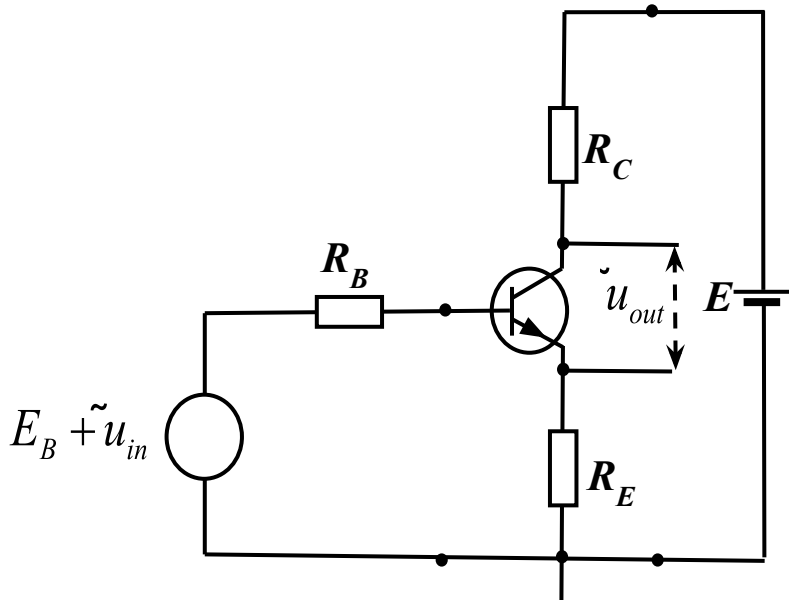


$$\tilde{u}_{in}(t) = u_m \sin(\omega t)$$

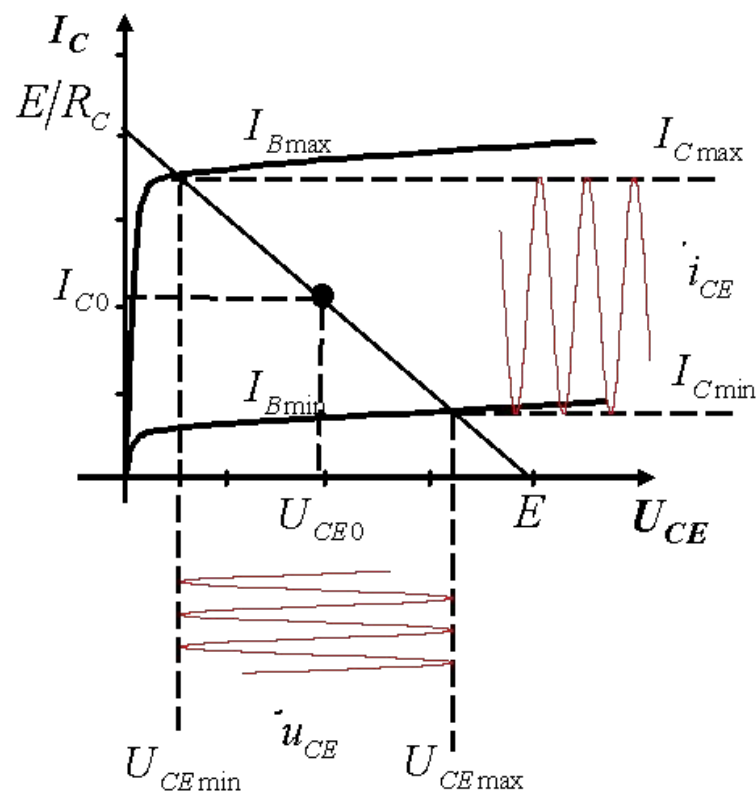
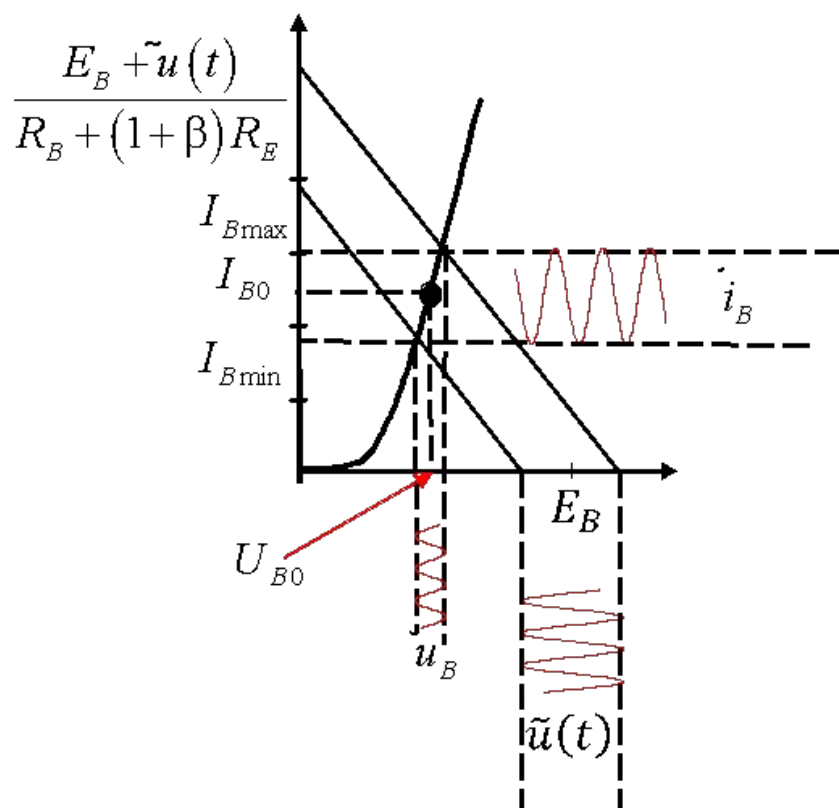
$$1/\omega C \ll R_2$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \ll 1$$



