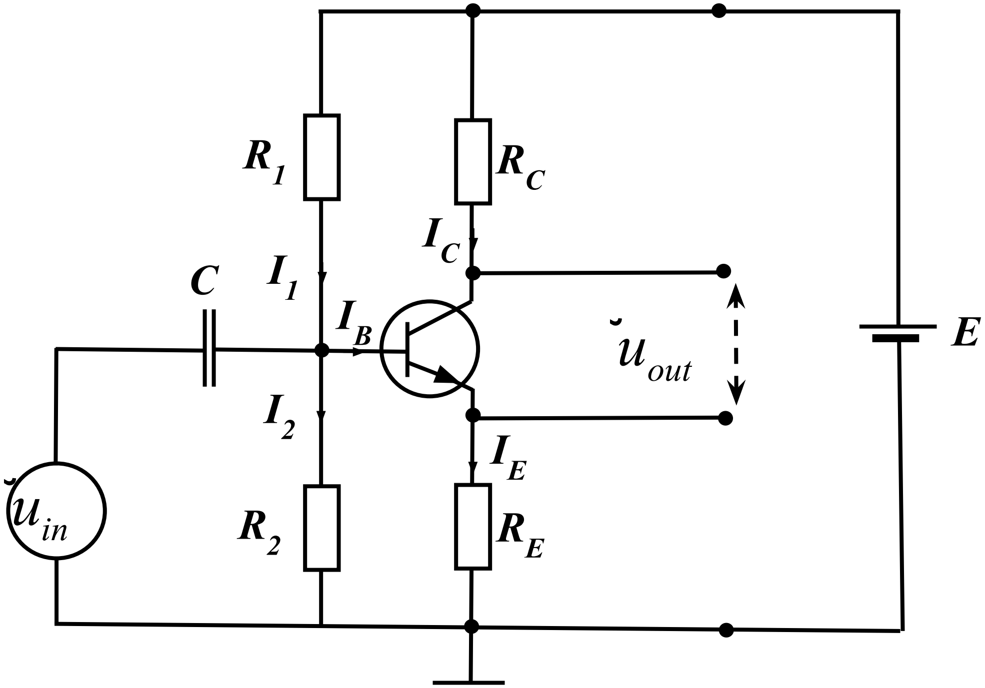
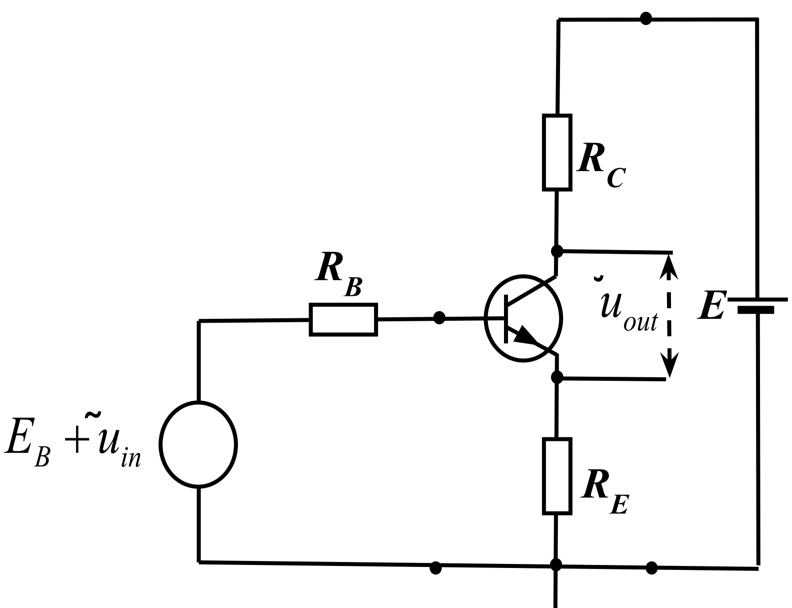
Усилители слабых узкополосных сигналов



