

Твердотельная электроника

Презентации к лекционному курсу

Биполярные транзисторы

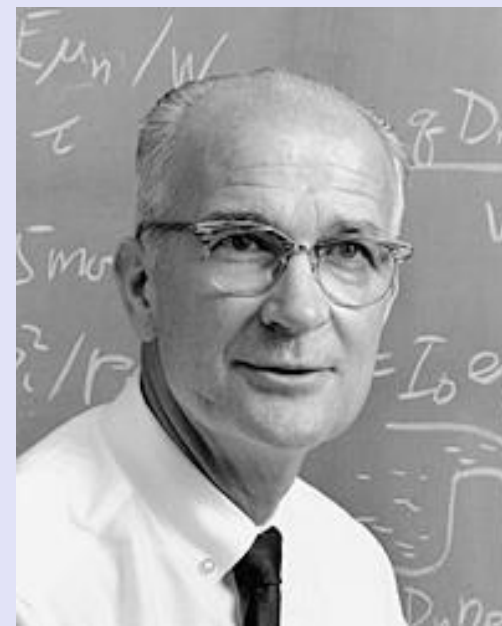
Биполярные транзисторы

В 1958 г. американские ученые Дж. Бардин и В. Браттейн создали полупроводниковый триод, или транзистор (Нобелевская премия В. Шокли, Дж. Бардина, У. Браттейна).

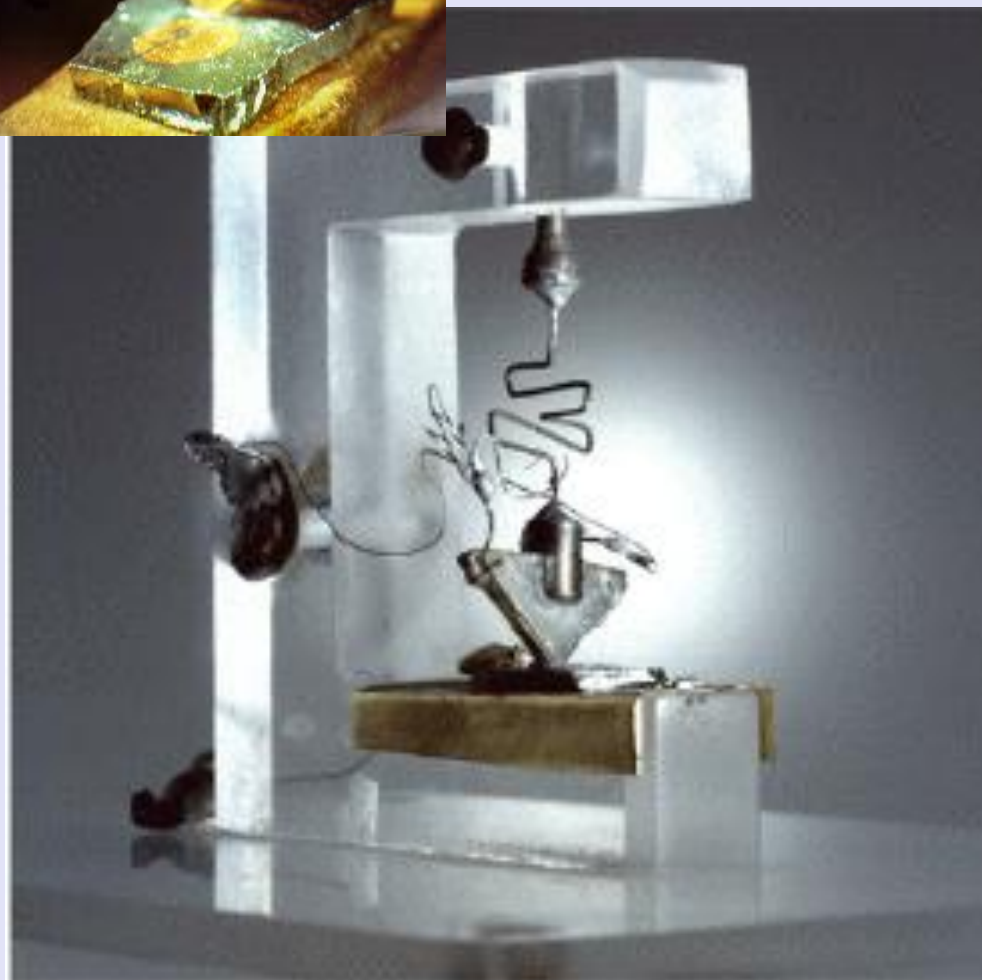
Биполярные транзисторы



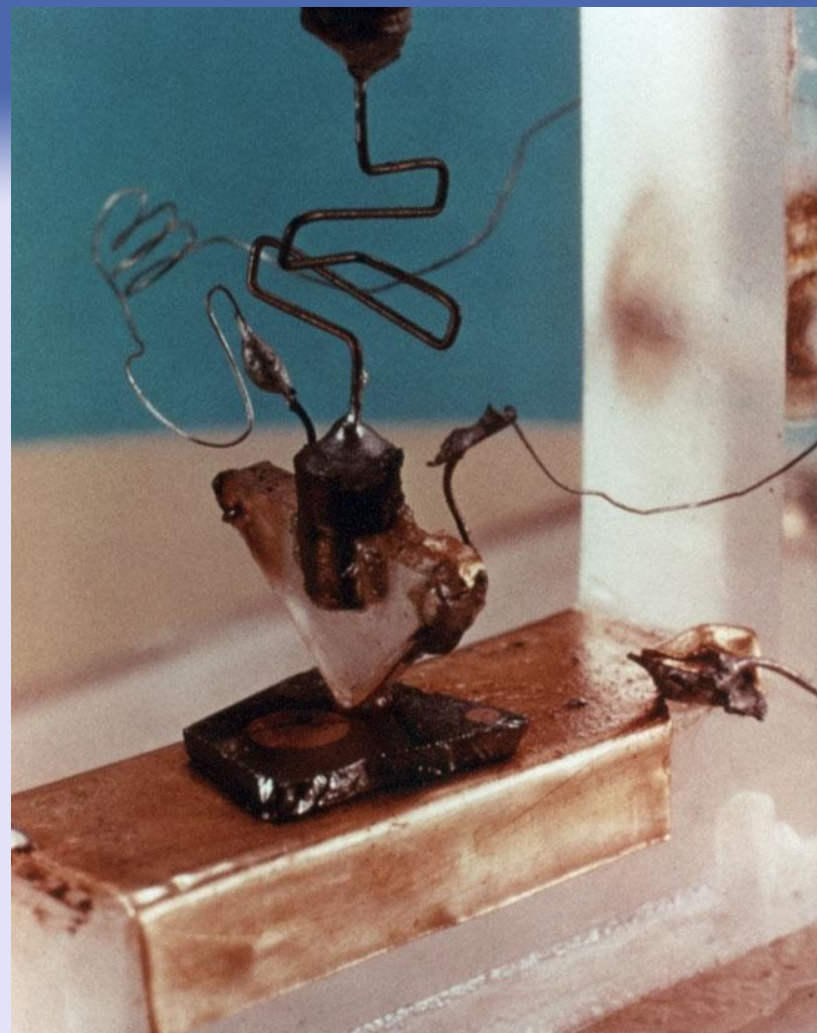
Биполярные транзисторы



В 1947 г. американские ученые Дж. Бардин (J. Bardeen) и У. Браттейн (W. Brattain) создали полупроводниковый триод, или транзистор (Нобелевская премия В. Шокли (W.Shockley), Дж. Бардина, У. Браттейна).



