

$$i_{\text{э}} = i_{\text{эс}} \cdot (e^{\mu_{\text{эо}} / \varphi_{\text{T}}} - 1) - \alpha_{\text{СТ I}} \cdot i_{\text{кс}} \cdot (e^{\mu_{\text{ок}} / \varphi_{\text{T}}} - 1),$$

$$i_{\text{к}} = \alpha_{\text{СТ}} \cdot i_{\text{эс}} \cdot (e^{\mu_{\text{эо}} / \varphi_{\text{T}}} - 1) - i_{\text{кс}} \cdot (e^{\mu_{\text{ок}} / \varphi_{\text{T}}} - 1).$$

$$\alpha_{\text{CT} I} \cdot \dot{i}_{\text{KS}} = \alpha_{\text{CT}} \cdot \dot{i}_{\text{3S}}.$$

$$\dot{i}_s \equiv \alpha_{\text{CT} I} \cdot \dot{i}_{\text{KS}} = \alpha_{\text{CT}} \cdot \dot{i}_{\text{3S}}.$$

$$\beta_{\text{CT}} \equiv \alpha_{\text{CT}} / (1 - \alpha_{\text{CT}})$$

$$\alpha_{\text{CT}} = \beta_{\text{CT}} / (1 + \beta_{\text{CT}}).$$

$$\beta_{\text{CT} I} \equiv \alpha_{\text{CT} I} / (1 + \alpha_{\text{CT} I}).$$

$$\alpha_{\text{CTI}} = \beta_{\text{CTI}} / (1 + \beta_{\text{CTI}}).$$

$$i_{\text{Э}} = \frac{i_{\text{с}}}{\alpha_{\text{CT}}} \cdot (e^{\mu_{\text{Э}} / \varphi_T} - 1) - i_{\text{с}} \cdot (e^{\mu_{\text{К}} / \varphi_T} - 1);$$

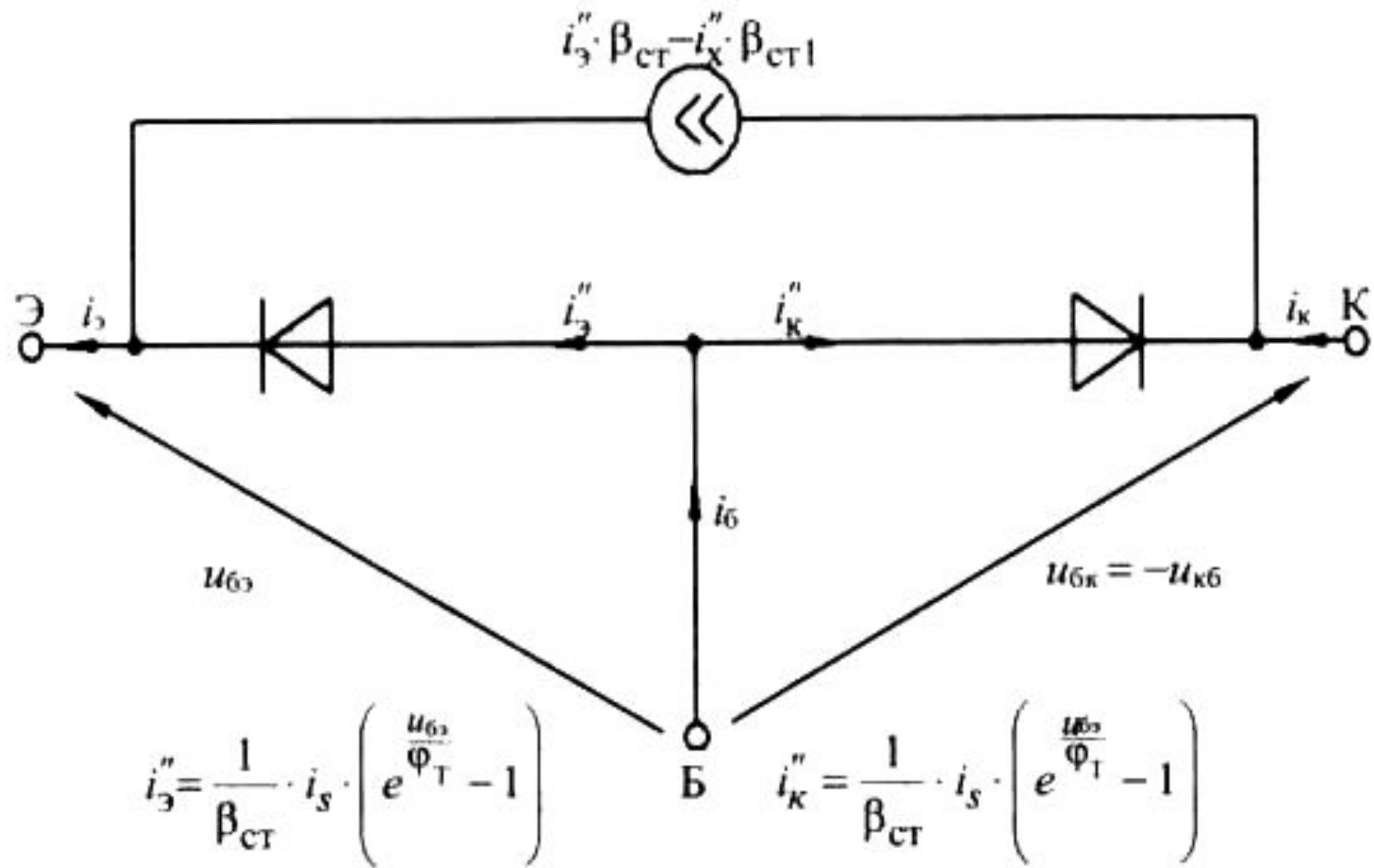
$$i_{\text{К}} = i_{\text{с}} \cdot (e^{\mu_{\text{Э}} / \varphi_T} - 1) - \frac{i_{\text{с}}}{\alpha_{\text{CTI}}} \cdot (e^{\mu_{\text{К}} / \varphi_T} - 1).$$

$$i_3 = (1 + \beta_{CT}) \cdot \frac{i_s}{\beta_{CT}} \cdot (e^{u_{\text{он}} / \varphi_T} - 1) - i_s \cdot (e^{u_{\text{ок}} / \varphi_T} - 1);$$

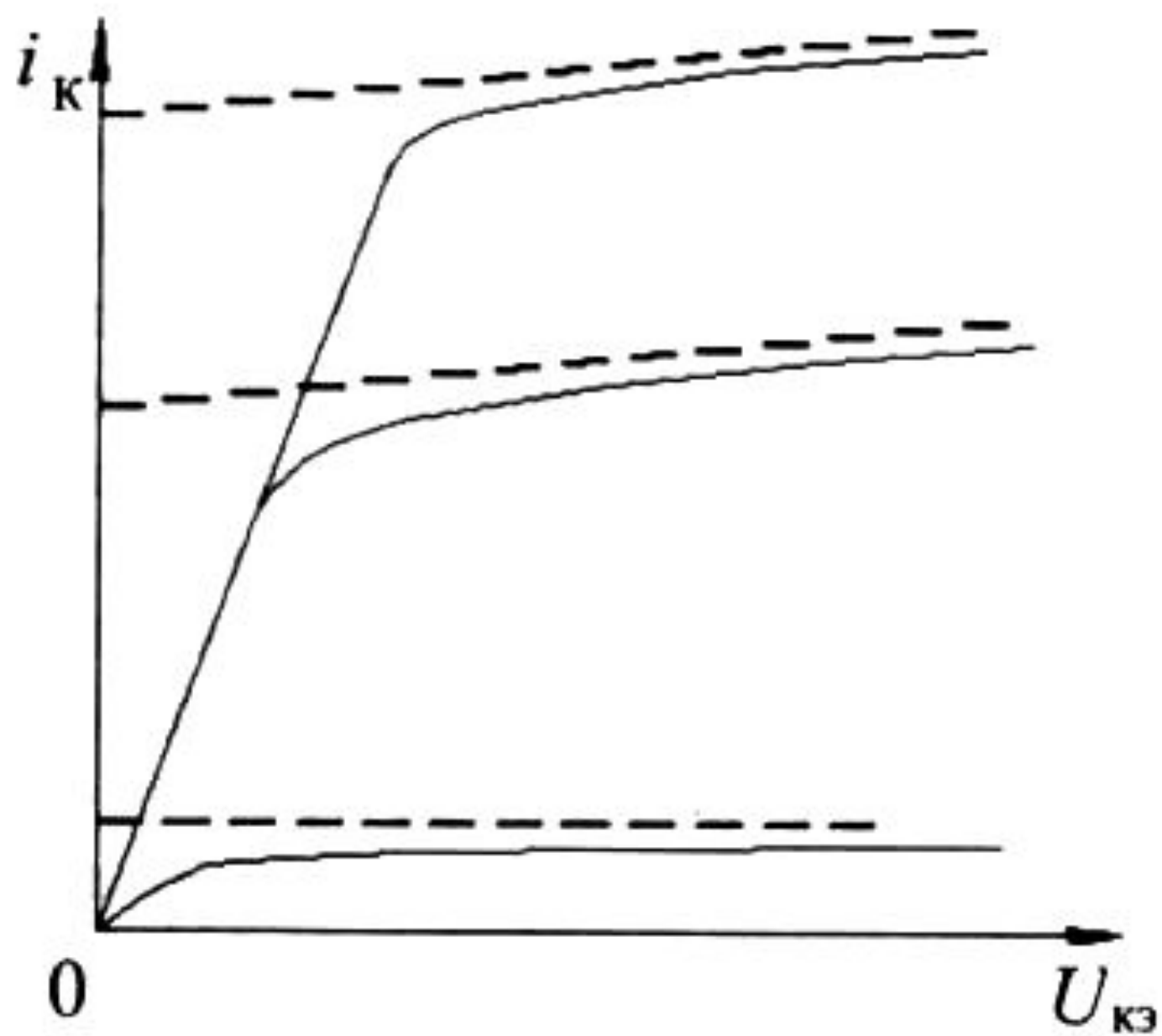
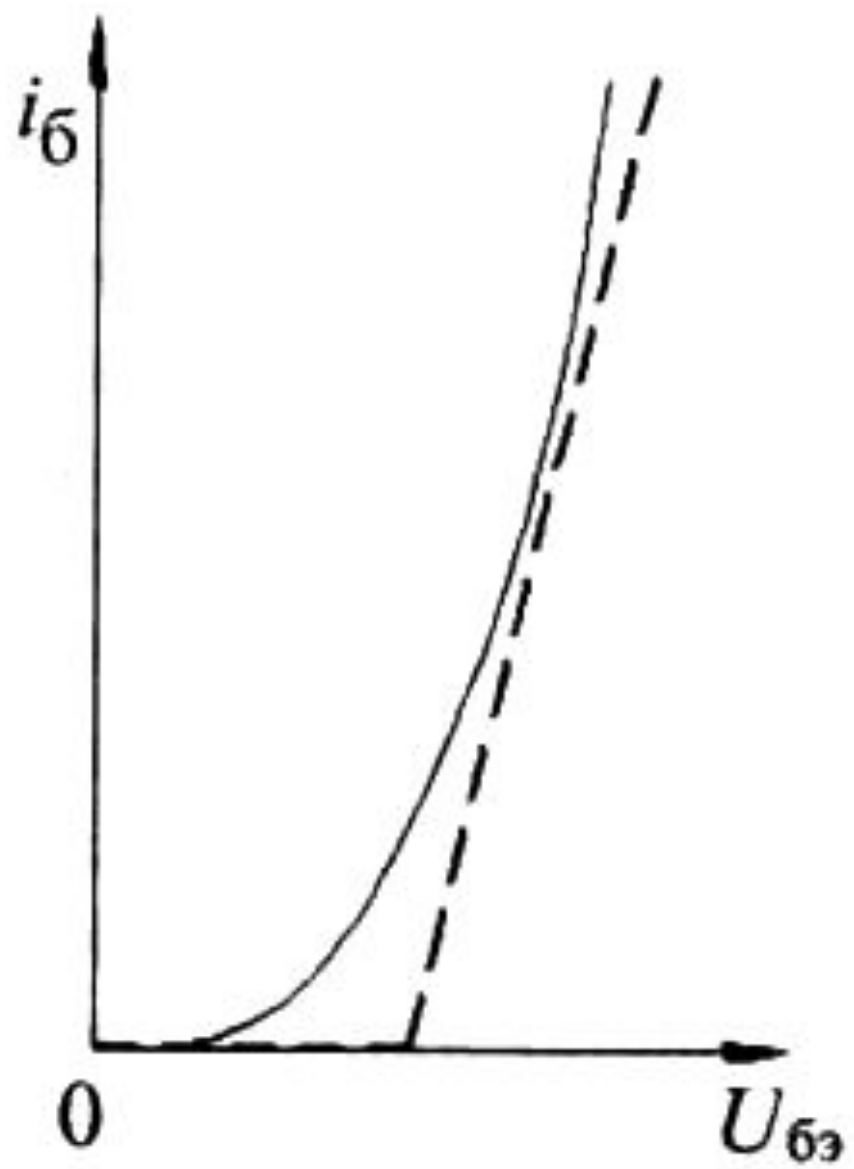
$$i_K = i_s \cdot (e^{u_{\text{он}} / \varphi_T} - 1) - (1 + \beta_{CT I}) \cdot \frac{i_s}{\beta_{CT I}} (e^{u_{\text{ок}} / \varphi_T} - 1).$$

