

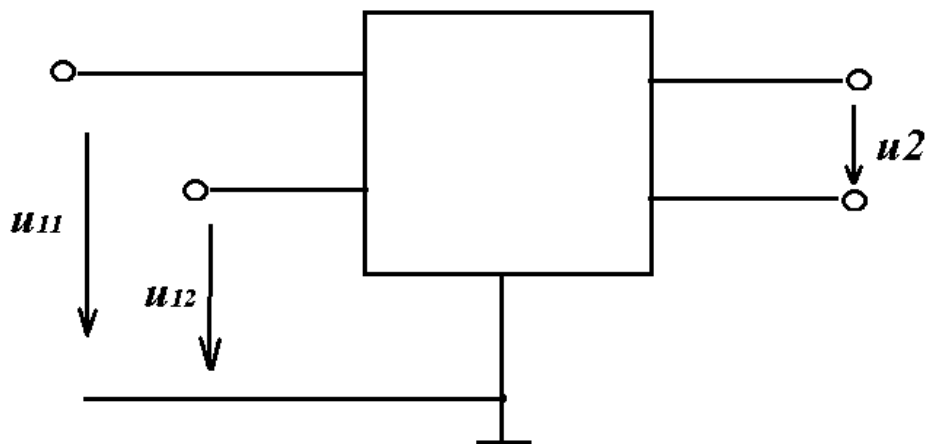
**Схемотехническое
проектирование электронных
средств**

2016 г.

Дифференциальный каскад

Дифференциальный каскад

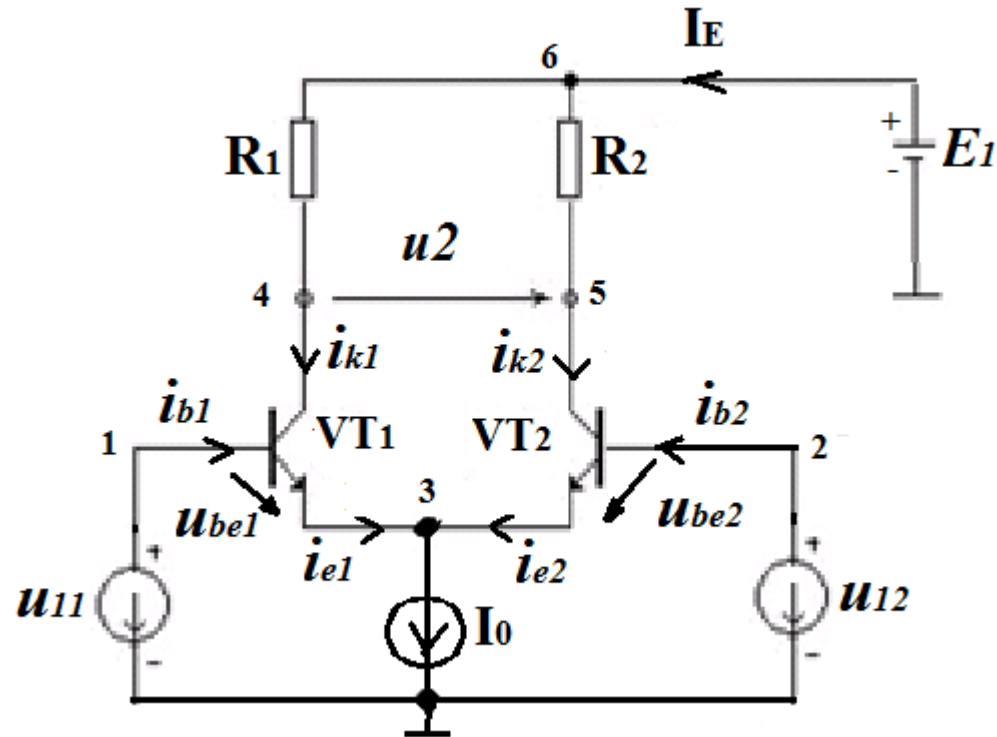
Дифференциальный каскад — многополюсник, выходное напряжение которого определяется разностью входных напряжений



