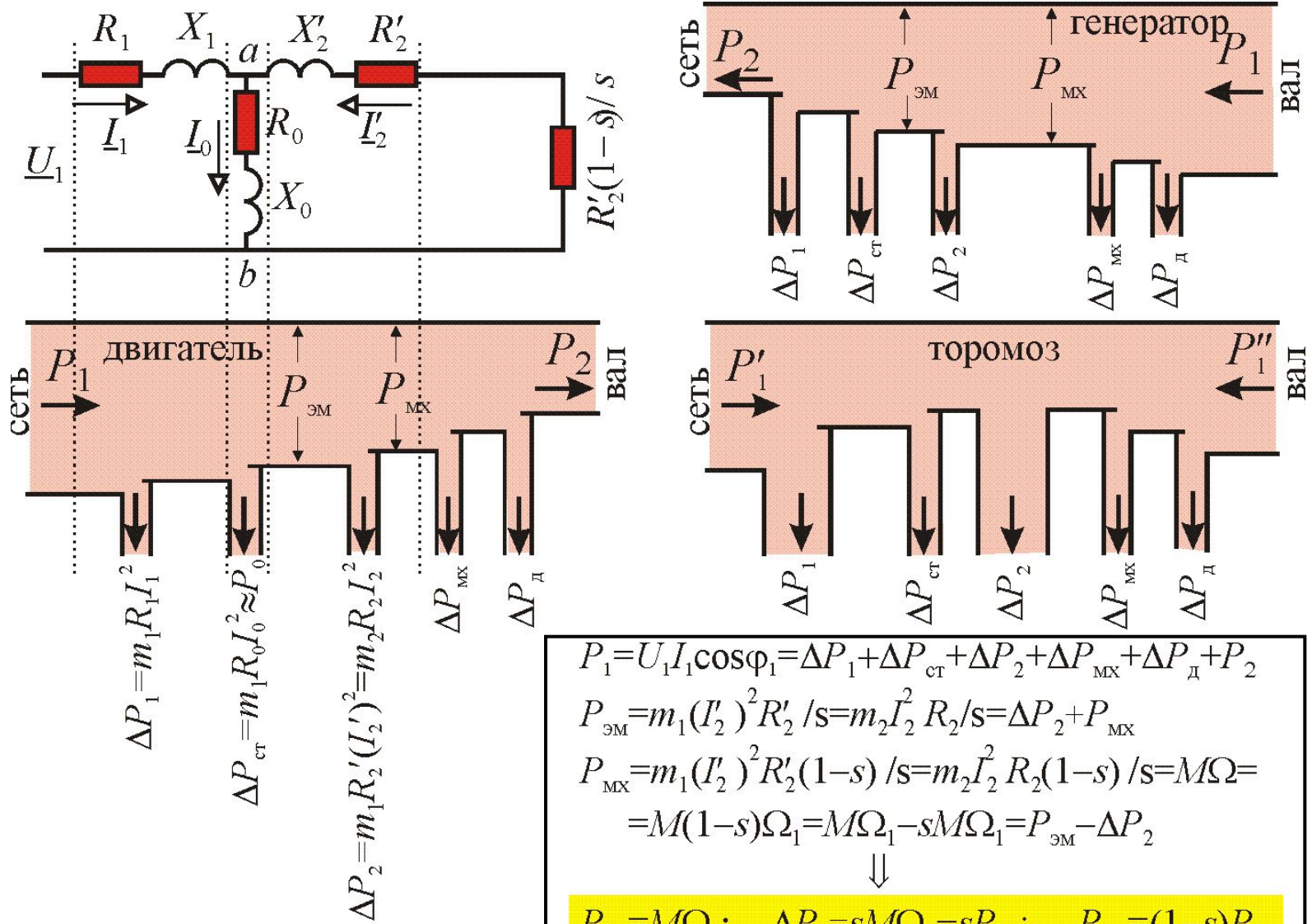


$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + c_1 R'_2 / s)^2 + (X_{s1} + c_1 X'_{s2})^2}}$$

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

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

# Диаграмма активной мощности



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

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

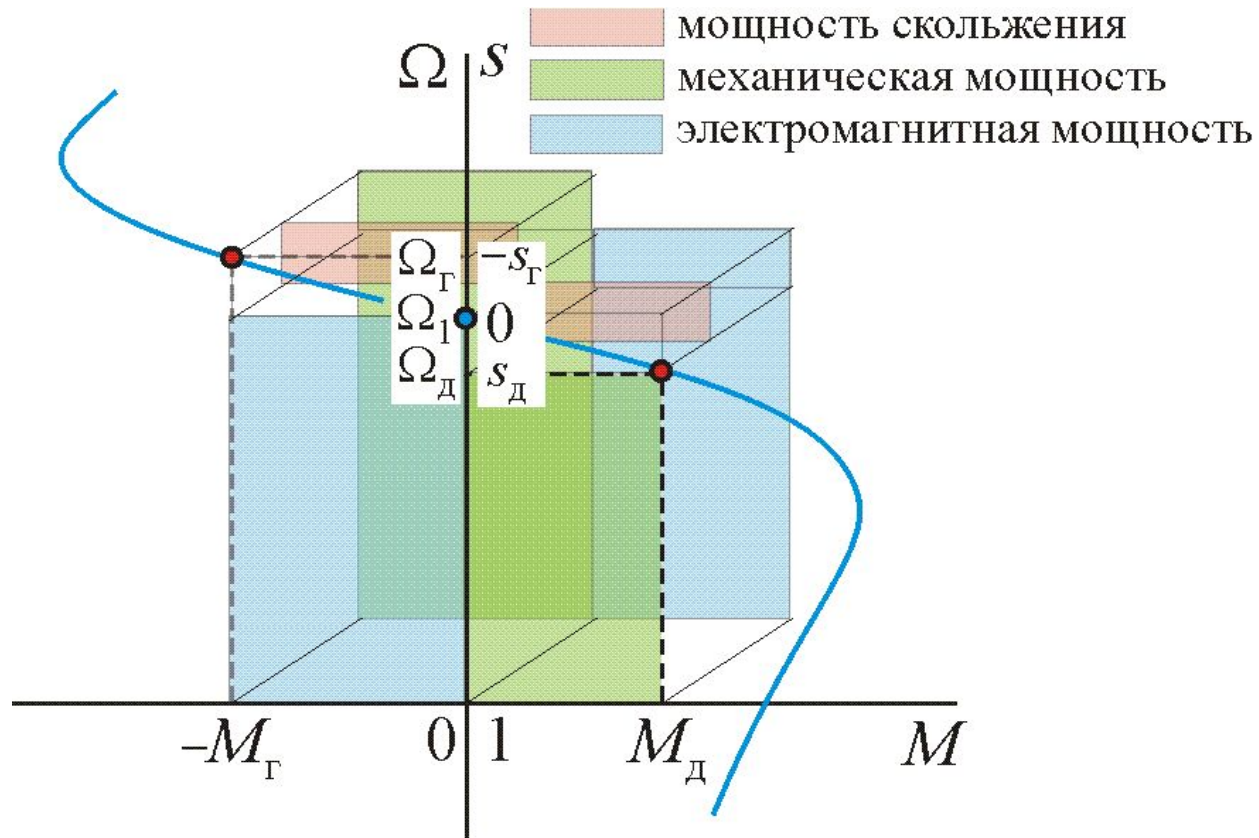
$$P_{МХ} = m_1 (I_2')^2 R_2' (1-s) / s = m_2 I_2'^2 R_2 (1-s) / s = M \Omega = M(1-s) \Omega_1 = M \Omega_1 - s M \Omega_1 = P_{эм} - \Delta P_2$$

⇓

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

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

# Графическое представление составляющих мощности на механической характеристике



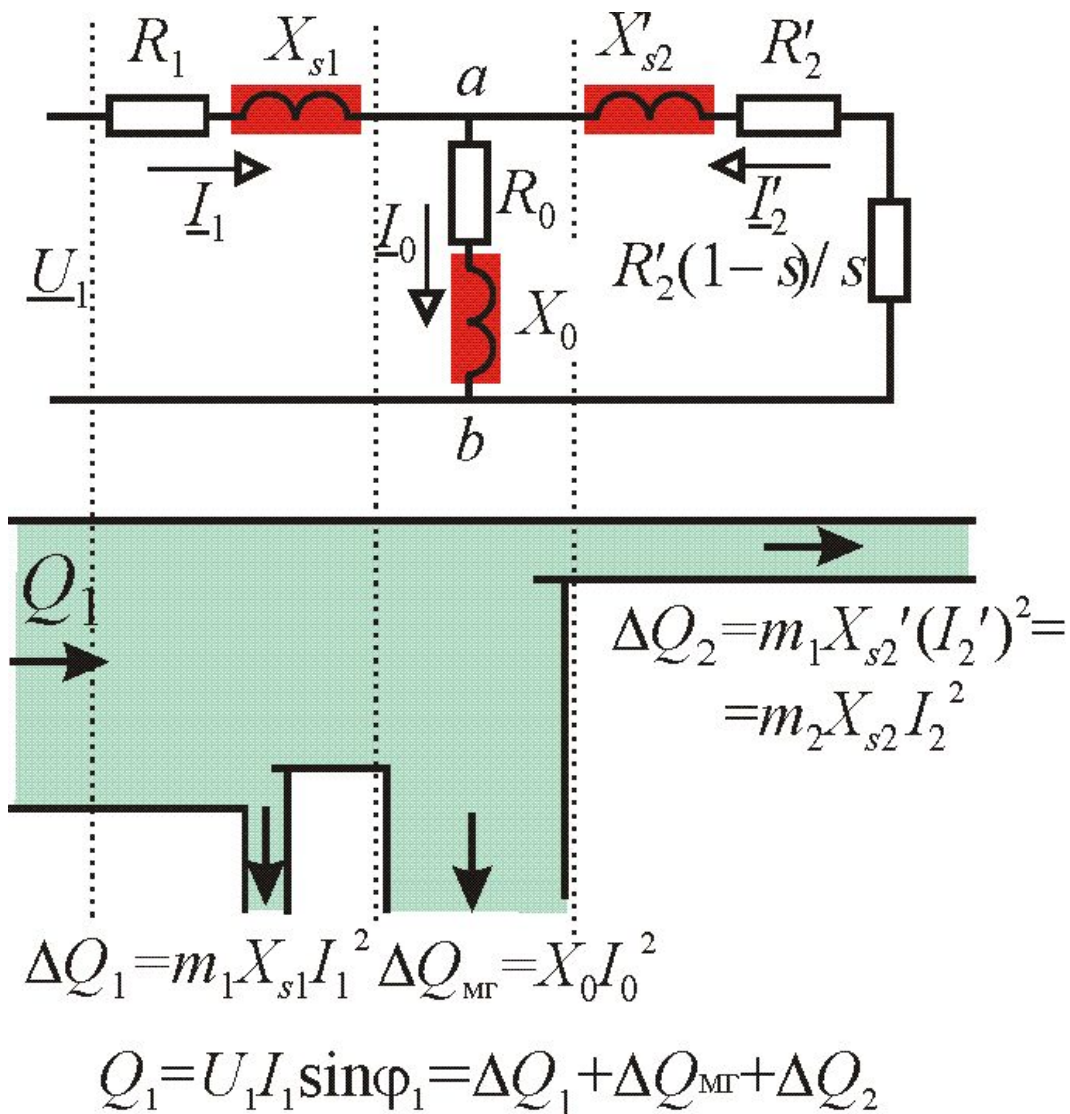
$$P_{\text{эм д}} = M_{\text{д}} \Omega_1 = P_{\text{мх д}} + \Delta P_{2\text{д}}; \quad P_{\text{мх д}} = M_{\text{д}} \Omega_{\text{д}}; \quad \Delta P_{2\text{д}} = s_{\text{д}} M_{\text{д}} \Omega_1$$

