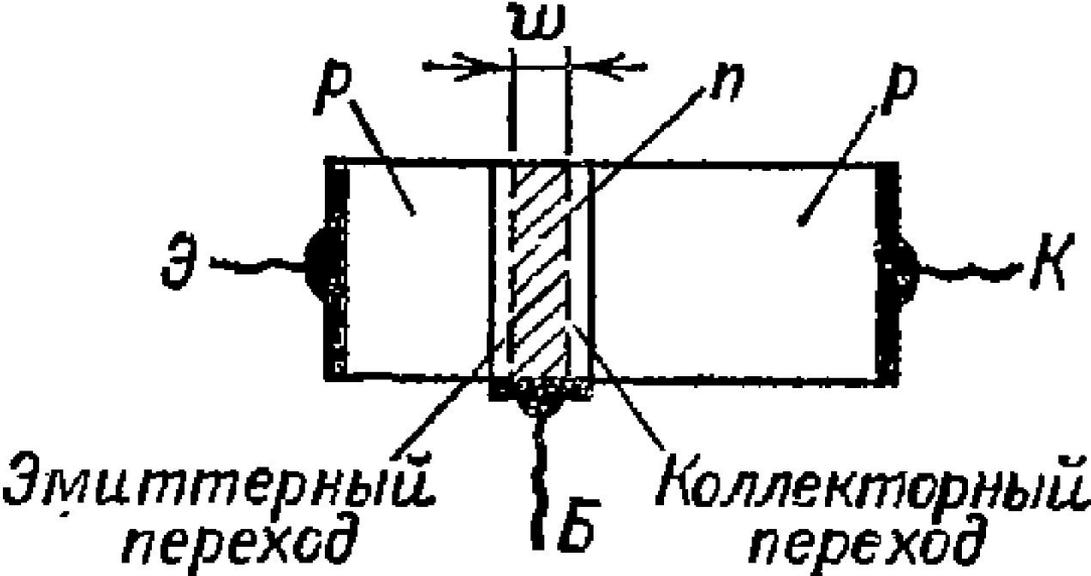
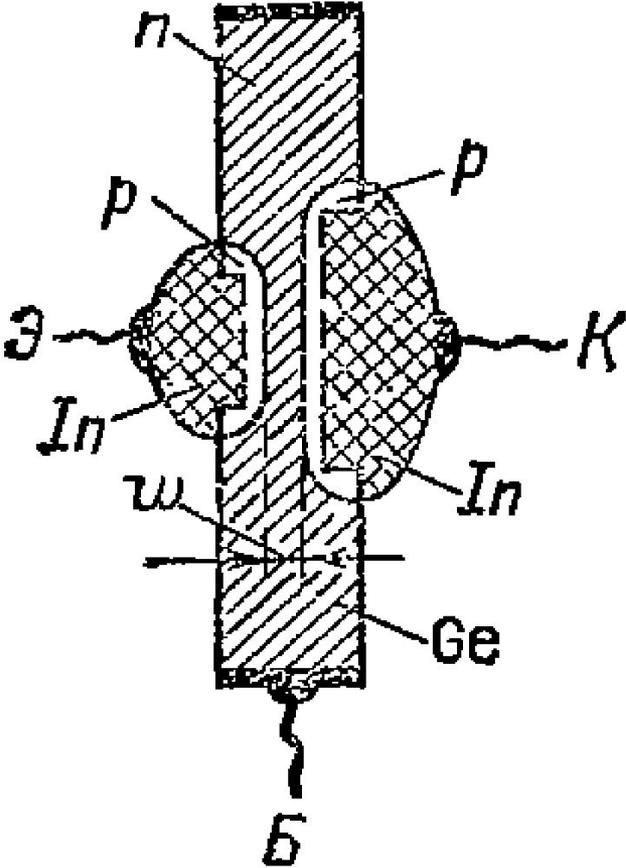


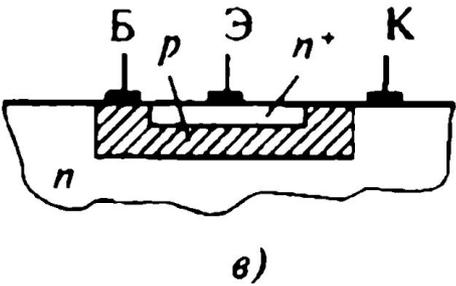
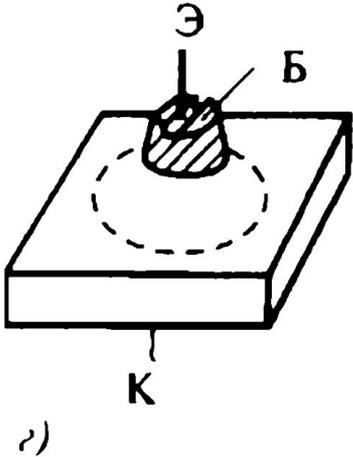
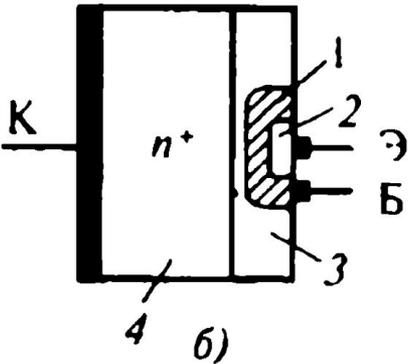
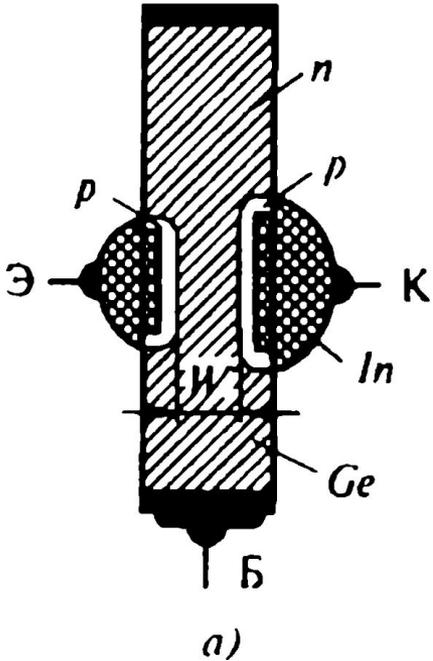
Биполярный транзистор.

Несимметричная p-n-p структура



Структура реального сплавного р-п-р транзистора





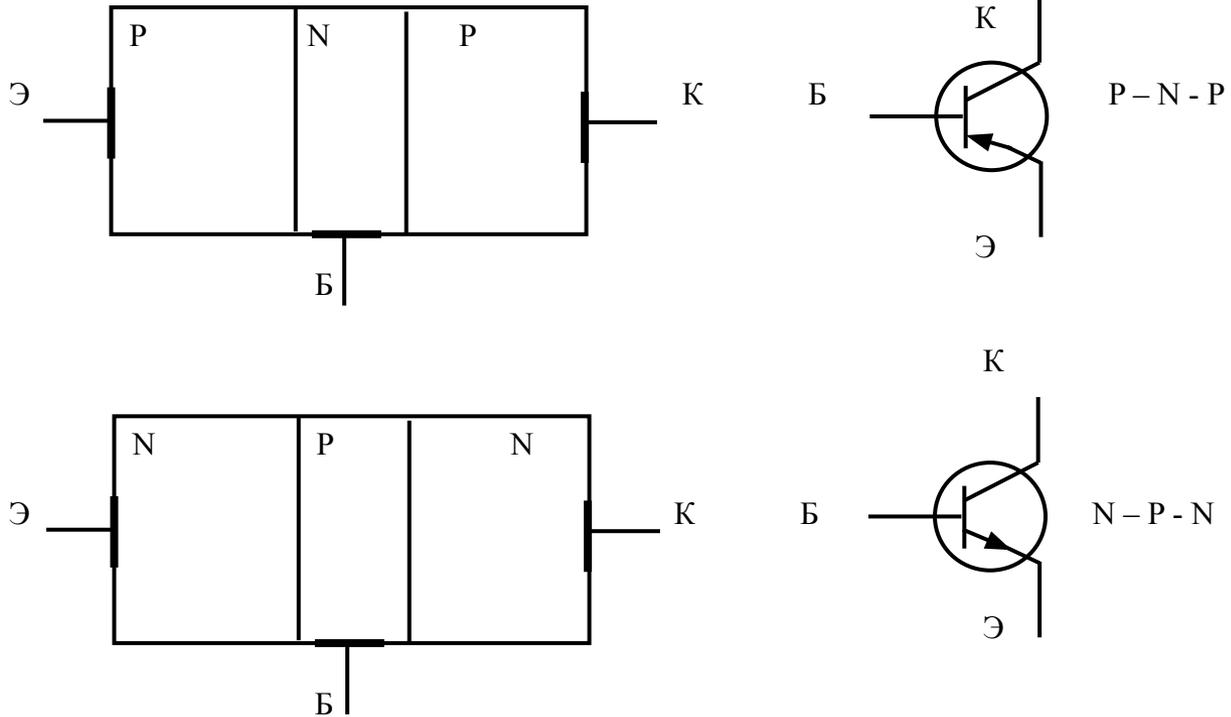
Структуры транзисторов:

a — сплавленного; *б* — эпитаксиально-диффузионного; *в* — планарного; *г* — мезатранзистора;
 1 — база; 2 — эмиттер; 3 — коллектор (эпитаксиальная пленка); 4 — подложка



Внешний вид биполярных транзисторов

Идеализированная симметричная структура



На условных обозначениях стрелка всегда указывает направление от области P к области N

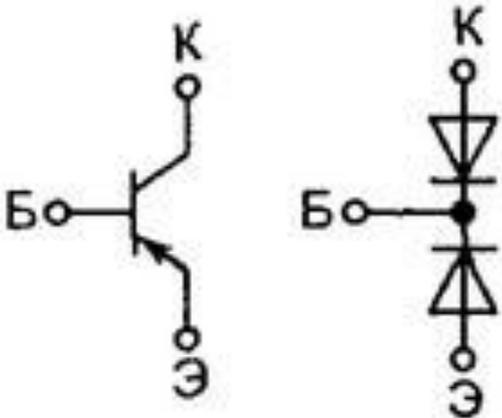
Э - эмиттер

Б - база

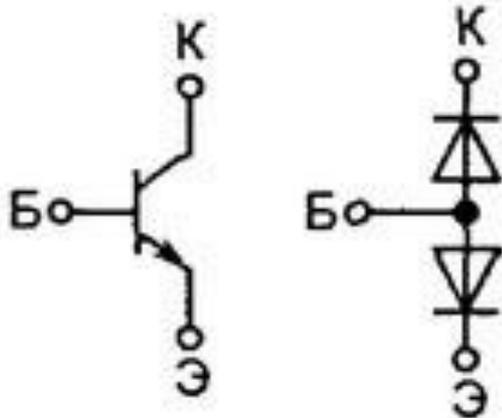
К - коллектор

Транзистор как два встречно включенных диода

p-n-p



n-p-n



Основные режимы работы транзистора

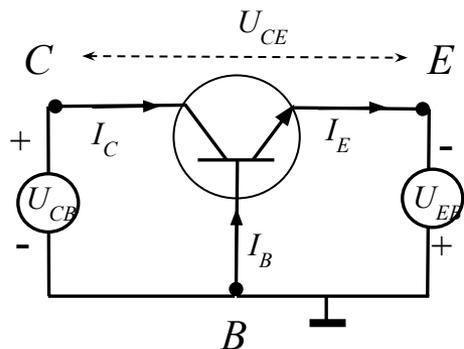
- 1.Режим насыщения. Оба перехода открыты**
- 2.Режим отсечки. Оба перехода закрыты.**
- 3.Активный режим. Эмиттерный переход открыт, коллекторный закрыт.**
- 4.Инверсный режим. Эмиттерный закрыт, коллекторный открыт.**

Активный режим. ОБ и ОЭ.

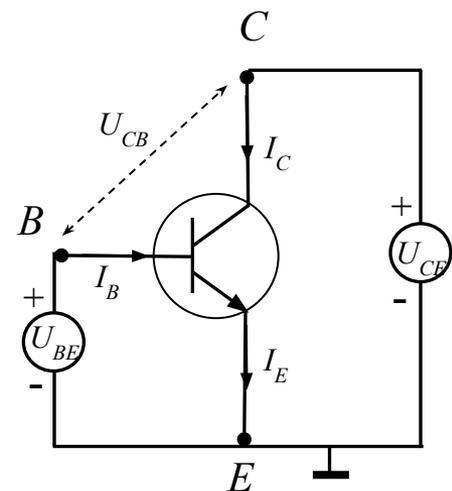
$$I_E = I_C + I_B$$

$U_{BE} > 0$ и $U_{BC} < 0$. Типовые значения для кремниевых транзисторов

$$U_{BE} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}, U_{BC} < -5 \text{ В}$$



$$U_{BE} > 0 \ (U_{EB} < 0) \text{ и } U_{BC} < 0 \ (U_{CB} > 0), \quad U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} > 5.6$$



$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \Rightarrow U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$$

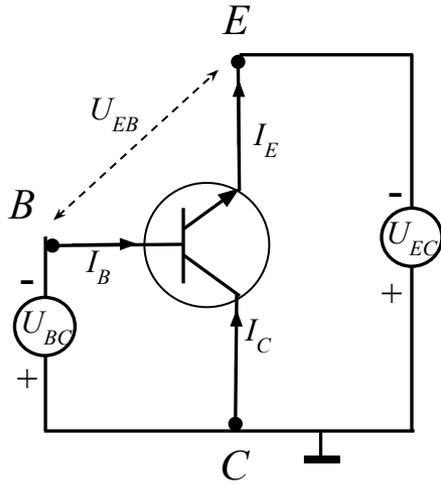
$U_{BE} > 0$ и $U_{CE} > 0$, но должно быть $U_{BC} < 0$, поэтому $U_{CE} > U_{BE}$.