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

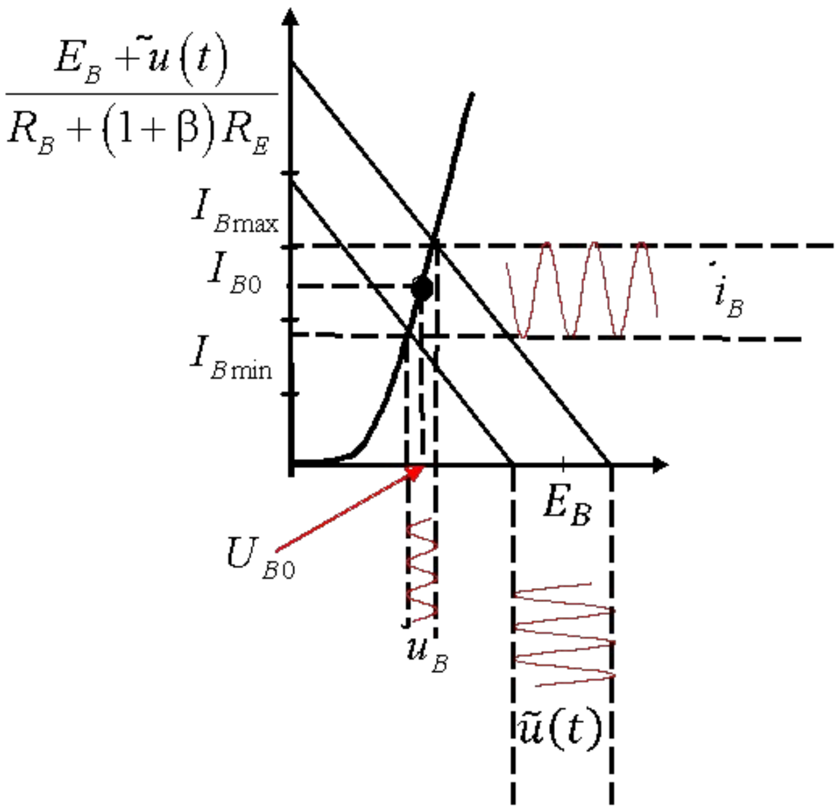
$$1/\omega C << R_2$$

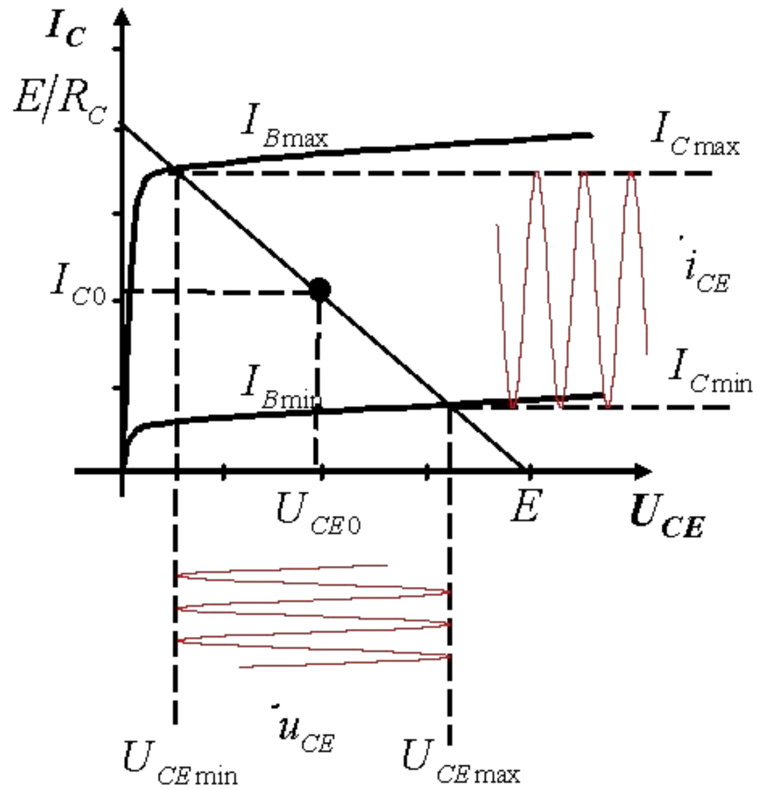
$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\Delta f}{f_0} << 1$$