---

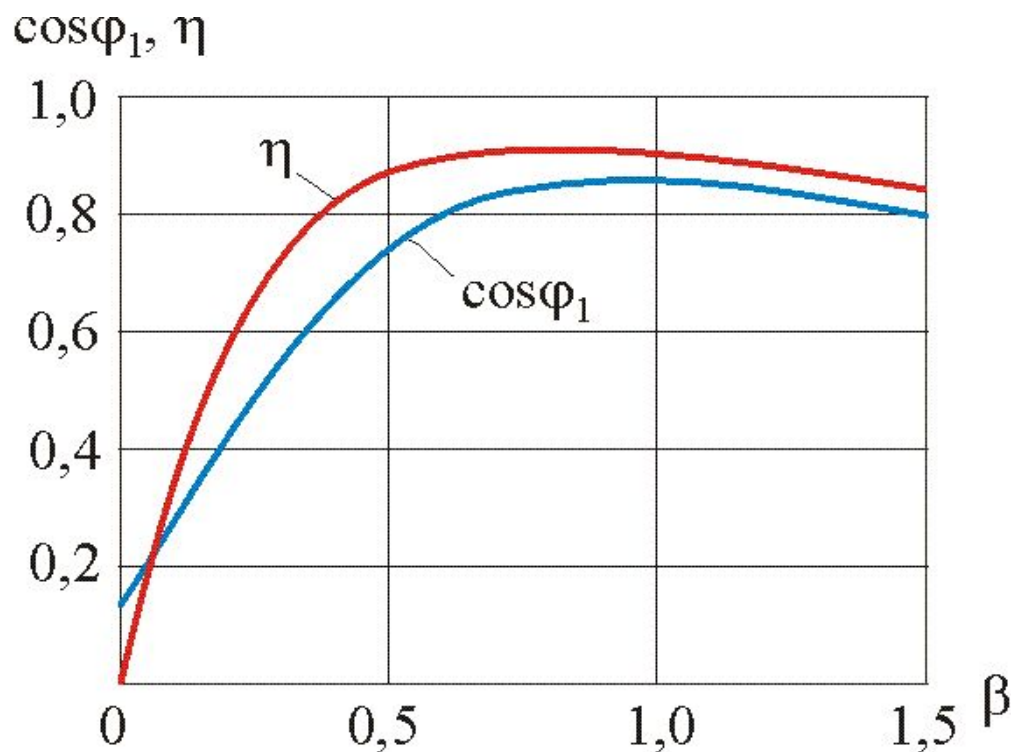

$$P_{\text{эм г}} = -M_{\text{г}} \Omega_1 = P_{\text{мх г}} + \Delta P_{2\text{г}}; \quad P_{\text{мх г}} = -M_{\text{г}} \Omega_{\text{г}}; \quad \Delta P_{2\text{г}} = s_{\text{г}} M_{\text{г}} \Omega_1 > 0$$



## Диаграмма реактивной мощности



## Зависимость КПД и коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки

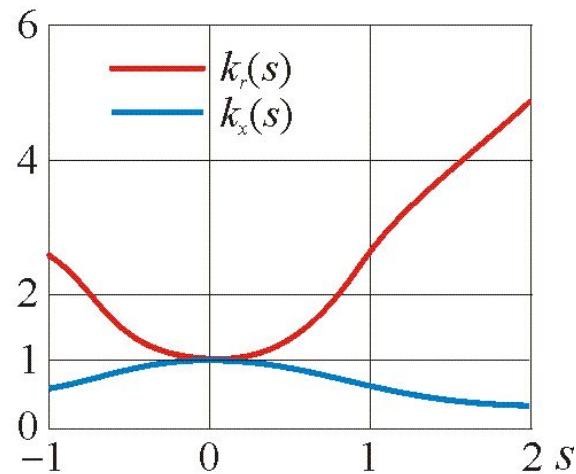
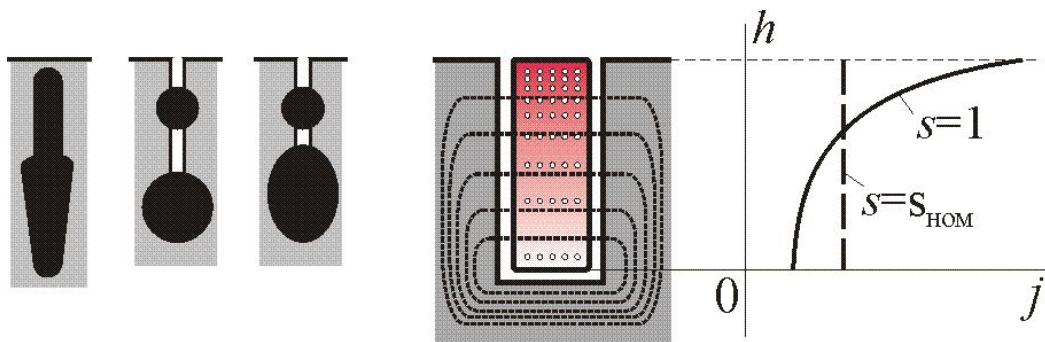


$$\eta = \frac{\beta P_{\text{НОМ}}}{\beta P_{\text{НОМ}} + \Delta P_{\text{с}} + \beta^2 \Delta P_{\text{м}}} \Big|_{\Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{д}} \approx 0}$$

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



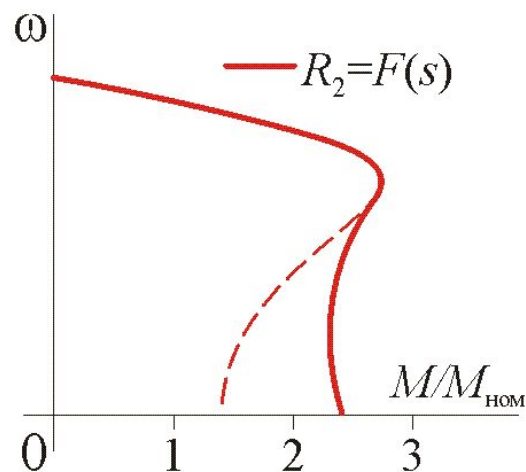
# Влияние вытеснения тока на характеристики двигателя



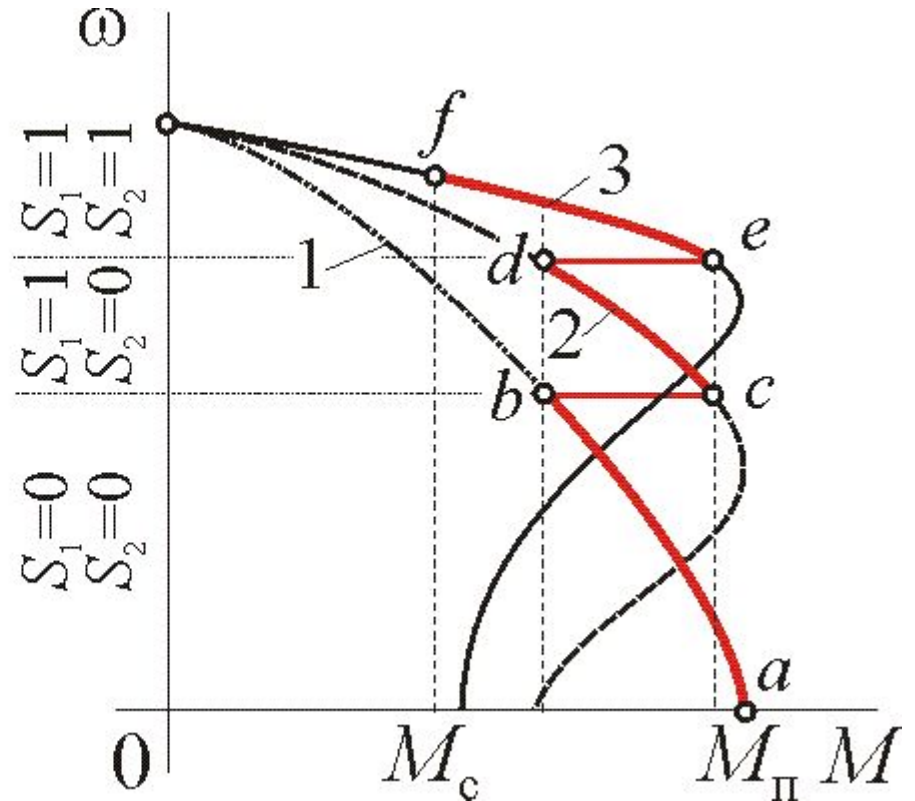
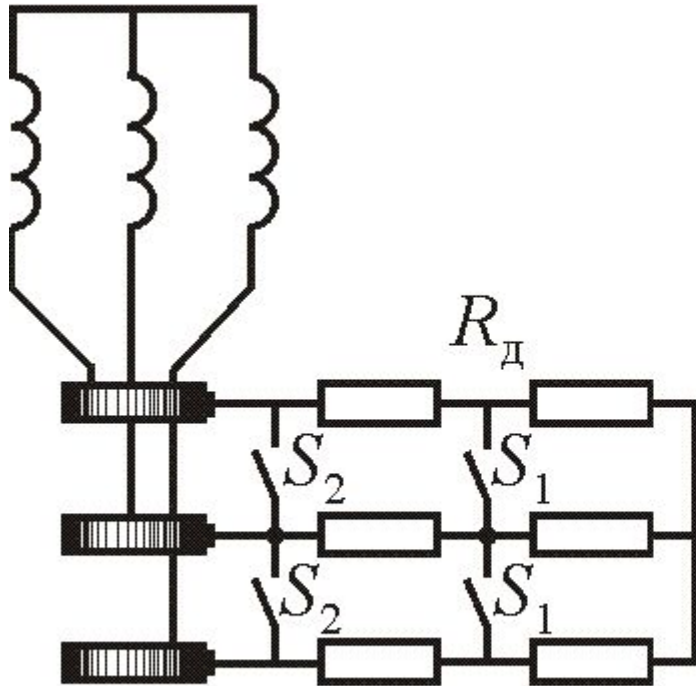
$$R_{\text{в}} = R_2 k_r + R_2 ; X_{2\text{п}} = X k_x + X$$