$$\tilde{u}_{in}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega) \exp(i\omega t) d\omega$$

$$1/\omega_{\text{низ}} C \approx 1/\omega_0 C \ll R_2$$



$$\frac{E_B - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = I_B(U_{CE}, U_{BE}) \Rightarrow \frac{E_B + \tilde{u} - (U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E} = I_B(U_{CE0} + \tilde{u}_{CE}, U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})$$

$$\frac{E - U_{CE}}{R_C + R_E} = I_C(U_{CE}, U_{BE}) \Rightarrow \frac{E - (U_{CE0} + \tilde{u}_{CE})}{R_C + R_E} = I_C(U_{CE0} + \tilde{u}_{CE}, U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})$$

$$I_B = \frac{I_S}{B_N} \exp(U_{BE} / U_T), I_C = B_N I_B, I_E = (1 + B_N) I_B$$

$$\frac{E_B + \tilde{u} - (U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E} \approx I_{B0} + \left. \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} \tilde{u}_{BE} + \left. \frac{\partial I_B}{\partial U_{CE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} \tilde{u}_{CE}$$

$$\frac{E - (U_{CE0} + \tilde{u}_{CE})}{R_C + R_E} \approx I_{C0} + \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} \tilde{u}_{BE} + \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} \tilde{u}_{CE}$$

$$\left. \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = \frac{1}{r_{BE}}, \quad \left. \frac{\partial I_B}{\partial U_{CE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = S_r, \quad \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = S, \quad \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = \frac{1}{r_{CE}},$$

$$S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = \frac{\partial \beta I_B}{\partial U_{BE}} \Big|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = \beta \left. \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \right|_{U_{BE0}, U_{CE0}} = \frac{\beta}{r_{BE}}$$