"The first transistor ever assembled, invented in Bell Labs in 1947." Photo and text from Porticus.org, www.porticus.org/bell/belllabs_transistor.html. (Follow that link to see more historical documents and images about Bell Labs and the transistor.)



• На фото - первый в мире полупроводниковый транзистор на прижимном контакте

Биполярные транзисторы

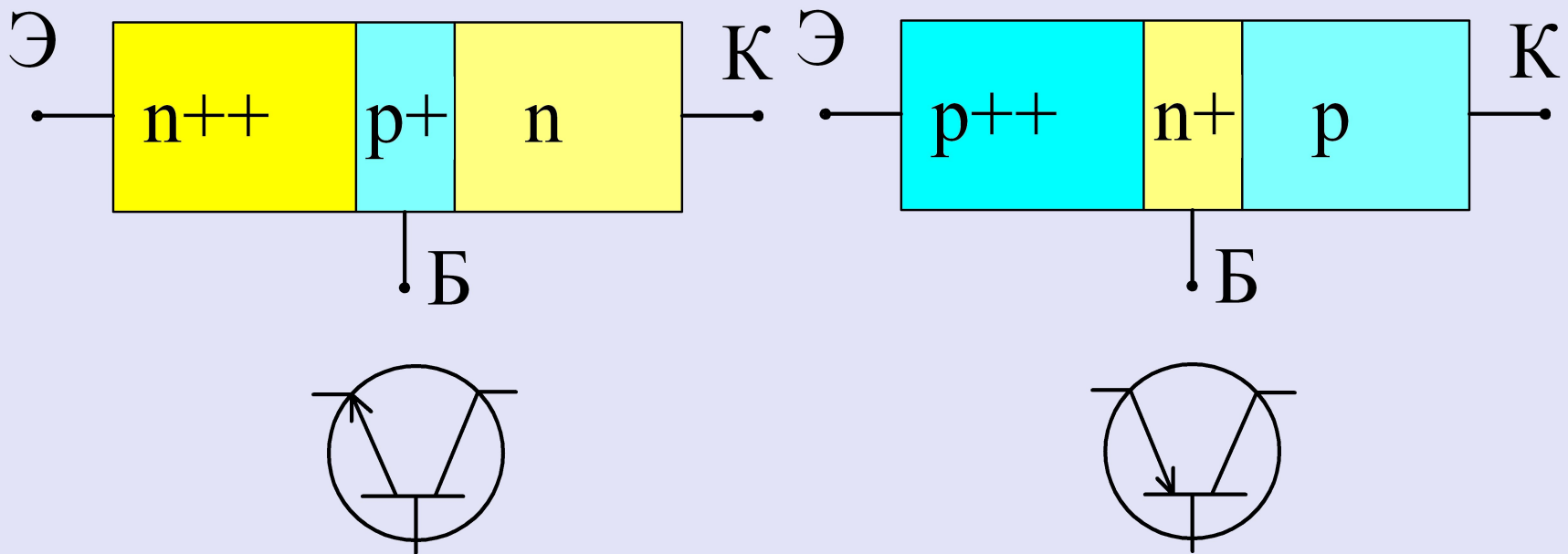
Это событие имело громадное значение для развития полупроводниковой электроники. Транзисторная структура легла в основу обширного класса усилительных приборов – *биполярных транзисторов*.

Определение "биполярный" указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают электроны и дырки, то есть основные и неосновные носители.

Транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя расположенными на близком расстоянии параллельными электронно-дырочными *pn*-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов.