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

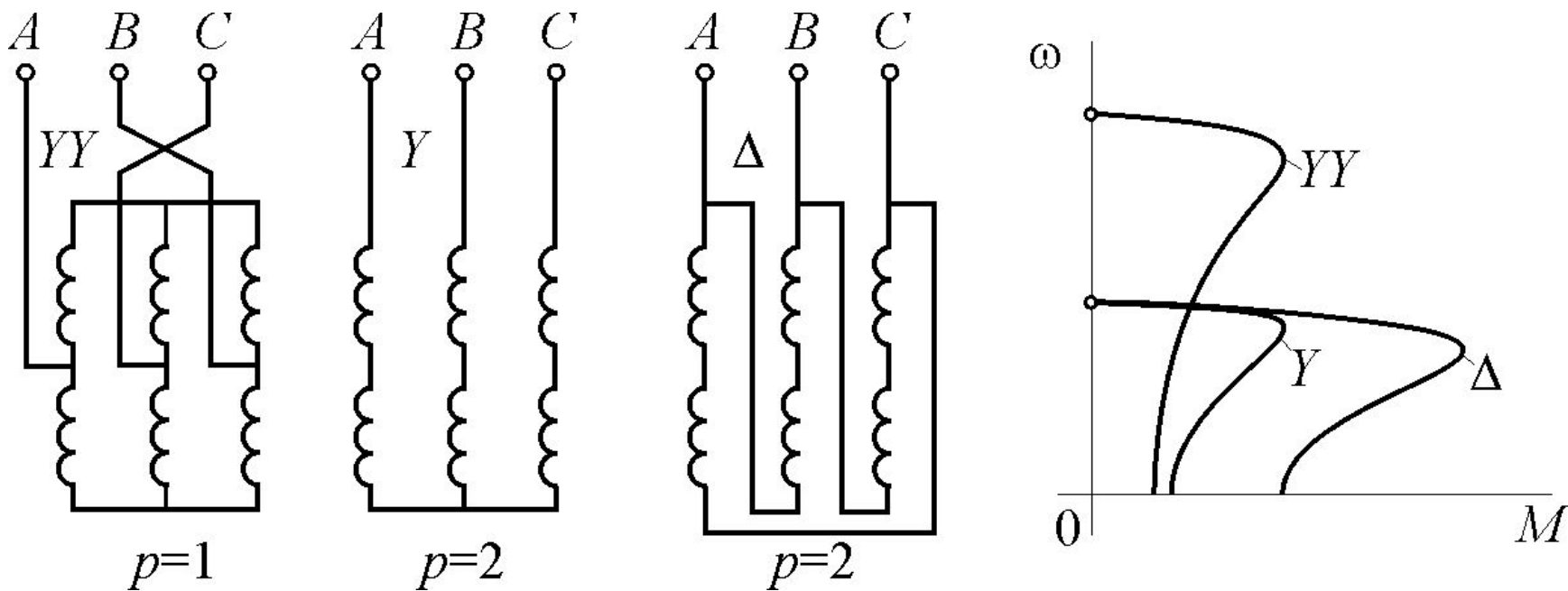
$$\xi \approx h / \sqrt{s}$$



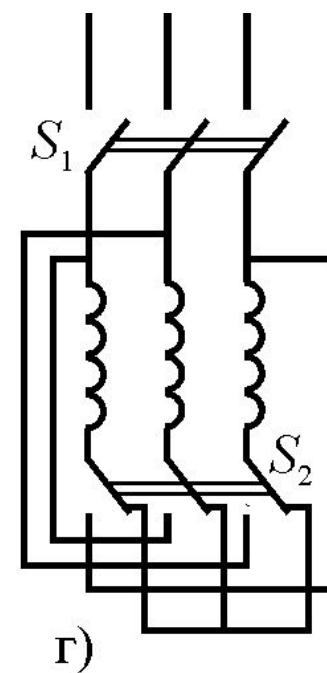
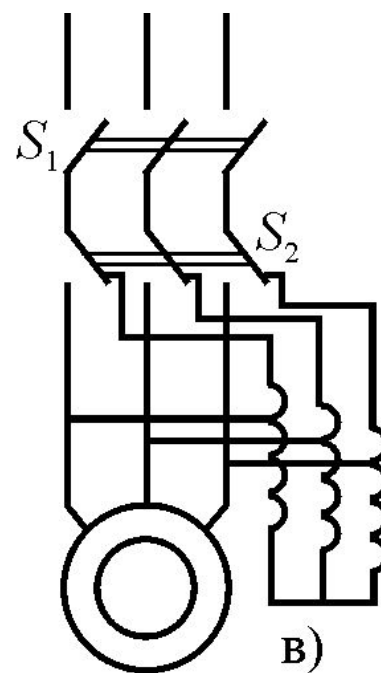
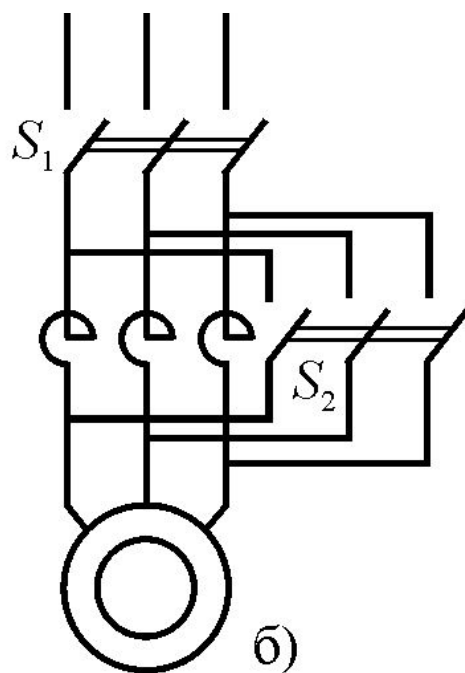
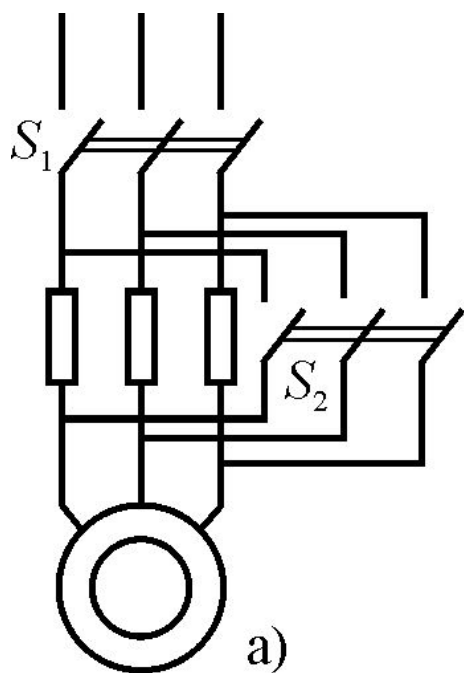
# Реостатный пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

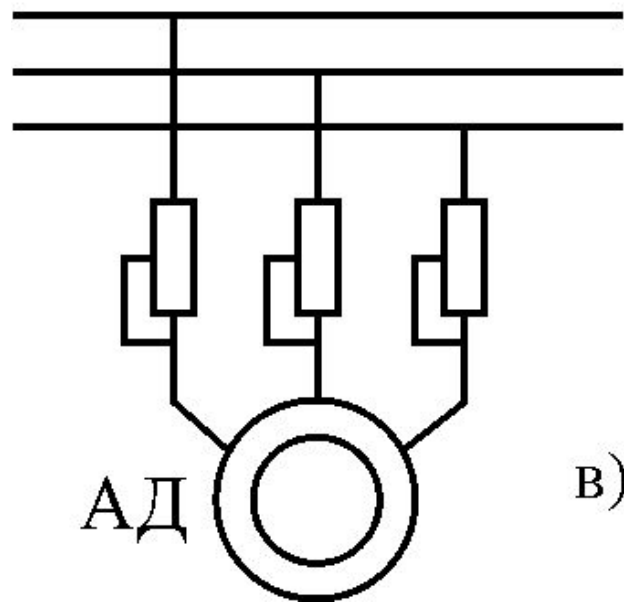
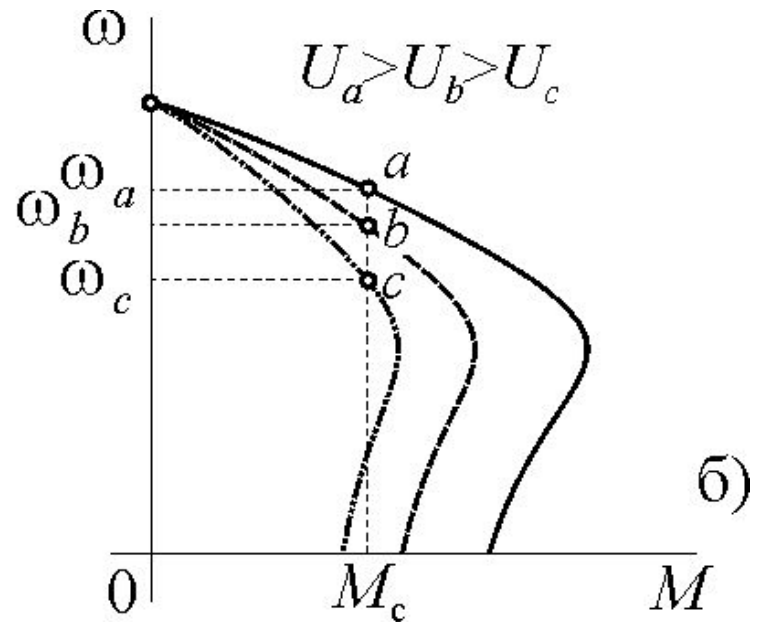
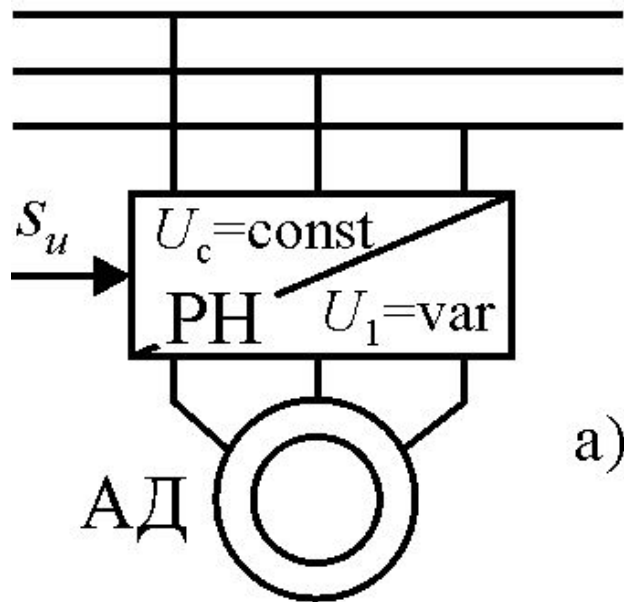