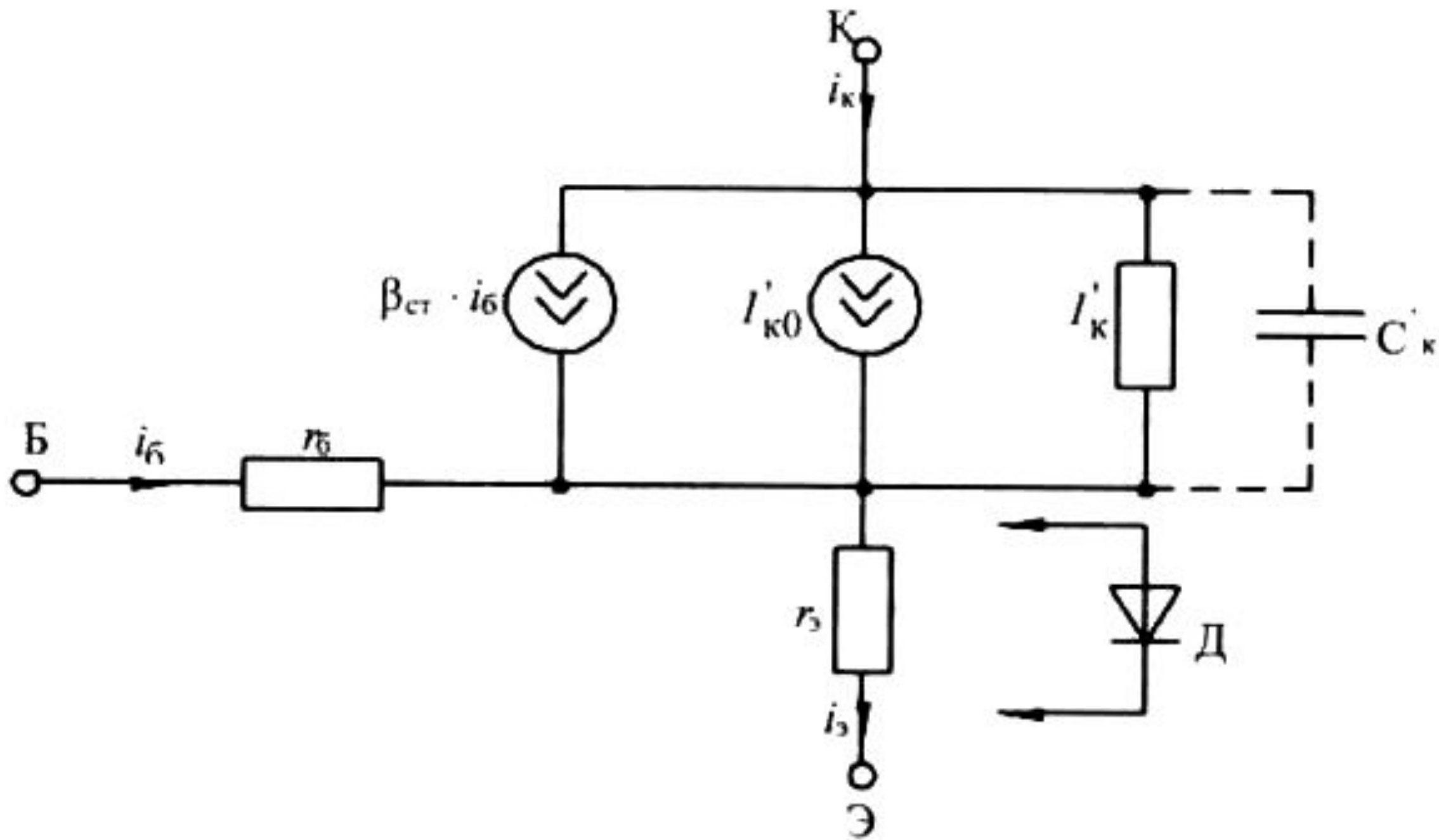
$$i_3 = i_s \cdot (e^{u_{\text{до}}/\varphi_T} - 1) - i_s \cdot (e^{u_{\text{ок}}/\varphi_T} - 1) + \frac{i_s}{\beta_{\text{CT}}} (e^{u_{\text{до}}/\varphi_T} - 1);$$

$$i_{\text{К}} = i_s \cdot (e^{u_{\text{до}}/\varphi_T} - 1) - i_s \cdot (e^{u_{\text{ок}}/\varphi_T} - 1) + \frac{i_s}{\beta_{\text{CT}I}} (e^{u_{\text{ок}}/\varphi_T} - 1).$$