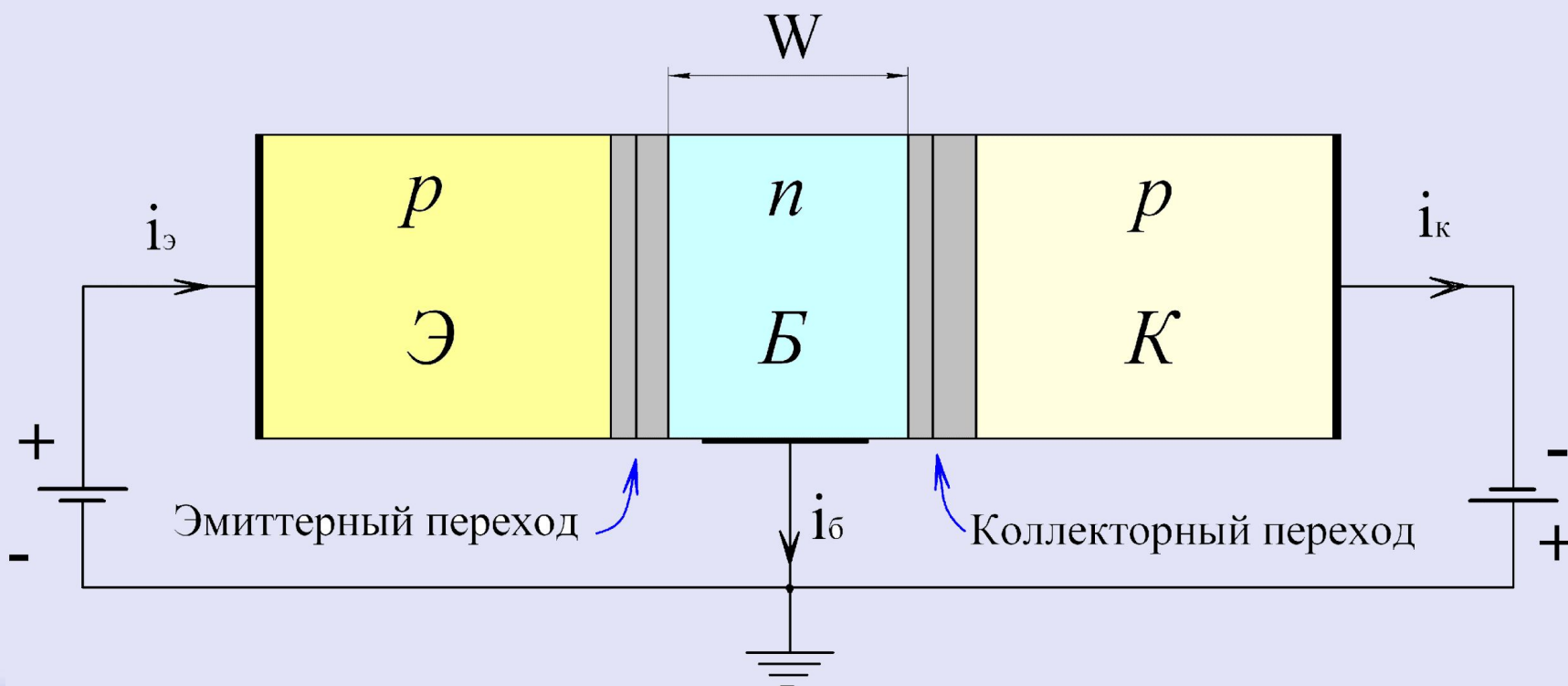
Полупроводниковый транзистор

Различают *npn*-транзисторы и *pnp*-транзисторы

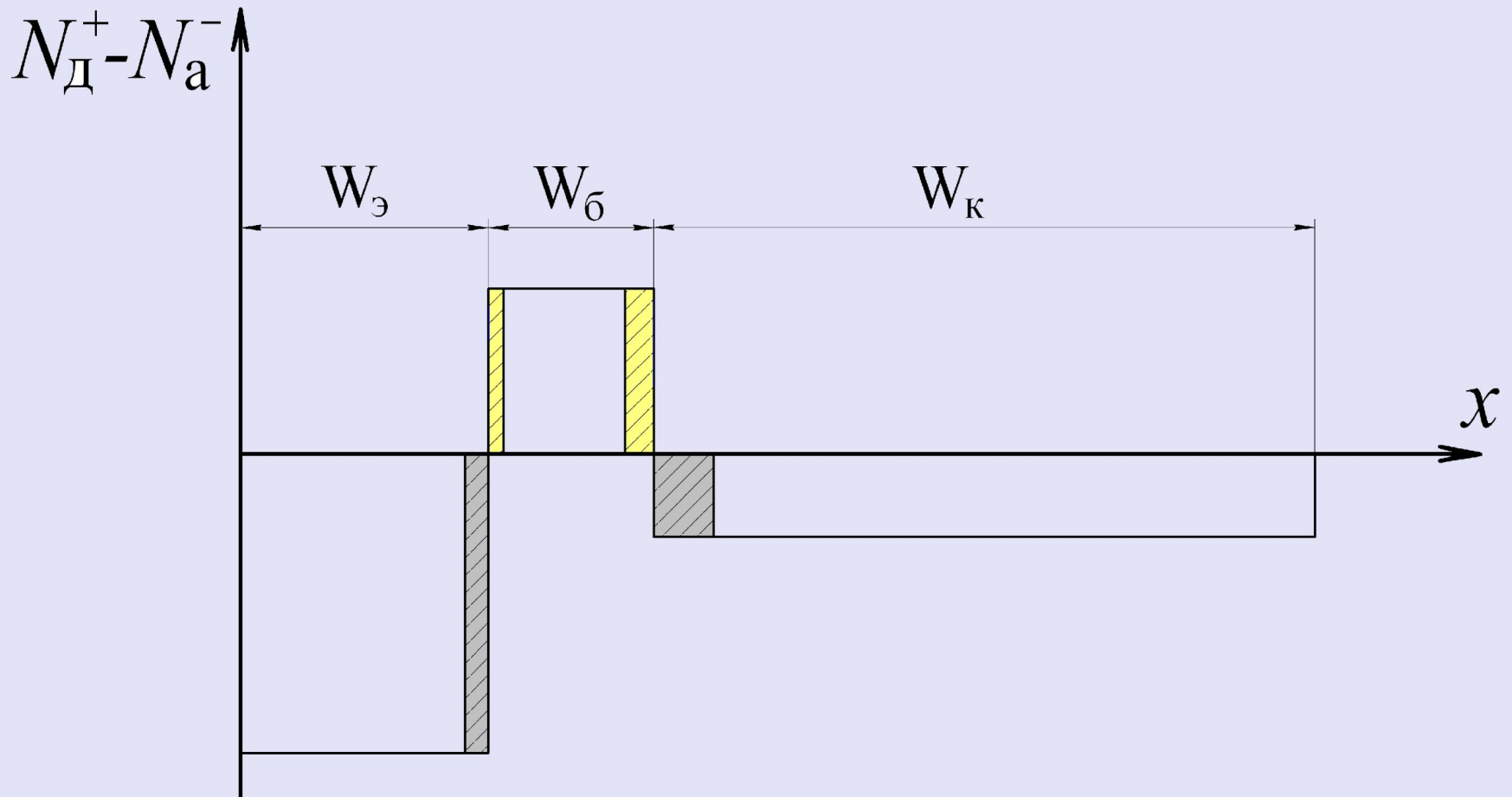


Стрелкой обозначен эмиттер, направление стрелки, как и в случае диода, от *p*-типа к *n*-типу

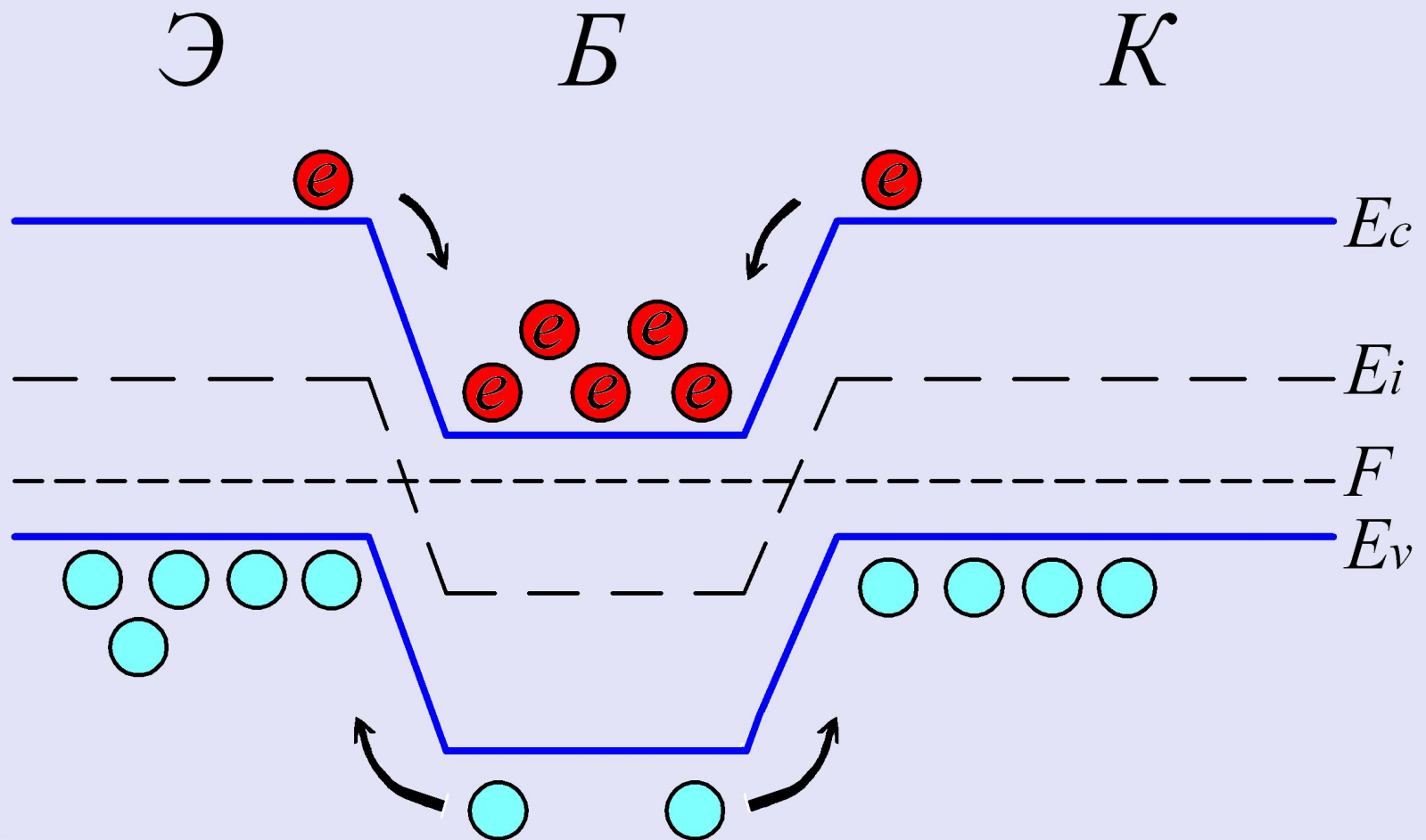
Центральную часть транзистора называется *базой*, левая высоколегированная - *эмиттер*, правая, низколегированная – *коллектор*. Переход, разделяющий эмиттер и базу, называется *эмиттерным переходом (ЭП)*, а переход, разделяющий базу и коллектор, - *коллекторным переходом (КП)*.