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

$$1/\omega_{нижн}C \approx 1/\omega_0 C << R_2$$





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

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

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

Уравнения в режиме малых сигналов

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

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

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

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

$$\begin{cases}\dfrac{E_B+\tilde{u}-\left(U_{BE0}+\tilde{u}_{BE}\right)}{R_B+\left(1+\beta\right)R_E}=I_{B0}+\dfrac{1}{r_{BE}}\tilde{u}_{BE}+S_r\tilde{u}_{CE}\\[2ex] \dfrac{E-\left(U_{CE0}+\tilde{u}_{CE}\right)}{R_C+R_E}=I_{C0}+\dfrac{1}{r_{CE}}\tilde{u}_{BE}+\dfrac{1}{r_{CE}}\tilde{u}_{CE}\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}\begin{cases}\dfrac{E_B-U_{BE0}}{R_B+\left(1+\beta\right)R_E}=I_{B0}\\[2ex] \dfrac{E-U_{CE0}}{R_C+R_E}=I_{C0}\end{cases}\\[4ex] \begin{cases}\dfrac{\tilde{u}-\tilde{u}_{BE}}{R_B+\left(1+\beta\right)R_E}=\dfrac{1}{r_{BE}}\tilde{u}_{BE}+S_r\tilde{u}_{CE}\\[2ex] \dfrac{-\tilde{u}_{CE}}{R_C+R_E}=S\tilde{u}_{BE}+\dfrac{1}{r_{CE}}\tilde{u}_{CE}\end{cases}\end{cases}$$

Уравнения в режиме малых сигналов

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

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

$$r_{BE}\approx\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}\approx\frac{10^{-2}}{10^{-5}}=1\ \text{кОм}\quad;\quad r_{CE}\approx\frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I}\approx\frac{10}{10^{-3}}=10\ \text{кОм}$$

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

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

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

Коэффициент усиления по напряжению, току и мощности

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

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

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

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

Влияние *RE* на коэффициент усиления.