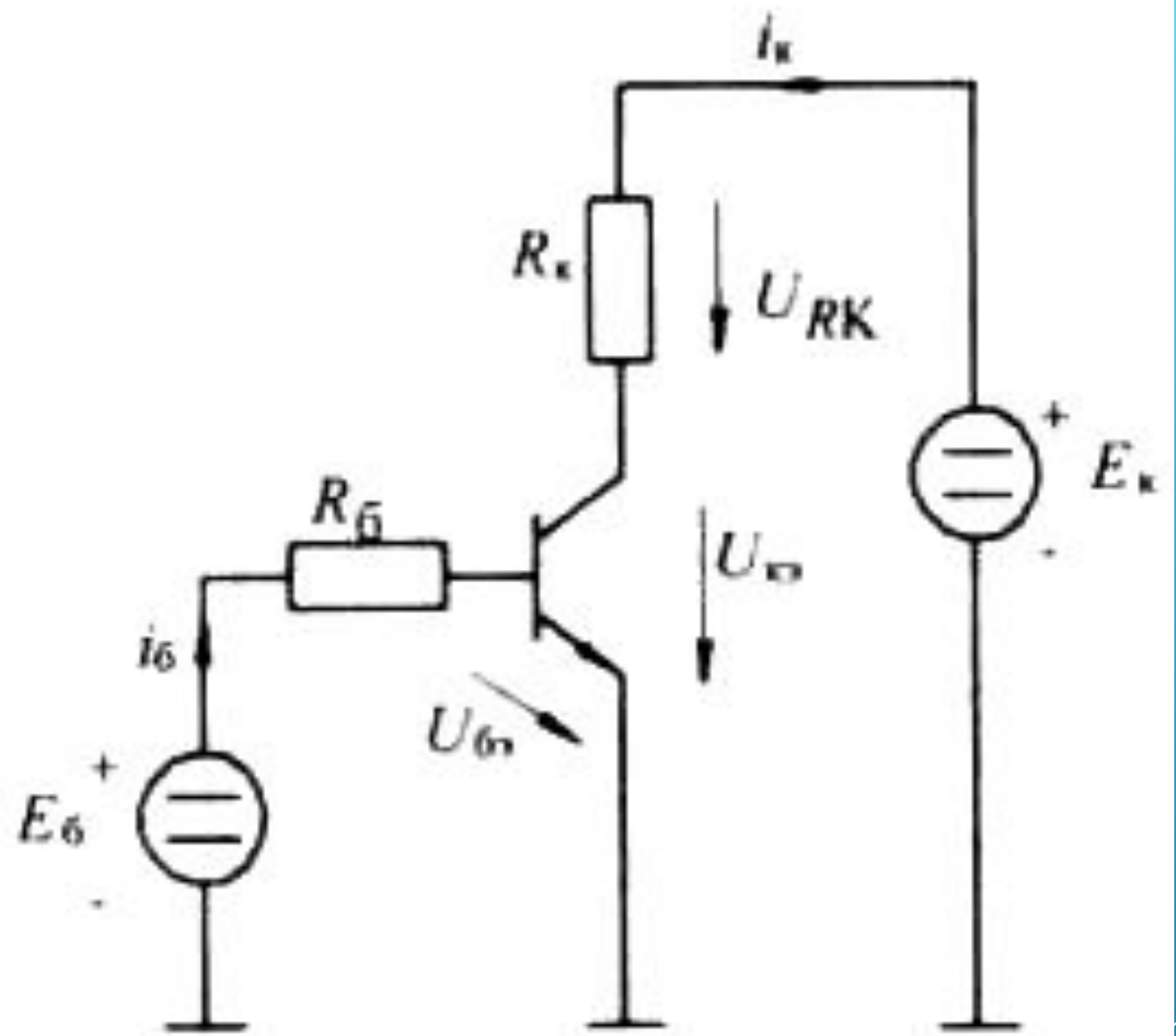


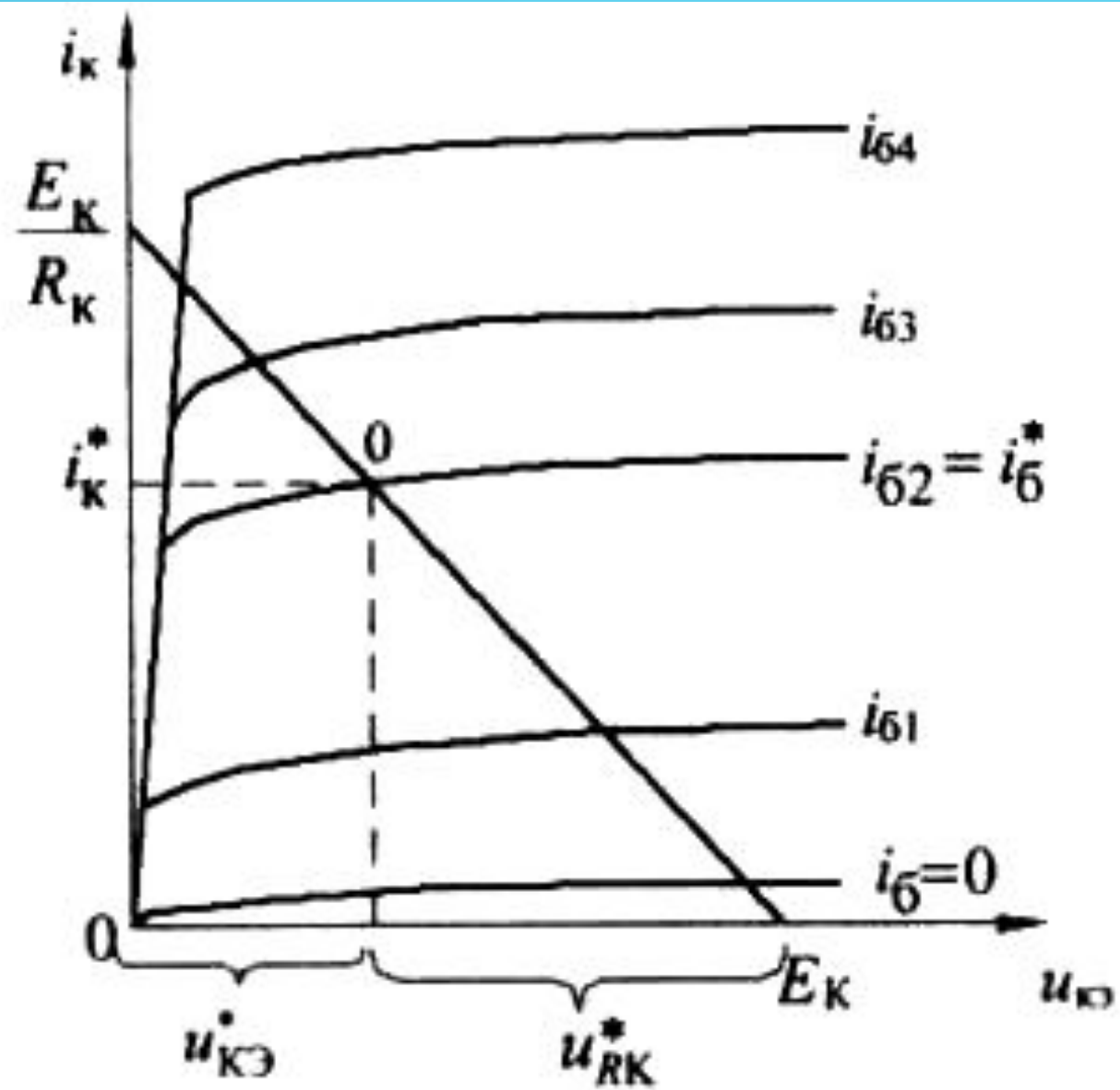
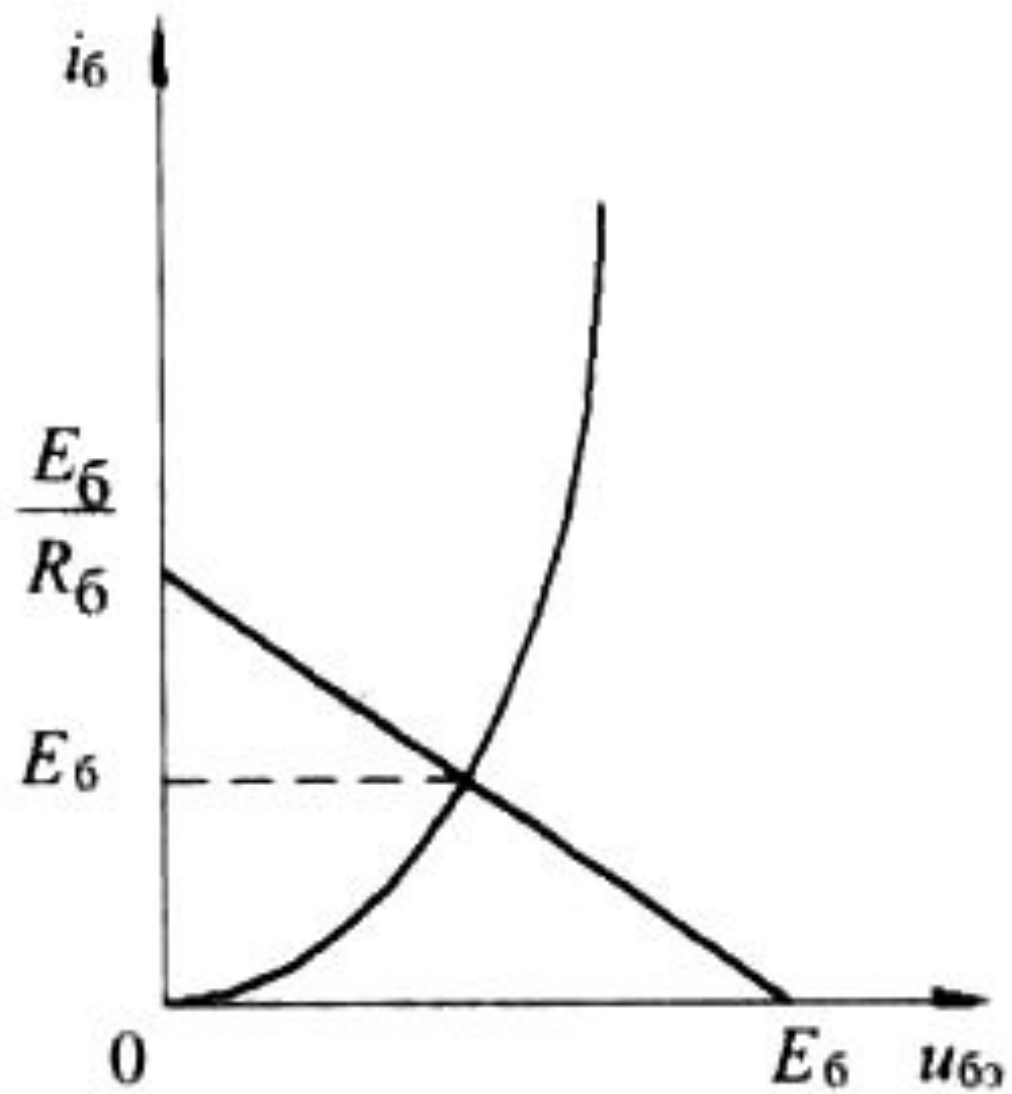
$$C'_K = (1 + \beta) \cdot C_K,$$