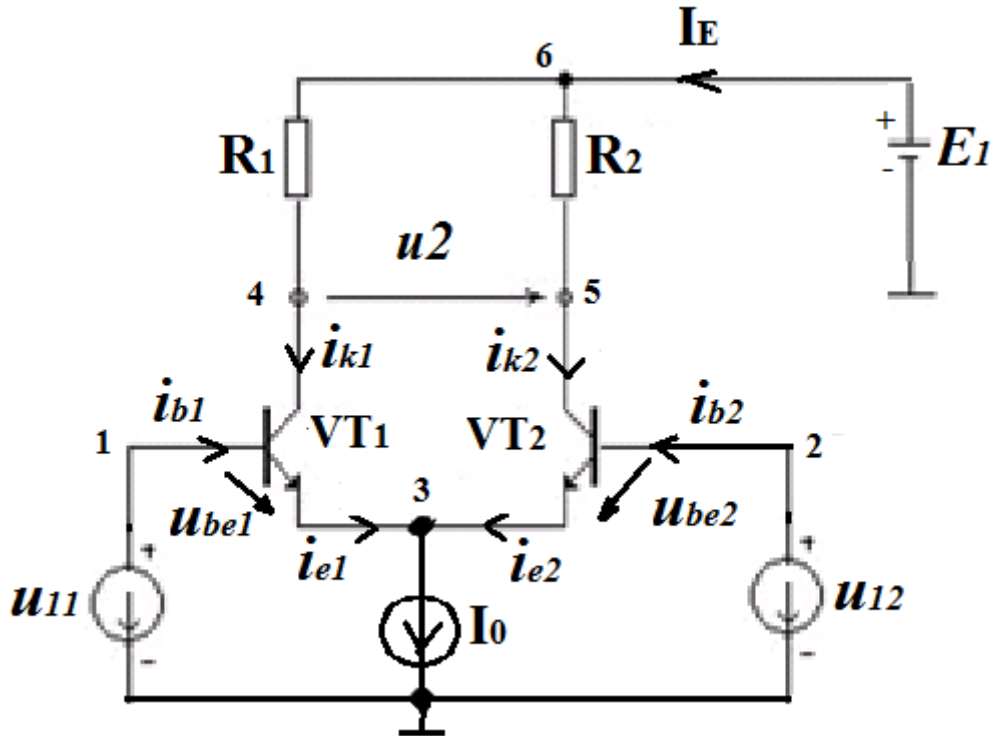
$$\Delta u_1 = u_{11} - u_{12};$$

$$u_2 = \Phi(\Delta u_1);$$

Функциональная схема дифференциального каскада на биполярных транзисторах

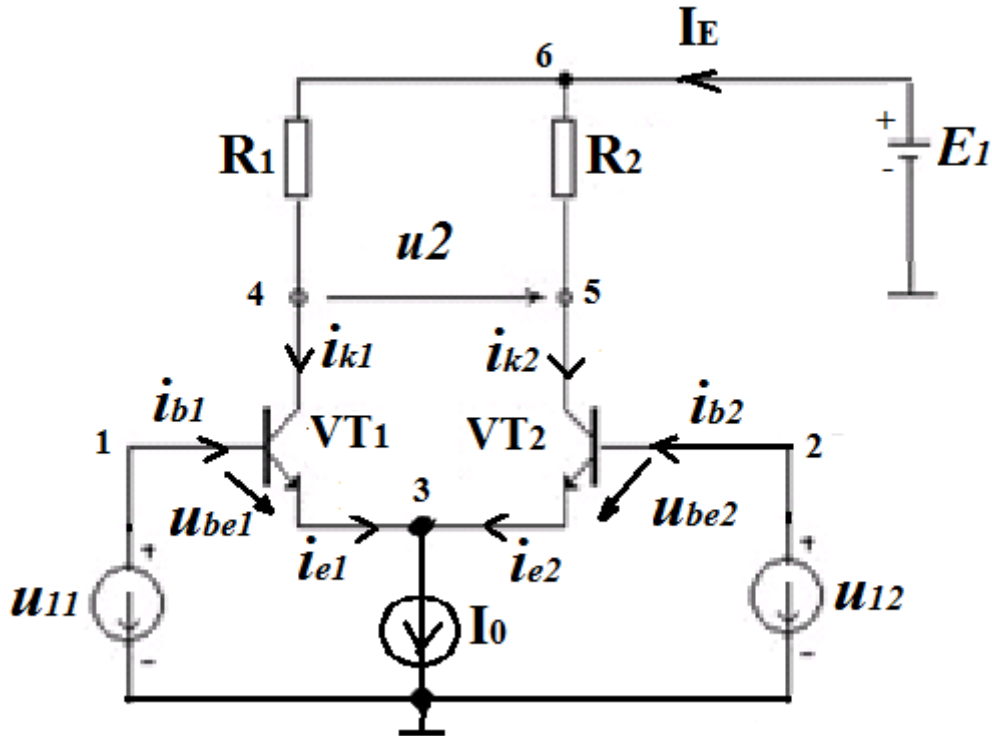


Математическая модель дифференциального каскада



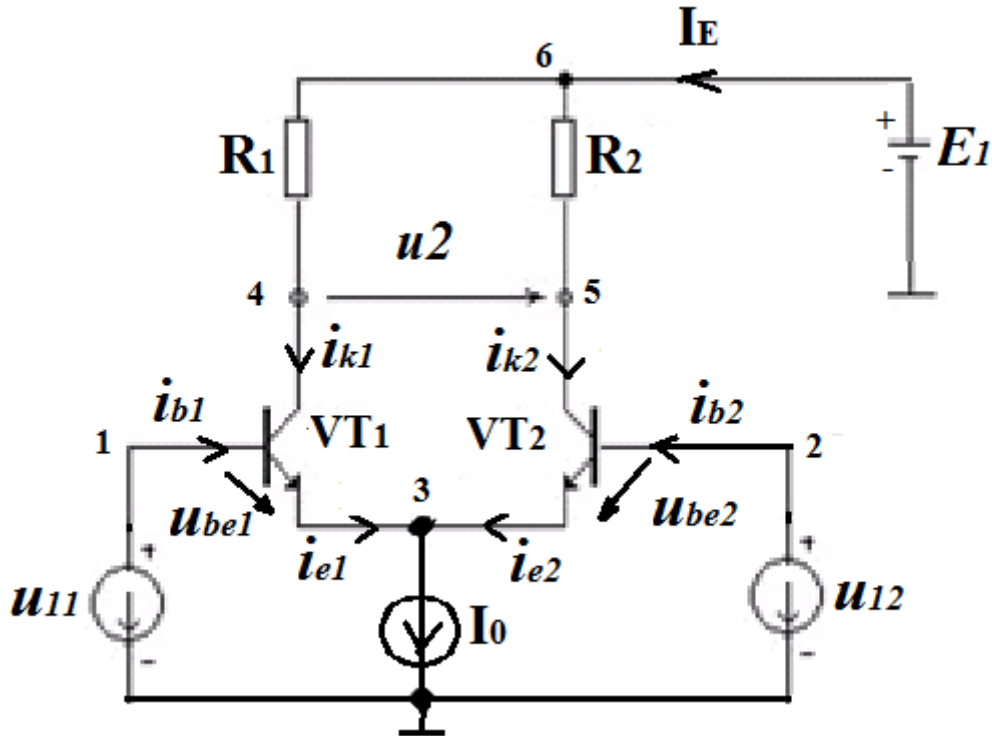
$$\{I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0;$$

Математическая модель дифференциального каскада



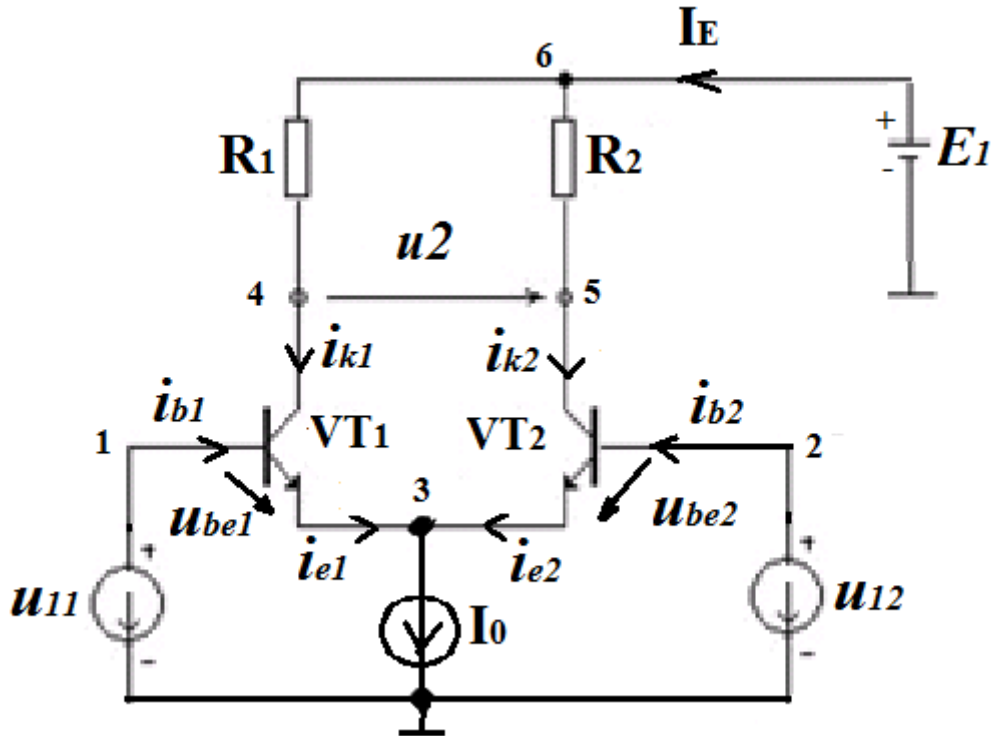
$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \end{cases}$$

Математическая модель дифференциального каскада



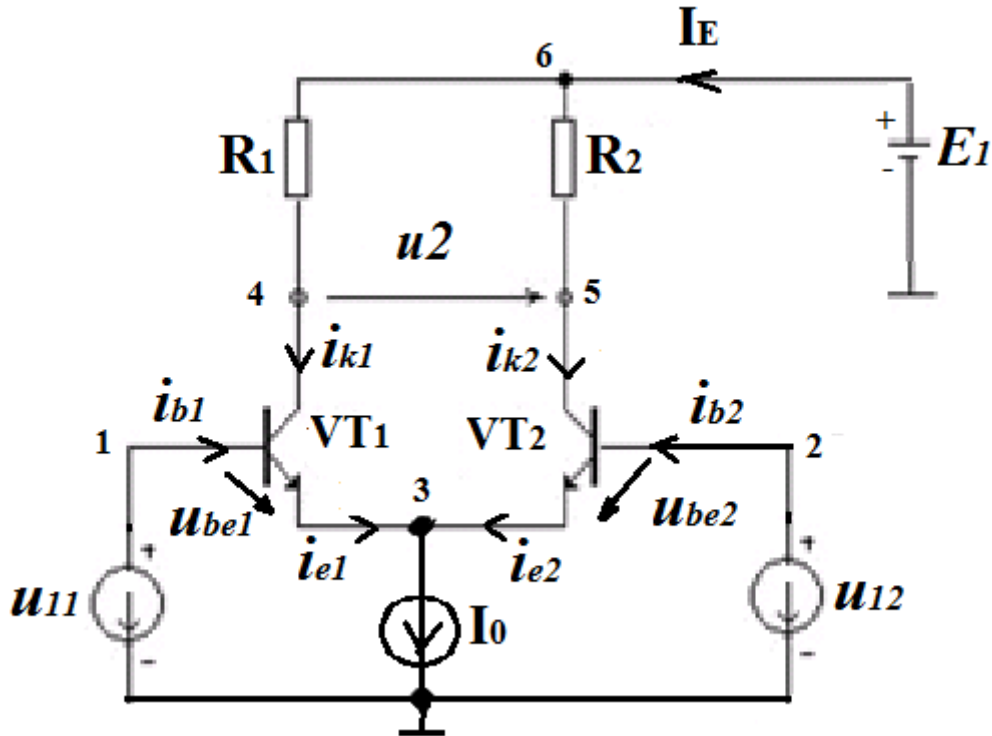
$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \end{cases}$$

Математическая модель дифференциального каскада



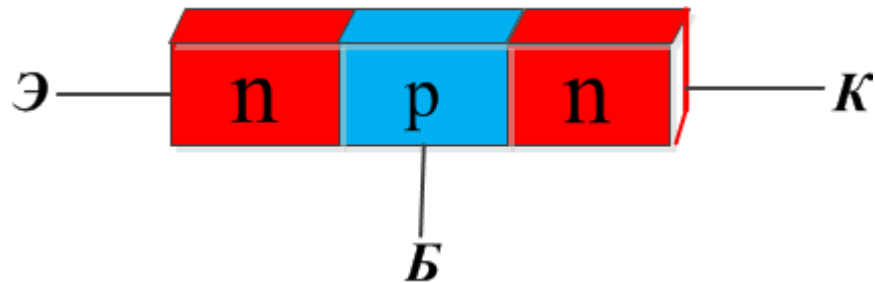
$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u_2 = 0; \end{cases}$$

Математическая модель дифференциального каскада

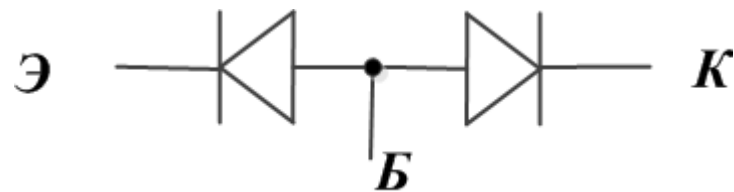
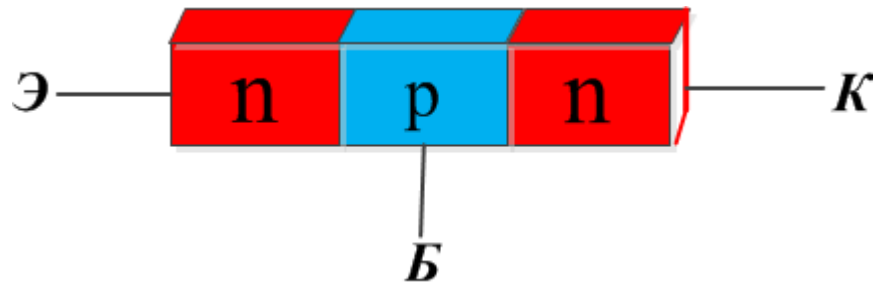


$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u_2 = 0; \\ -u_{11} + u_{be1} - u_{be2} + u_{12} = 0; \end{cases}$$