# Изменение скорости вращения асинхронного двигателя переключением схемы соединения обмоток

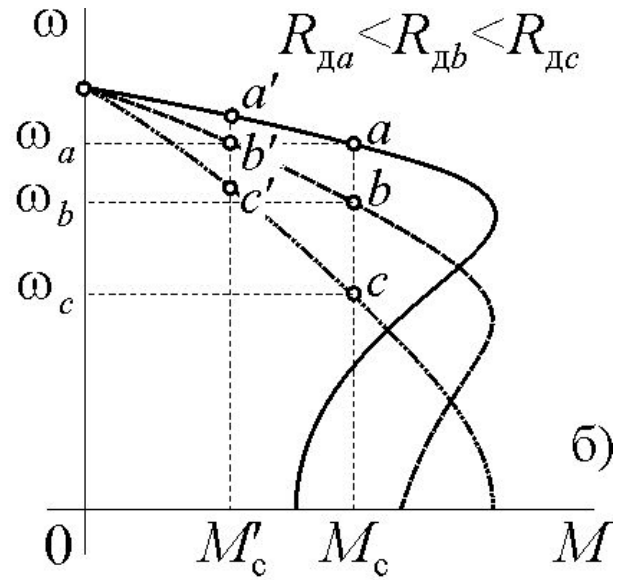
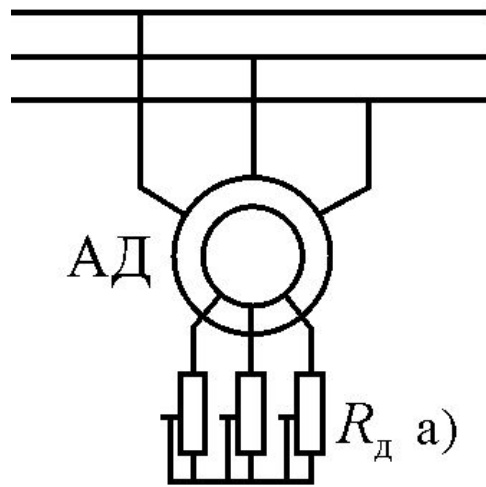


# Схемы управления пуском АД

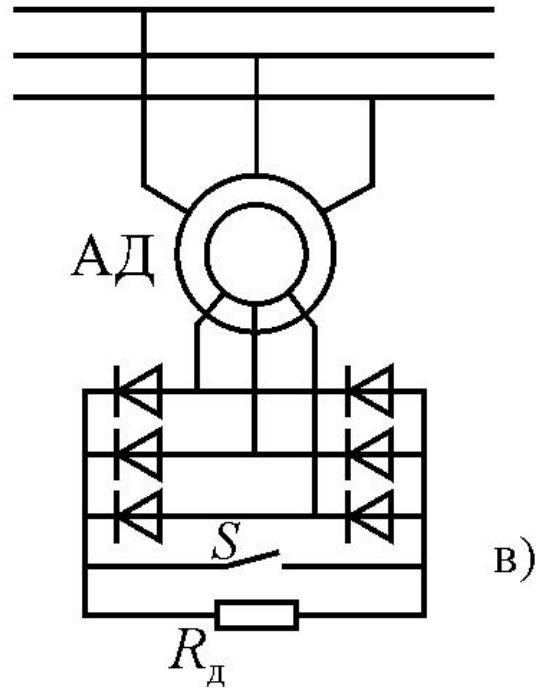




Регулирование скорости вращения изменением напряжения питания



Регулирование скорости вращения изменением сопротивления цепи ротора

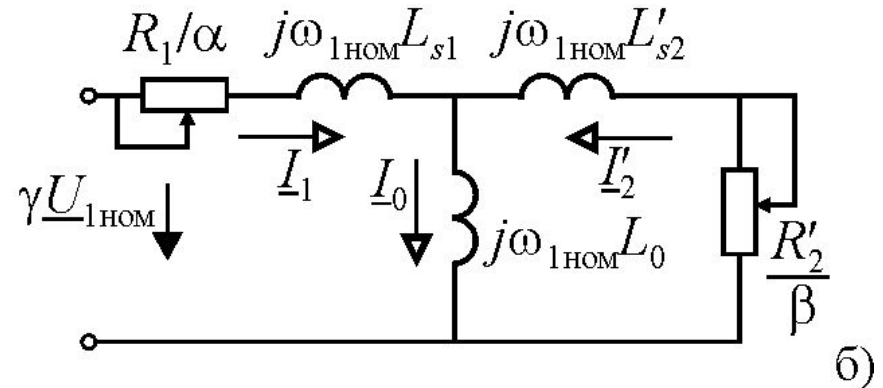
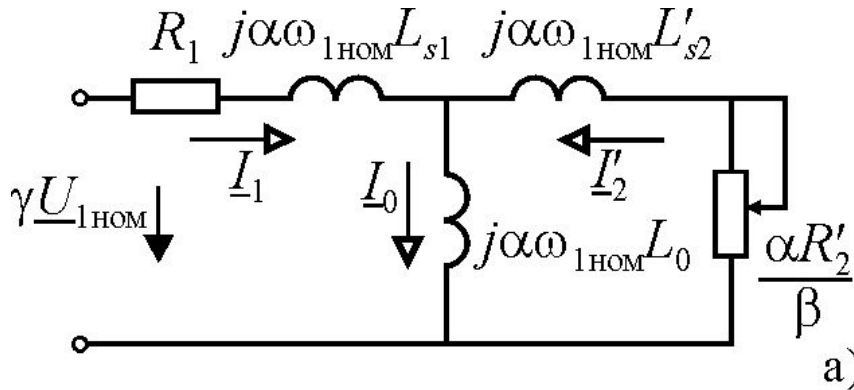




