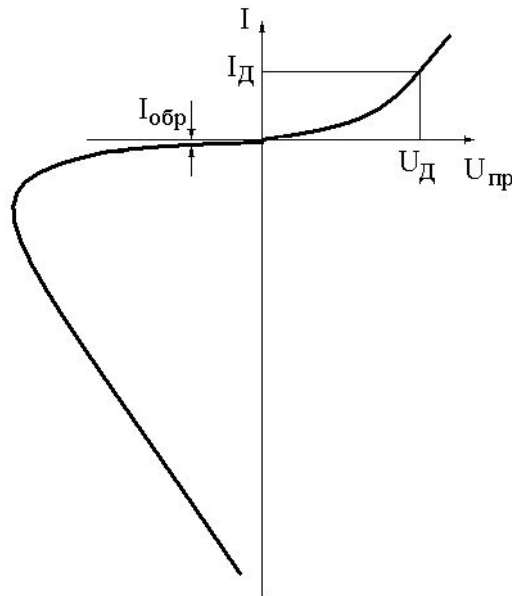
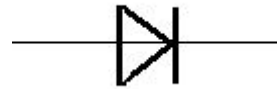
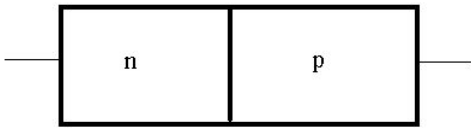
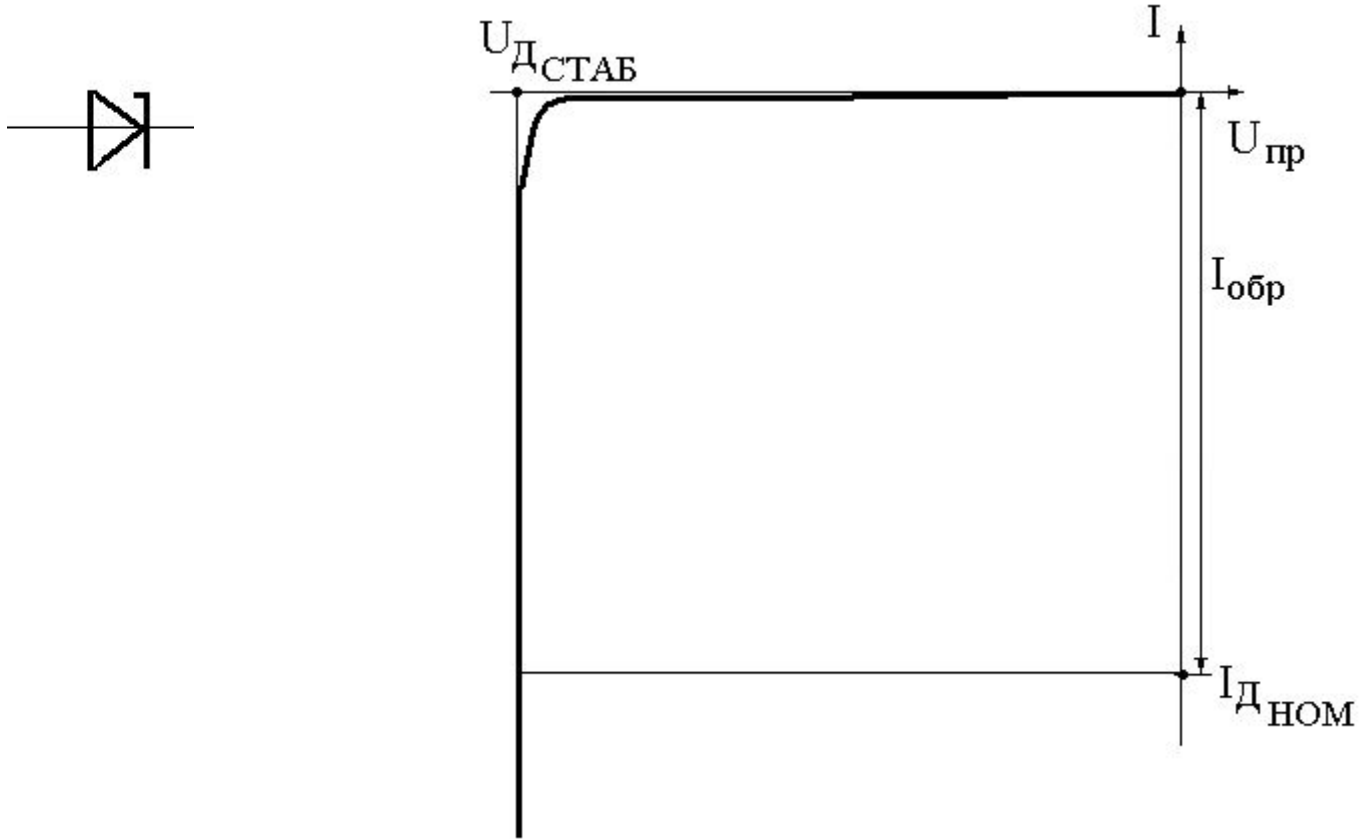


Полупроводниковый выпрямительный диод



Кремниевый стабилитрон



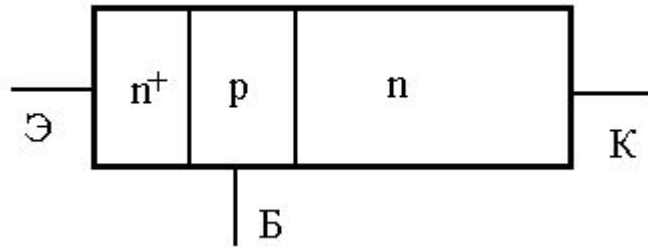
$I_{\text{СТАБ}}$

$I_{\text{Д.НОМ}}$

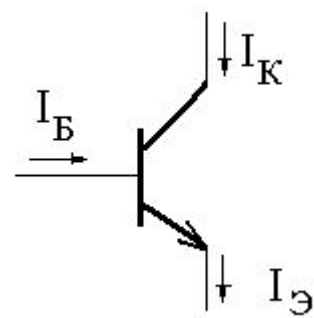
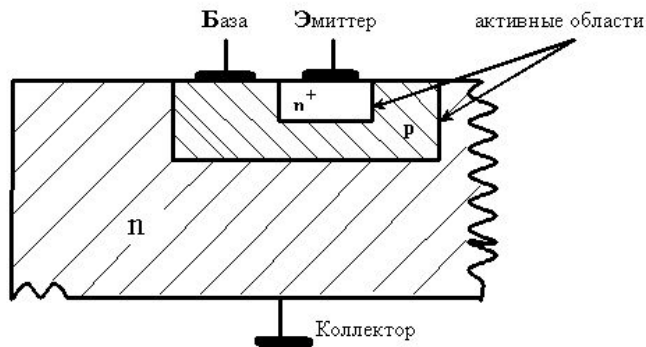
$I_{\text{МАКС}}$

