

# Асинхронные двигатели

# Электромагнитный

$$M = \frac{P_{\text{МХ}}}{\Omega}, \quad \Omega = 2\pi n = 2\pi(1-s)n_1 = \frac{(1-s)\omega_1}{p}, \quad n_1 = \frac{f_1}{p}$$

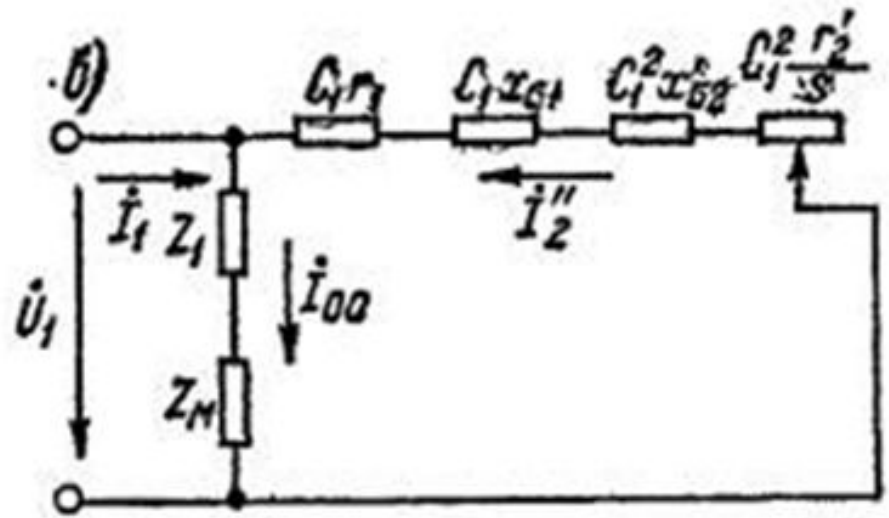
$$P_{\text{МХ}} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$$

$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\Omega_1} \quad P_{\text{ЭМ}} = m I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} \quad M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}} p}{2\pi f_1}$$

$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}$$



# Электромагнитный момент

Полагаем  
м

$$\dot{c}_1 = c_1$$

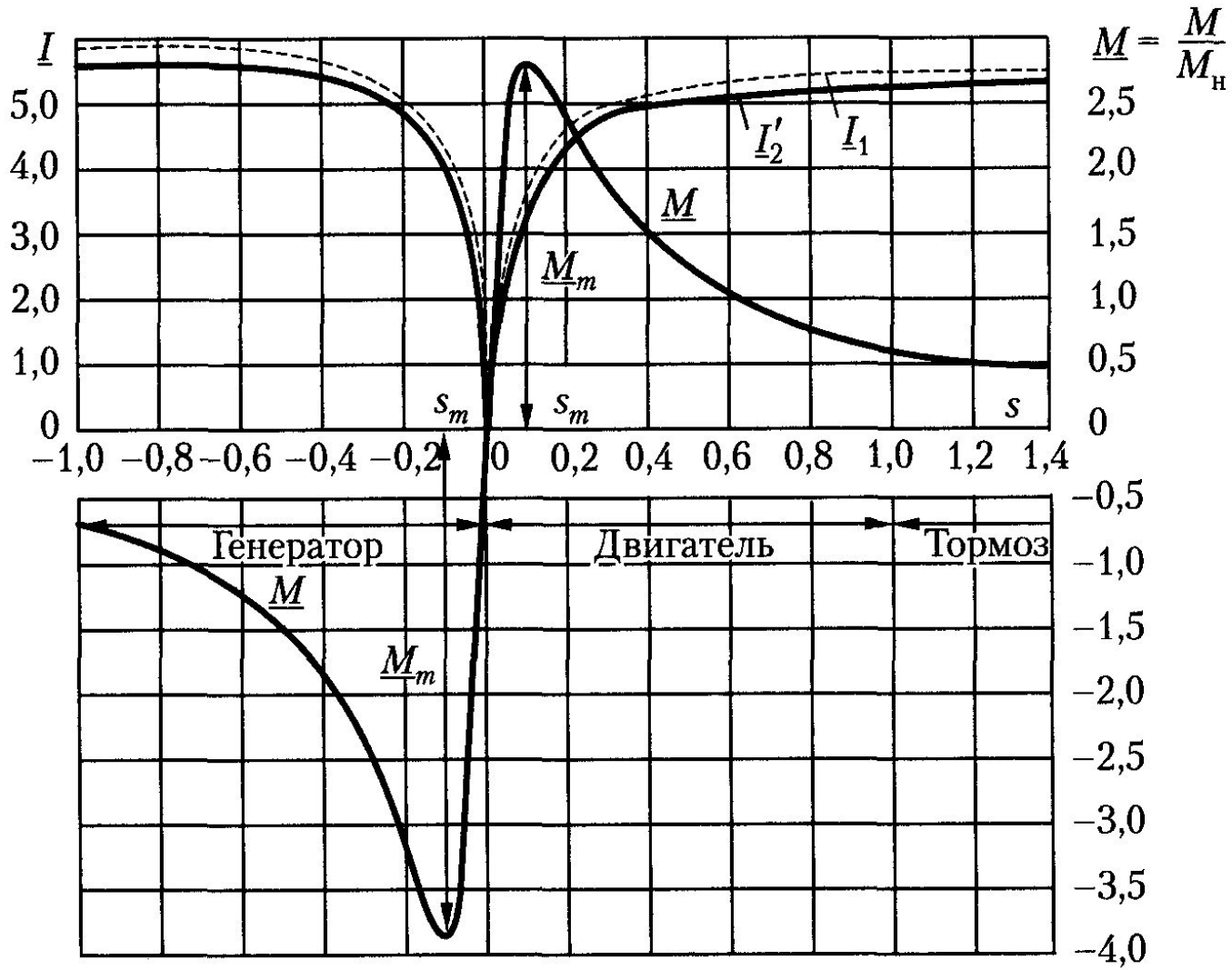
$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}}.$$

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_1} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left(r_1 + \frac{c_1 r'_2}{s}\right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2 \right]}.$$

$$U_1 = \text{const.} \quad M = f(s)$$

$$s > 0 \quad M > 0 \quad s < 0 \quad M < 0$$

$$s = 0 \text{ и } s = \pm\infty \quad M = 0$$



$$\frac{M}{M_H} = \frac{M}{M_H}$$

$$i_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\frac{r_2'}{s} + jx_{\sigma 2}'}$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2}}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

# Критическое скольжение и максимальный

$$M = \frac{\rho m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

$$U_1 = \text{const} \quad f = \text{const}$$

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

$$y = \frac{1}{s} \quad M = \frac{Ay}{B + Cy + Dy^2}$$

$$A = \frac{\rho m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1} \quad B = r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2 \quad C = 2c_1 r_1 r_2' \quad D = c_1^2 r_2'^2$$

$$\left[ \frac{dM}{dy} \right]_{y=y_m} = \frac{A(B - Dy'_m)}{(B + Cy_m + Dy_m^2)^2} = 0 \quad y_m = \pm \sqrt{\frac{B}{D}} \quad s_m = \pm \sqrt{\frac{D}{B}}$$

$$s_m = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}}$$

$$M_m = \pm \frac{A}{\pm C + 2\sqrt{BD}}$$

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 \left[ \pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2} \right]}$$

$$S_m = \pm \frac{c_1 r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}}$$

в нормальных асинхронных машинах  $r_1 \ll (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})$ ,

$$S_m = \pm \frac{c_1 r'_2}{x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2}}$$

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 c_1 (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})}$$

$$c_1 = 1$$

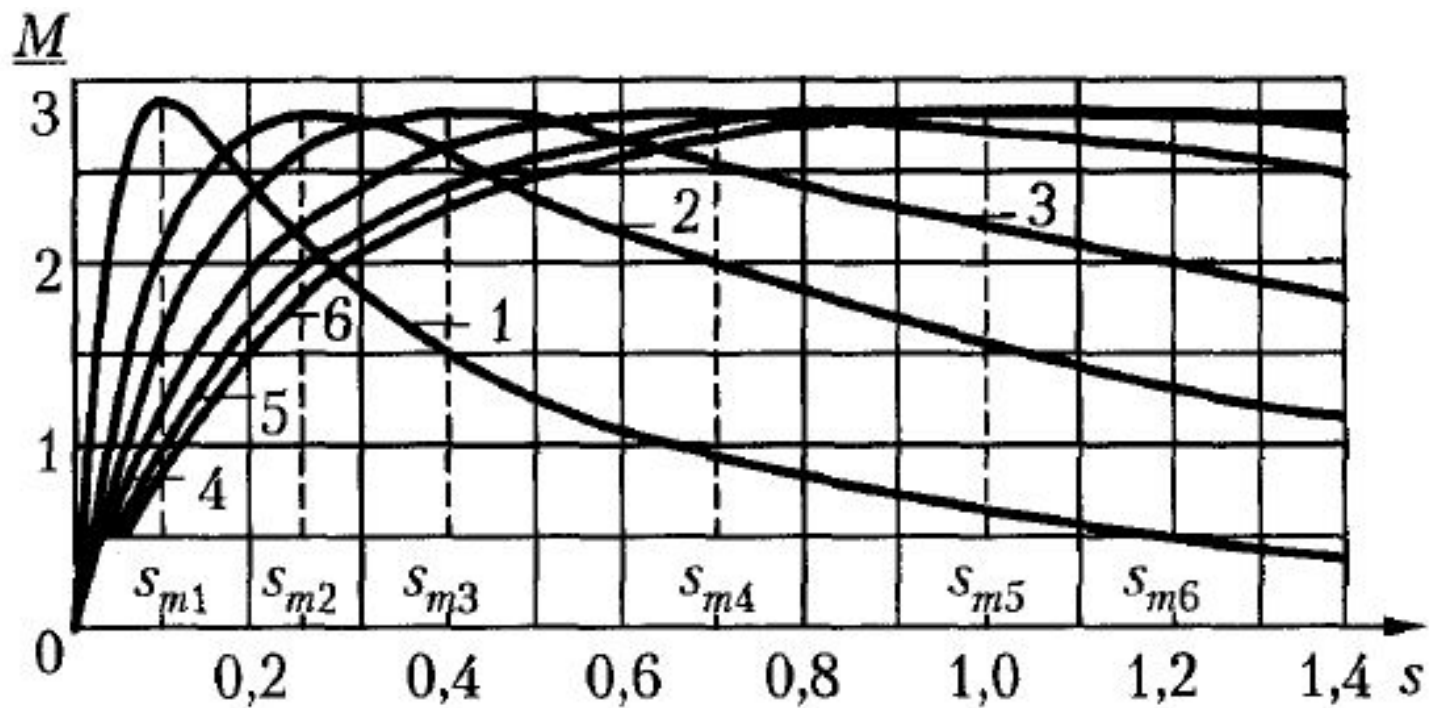
$$S_m \sim r'_2$$

$$S_m \sim \frac{1}{x_K}$$

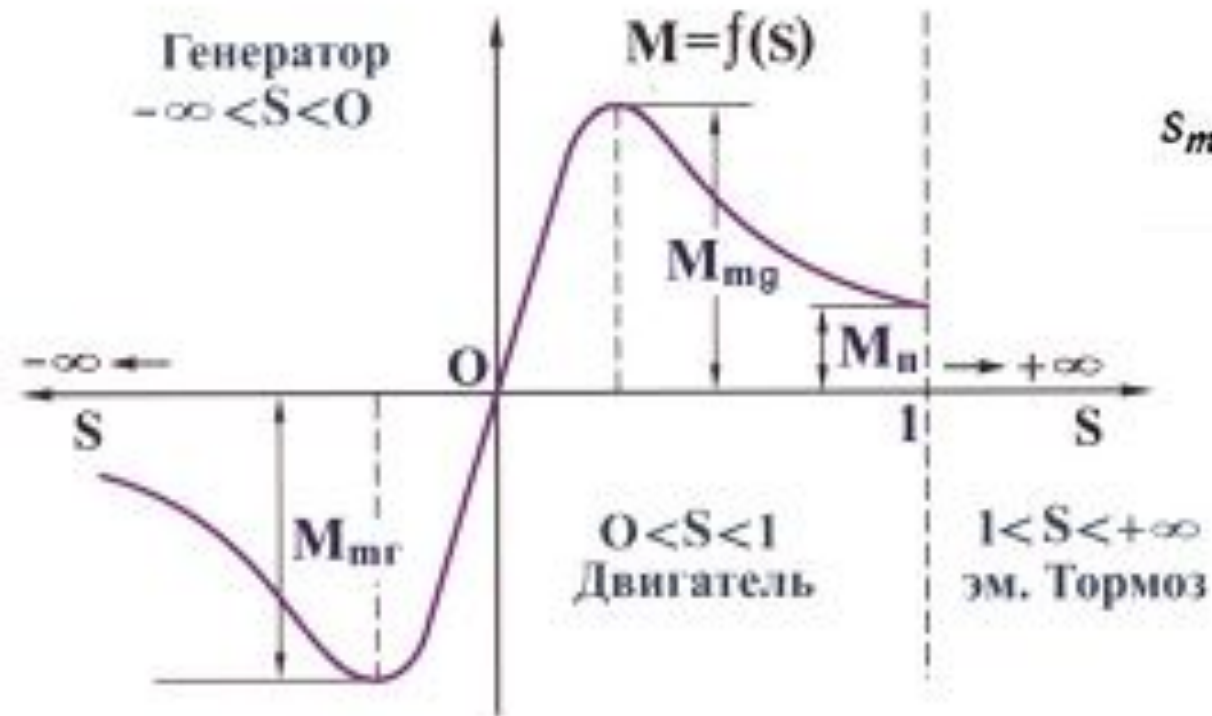
$$M_m \sim U_1^2$$

$$M_m \sim \frac{1}{x_K}$$

Кривые электромагнитного момента асинхронной машины при различных значениях активного сопротивления вторичной цепи



# Электромагнитный момент



$$s_m = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}}$$

$$M_m = \pm \frac{\rho m_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}]}$$



## Величина электромагнитного момента по отношению к его максимальному значению

$$y_m = \pm \sqrt{\frac{B}{D}} \quad \sqrt{B} = \pm y_m \sqrt{D}; \quad B = Dy_m^2$$

$$\frac{M}{M_m} = \frac{y(C + 2y_m D)}{y_m^2 D + Cy + Dy^2} = \frac{\frac{C}{y_m D} + 2}{\frac{y_m}{y} + \frac{C}{y_m D} + \frac{y}{y_m}} \quad y_m = 1/s_m \text{ и } y = 1/s$$

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2 + as_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + as_m} \quad a = \frac{2r_1}{c_1 r_2'} \quad as_m \approx 0$$

$$\frac{M}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

формула  
Клосса

# ПУСКОВОЙ

МОМЕНТ

$$M = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_1} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( r_1 + \frac{c_1 r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