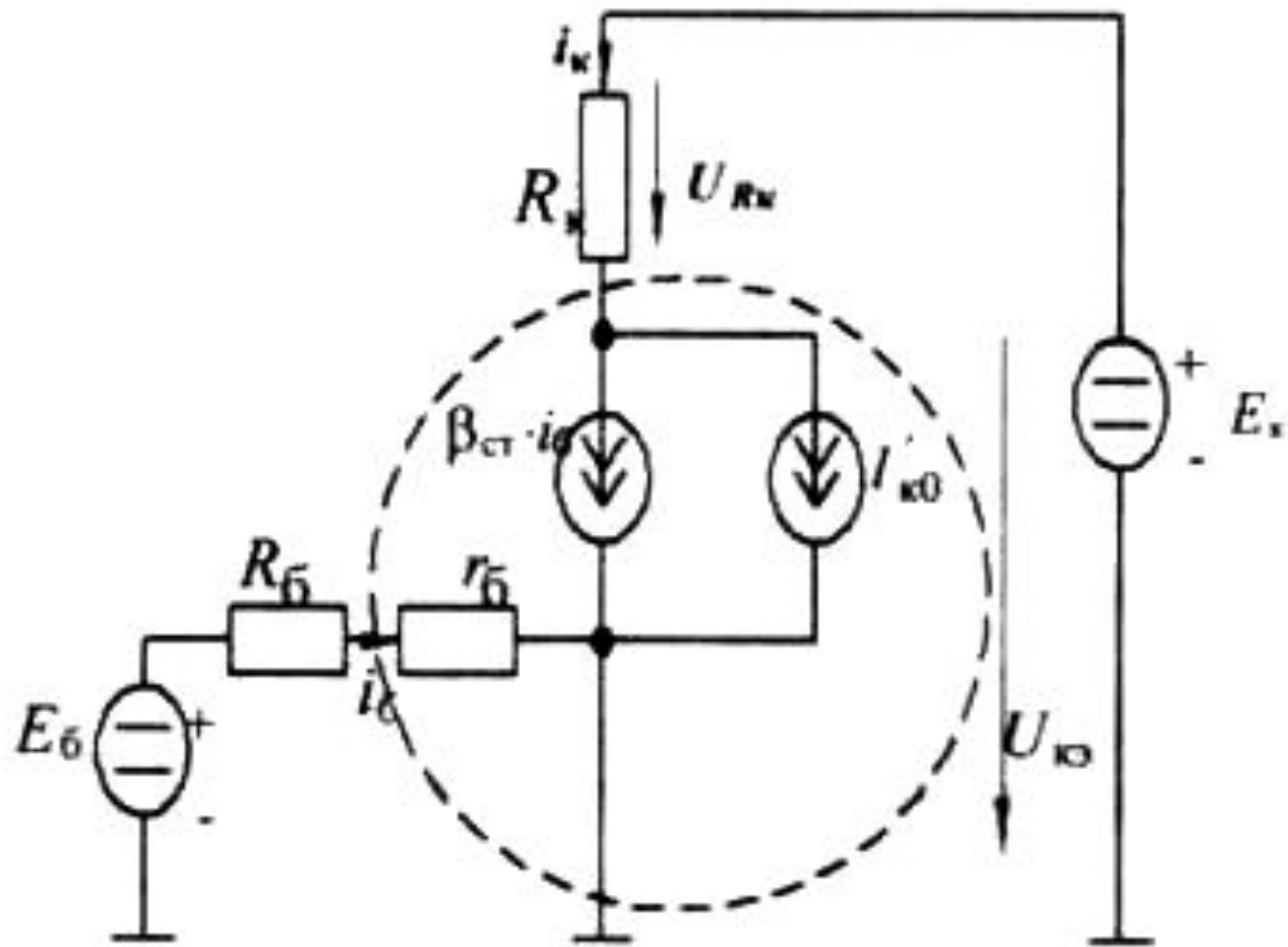




$$i_K = \beta_{CT} \cdot i_G + I'_{KO} + 1/r'_K \cdot u_{KЭ}.$$



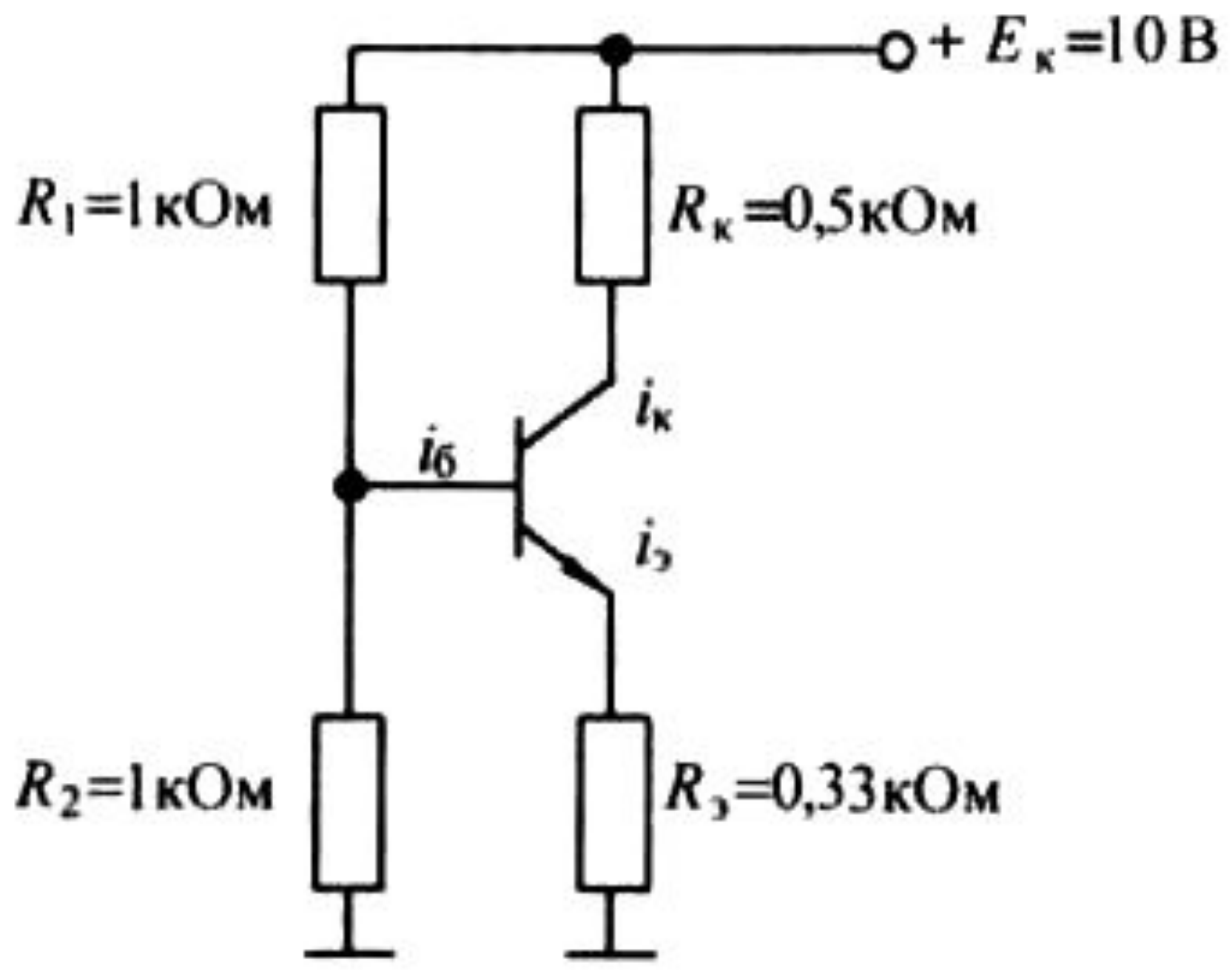




$$i_0 = E_0 / (R_0 + r_0),$$

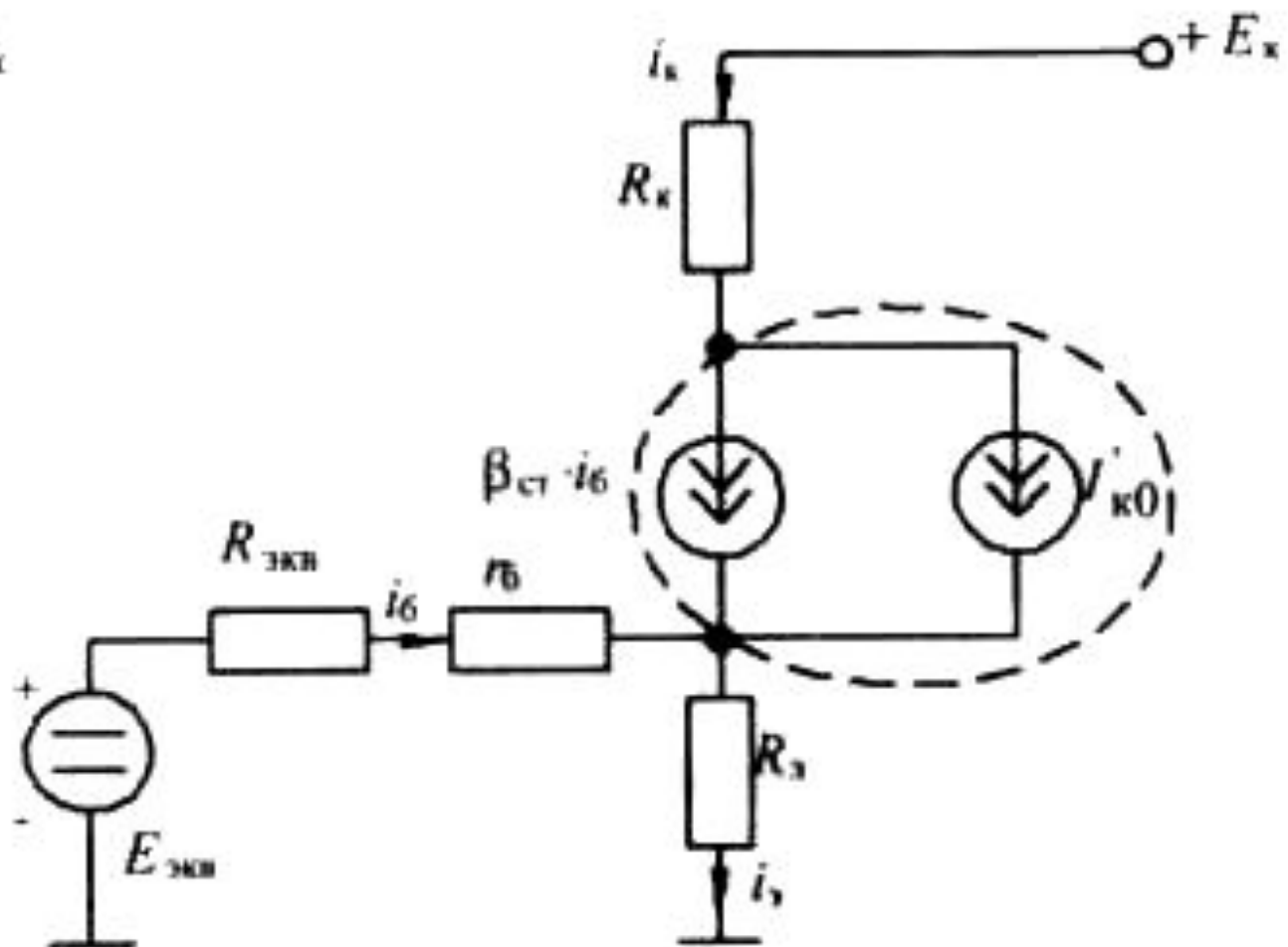
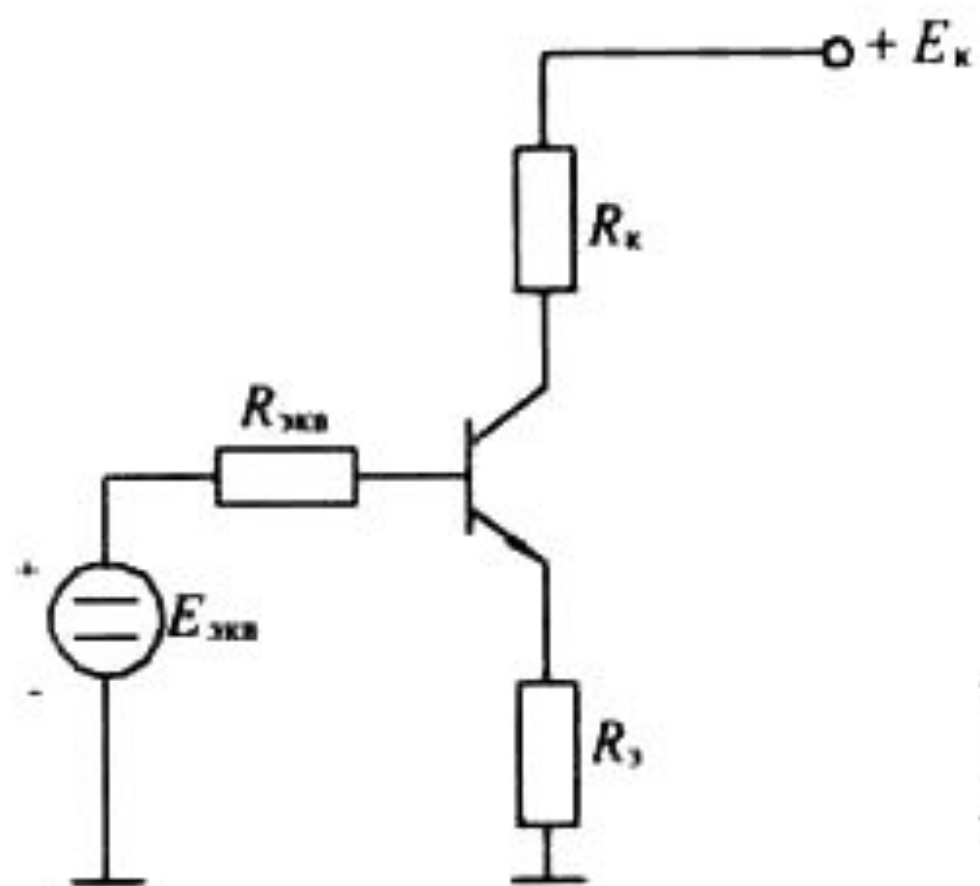
$$i_K = i_0 \cdot \beta_{CT} + I'_{KO},$$

$$U_{KO} = E_K - i_K \cdot R_K.$$



$$E_{\text{ЭКВ}} = E_{\text{к}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \text{ В},$$

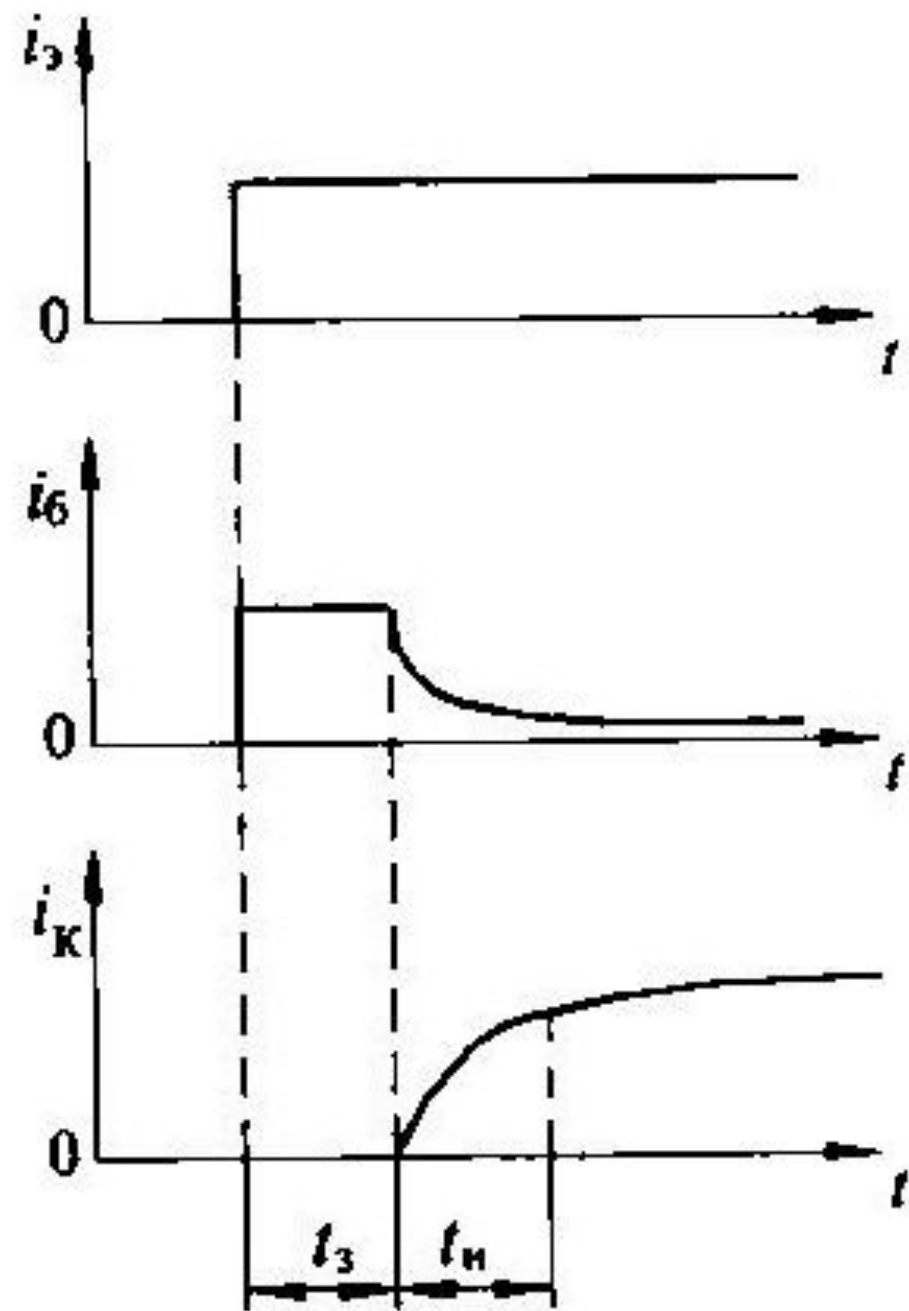
$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0,5 \text{ КОМ.}$$