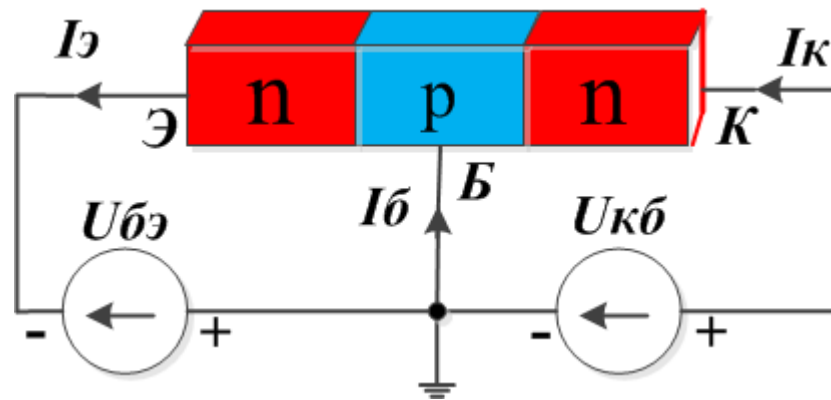
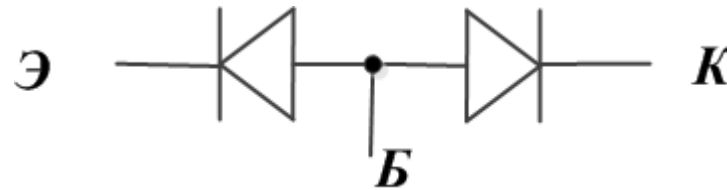
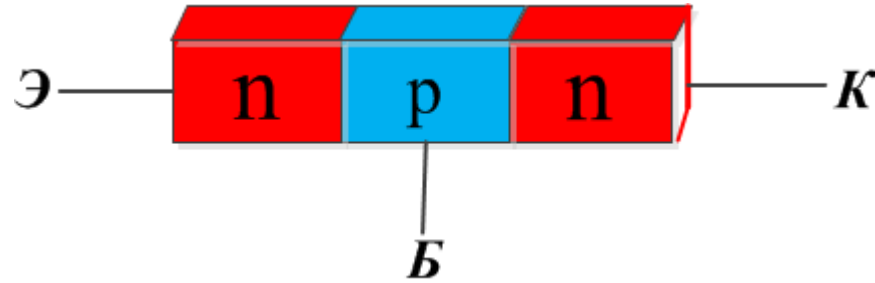
Математическая модель биполярного транзистора



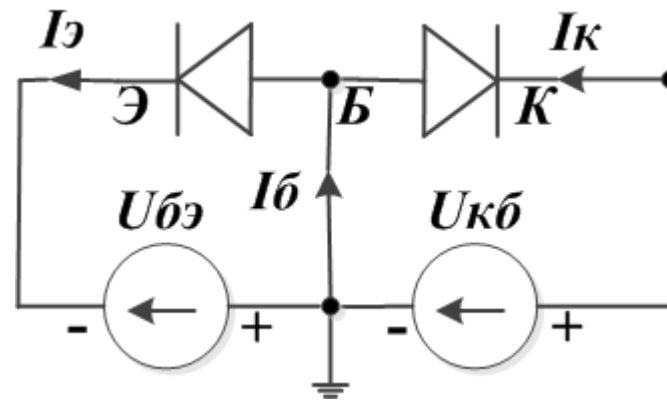
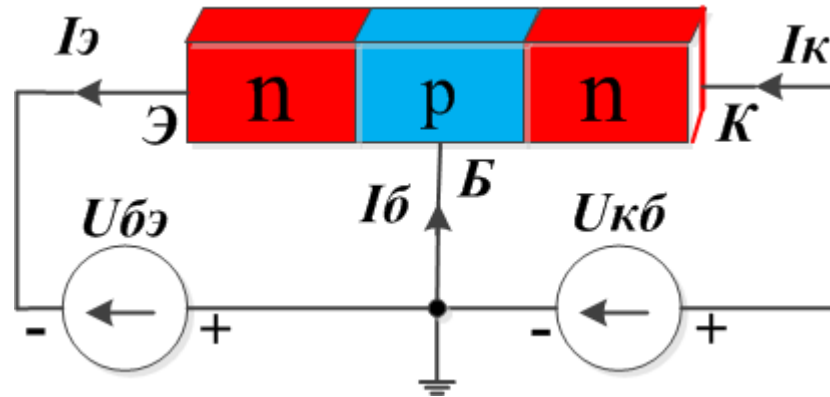
Математическая модель биполярного транзистора



Математическая модель биполярного транзистора

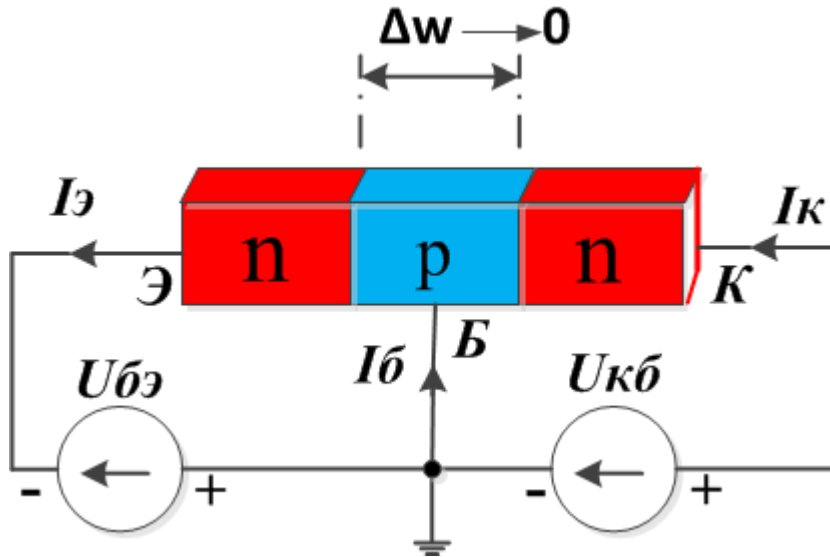


Математическая модель биполярного транзистора

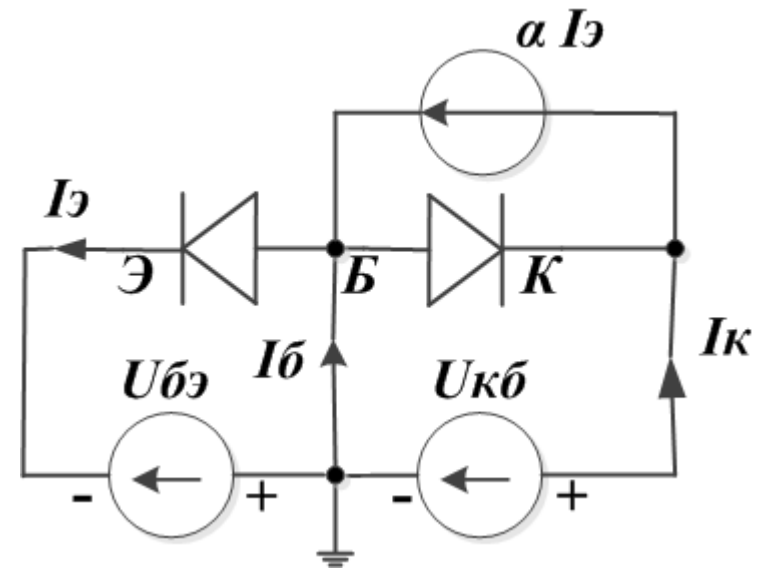
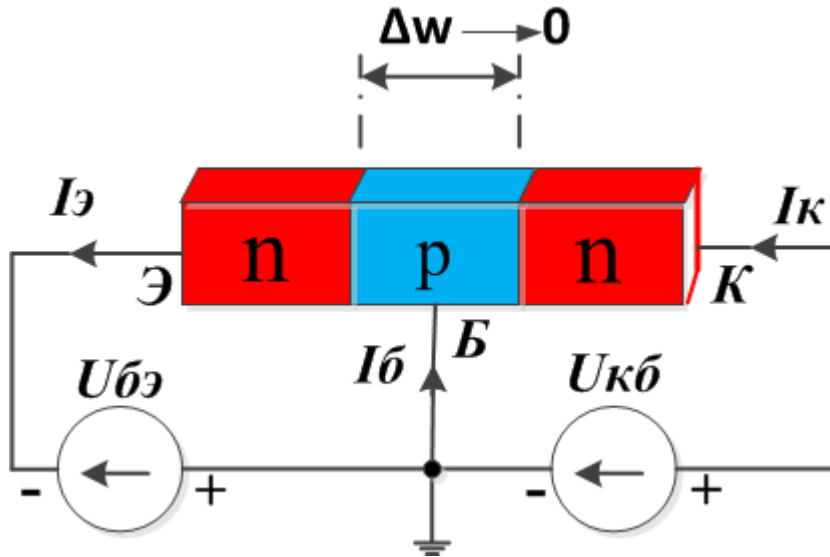