Распределение примеси в р-п-р-транзисторе



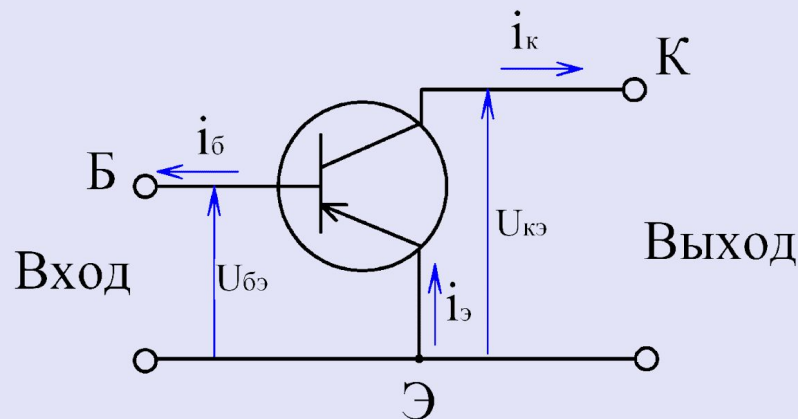
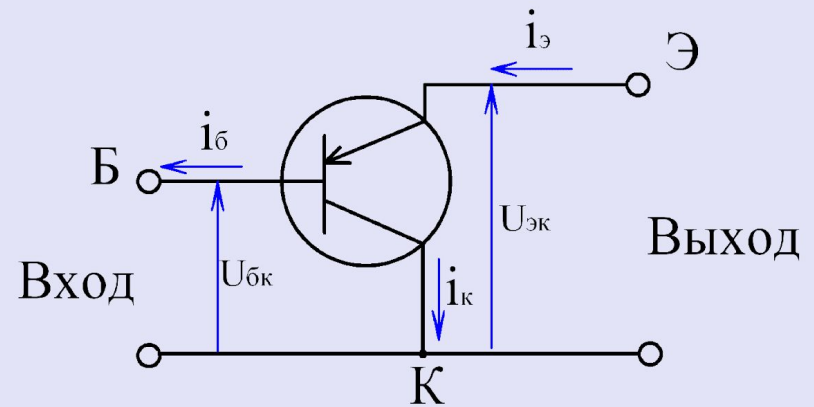
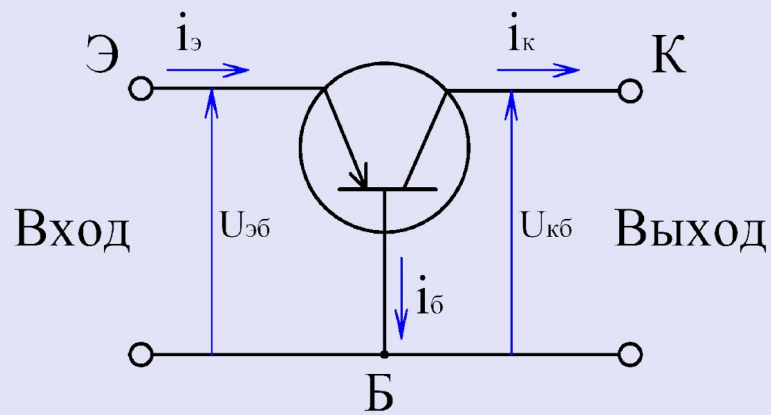
Зонная диаграмма р-п-р транзистора в стационарном состоянии



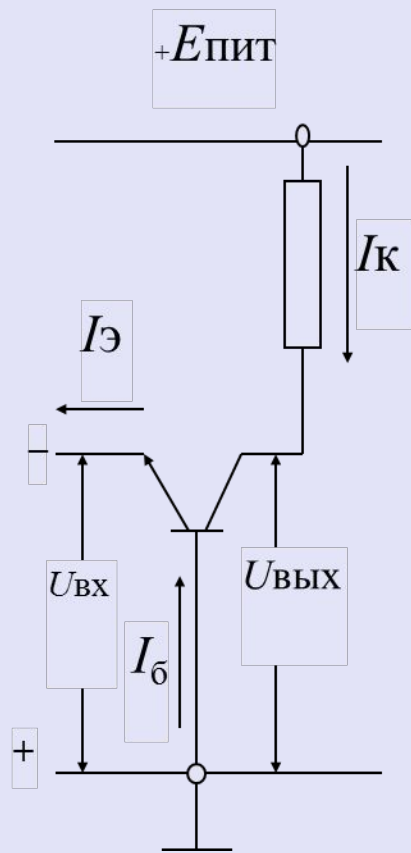
Включение транзисторов в схему

В электрическую схему транзистор можно включить тремя режимами (в зависимости от того, какой электрод является общим для входного и выходного напряжения): с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