$$\begin{cases} \frac{E_B + \tilde{u} - (U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E} = I_{B0} + \frac{1}{r_{BE}} \tilde{u}_{BE} + S_r \tilde{u}_{CE} \\ \frac{E - (U_{CE0} + \tilde{u}_{CE})}{R_C + R_E} = I_{C0} + \frac{1}{r_{CE}} \tilde{u}_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \tilde{u}_{CE} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{E_B - U_{BE0}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = I_{B0} \\ \frac{E - U_{CE0}}{R_C + R_E} = I_{C0} \\ \frac{\tilde{u} - \tilde{u}_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} = \frac{1}{r_{BE}} \tilde{u}_{BE} + S_r \tilde{u}_{CE} \\ \frac{-\tilde{u}_{CE}}{R_C + R_E} = S \tilde{u}_{BE} + \frac{1}{r_{CE}} \tilde{u}_{CE} \end{cases}$$

$$\left(\frac{1}{r_{BE}} + \frac{1}{R_B + (1+\beta)R_E} \right) u_{BE} + S_r u_{CE} = \frac{\tilde{u}}{R_B + (1+\beta)R_E}$$

$$\tilde{S} u_{BE} + \left(\frac{1}{r_{CE}} + \frac{1}{R_C + R_E} \right) u_{CE} = 0$$

$$k_{BE}^{OM} \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \boxtimes \frac{10^{-2}}{10^{-5}} = 1 \quad ; \quad k_{CE}^{OM} \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I} \boxtimes \frac{10}{10^{-3}} = 10$$

$$S_r \approx \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{CE}} \boxtimes \frac{10^{-7}}{10} = 10^{-7} \text{ A/B}; \quad S \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}} \boxtimes \frac{0.01}{10^{-2}} = 1 \text{ A/B};$$

$$S_r = 0 \Rightarrow \tilde{u}_{BE} = \frac{r_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_E + r_{BE}} \tilde{u}$$

$$\tilde{u}_{CE} = - \frac{(R_C + R_E) r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1+\beta)R_E + r_{BE})} \tilde{u}$$

Коэффициент усиления по напряжению, току и мощности

$$k_u = - \frac{(R_C + R_E) r_{CE} \beta}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})}$$

$$k_i = \frac{\tilde{i}_C}{\tilde{i}_B}$$

$$\tilde{i}_B \approx \frac{1}{r_{BE}} \tilde{u}_{BE}, \tilde{i}_C = \tilde{S} u_{BE}, k_i = \tilde{S} r_{BE} = \beta$$

$$k_p = k_u k_i = k_u \beta$$

$$R_E = 0$$

$$k_u = -\frac{R_C r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + r_{CE})(R_B + r_{BE})}, \quad r_{CE} \gg R_C + R_E \Rightarrow k_u \approx -\frac{R_C r_{BE} S}{(R_B + r_{BE})}$$