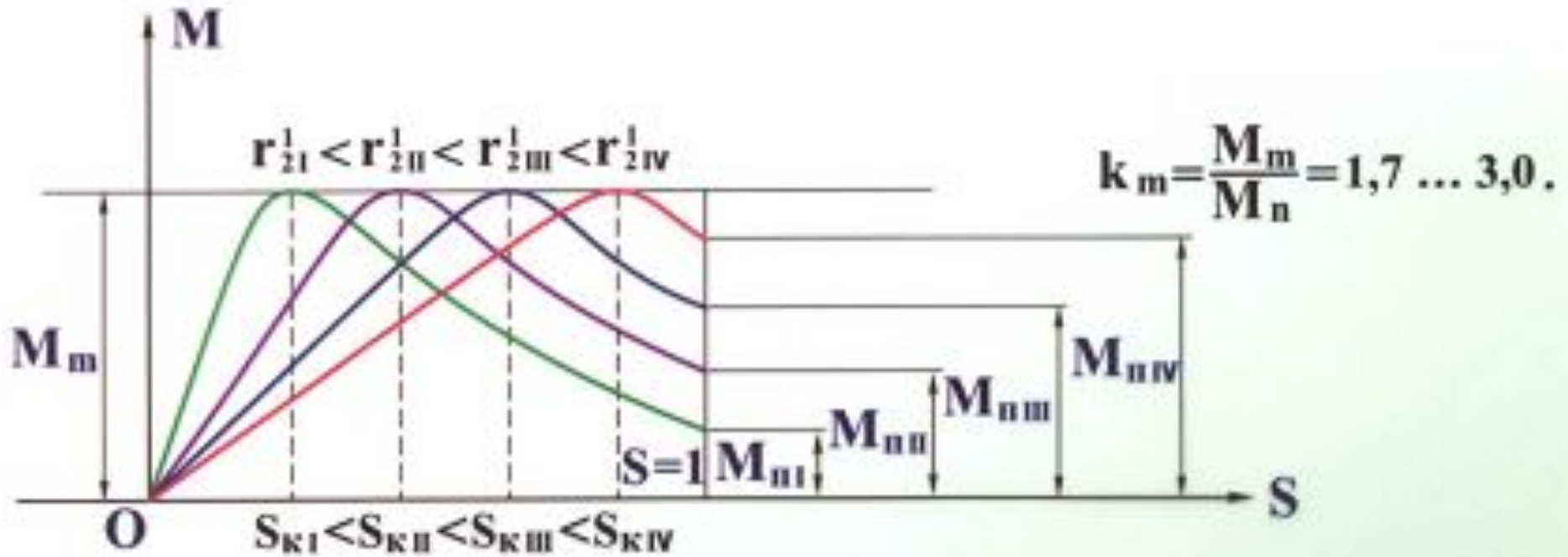
$s=1$

$$M_{\text{п}} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2]}$$

$$s_m = 1 \quad M_{\text{п}} = M_m \quad s_m = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}} \quad r_2' = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}} \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x'_{\sigma 2}}{\frac{r_2'}{s}} \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x'_{\sigma 2}}{r_2'}$$

# Влияние активного сопротивления



$$M_n = \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_1 [(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2]}$$

$$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 0,7 \dots 1,8 ;$$

$$k_{ni} = \frac{I_n}{I_n} = 5 \dots 7.$$

$$M = \frac{\rho m_1}{\omega_1} I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$\frac{I_{2m}'}{I_{2n}'} = \sqrt{\frac{s_m M_m}{s_n M_n}} = 2,5 \dots 3,5$$

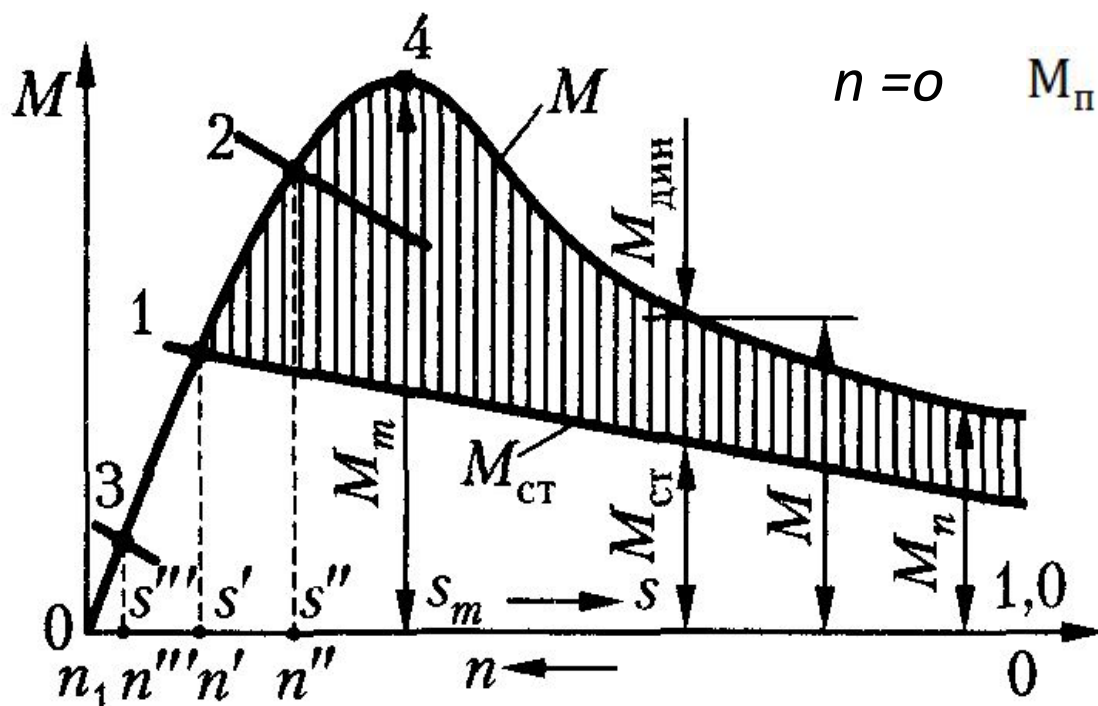
# Механическая характеристика

Полезный вращающий момент на валу двигателя -

$$n = f(M_2) \quad M_2 = f(M_2) \quad U_1 = const \quad f_1 = const$$

$$M_0 = \frac{P_{мх} + P_d}{\Omega}, \quad M_2 = M - M_0.$$

$$M_0 \approx 0 \quad M = f(n). \quad M = M_{ст} + M_{дин}, \quad M_{дин} = J \frac{d\Omega}{dt} = 2\pi J \frac{dn}{dt}$$



$$n = 0 \quad M_{п} > M_{ст} \quad M_{дин} > 0 \quad \frac{dn}{dt} > 0$$

$$M_{дин} = M - M_{ст} > 0.$$

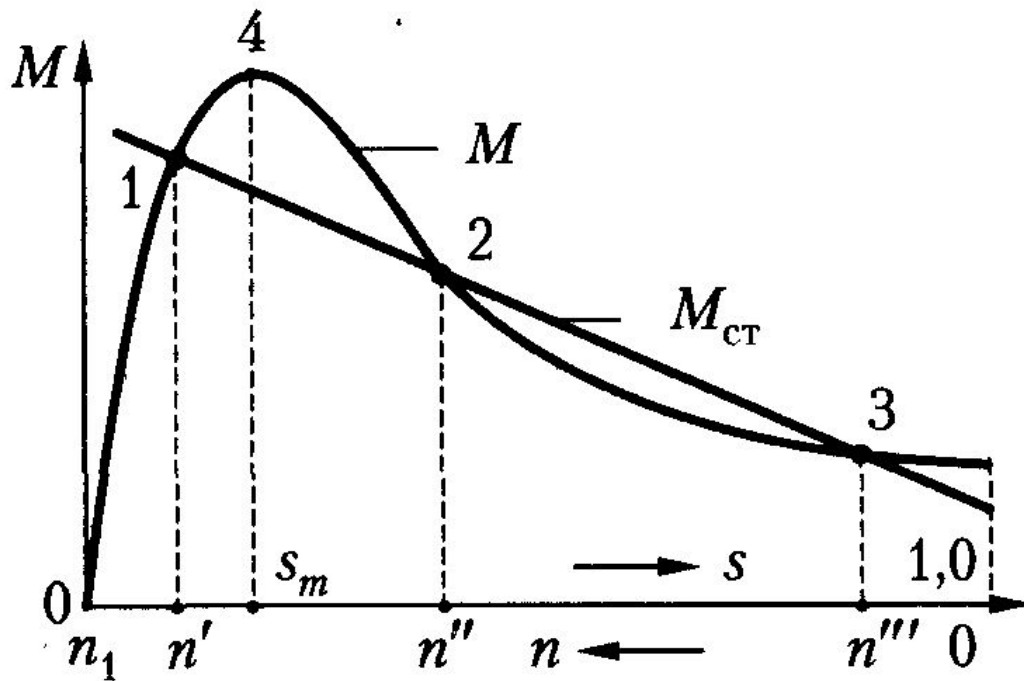
точка  $M = M_{ст}$   
1

точка  
 $M < M_{ст}^2 \quad M_{дин} < 0$

$$\frac{dn}{dt} < 0 \quad E_{2s} = sE_2$$

Жесткая механическая

# Условия устойчивой работы.



$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{\text{ст}}}{dn},$$

В точках 1 и 3

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{\text{ст}}}{dn},$$

устойчивая работа

в точке 2

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_{\text{ст}}}{dn}$$

неустойчивая работа

$$0 < s < s_m$$

# Перегрузочная способность асинхронного двигателя.

$0 < s < s_m$  устойчивый режим

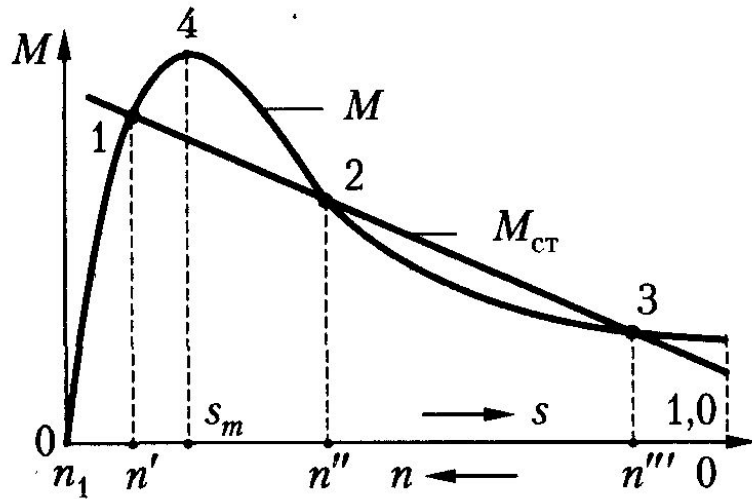
$$M_{ст} = M_m$$

Пр  $M_{ст} > M_m$  двигатель будет  
и затормаживаться  
работа асинхронного двигателя возможна  
при

$$0 < M < M_m$$

$$\hat{M}_m \sim U_1^2$$

всегда должно быть  $M_m > M_H$ .



кратность максимального момента

$$k_m = \frac{M_m}{M_H}$$

характеризующая перегрузочную способность двигателя.

$$k_m = \frac{M_m}{M_H} = 1,7 \dots 3,0$$

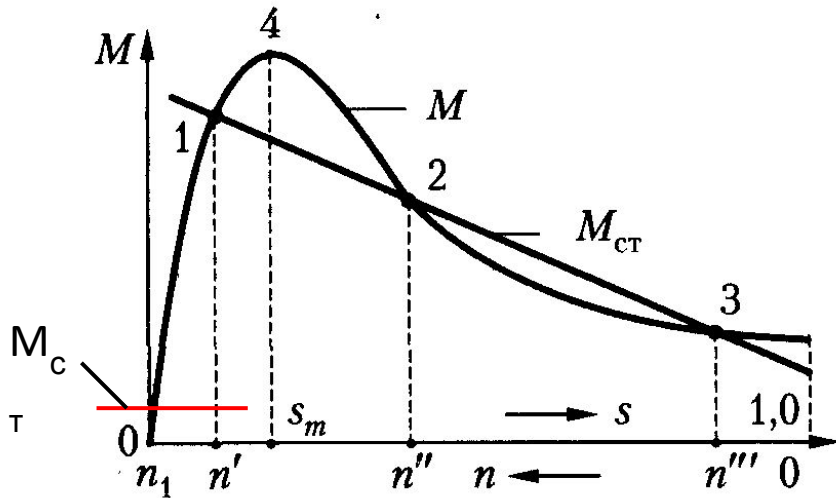
## Кратности начального пускового момента и пускового