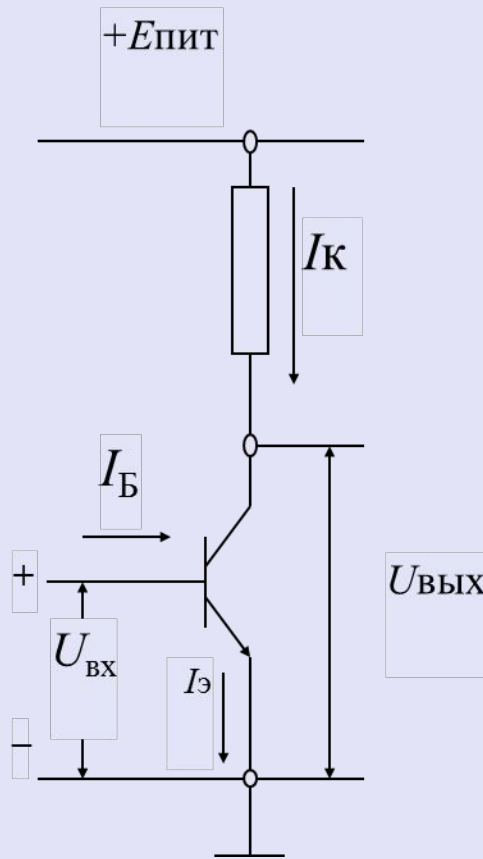
Варианты включения транзисторов



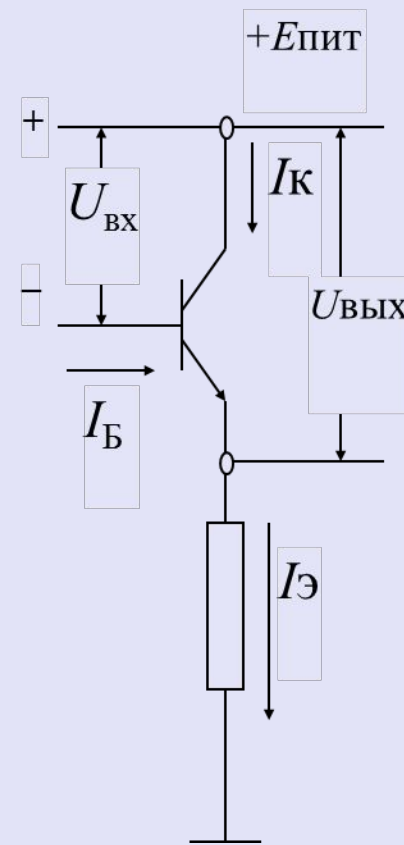
ОБ



ОЭ

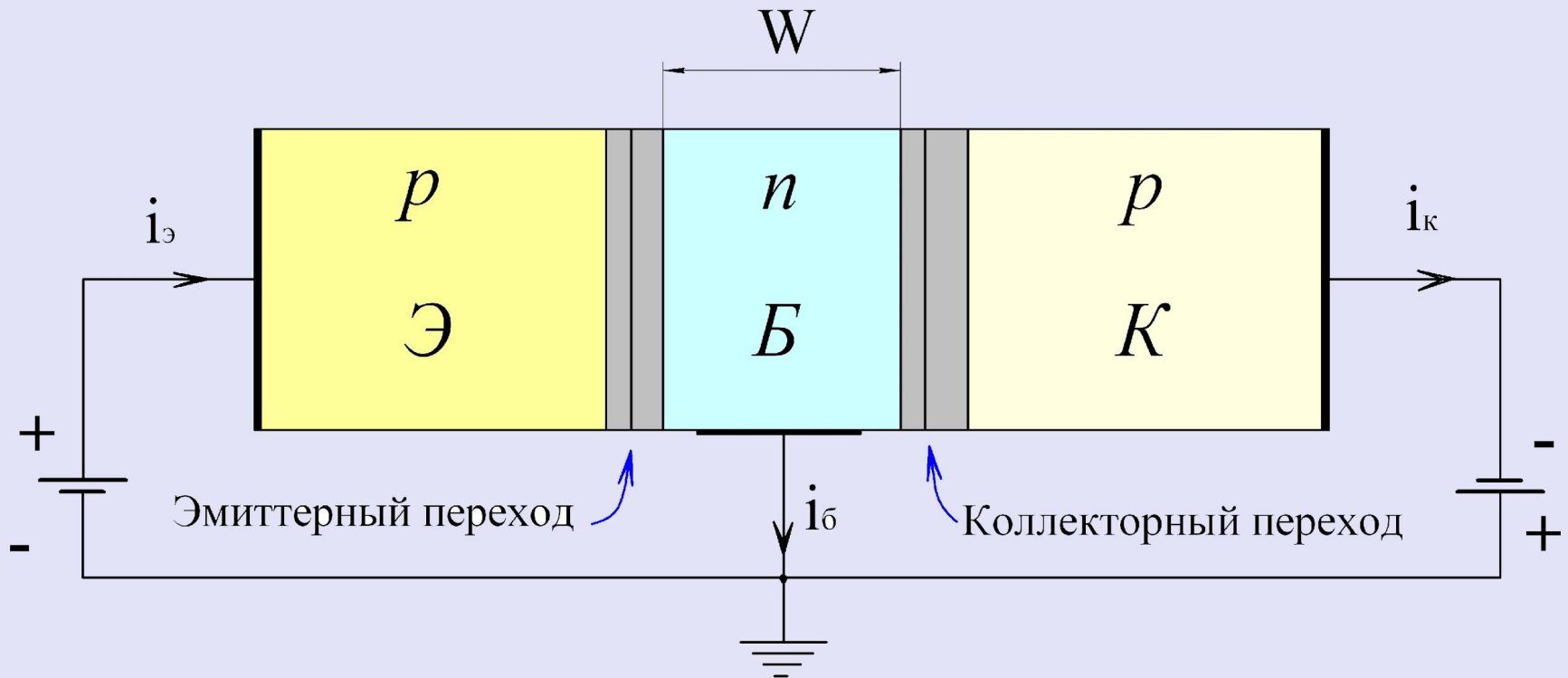


ОК

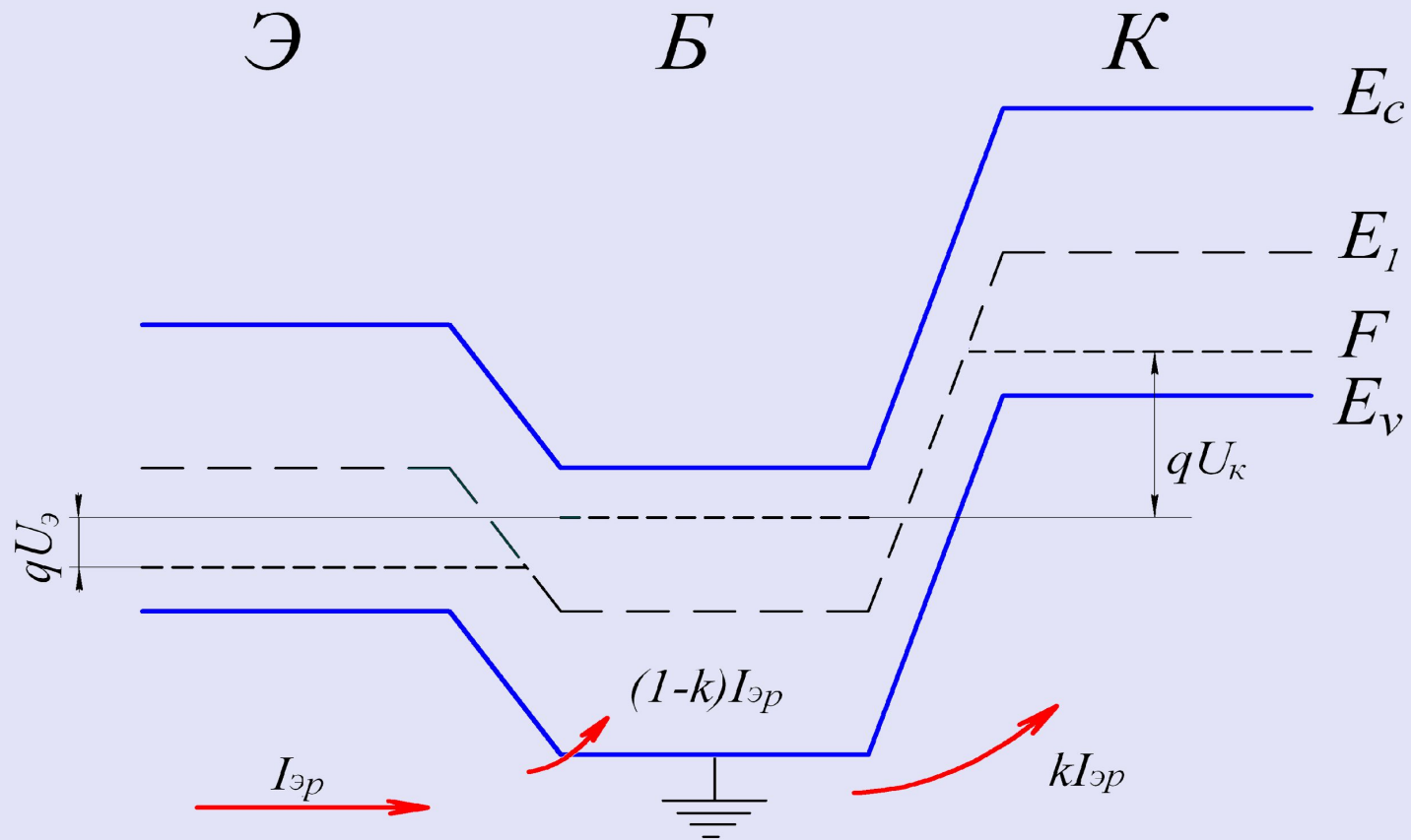


Включение транзистора по схеме с общей базой

Пусть эмиттерный переход включен в прямом направлении, коллекторный – в обратном.



Зонная диаграмма при включении по схеме ОБ



Такая полярность напряжения обеспечивает открытое состояние эмиттерного перехода и закрытое состояние коллекторного перехода, что соответствует **активному режиму** работы транзистора, когда выходной (коллекторный) ток изменяется в соответствии с входным напряжением или током. Другие режимы – **инверсный, насыщения и отсечки** – будут рассмотрены ниже.

Напряжение, приложенное к эмиттерному переходу, уменьшает потенциальный барьер, и из эмиттера в базу инжектируются основные носители (дырки в *pnp*-транзисторе или электроны в *npr*-транзисторе), становясь