тогда $U_{CB} > 4.3 \text{ В}$

Активный режим. ОК

$$I_E = I_C + I_B$$

$U_{BE} > 0$ и $U_{BC} < 0$. Типовые значения для кремниевых транзисторов
 $U_{BE} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}$, $U_{BC} < -5 \text{ В}$



$U_{BC} < -5 \text{ В}$ и $U_{EC} < 0$. Должно быть $U_{BE} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}$.
Поэтому $U_{EC} < -5.6 \text{ В}$

Коэффициент передачи эмиттерного тока и коэффициент усиления тока базы

$$I_C = \alpha I_E, \alpha = 0.95 \div 0.999 \approx 1$$

$$I_E = I_C + I_B \Rightarrow \frac{I_C}{\alpha} = I_C + I_B \Rightarrow I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx 20 \div 1000 \gg 1$$

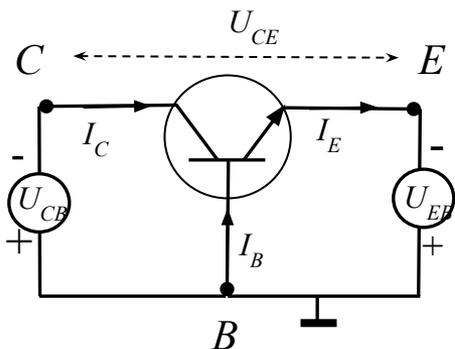
$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Режим насыщения. ОБ и ОЭ.

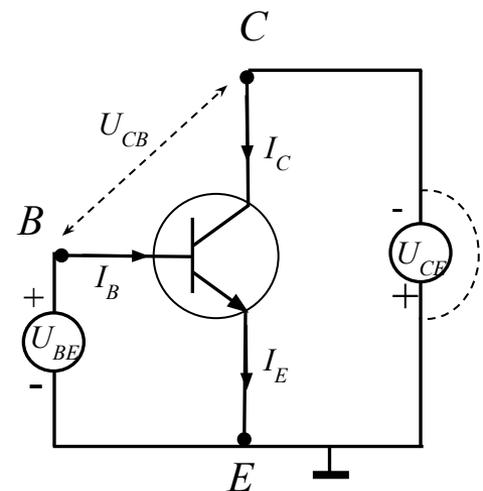
$$I_E = I_C + I_B$$

$U_{BE} > 0$ и $U_{BC} > 0$. Типовые значения для кремниевых транзисторов

$$U_{BE} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}, U_{BC} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}, \Rightarrow U_{CE} \approx 0$$



$$U_{BE} > 0 (U_{EB} < 0) \text{ и } U_{BC} > 0 (U_{CB} < 0), \quad U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \approx 0$$



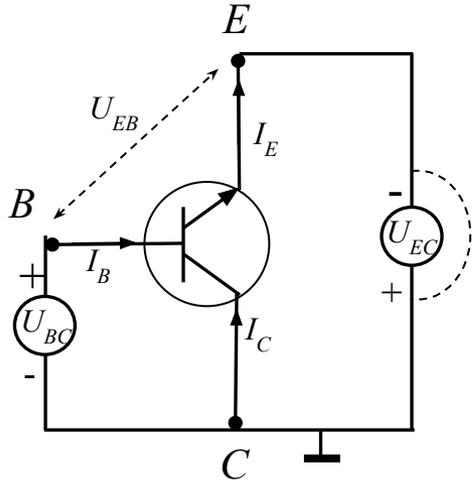
$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \Rightarrow U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} \approx -U_{BE}$$

$$U_{BE} > 0 \text{ и } U_{CE} \approx 0$$

Режим насыщения. ОК

$$I_E = I_C + I_B$$

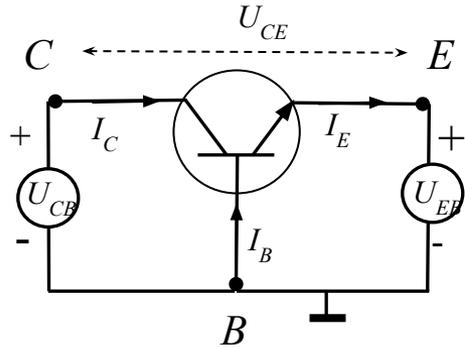
$U_{BE} < 0$ и $U_{BC} < 0$. Типовые значения для кремниевых транзисторов
 $U_{BE} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}$, $U_{BC} = 0.6 \div 0.7 \text{ В}$, $\Rightarrow U_{CE} \approx 0$



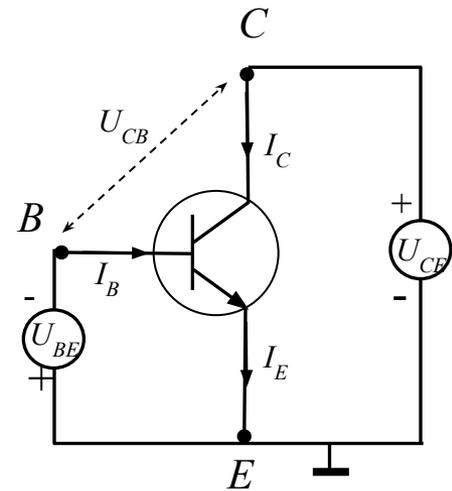
$U_{BC} > 0 \text{ В}$ и $U_{EC} \approx 0$.

Режим отсечки. ОБ и ОЭ.

$$I_E = I_C + I_B \quad U_{BE} < 0 \text{ и } U_{BC} < 0.$$



$$U_{BE} < 0 \text{ (} U_{EB} > 0 \text{)} \text{ и } U_{BC} < 0 \text{ (} U_{CB} > 0 \text{)},$$



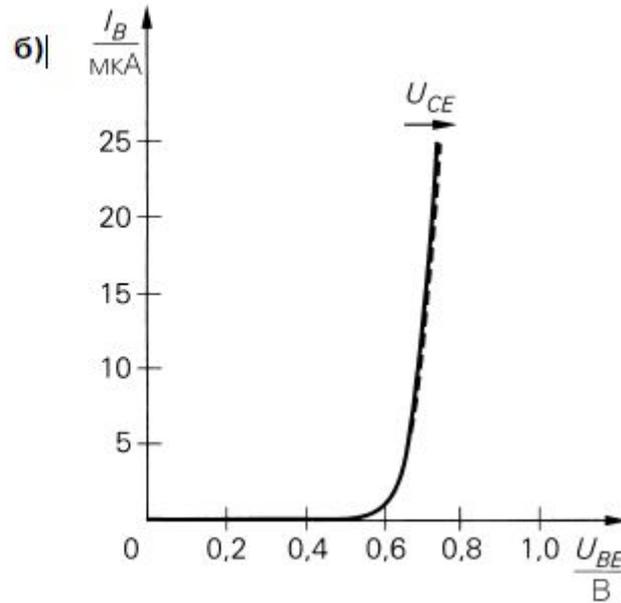
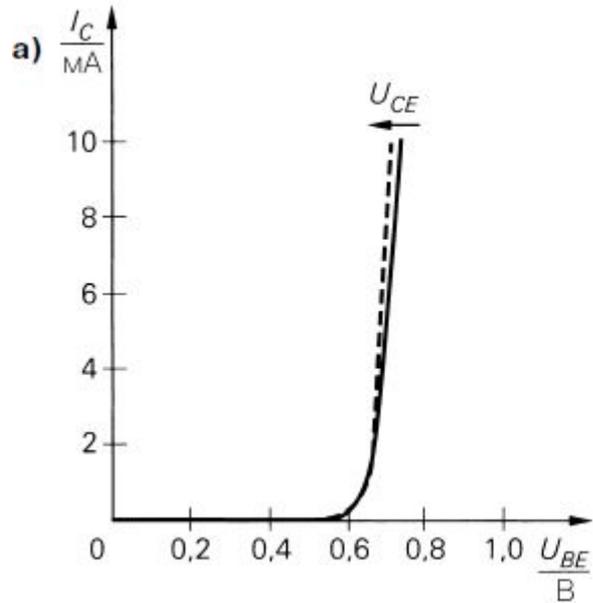
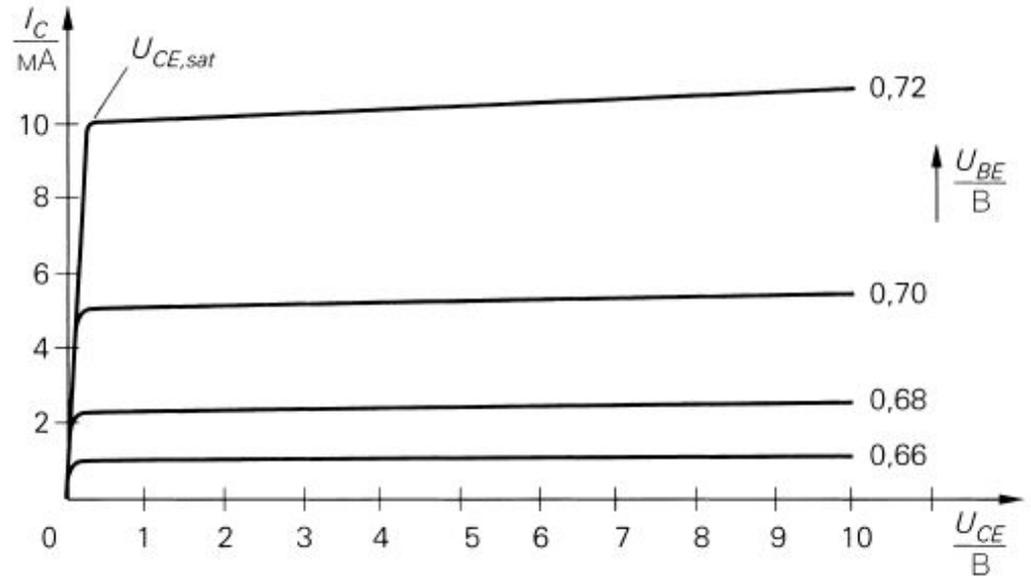
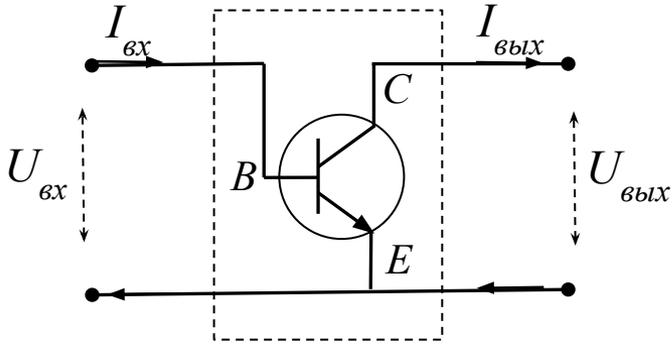
$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \Rightarrow U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$$

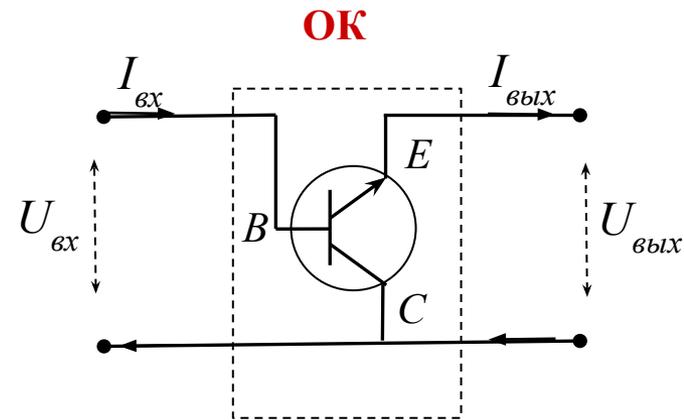
$$U_{BE} < 0 \text{ и } U_{CE} > 0, \Rightarrow U_{BC} < 0$$

Транзистор как четырехполюсник

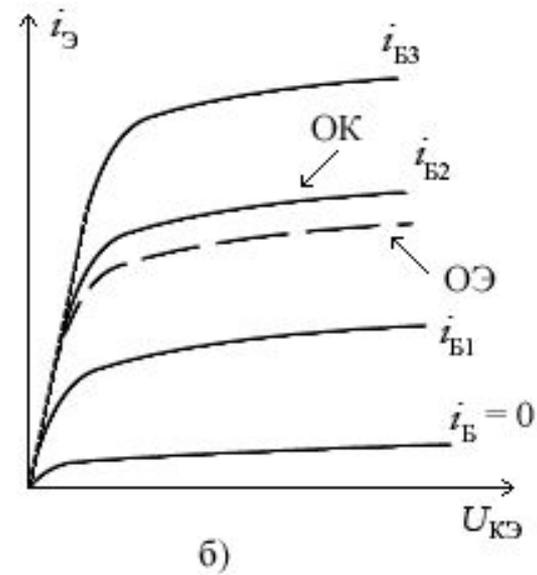
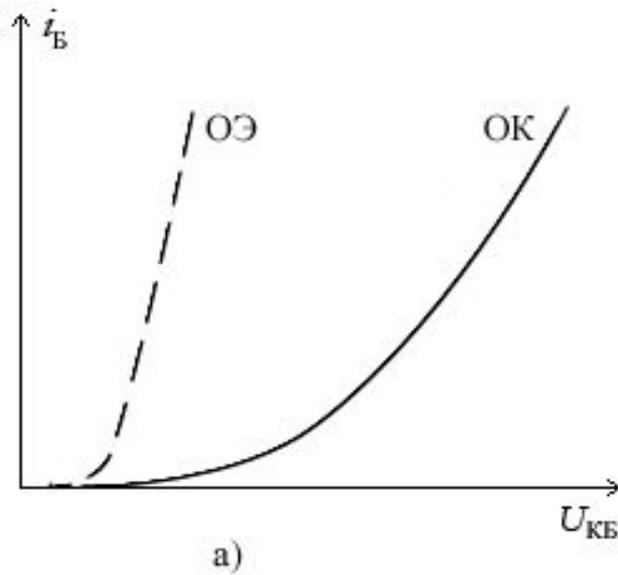
03

$$U_{вх} = U_{BE}, \quad U_{вых} = U_{CE}, \quad I_{вх} = I_B, \quad I_{вых} = I_C$$