Т Значения  $k_n$  и  $k_{ni}$  для асинхронных короткозамкнутых двигателей

$$k_n = \frac{M_H}{M_n} = 0,7 \dots 1,8$$

$$k_{ni} = \frac{I_H}{I_n} = 5 \dots 7$$

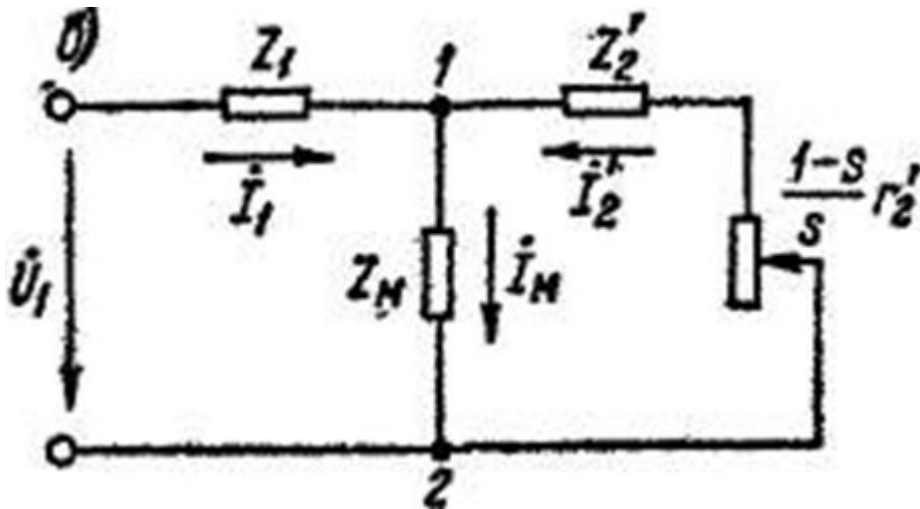
# Холостой ход асинхронного двигателя



$$M_{\text{CT}} = M_0$$

$$M_0 = \frac{p_{\text{MX}} + p_{\text{Д}}}{\Omega},$$

$$s \approx 0$$

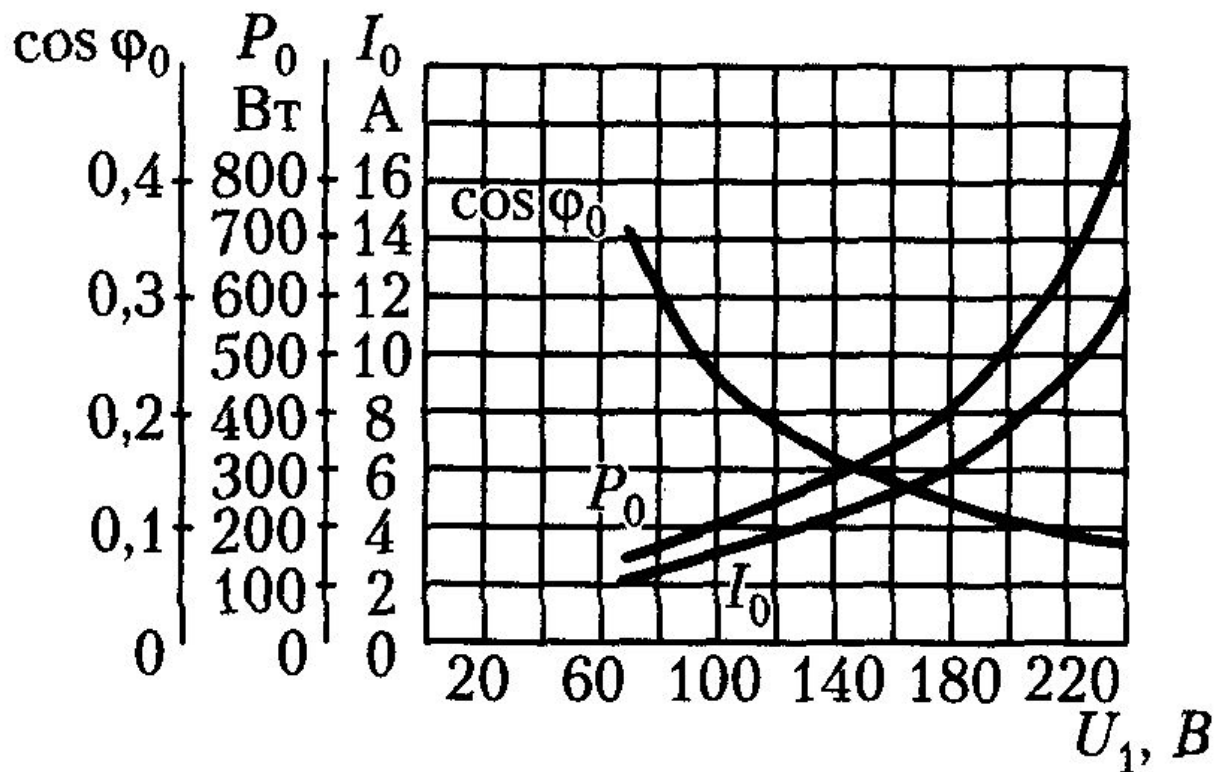


$$Z_M \gg Z_1$$

$$Z_0 = Z_M$$

# Опыт холостого хода

$$I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_1).$$



$$s \approx 0$$

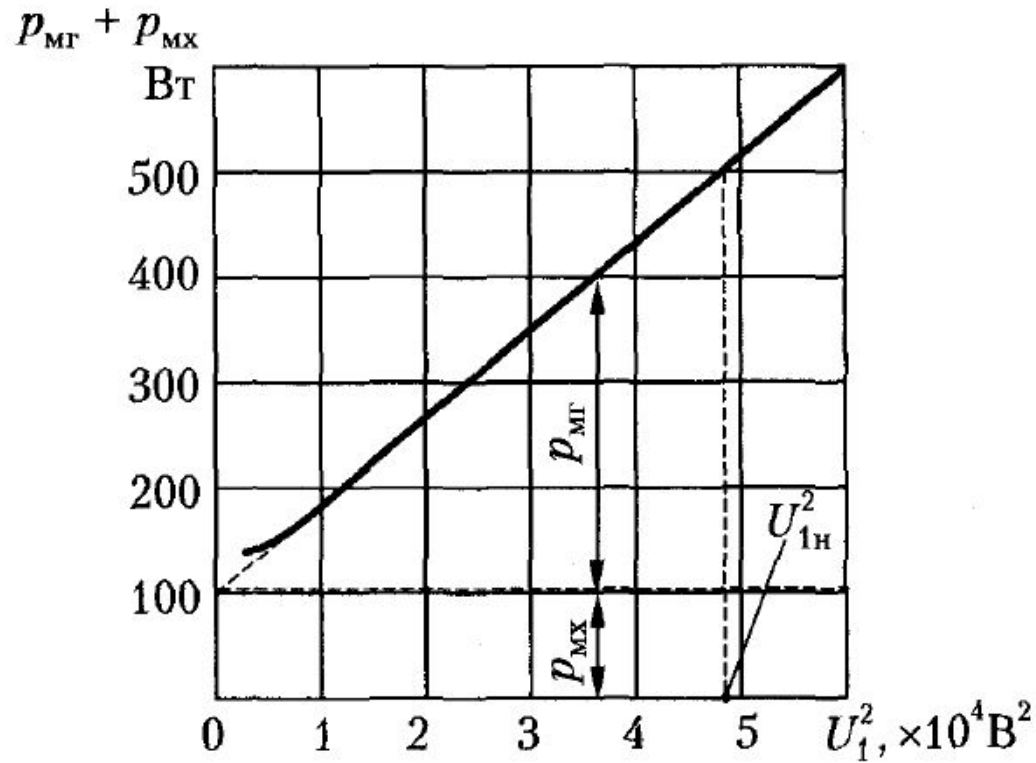
$$I_2 \approx 0$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad U_{10} = E_1 \quad E_1 = \pi \sqrt{2} \Phi f_1 w_1 k_{061} \quad U_{10} \sim \Phi$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi}} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_0}$$



## Разделение потерь холостого хода



$$P_0 = p_{MХ} + p_{MГ} + p_{эл1},$$

$$P_0 - p_{эл1} = p_{MГ} + p_{MХ}.$$

$$p_{MХ} \approx \text{const}; p_{эл1} = 3I_0^2 r_1; p_{MГ} = C_1 f_1^v \Phi_\delta^2 \approx CU_1^2.$$

$$p_{MГ} + p_{MХ} = f(U_1^2),$$

# Определение параметров намагничивающего контура

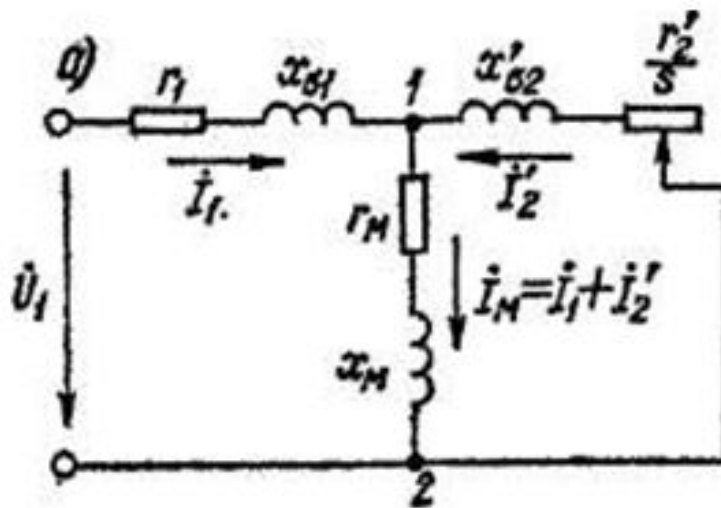
$$P_{мг} = P_0 - p_{эл1} - p_{мх}$$

$$Z_M = r_M + jx_M$$

$$R_M = \frac{P_{мгн}}{m_1 I_{0H}^2}$$

$$Z_M = \frac{U_1}{I_{0H}}$$

$$x_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}$$



# Характеристики короткого замыкания

опыт производится при замыкании коротко вторичной обмотке и заторможенном роторе

$$n=0 \quad S=1$$

$$I_{1K}, P_{1K}, r_K, x_K, z_K = f(U_{1K})$$

$$U_K = (0,25 - 0,4)U_{1H}$$

$$P_{1K} = p_{эл1} + p_{эл2} = m_1 I_1^2 r_K$$

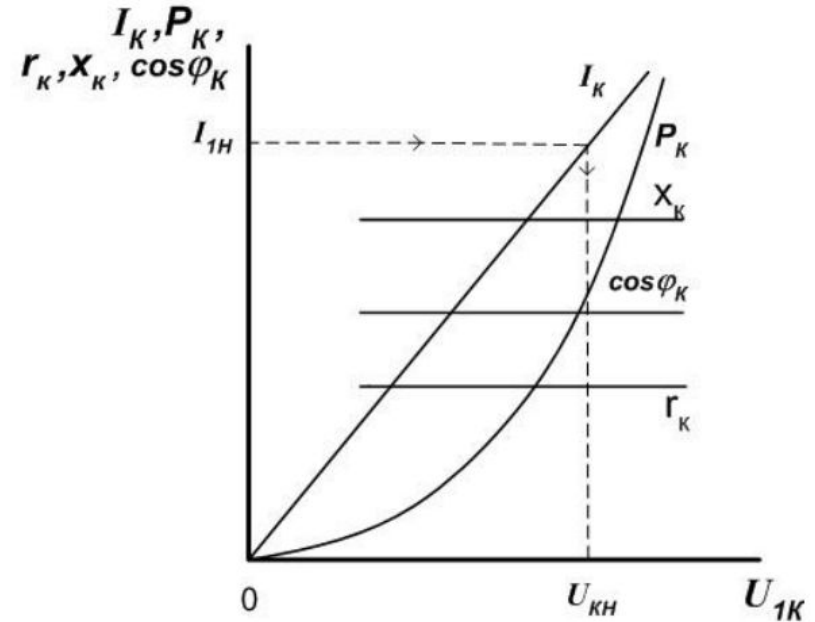
$$Z_K = Z_1 + Z_2'$$

$$r_K = r_1 + r_2'; \quad x_K = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$$

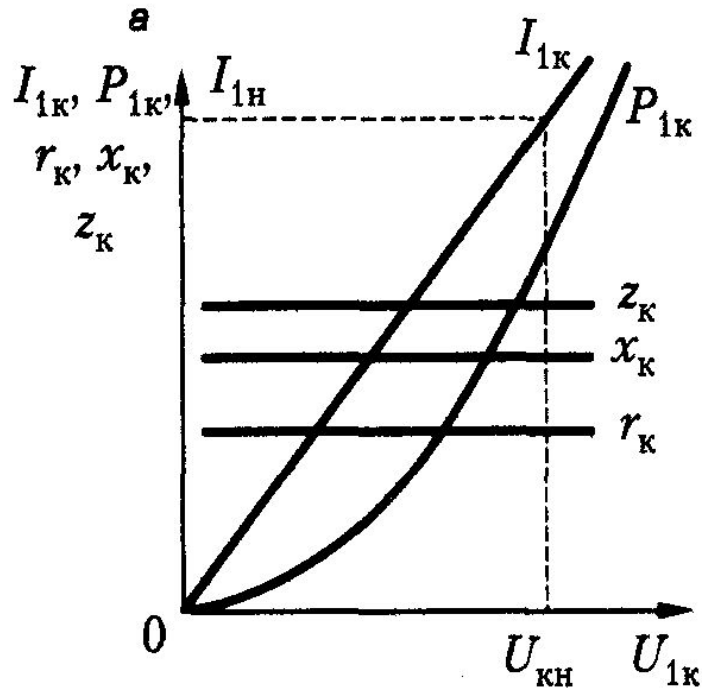
$$r_K = \frac{P_{1K}}{m_1 I_{1K}^2} \quad z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}$$

$$\cos \phi_K = const$$



# Характеристики короткого замыкания расчет пускового тока и момента



Пусковой ток

$$I_{пн} = I_H \cdot U_H / U_{кн},$$

$U_{кн}$  напряжение короткого замыкания при  $I = I_H$

Пусковой момент

$$M_{пн} = M_{кн} \left( \frac{I_{пн}}{I_H} \right)^2.$$

Мощность при пуске

$$P_{пн} = \left( \frac{U_H}{U_{кн}} \right)^2 P_{кн}$$

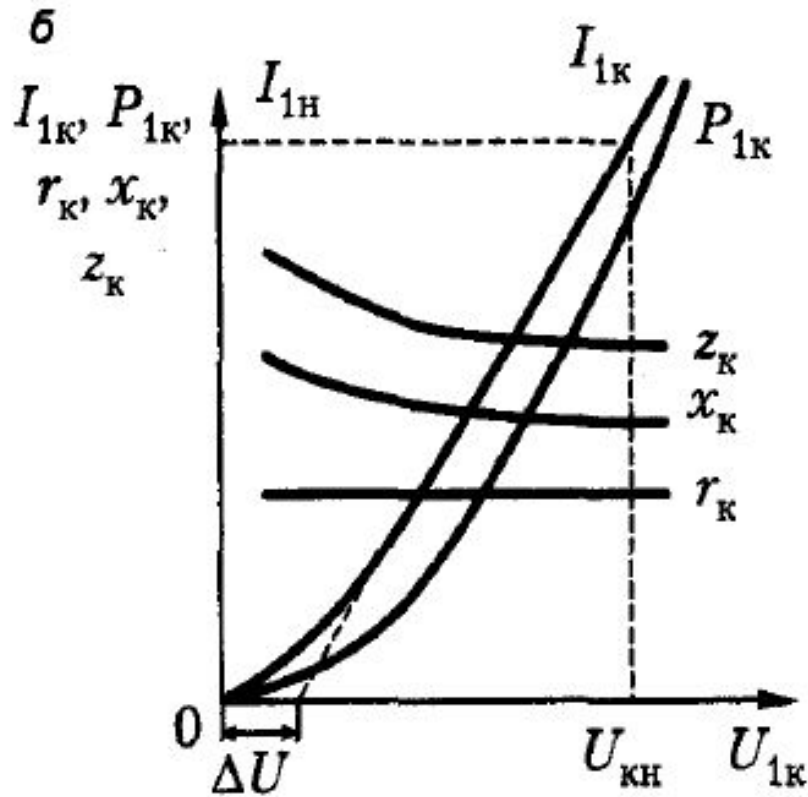
Машина с фазным ротором

(с постоянными параметрами)

$$k_{пi} = \frac{I_{пн}}{I_H},$$

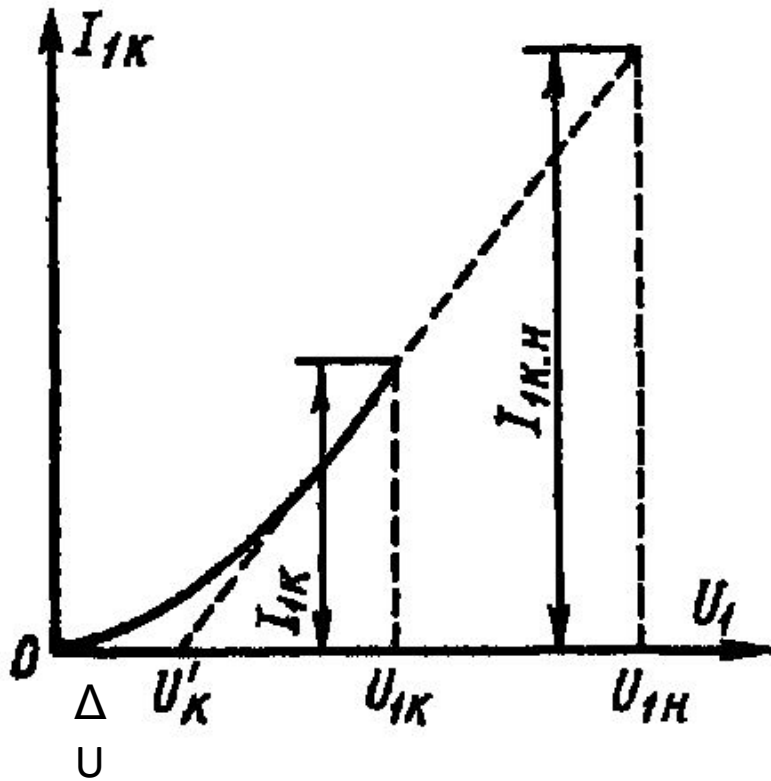
$$k_{п} = \frac{M_{пн}}{M_H}.$$

# Характеристики короткого замыкания



Машина с короткозамкнутым ротором  
 Видно влияние насыщения коронок зубцов

В результате насыщения проводимость для потоков пазового рассеивания уменьшается, а следовательно, по мере увеличения тока ротора уменьш  $x_{\sigma 2}$  ся и



