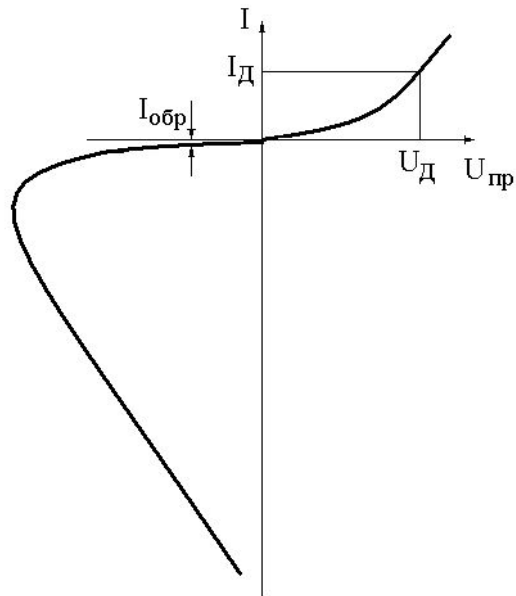
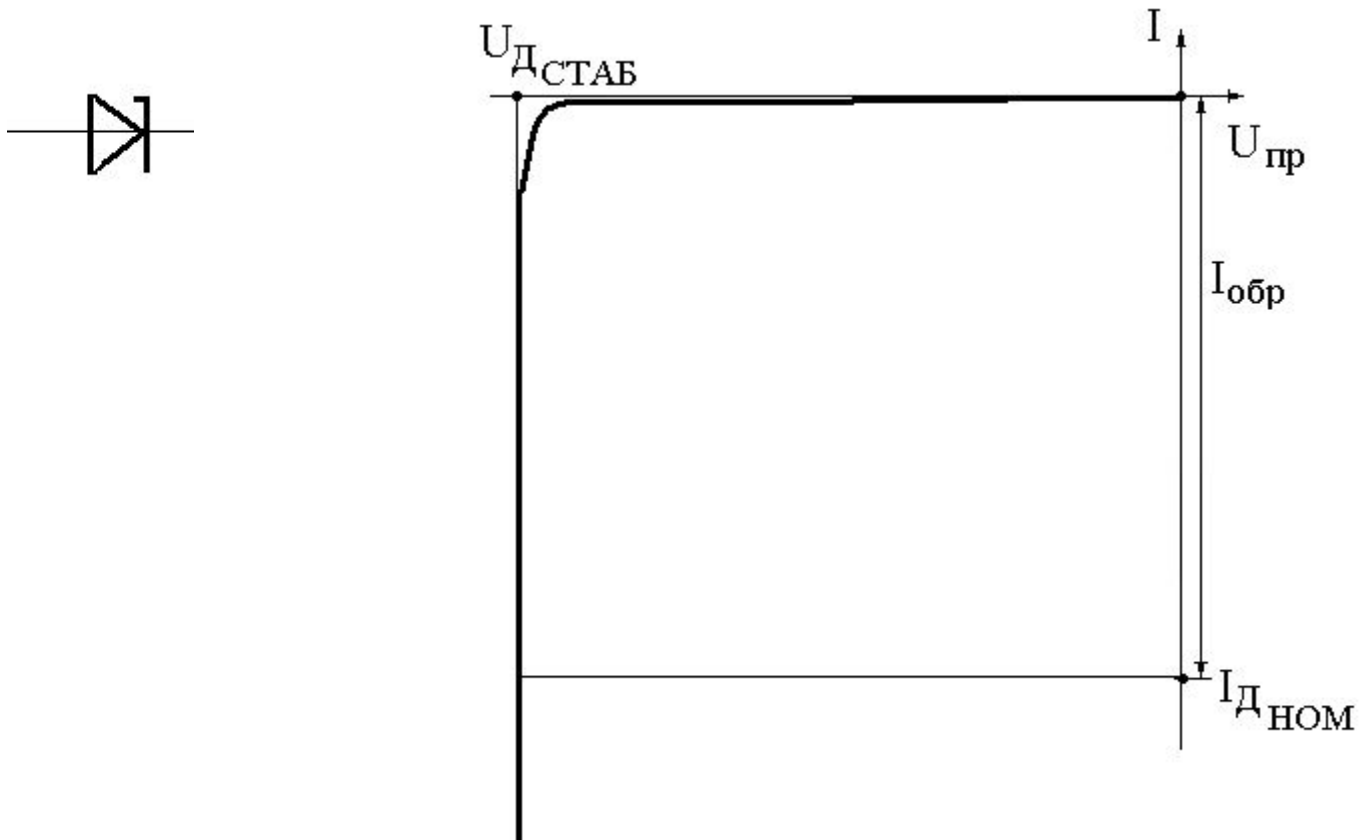


Полупроводниковый выпрямительный диод



Кремниевый стабилитрон



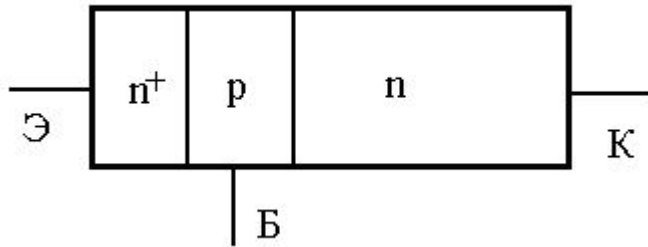
$I_{\text{СТАБ}}$

$I_{\text{Д.НОМ}}$

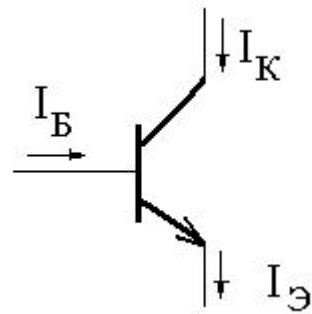
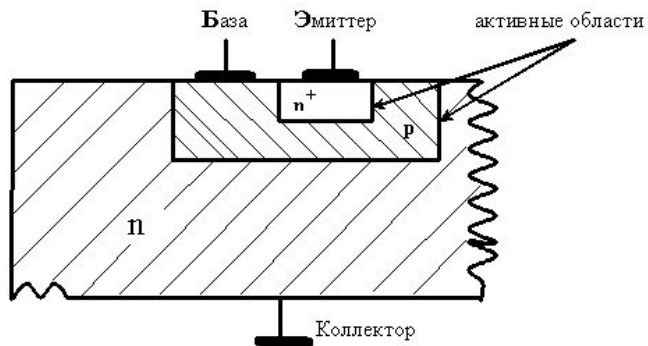
$I_{\text{МАКС}}$

$U_{\text{СТАБ.НОМ}}$

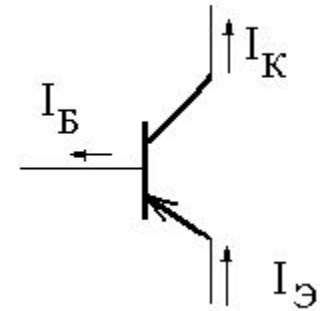
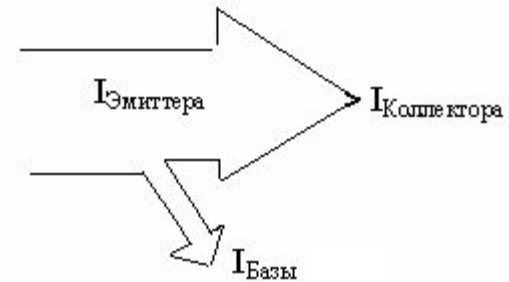
Биполярные транзисторы