$$I_{\text{к}} \approx 0;$$

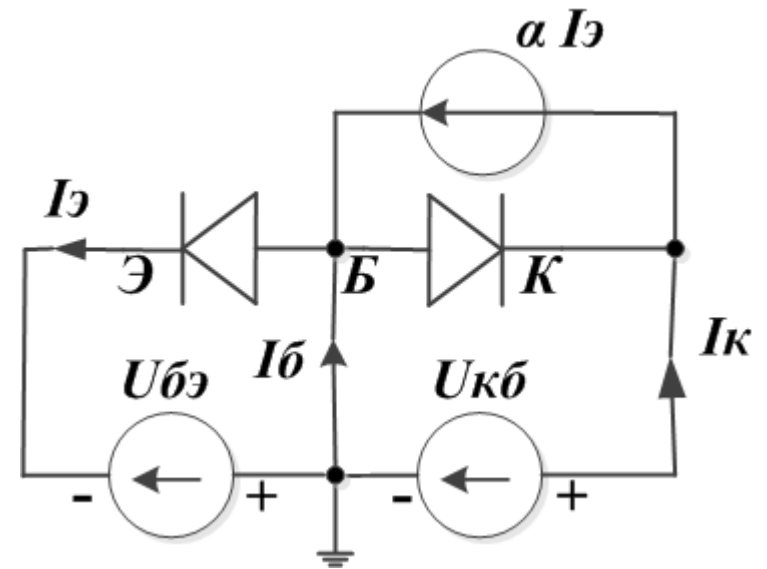
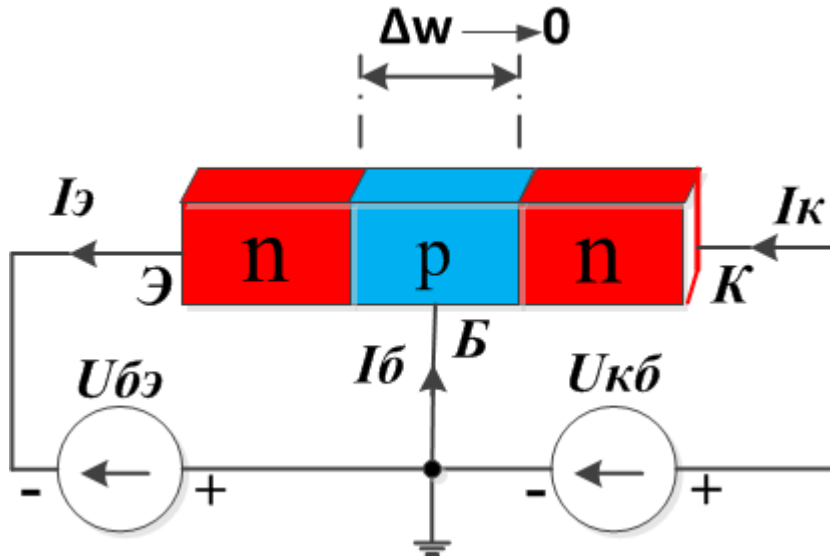
Математическая модель биполярного транзистора



Математическая модель биполярного транзистора

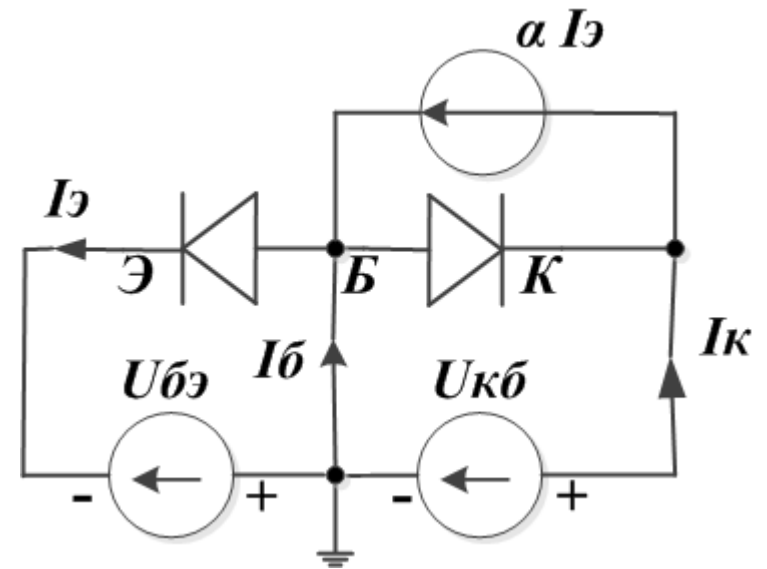
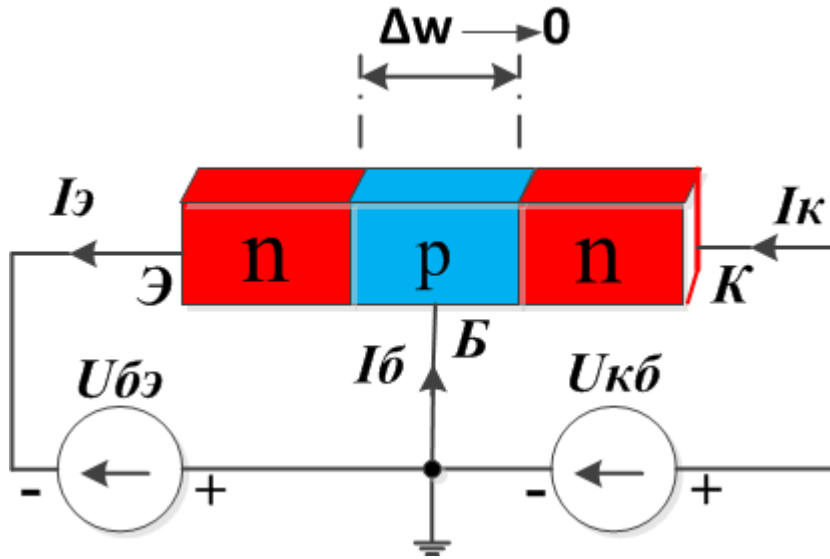


Математическая модель биполярного транзистора



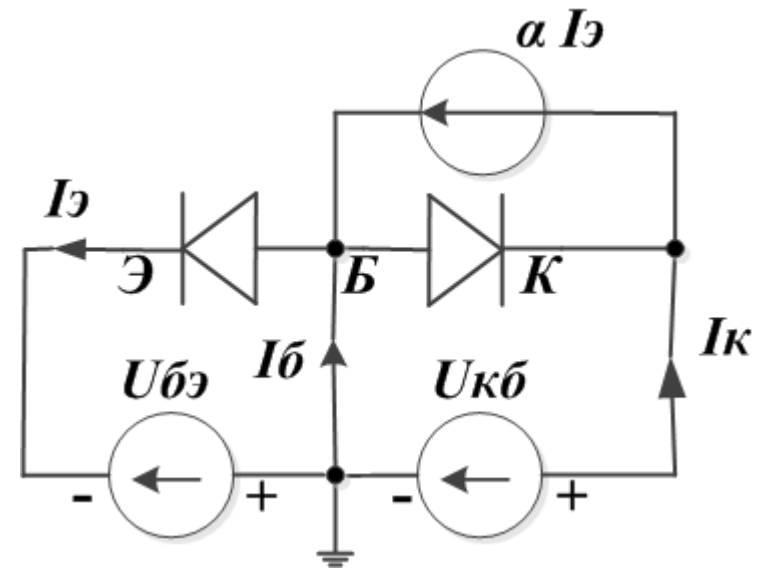
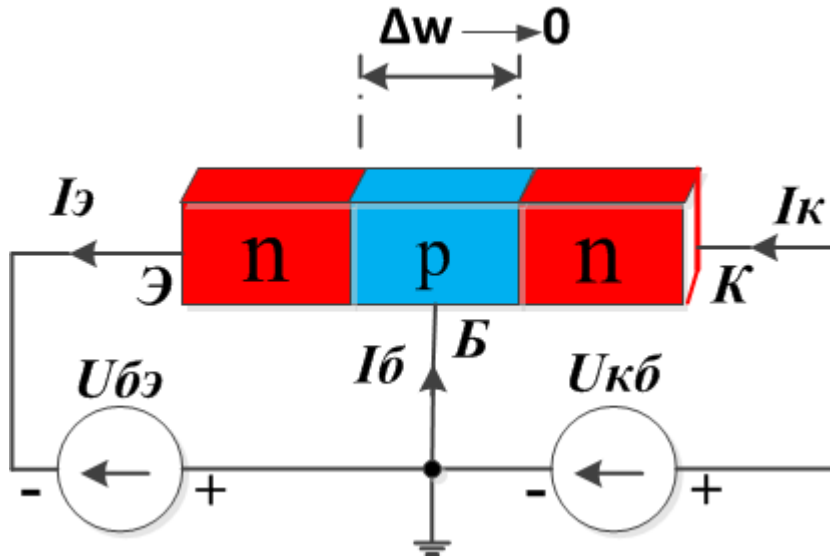
$$I_k + I_{б} - I_{э} = 0;$$

Математическая модель биполярного транзистора



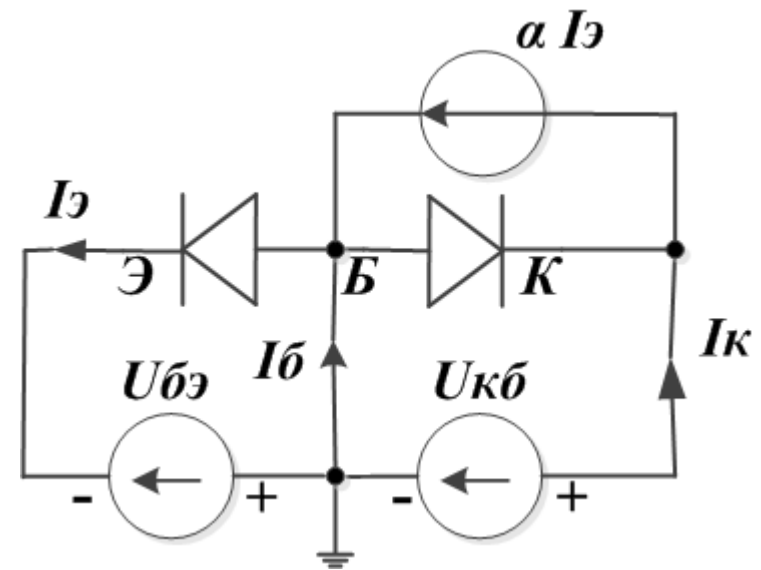
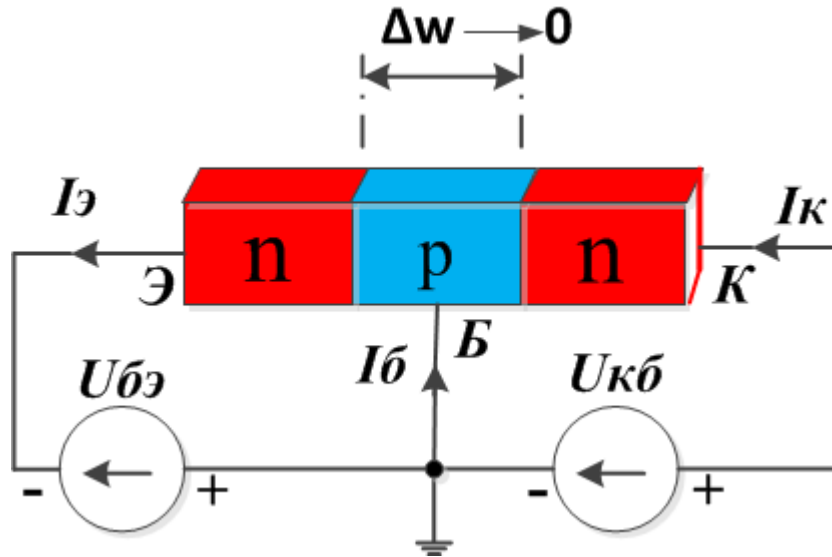
$$I_k + I_b - I_\varepsilon = 0; \quad I_k = \alpha \cdot I_\varepsilon;$$