в базе неосновными (избыточными, неравновесными) носителями. Этот поток очень сильно зависит от напряжения на эмиттерном переходе $V_{ЭБ}$, экспоненциально возрастаая с увеличением $V_{ЭБ}$.

Вследствие диффузии инжектированные носители движутся через базу к коллекторному переходу, частично рекомбинируя с основными носителями – дырками в *npr*-транзисторе и электронами в *prp*-транзисторе.

Между базой и коллектором для неосновных носителей барьера нет, поэтому все дошедшие до коллектора носители заряда проходят через коллекторный переход и создают коллекторный ток.

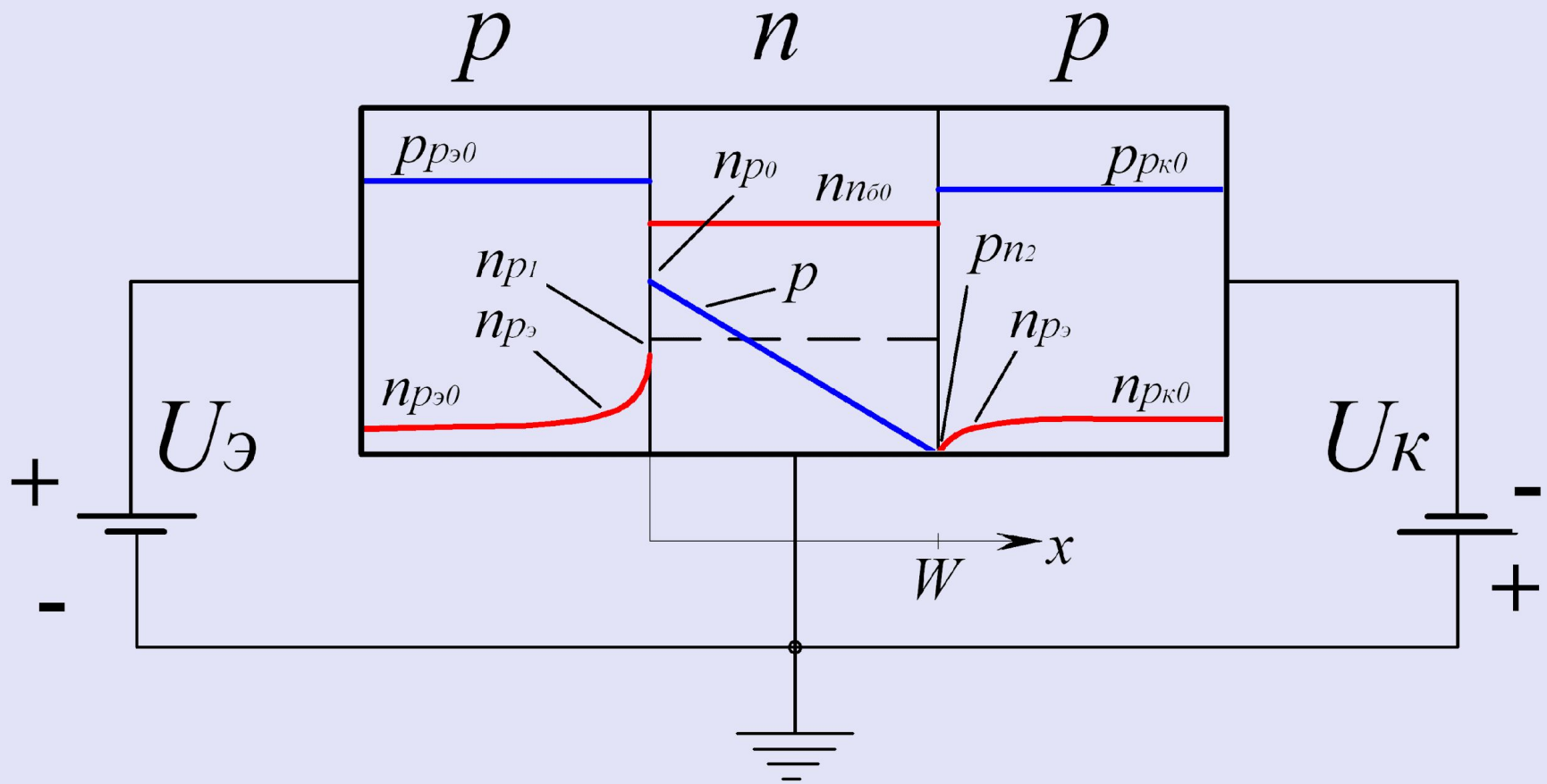
Говорят, что достигнувшие коллекторного перехода носители *экстрагируются* полем закрытого коллекторного перехода в коллектор

Поток дырок и, соответственно, ток коллектора I_K , являющийся выходным током транзистора, очень эффективно управляется входным напряжением $V_{ЭБ}$ и не зависят от выходного напряжения $V_{КБ}$.