$U_{\text{СТАБ.НОМ}}$

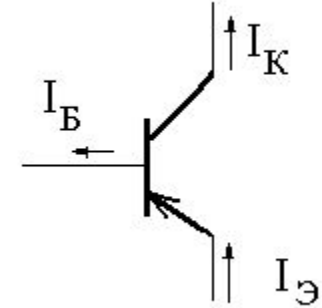
Биполярные транзисторы



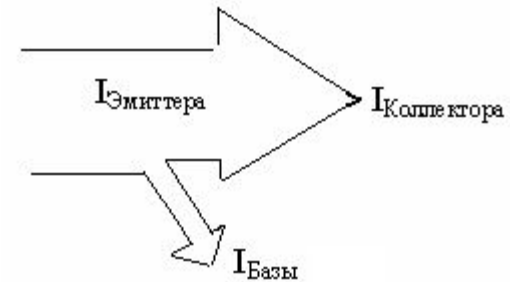
Структура биполярного транзистора



Тип n - p - n
 p - n - p



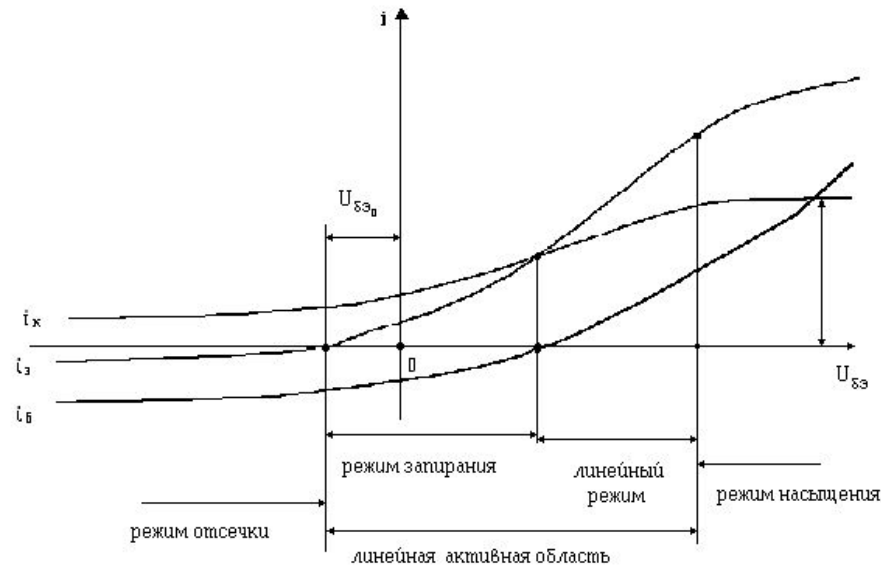
тип



Представление токов в транзисторе

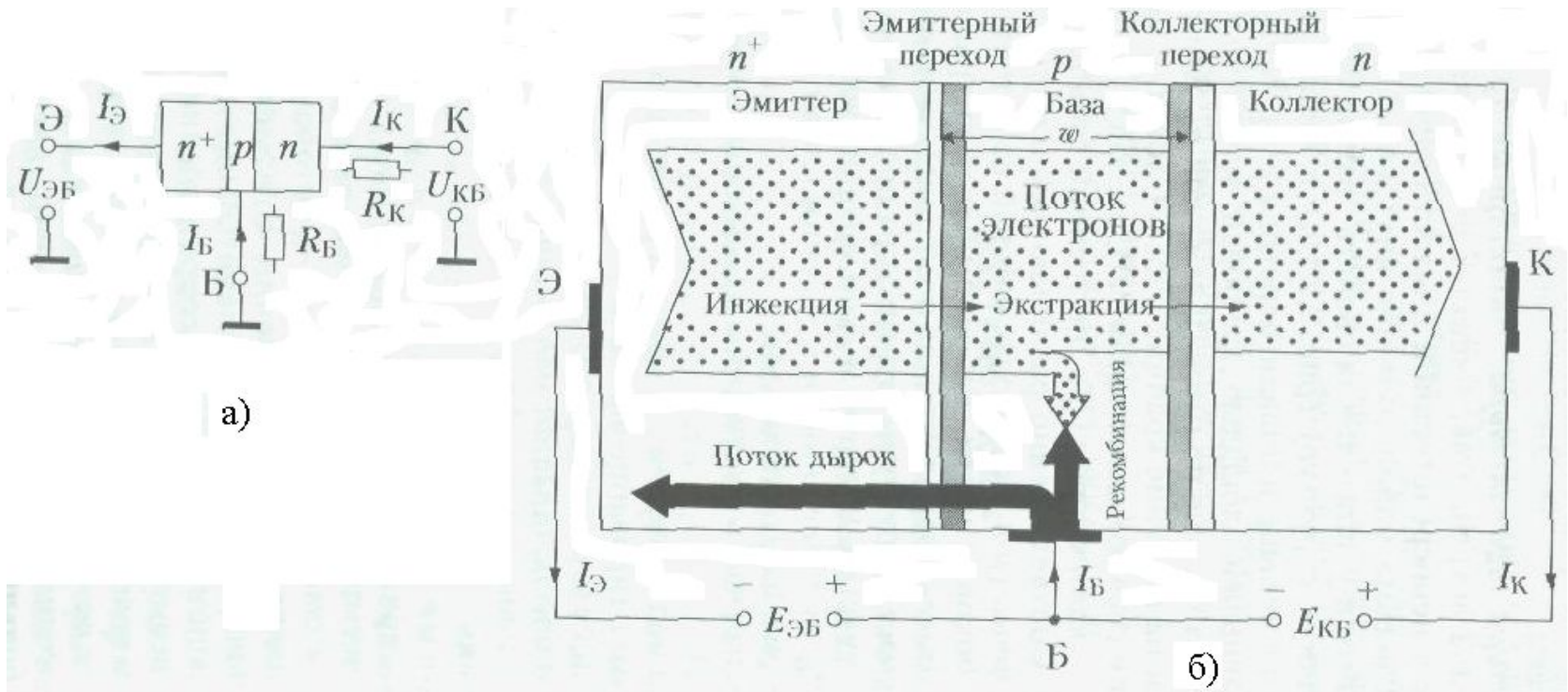
Биполярные транзисторы

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



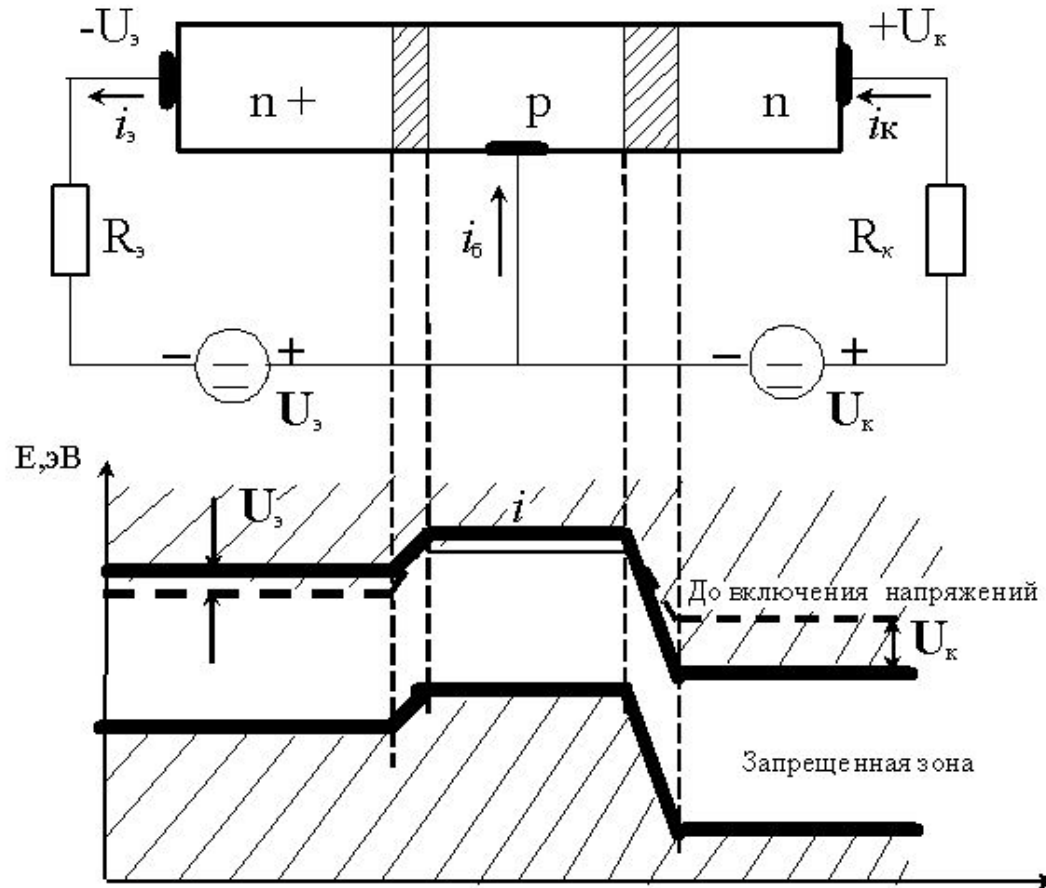
Режимы работы транзистора

Биполярные транзисторы



Структура биполярного транзистора в активном режиме

Биполярные транзисторы



Изменение энергетических состояний на переходах транзистора

Биполярные транзисторы

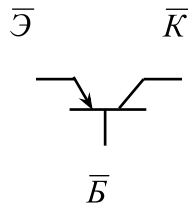
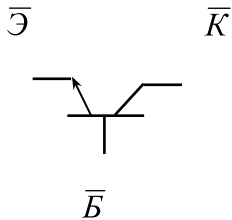
$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\dot{Y}}}$$

коэффициент передачи эмиттерного тока

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

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

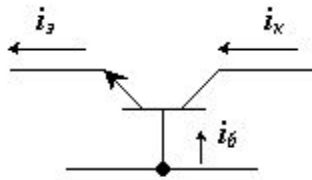
коэффициент передачи базового тока



Различные типы биполярных транзисторов

- *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



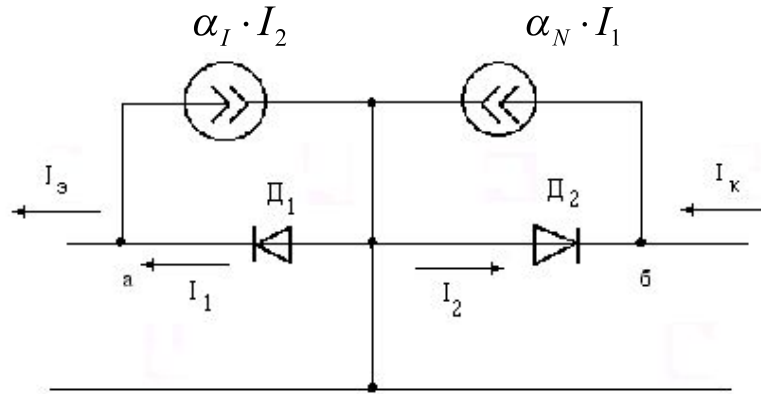
$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \approx \frac{I_K}{I_E}$$

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

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

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