## Частотное управление АД

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

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



*Закон М.П.Костенко*

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

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

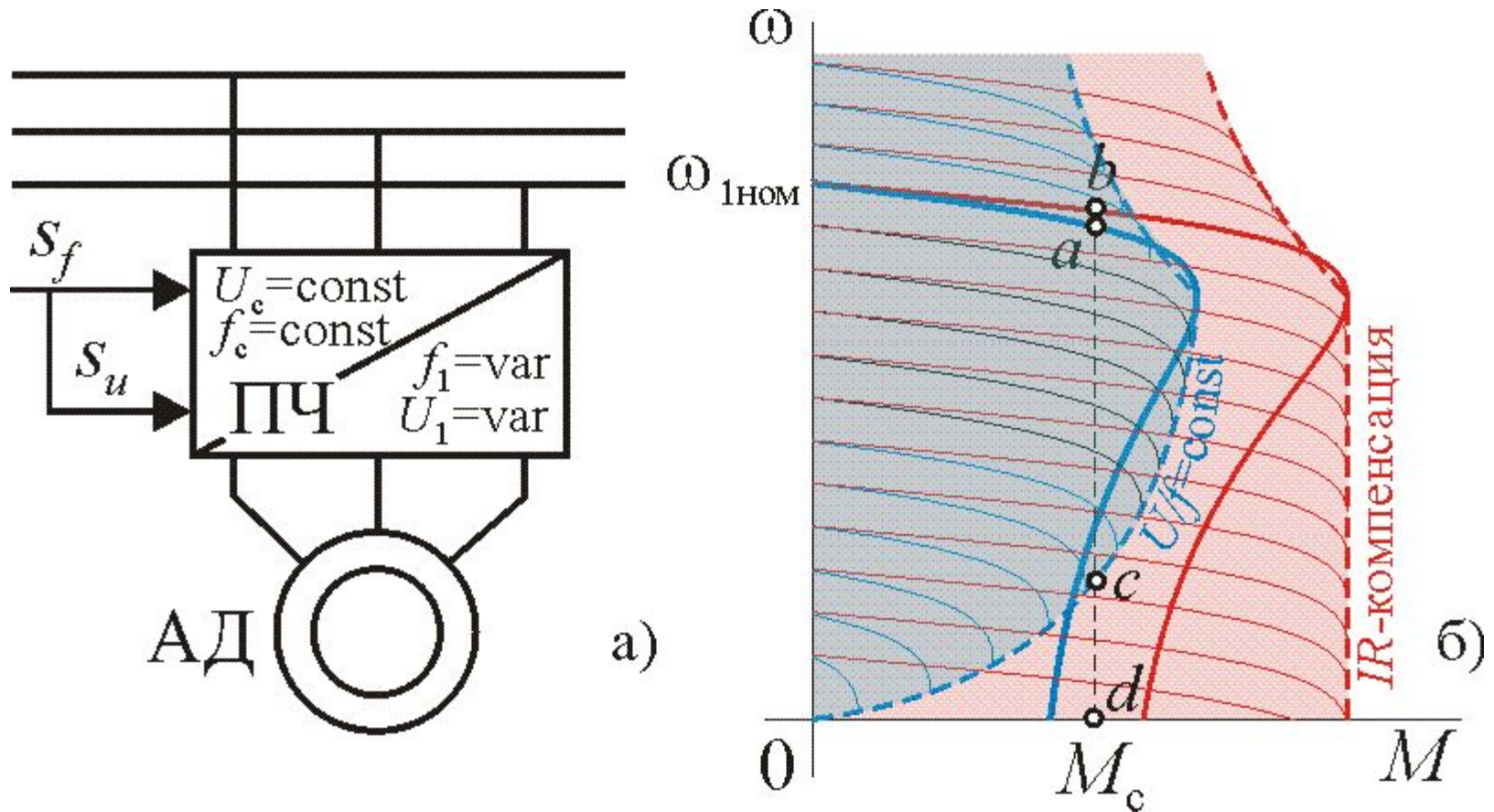
---


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

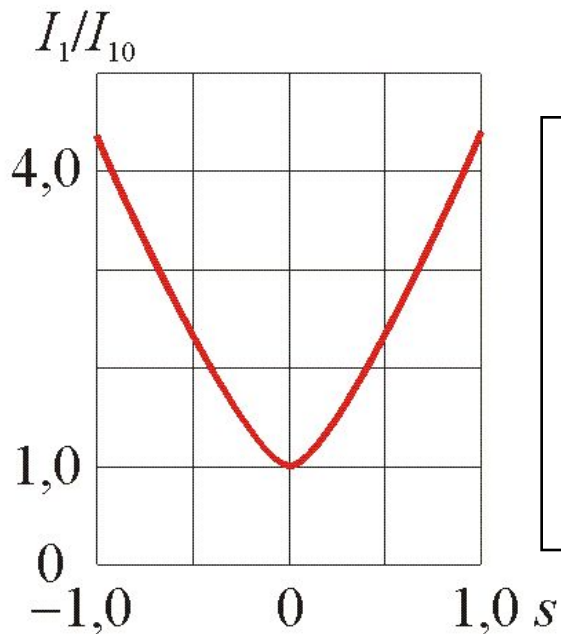
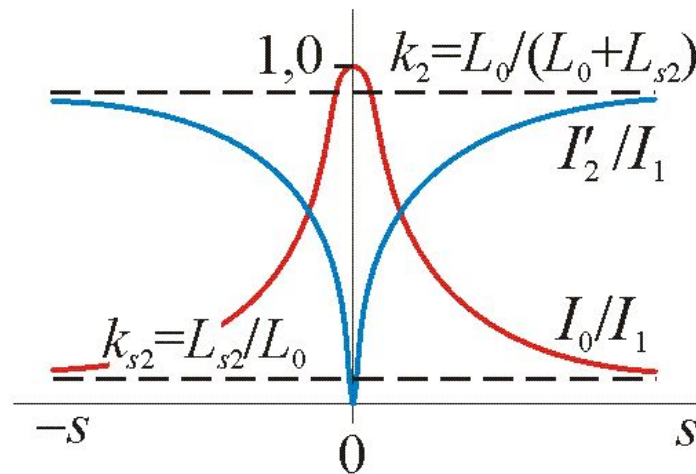
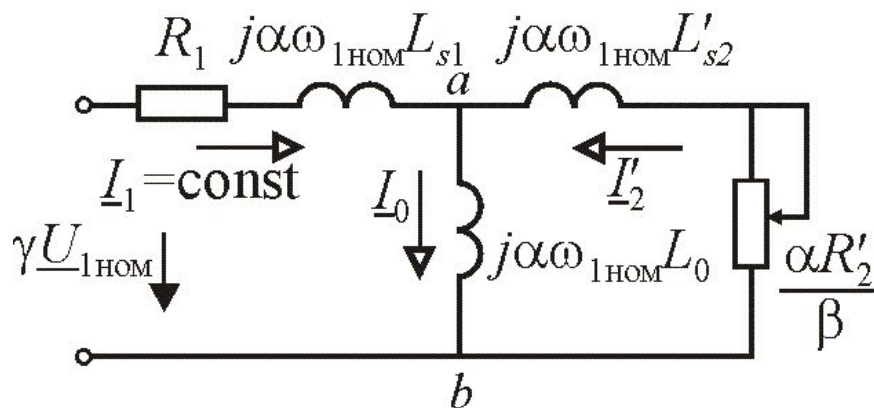
$$P_{\text{H}} \approx c_p M_{\text{H}} f_1 \Rightarrow \gamma = \sqrt{\alpha}$$

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

# Регулирование скорости вращения изменением частоты питания (частотное регулирование)



# Электромеханические характеристики АД при питании от источника тока

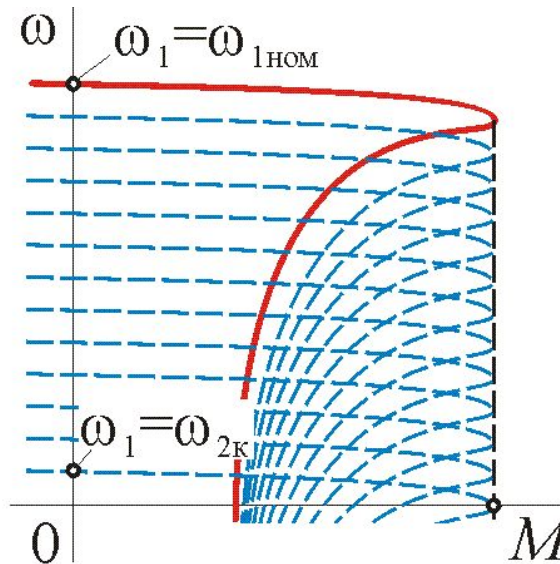
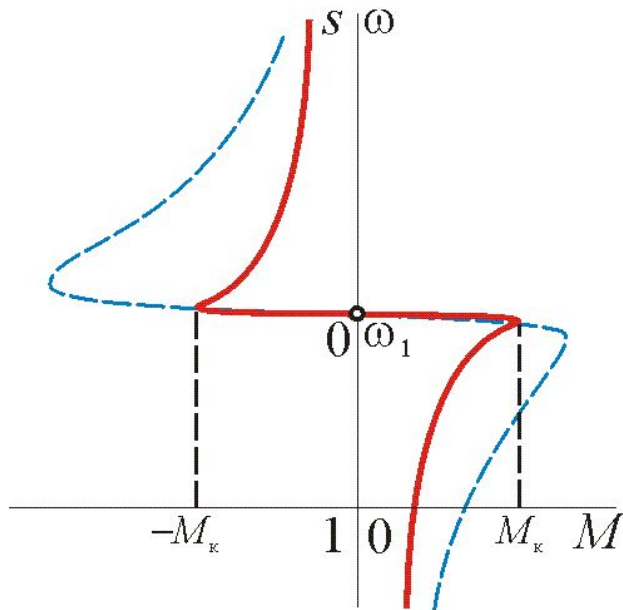


$$z_{ab} = X_0 \sqrt{\frac{1 + (s\omega_1 L'_{s2} / R'_2)^2}{1 + (s\omega_1 L_2 / R'_2)^2}} = X_0 \zeta_{ab}; \quad L_2 = L'_{s2} + L_0$$

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

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

# Механические характеристики АД при питании от источника тока



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

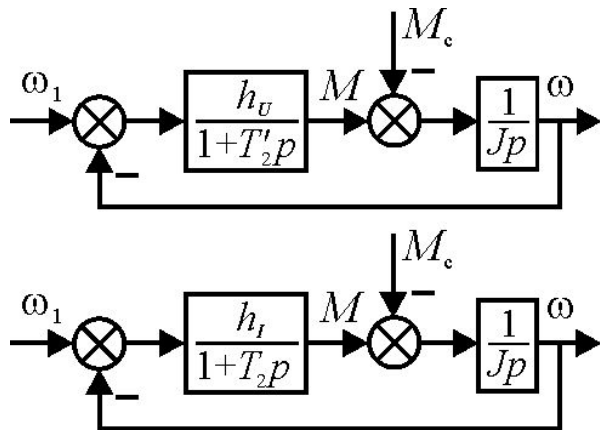
$$M_{\max} = \frac{m_1 p L_0^2}{2 L_2} I_1^2$$

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

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

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

## Линеаризованные динамические МХ АД



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

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

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

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

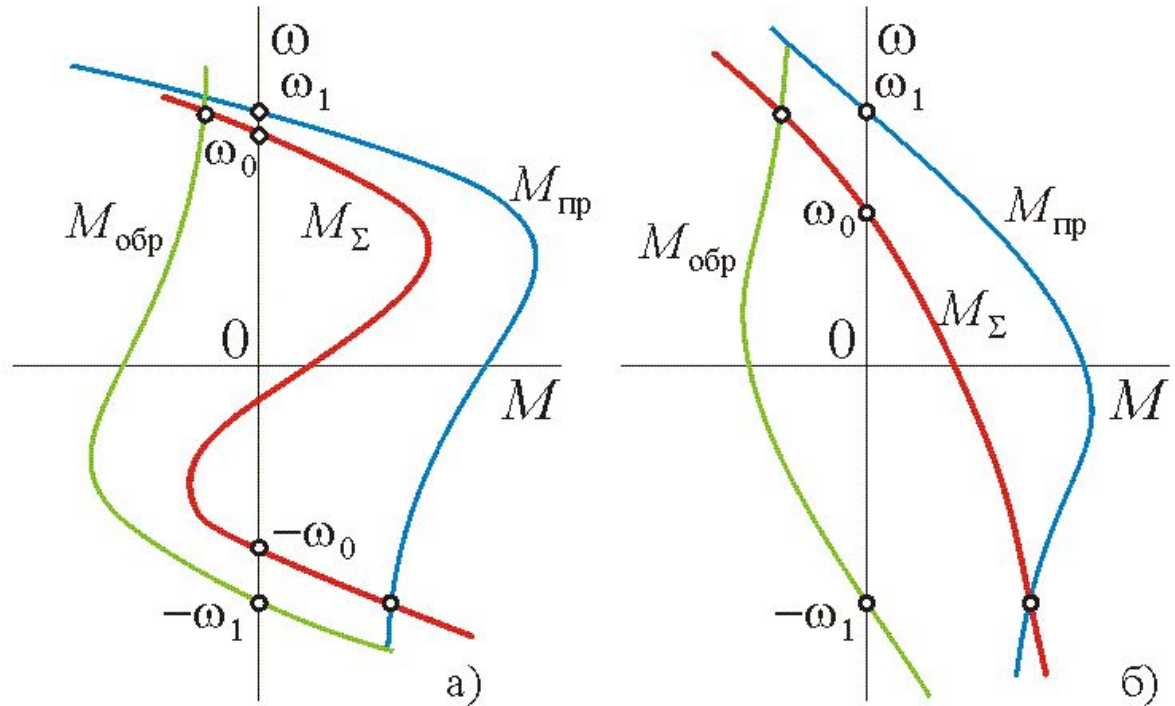
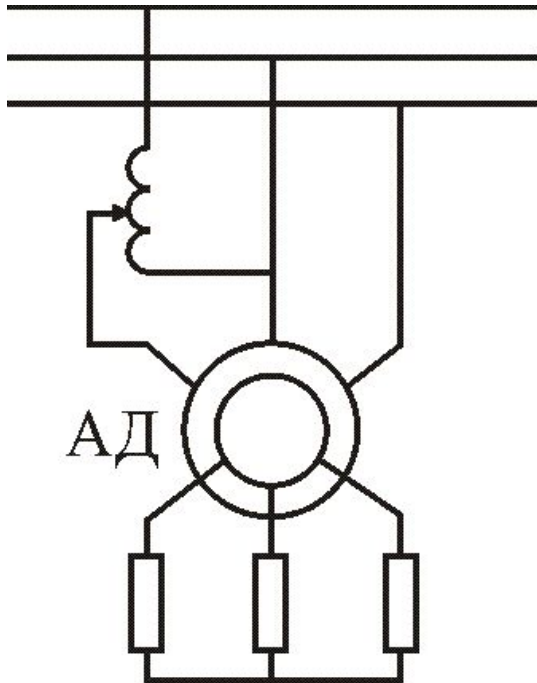
$$k_{\text{ном}} = L_{s2}/L_0; k_1 = L'_{s2}/L_0; \sigma = 1 - k_1 k_2; \beta = \omega_2/\omega_1; L = L'_s + L$$