Математическая модель биполярного транзистора



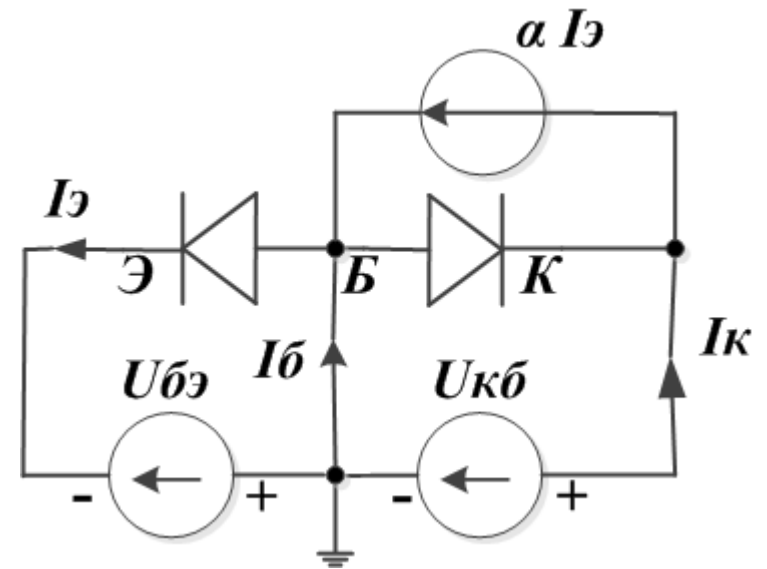
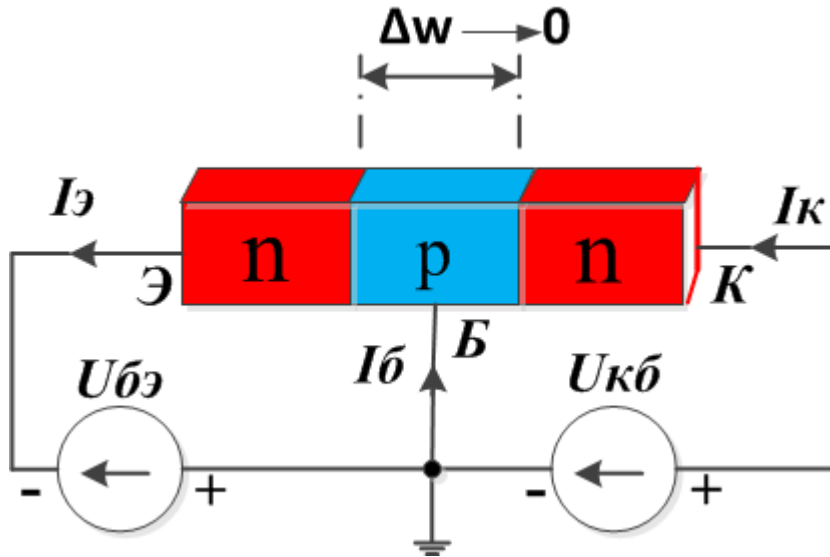
$$I_k + I_б - I_э = 0; \quad I_k = \alpha \cdot I_э; \quad I_б = (1 - \alpha) \cdot I_э;$$

Математическая модель биполярного транзистора



$$I_k + I_b - I_э = 0; \quad I_k = \alpha \cdot I_э; \quad I_b = (1 - \alpha) \cdot I_э; \quad I_э = I_{э,обр} \cdot \left[e^{\frac{U_{бэ}}{\varphi_T}} - 1 \right];$$

Математическая модель биполярного транзистора

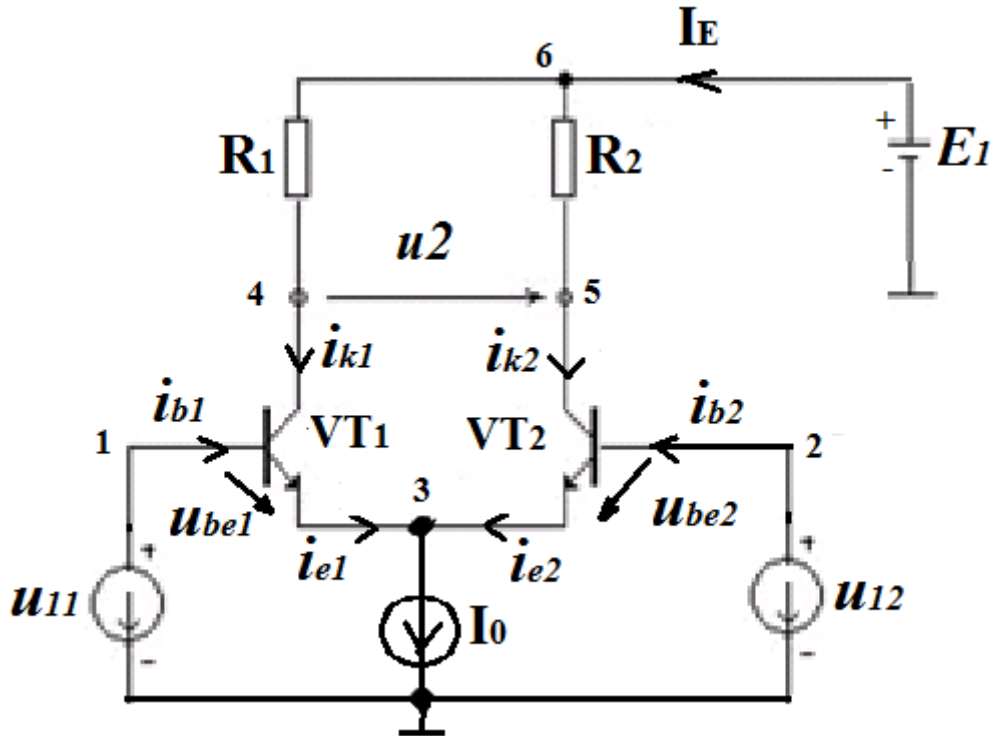


$$I_k + I_{\text{б}} - I_{\text{э}} = 0; \quad I_k = \alpha \cdot I_{\text{э}}; \quad I_{\text{б}} = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{э}}; \quad I_{\text{э}} = I_{\text{э,обр}} \cdot \left[e^{\frac{U_{\text{бэ}}}{\varphi_T}} - 1 \right];$$

$$I_k = \alpha \cdot I_{\text{э}}; \quad \alpha < 1;$$

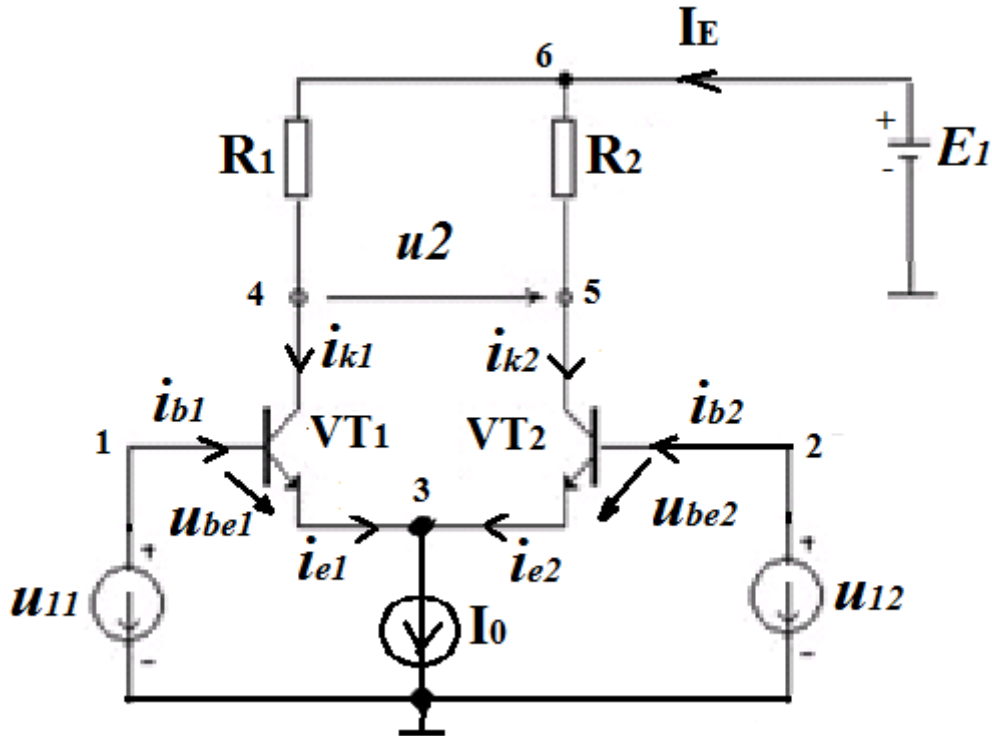
$$I_k = \beta \cdot I_{\text{б}}; \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \gg 1;$$