Биполярные транзисторы



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

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

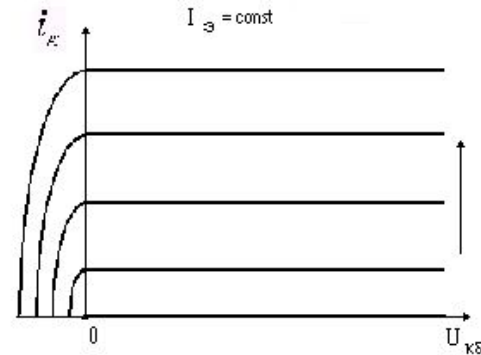
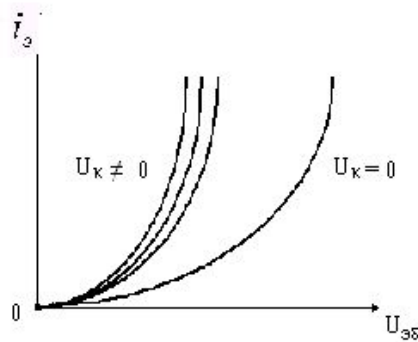
$$I_{20} = \frac{I_{\text{эб0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N}$$

Биполярные транзисторы

$$i_{\text{э}} = \frac{I_{\text{эб0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\text{эб}}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \frac{I_{\text{кб0}} \alpha_I}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\text{кб}}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$i_{\text{к}} = \frac{\alpha_N I_{\text{эб0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\text{эб}}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \frac{I_{\text{кб0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N} \left(e^{\frac{U_{\text{кб}}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

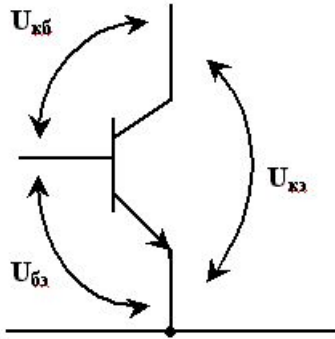
$$i_{\text{б}} = i_{\text{э}} - i_{\text{к}}$$



$$i_{\text{э}} = \alpha_N (i_{\text{б}} + \alpha_I I_{\text{э2}}) - I_{\text{э2}} = \alpha_N i_{\text{б}} + I_{\text{э2}} (\alpha_I \alpha_N - 1) = \alpha_N i_{\text{б}} + \frac{I_{\text{э2}}}{1 - \alpha_I \alpha_N} (1 - \alpha_I \alpha_N) = \alpha_N i_{\text{б}} + I_{\text{э2}}$$

$$\alpha_N \cdot i_{\text{б}} + I_{\text{э2}} + \frac{U_{\text{э2}}}{r_{\text{э2}}}$$