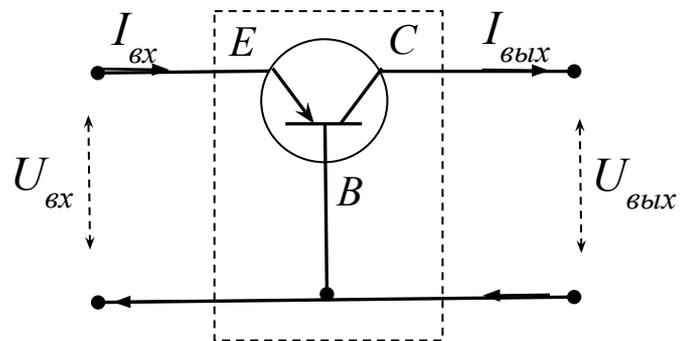




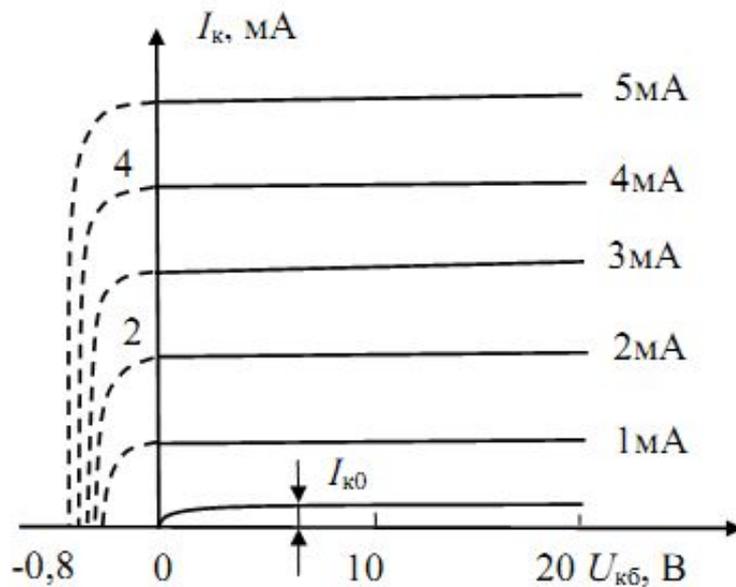
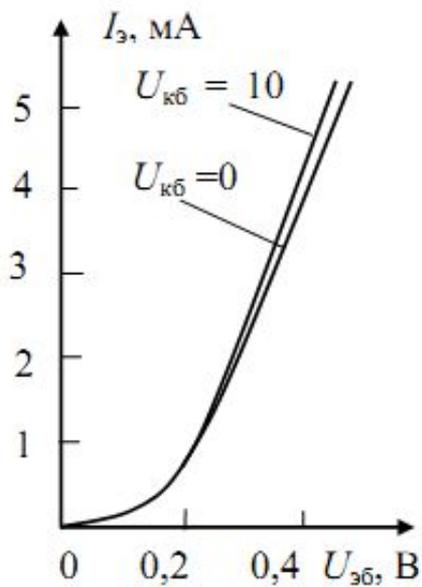
$$U_{\text{вх}} = U_{BC}, \quad U_{\text{ввых}} = U_{EC}, \quad I_{\text{вх}} = I_B, \quad I_{\text{ввых}} = I_E$$



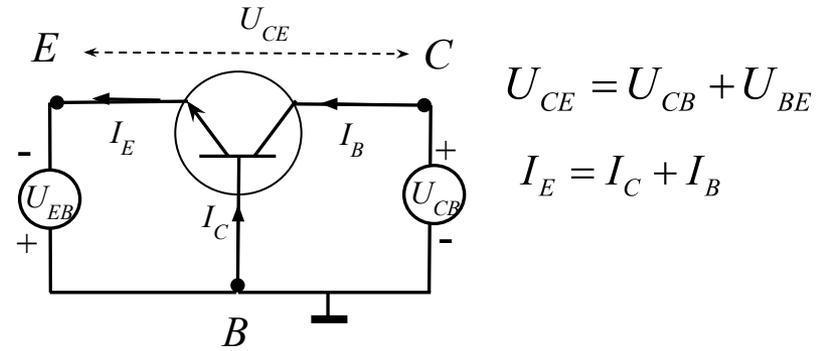
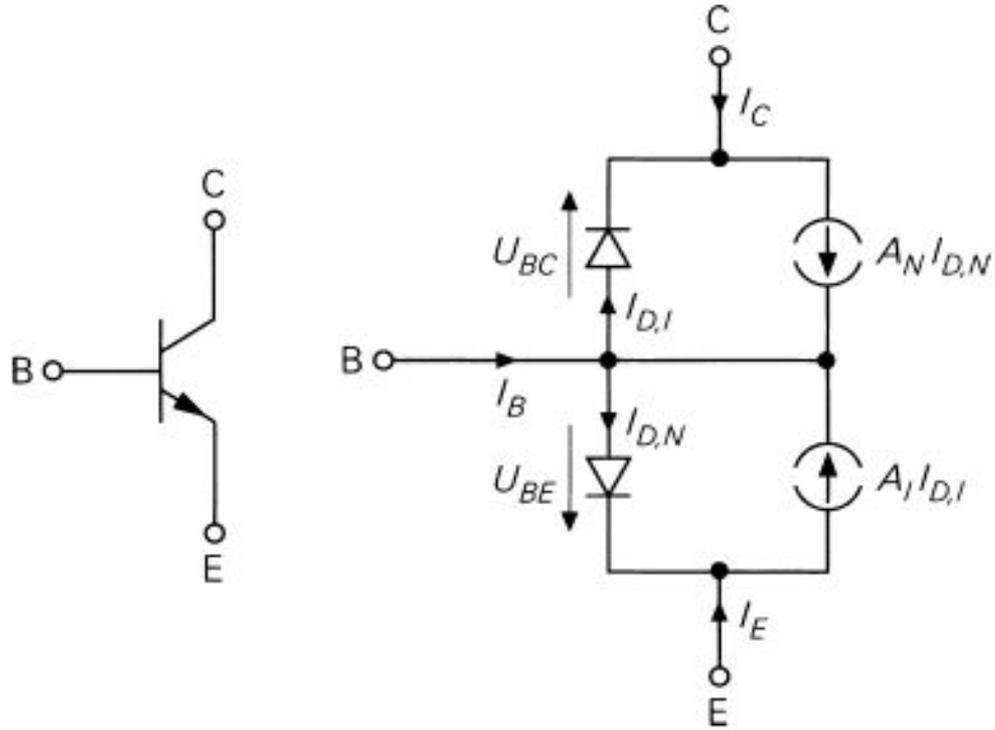
ОБ



$$U_{\epsilon x} = U_{EB}, \quad U_{\epsilon bx} = U_{CB}, \quad I_{\epsilon x} = I_E, \quad I_{\epsilon bx} = I_C$$



Модель Эберса-Молла



$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$A_{N,I} = \alpha_{N,I}, \quad A_N = \alpha$$

$$-I_E = I_C + I_B$$

$$I_{D,N} = I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right], \quad I_{D,I} = I_{S,I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right], \quad U_T = \phi_T$$

$$I_C = A_N I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] - I_{S,I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

$$A_N I_{S,N} = A_I I_{S,I} = I_S$$

$$I_E = -I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] + A_I I_{S,I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

$$I_B = (1 - A_N) I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] + (1 - A_I) I_{S,I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

В активном режиме

$$\exp(U_{BE}/U_T) \gg 1, \quad \exp(U_{BC}/U_T) \ll 1$$

$$I_C = I_S \exp(U_{BE}/U_T) \qquad I_E = -\frac{1}{A_N} I_S \exp(U_{BE}/U_T)$$

$$I_B = \frac{1 - A_N}{A_N} I_S \exp(U_{BE}/U_T) = B_N I_S \exp(U_{BE}/U_T)$$

$$B_N = \frac{A_N}{1 - A_N} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta_N = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \gg 1 \qquad \text{Коэффициент усиления тока базы}$$

$$I_C = -A_N I_E = -\alpha_N I_E = -\alpha I_E$$

$$\alpha = |I_C/I_E| = 1/(1 - \beta) = 0.95 \div 0.999 \approx 1 \qquad \text{Коэффициент передачи тока эмиттера}$$