Структура биполярного транзистора



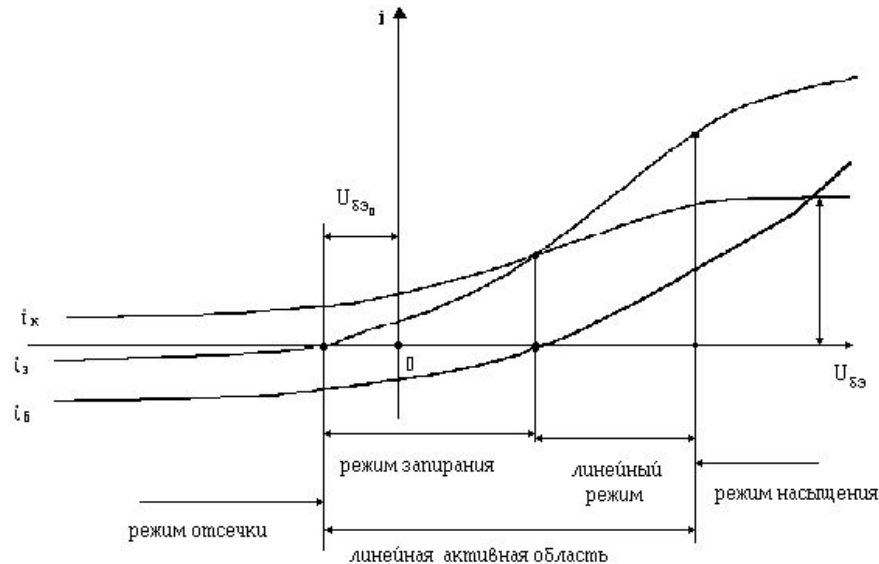
Тип n-p-n
p-n-p

**тип**

Представление токов в транзисторе

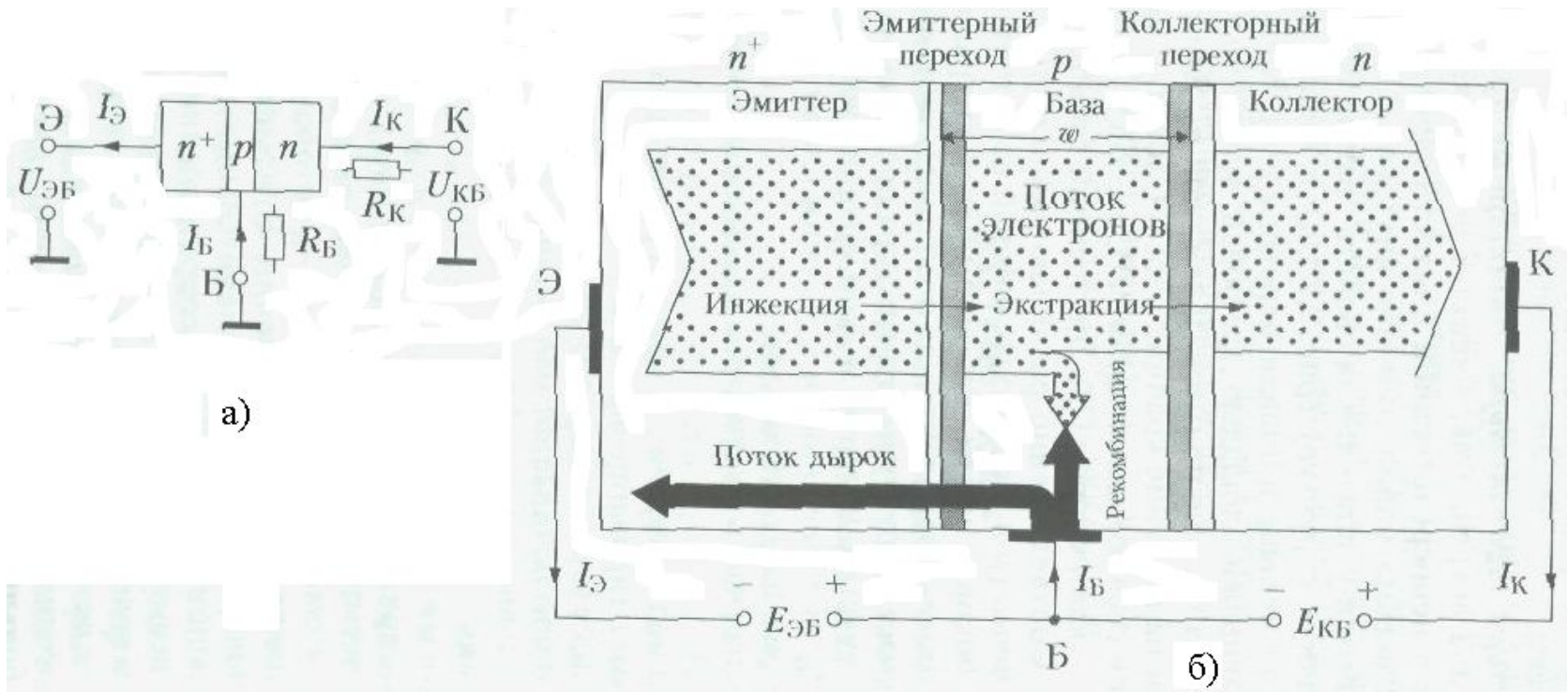
Биполярные транзисторы

Эмиттерный переход	Коллекторный переход	Режим работы
Закрит	Закрит	отсечки, запираия
Открит	Закрит	активный или линейный
Закрит	Открит	инверсный
Открит	Открит	насыщения



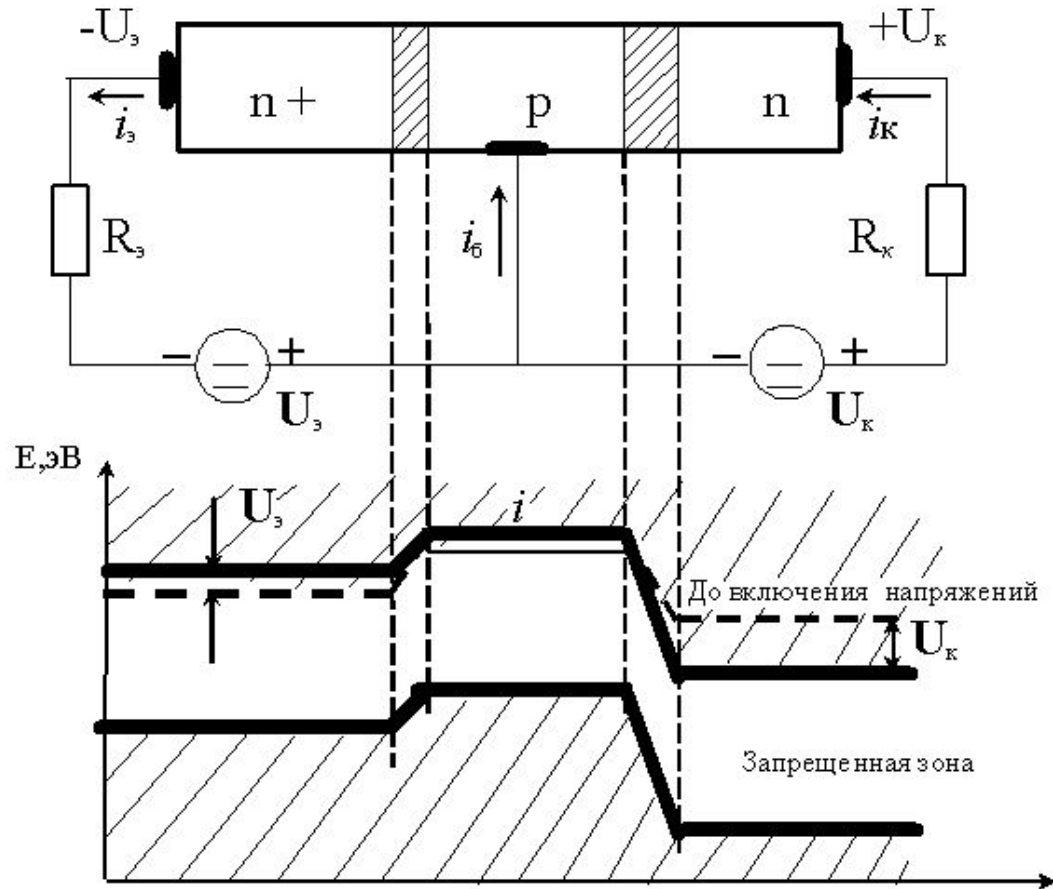
Режимы работы транзистора

Биполярные транзисторы



Структура биполярного транзистора в активном режиме

Биполярные транзисторы



Изменение энергетических состояний на переходах транзистора

Биполярные транзисторы

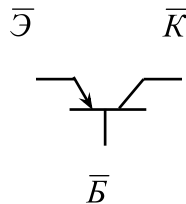
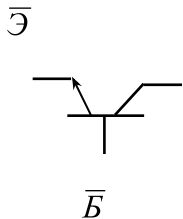
$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\dot{Y}}}$$