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

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

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

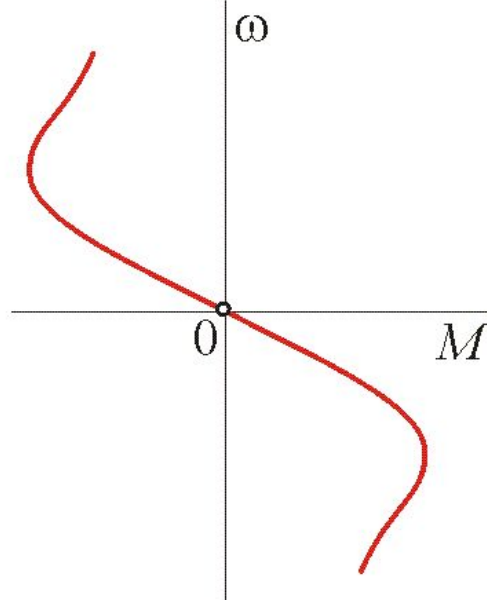
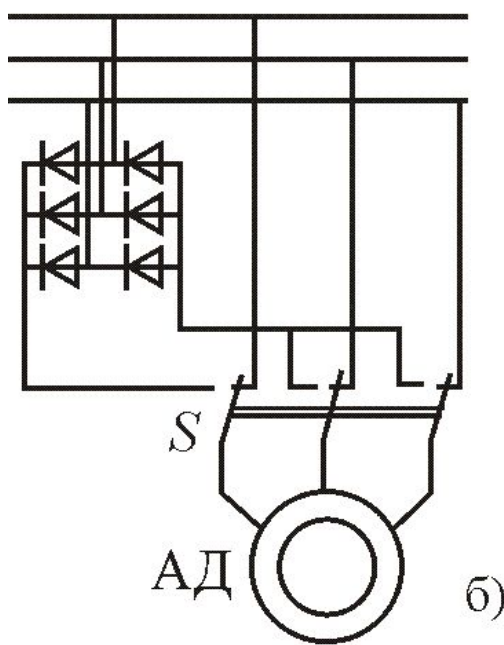
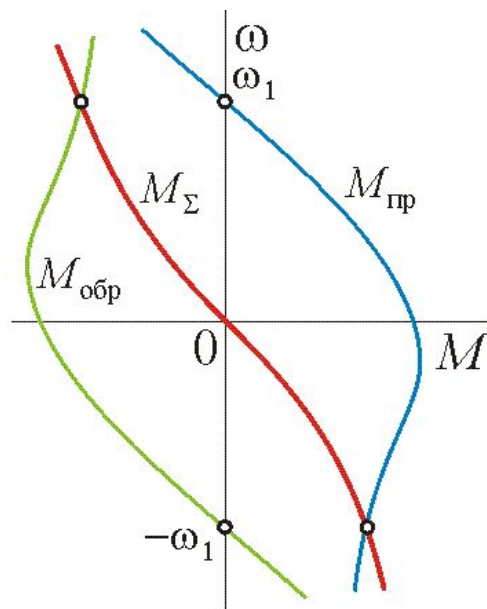
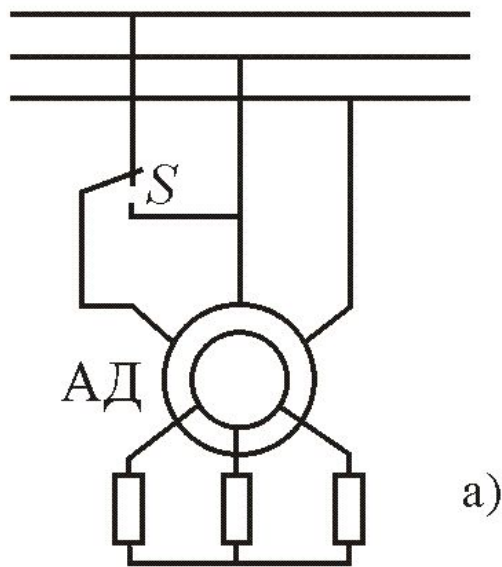
# Механические характеристики АД при несимметричном управлении



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

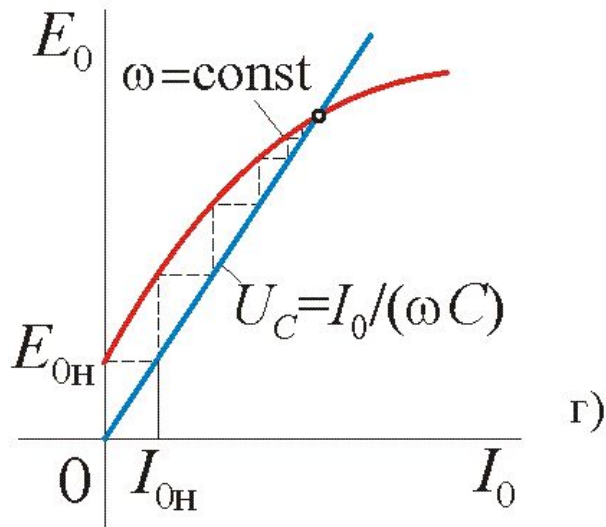
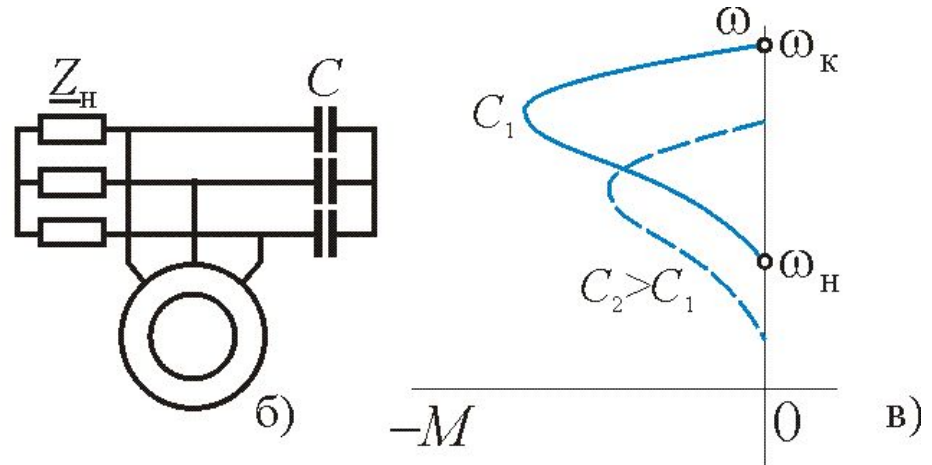
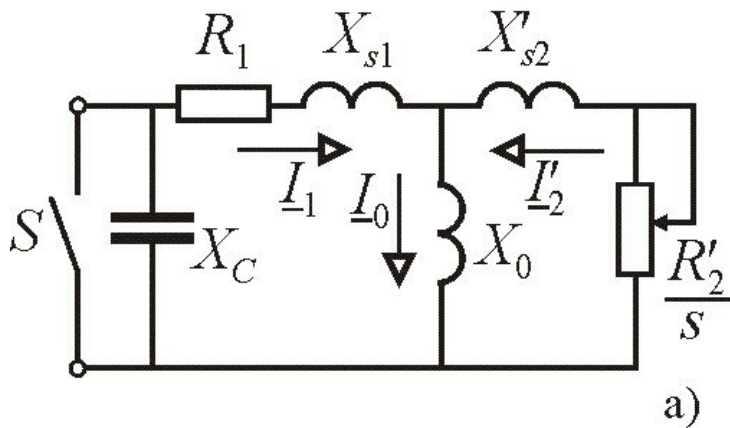
$$M_{\text{max}} = M_{\text{max пр}} \left( \frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2; \quad M_{\text{maxобр}} = M_{\text{max обр}} \left( \frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2$$





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

# Магнитное и конденсаторное торможение



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

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

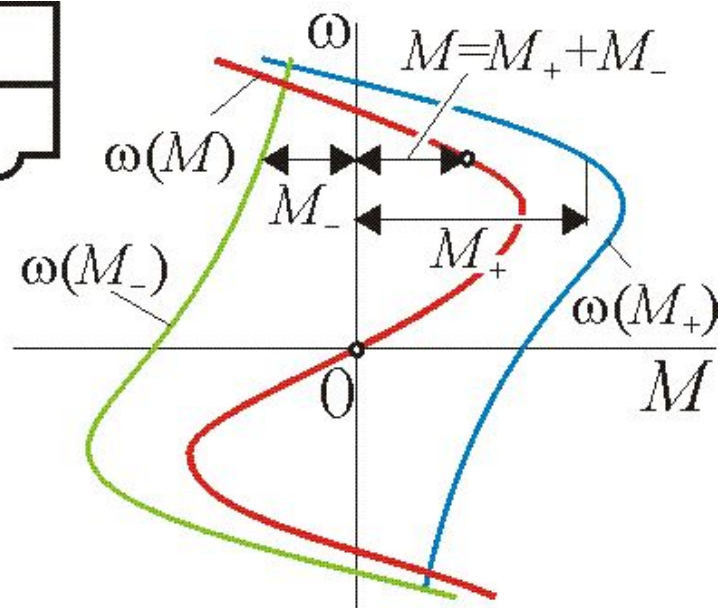
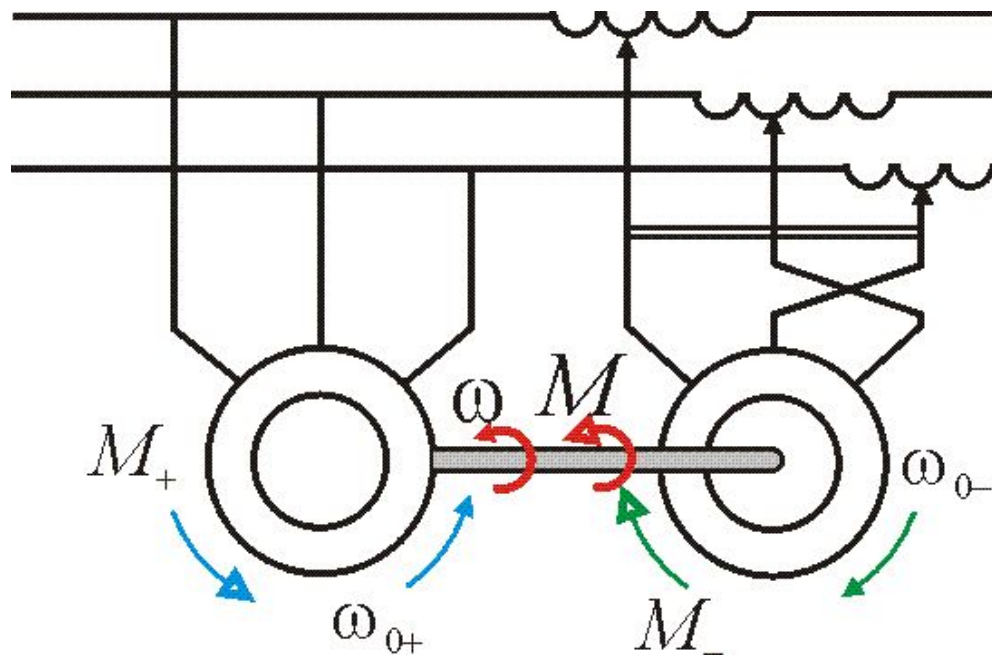
$$\omega_H \approx 1 / \sqrt{CL_0} \Big|_{R_1 \approx 0; X_{s1} \approx 0}$$