ОБ

$$I_C(0.1, U_{BCj})$$

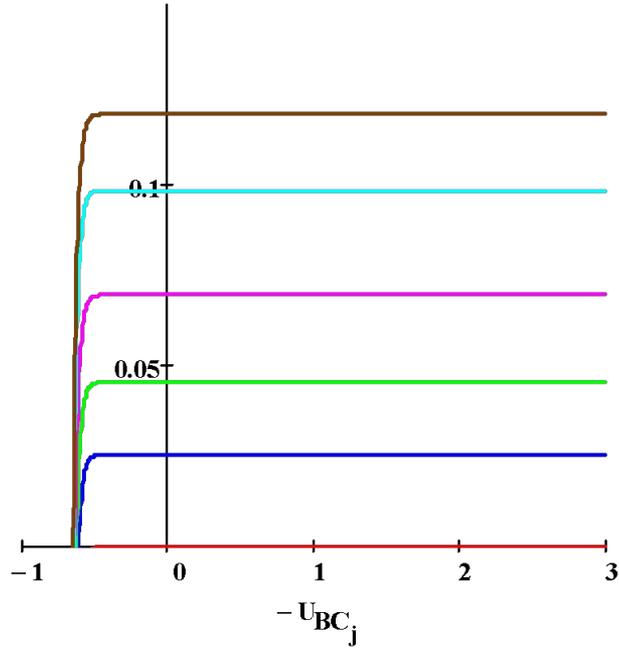
$$I_C(0.62, U_{BCj})$$

$$I_C(0.635, U_{BCj})$$

$$I_C(0.646, U_{BCj})$$

$$I_C(0.655, U_{BCj})$$

$$I_C(0.66, U_{BCj})$$



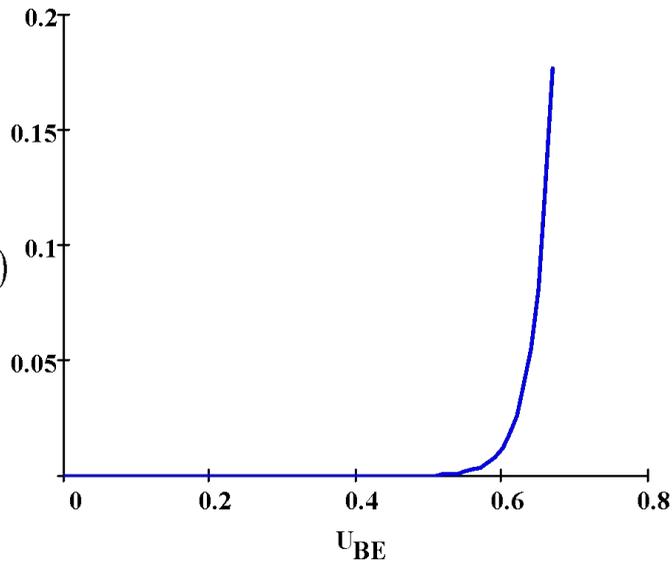
$$I_S \equiv 1 \cdot 10^{-12}$$

$$A_N \equiv 0.998$$

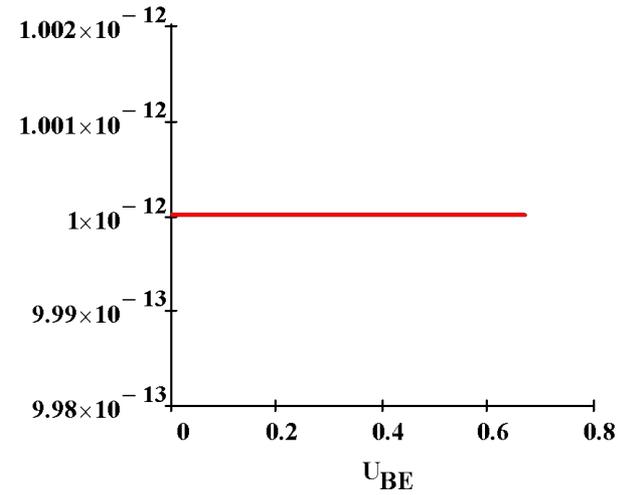
$$A_I \equiv 0.7$$

$$-I_E(U_{BE}, 0)$$

$$-I_E(U_{BE}, -10)$$



$$I_E(U_{BE}, 0) - I_E(U_{BE}, -10)$$

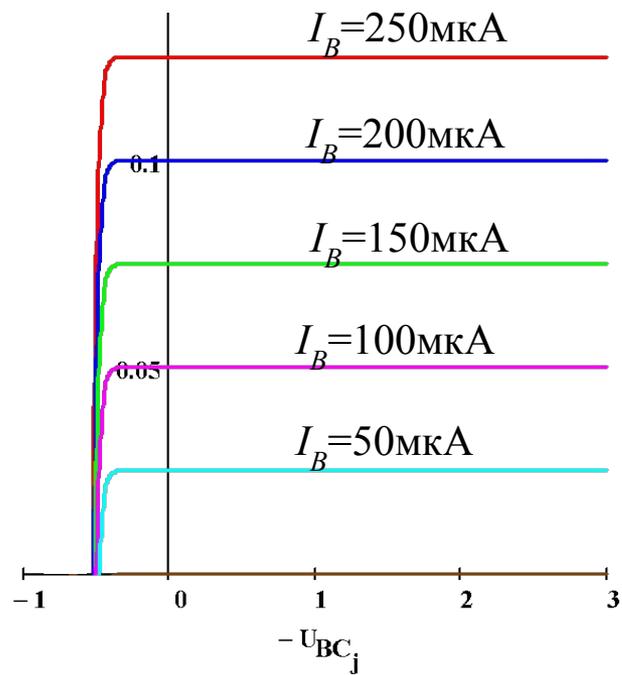
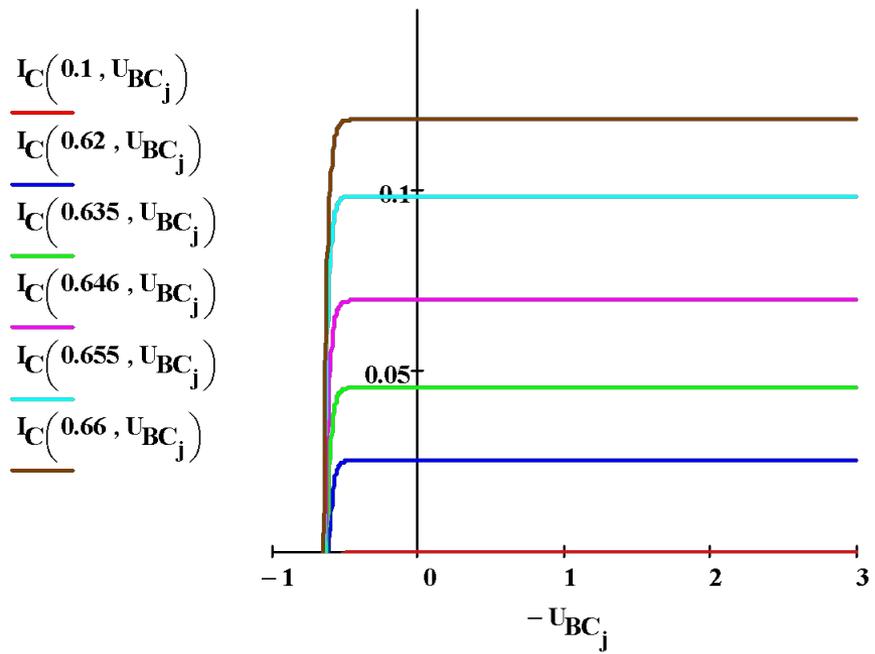


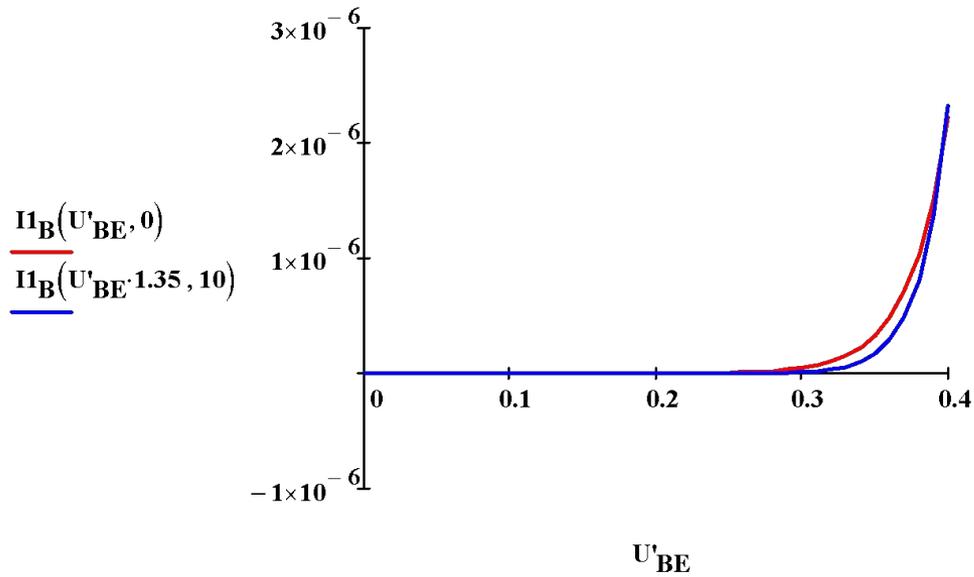
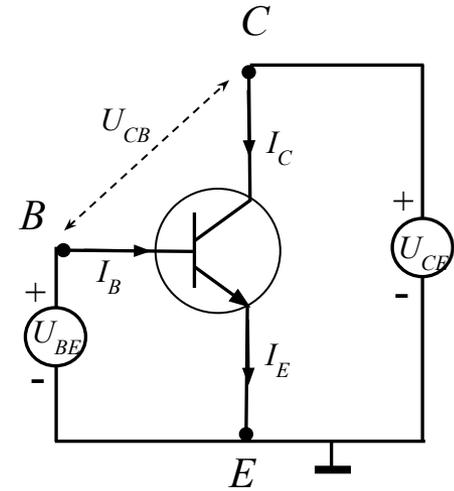
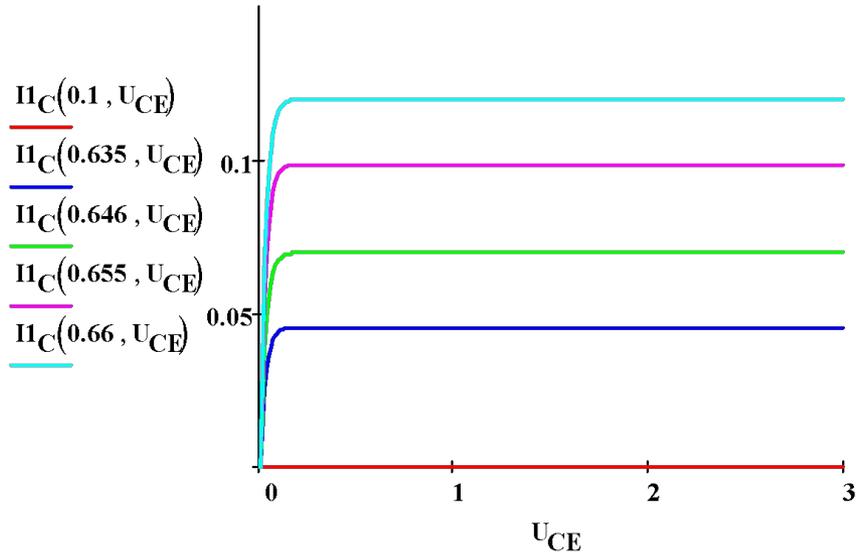
ОБ. Переход от аргументов U_{BE} и U_{BC} к аргументам I_B и U_{BC}

$$I_B = (1 - A_N) I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] + (1 - A_I) I_{S,I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

$$U_{BE}(I_B, U_{BC}) = U_T \cdot \ln \left[1 - \frac{I_B + I_{S,I} \cdot (A_I - 1) \cdot \left(\exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) - 1 \right)}{I_{S,N} \cdot (A_N - 1)} \right]$$

$$I_C(I_B, U_{BC}) = \frac{A_N}{1 - A_N} \cdot I_B + I_{S,I} \cdot \frac{1 - A_I \cdot A_N}{1 - A_N} - \frac{1 - A_I \cdot A_N}{1 - A_N} \cdot I_{S,I} \cdot \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right)$$





$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} \Rightarrow$$

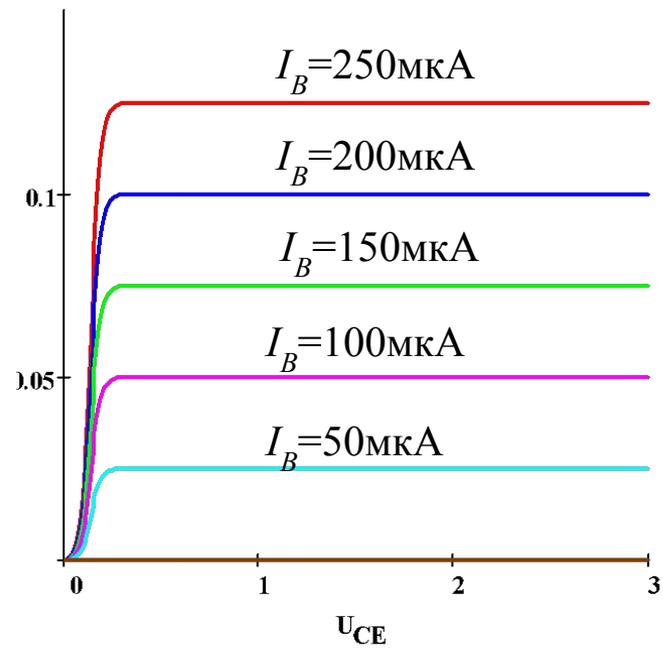
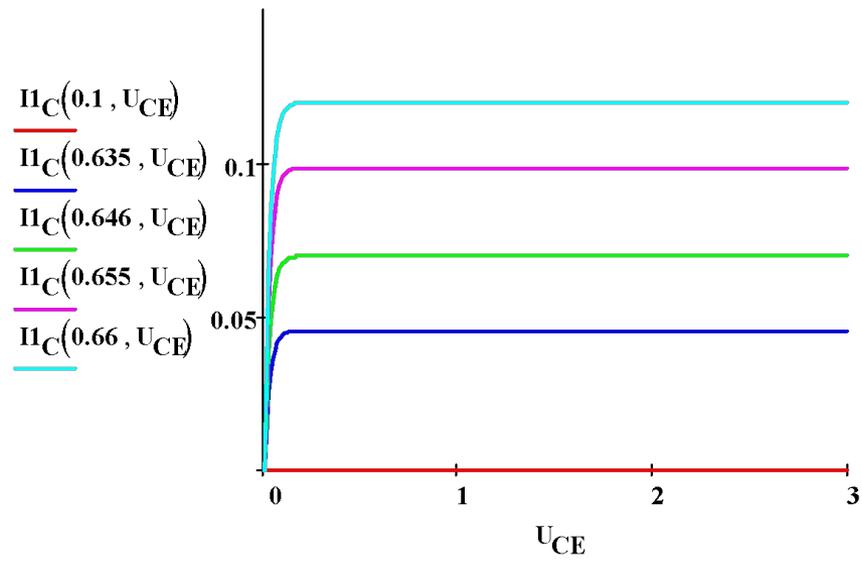
$$U_{BC} = -U_{CE} + U_{BE}$$

ОЕ. Переход от аргументов U_{BE} и U_{CE} к аргументам I_B и U_{CE}

$$I_B = (1 - A_N) I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] + (1 - A_I) I_{S,I} \left[\exp((-U_{CE} + U_{BE})/U_T) - 1 \right]$$

$$U_{BE}(I_B, U_{CE}) = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_B + I_{S,I} + I_{S,N} - A_I \cdot I_{S,I} - A_N \cdot I_{S,N}}{I_{S,N} - A_N \cdot I_{S,N} + I_{S,I} \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right) - A_I \cdot I_{S,I} \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)} \right)$$