Биполярные транзисторы

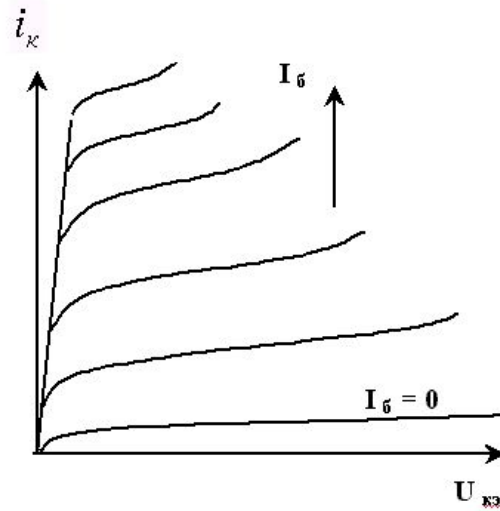
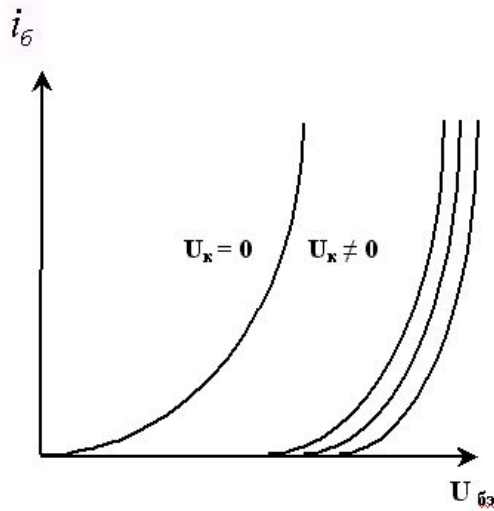


$$U_{\hat{E}\hat{Y}} = U_{\hat{A}\hat{Y}} + U_{\hat{E}\hat{A}} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{\Delta I_{\hat{E}}}{\Delta I_{\hat{A}}} \approx \frac{I_{\hat{E}}}{I_{\hat{A}}}$$

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

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

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

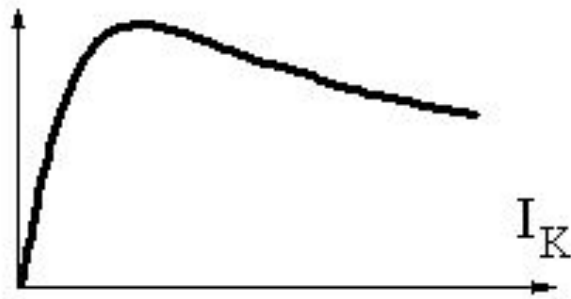


$$r_{к}^* = \frac{r_{кб}}{1 + \beta}$$

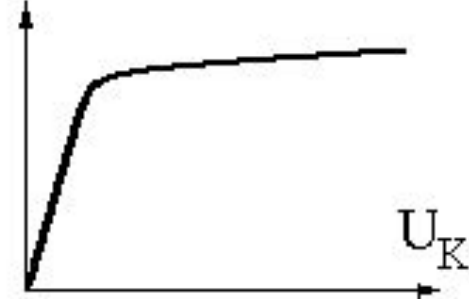
Семейства ВАХ при включении транзистора с общим эмиттером

Биполярные транзисторы

β



β



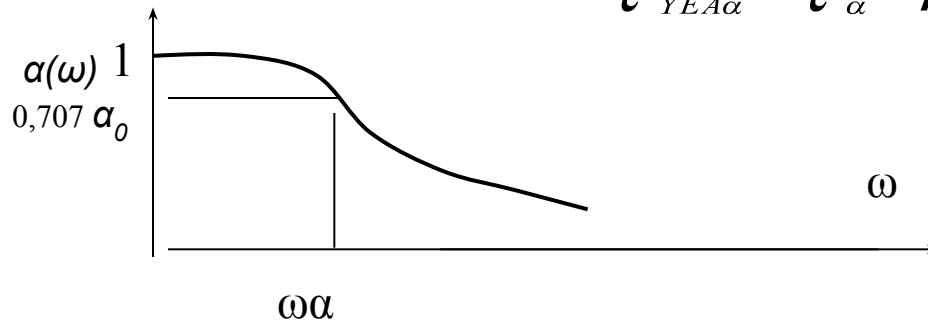
Зависимость коэффициента передачи тока β от электрического режима