коэффициент передачи эмиттерного тока

$$(0,985 < \alpha < 0,995)$$

$$\beta = \frac{\Delta I_{\hat{E}}}{\Delta I_{\hat{A}}}$$

коэффициент передачи базового тока



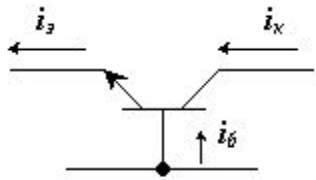
Различные
транзисторов

типы

биполярных

- *n-p-n*- типа или *n*-типа электропроводности (инжектируются основные носители n^-);
- *p-n-p*- типа или *p*- типа электропроводности (дырки являются в эмиттере основными носителями)

Биполярные транзисторы



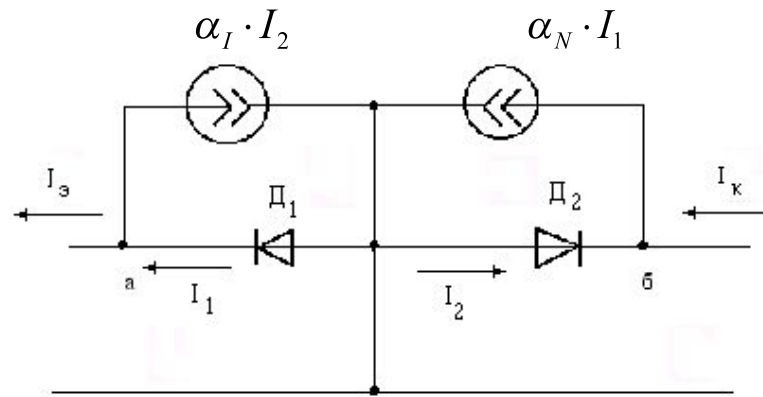
$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \approx \frac{I_K}{I_E}$$

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E} = \gamma \cdot \beta^* = \frac{I_{\varepsilon_n}}{I_{\varepsilon}}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\rho_{\varepsilon}}{\rho_{\delta}} \approx 0,985 \div 0,995$$

$$\beta^* = 1 - \left(\frac{W}{L} \right)^2 \cdot K$$

Биполярные транзисторы



$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{э}} = I_1 - \alpha_I I_2 \\ i_{\text{к}} = \alpha_N I_1 - I_2 \\ i_{\text{б}} = i_{\text{э}} - i_{\text{к}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} I_1 = I_{10} (e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1) \\ I_2 = I_{20} (e^{\frac{U_{\text{кб}}}{\varphi_T}} - 1) \end{array}$$

Из условий

$$i_{\text{э}} = 0; I_{\text{к}} = I_{\text{кб0}}; U_{\text{к}} < 0$$

можно получить

$$I_{20} = \frac{I_{\text{кб0}}}{1 - \alpha_2 \alpha_N}$$

, а из условий

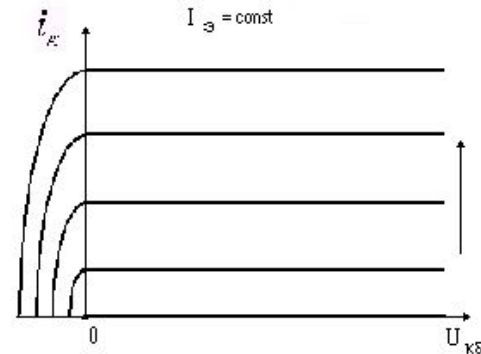
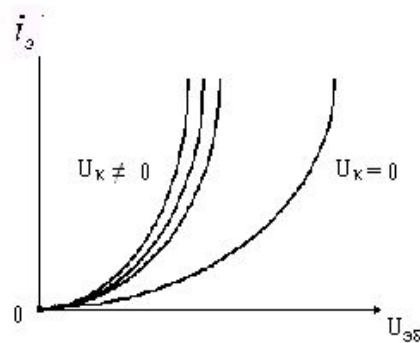
$$i_{\text{к}} = 0; I_{\text{э}} = I_{\text{кб0}}; U_{\text{э}} < 0$$

можно получить

$$I_{20} = \frac{I_{\text{эб0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N}$$

Биполярные транзисторы

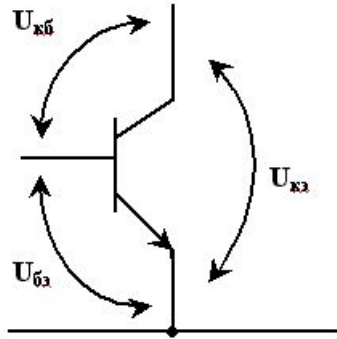
$$\begin{aligned}
 i_{\vartheta} &= \frac{I_{\vartheta 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\vartheta \delta}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \frac{I_{\kappa \delta 0} \alpha_I}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\kappa \delta}}{\varphi_T}} - 1 \right) \\
 i_k &= \frac{\alpha_N I_{\vartheta 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\vartheta \delta}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \frac{\kappa \delta I_{\vartheta 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\kappa \delta}}{\varphi_T}} - 1 \right) \\
 i_{\delta} &= i_{\vartheta} - i_{\kappa}
 \end{aligned}$$



$$i_{\hat{E}} = \alpha_N (i_{\hat{Y}} + \alpha_I I_2) - I_2 = \alpha_N i_{\hat{Y}} + I_2 (\alpha_I \alpha_N - 1) = \alpha_N i_{\hat{Y}} + \frac{I_{\hat{E} \hat{A} 0}}{1 - \alpha_I \alpha_N} (1 - \alpha_I \alpha_N) = \alpha_N i_{\hat{Y}} + I_{\hat{E} \hat{A} 0}$$

$$\alpha_N \cdot i_{\hat{Y}} + I_{\hat{E} \hat{A} \hat{I}} + \frac{U_{\hat{E} \hat{A}}}{r_{\hat{E} \hat{A}}}$$