$$I_{1K} = (2,5 - 3,0)I_{1H}$$

Пусковой

$$I_{1K, H} = \frac{U_{1H} - \Delta U}{U_{1K} - \Delta U} I_{1K},$$

Мощность при  
пуске

$$P_{1K, H} = \frac{(U_{1H} - \Delta U)^2}{(U_{1K} - \Delta U)^2} P_{1K}.$$

Пусковой  
момент

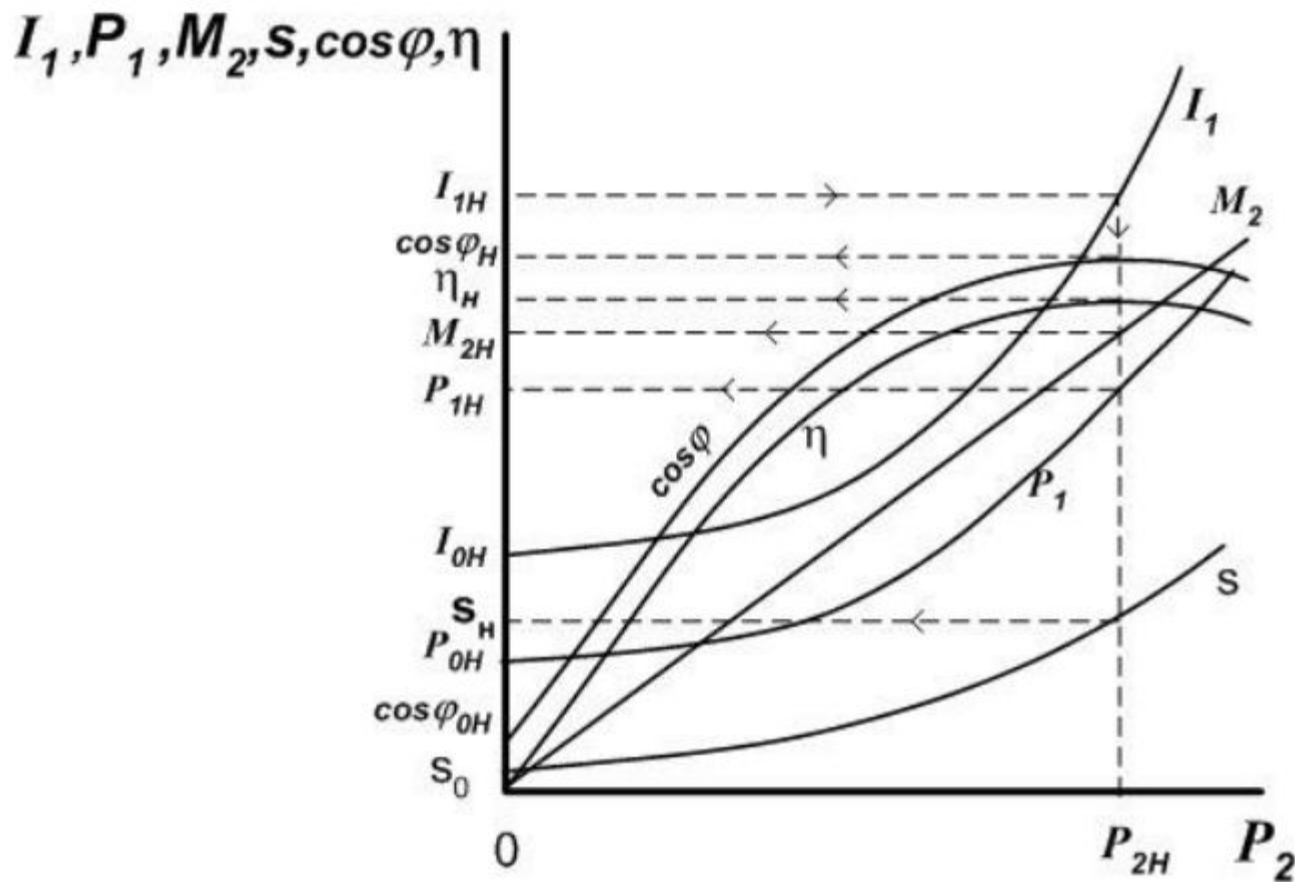
$$M_{п. H} = \left( \frac{I_{1K, H}}{I_{1K}} \right)^2 M_{K1}$$

# Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , первичного тока  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos \phi$ , момента на валу  $M_2$ , скольжения  $s$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при работе с номинальными напряжением и частотой.

$$U_1 = \text{const}$$

$$f_1 = \text{const}$$



# Пуск трехфазных асинхронных двигателей

1. Двигатель должен развивать при пуске надлежащий пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной частоты вращения.
2. Пусковой ток должна быть ограничен таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети.
3. Схема пуска должна быть по возможности простой, а количество и стоимость пусковых устройств - малыми.

Двигатели мощностью 3...10 кВт в обычных условиях допускают до 5...10 включений в час.

## Способы пуска асинхронных двигателей

а) Прямой

$$I_{\text{п}} = (4...6,5)I_{\text{н}}$$

падение напряжения в сети не более 10...15%

$$I_{\text{п}} \approx \frac{U_1}{Z_{\text{к}}}$$

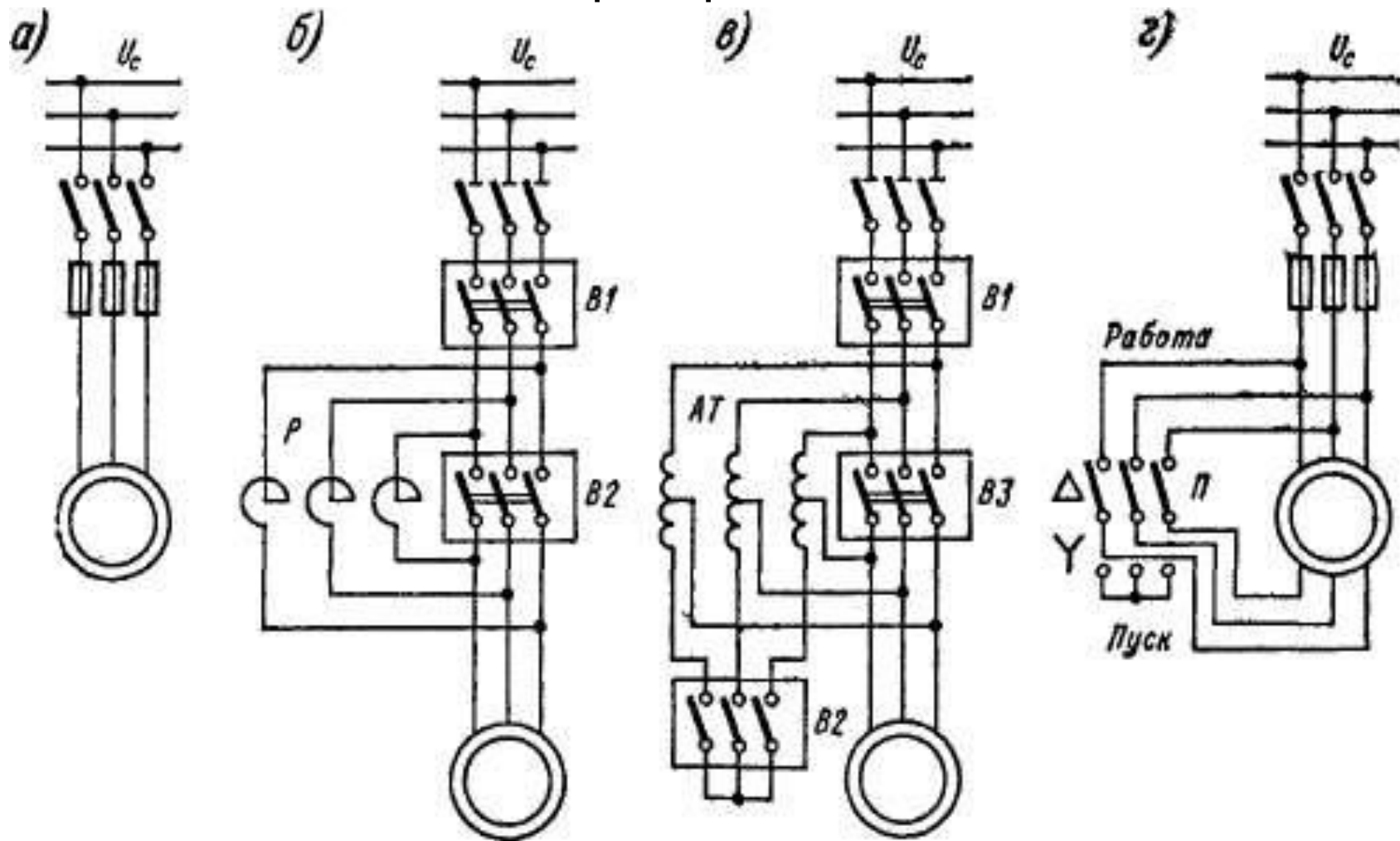
б) Способы пуска двигателя при пониженном напряжении

$$M_{\text{п}} \sim U^2$$

Пуск двигателя на холостом ходу или под неполной нагрузкой.



# Пуск двигателей с кз ротором



Схемы способов пуска двигателей с короткозамкнутым ротором: а — прямой; б — реакторный; в — автотрансформаторный; г — с переключением со звезды на треугольник

прямой

$$I_{п.п} = \frac{U_{н}}{\sqrt{r_{к}^2 + x_{к}^2}}$$

реакторны

й

$$I_{п.р} = \frac{U_{н}}{\sqrt{r_{к}^2 + (x_{к} + x_{р})^2}}$$

$$\frac{I_{п.п}}{I_{п.р}} = \sqrt{\frac{r_{к}^2 + (x_{к} + x_{р})^2}{r_{к}^2 + x_{к}^2}}$$

$$\frac{M_{п.п}}{M_{п.р}} = \frac{r_{к}^2 + (x_{к} + x_{р})^2}{r_{к}^2 + x_{к}^2}$$

$$M_{п} = \frac{m_1 I_{п}^2 r_2'}{\Omega_1}$$

автотрансформаторн

ый – коэффициент понижения напряжения

автотрансформатора

$I_{пд}$  – пусковой ток

$I_{пс}$  – пусковой ток  
сети

Если пусковой автотрансформатор понижает пусковое напряжение двигателя в  $k_{ат}$  раз, то пусковой ток в двигателе или на стороне низкого напряжения трансформатора  $I_{п.д}$  уменьшается также в  $k_{ат}$  раз, а пусковой ток на стороне высокого напряжения автотрансформатора или в сети  $I_{п.с}$  уменьшается в  $k_{ат}^2$  раз. Пусковой момент  $M_{п}$ , пропорциональный напряжению на зажимах двигателя, уменьшается также в  $k_{ат}^2$  раз.

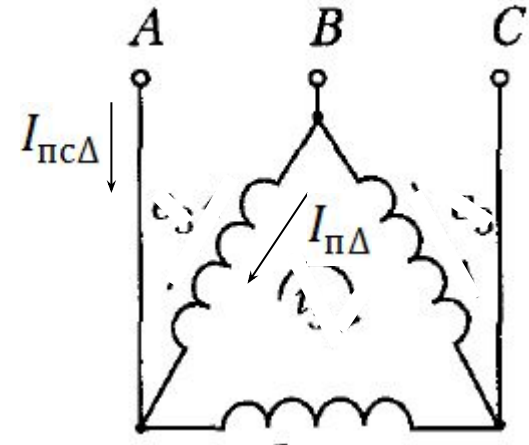
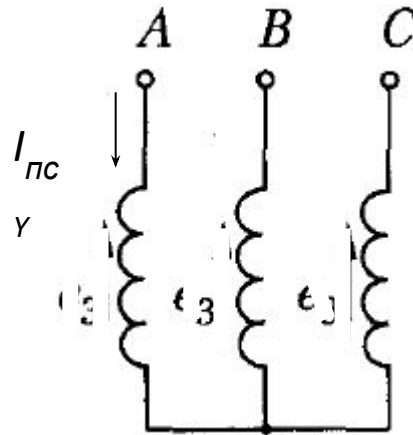
Если же сравнивать условия пуска при одинаковых значе  $I_{п.с}$  то пусковой момент при автотрансформаторном  $k_{ат}^2$ ске будет в раз больше, чем при реакторном.  $M_{п.ат}$

Переключение со звезды на  
треугольник

$$I_{псY} = I_{пY} = \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_K}$$

$$I_{пс\Delta} = \sqrt{3}I_{п\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_1}{Z_K}$$

$$\frac{I_{псY}}{I_{пс\Delta}} = \frac{1}{3}$$



$$\frac{M_{пY}}{M_{п\Delta}} = \frac{I_{пY}^2}{I_{п\Delta}^2} = \frac{1}{3}$$

недостаток – коммутационные перенапряжения

# Пуск двигателя с фазным ротором

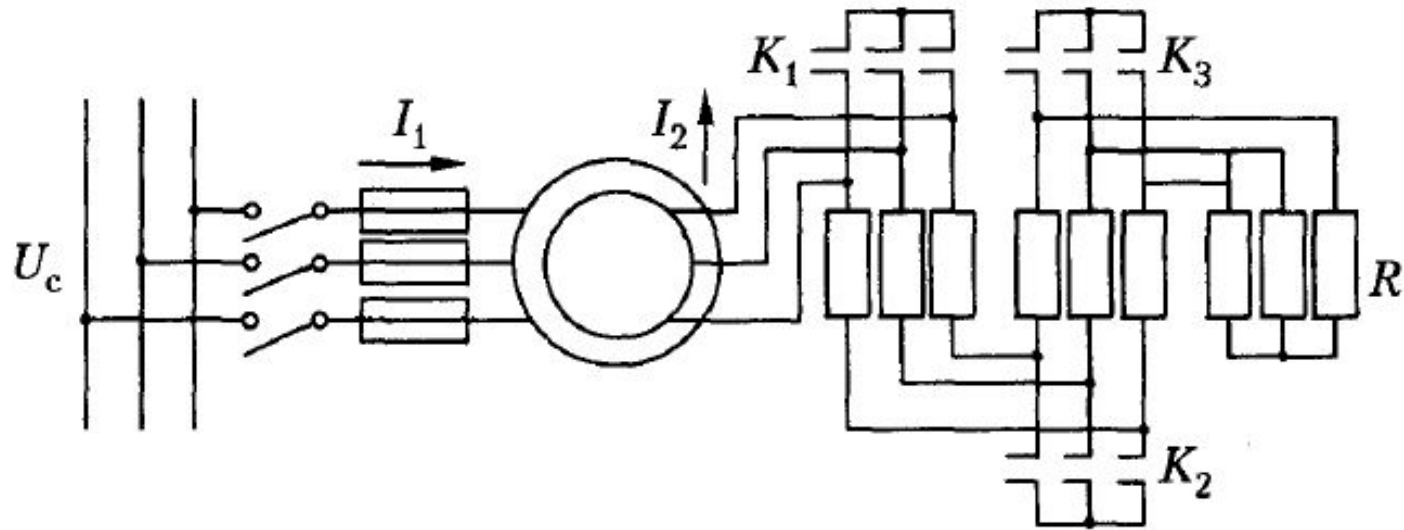
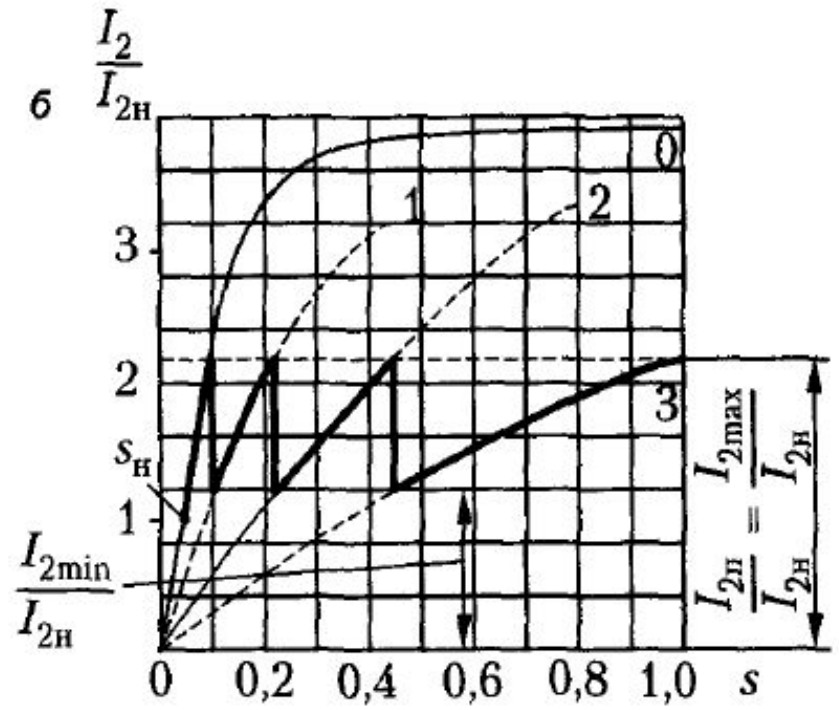
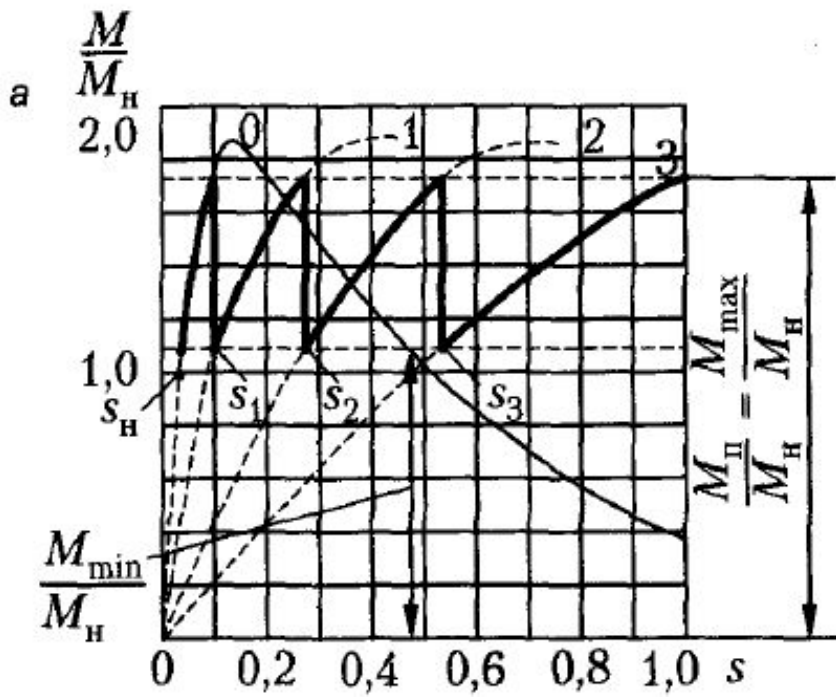