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

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

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

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



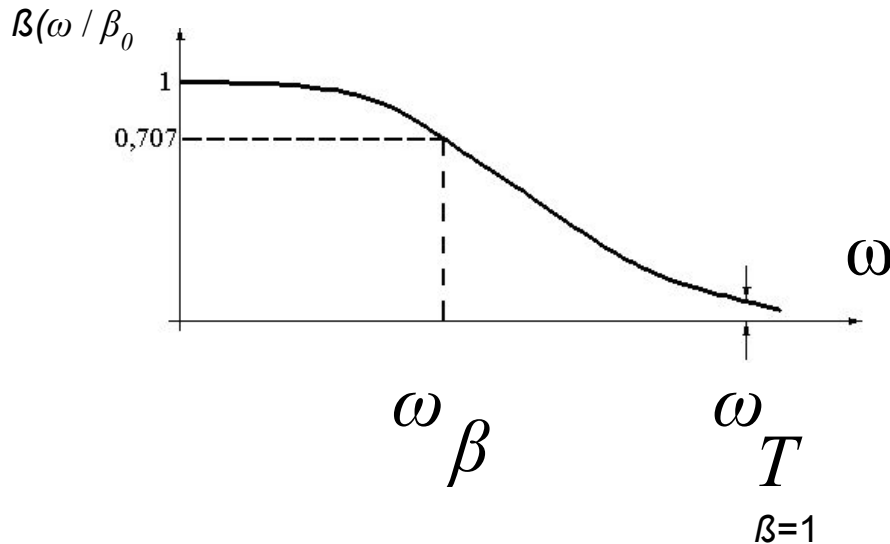
Биполярные транзисторы

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

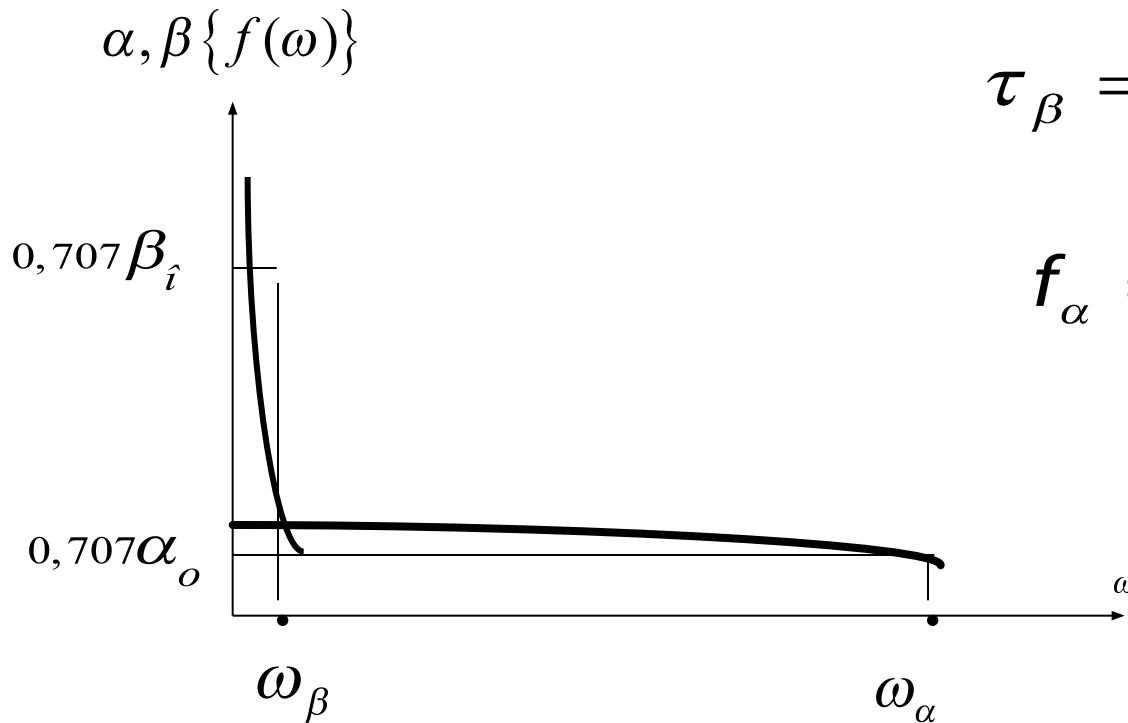
$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}.\beta})^2}}$$

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

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



Биполярные транзисторы



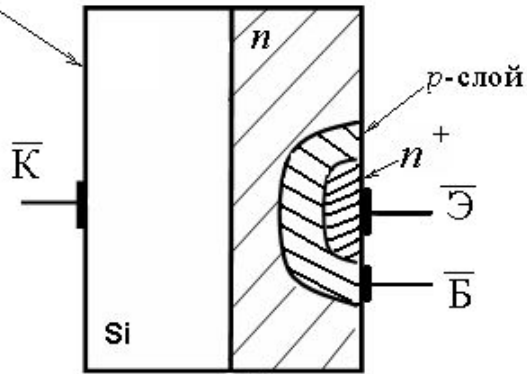
$$\tau_\beta = \frac{1}{\omega_\beta} = \frac{1}{2\pi f_\beta}$$

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

Биполярные транзисторы

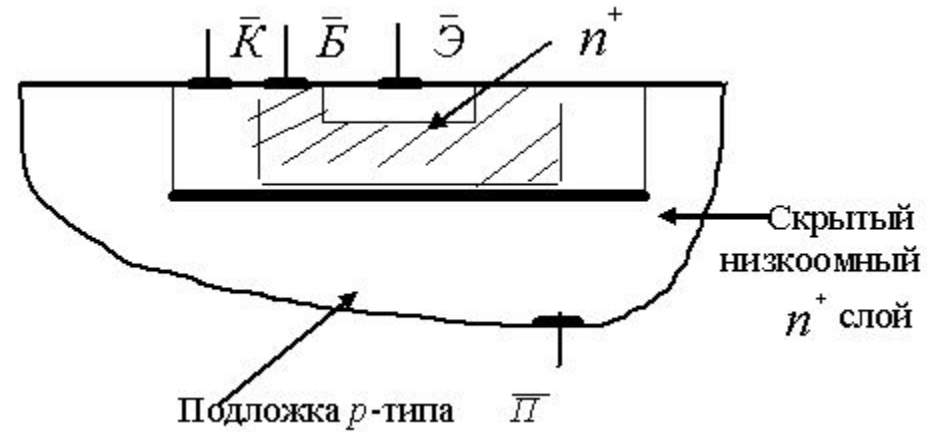
•Эпитаксиально –
диффузионные

Высокоомная эпитаксиальная плёнка n -типа

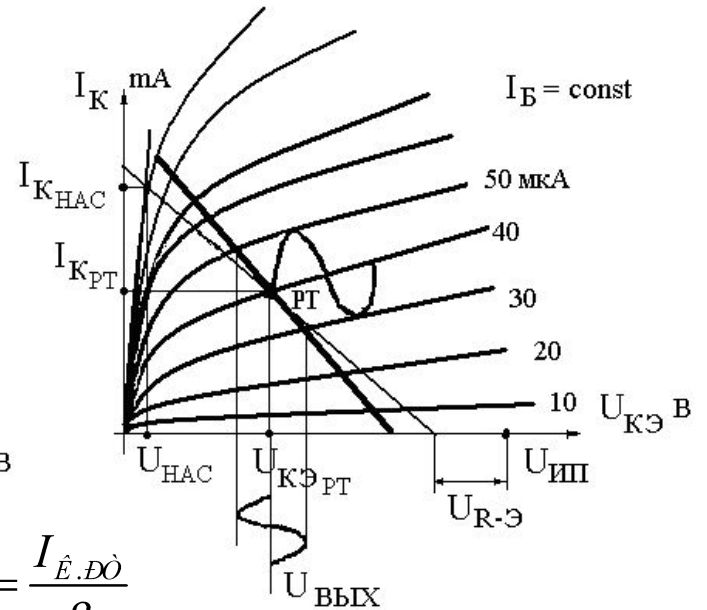
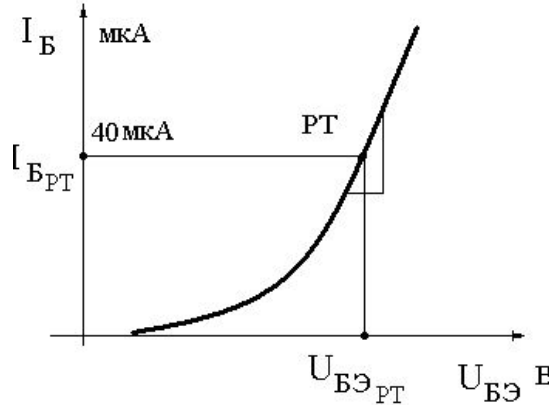
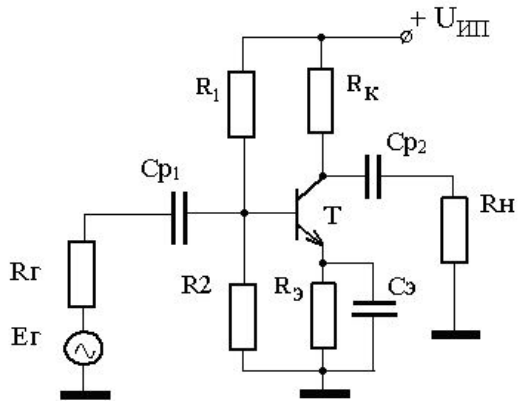