Биполярные транзисторы

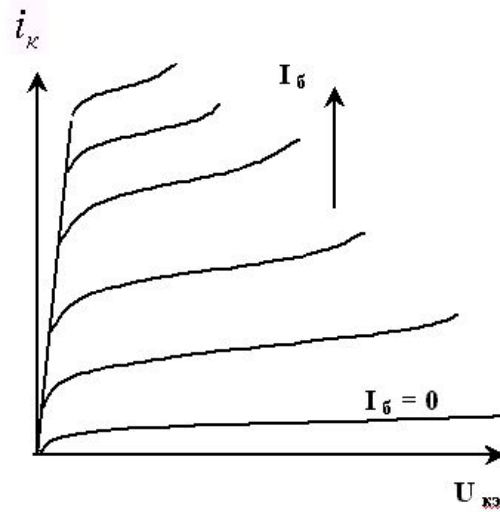
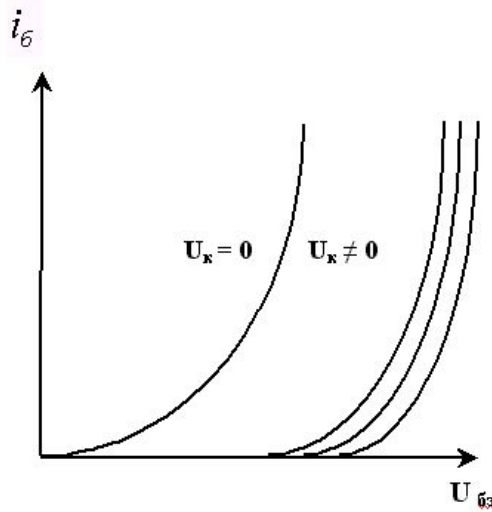


$$U_{\hat{E}\dot{Y}} = U_{\hat{A}\dot{Y}} + U_{\hat{E}\hat{A}} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{\Delta I_{\hat{E}}}{\Delta I_{\hat{A}}} \approx \frac{I_{\hat{E}}}{I_{\hat{A}}}$$

$$I_{\dot{Y}} = I_{\hat{E}} + I_{\hat{A}}$$

$$\frac{1}{1 - \alpha_N} = 1 + \beta_N$$

$$i_{\hat{E}} = \beta \cdot i_{\hat{A}} + I_{\hat{E}\hat{A}0}(1 + \beta) \quad i_{\hat{E}} = \beta \cdot i_{\hat{A}} + I_{\hat{E}\hat{A}0}(1 + \beta) + \frac{U_{\hat{E}\dot{Y}}}{r_{\hat{E}}^*}$$

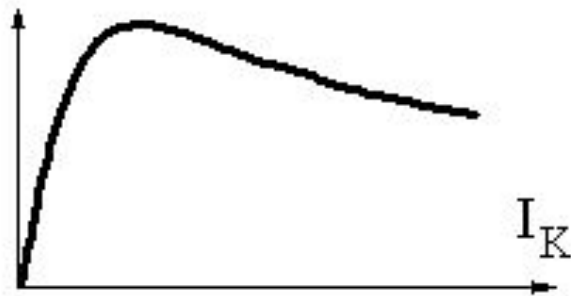


$$r_{\kappa}^* = \frac{r_{\kappa\delta}}{1 + \beta}$$

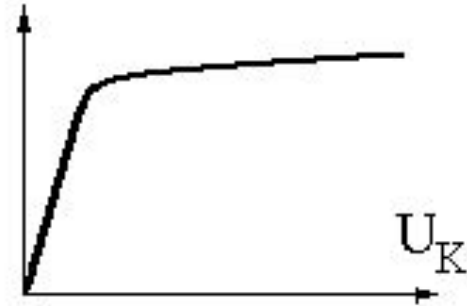
Семейства ВАХ при включении транзистора с общим эмиттером

Биполярные транзисторы

β



β



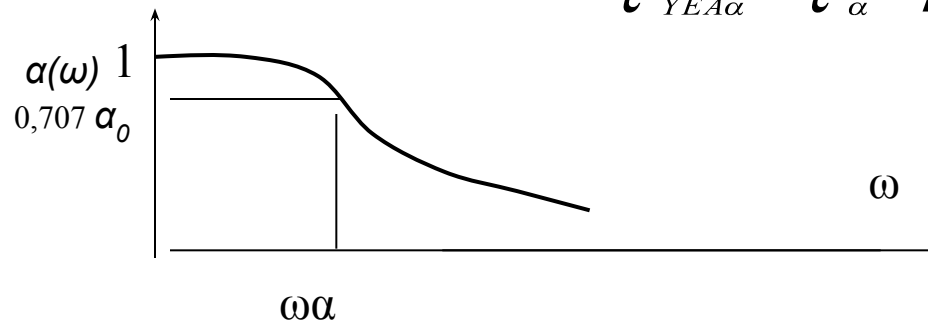
Зависимость коэффициента передачи тока β от электрического режима

$$\tau_{\alpha} = \frac{1}{\omega_{\alpha}} = \frac{1}{2\pi f_{\alpha}}$$

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega\tau_{\text{экв.}\alpha}}$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{\text{экв.}\alpha})^2}}$$

$$\tau_{\text{экв.}\alpha} = \tau_{\alpha} + \tilde{n}_{\text{экв.}\alpha} R_{\text{экв.}\alpha}$$



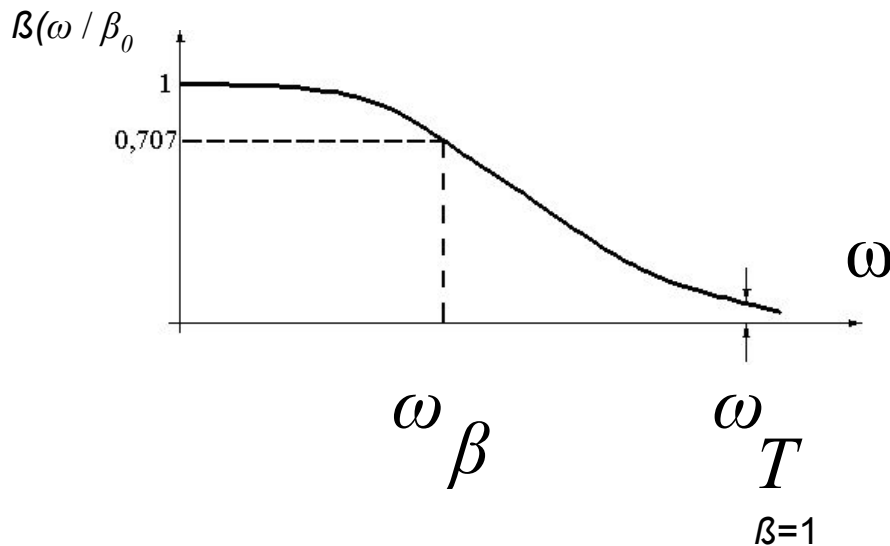
Биполярные транзисторы

$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_i}{1 + j\omega\tau_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}$$

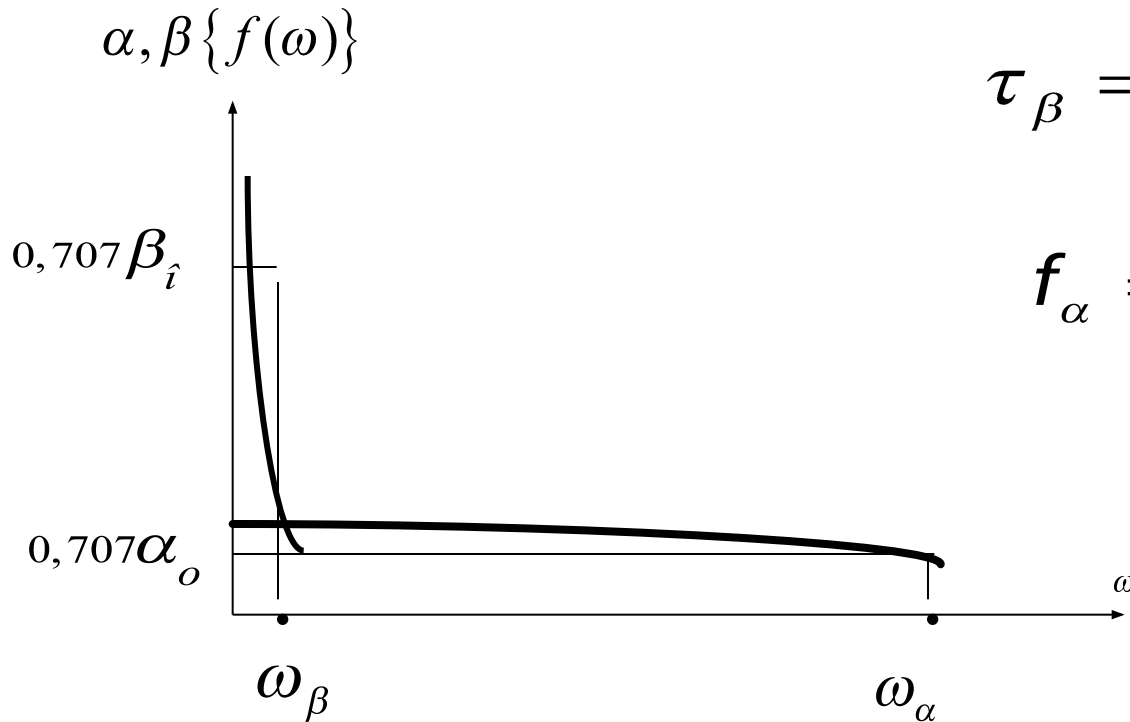
$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A},\beta})^2}}$$