Математическая модель дифференциального каскада



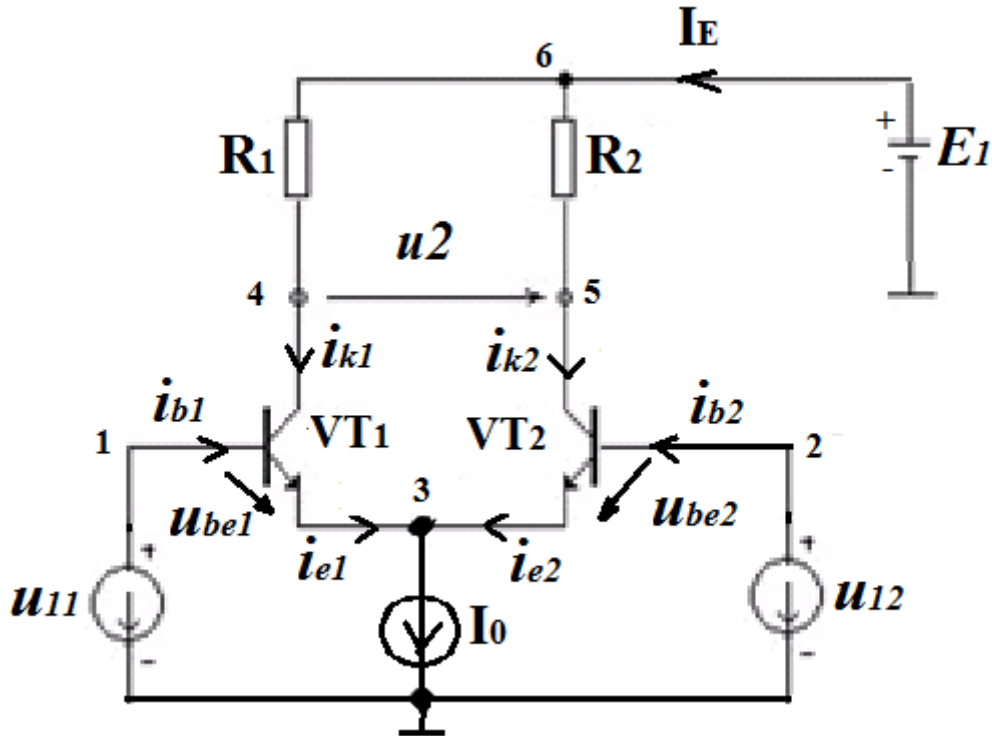
$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u_2 = 0; \\ -u_{11} + u_{be1} - u_{be2} + u_{12} = 0; \end{cases}$$

Математическая модель дифференциального каскада



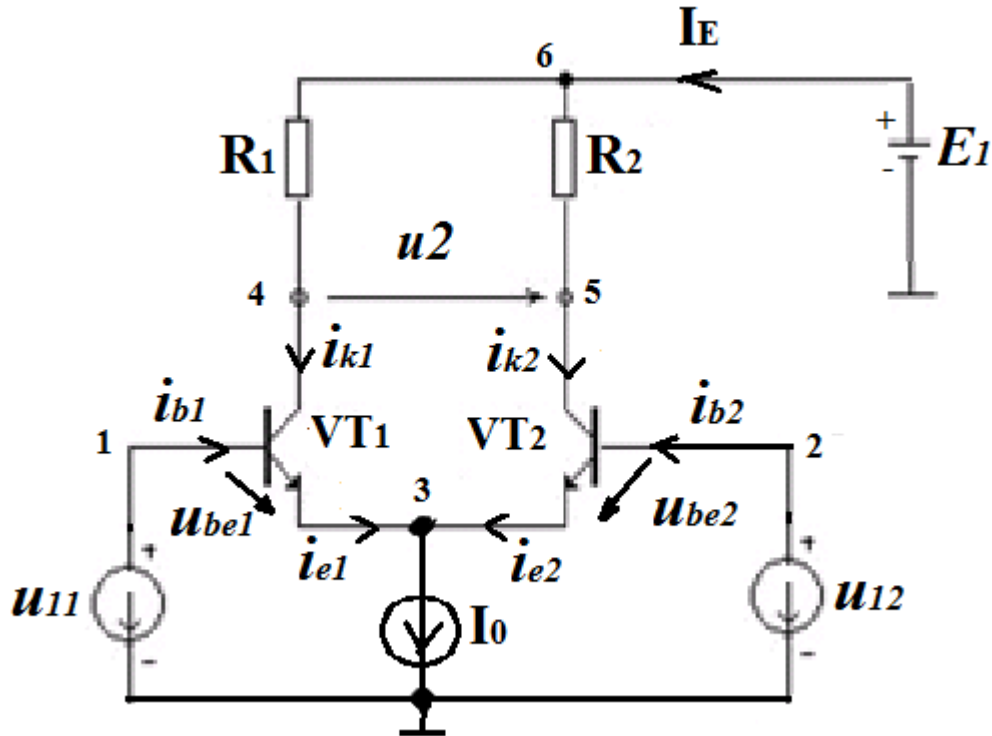
$$\begin{cases} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u_2 = 0; \\ -u_{11} + u_{be1} - u_{be2} + u_{12} = 0; \\ i_{k1} = \alpha \cdot i_{e1}; \\ i_{k2} = \alpha \cdot i_{e2}; \end{cases}$$

Математическая модель дифференциального каскада



$$\left\{ \begin{array}{l} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u_2 = 0; \\ -u_{11} + u_{be1} - u_{be2} + u_{12} = 0; \\ i_{k1} = \alpha \cdot i_{e1}; \\ i_{k2} = \alpha \cdot i_{e2}; \\ i_{e1} = I_{e0} \cdot \left(e^{\frac{u_{be1}}{\varphi_T}} - 1 \right); \\ i_{e2} = I_{e0} \cdot \left(e^{\frac{u_{be2}}{\varphi_T}} - 1 \right); \end{array} \right.$$

Математическая модель дифференциального каскада

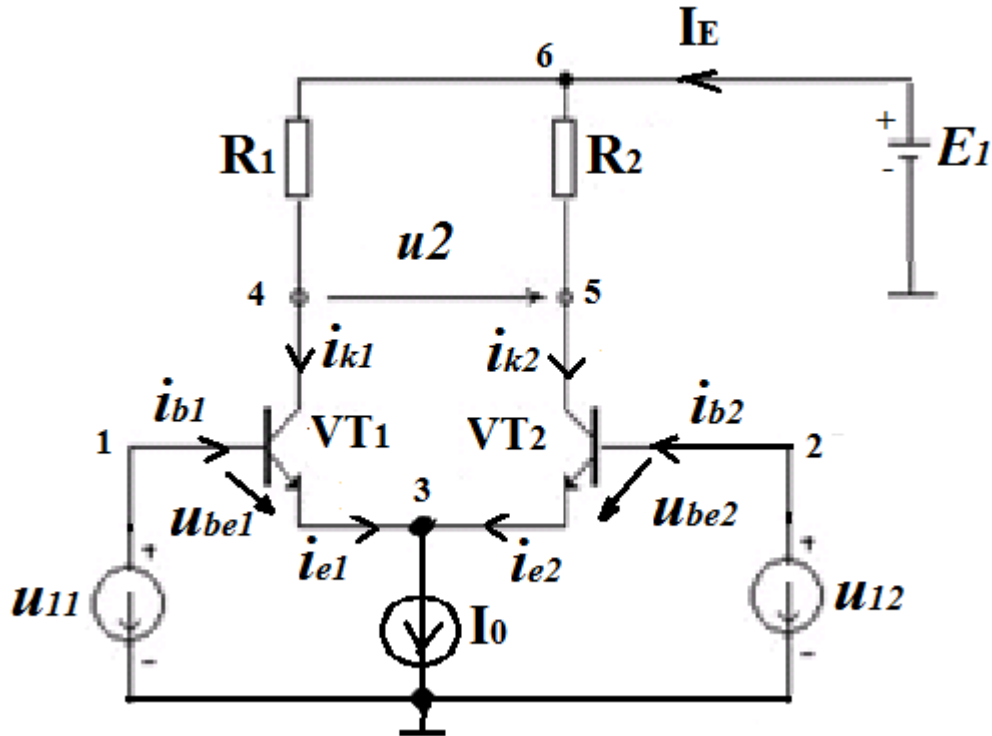


$$\Delta u1 = u_{11} - u_{12};$$

$$u2 = \Phi(\Delta u1);$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_E - i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ i_{e1} + i_{e2} - I_0 = 0; \\ i_{k1} + i_{b1} - i_{e1} = 0; \\ i_{k2} + i_{b2} - i_{e2} = 0; \\ -R_1 \cdot i_{k1} + R_2 \cdot i_{k2} - u2 = 0; \\ -u_{11} + u_{be1} - u_{be2} + u_{12} = 0; \\ i_{k1} = \alpha \cdot i_{e1}; \\ i_{k2} = \alpha \cdot i_{e2}; \\ i_{e1} = I_{e0} \cdot (e^{\frac{u_{be1}}{\varphi_T}} - 1); \\ i_{e2} = I_{e0} \cdot (e^{\frac{u_{be2}}{\varphi_T}} - 1); \end{array} \right.$$