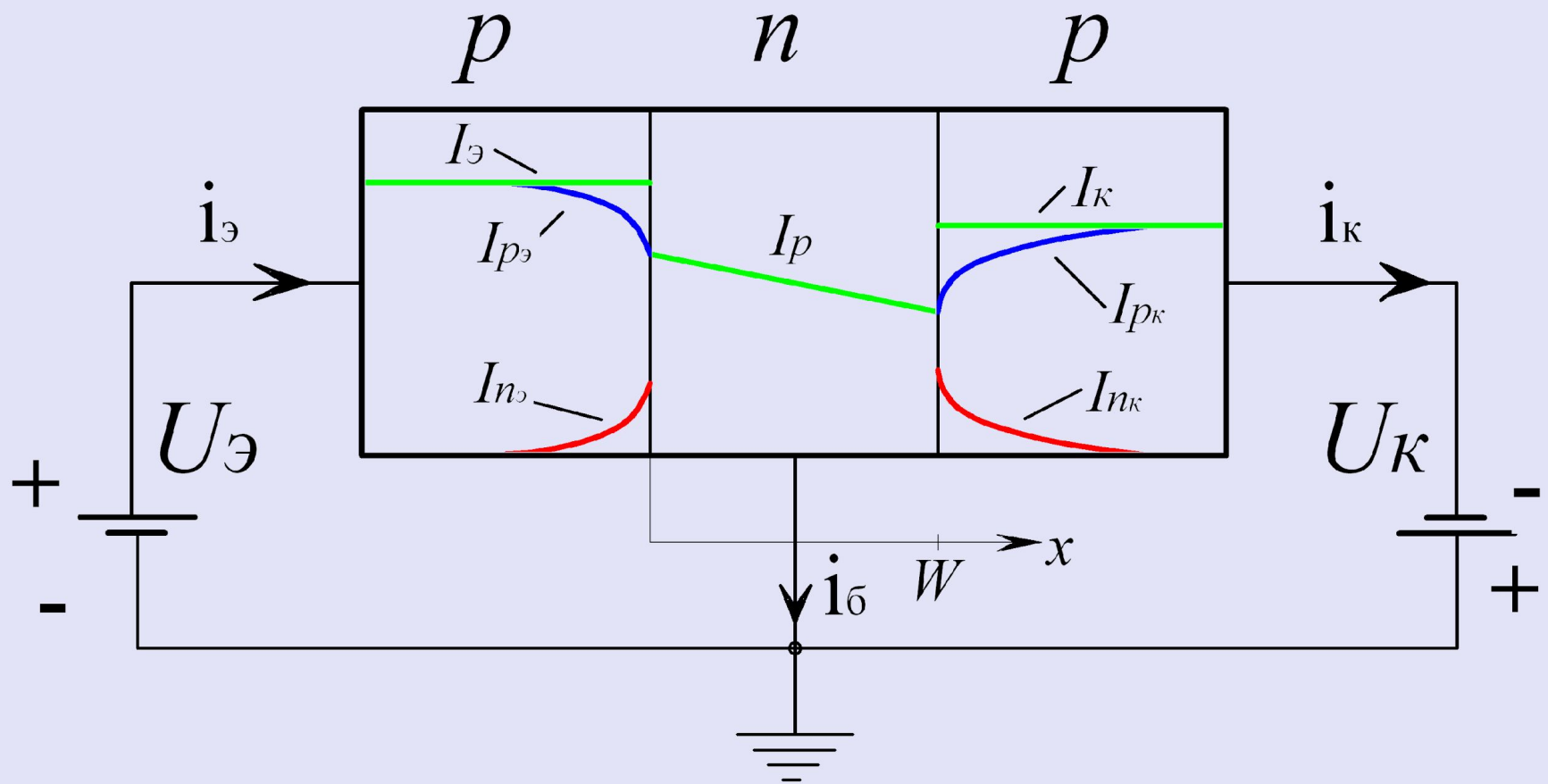
Эффективное управление выходным током с помощью входного напряжения составляет основу принципа работы биполярного транзистора и позволяет использовать транзистор для усиления электрических сигналов.

Определим характер распределения неосновных носителей и токов в областях базы, эмиттера и коллектора транзистора .

Распределение концентраций основных и неосновных носителей заряда



Распределение токов



Отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*

$$\alpha \Big|_{U_K = const} = \frac{dI_K}{dI_\varepsilon}$$

Коллекторный ток транзистора обусловлен не всем эмиттерным током, а только его дырочной составляющей. Поэтому коэффициент передачи зависит от того, какую часть тока эмиттера составляет именно его дырочная компонента.

Для характеристики эмиттерного перехода вводят коэффициент инжекции

$$\gamma = \frac{dI_{pЭ}}{dI_{Э}} = \frac{dI_{pЭ}}{d(I_{pЭ} + I_{nЭ})}$$

Не все инжектированные эмиттером дырки доходят до коллектора, некоторая их часть рекомбинирует в базе, поэтому плотность дырочного тока коллектора j_{pK} меньше плотности дырочного тока эмиттера $j_{pЭ}$, а дырочный ток коллектора меньше дырочного тока эмиттера.

Для отражения этого вводят понятие *коэффициента переноса* или *коэффициента рекомбинации* α , который показывает, какая часть инжектированных носителей достигла коллектора. По определению

$$\alpha = \frac{dI_{pK}}{dI_{pЭ}}$$

Коэффициент переноса зависит от ширины базы W и диффузионной длины неосновных носителей в базе L_p .

Именно необходимость обеспечить перенос инжектированных носителей через базу транзистора выдвигает требование, чтобы их диффузионная длина L_p была больше ширины базы транзистора $L_p \gg W$.

Выполнение этого условия позволяет обеспечить высокие значения коэффициента переноса (обычно $\alpha > 0.98$).

Преимущественное легирование одной из областей влечет за собой преимущественное инжектирование электронов либо дырок.

Если считать ток коллектора чисто дырочным, что справедливо для сильно легированного эмиттера, то коэффициент передачи:

$$\alpha = \gamma \cdot \alpha_e$$

Найдем аналитическое выражение, связывающее коэффициент передачи с физическими свойствами полупроводниковых материалов p - и n -областей.

Для этого решим уравнение диффузии, описывающее поведение дырок в n -области базы и электронов в p -области эмиттера.

Решение будем проводить, считая, что модель транзистора одномерная, электрическое поле в базе равно нулю, генерация и рекомбинация в pn -переходах отсутствуют и уровень инжекции эмиттера мал.