$$\tau_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A},\beta} = \tau_{\beta} + C_{\hat{E}\hat{A}}^* R_{\hat{E}-\hat{I}}$$

$$C_{\hat{E}}^* = C_{\hat{E}\hat{A}} (1 + \beta_0)$$



Биполярные транзисторы



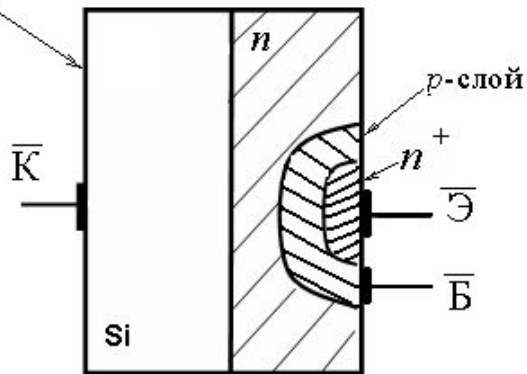
$$\tau_\beta = \frac{1}{\omega_\beta} = \frac{1}{2\pi f_\beta}$$

$$f_\alpha = (1 + \beta) f_\beta$$

Биполярные транзисторы

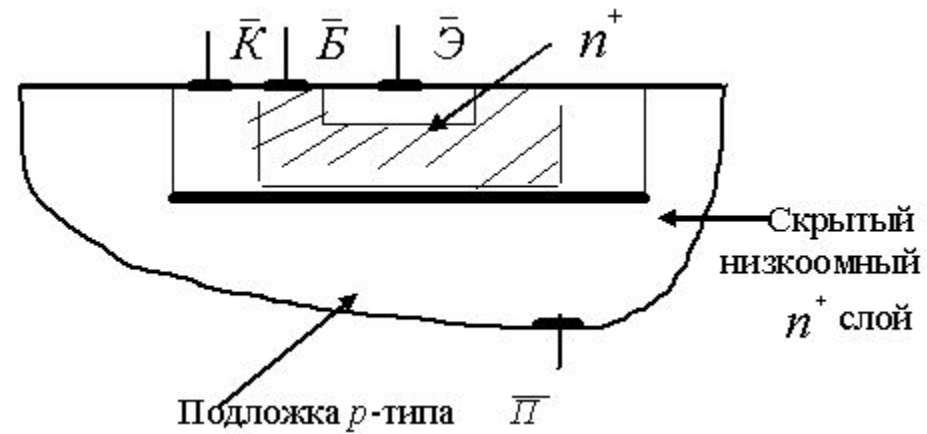
•Эпитаксиально –
диффузионные

Высокоомная эпитаксиальная плёнка n -типа

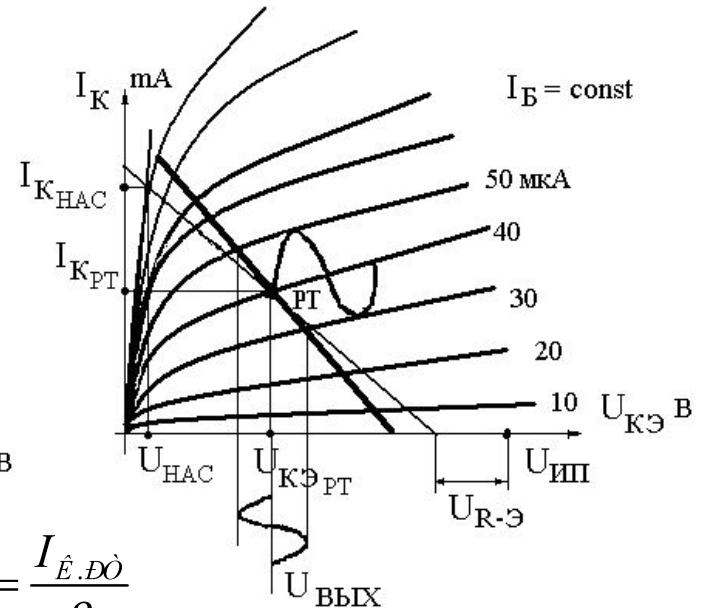
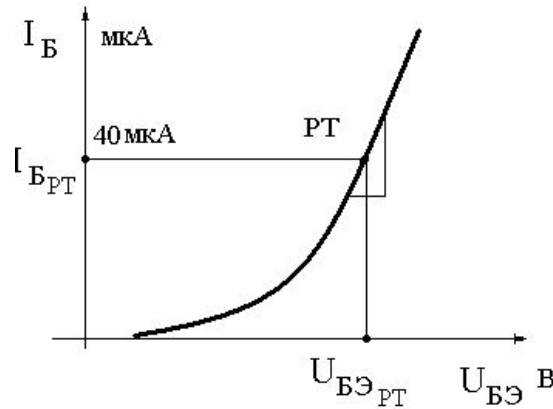
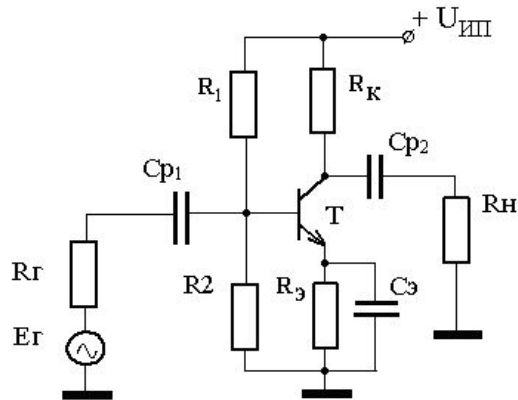


Низкоомная подложка

Планарные



Биполярные транзисторы

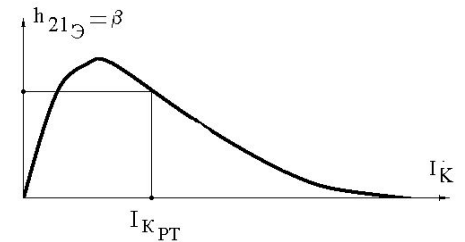


$$U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}} = I_{\hat{E}} * R_{\hat{E}} \quad I_{\hat{A}\hat{A}\hat{E}} = \frac{U_{\hat{E}\hat{I}}}{R_1 + R_2} > (2-5) * I_{\hat{A}\hat{D}\hat{O}} = \frac{I_{\hat{E}\hat{D}\hat{O}}}{\beta}$$

$$U_{R-\hat{Y}} = (0,1-0,15) * U_{\hat{E}\hat{I}}$$

$$R_1 \approx \frac{U_{\hat{E}\hat{I}} - U_{R-\hat{Y}} - U_{\hat{A}\hat{Y}\hat{D}\hat{O}}}{I_{\hat{A}\hat{D}\hat{O}}}$$

$$K_U = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{E_{\hat{A}}} = \frac{\beta * R_{\hat{E}-\hat{I}}}{R_{\hat{A}} + R_{\hat{A}\hat{O}}}$$



$$R_2 \approx \frac{U_{R-\hat{Y}} + U_{\hat{A}\hat{Y}\hat{D}\hat{O}}}{I_{\hat{A}\hat{A}\hat{E}}}$$

$$R_{\hat{A}\hat{O}} = r_{\hat{A}} + r_{\hat{Y}} * (1 + \beta_{\hat{D}\hat{O}}) \quad r_{\hat{Y}} = \frac{26 \hat{I}_{\hat{A}}}{I_{\hat{Y}} \hat{I}_{\hat{A}}} \quad r_{\hat{A}} - \text{объемное сопротивление базы} = 20 - 50 \text{ Ом}$$

$$R_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}} \approx r_{\hat{E}\hat{Y}} = 500 - 1000 \text{ кОм}$$