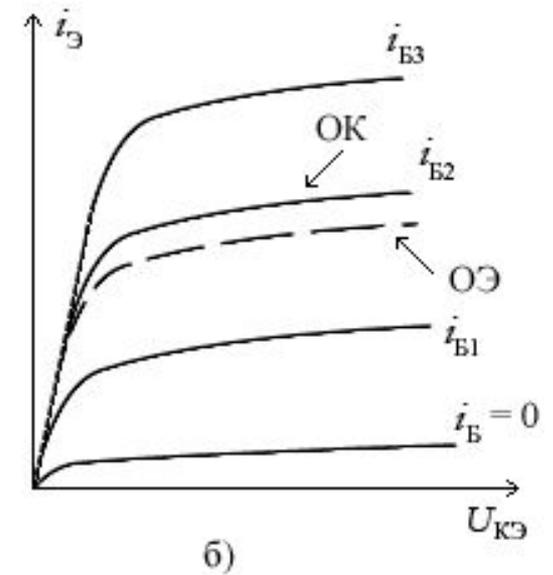
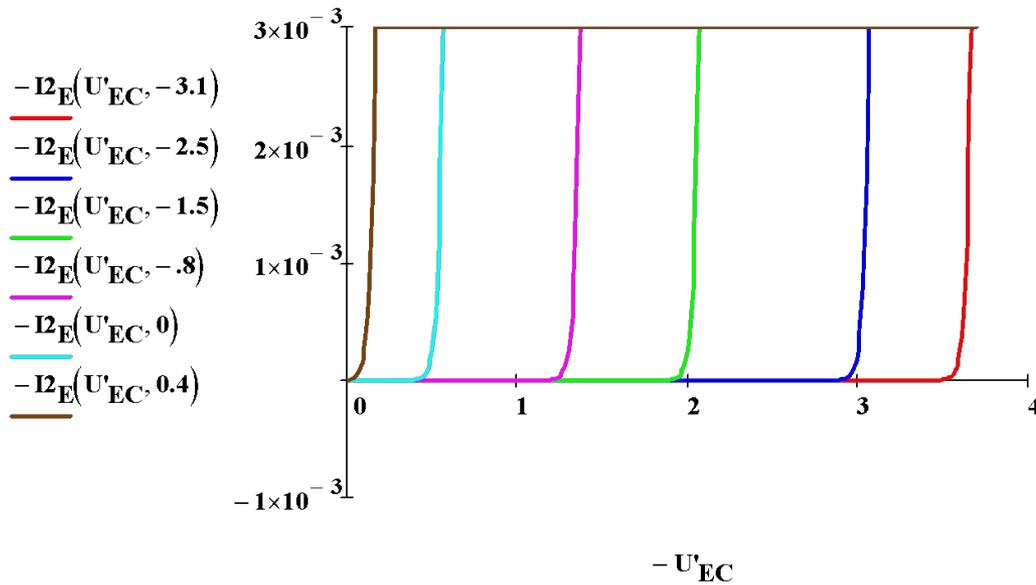
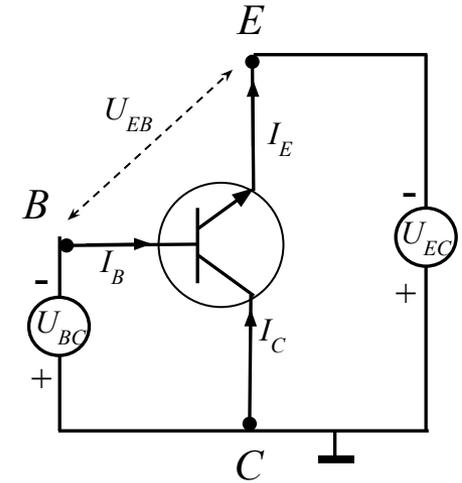
$$I_C(I_B, U_{CE}) = \frac{I_{S,N} \cdot [I_{S,I} \cdot (1 - A_I \cdot A_N) + A_N \cdot I_B] - I_{S,I} \cdot [I_{S,N} \cdot (1 - A_I \cdot A_N) + I_B] \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)}{I_{S,N} \cdot (1 - A_N) + I_{S,I} \cdot (1 - A_I) \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)}$$



OC

$$U_{BE} = U_{BC} - U_{EC}$$

$$I_E = -I_{S,N} \left[\exp\left(\frac{U_{BC} - U_{EC}}{U_T}\right) - 1 \right] + A_I I_{S,I} \left[\exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

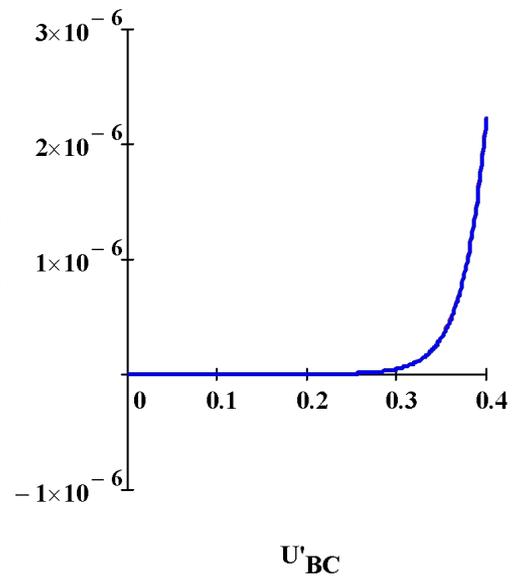
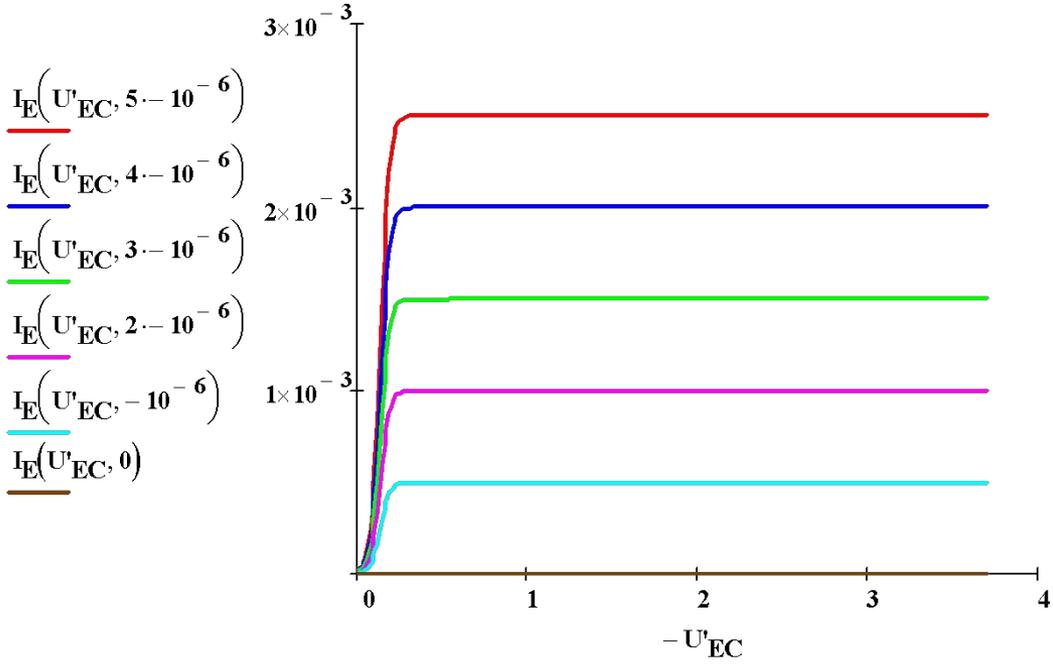


ОК. Переход от аргументов U_{BC} и U_{EC} к аргументам I_B и U_{EC}

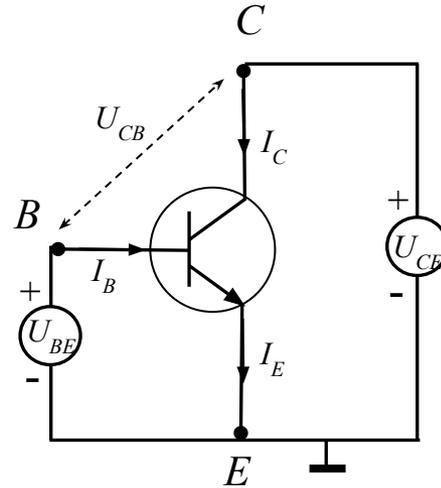
$$I_B = (1 - A_N) I_{S,N} \left[\exp\left(\frac{U_{BC} - U_{EC}}{U_T}\right) - 1 \right] + (1 - A_I) I_{S,I} \left[\exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$U_{BC}(U_{EC}, I_B) = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_B + I_{sI} + I_{sN} - A_I \cdot I_{sI} - A_N \cdot I_{sN}}{I_{sI} - A_I \cdot I_{sI} + I_{sN} \cdot \exp\left(-\frac{U_{EC}}{U_T}\right) - A_N \cdot I_{sN} \cdot \exp\left(-\frac{U_{EC}}{U_T}\right)} \right)$$

$$I_E(U_{EC}, I_B) = \frac{I_{sI} \cdot [I_{sN} \cdot (1 - A_I \cdot A_N) + A_I \cdot I_B] - I_{sN} \cdot [I_{sI} \cdot (1 - A_I \cdot A_N) + I_B] \cdot \exp\left(-\frac{U_{EC}}{U_T}\right)}{I_{sI} \cdot (1 - A_I) + I_{sN} \cdot (1 - A_N) \cdot \exp\left(-\frac{U_{EC}}{U_T}\right)}$$



Статический режим. Рабочая точка транзистора.



Постоянные величины $I_E, I_C, I_B, U_{BE}, U_{BC}, U_{CE}$ – рабочая точка

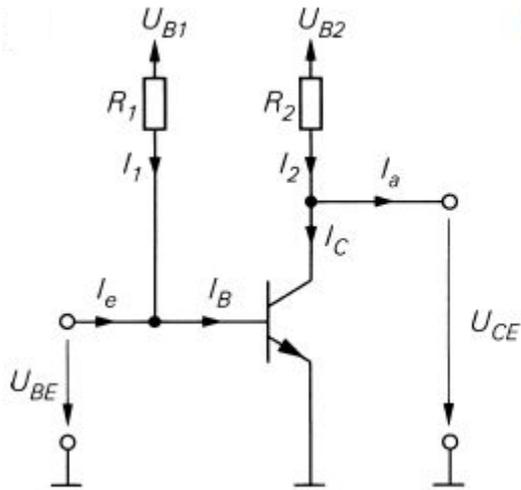
Однако независимыми являются только четыре.

$$I_E = I_C + I_B \quad U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

Какие зависимы, а какие независимы зависит от схемы включения. Обычно рабочую точку задают двумя входными величинами и двумя выходными. Так в схеме с ОЭ рабочая точка задается.

$$I_C, I_B, U_{BE}, U_{CE}$$

Пример определение РТ в схеме с ОЭ



При нулевых сигнальных токах $I_e = I_a = 0$ получим

$$U_{B1} = I_1 R_1 + U_{BE}, \quad U_{B2} = I_2 R_2 + U_{CE} \Rightarrow$$

$$I_1 = \frac{U_{B1} - U_{BE}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{B2} - U_{CE}}{R_2},$$

$I_1 = I_B(U_{BE}, U_{CE})$ $I_2 = I_c(U_{BE}, U_{CE})$. Таким образом получим два уравнения с двумя неизвестными

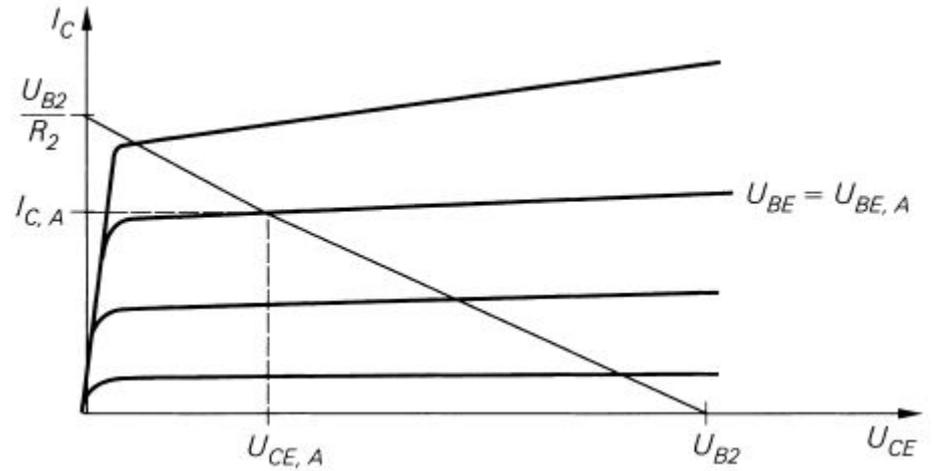
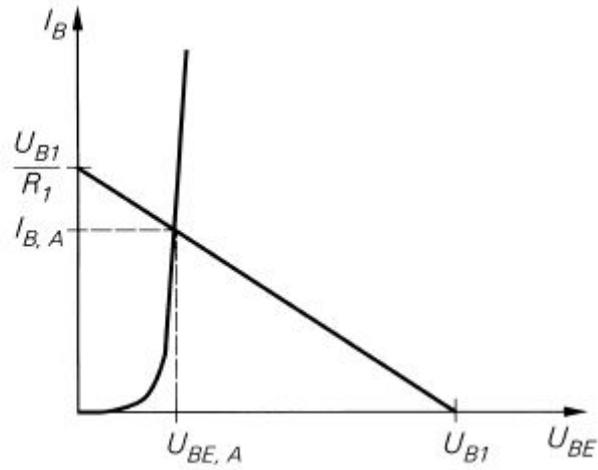
$$I_B(U_{BE}, U_{CE}) = \frac{U_{B1} - U_{BE}}{R_1}, \quad I_c(U_{BE}, U_{CE}) = \frac{U_{B2} - U_{CE}}{R_2}$$