Математическая модель дифференциального каскада

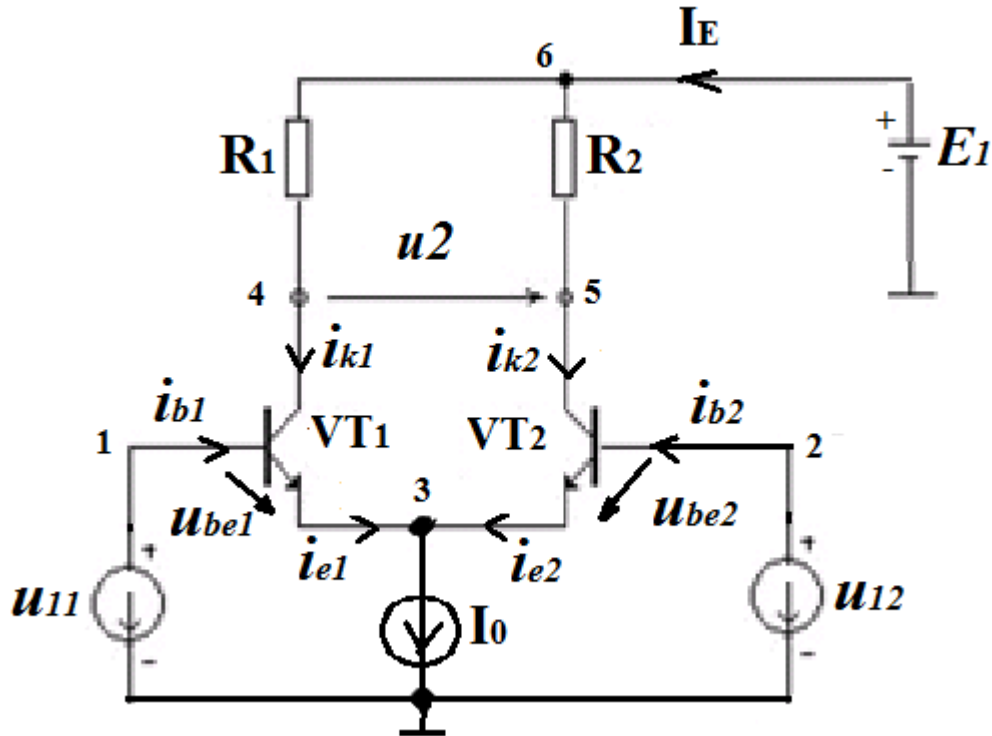


$$R_1 = R_2 = R = \frac{E_1}{I_0};$$

$$\Delta u_1 = u_{11} - u_{12};$$

$$u_2 = \Phi(\Delta u_1);$$

Математическая модель дифференциального каскада



$$R_1 = R_2 = R = \frac{E_1}{I_0};$$

$$u_2 = \alpha \cdot E \cdot \frac{1 - e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}}{1 + e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}};$$

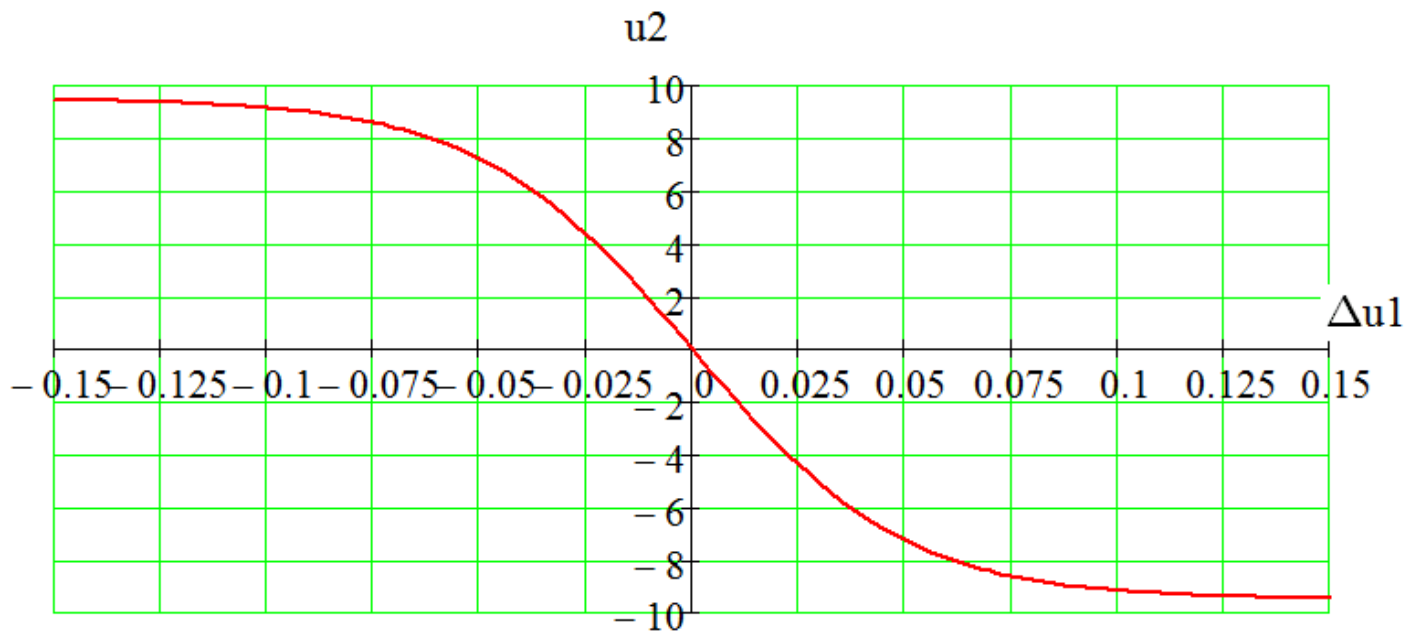
$$\Delta u_1 = u_{11} - u_{12};$$

$$u_2 = \Phi(\Delta u_1);$$

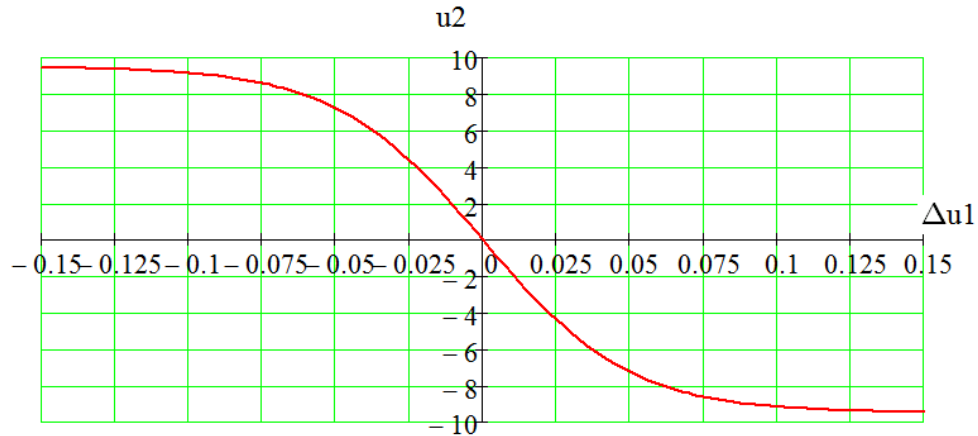
Функциональная характеристика дифференциального каскада

$E = 10 \text{ В}; \quad \alpha_0 = 0,95; \quad I_0 = 1 \text{ мА}; \quad R = 10 \text{ кОм}; \quad I_{e0} = 0,1 \text{ нА}; \quad \varphi_T = 25 \text{ мВ};$

$$\Delta u_1 = u_{11} - u_{12};$$
$$u_2 = \alpha_0 \cdot E \cdot \frac{1 - e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}}{1 + e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}};$$



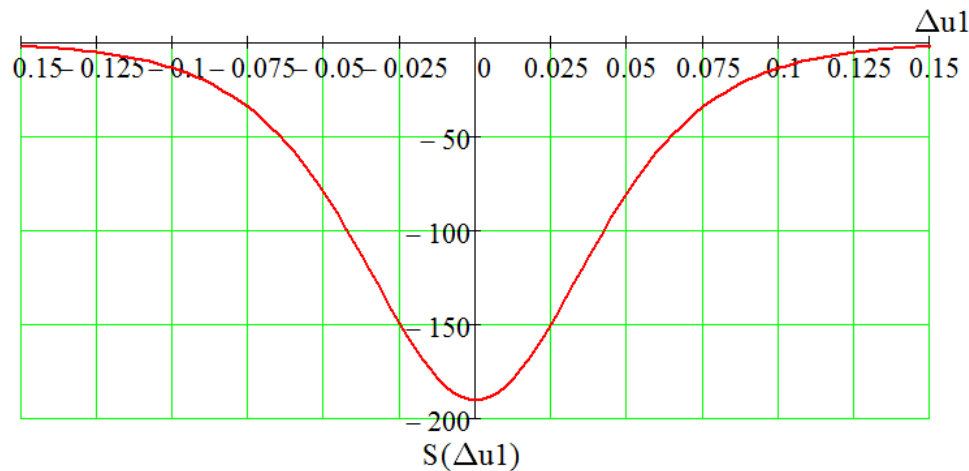
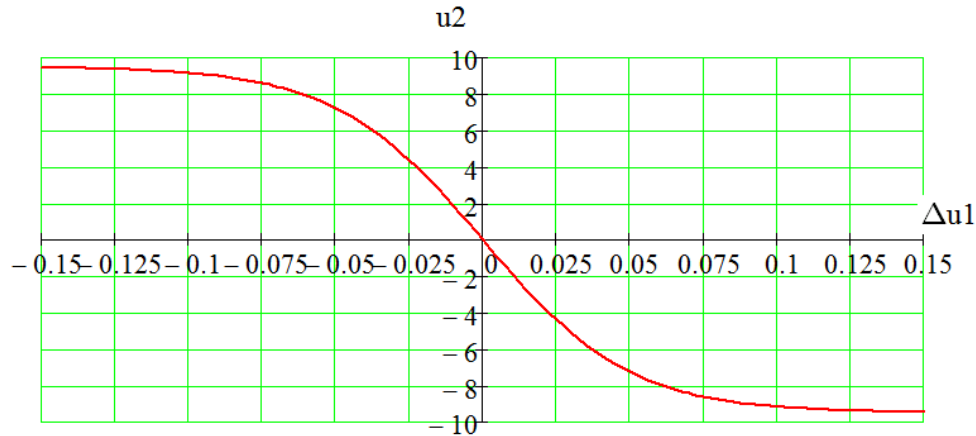
Крутизна характеристика дифференциального каскада



$$S_{\Delta u_1}^{u_2} = \frac{du_2}{d(\Delta u_1)};$$

$$u_2 = \alpha_0 \cdot E \cdot \frac{1 - e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}}{1 + e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}};$$