Биполярные транзисторы

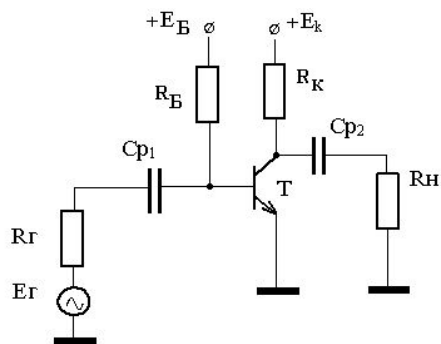


Схема ОЭ

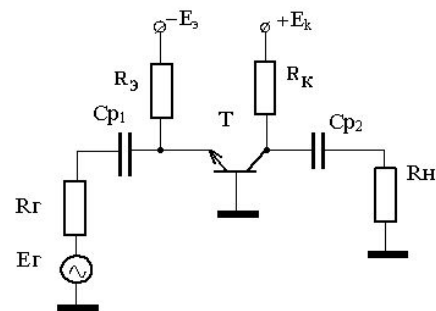


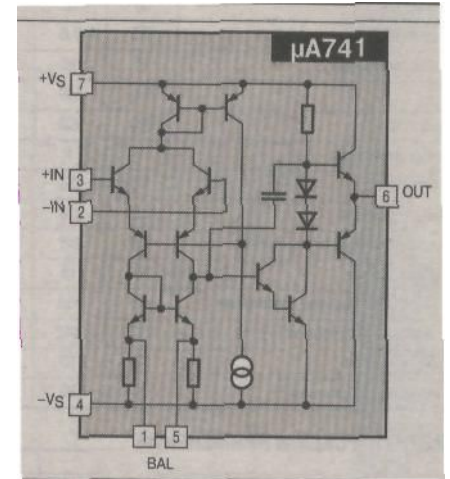
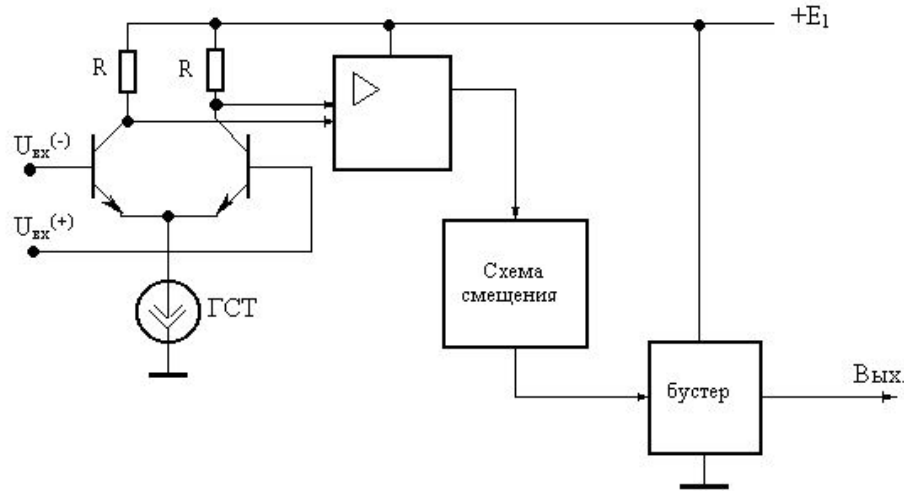
Схема ОБ

Операционные усилители

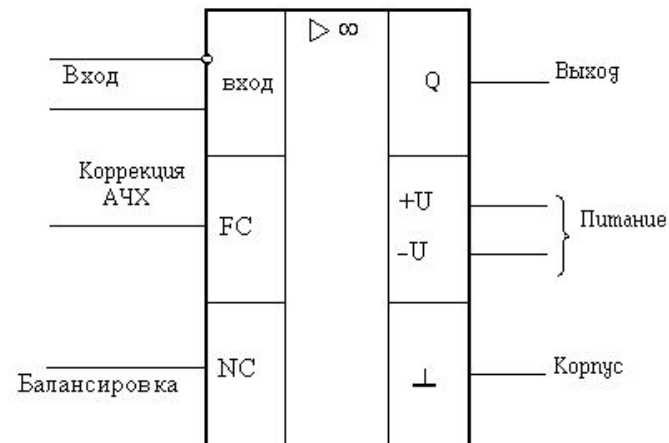
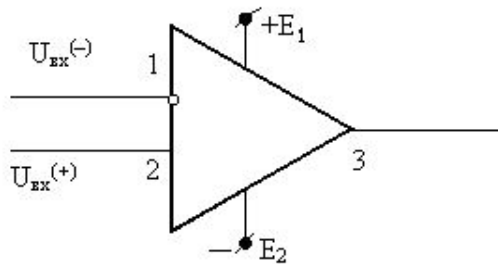
$$K_U \rightarrow \infty$$

$$R_{BX} \rightarrow \infty$$

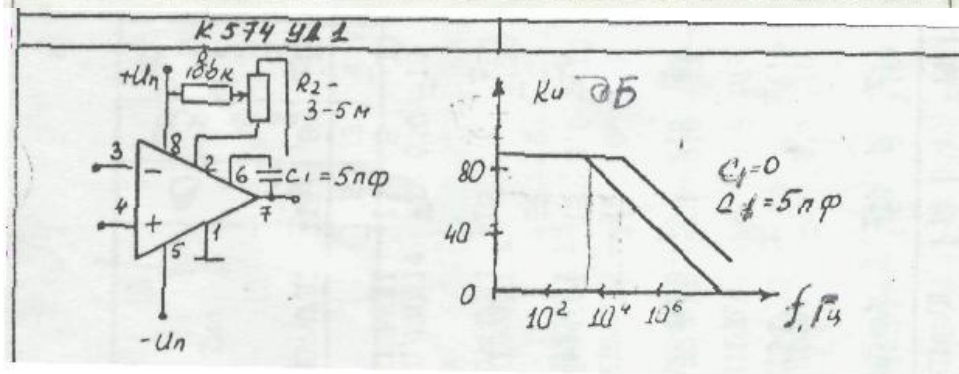
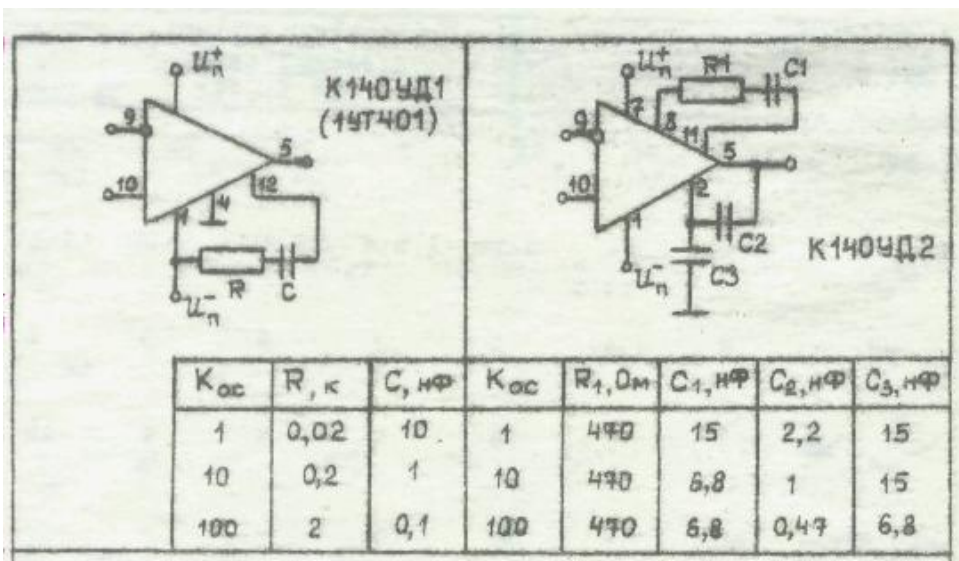
$$R_{ВЫХ} \rightarrow 0$$