Для модели Эберса-Молла

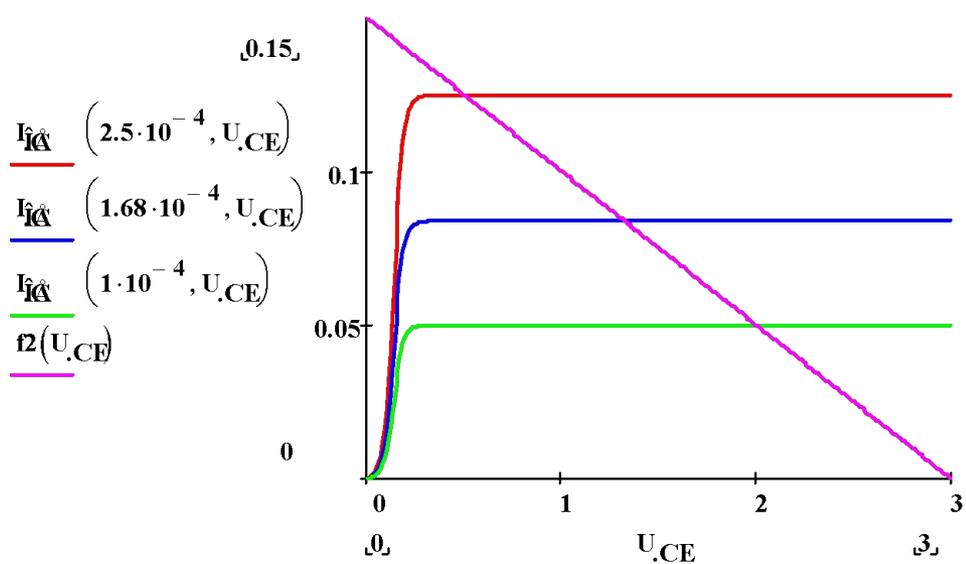
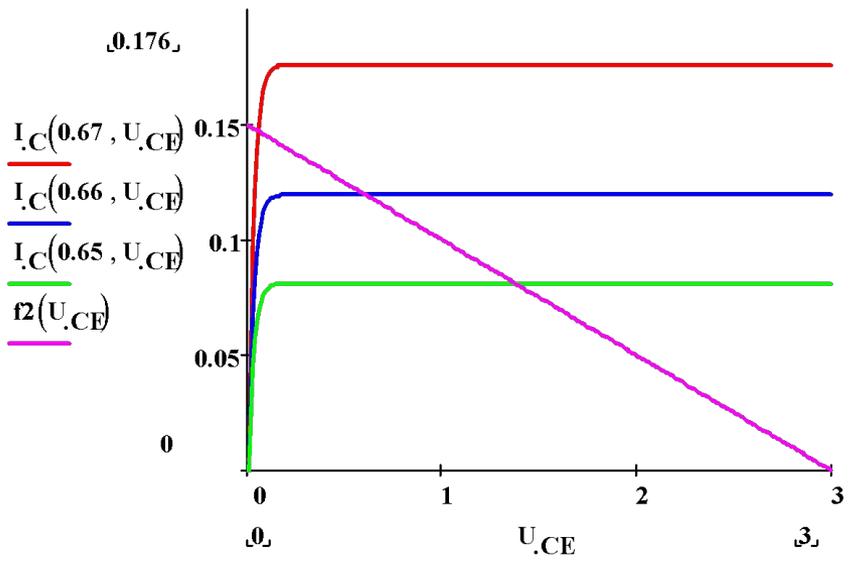
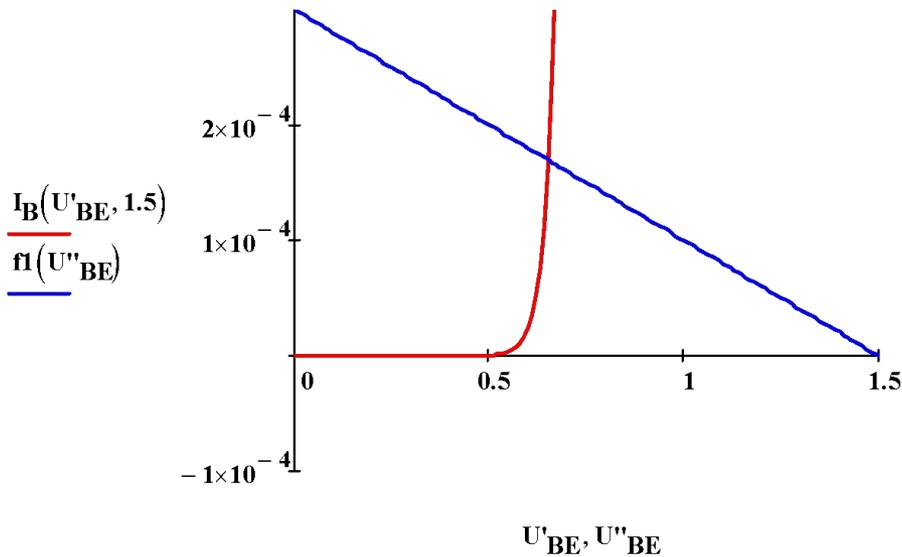
$$(1 - A_N) I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] - (1 - A_I) I_{S,I} \left[\exp((-U_{CE} + U_{BE})/U_T) - 1 \right] = \frac{U_{B1} - U_{BE}}{R_1},$$

$$A_N I_{S,N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] - I_{S,I} \left[\exp((-U_{CE} + U_{BE})/U_T) - 1 \right] = \frac{U_{B2} - U_{CE}}{R_2}$$

Графическое определение РТ в схеме с ОЭ



Графическое определение РТ в схеме с ОЭ по модели Эберса-Молла



$$U_{x1} := 0.65$$

$$U_{x2} := 1.39$$

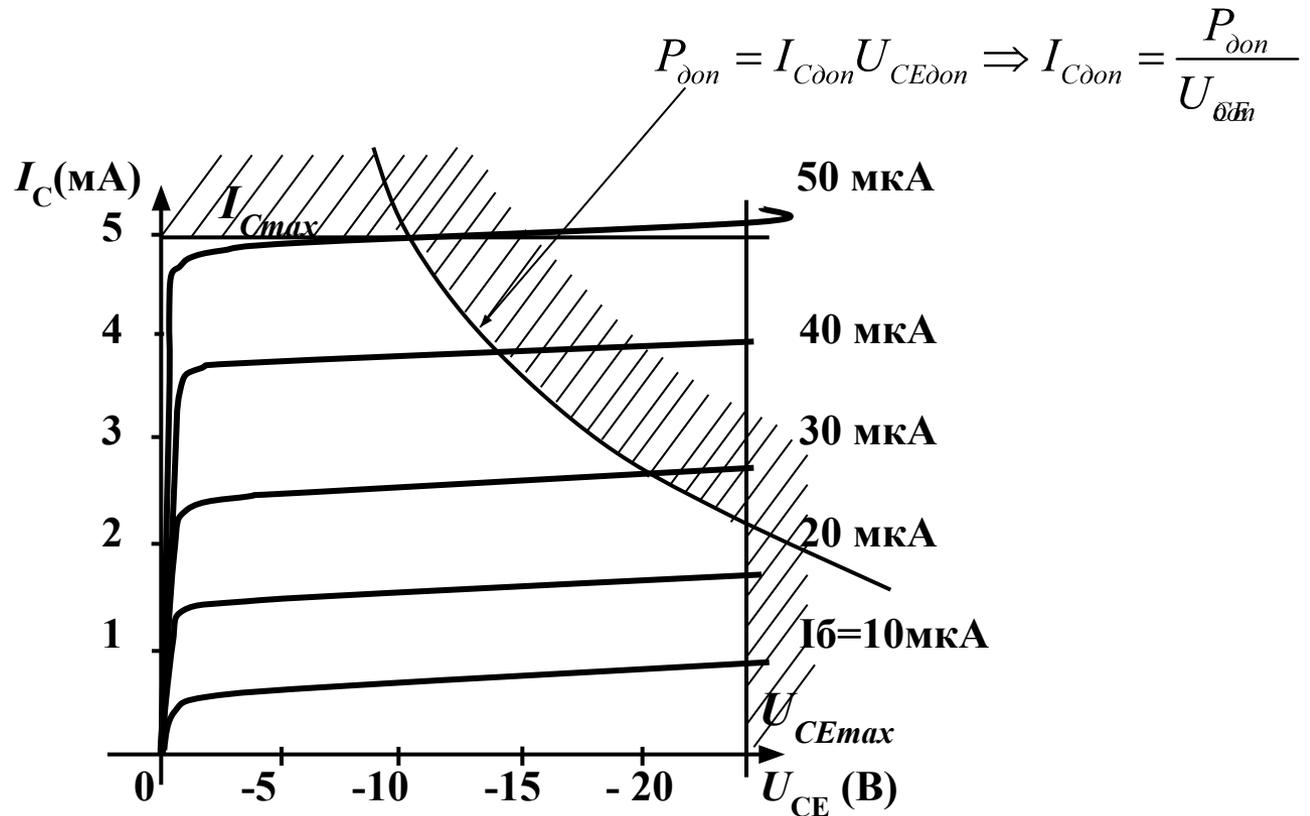
Given

$$A_N \cdot I_{sN} \cdot \left(\exp\left(\frac{U_{x1}}{\phi_T}\right) - 1 \right) - I_{sI} \cdot \left(\exp\left(\frac{-U_{x2} + U_{x1}}{\phi_T}\right) - 1 \right) = \frac{U_{B2} - U_{x2}}{R2}$$

$$(1 - A_N) \cdot I_{sN} \cdot \left(\exp\left(\frac{U_{x1}}{\phi_T}\right) - 1 \right) + (1 - A_I) \cdot I_{sI} \cdot \left(\exp\left(\frac{-U_{x2} + U_{x1}}{\phi_T}\right) - 1 \right) = \frac{U_{B1} - U_{x1}}{R1}$$

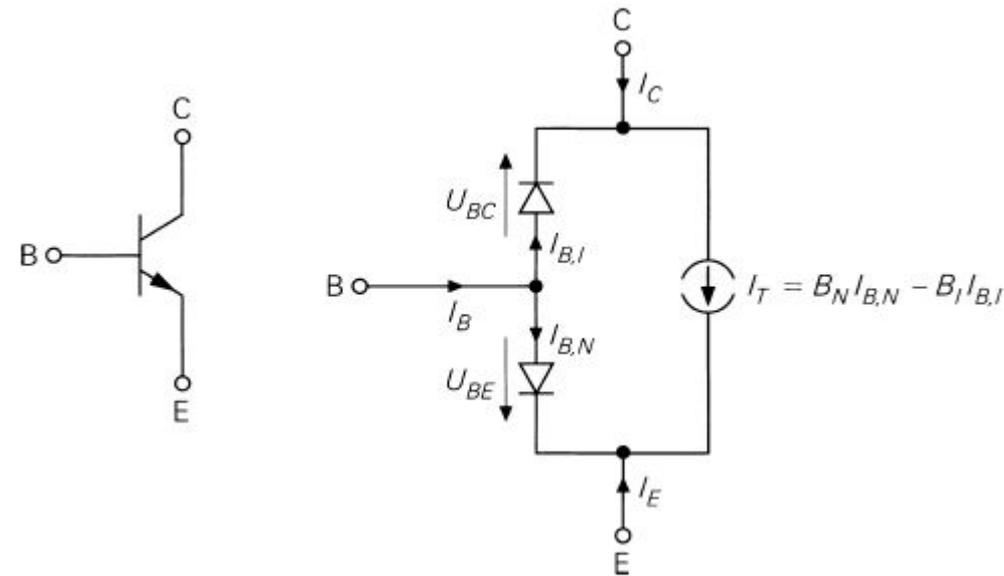
$$\text{Find}(U_{x1}, U_{x2}) = \begin{pmatrix} 0.651 \\ 1.306 \end{pmatrix}$$

Рабочая область транзисторов



Область выходных характеристик транзистора с ОЭ, в пределах которой можно выбирать рабочую точку.

Транспортная модель



Токи в модели

$$I_{B,N} = \frac{I_S}{B_N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right],$$

$$I_{B,I} = \frac{I_S}{B_I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

$$I_T = \beta_N I_{B,N} - \beta_I I_{B,I} =$$

$$= I_S \left[\exp(U_{BE}/U_T) - \exp(U_{BC}/U_T) \right]$$

По первому закону Кирхгофа

$$I_B = \frac{I_S}{B_N} \left[\exp(U_{BE}/U_T) - 1 \right] + \frac{I_S}{B_I} \left[\exp(U_{BC}/U_T) - 1 \right]$$

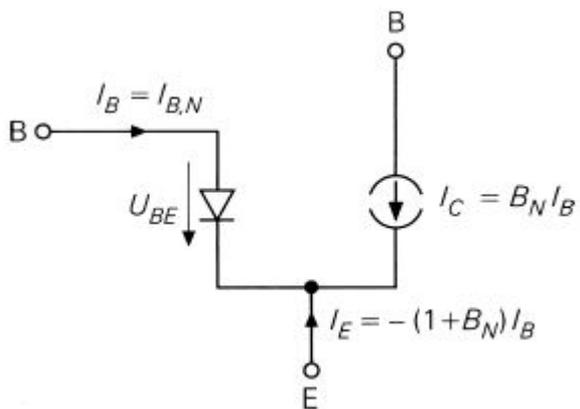
$$I_C = I_S \left[\exp(U_{BE}/U_T) - \left(1 + \frac{1}{B_I} \right) \exp(U_{BC}/U_T) + \frac{1}{B_I} \right]$$