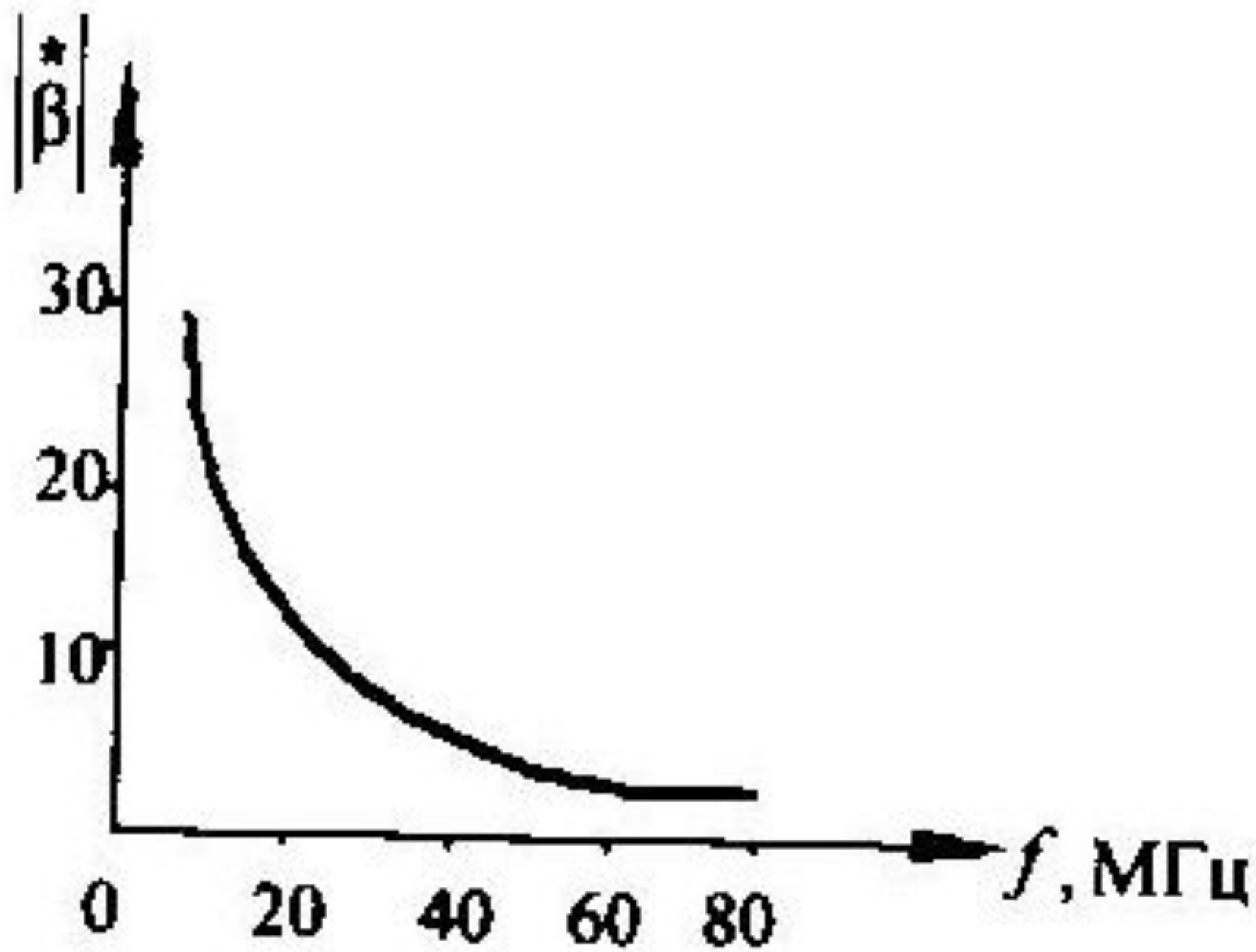


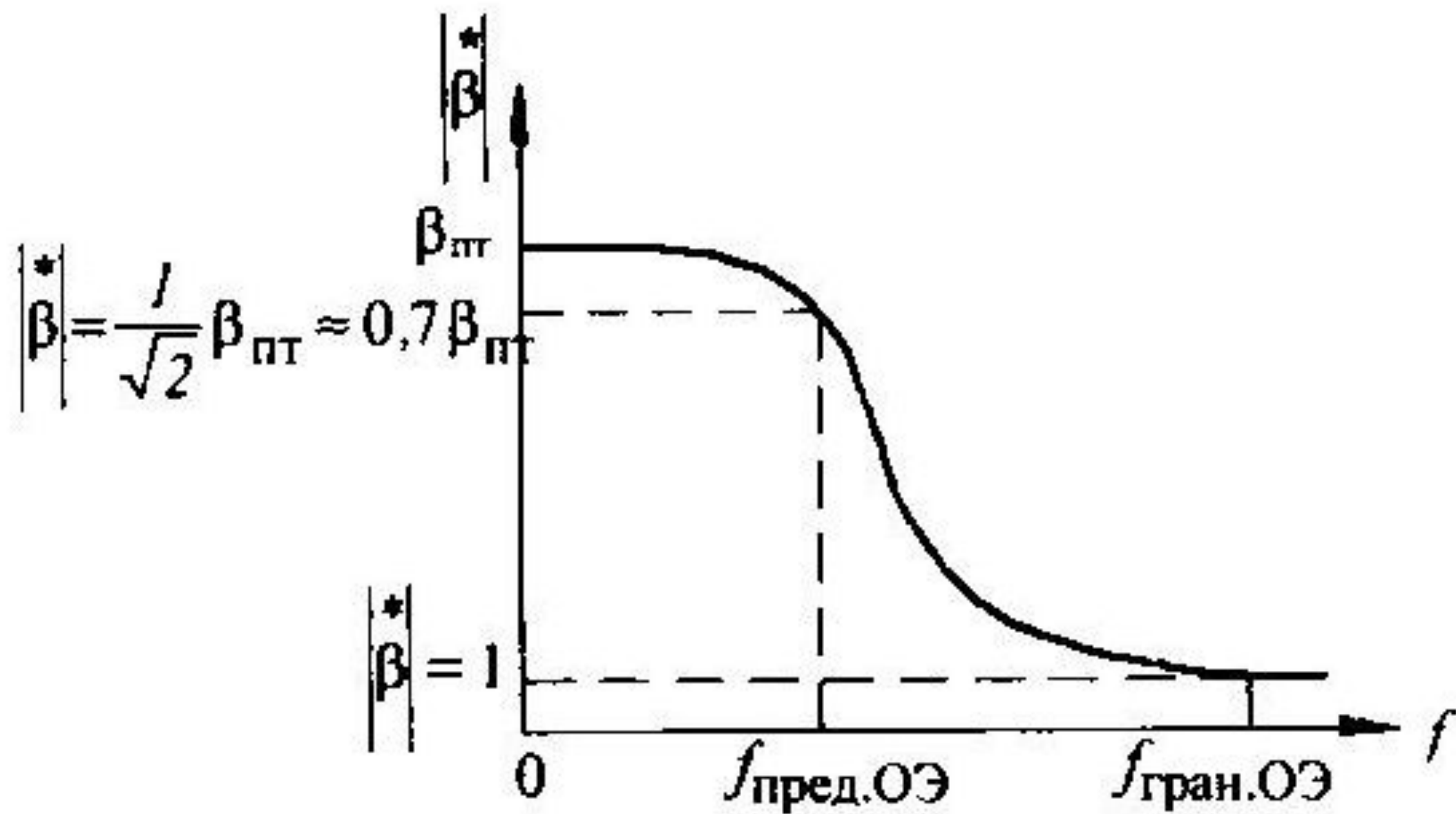
$$I'_{\text{к0}} = (1 + \beta_{\text{ст}}) \cdot I_{\text{к0}} = 1 \text{ mA.}$$

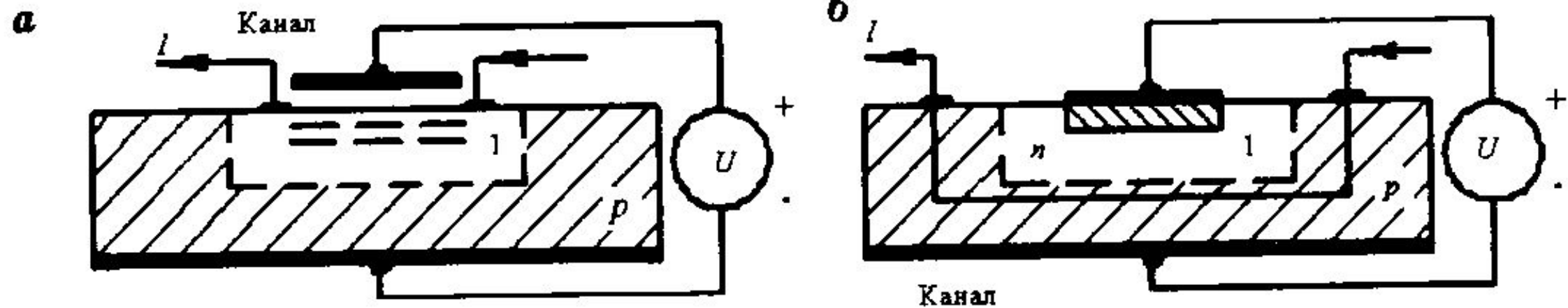
$$E_{\text{ЭКВ}} - i_6 \cdot (R_{\text{ЭКВ}} + r_6) = (\beta_{\text{ст}} \cdot i_6 + I'_{\text{к0}} + i_6) \cdot R_3.$$

$$i_6 = (E_{\text{ЭКВ}} - I'_{\text{к0}} \cdot R_3) / (R_{\text{ЭКВ}} + r_6 + (1 + \beta_{\text{ст}}) \cdot R_3) = 0,137 \text{ mA.}$$

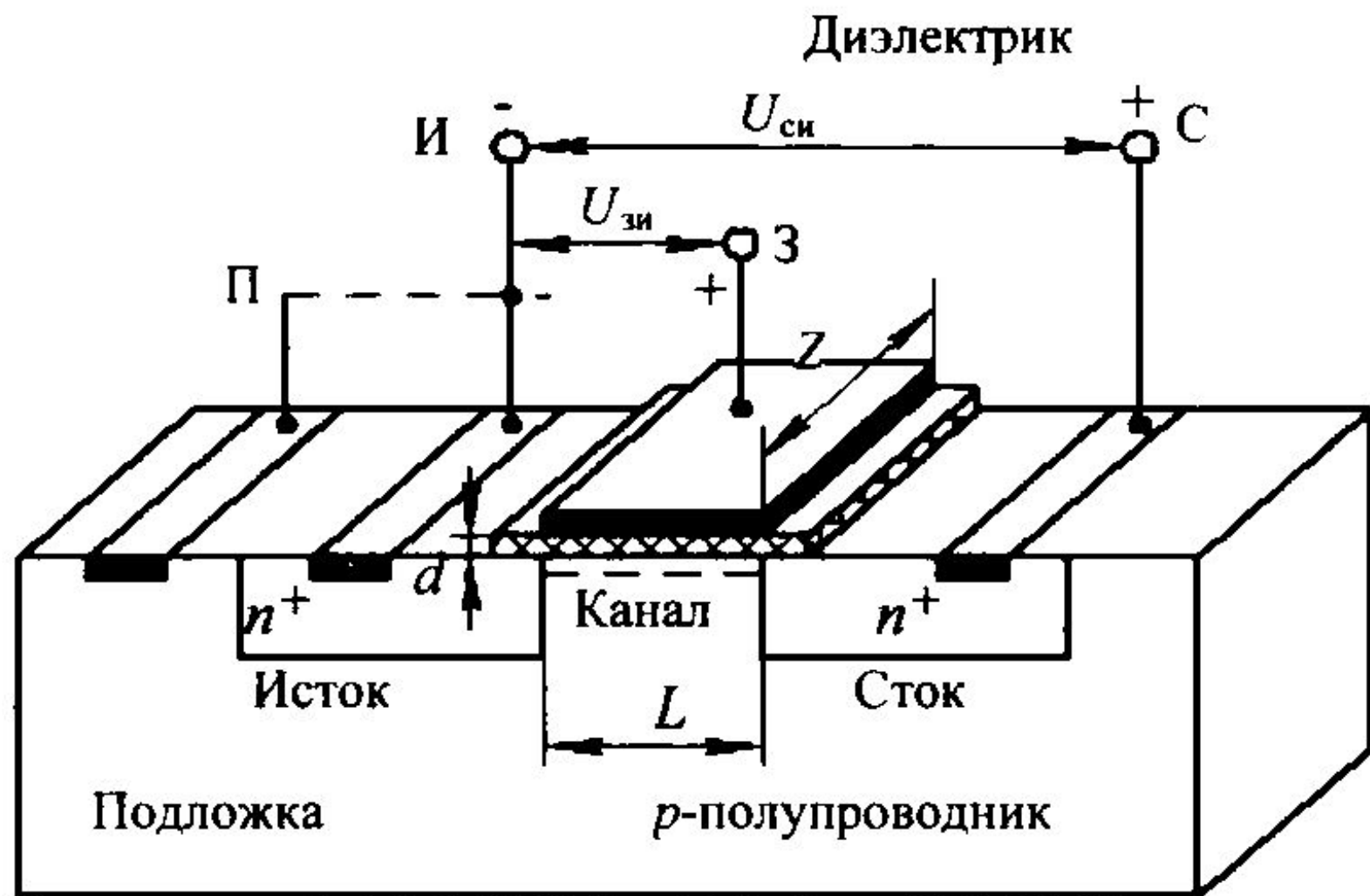






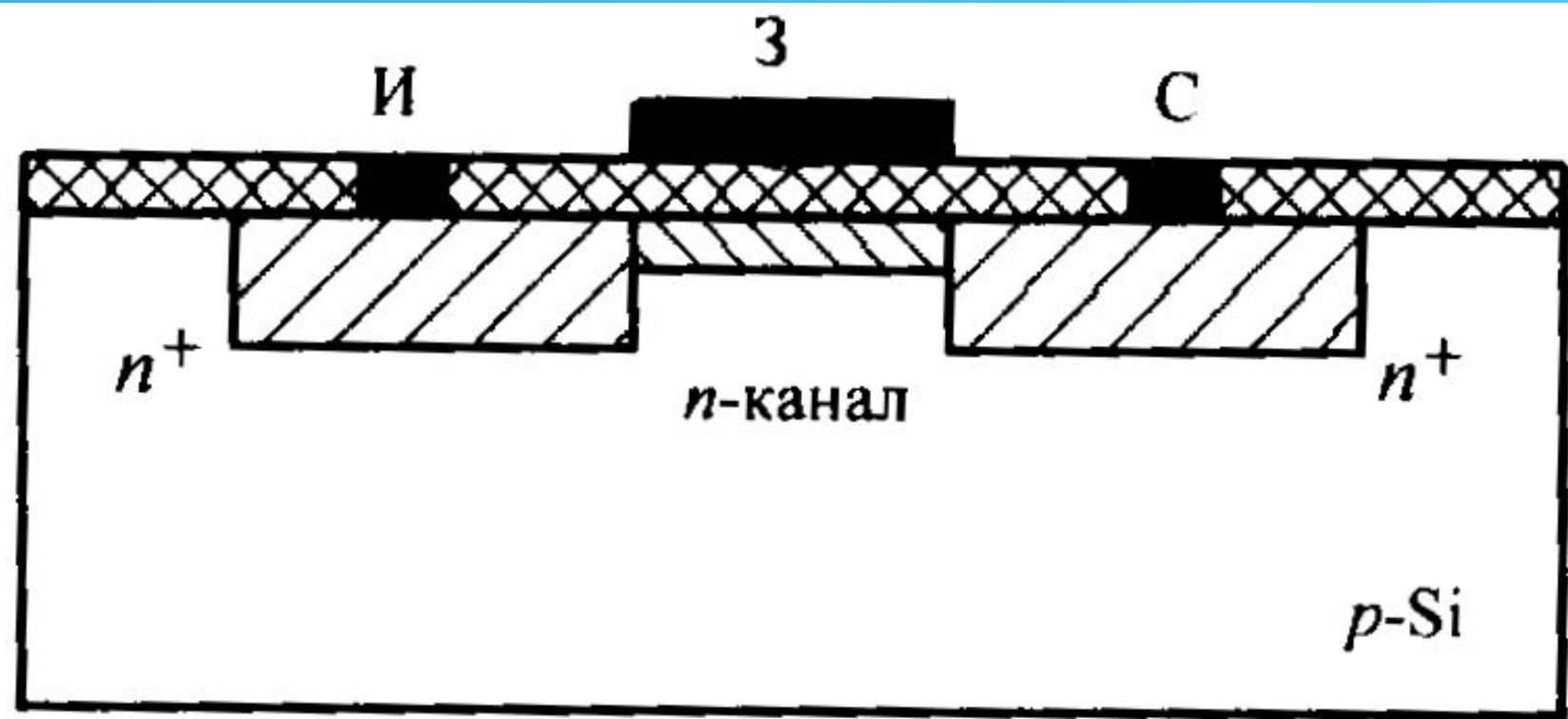


Принцип использования каналов в униполярных транзисторах:
а — приповерхностный *n*-канал; *б* — объемный *p*-канал; *1* — обедненный слой.