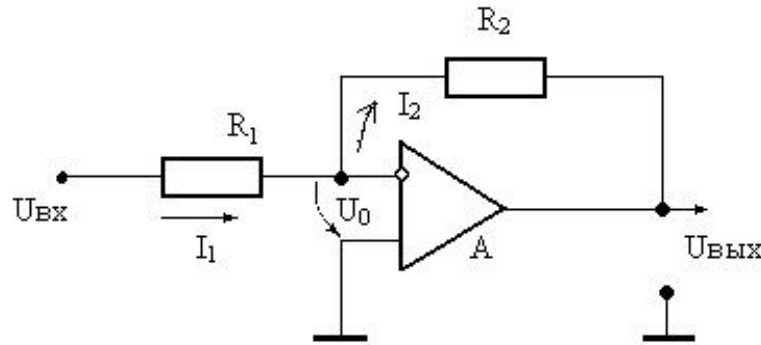
$$\Delta U_{ВЫХ} = \pm K_y U_{ВХ},$$



Операционные усилители



Операционные усилители

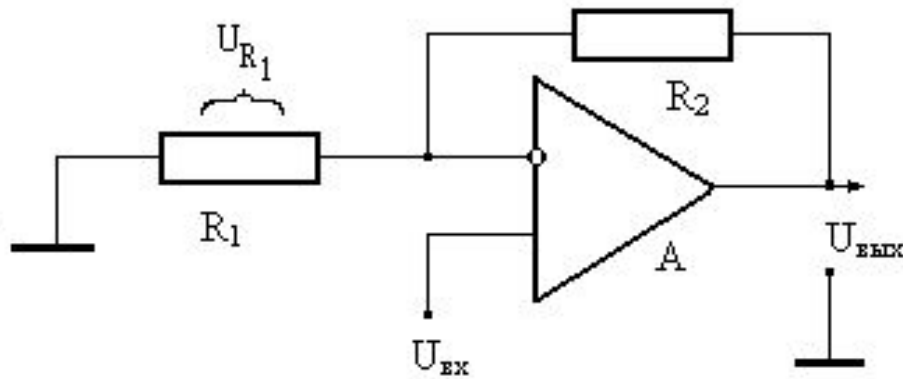


Из условия $I_1 = I_2$ (при $R_{ВХ} \rightarrow \infty$ $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$) имеем

$$I_1 = \frac{U_{\hat{A}\hat{O}} - U_0}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_0 - U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{R_2} \quad \hat{E}_{\hat{O}} = -\frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{U_0}$$

$$\hat{E}_U = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{U_{\hat{A}\hat{O}}} = -\frac{\hat{E}_{\hat{O}} R_2}{\hat{E}_{\hat{O}} R_1 + R_1 + R_2} = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{K_{\hat{O}}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

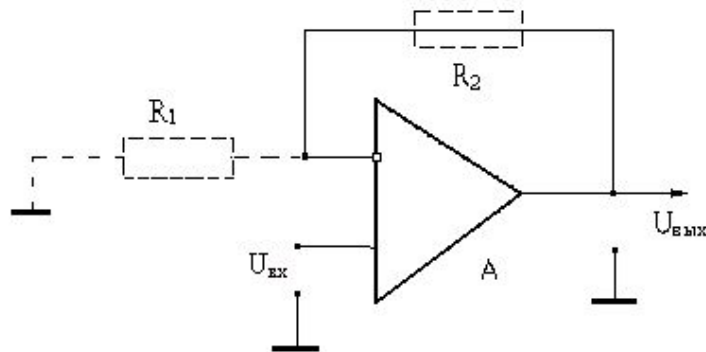
Операционные усилители



$$U_{R1} = U_{\text{вх}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

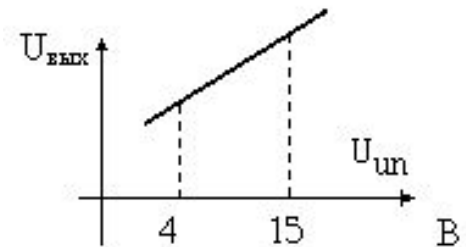
$$K_U = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



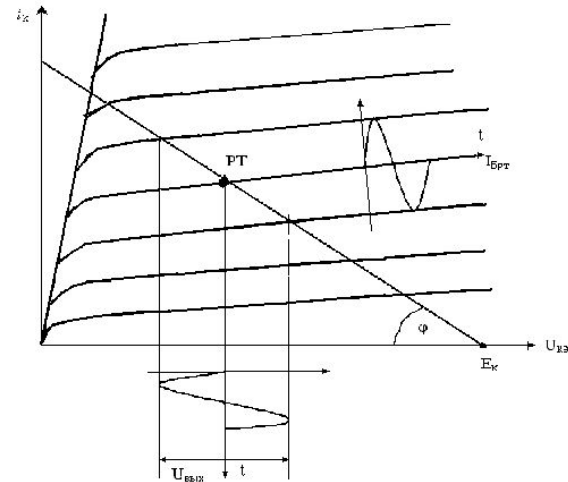
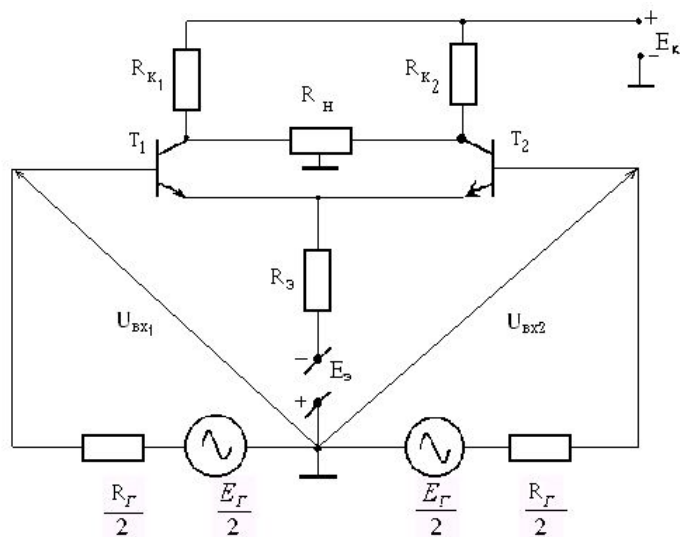
$$K_U^{\text{неинв}} = 1 + K_U^{\text{инв}}$$

$$\hat{E}_{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 1$$

$$K_{U_{\text{вх}}} = \frac{\hat{E}_{\text{вх}}}{1 + \hat{E}_{\text{вх}}}$$



Дифференциальный каскад



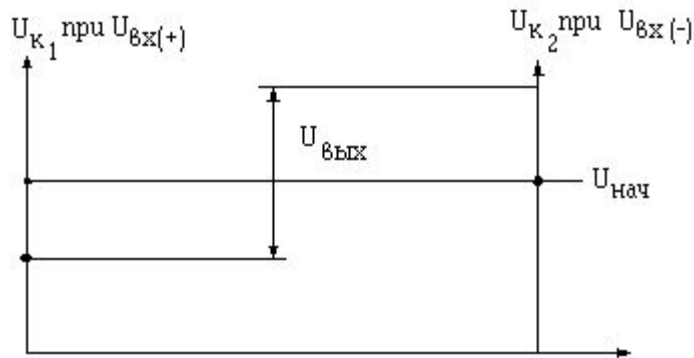
$$I_{\hat{A}\hat{D}\hat{O}} = \frac{I_{\hat{Y}}}{2(1 + \beta)}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R_{\hat{E}} \parallel \frac{R_{\hat{I}}}{2}}$$

$$I_{\hat{Y}\hat{\sim}\hat{O}\hat{I}} = \frac{E_{\hat{Y}}}{R_{\hat{Y}}} = I_{\hat{Y}1} + I_{\hat{Y}2} = 2I_{\hat{E}}$$