$$r_{BE} \gg R_B \Rightarrow k_u \approx -R_C S$$

$$k_u \approx -R_C S \approx -100$$

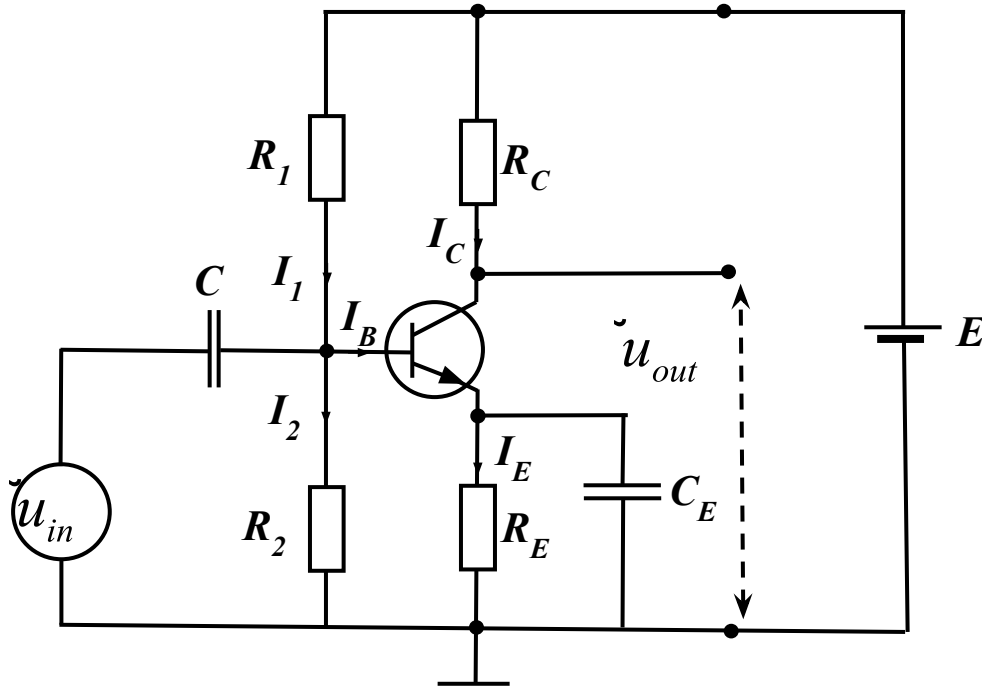
$$R_E \neq 0$$

$$k_u = -\frac{(R_C + R_E) r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})} \approx -\frac{(R_C + R_E) r_{BE} S}{(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})}$$

$$R_B \ll (1 + \beta) R_E \Rightarrow k_u = -\frac{(R_C + R_E) r_{BE} S}{\beta R_E + r_{BE}}$$

$$k_u \approx \frac{-200 \cdot 10^4}{500 \cdot 100 + 10^4} \approx -10$$

Обратная связь по переменному току отсутствует. Схема с общим эмиттером.

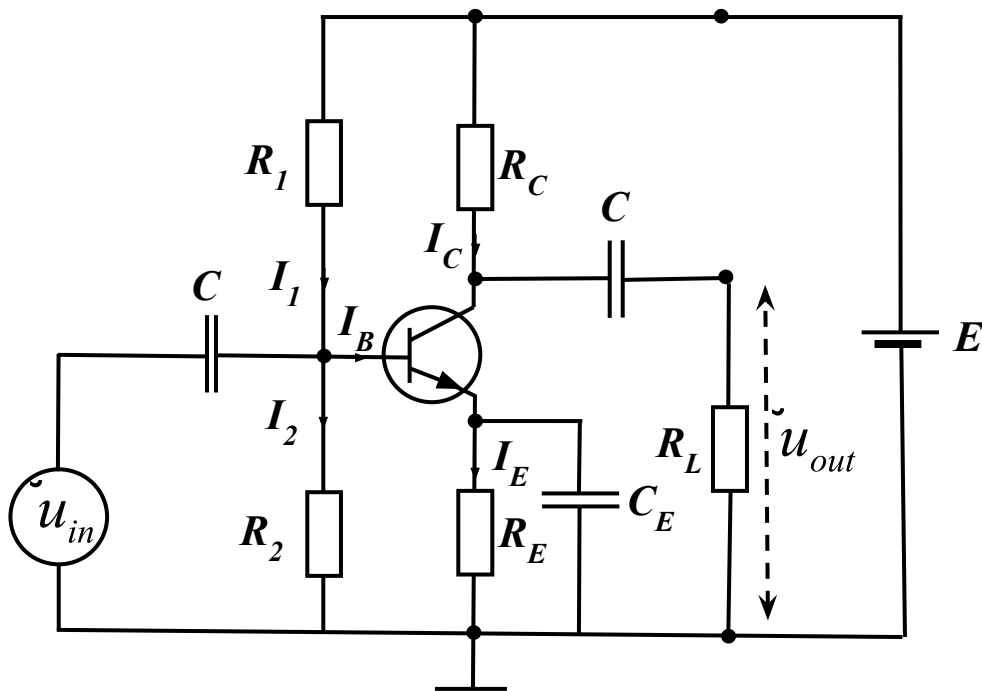


$$1/\omega C_E \ll R_E$$

$$k_u = - \frac{R_C r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + r_{CE})(R_B + r_{BE})}$$

$$k_i = \beta$$

*Каскад с ОЭ усиливает и ток, и инвертированное напряжение.
Обычно работает как усилитель мощности.*



$$R_C \parallel R_L \Rightarrow R_{CL} = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