$$R_E = 0$$

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

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

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

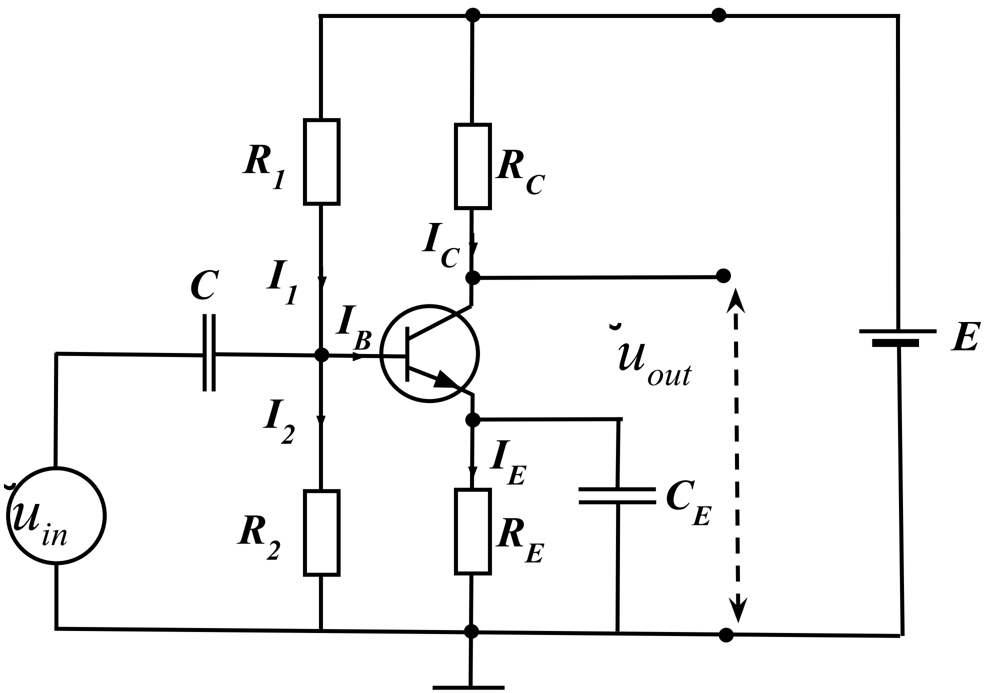
$$R_E \neq 0$$

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

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

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

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



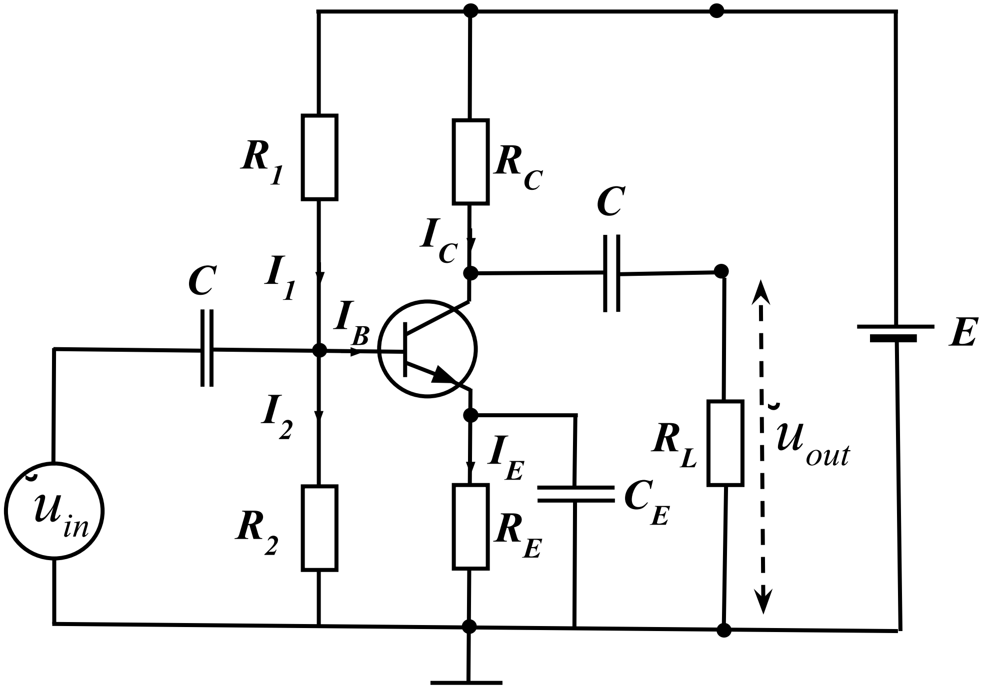
$$1/\omega C_E << R_E$$

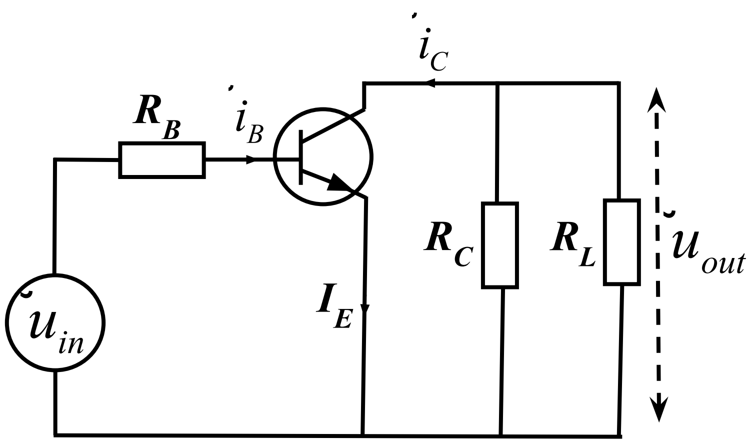
$$k_u = -\frac{R_C r_{BE} r_{CE} S}{\left(R_C + r_{CE}\right)\left(R_B + r_{BE}\right)}$$