Крутизна характеристика дифференциального каскада



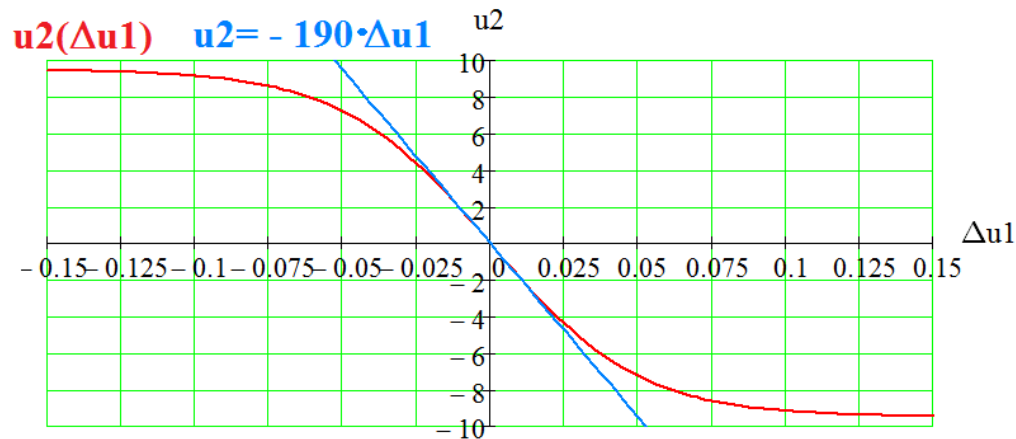
$$S_{\Delta u_1}^{u_2} = \frac{du_2}{d(\Delta u_1)};$$

$$u_2 = \alpha_0 \cdot E \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}}{1 + e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}};$$

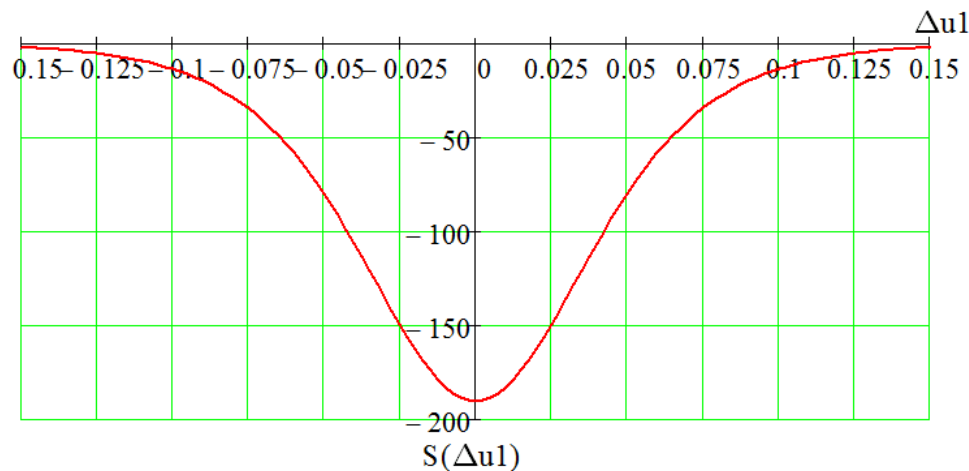
$$S_{\Delta u_1}^{u_2} = -\frac{2 \cdot \alpha_0 \cdot E}{\varphi_T} \cdot \frac{e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}}{\left(1 + e^{\frac{\Delta u_1}{\varphi_T}}\right)^2};$$

Крутизна характеристика дифференциального каскада

$$S_{\Delta u1}^{u2} = \frac{du2}{d(\Delta u1)};$$



$$u2 = \alpha_0 \cdot E \cdot \frac{1 - e^{\frac{\Delta u1}{\varphi_T}}}{1 + e^{\frac{\Delta u1}{\varphi_T}}};$$

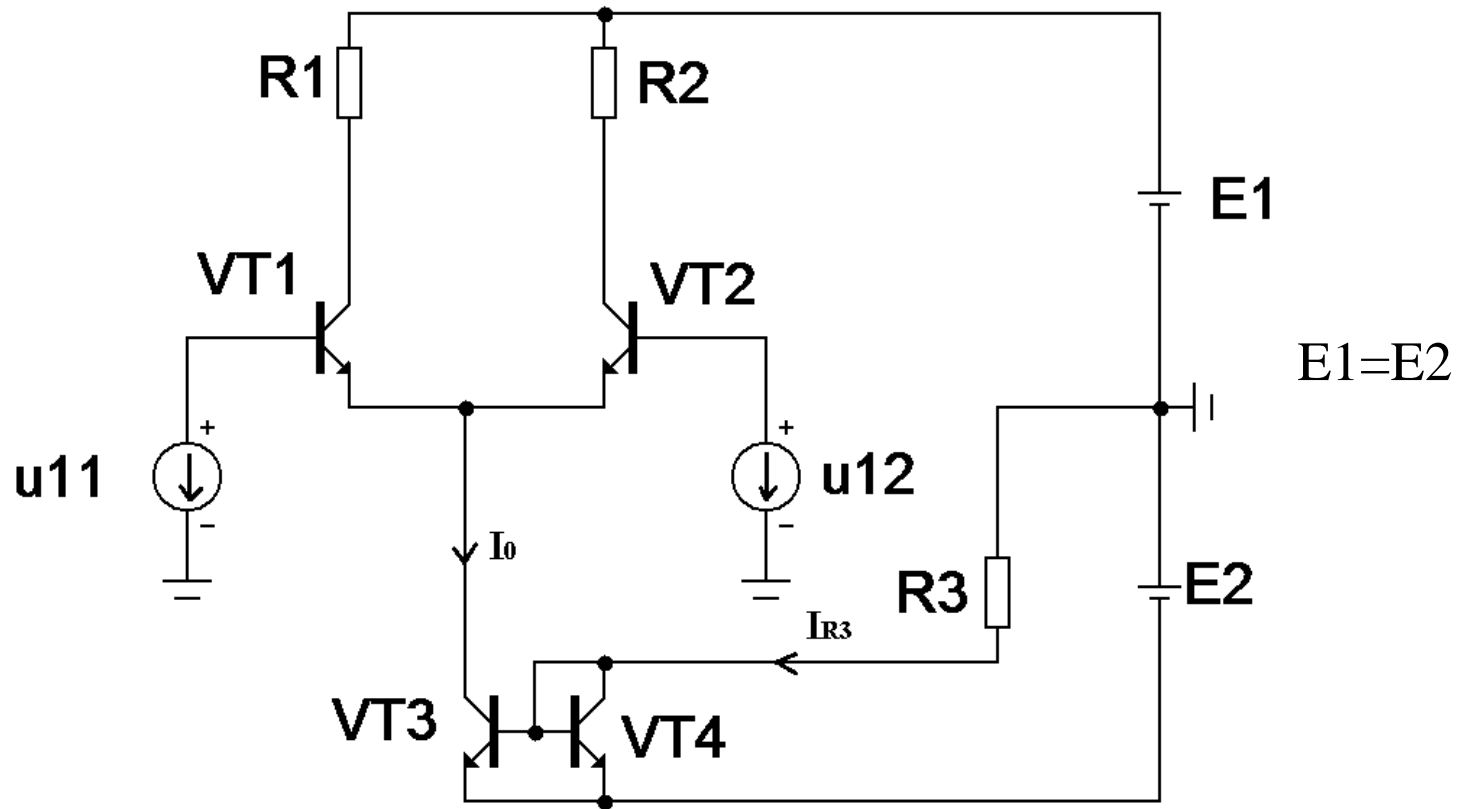


$$S_{\Delta u1}^{u2} = -\frac{2 \cdot \alpha_0 \cdot E}{\varphi_T} \cdot \frac{e^{\frac{\Delta u1}{\varphi_T}}}{\left(1 + e^{\frac{\Delta u1}{\varphi_T}}\right)^2};$$

при $\Delta u1 = 0$,

$$S_{\Delta u1}^{u2} = -190;$$

Функциональная схема дифференциального каскада с "токовым зеркалом"



$$I_{R3} = I_0 + 2 \cdot I_0 \cdot (1 - \alpha_0) = I_0 \cdot [1 + 2 \cdot (1 - \alpha_0)] \approx I_0;$$

Спасибо за внимание