Низкоомная подложка

Планарные



Биполярные транзисторы



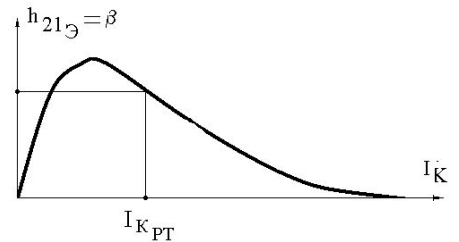
$$U_{\text{АУО}} = I_{\text{Е}} * R_{\text{Е}}$$

$$I_{\text{ААЕ}} = \frac{U_{\text{ЕИ}}}{R_1 + R_2} > (2-5) * I_{\text{АДО}} = \frac{I_{\text{ЕДО}}}{\beta}$$

$$U_{\text{R-Й}} = (0,1 - 0,15) * U_{\text{ЕИ}}$$

$$R_1 \approx \frac{U_{\text{ЕИ}} - U_{\text{R-Й}} - U_{\text{АЙДО}}}{I_{\text{АДО}}}$$

$$K_U = \frac{U_{\text{АУО}}}{E_{\text{А}}} = \frac{\beta * R_{\text{Е-И}}}{R_{\text{А}} + R_{\text{АО}}}$$



$$R_2 \approx \frac{U_{\text{R-Й}} + U_{\text{АЙДО}}}{I_{\text{ААЕ}}}$$

$$R_{\text{АО}} = r_{\text{А}} + r_{\text{Й}} * (1 + \beta_{\text{ДО}})$$

$$r_{\text{Й}} = \frac{26i_{\text{А}}}{I_{\text{Й}}i_{\text{А}}}$$

$r_{\text{А}}$ - объемное сопротивление базы = 20 - 50 Ом

$$R_{\text{АУО}} \approx r_{\text{ЕЙ}} = 500 - 1000 \text{ кОм}$$

Биполярные транзисторы

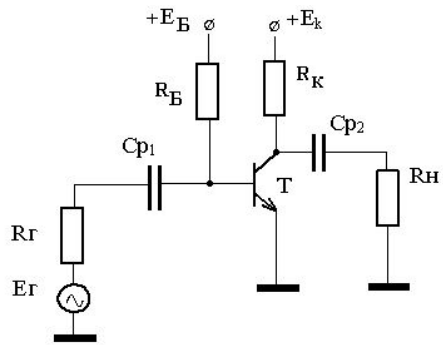


Схема ОЭ

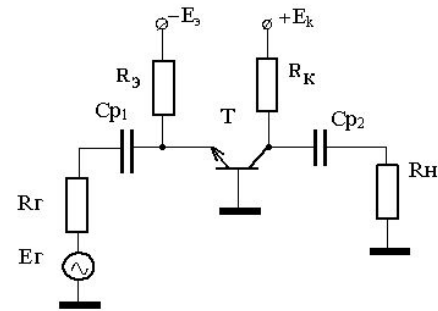


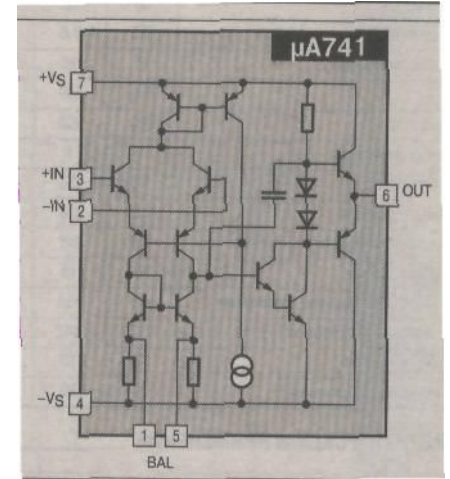
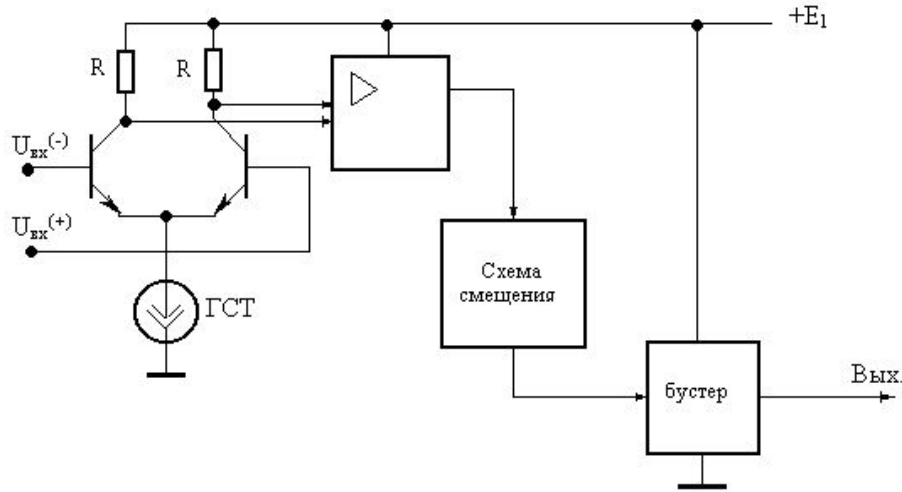
Схема ОБ

Операционные усилители

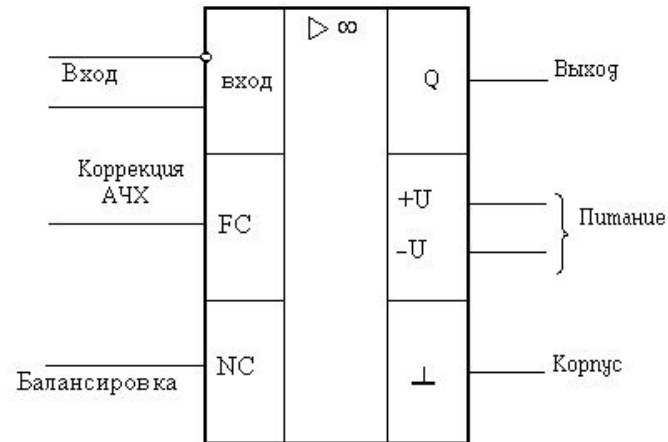
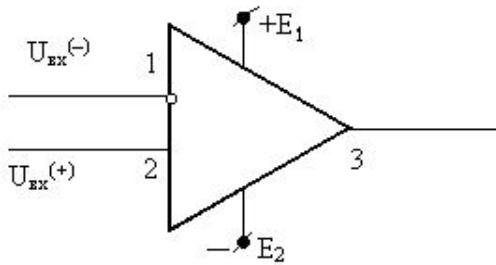
$$K_U \rightarrow \infty$$