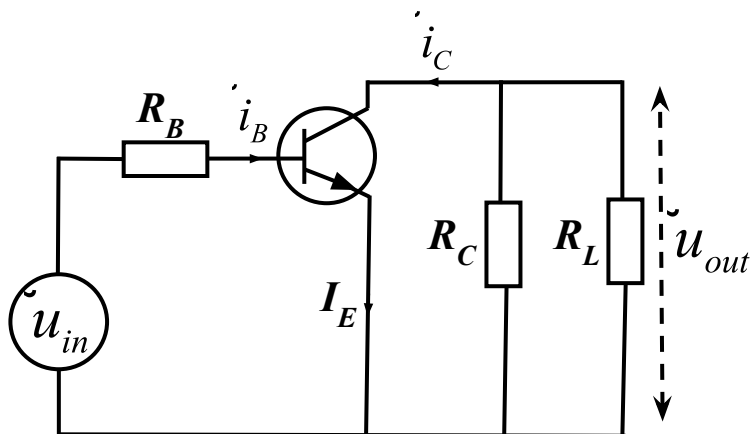
$$k_u = - \frac{R_{CL} r_{BE} r_{CE} S}{(R_{CL} + r_{CE})(R_B + r_{BE})}$$

$$R_{CL} \ll r_{CE}, R_B \ll r_{BE}$$

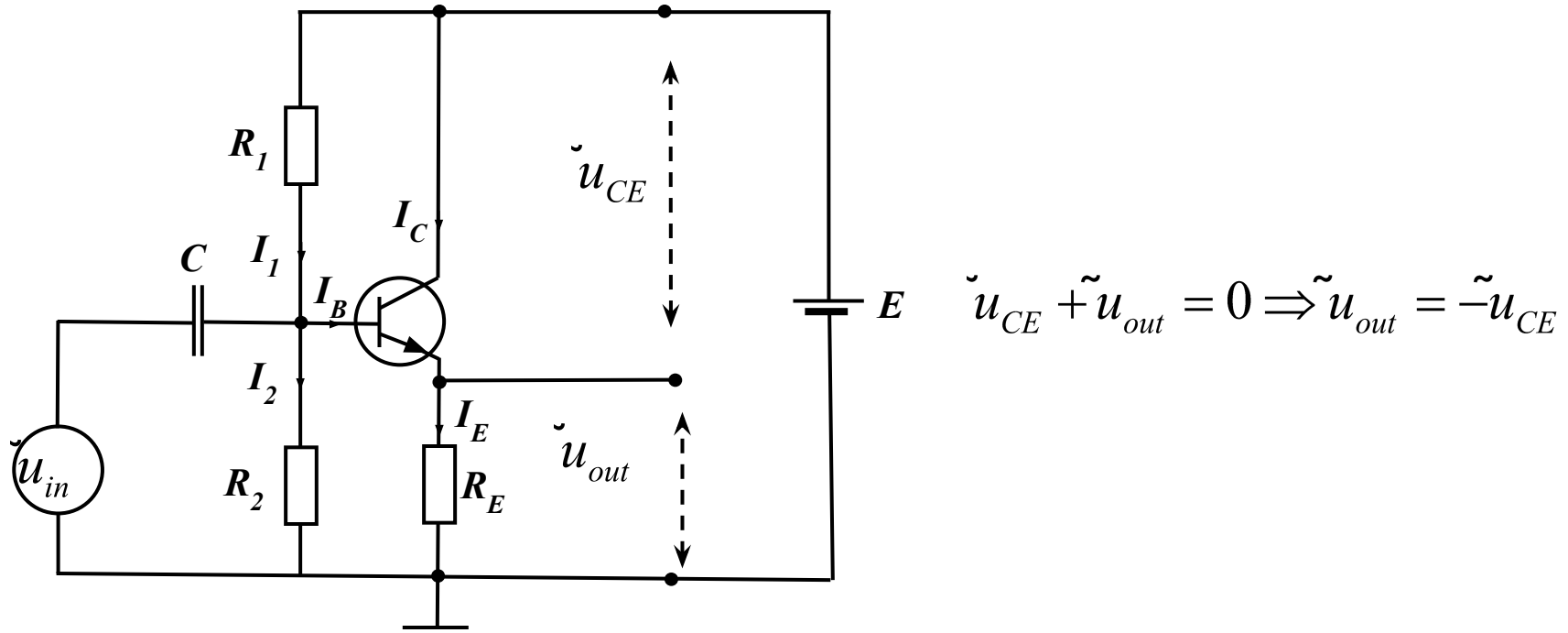
$$k_u = -R_{CL} S$$

$$k_u \approx -R_C S \text{ для } R_C \gg R_L$$

$$k_u \approx -R_L S \text{ для } R_C \ll R_L$$



Каскад с общим коллектором.



$$k_u = \frac{(R_C + R_E) r_{CE} \beta}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})}, R_C = 0$$

$$k_u = \frac{R_E r_{CE} \beta}{(R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})}, r_{CE} \gg R_E, (1 + \beta) R_E \gg R_B + r_{BE}$$

$$k_u = \frac{\beta}{1 + \beta} \approx 1 \quad (k_u < 1), \quad k_i = \beta, \quad k_p \approx \beta$$

Каскад с ОК усиливает ток, но не усиливает (повторяет) напряжение.

Входные и выходные сопротивления каскадов с ОЭ и ОК

$$S_r = 0 \Rightarrow \tilde{u}_{BE} = \frac{r_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E + r_{BE}} \tilde{u}, \tilde{i}_B \approx \frac{1}{r_{BE}} \tilde{u}_{BE}$$

$$R_{in} = \frac{\tilde{u}}{\tilde{i}_B}, \tilde{i}_B \approx \frac{\tilde{u}}{R_B + (1 + \beta)R_E + r_{BE}}$$

$$R_{in} = R_B + (1 + \beta)R_E + r_{BE}$$

ОЭ**ОК**

$$R_{in} = R_B + r_{BE}$$

$$R_{in} \approx \beta R_E$$

$$R_{in} = 100 \text{ Ом} \ll 1$$

$$R_{in} \approx 10 \text{ кОм} \ll 100$$

$$R_{inOE} \ll R_{inOK}$$

$$R_{out} = \left| \frac{u_{out}}{i_{out}} \right|$$

$$\left| u_{out} \right| = \frac{(R_C + R_E) r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})} \tilde{u}, \quad \left| i_{out} \right| = \tilde{S} u_{BE} = \frac{S r_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE}} \tilde{u}$$

$$R_{out} = \frac{\frac{(R_C + R_E) r_{BE} r_{CE} S}{(R_C + R_E + r_{CE})(R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE})}}{\frac{S r_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E + r_{BE}}} = \frac{(R_C + R_E) r_{CE}}{(R_C + R_E + r_{CE})} = (R_C + R_E) \parallel r_{CE}$$