Схема пуска асинхронного двигателя с помощью пускового реостата

$$s_m = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2}}$$

$$s_m = \frac{r_2' + r_D'}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}} = 1$$



Последовательные изменения при реостатном пуске асинхронного двигателя: а - вращающего момента; б - тока

# Регулирование частоты вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей

$$n = n_1(1 - s).$$

1) регулирование частоты вращения первичного магнитного поля

$$n_1 = \frac{f_1}{p},$$

2) регулирование скольжения двигателя  $s$  при  $n_1 = const$

$$P_{\text{в.л.д}} = sP_{\text{эм}} \quad P_s = sP_{\text{эм}}$$

## Регулирование частоты вращения изменением первичной частоты

$$U_1 = E_1 = 4,44f_1\omega_1 k_{\text{об1}} \Phi_{\delta}.$$

$$\frac{U_1}{f_1} = const \quad U_{11}/U_{12} = (f_{11}/f_{12}) \sqrt{M_{\text{н1}}/M_{\text{н2}}}.$$

$\Phi_{\delta}$  превышающий нормальный, вызывает увеличение насыщения магнитной цепи и сильное увеличение намагничивающего тока, а уменьшение  $\Phi_{\delta}$  вызывает недоиспользование машины, уменьшение перегрузочной способности и увеличение тока  $I_2$  при неизменном значении  $M$ .

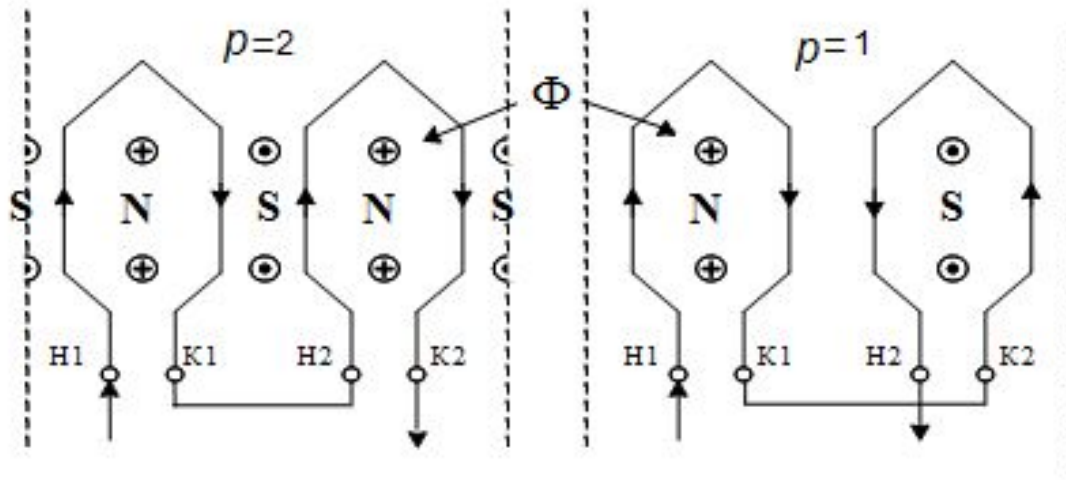
Поэтому в большинстве случаев целесообразно поддерживать  $\Phi_{\delta} = const$

## Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов

Асинхронные двигатели, в которых, в результате изменения числа полюсов обмотки статора частота вращения изменяется скачком, называются многоскоростными.

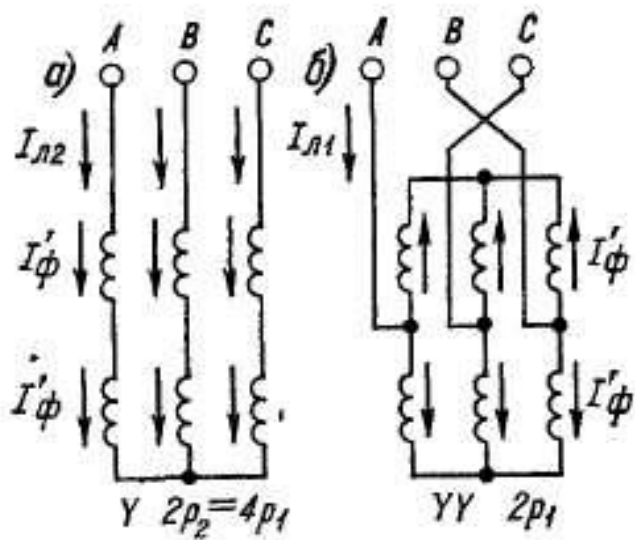
Выпускаются двух-, трех- и четырехскоростные АД.

Например, двигатель на  $f_1 = 50$  Гц с синхронными скоростями вращения 1500/1000/750/500 об/мин имеет одну обмотку с переключением на  $2p = 4$  и 8 и другую обмотку с переключением на  $2p = 6$  и 12.



$$n_1 = \frac{f_1}{p},$$

Принципиальная схема переключения обмотки статора с соотношением чисел полюсов 1 : 2

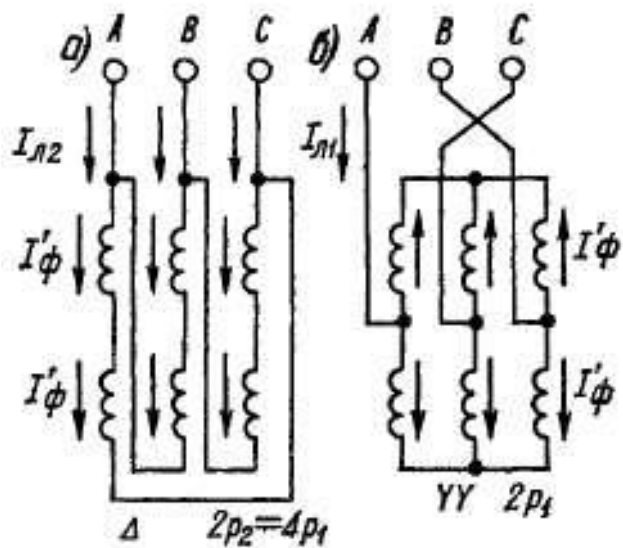


$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad M = \frac{P_{MX}}{\Omega},$$

$$P_2 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} I'_{\phi} \eta \cos \varphi_1; \quad P_1 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} 2I'_{\phi} \eta \cos \varphi_1.$$

$$P_1/P_2 = 2$$

$$M = \text{const}$$



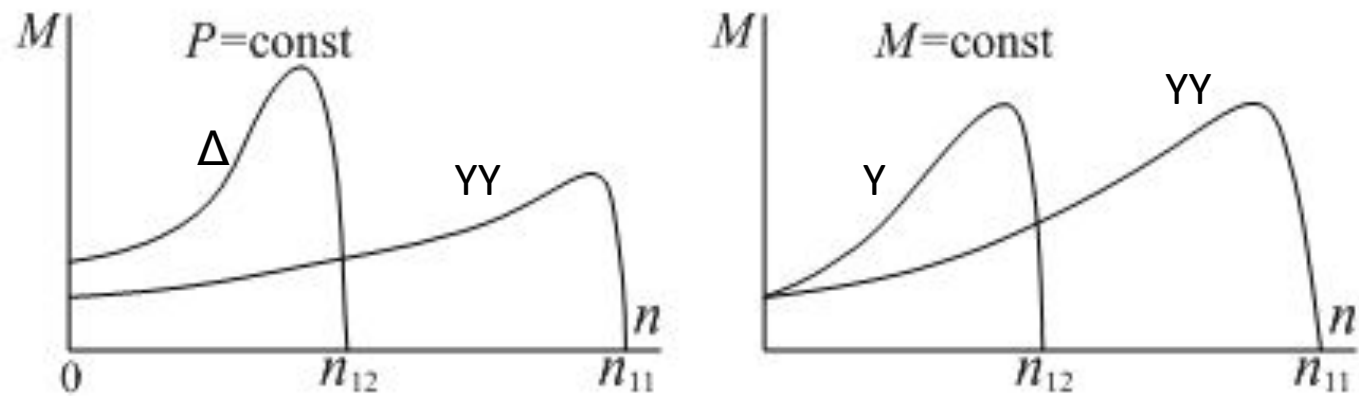
откуда

$$P_2 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} I_{\Delta 2} \eta \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} \sqrt{3} I'_{\phi} \eta \cos \varphi_1;$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} I_{\Delta 1} \eta \cos \varphi_1 = \sqrt{3} U_{\Delta 1} 2I'_{\phi} \eta \cos \varphi_1,$$

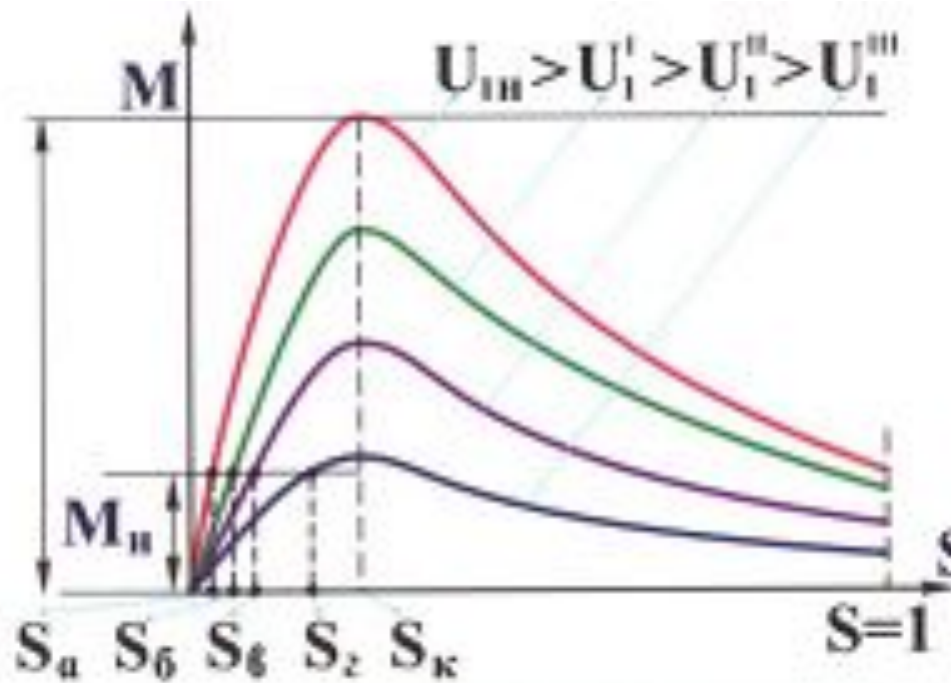
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15. \quad P = \text{const}$$



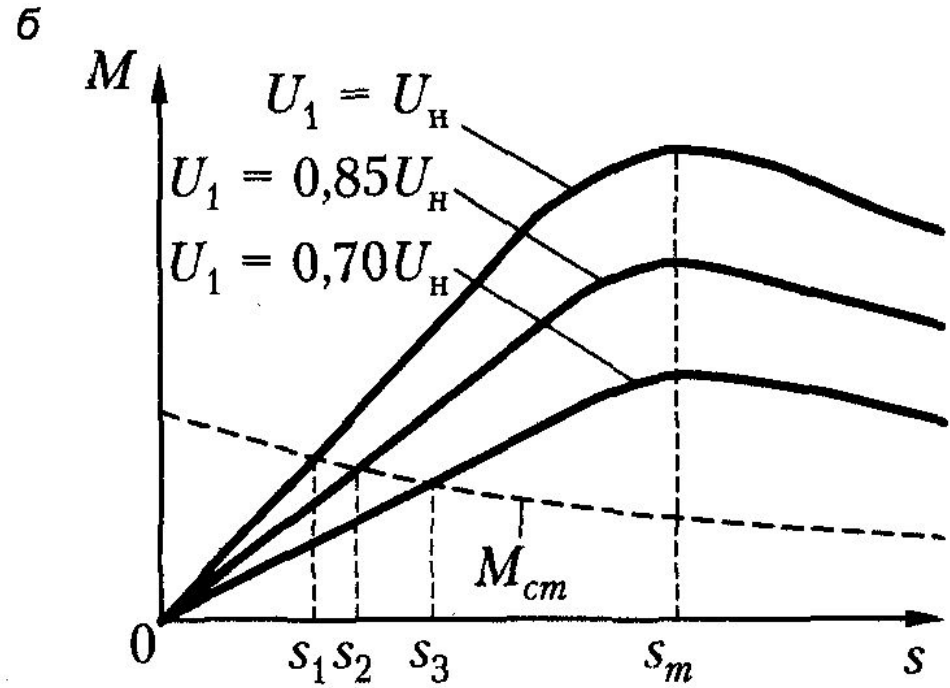
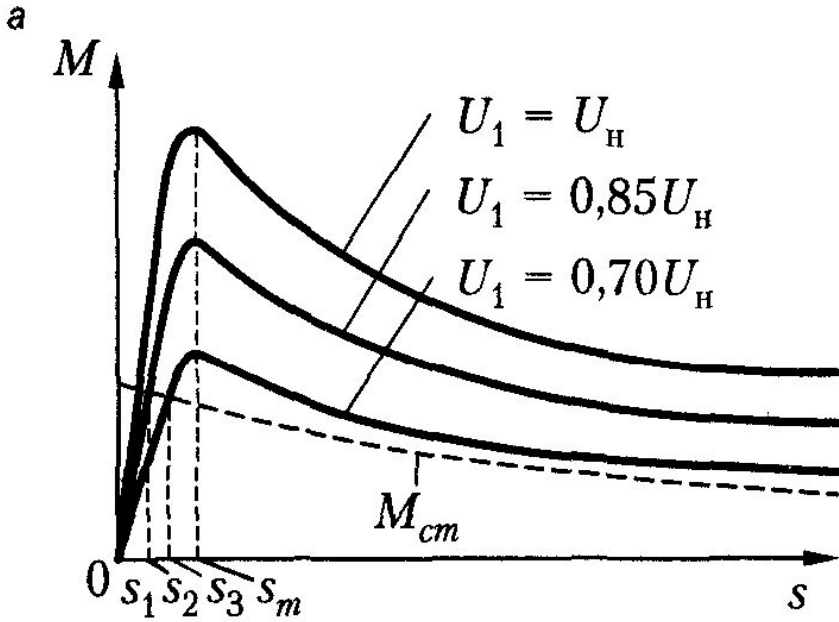


:  $n_{11}$  — синхронная частота вращения при числе пар полюсов  $p_1$ ,  
 $n_{12}$  — при числе пар полюсов  $p_2 = 2p_1$ .