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

Эти уравнения сводятся к уравнениям Эберса-Молла, если учесть соотношения

$$B_{N,I} = \frac{A_{N,I}}{1 - A_{N,I}}$$

Транспортная модель для нормального режима

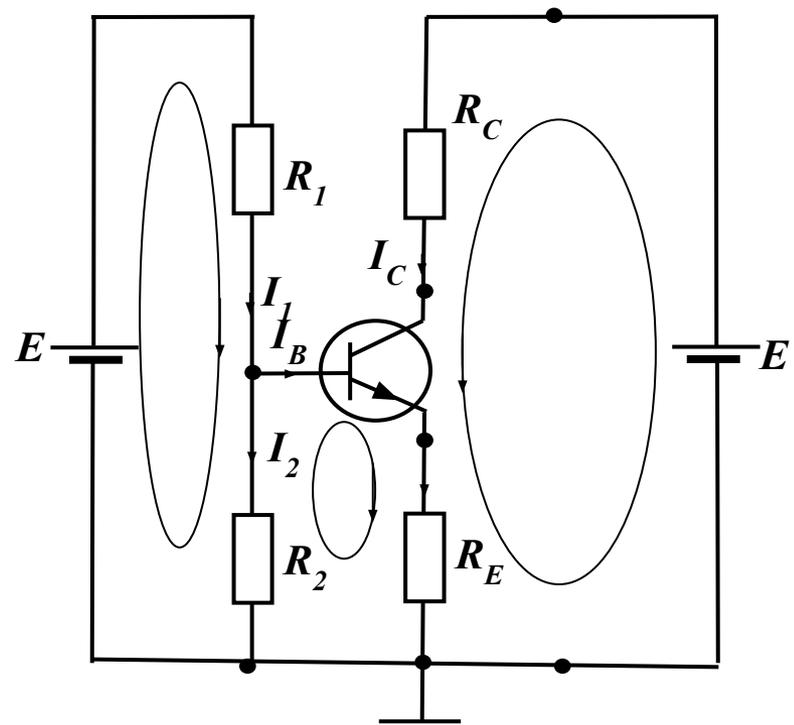
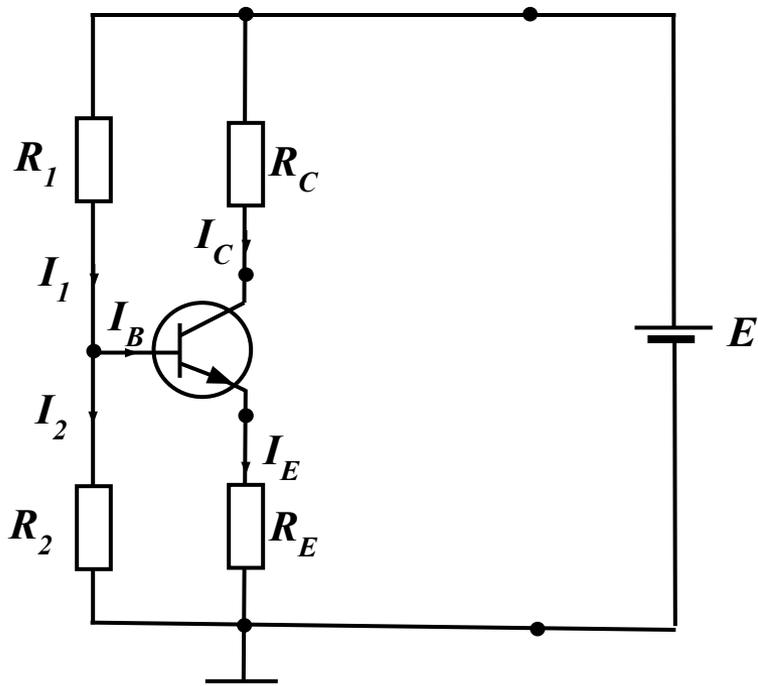


$$I_B = \frac{I_S}{B_N} \exp(U_{BE}/U_T)$$

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

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

Резистивный каскад с обратной связью по току. Анализ



Питание цепи базы и цепи СЕ

Расчет параметров рабочей точки в активном режиме по цепи питания СЕ

$$E = U_{R_C} + U_{CE} + U_{R_E}$$

$$\begin{aligned} E &= I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E = I_C R_C + U_{CE} + \alpha^{-1} I_C R_E = \\ &= I_{\Sigma} \left(R_C + \alpha^{-1} R_E \right) + U_{KCE} \approx I \left(R_C + R_E \right) + U \end{aligned}$$

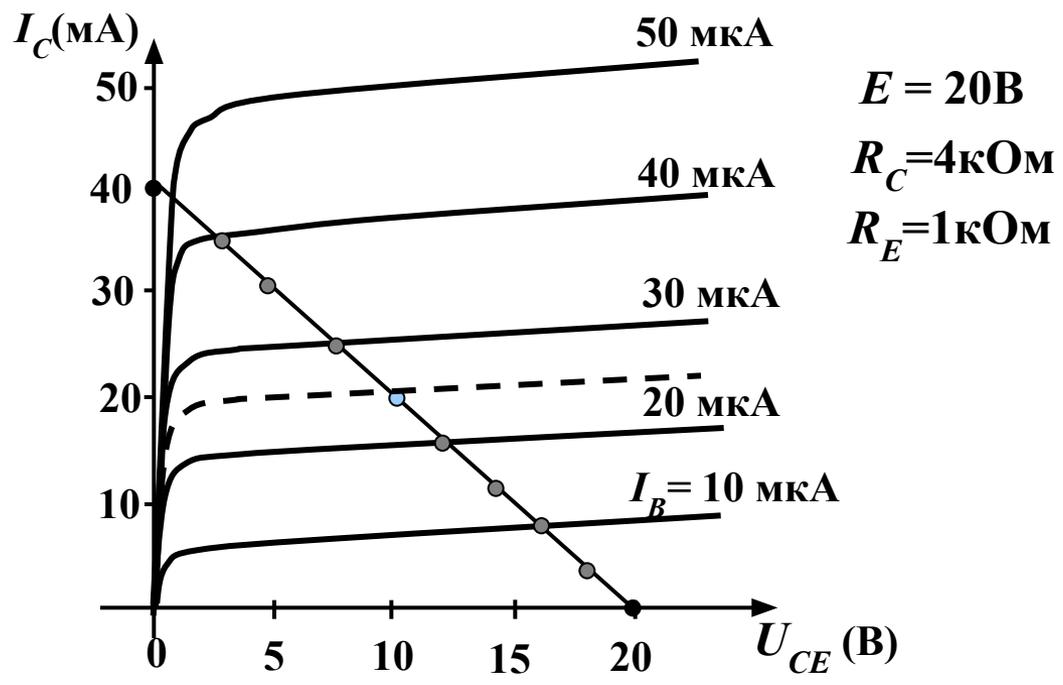
$$\frac{E - U_{CE}}{R_C + R_E} = I_C \left(U_{CE}, U_{BE} \right) = I_C \left(U_{CE}, I_B \right)$$

$$I = I_C \left(U_{CE}, U_{BE} \right) \text{ ВАХ транзистора в схеме с ОЭ}$$

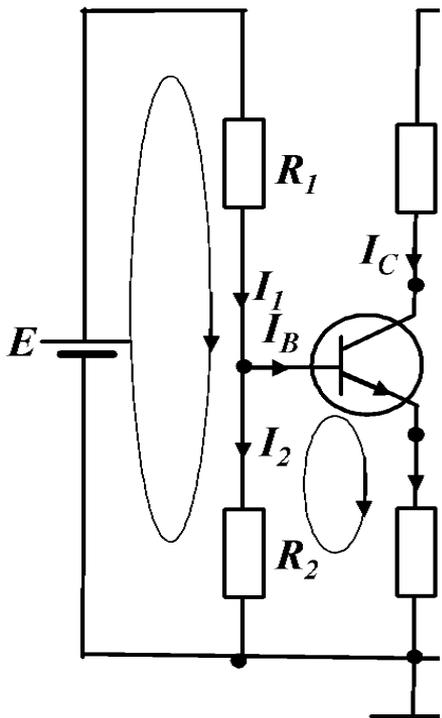
$$I_{нвых} (U) = \frac{E - U}{R_{\Sigma} + R} \text{ ВАХ нагрузки}$$

Неоднозначность в выборе R_E устраняется при помощи соотношения и уточняется для конкретного транзистора

$$R_C = (1 \dots 10) R_E$$



Эквивалентная схема питания базовой цепи

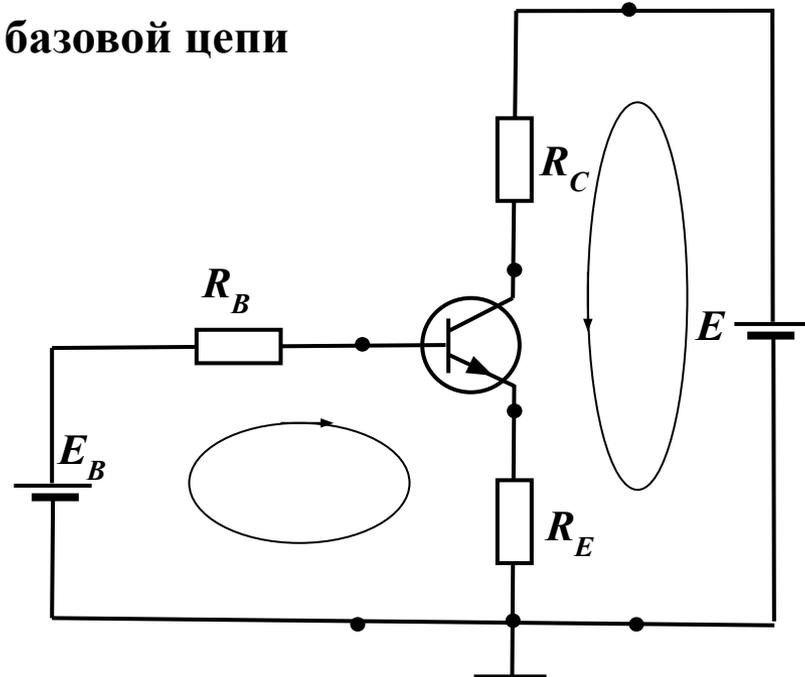


$$I_1 = I_2 + I_B$$

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E$$

$$-I_2 R_2 + U_{BE} + U_{RE} = 0$$

$$I_2 (R_1 + R_2) + I_B R_1 = E$$



$$I_2 = \frac{U_{BE} + U_{RE}}{R_2}$$

$$I_B R_1 + \frac{U_{BE} + U_{RE}}{R_2} (R_1 + R_2) = E$$

$$I_B \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + U_{BE} + U_{RE} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_B R_B + U_{BE} + U_{RE} = E_B$$

$$E_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E_B = U_{R_B} + U_{BE} + U_{R_E} = I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = I_B R_B + U_{BE} + (1 + \beta) I_B R_E =$$

$$= U_{BE} + [R_B + (1 + \beta) R_E] I_B$$

$$\frac{E_B - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = I_B(U_{CE}, U_{BE})$$

$I_B(U_{CE}, U_{BE})$ входная ВАХ в схеме с ОЭ

Аргументы

, U_{CE} U_{BE}

$$I_{вых}(U) = \frac{E_B - U}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

нагрузочная прямая базовой цепи

$$E_B - I_B (R_B + (1 + \beta) R_E) = U_{BE}(I_B, U_{CE})$$

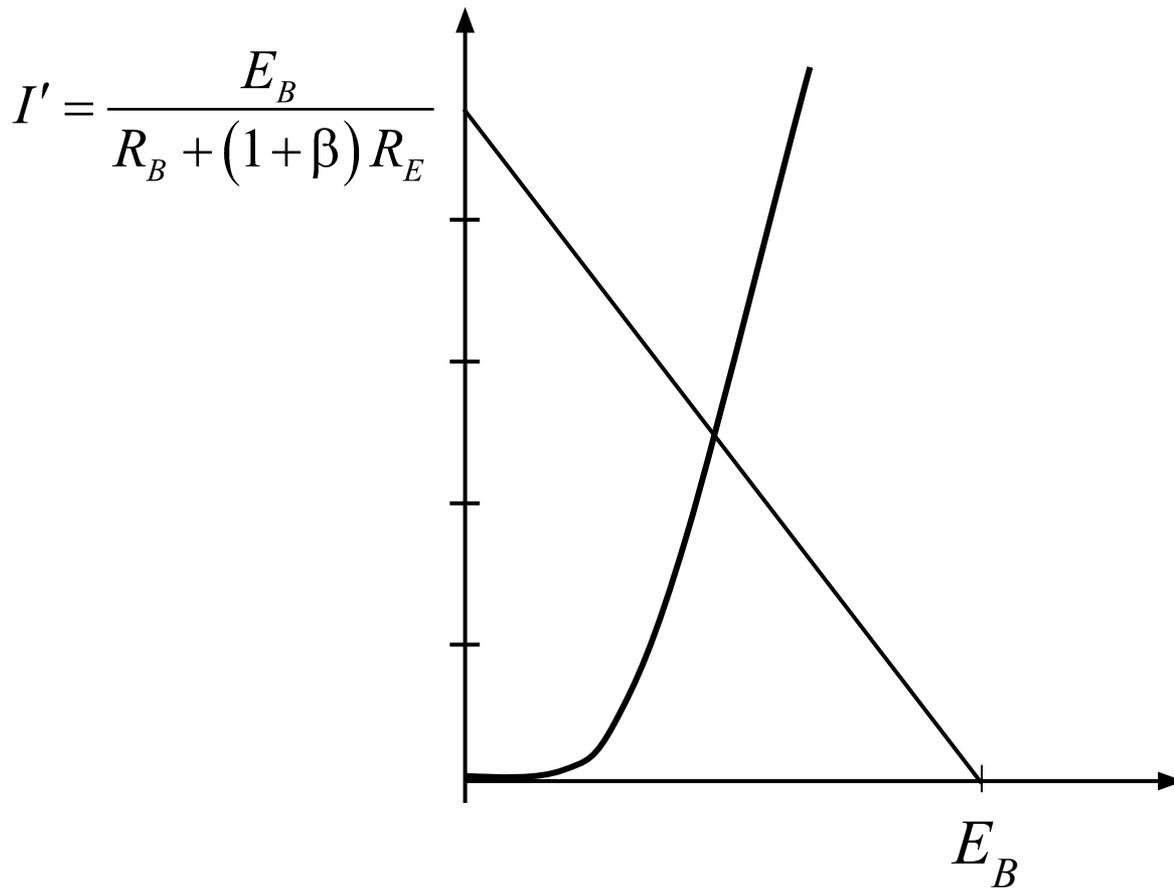
$U_{BE}(I_B, U_{CE})$ входная ВАХ в схеме с ОЭ