$$k_i = \beta$$

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

Работа каскада с ОЭ на активную нагрузку





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

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

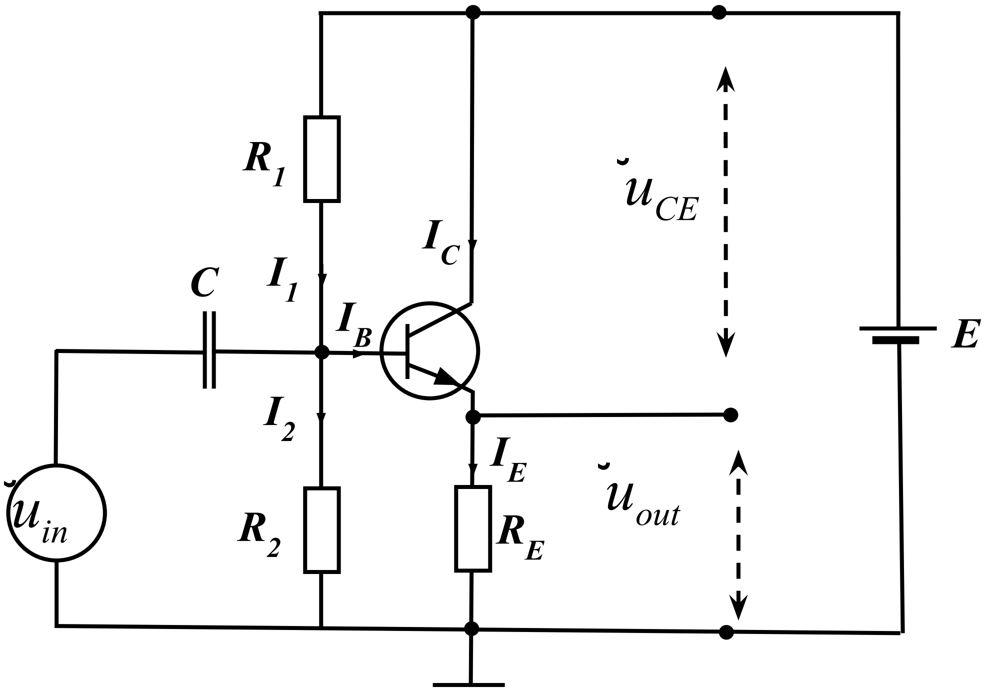
$$R_{CL} << r_{CE}, R_B << r_{BE}$$

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

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

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

Каскад с общим коллектором.



$$\tilde{u}_{CE} + \tilde{u}_{out} = 0 \Rightarrow \tilde{u}_{out} = -\tilde{u}_{CE}$$

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

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

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

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

Входные и выходные сопротивления каскадов с ОЭ и ОК

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

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

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

OE

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

$R_{in} = 100$ Ом ÷ 1 кОм

OK

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

$R_{in} = 10$ кОм ÷ 100 кОм

$$R_{inOE} << R_{inOC}$$

$$R_{out} = \left|\tilde{u}_{out}\right| / \left|\tilde{i}_{out}\right|$$

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

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

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

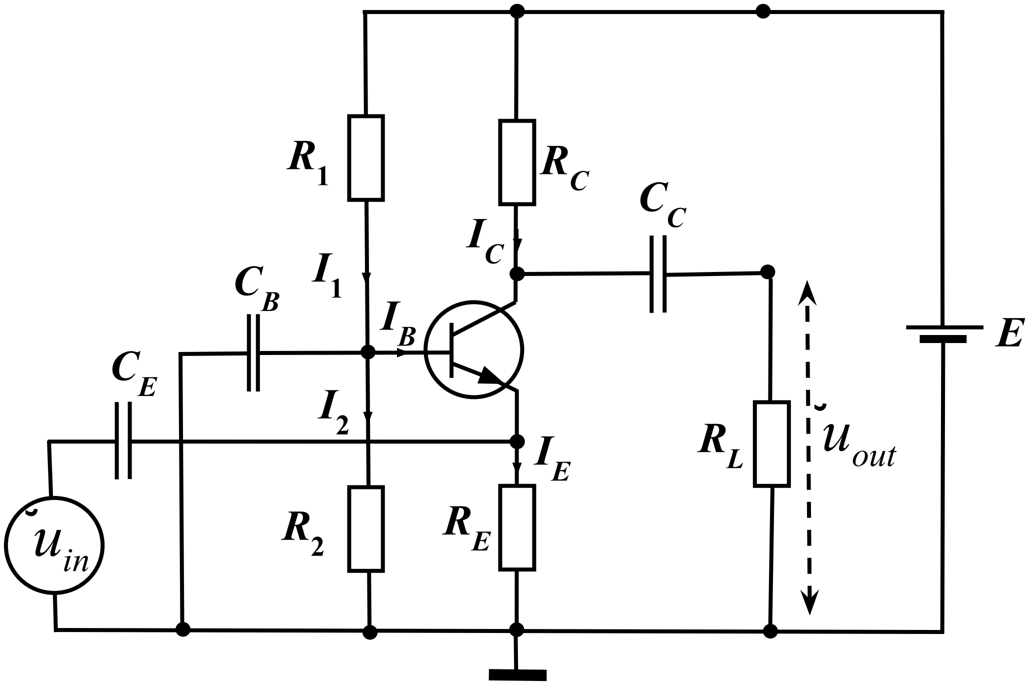
OE ***OC***

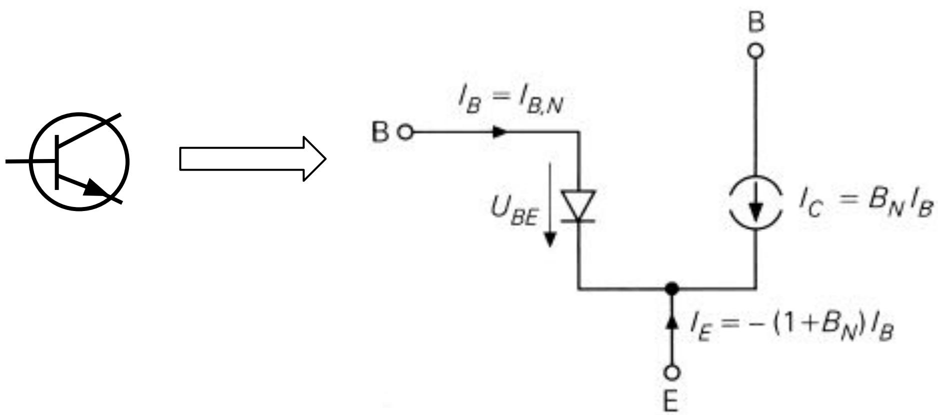
$R_{out} \approx R_C \approx$ 1 … 10 кОм