# Работа при пониженном напряжении



$$M_{эм} = \frac{mp}{2\pi f_1} \frac{U_1^2}{(x'_{\sigma 2} + x_{\sigma 1})^2 + \left(\frac{r'_2}{s} + r_1\right)^2} \frac{r'_2}{s}$$



Механические характеристики асинхронных двигателей при различных значениях первичного напряжения: а - при малых; б - при больших значениях активного сопротивления цепи ротора

$$0 < s < s_m$$

$$P_s = sP_{эм}$$

# Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором

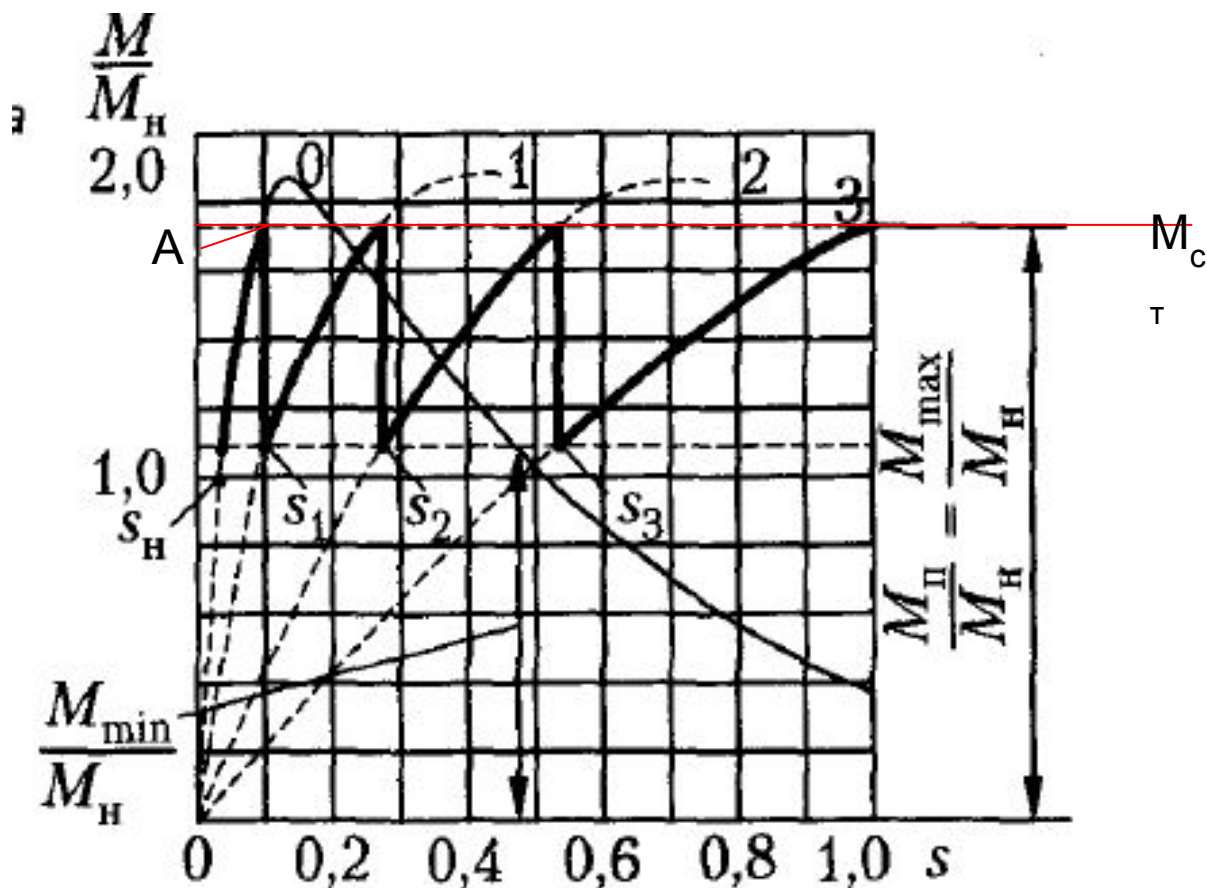
Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора

При  $M_{ct} = \text{const}$

$$s \sim s_m \sim r_2$$

$$\frac{s'}{s} = \frac{r_d + r_2}{r_2},$$

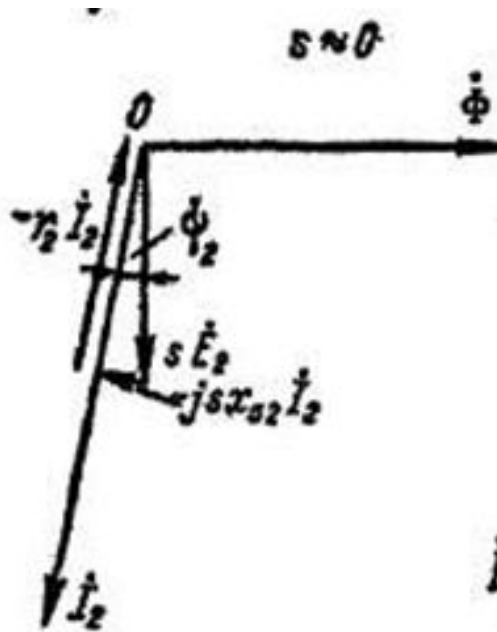
$$r_d = \left( \frac{s'}{s} - 1 \right) r_2.$$



Регулирование частоты вращения введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя.

$$P_s = sP_{эм}, \quad f_2 = sf_1$$

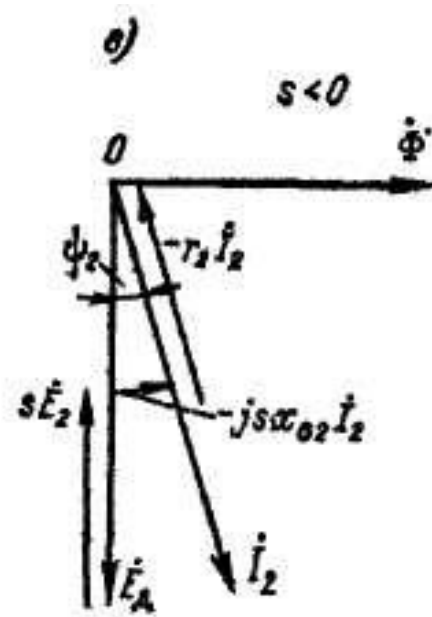
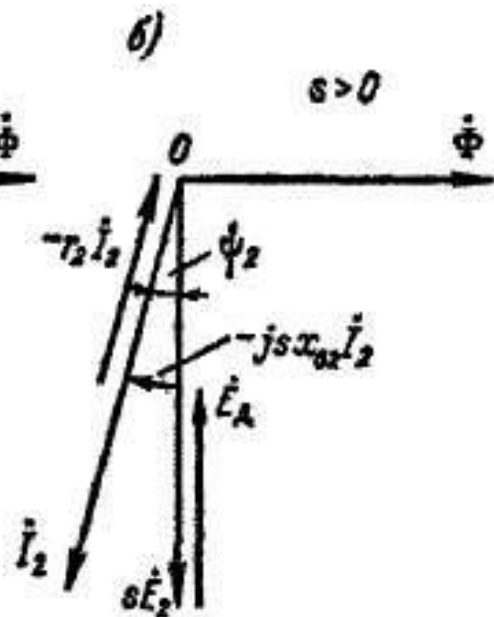
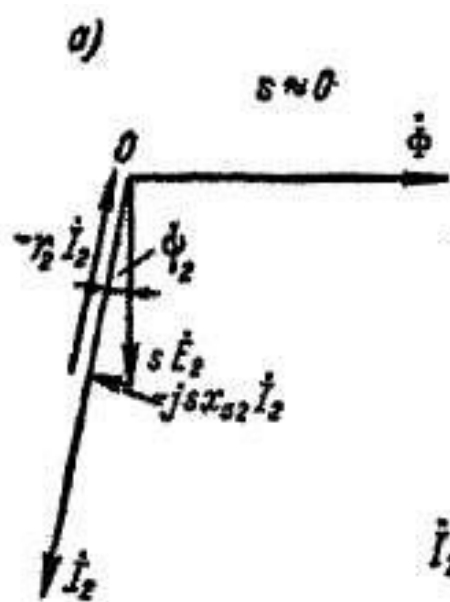
$$U_1 = const \quad f_1 = const \quad M_{ст} = const$$



$$E_D = 0$$

$$s\dot{E}_2 = (r_2 + jsx_{\sigma 2})\dot{I}_{2s}$$

$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}$$



$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2s} - \dot{E}_A}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 - \dot{E}_A}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}$$

$$i_2 = \frac{\dot{E}_{2s} + \dot{E}_D}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 + \dot{E}_D}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}$$

$$M = \dot{M} - \dot{M}_{CT} < 0 \quad M_{дин} < 0$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{sx_{\sigma 2}}{r_2}$$

Таким образом, с помощью добавочной э. д. с.  $E_D$ , путем изменения ее значения и направления, можно осуществить плавное двухзонное регулирование скорости двигателя: ниже и выше синхронной.

# Асинхронные короткозамкнутые двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками

## Глубокопазные двигатели

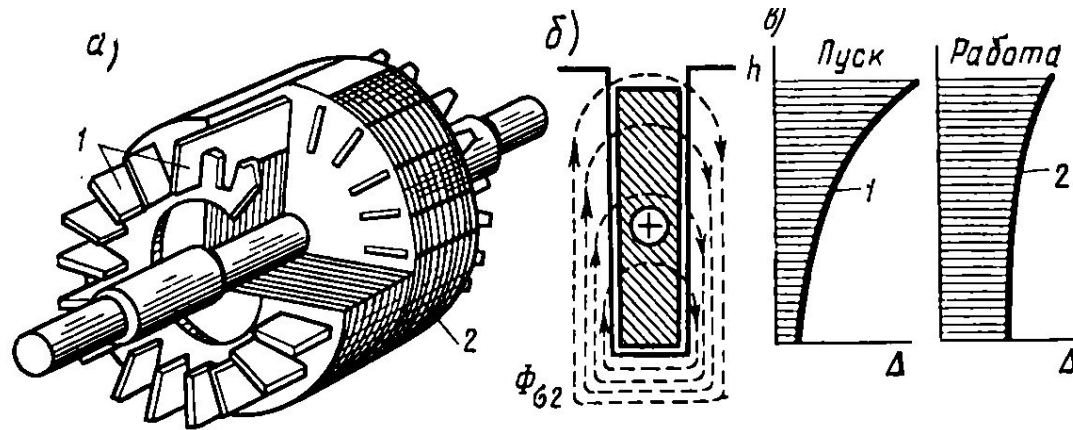


Рис. 5.9. Общий вид (а), разрез паза (б) ротора глубокопазного двигателя и разновидности пазов глубокопазных двигателей (в):  
 1 — стержни белчьей клетки; 2 — сердечник ротора

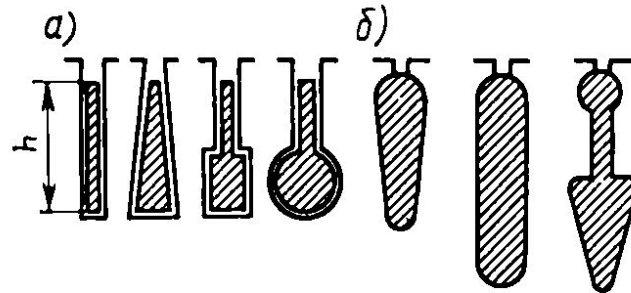
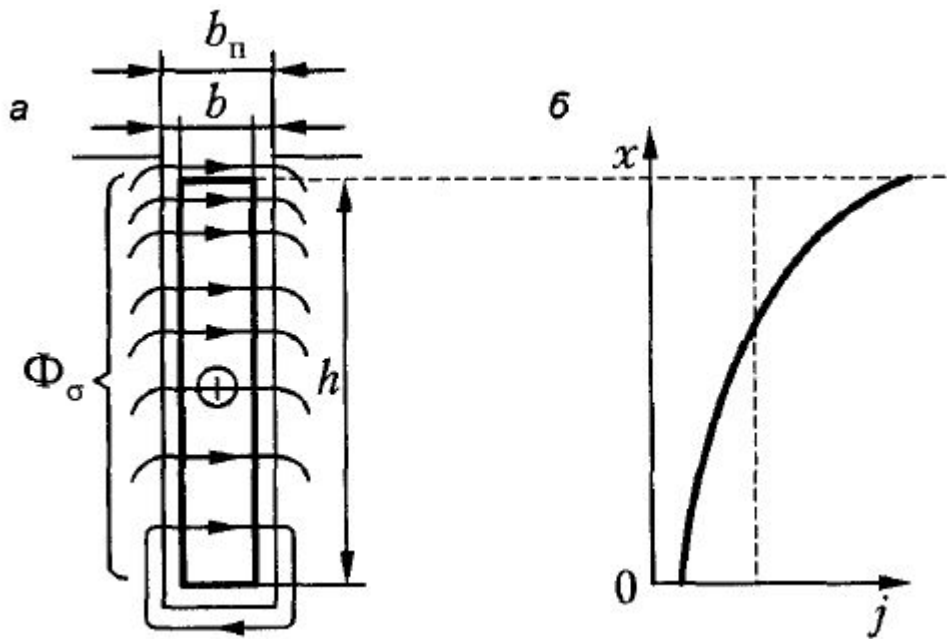
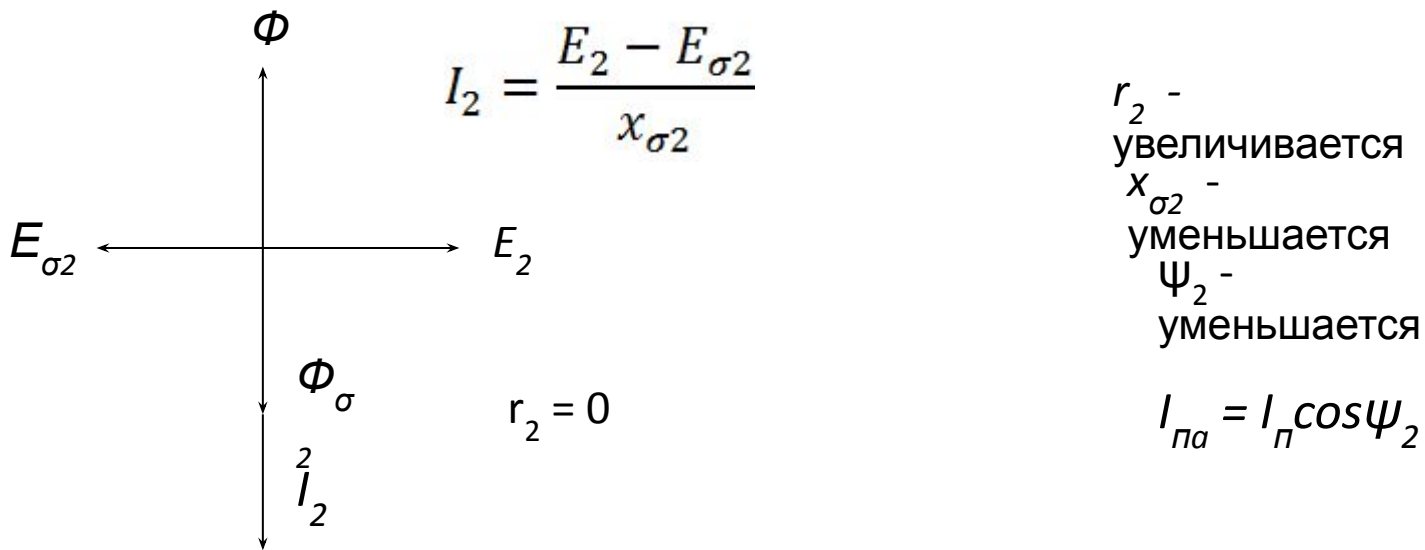