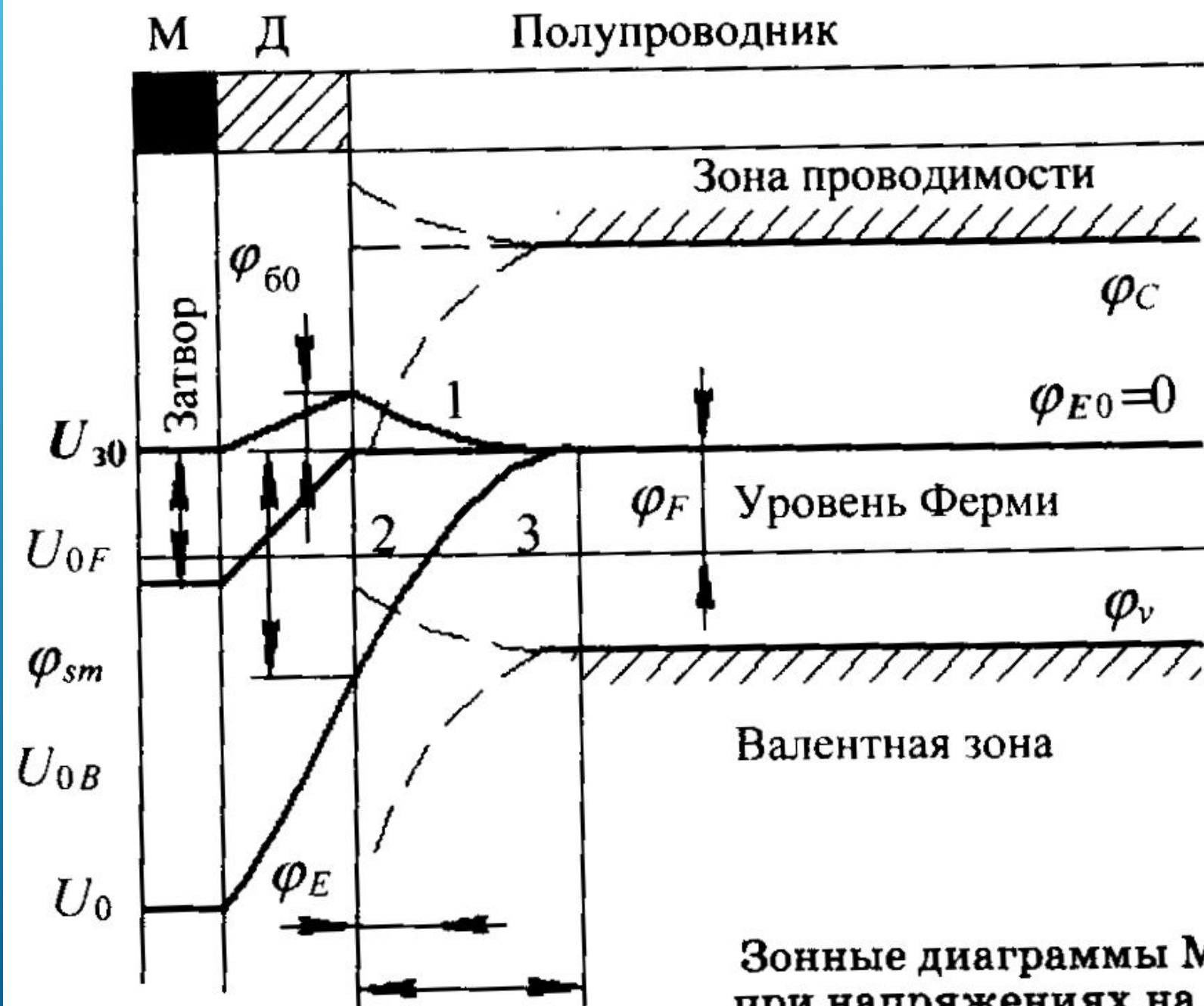


**Структура
МДП-транзистора
с индуцированным
n-каналом**

Структура
МДП-транзистора
со встроенным
n-каналом



$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_d / d,$$



Зонные диаграммы МДП-транзистора
 при напряжениях на затворе от 0 до U_0

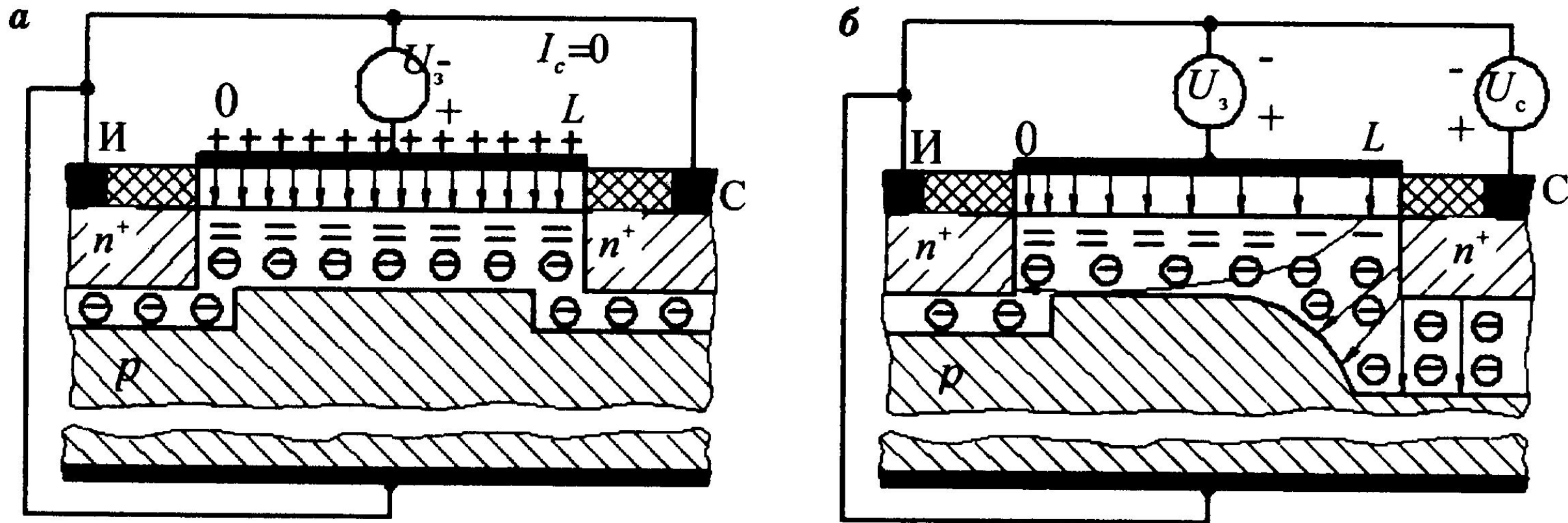
$$U_0 = U_{0F} + U_{0B}.$$

$$U_{0F} = \varphi_{MS} + Q_{0s}/C_0,$$

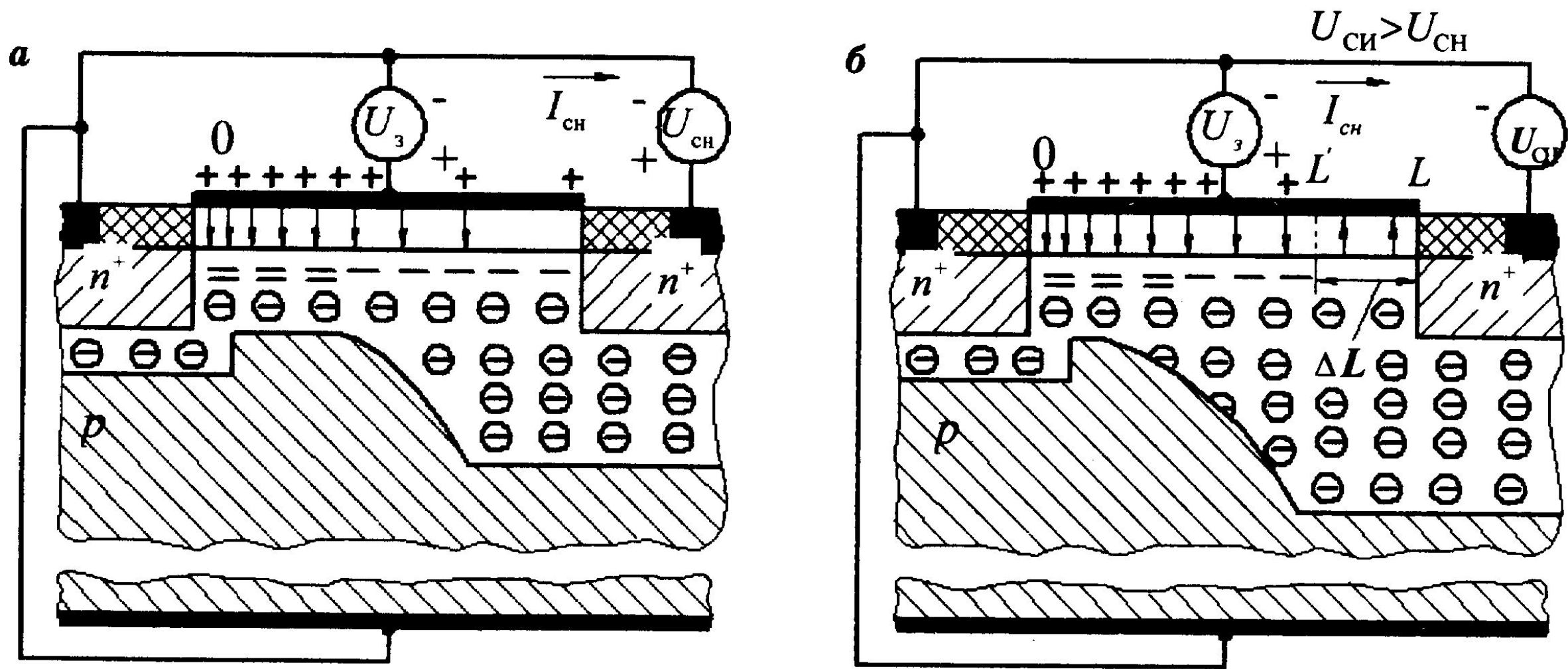
$$U_{0B} = \varphi_{sm} + \frac{a}{C_0} \sqrt{\varphi_{sm}},$$