Аргументы

, I_B U

$$U_{вых} = E_B - I_B (R_B + (1 + \beta) R_E)$$

нагрузочная прямая базовой цепи



$$R_B = \frac{E_B}{I'} - (1 + \beta) R_E$$

Иногда можно синтезировать базовую цепь по нагрузочной прямой

$$E_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{E_B}{E} \quad R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_B = R_1 \frac{E}{E_B} \Rightarrow R_1 = R_B \frac{E}{E_B}$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_B R_1 + R_B R_2 = R_1 R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_B R_1}{R_1 - R_B} \quad I_B \ll I_1 \quad \text{и} \quad I_B \ll I_2$$

Точное положение рабочей точки в активном режиме

$$I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E = E_B \qquad I_B = \frac{I_S}{B_N} \exp(U_{BE}/U_T) \Rightarrow U_{BE} = U_T \ln \left(\frac{B_N I_B}{I_S} \right)$$

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

$$I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E = E$$

$$I_E = I_S \frac{1 + B_N}{B_N} \exp(U_{BE}/U_T) \approx -I = -B I$$

$$I_B R_B + U_T \ln \left(\frac{B_N I_B}{I_S} \right) + B_N I_B R_E = E_B \Rightarrow I_B (R_B + B_N R_E) + U_T \ln \left(\frac{B_N I_B}{I_S} \right) = E_B$$

$$B_N I_B R_C + U_{CE} + B_N I_B R_E = E \Rightarrow B_N I_B R_C + U_{CE} + B_N I_B R_E = E$$

$$\Rightarrow U_{CE} = E - B_N I_B (R_E + R_C)$$

$$I_{B0} (R_B + B_N R_E) + U_T \ln \left(\frac{B_N I_{B0}}{I_S} \right) = E_B$$

$$U_{CE0} = E - B_N I_{B0} (R_E + R_C), \quad U_{BE0} = U_T \ln \left(\frac{B_N I_{B0}}{I_S} \right), \quad I_{C0} = B I_{B0}$$

$$I_{Bx} := 1.75 \cdot 10^{-5}$$

$$I_{BPT} := \text{root} \left[E_B - U_T \cdot \ln \left[\frac{I_{Bx}}{(1 - A_N) \cdot I_{sN}} \right] - I_{Bx} \cdot (R_B + B_N \cdot R_E), I_{Bx} \right]$$

$$U_{BEPT} := U_T \cdot \ln \left(\frac{B_N \cdot I_{BPT}}{I_s} \right)$$

$$U_{CEPT} := E - B_N \cdot I_{BPT} \cdot R_\Sigma$$

$$I_{CPT} := B_N \cdot I_{BPT}$$

$$U_{BEPT} = 0.6510782$$

$$I_{BPT} = 1.7233083 \times 10^{-5}$$

$$U_{CEPT} = 2.4202075$$

$$I_{CPT} = 8.5993083 \times 10^{-3}$$

$$I_s = 1 \cdot 10^{-12}$$

$$A_N = 0.998$$

$$A_I = 0.7$$

$$I_{sN} = \frac{I_s}{A_N}$$

$$I_{sI} = \frac{I_s}{A_I}$$

$$B_N = \frac{A_N}{1 - A_N}$$

$$B_I = \frac{A_I}{1 - A_I}$$

$$n = 1.1$$

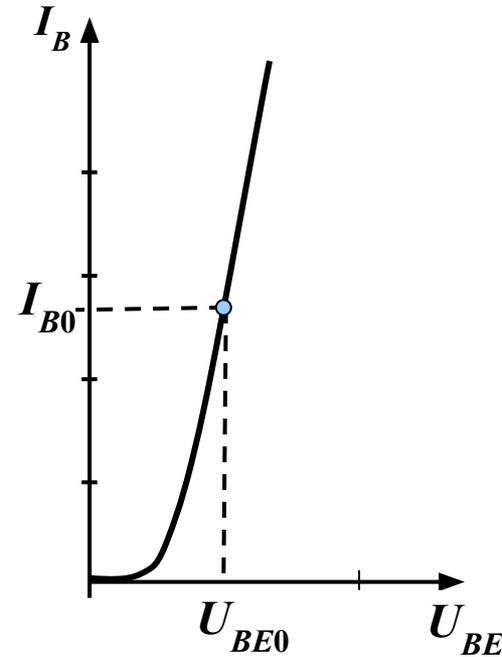
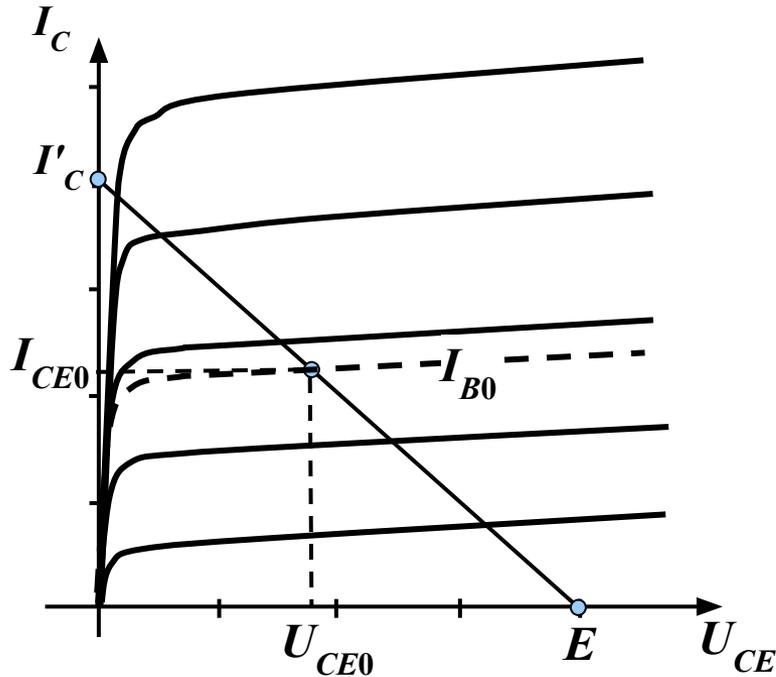
$$E_B = 1.1$$

$$R_B = \frac{E_B}{100 \cdot 10^{-5}}$$

$$R_E = 50$$

Синтез резистивного каскада с ОЕ по току.

1. Задаем положение РТ



2. Чертим нагрузочную прямую на ВАХ $I_C(U_{CE})$ и определяем E и сумму сопротивлений.

$$R_C + R_E = (E - U_{CE0}) / I_{C0}$$

3. Задаем соотношение $R_C = (1 \dots 10) R_E$, например, $R_C = 5 R_E$ и находим отдельно

$$R_E = E / 6 I'_C \quad R_C = 5 E / 6 I'_C$$

4. Задаем ток $I_1 \gg I_{B0}$, например, $I_1 = 50I_{B0}$. Тогда $I_2 = I_1 + I_{B0} = 50I_{B0} + I_{B0} = 51I_{B0} \approx I_1$.
Рассчитываем R_2

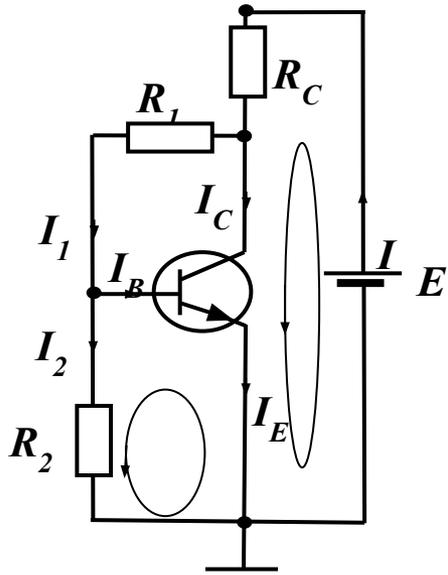
$$U_{BE0} = I_2 R_2 \Rightarrow R_2 = U_{BE0} / I_2$$

5. Рассчитываем R_1

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2 \Rightarrow R_1 = (E - I_2 R_2) / I_1 = (E - U_{BE0}) / I_1$$

6. Все рассчитанные сопротивления округляются до ближайшего номинала и проверяется уход рабочей точки от изначально выбранного положения. Он должен быть незначительным. В противном случае производится перерасчет.

Резистивный каскад с обратной связью по напряжению. Анализ.



Модель

$$I = I_C + I_1, I_1 = I_B + I_2$$

$$I_2 R_2 - U_{BE} = 0, IR_C + U_{CE} = E, I_1 R_1 + U_{BE} - U_{CE} = 0$$

$$U_{BE} = U_{NT} \ln \left(\frac{B_N I_B}{E I_S} \right), I = \beta I_B, I \approx -I = -\beta I$$

Редукция к решаемым уравнениям

$$I_1 = (U_{CE} - U_{BE}) / R_1, (I_C + I_1) R_C + U_{CE} = E, (I_1 - I_B) R_2 - U_{BE} = 0$$

$$\begin{cases} \frac{R_2}{R_1} U_{CE} - \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) U_{BE} (I_B) - R_2 I_B = 0 \\ \left(\frac{R_C}{R_1} + 1 \right) U_{CE} - \frac{R_C}{R_1} U_{BE} (I_B) + B_N R_C I_B = E \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{CE} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{BE} (I_B) + R_1 I_B \\ (R_1 + B_N R_C) I_B + \frac{R_1 + R_2 + R_C}{R_2} U_{BE} (I_B) = E \end{cases}$$

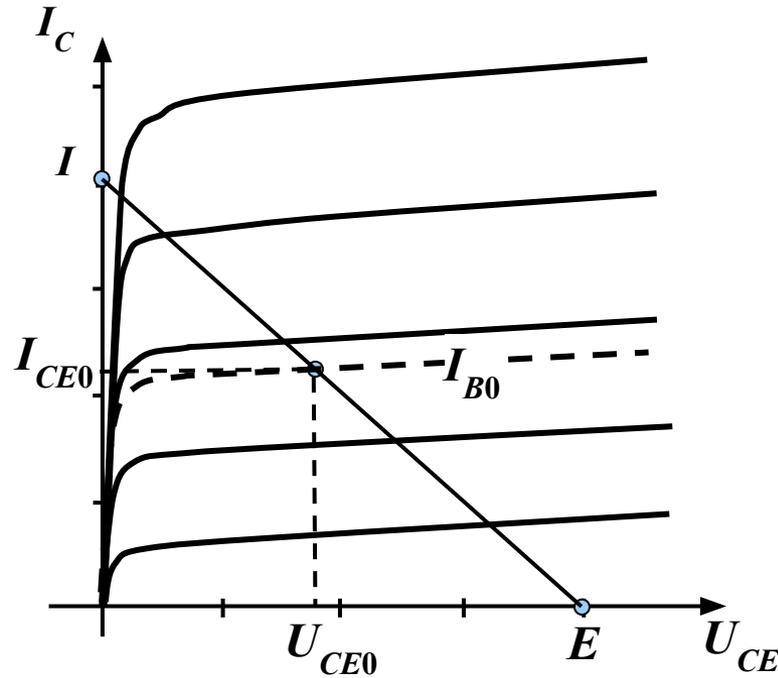
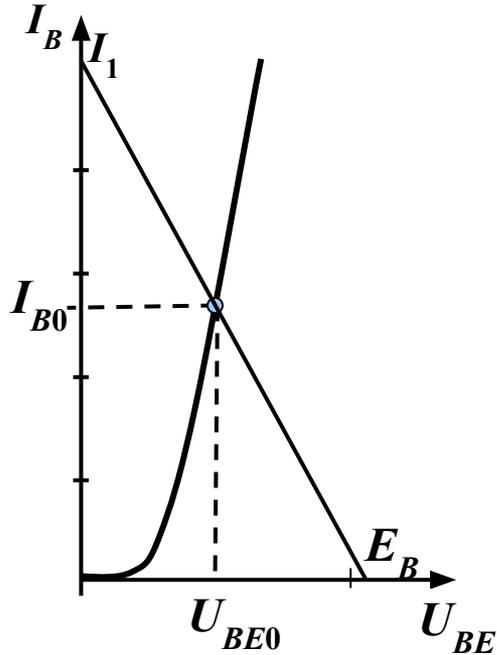
Основное уравнение для численного решения

$$(R_1 + B_N R_C) I_B + \frac{R_1 + R_2 + R_C}{R_2} U_{BE} = E \Leftrightarrow (R_1 + B_N R_C) I_B + \frac{R_1 + R_2 + R_C}{R_2} U_T \ln \left(\frac{B_N I_B}{I_S} \right) = E$$

$$B_N \cancel{I_B} \frac{E}{R_1 + B_N R_C} - \frac{R_1 + R_2 + R_C}{(R_1 + B_N R_C) R_2} U_{BE} \Leftrightarrow = \text{нагрузочная прямая}$$

Синтез резистивного каскада с ОЕ по напряжению.

1. Задаем положение РТ



2. Чертим нагрузочную прямую на ВАХ $I_B(U_{BE})$ и определяем R_2 и I_1 .

$$I_B = (I_1 R_2 - U_{BE}) / R_2 = (I_1 R_2 - U_{BE0}) / R_2 \Rightarrow R_2 = (E_B - U_{BE0}) / I_{B0}, \quad I_1 = E_B / R_2$$

3. Определяем R_1 . $R_1 = (U_{CE0} - U_{BE0}) / I_1$

4. Так как $I_2 R_2 = U_{BE0} \Leftrightarrow I_2 = U_{BE0} / R_2$. Тогда $I = I_{C0} + I_1$.

5. Чертим нагрузочную прямую на ВАХ $I_C(U_{CE})$ и определяем E и R_C .

$$R_C = \frac{E - U_{CE0}}{I}$$