$$R_{out} \approx R_C + R_E$$

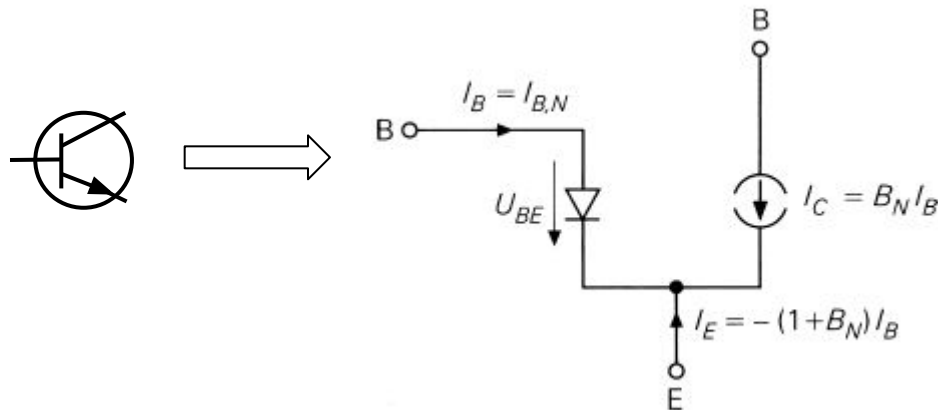
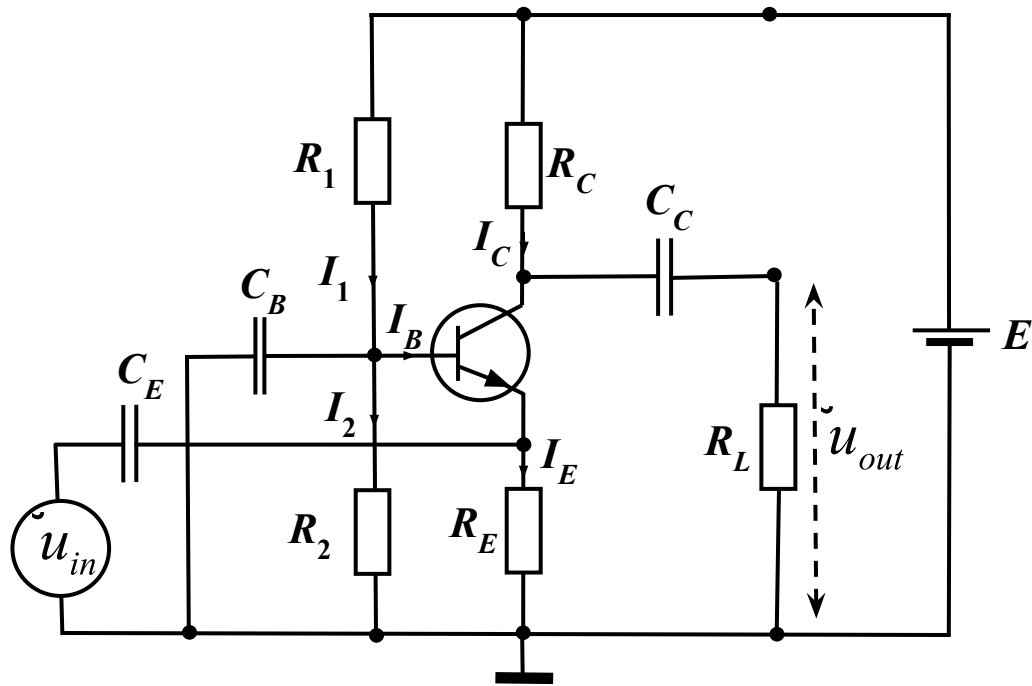
OE