Рис. 5.12. Формы поперечного сечения стержней обмотки ротора асинхронных двигателей



Глубокопазный двигатель: а - форма паза ротора; б - распределение плотности тока  $j$  в стержне при пуске





## Параметры •беличьей клетки•.

$$\begin{cases} r'_2 = k_r r'_{2\Pi} + r'_{2Л}; \\ x'_{\sigma 2} = k_x x'_{\sigma 2\Pi} + x'_{\sigma 2Л}, \end{cases} \quad k_r = \xi \frac{sh2\xi + \sin2\xi}{ch2\xi - \cos2\xi}; \quad k_x = \frac{3}{2\xi} \frac{sh2\xi - \sin2\xi}{ch2\xi - \cos2\xi},$$

$$\xi = h/h_{\text{нр}}, \quad h_{\text{нр}} = \sqrt{\frac{2}{\mu\gamma\omega}} \quad \text{- эквивалентная глубина проникновения тока при поверхностном эффекте}$$

$$\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} h \sqrt{\frac{sf_1}{10\rho} \frac{b}{b_{\Pi}}}$$

$$\omega = s\omega_1 = 2\pi sf_1 \quad \mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Г/м,}$$

$$\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad b = b_{\Pi}$$

$$\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} \frac{h}{100} \sqrt{\frac{50s}{10 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}}} \quad h - \text{в см}$$

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

при  $\xi > 2$   $sh2\xi = ch2\xi$   $k_r \approx \xi; k_x \approx \frac{3}{2\xi}.$

Если  $h = 5$  см и  $f_1 = 50$  гц то во время пуска ( $s = 1$ )  $r_2$  будет в 5 раз больше ( $k_r = 5$ ),

а  $x_{\sigma 2}$  будет в 3,33 раза меньше ( $k_x = 0,3$ )

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{н}}} = 1,0-1,4; \quad k_{\text{ни}} = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{н}}} = 4,5-6,0.$$

# Двухклеточные двигатели

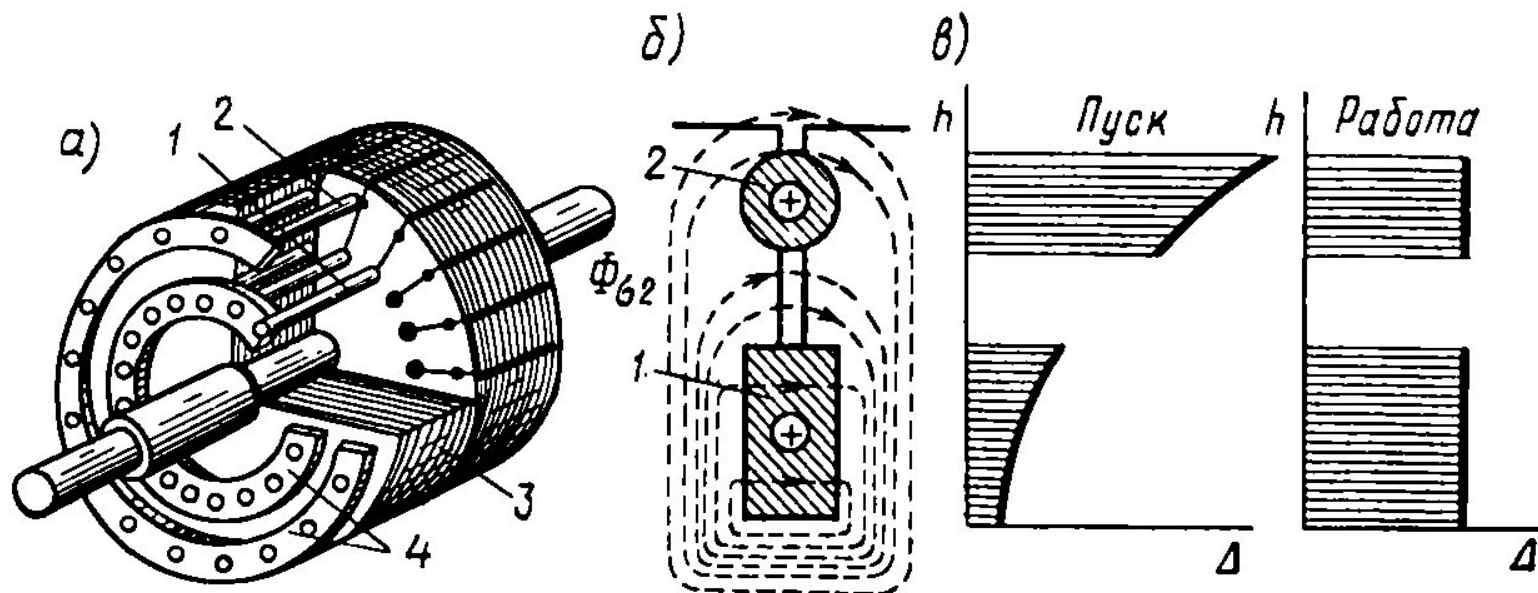


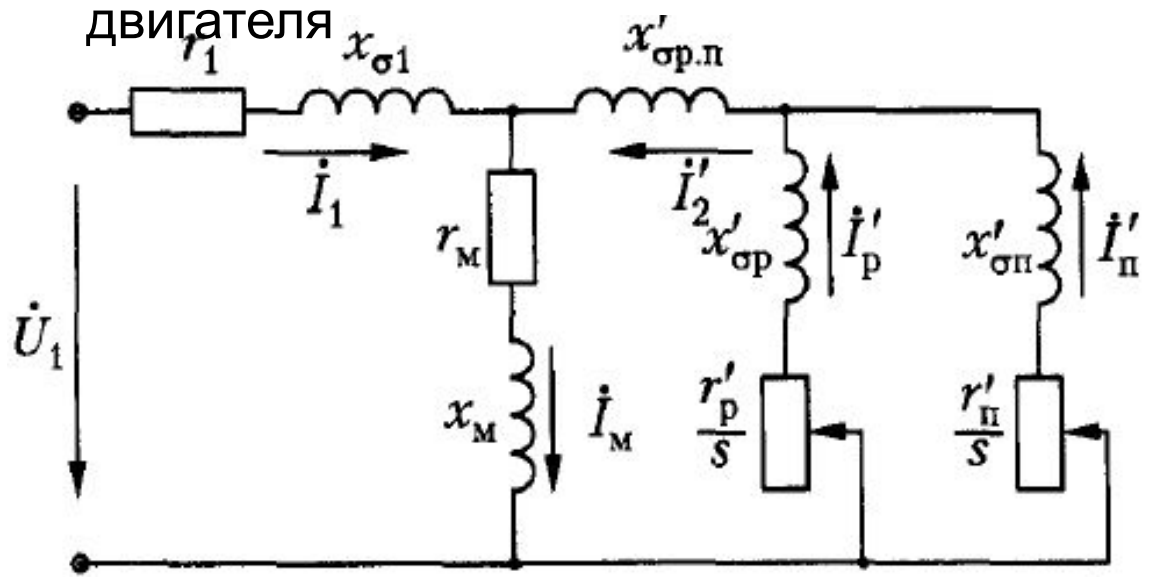
Рис. 5.7. Общий вид (а) и разрез паза (б) ротора двигателя с двойной беличьей клеткой и распределение плотности тока  $\Delta$  по высоте  $h$  в клетках при пуске и работе двигателя (в):

1 — рабочая клетка; 2 — пусковая клетка; 3 — сердечник ротора; 4 — короткозамыкающие кольца

$$I_{2п}/I_{2р} = Z_{2р}/Z_{2п} = \sqrt{R_{2р}^2 + X_{2р}^2} / \sqrt{R_{2п}^2 + X_{2п}^2}$$

$$k_{п} = \frac{M_{п}}{M_{н}} = 1,2-2,0; k_{ми} = \frac{I_{п}}{I_{н}} = 4,0-6,0.$$

# Схема замещения двухклеточного двигателя

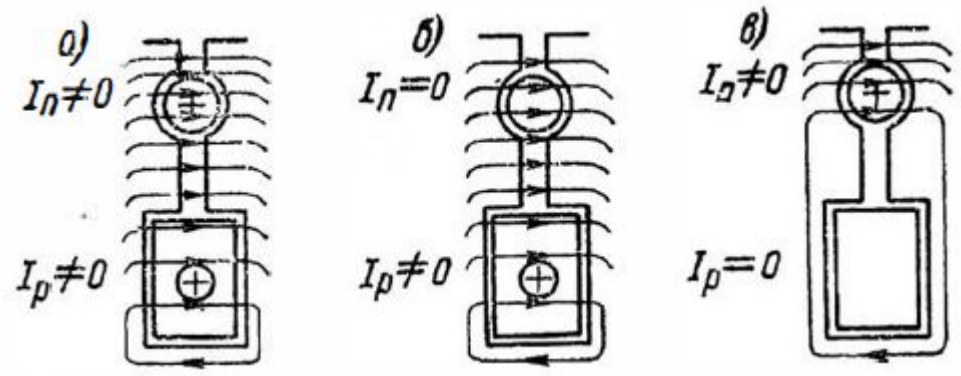


$$I_2' = I_p' + I_{п}'$$

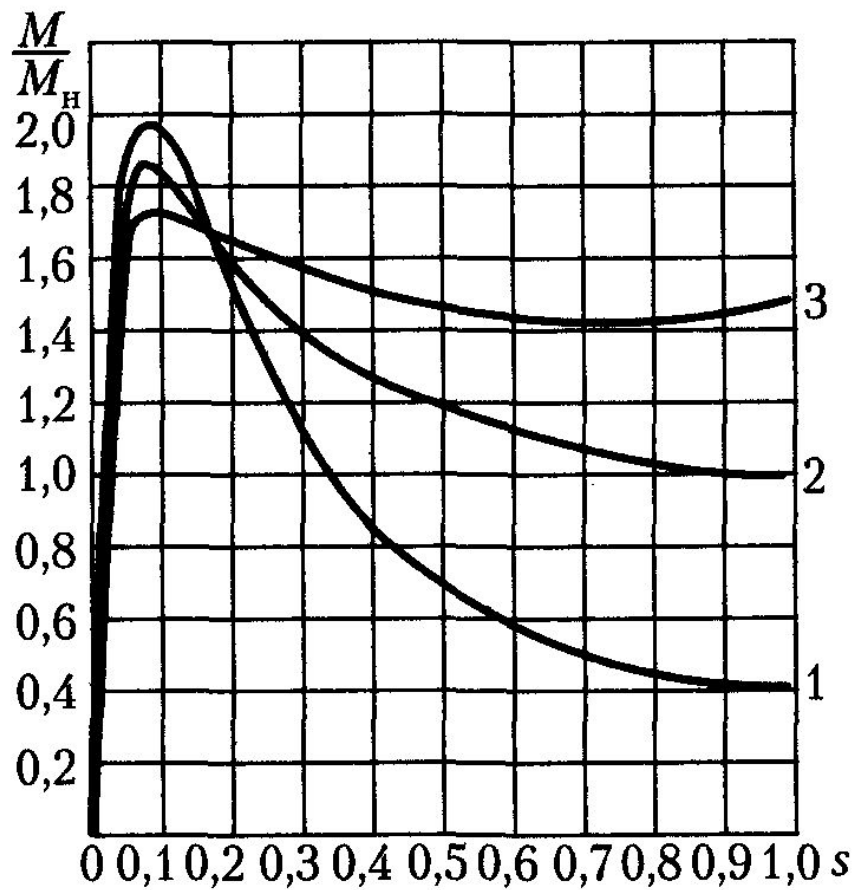
$$\dot{E}'_{р. п} = -jx'_{р. п} (I_p' + I_{п}')$$

$$r_{п} > r_p$$

$$x_{\sigma п} < x_{\sigma p}$$



Пазовые поля обмоток ротора двухклеточного двигателя

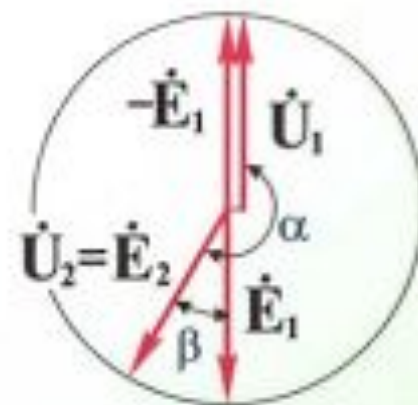
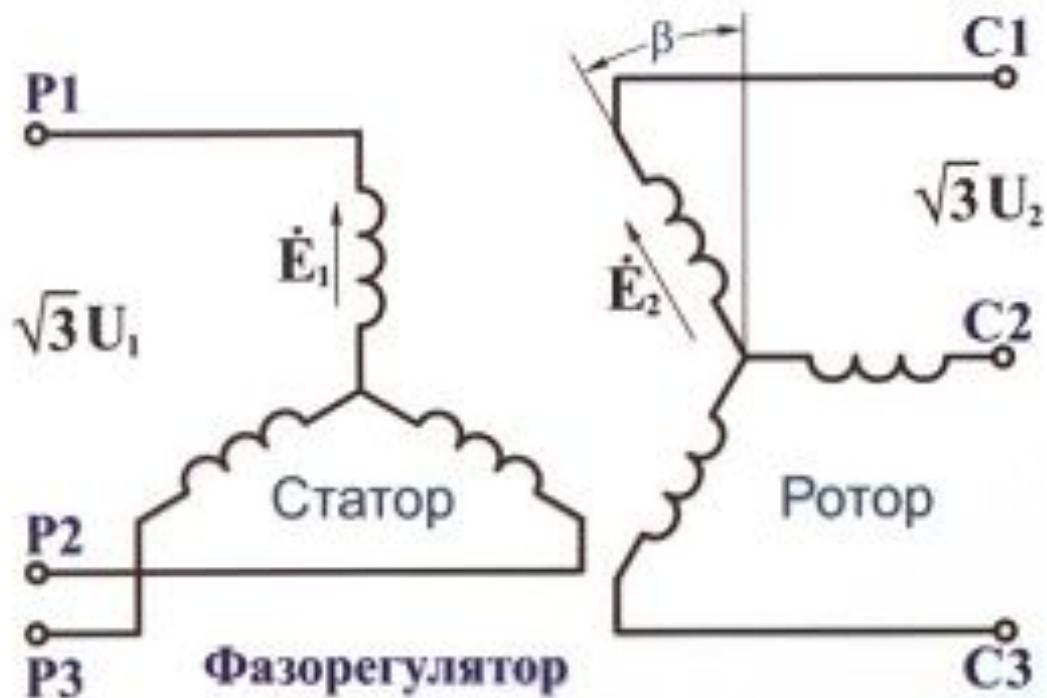