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

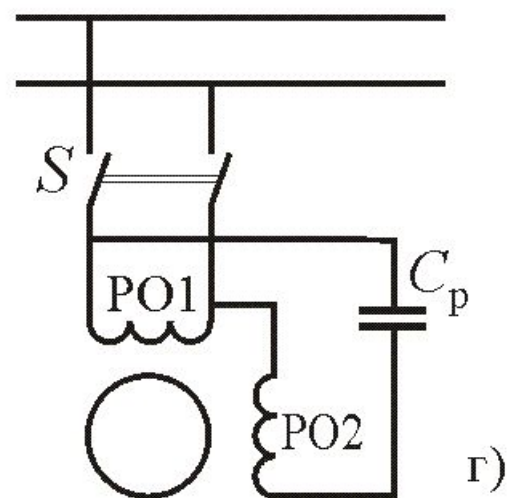
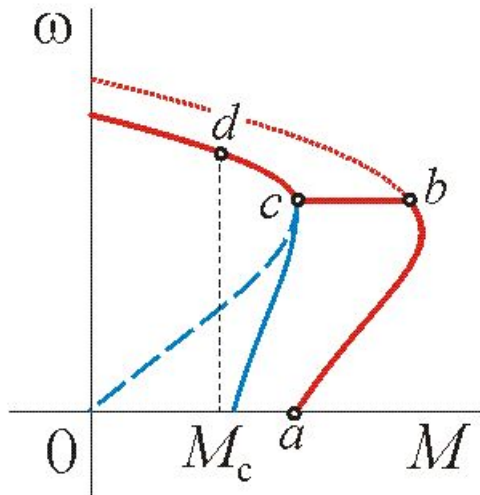
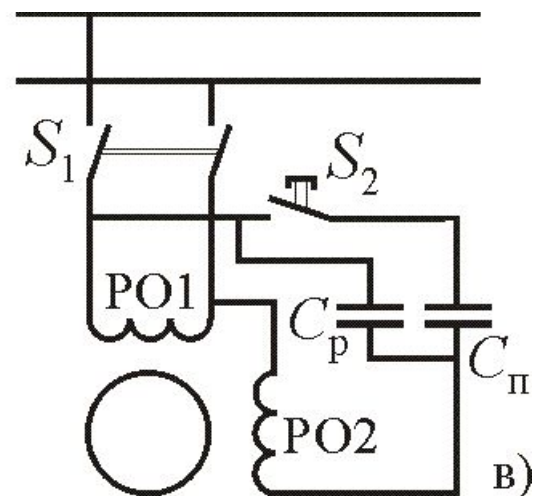
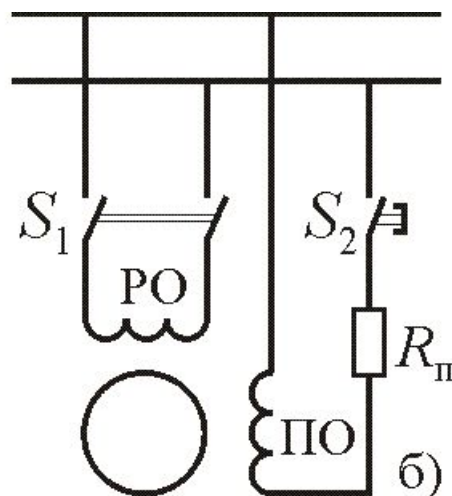
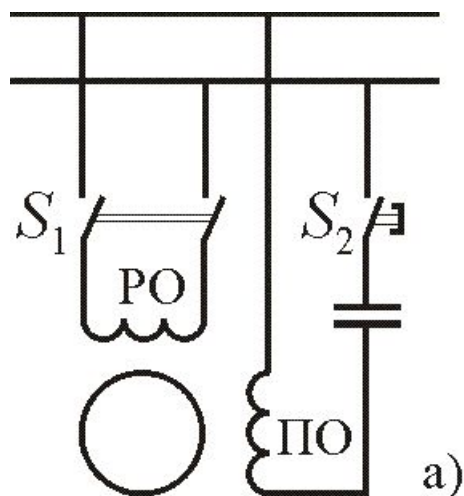
$$\alpha_k \approx \sqrt{X_C / (X_{s1} + X'_{s2})} \Big|_{I_1 \approx I'_2}$$

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

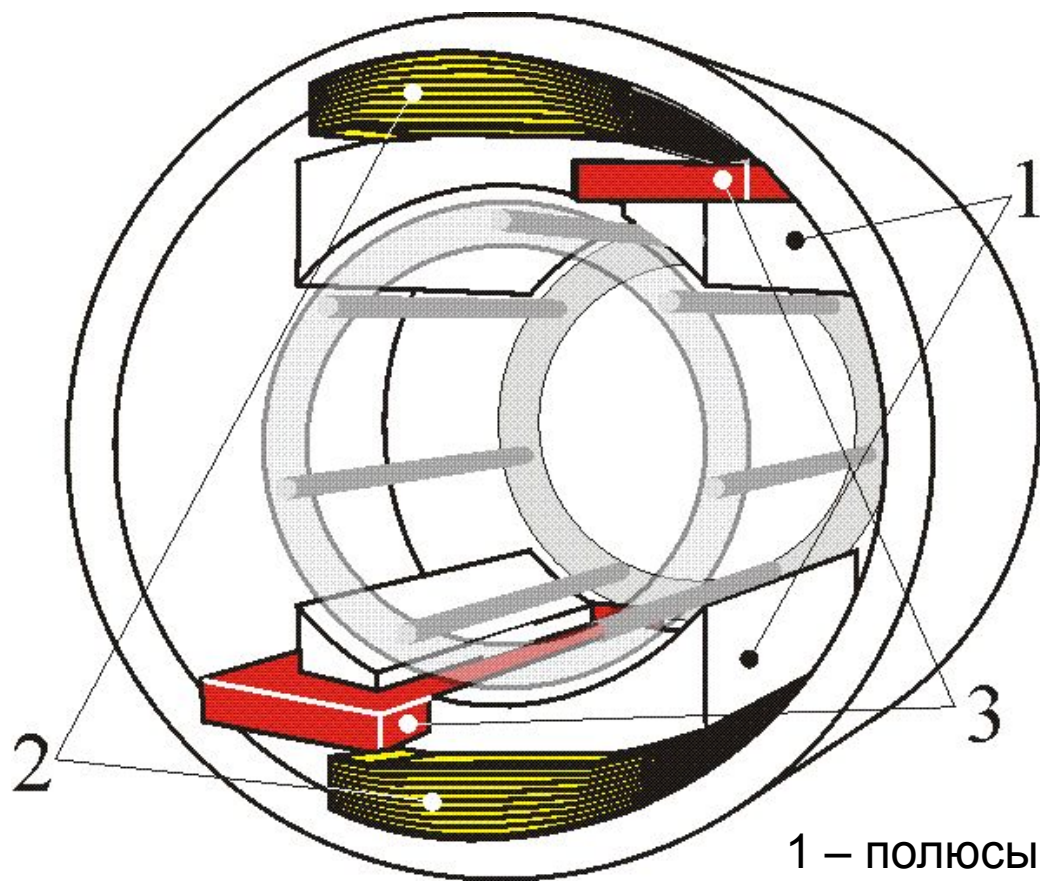
Физическая модель и механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя



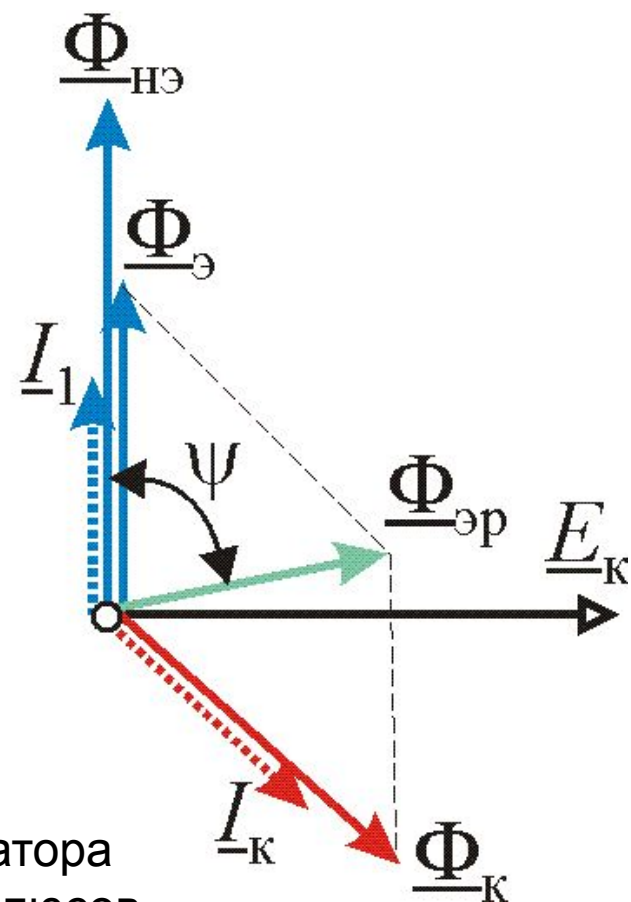
# Пуск однофазных асинхронных двигателей