$$a = \sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_{\Pi}N}$$

$$U_{\text{сн}} = U_{\text{зи}} - U_0.$$

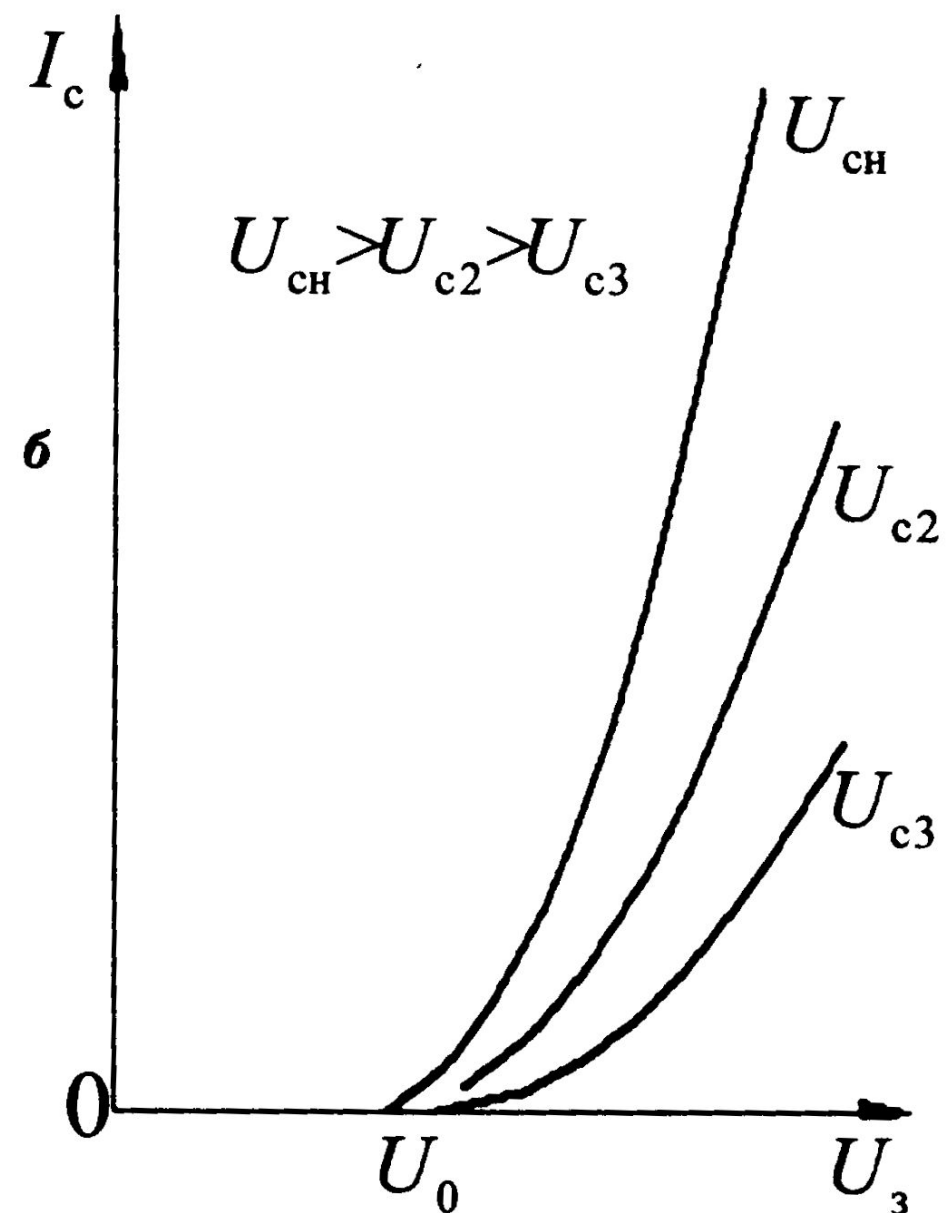
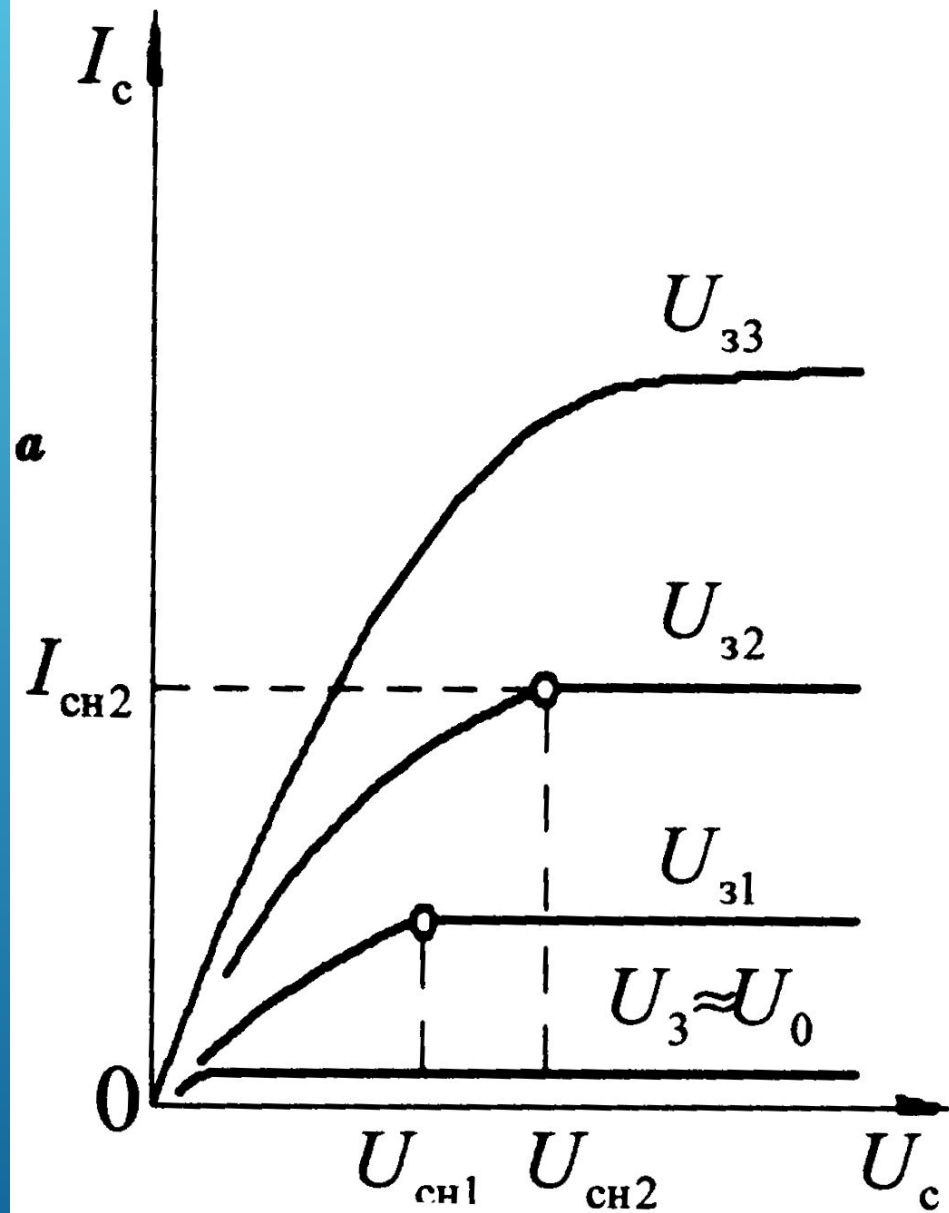


Распределение поля и зарядов в МДП-транзисторе при нулевом (а) и наибольшем положительном (б) напряжениях на стоке



Распределение поля и зарядов в МДП-транзисторе:

a — на границе насыщения ($U_{CH} = U_{сн}$); *б* — в области насыщения ($U_{CH} > U_{сн}$).



Статические характеристики МДП-транзистора:

a — выходные; *б* — передаточные.

$$I_c = b \left[(U_{\text{зи}} - U_0) U_{\text{си}} - 1/2 U_{\text{си}}^2 \right].$$

$$b = \mu C_0 \frac{Z}{L} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \mu}{d} \frac{Z}{L},$$

$$I_c = 1/2 b (U_{\text{зи}} - U_0)^2.$$

$$I_{\text{с ном}} = 1/2 b U_0^2.$$

$$I_c = b \left[(U_{зи} - U_0) U_{сн} - \frac{1}{2} (1 + \eta) U_{сн}^2 \right],$$

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{a / C_0}{\sqrt{\varphi_{sm}}}.$$

$$U_{сн} = \frac{1}{1 + \eta} (U_{зи} - U_0).$$

$$I_c = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \eta} (U_{зи} - U_0)^2.$$

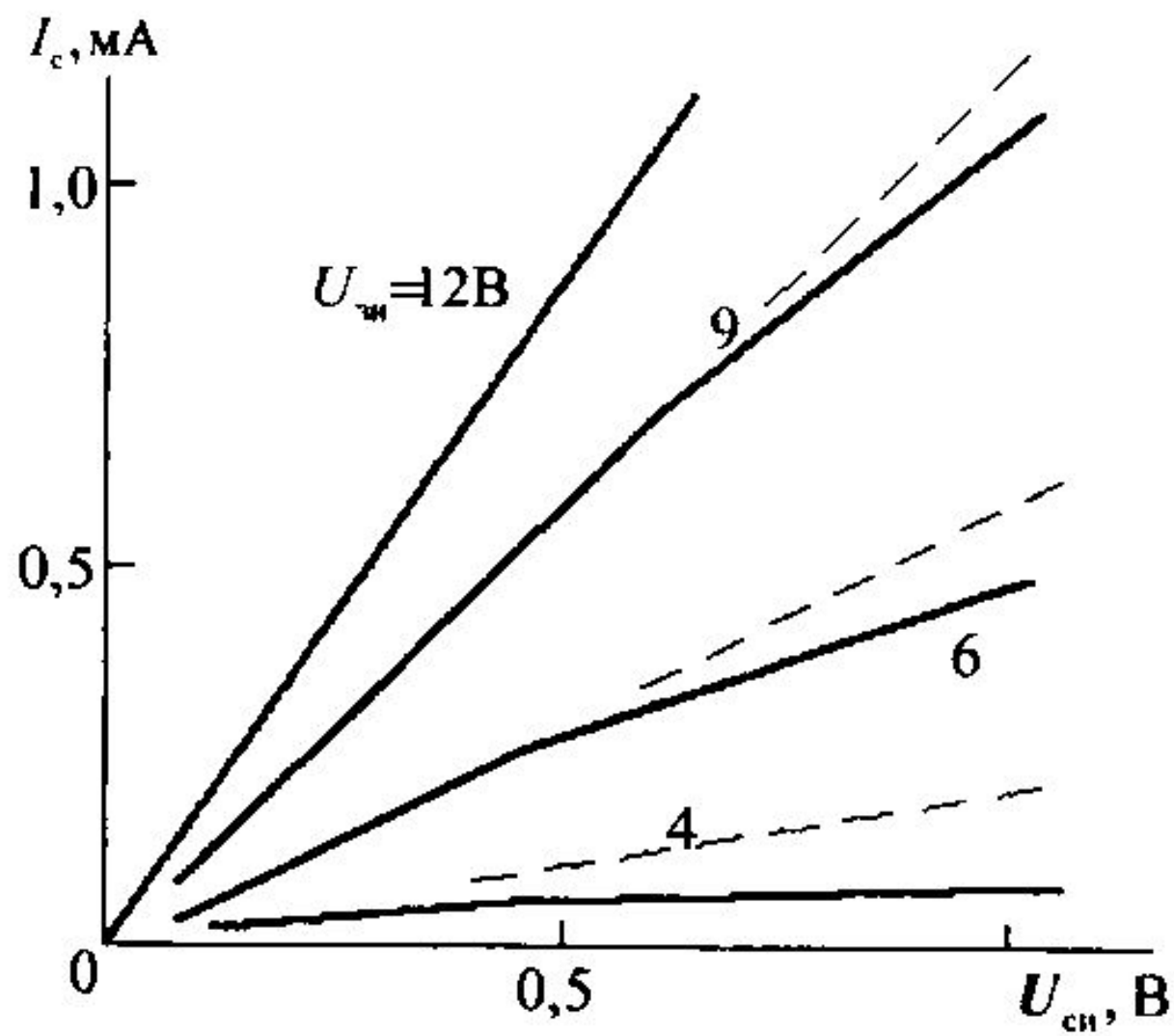
$$U_{0B} = \varphi_{sm} + \frac{a}{C_0} \sqrt{\varphi_{sm} + |U_{пн}|}.$$

$$I_c = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \eta} \left(U_{зи} - U_0 - \frac{2}{3} \eta |U_{пи}| \right)^2$$

$$U_{си} \ll U_{зи} - U_0$$

$$I_c = b(U_{зи} - U_0)U_{си}$$

$$R_0 = \frac{1}{b(U_{зи} - U_0)}$$



Начальные квазилинейные участки выходных характеристик МДП-транзистора

• крутизна $S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}} ;$

• внутреннее сопротивление $r_c = \left. \frac{dU_{си}}{dI_c} \right|_{U_{зи} = \text{const}} ;$