Кривые моментов  $M = f(s)$  асинхронных двигателей: 1 — без вытеснения тока в обмотке ротора; 2 — глубокопазного; 3 — двухклеточного

$$M_m \sim \frac{1}{x_K}$$

# Асинхронные машины с неподвижным ротором

## Фазорегулятор



$$\begin{aligned} r_1 = r_2 = x_1 = x_2 = 0 ; \\ U_1 \approx E_1 \quad U_2 = E_2 \end{aligned}$$

# Индукционный регулятор

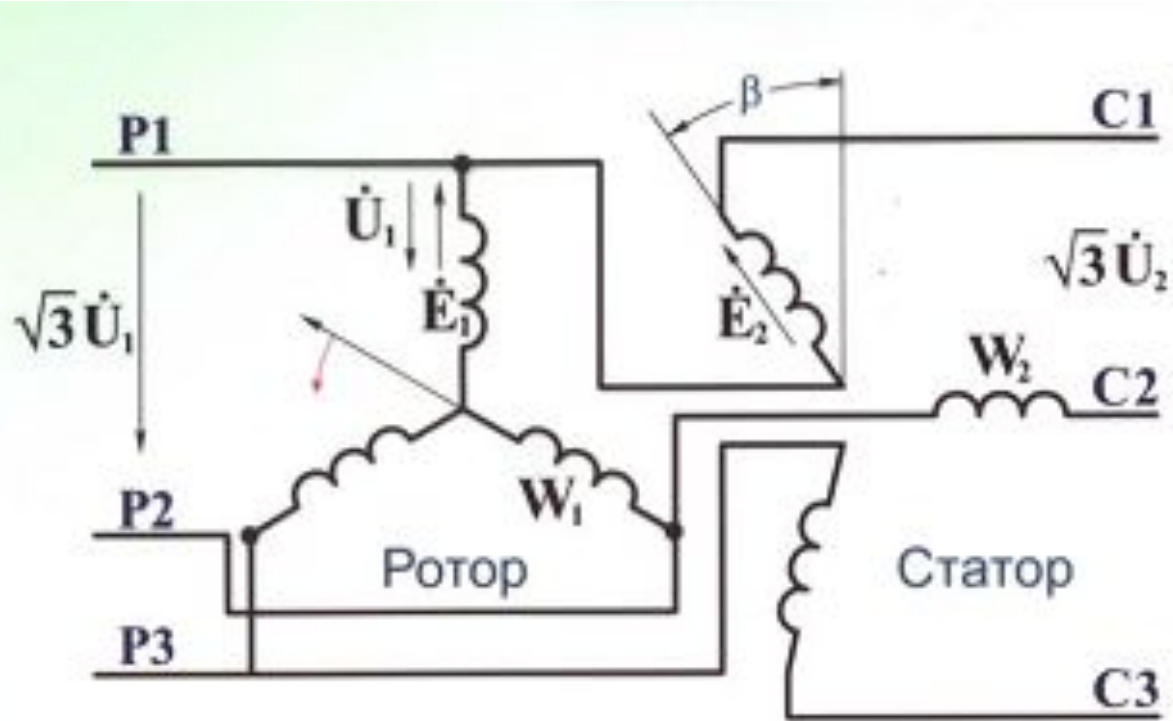
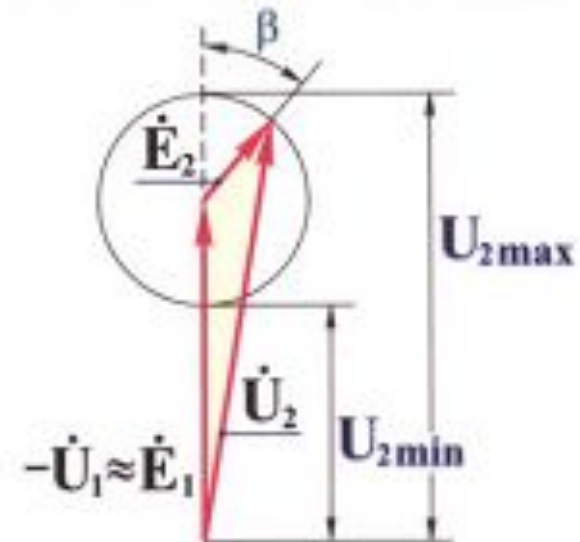


Схема индукционного регулятора ( ИР )



$$\dot{U}_2 = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 = -\dot{U}_1 + \dot{E}_2$$

Векторная  
диаграмма ( ИР )

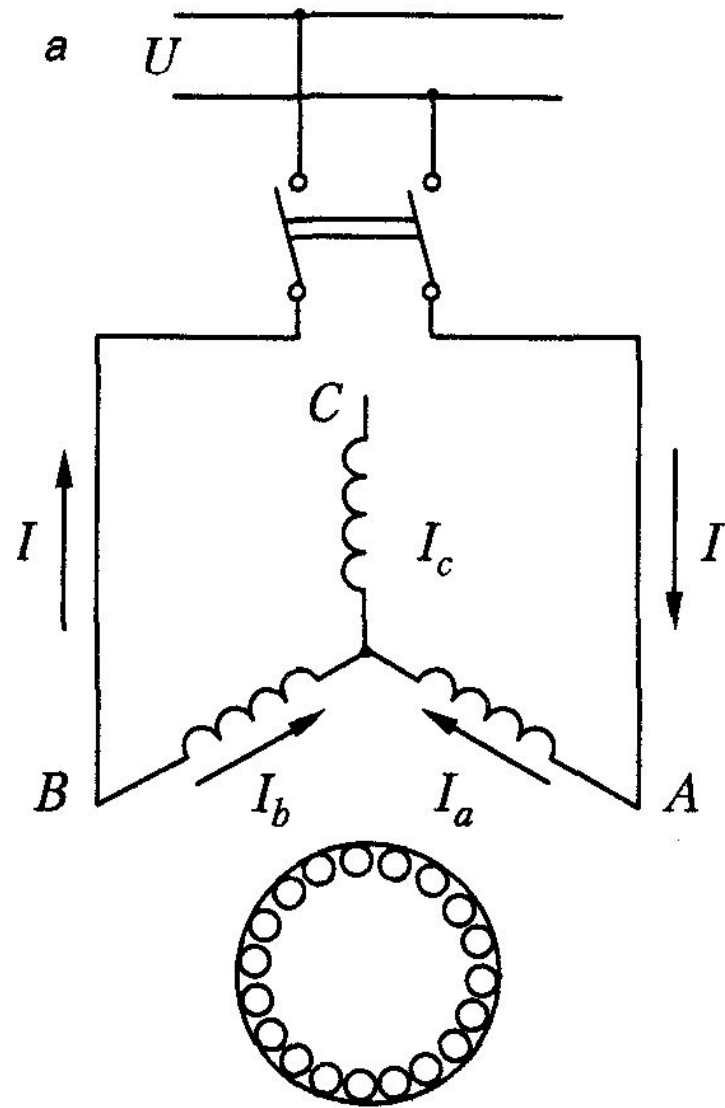
$$E_2 = \frac{\omega_2 k_{o62}}{\omega_1 k_{o61}} E_1 = \frac{\omega_2 k_{o62}}{\omega_1 k_{o61}} U_1.$$

$$\text{при } \beta = 0^\circ \quad U_{2\max} = U_1 + E_2;$$

$$\text{при } \beta = 180^\circ \quad U_{2\min} = U_1 - E_1.$$

$$E_2 = E_1 = U_1 \quad U_{2\max} \approx 2U_1; \quad U_{2\min} \approx 0.$$

# Однофазный режим асинхронного двигателя



Однофазный ток  $I_1$  статора однофазного двигателя создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на два поля, имеющих равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой скоростью

$$n_1 = \frac{f_1}{p}$$

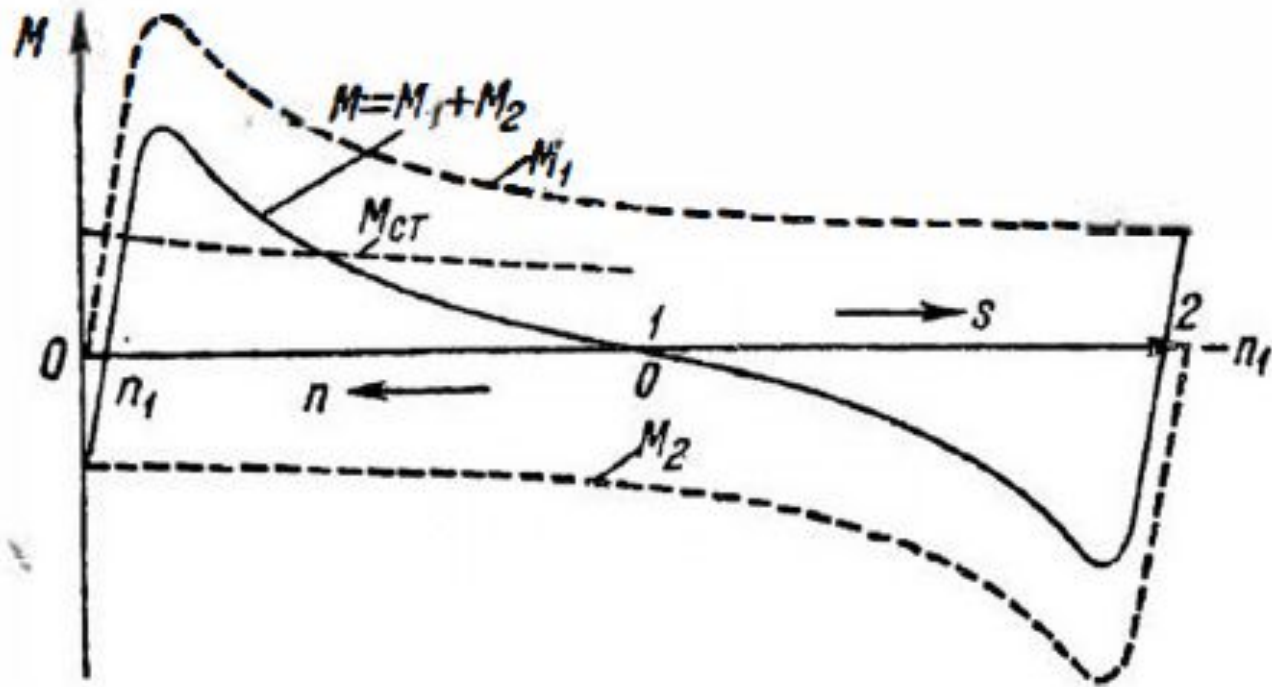
$$M = M_1 - M_2$$

$$P_3 = \sqrt{3} UI_3 \eta_3 \cos \varphi_3,$$

$$P_1 = UI_1 \eta_1 \cos \varphi_1.$$

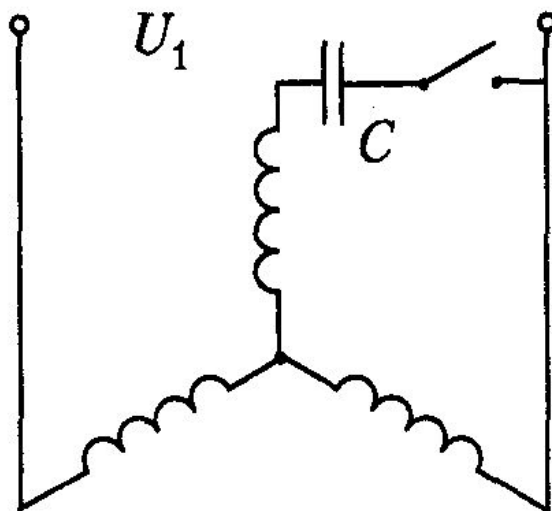
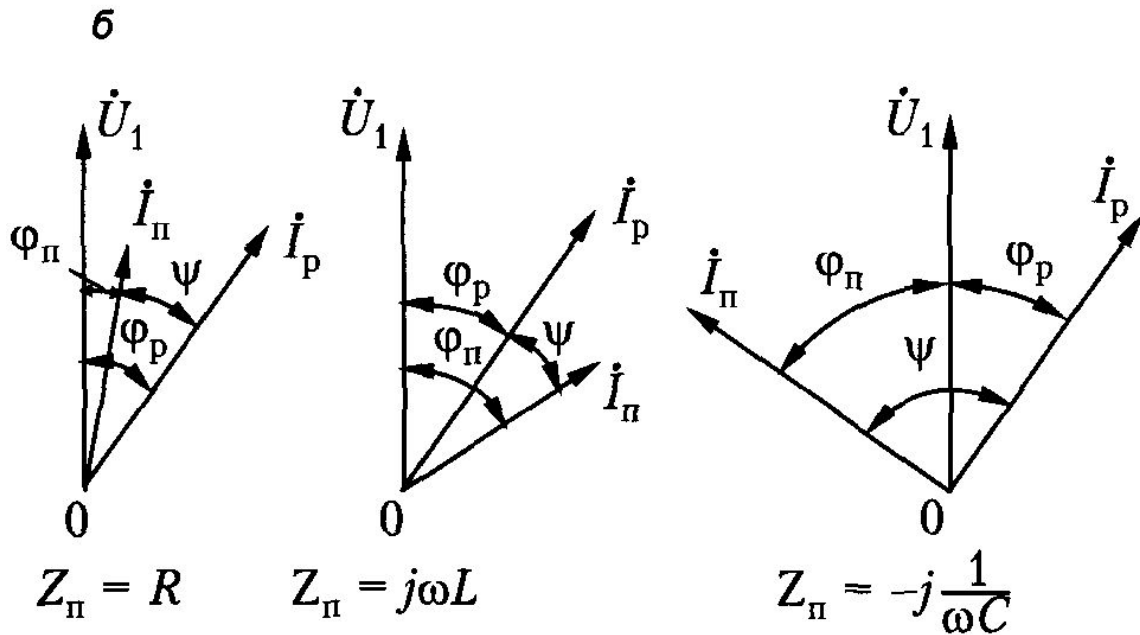
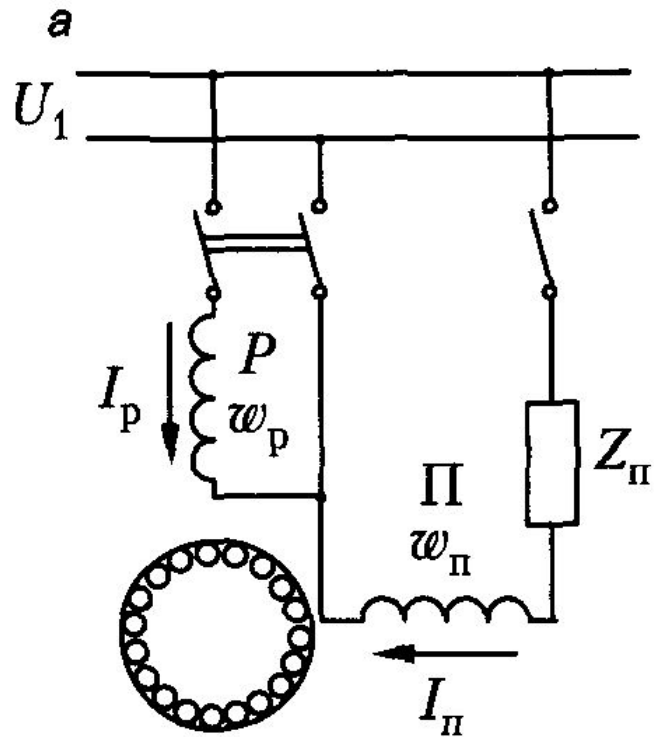


# Однофазный режим асинхронного двигателя



Кривые моментов однофазного двигателя

# Двигатели с пусковой обмоткой



$$P_{1\text{H}} = 40 \dots 50\% P_{3\text{H}}$$

Схема включения трехфазного двигателя для работы от однофазной сети