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

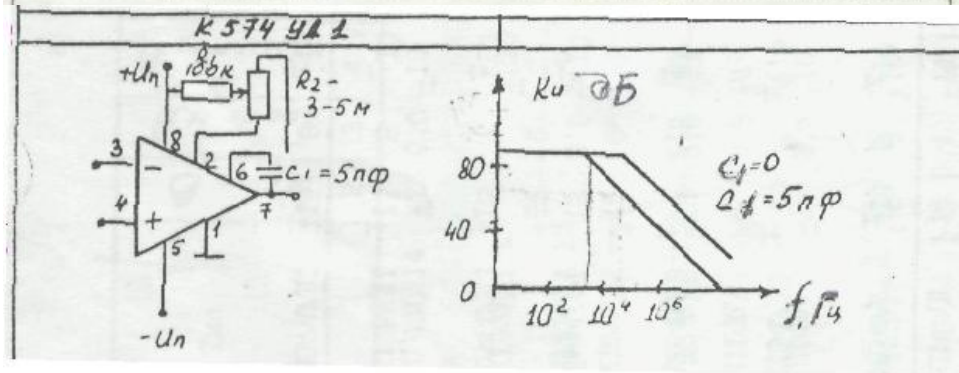
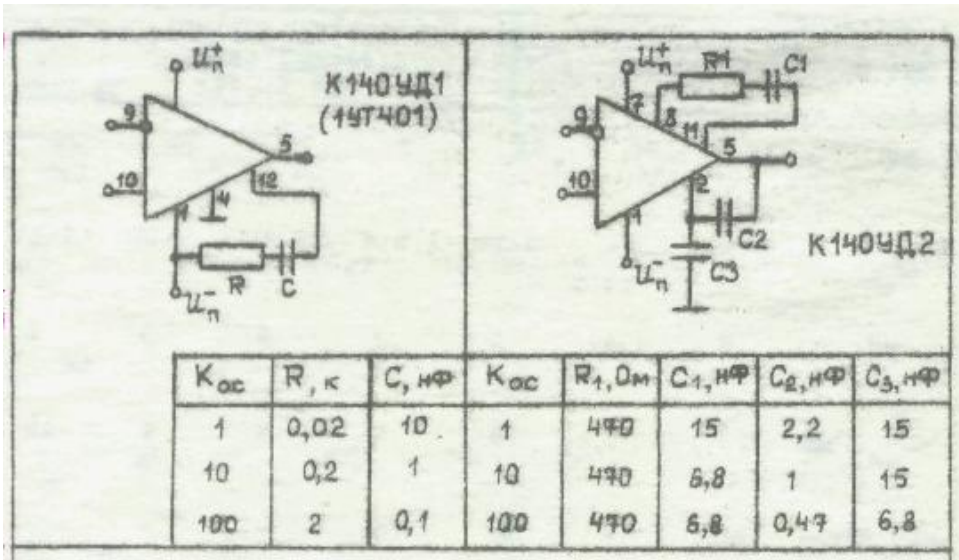
$$R_{ВЫХ} \rightarrow 0$$



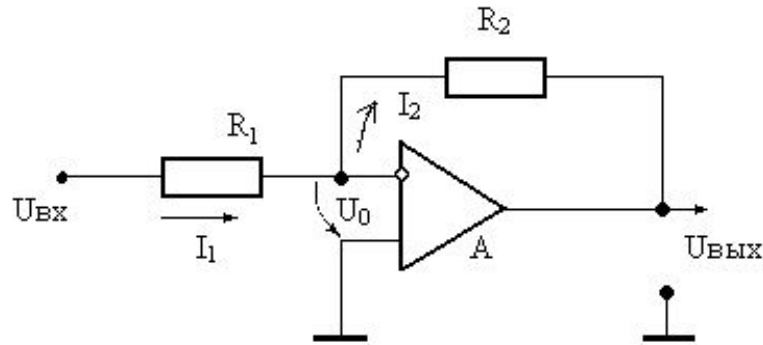
$$\Delta U_{ВЫХ} = \pm K_y U_{ВХ},$$



Операционные усилители



Операционные усилители

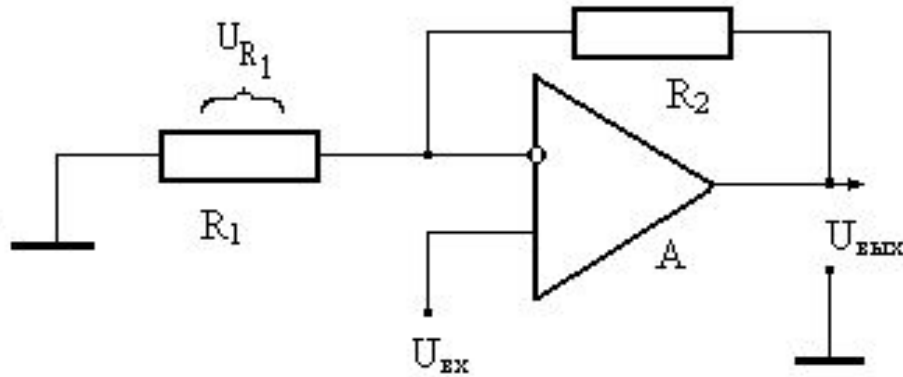


Из условия $I_1 = I_2$ (при $R_{\text{ВХ}} \rightarrow \infty$ $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$) имеем

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

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

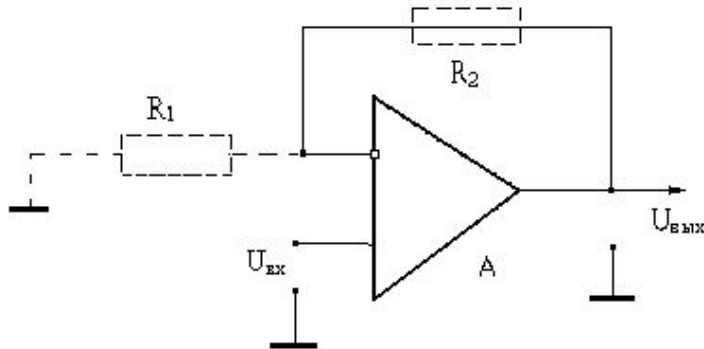
Операционные усилители



$$U_{R1} = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

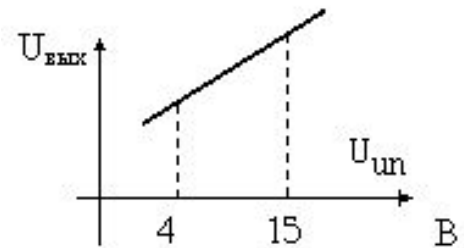
$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