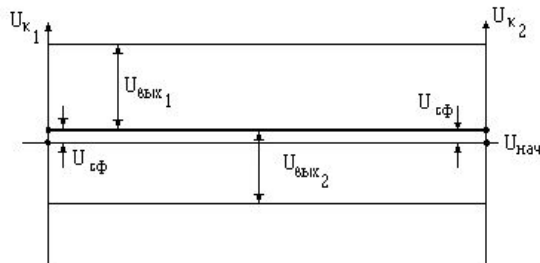
$$U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}} = \pm K_{U\hat{A}\hat{E}\hat{O}} (U_{\hat{A}\hat{O}1} - U_{\hat{A}\hat{O}2})$$

Дифференциальный каскад



$$U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{O}} = U_{\hat{e}1} - U_{\hat{e}2} = 0$$

$$K_{U\tilde{N}\hat{O}} = \frac{\Delta U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{O}}}{\Delta \left(\frac{U_{\hat{A}\tilde{O}1} + U_{\hat{A}\tilde{O}2}}{2} \right)}$$

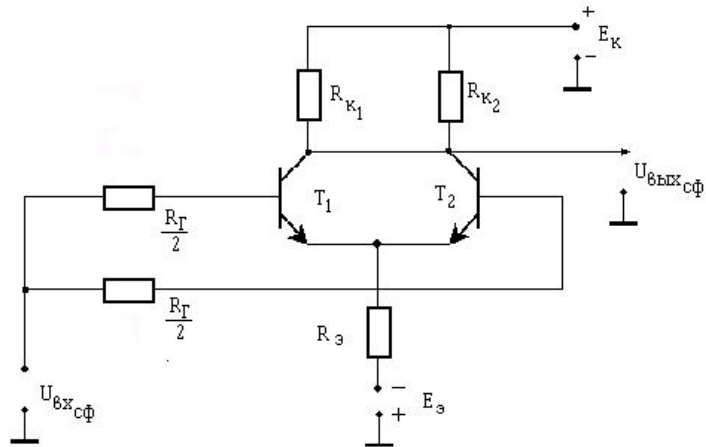


$$U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{O}} = (U_{\hat{A}\tilde{O}1} - U_{\hat{A}\tilde{O}2})K_{U.\tilde{A}\tilde{E}\hat{O}} + \frac{1}{2}(U_{\hat{A}\tilde{O}1} + U_{\hat{A}\tilde{O}2})K_{U.\tilde{N}\hat{O}}$$

$$R_{\text{вх.диф}} = 2R_{\text{вх.оэ}} = 2[r'_6 + r_9(1 + \beta)]$$

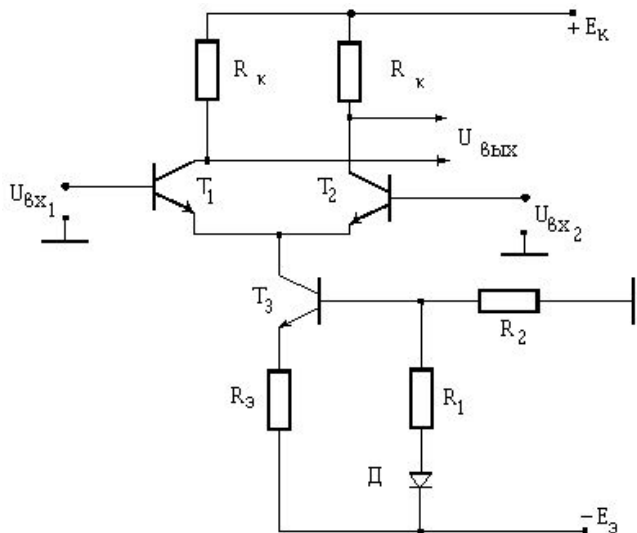
$$K_{U\tilde{A}\tilde{E}\hat{O}} = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{O}}}{\frac{E_{\tilde{A}}}{2}} = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{O}}}{E_{\tilde{A}}} = \frac{\beta(R_{\hat{E}} \parallel \frac{R_{\hat{I}}}{2})}{\frac{R_{\tilde{A}}}{2} + R_{\hat{A}\tilde{O}.\hat{I}\hat{Y}}} \quad K_{I.\tilde{A}\tilde{E}\hat{O}} = \frac{I_{\hat{I}}}{I_{\tilde{A}}} = \beta \frac{R_{\hat{E}}}{R_{\hat{E}} + \frac{R_{\hat{I}}}{2}} \cdot \frac{\frac{R_{\tilde{A}}}{2}}{\frac{R_{\tilde{A}}}{2} + R_{\hat{A}\tilde{O}.\hat{I}\hat{Y}}}$$

Дифференциальный каскад



$$K_{U.\tilde{N}\hat{O}} = \frac{U_{\hat{A}\tilde{O}.\tilde{N}\hat{O}}}{U_{\hat{A}\tilde{O}.\tilde{N}\hat{O}}} = \frac{\beta(R_{\hat{E}1} \parallel R_{\hat{E}2})}{R_{\hat{A}\tilde{O}.\tilde{N}\hat{O}}} \approx \frac{\beta \frac{R_{\hat{E}}}{2}}{\beta R_{\hat{Y}}} \approx \frac{R_{\hat{e}}}{2R_{\hat{y}}}$$

$$\hat{E}\hat{I} \tilde{N}\tilde{N}(\tilde{i} \partial \tilde{e}.R_{\hat{f}} \rightarrow \infty) = \frac{K_{U.\hat{A}\tilde{E}\hat{O}}}{K_{U.\tilde{N}\hat{O}}}$$



$$\hat{E}\hat{I} \tilde{N}\tilde{N} = \frac{\frac{\beta R_{\hat{E}}}{\frac{R_{\hat{A}}}{2} + R_{\hat{A}\tilde{O}.\hat{I}\hat{Y}}}}{\frac{R_{\hat{Y}}}{2R_{\hat{Y}}}} = \frac{2\beta \cdot R_{\hat{Y}}}{\frac{R_{\hat{A}}}{2} + R_{\hat{A}\tilde{O}.\hat{I}\hat{Y}}} = 4 \frac{\beta \cdot R_{\hat{Y}}}{R_{\hat{A}} + R_{\hat{A}\tilde{O}.\hat{A}\tilde{E}\hat{O}}}$$

$$I_{\hat{E}.\hat{O}3} = \alpha I_{\hat{Y}} = \alpha \frac{E_{\hat{Y}}}{R_{\hat{Y}}} \approx \frac{E_{\hat{Y}}}{R_{\hat{Y}}}$$

$$R_{\hat{\kappa}\hat{e}} = (r_{\hat{\kappa}\hat{O}} + R_{\hat{I}-2}) \parallel (r_{\hat{\kappa}\hat{E}} + \beta R_{\hat{3}}) \approx r_{\hat{\kappa}\hat{O}}$$