$$R_{out} \approx R_C \approx 10 \text{ Ом} \quad \boxtimes \quad 10$$

OC

$$R_{out} \approx R_E \approx 100 \text{ Ом} \quad \boxtimes \quad 1$$

$$R_{outOE} \ll R_{outOC} \quad \text{ИЛИ} \quad R_{outOE} \boxtimes R_{outOC}$$

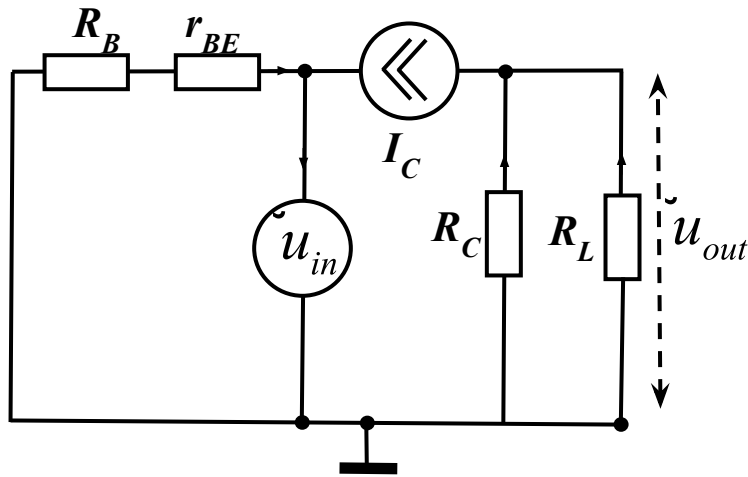


$$I_B = \frac{I_S}{B_N} \exp(U_{BE}/U_T)$$

$$I_C = I_S \exp(U_{BE}/U_T)$$

$$I_E = -I_S \left(1 + \frac{1}{B_N} \right) \exp(U_{BE}/U_T)$$

Малосигнальная эквивалентная схема



$$\exp((U_{BE0} + \tilde{u}_{BE})/U_T) \cong [1 + (\tilde{u}_{BE}/U_T)] \exp(U_{BE0}/U_T)$$

$$\tilde{i}_B = \frac{I_S}{\beta U_T} \tilde{u}_{BE} \exp(U_{BE0}/U_T) = \frac{I_{B0}}{U_T} \tilde{u}_{BE}, \Rightarrow$$

$$\tilde{u}_{BE} = \frac{U_T}{I_{B0}} \tilde{i}_B = r_{BE} \tilde{i}_B, \quad r_{BE} = \frac{U_T}{I_{B0}} \propto \frac{0.025}{10^{-4}} = 250$$

$$\tilde{i}_C = \frac{I_S}{U_T} \tilde{u}_{BE} \exp(U_{BE0}/U_T) = \tilde{\beta} \tilde{i}_B$$

$$\tilde{i}_E = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \frac{I_S}{U_T} \tilde{u}_{BE} \exp(U_{BE0}/U_T) = \tilde{\alpha} \tilde{i}_C$$

$$\tilde{u}_{out} = \tilde{u}_{CE} = \tilde{i}_C \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = \tilde{\beta} \tilde{i}_B R'_C \quad \text{где} \quad R'_C = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$\tilde{i}_B (R_B + r_{BE}) = \tilde{u}_{in}, \Rightarrow k_u = \tilde{u}_{out} / \tilde{u}_{in} = \beta R'_C / (R_B + r_{BE}),$$

$$\text{т.к. } R_B \ll r_{BE}$$

$$k_u = \beta R'_C / r_{BE} = S R'_C, \quad k_i = \tilde{i}_C / \tilde{i}_E = \alpha \approx 1 \quad (\alpha < 1), \quad k_p = k_u k_i = S R'_C \alpha \approx S R'_C$$

Каскад с ОБ усиливает напряжение, но не усиливает ток.

$$R_{in} = \tilde{u}_{in} / \tilde{i}_{in} = R_B + r_{BE} = 100 \quad \boxtimes \quad 1 \qquad R_{out} = \tilde{u}_{out} / \tilde{i}_{out} = \tilde{u}_{CE} / i_C = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = R'_C$$

Основные свойства схем включения

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_i	Десятки – сотни	< 1	Десятки – сотни
K_U	Десятки – сотни	Десятки – сотни	< 1
K_P	Сотни–десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых}$	единицы – десятки килоом	Сотни килоом – Единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$	180°	0°	0°

Схема с ОБ усиливает напряжение, мощность, но не усиливает ток.

Схема с ОЭ усиливает и ток, и напряжение, и мощность.

Схема с ОК усиливает ток и мощность, но не дает усиления по напряжению.

Малосигнальная эквивалентная схема

Малосигнальная эквивалентная схема