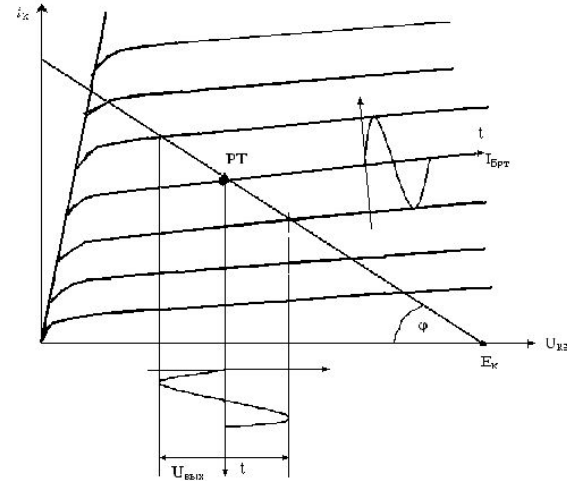
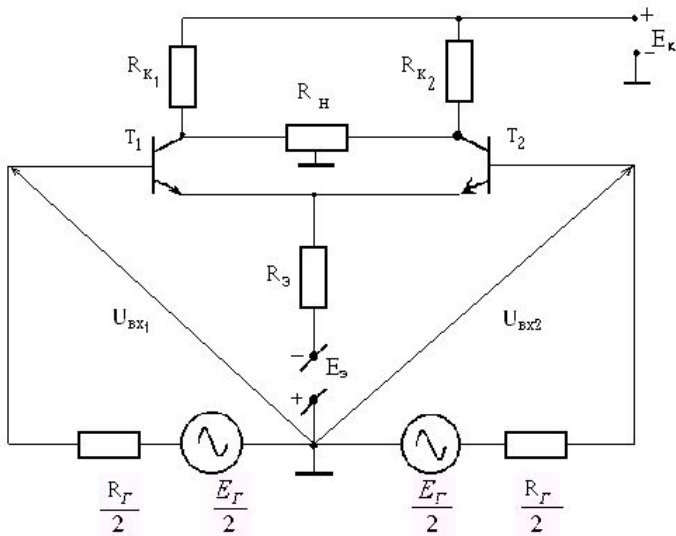
$$K_U^{НЕИНВ} = 1 + K_U^{ИНВ}$$

$$\hat{E}_{U_{II} \Delta O} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 1$$

$$K_{U_{II} \Delta O} = \frac{\hat{E}_o}{1 + \hat{E}_o}$$



Дифференциальный каскад



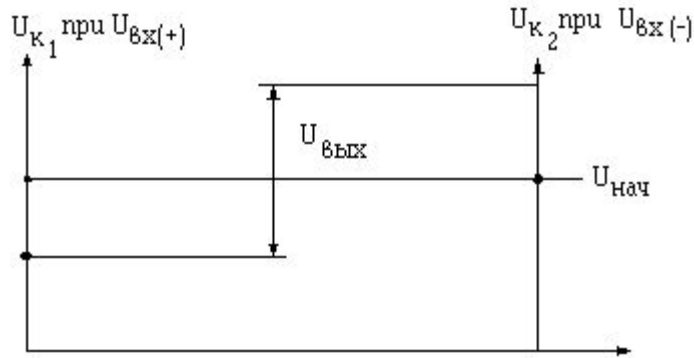
$$I_{\dot{Y}\tilde{\text{н}}\text{ò}\text{ì}} = \frac{E_{\dot{Y}}}{R_{\dot{Y}}} = I_{\dot{Y}1} + I_{\dot{Y}2} = 2I_{\dot{E}}$$

$$I_{\dot{A}\dot{D}\text{ò}} = \frac{I_{\dot{Y}}}{2(1 + \beta)}$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{1}{R_{\dot{E}} \parallel \frac{R_{\dot{I}}}{2}}$$

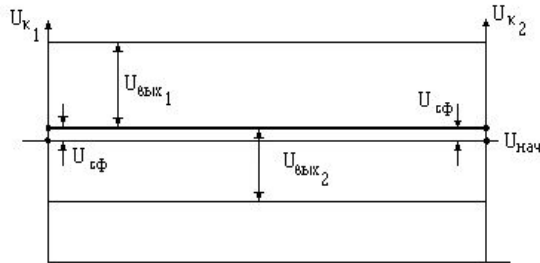
$$U_{\hat{A}\hat{U}\tilde{\text{ò}}} = \pm K_{U\hat{A}\tilde{\text{è}}\hat{\text{ò}}} (U_{\hat{A}\tilde{\text{ò}}1} - U_{\hat{A}\tilde{\text{ò}}2})$$

Дифференциальный каскад



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

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

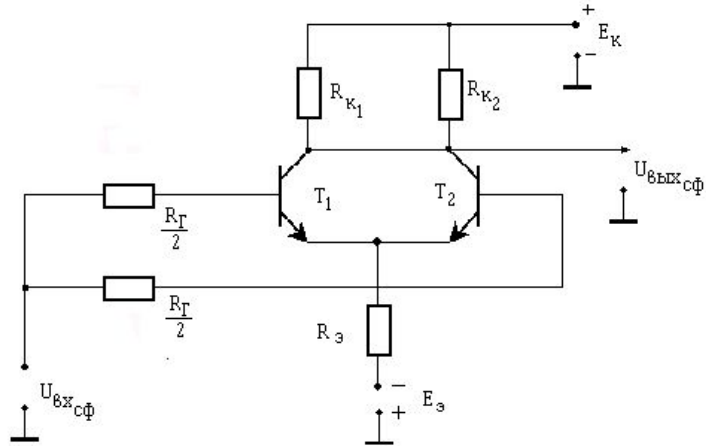


$$U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}} = (U_{\hat{A}\hat{O}1} - U_{\hat{A}\hat{O}2})K_{U.\hat{A}\hat{E}\hat{O}} + \frac{1}{2}(U_{\hat{A}\hat{O}1} + U_{\hat{A}\hat{O}2})K_{U.\tilde{N}\hat{O}}$$

$$R_{\text{вх.диф}} = 2R_{\text{вх.ср}} = 2[r_6' + r_9(1 + \beta)]$$

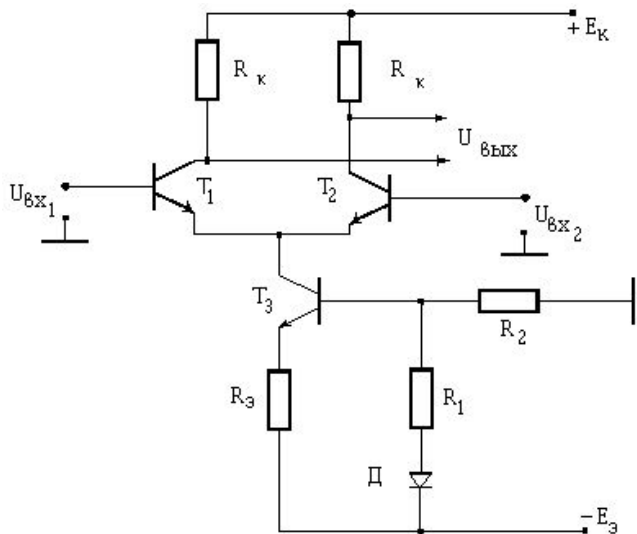
$$K_{U\hat{A}\hat{E}\hat{O}} = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{\frac{E_{\tilde{A}}}{2}} = \frac{U_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}}}{E_{\tilde{A}}} = \frac{\beta(R_{\hat{E}} \parallel \frac{R_{\hat{I}}}{2})}{\frac{R_{\tilde{A}}}{2} + R_{\hat{A}\hat{O}\hat{I}\hat{Y}}} \quad K_{I.\hat{A}\hat{E}\hat{O}} = \frac{I_{\hat{I}}}{I_{\tilde{A}}}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

Дифференциальный каскад



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

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



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

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

$$R_{\hat{e}\hat{v}\hat{e}} = (r_{\hat{c}\hat{b}} + R_{1-2}) \parallel (r_{\hat{c}\hat{э}} + \beta R_{\hat{э}}) \approx r_{\hat{c}\hat{b}}$$