$R_{out} \approx R_E \approx$ 10 … 100 Ом

$R_{outOE} << R_{outOC}$ или $R_{outOE} \gg R_{outOC}$

Каскад с общей базой (ОБ).



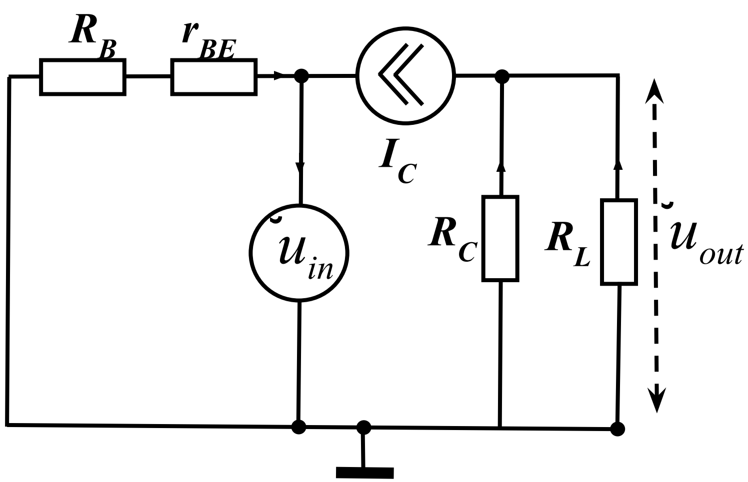


$$I_B = \frac{I_S}{B_N}\exp\left(U_{BE}/U_T\right)$$

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

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

Малосигнальная эквивалентная схема



$$\exp\left(\left(U_{BE0}+\tilde u_{BE}\right)/U_T\right)\cong\left[1+\left(\tilde u_{BE}/U_T\right)\right]\exp\left(U_{BE0}/U_T\right)$$

$$\tilde i_B=\frac{I_S}{\beta U_T}\tilde u_{BE}\exp\left(U_{BE0}/U_T\right)=\frac{I_{B0}\tilde u_{BE}}{U_T},\Rightarrow$$

$$\tilde u_{BE}=\frac{U_T}{I_{B0}}\tilde i_B=r_{BE}\tilde i_B,\ r_{BE}=\frac{U_T}{I_{B0}}\propto\frac{0.025}{10^{-4}}=250\ \text{Ом}$$

$$\tilde i_C=\frac{I_S}{U_T}\tilde u_{BE}\exp\left(U_{BE0}/U_T\right)=\tilde\beta i_B$$

$$\tilde i_E=\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\frac{I_S}{U_T}\tilde u_{BE}\exp\left(U_{BE0}/U_T\right)=\tilde\alpha i_C$$

$$\tilde u_{out}=\tilde u_{CE}=\tilde i_C\frac{R_CR_L}{R_C+R_L}=\tilde\beta i_BR'_C,\ \text{где}\quad R'_C=\frac{R_CR_L}{R_C+R}$$

$$\tilde i_B\left(R_B+r_{BE}\right)=\tilde u_{in},\Rightarrow k_u=\tilde u_{out}/\tilde u_{in}=\beta R'_C/\left(R_B+r_{BE}\right),$$

т.к. $R_B << r_{BE}$

$$k_u=\beta R'_C/r_{BE}=SR'_C,\ k_i=\tilde i_C/\tilde i_E=\alpha\approx1\ (\alpha<1),\ k_p=k_uk_i=SR'\alpha\approx SR'$$

Каскад с ОБ усиливает напряжение, но не усиливает ток.

Входное и выходное сопротивление

$R_{in} = \tilde{u}_{in} / \tilde{i}_B = R_B + r_{BE} = 100$ Ом 1 кОм

$$R_{out} = \tilde{u}_{out} / \tilde{i}_{out} = \tilde{u}_{CE} / \tilde{i}_C = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = R'_C$$

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 сдвигмежду $U_{вх}$ 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