# Конструктивная схема однофазного асинхронного двигателя с экранированными (расщеплёнными) полюсами



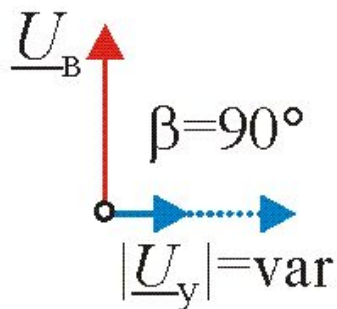
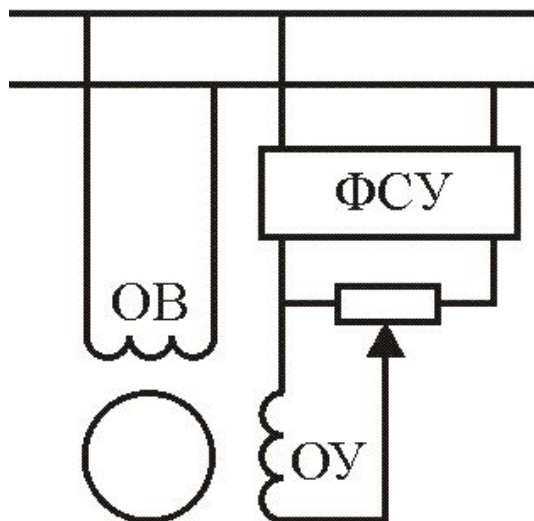
- 1 – полюсы статора
- 2 – обмотка полюсов
- 3 – короткозамкнутые витки



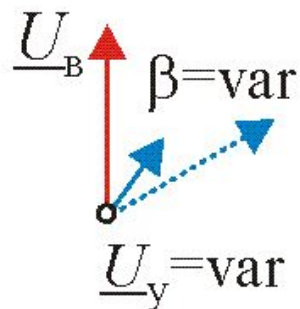
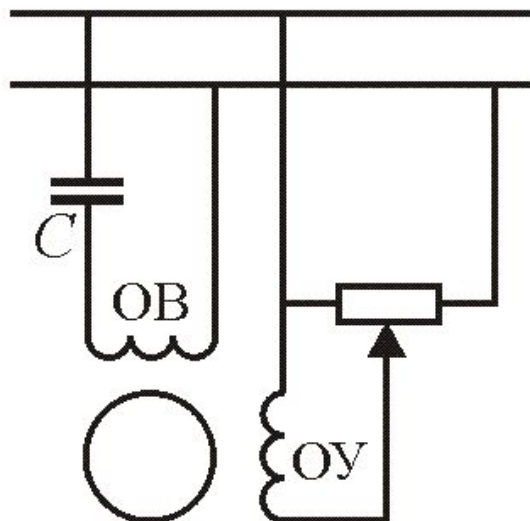


# Способы управления двухфазным асинхронным исполнительным двигателем

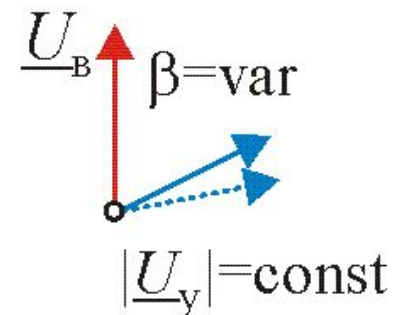
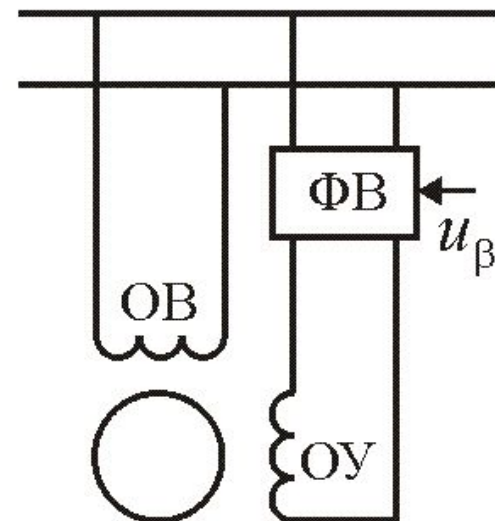
амплитудное



амплитудно-фазовое



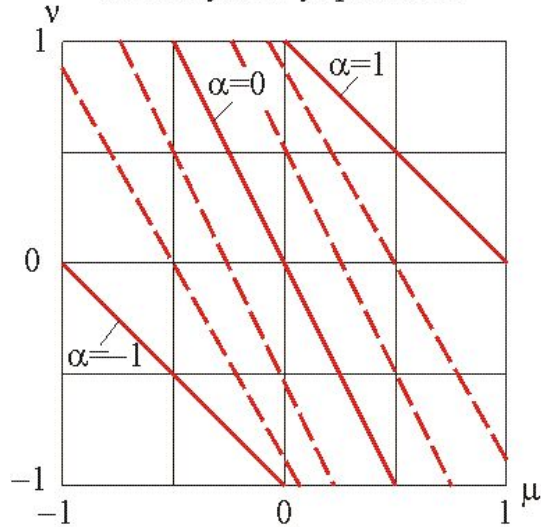
фазовое



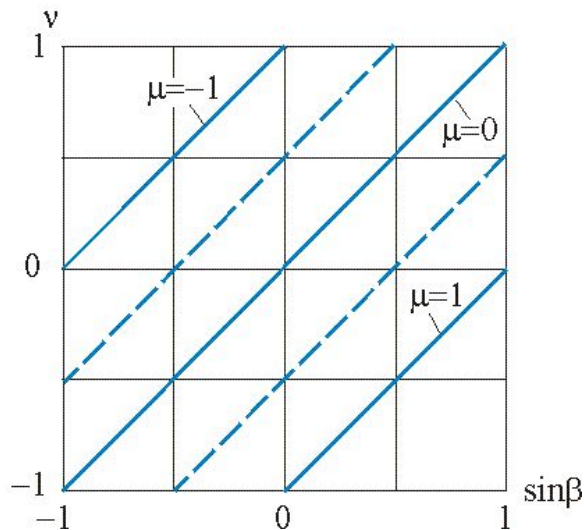
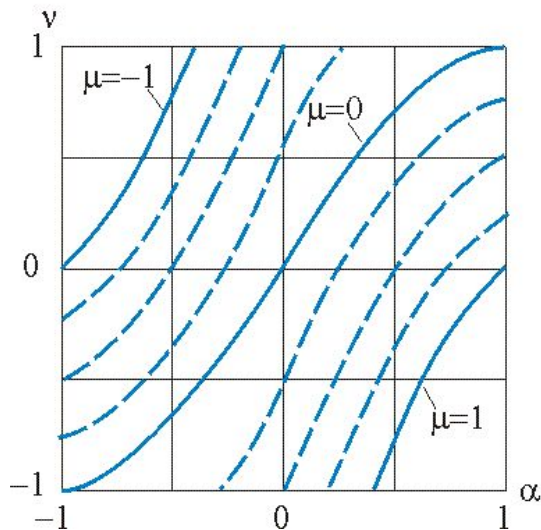
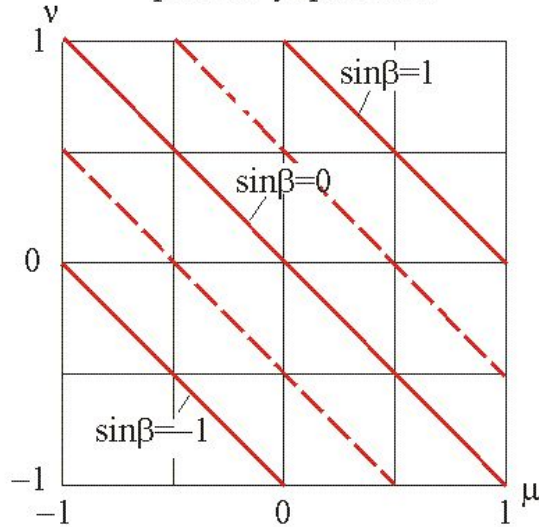


# Механические и регулировочные характеристики идеального ДИД

амплитудное управление



фазовое управление



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

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

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

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

---


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

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

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

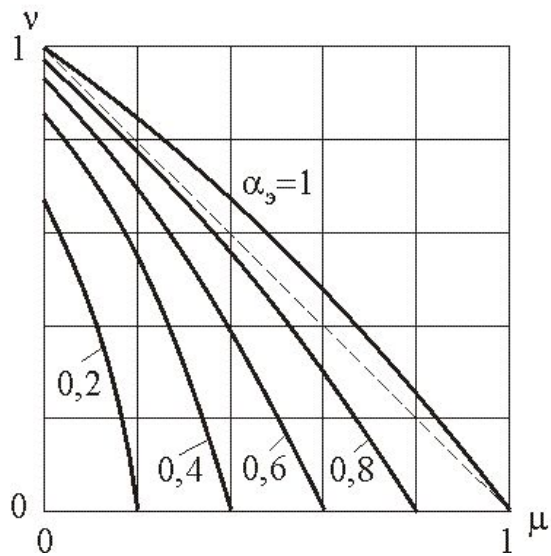
---


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

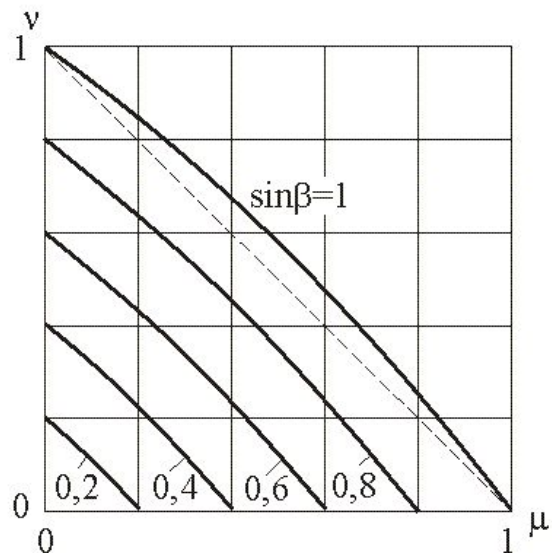
$$v_0 = \sin \beta ; \mu_{\text{н}} = \sin \beta ; \eta = -1$$

# Механические характеристики реального ДИД

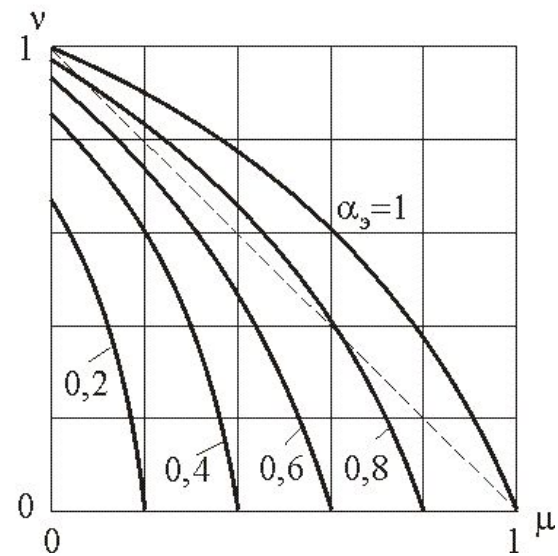
амплитудное управление



фазовое управление



амплитудно-фазовое управление



# Торможение и реверсирование АД