• коэффициент усиления $k = \left. \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right|_{I_c = \text{const}} .$

$$k = Sr_c ; \quad S = b(U_{зи} - U_0) ; \quad S = \sqrt{2bI_c} .$$

$$r_c = \left(L \sqrt{\frac{2qN}{\epsilon_0 \epsilon_{\pi}}} \right) \frac{\sqrt{U_c}}{I_c}$$

$$S = \frac{dI_{\kappa}}{dU_{\vartheta}} = \frac{dI_{\kappa}}{dI_{\vartheta}} \frac{dI_{\vartheta}}{dU_{\vartheta}},$$

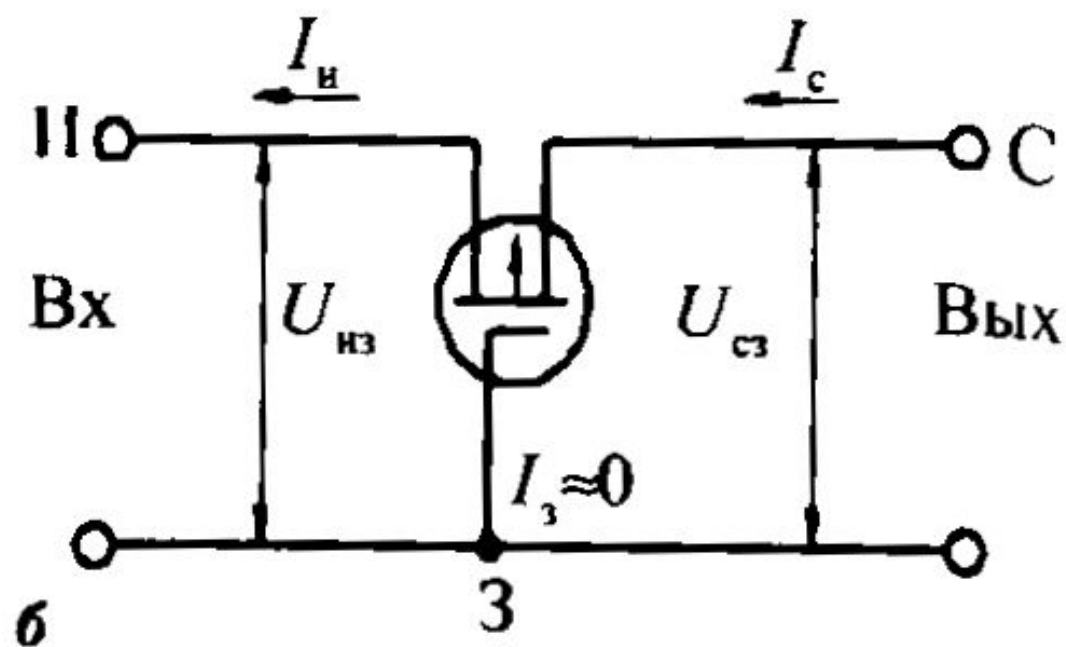
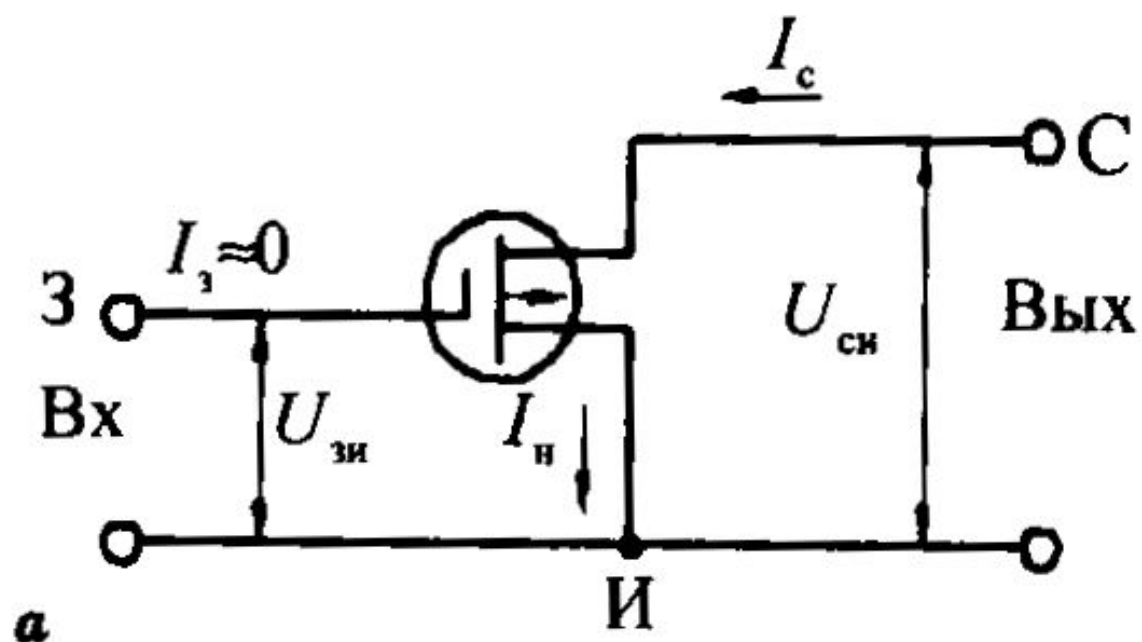
$$S = \alpha / r_{\vartheta} = \alpha I_{\vartheta} / \varphi_T.$$

$$k = S r_{\kappa} = r_{\kappa} / r_{\vartheta}.$$

$$k = 40\,000 - 80\,000.$$

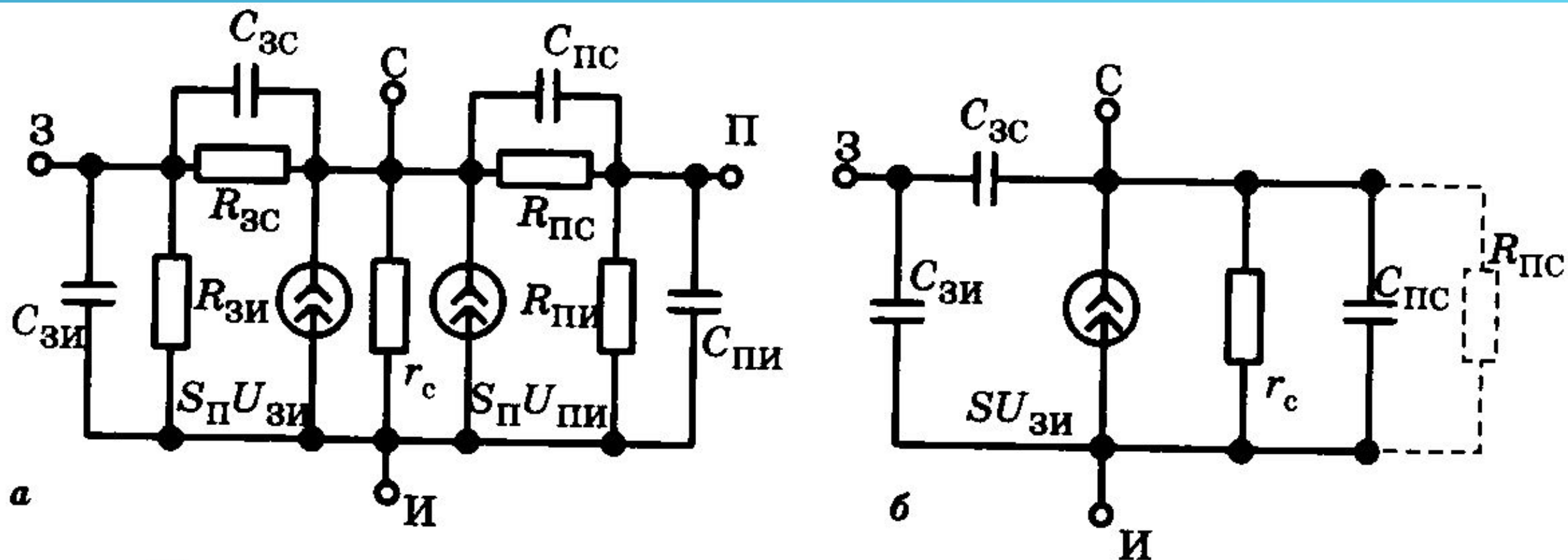
$$S_{\Pi} = -\frac{2}{3} \frac{\eta}{1+\eta} b \left(U_{\text{зи}} - U_0 - \frac{2}{3} |U_{\text{пи}}| \right)$$

$$S_3 = \frac{\eta}{1+\eta} \left(U_{\text{зи}} - U_0 - \frac{2}{3} \eta |U_{\text{пи}}| \right).$$



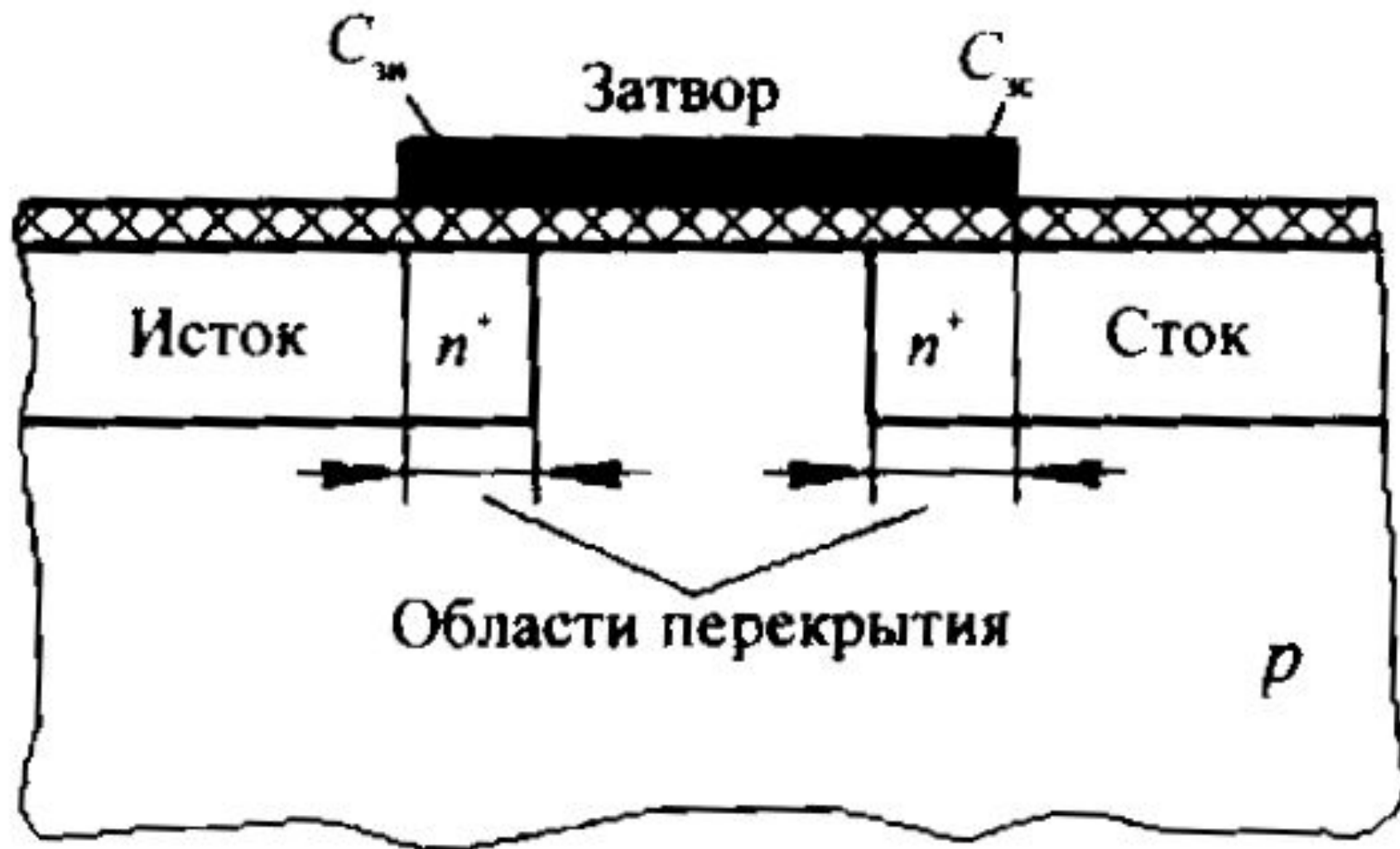
Включение МДП-транзистора с общим истоком (а)
и с общим затвором (б)

$$U_{зи.кр} - U_0 = (0,8 - 2,4) \text{ В}$$



Малосигнальные эквивалентные схемы МДП-транзистора:

a — полная; *б* — упрощенная при $U_{пи} = 0$.



**Перекрытие затвора,
емкости перекрытия**