Уравнение диффузии дырок в области базы в стационарном режиме

$$D_p \cdot \frac{\partial^2 p_{nB}(x)}{\partial x^2} - \frac{p - p_{n0}}{\tau_p} = 0$$

$$D_p = \mu_p \cdot \phi_T$$

Граничные условия:

$$\text{при } x = 0 : \quad p_{nB} = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right)$$

$$\text{при } x = W : \quad p_{nB} = p_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{U_{КБ}}{\phi_T}\right) = 0$$

Решение уравнения имеет вид:

$$p_{nB}(x) - p_{n0B} = \frac{\Delta p_{\text{Э}} \cdot \operatorname{sh} \frac{W-x}{L_{pB}} + \Delta p_{\text{К}} \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{L_{pB}}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_{pB}}} =$$
$$= p_{n0B} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \operatorname{sh} \frac{W-x}{L_{pB}} + \operatorname{sh} \frac{x}{L_{pB}}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_{pB}}}$$

Плотность дырочного тока найдем, дифференцируя последнее выражение по x :

$$j_p(x) = -q \cdot D_{pB} \cdot \frac{dp_B(x)}{dx} = \frac{q \cdot D_{pB} \cdot p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W-x}{L_{pB}} + ch \frac{x}{L_{pB}}}{sh \frac{W}{L_{pB}}}$$

Полагая $x = 0$ и $x = W$, находим дырочные составляющие токов эмиттерного и коллекторного переходов:

$$j_{pЭ} = \frac{q \cdot D_{pB} \cdot p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W}{L_{pB}} + 1}{sh \frac{W}{L_{pB}}} \quad (1)$$

$$j_{pК} = \frac{q D_{pB} p_{n0B}}{L_{pB}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + ch \frac{W}{L_{pB}}}{sh \frac{W}{L_{pB}}} \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), найдем коэффициент переноса:

$$\alpha = \frac{dI_{pK}}{dI_{pЭ}} = \left(ch \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Для нахождения коэффициента инжекции необходимо знать полный ток эмиттера. Для нахождения электронной составляющей тока эмиттера решим уравнение диффузии электронов в p -области эмиттера:

$$D_{nЭ} \frac{\partial^2 n_{pЭ}(x)}{\partial x^2} - \frac{n_{pЭ}(x) - n_{p0Э}}{\tau_{nЭ}} = 0$$

Граничные условия запишем исходя из того, что протяженность области эмиттера много больше диффузионной длины электронов $L_{nЭ} = \sqrt{D_{nЭ} \cdot \tau_{nЭ}}$. В активном режиме к эмиттеру приложено прямое напряжение, поэтому:

$$\text{при } x = 0 : \quad n_{pЭ} \big|_{x=0} = n_{p0Э} \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right)$$

$$\text{при } x = -\infty : \quad n_{pЭ} \big|_{x \rightarrow -\infty} = n_{p0Э}$$

$$\Delta n_{Э}(x) = n_{pЭ}(x) - n_{p0Э} = n_{p0Э} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{nЭ}}\right)$$

$$j_{nЭ}(x) = q \cdot D_{nЭ} \cdot \frac{dn_{pЭ}}{dx} = q \cdot \frac{D_{nЭ} \cdot n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{nЭ}}\right)$$

Электронную компоненту тока эмиттерного перехода на границе с базой получим из этого выражения при $x=0$:

$$j_{nЭ} = q \frac{D_{nЭ} n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$

Эмиттерный ток имеет две компоненты: $j_{Э} = j_{pЭ} + j_{nЭ}$

$$j_{Э} = \frac{q \cdot D_{pБ} \cdot p_{n0Б}}{L_{pБ}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot ch \frac{W}{L_{pБ}} + 1}{sh \frac{W}{L_{pБ}}} + \frac{q \cdot D_{nЭ} \cdot n_{p0Э}}{L_{nЭ}} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$

$$\gamma = \frac{dj_{pЭ}}{d(j_{pЭ} + j_{nЭ})} = \left(1 + \frac{D_{nЭ} \cdot n_{p0Э} \cdot L_{pБ}}{D_{pБ} \cdot p_{n0Б} \cdot L_{nЭ}} \cdot th \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \quad (4)$$

Если бы эмиттерный ток целиком состоял из неосновных носителей ($\gamma = 1$) и все они доходили до коллектора ($\alpha = 1$), то коллекторный ток был бы равен току эмиттера, а коэффициент передачи $\alpha = 1$.

Для нахождения коэффициента передачи тока эмиттера найдем электронную составляющую тока коллектора, для этого решим уравнение диффузии для электронов в p-области коллектора:

$$D_{nK} \frac{\partial^2 n_{pK}}{\partial x^2} - \frac{n_{pK} - n_{p0K}}{\tau_{nK}} = 0$$

с граничными условиями:

$$\text{при } x = W: \quad n_{pK} \Big|_{x=W} = n_{p0K} \cdot \exp\left(-\frac{U_{KB}}{\phi_T}\right) = 0$$

$$\text{при } x = \infty: \quad n_{pK} \Big|_{x=\infty} = n_{p0K}$$

Решение имеет вид:

$$\Delta n_{pK}(x) = n_{pK}(x) - n_{p0K} = -n_{p0K} \cdot \exp\left(\frac{x - W}{L_{nK}}\right)$$

$$j_{nK}(x) = -q \cdot D_{nK} \cdot \frac{dn_K}{dx} = \frac{q \cdot D_{nK} \cdot n_{p0K}}{L_{nK}} \cdot \exp\left(\frac{x - W}{L_{nK}}\right)$$

Зная электронную и дырочную составляющие тока коллектора, получаем полный ток через коллекторный переход при $x = W$:

$$j_K(x) = \left(\frac{q \cdot D_{nK} \cdot n_{p0K}}{L_{nK}} + \frac{q \cdot D_{pK} \cdot p_{n0K}}{L_{pK}} \right) \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\phi_T}\right) - 1 \right] + ch \frac{x}{L_{pB}}}{sh \frac{W}{L_{pB}}}$$

$$\alpha = \frac{dI_K}{dI_{\text{Э}}} = \left(1 + \frac{D_{n\text{Э}} \cdot n_{p0\text{Э}} \cdot L_{p\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} \cdot p_{n0\text{Б}} \cdot L_{n\text{Э}}} \cdot th \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Уравнения (3), (4) и (7) примут более простой вид, если гиперболические функции, входящие в них, разложить в ряд Тейлора. Учитывая, что $W/L_p \ll 1$:

$$sh \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \approx th \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \approx \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \quad ch \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^2$$

$$\gamma = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1} \cong 1 - \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}}$$

$$\alpha = \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^2 \right]^{-1} \cong 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^2$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$

Учитывая связь основных и неосновных носителей

$$n_i^2 = N_d \cdot p_{n0} \quad n_i^2 = N_a \cdot n_{p0}$$

МОЖНО записать:

$$\gamma = 1 - \frac{D_{nЭ} \cdot N_{dB} \cdot W}{D_{pБ} \cdot N_{aЭ} \cdot L_{nЭ}}$$

$$\alpha = \left(1 + \frac{D_{nЭ} \cdot N_{dB} \cdot W}{D_{pБ} \cdot N_{aЭ} \cdot L_{nЭ}} \right)^{-1}$$

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}} \quad I_{\text{К}} = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}}$$

Ток базы $I_{\text{Б}}$ транзистора будет состоять из трех компонент, включающих электронный ток в эмиттерном переходе

$$I_{n\text{Э}} = (1 - \gamma) \cdot I_{\text{Э}}$$

рекомбинационный ток в базе

$$(1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot I_{\text{Э}}$$

и тепловой ток коллектора $I_{\text{КБ0}}$.

Тепловой ток коллектора при включении по схеме ОБ $I_{КБ0}$ имеет две составляющие:

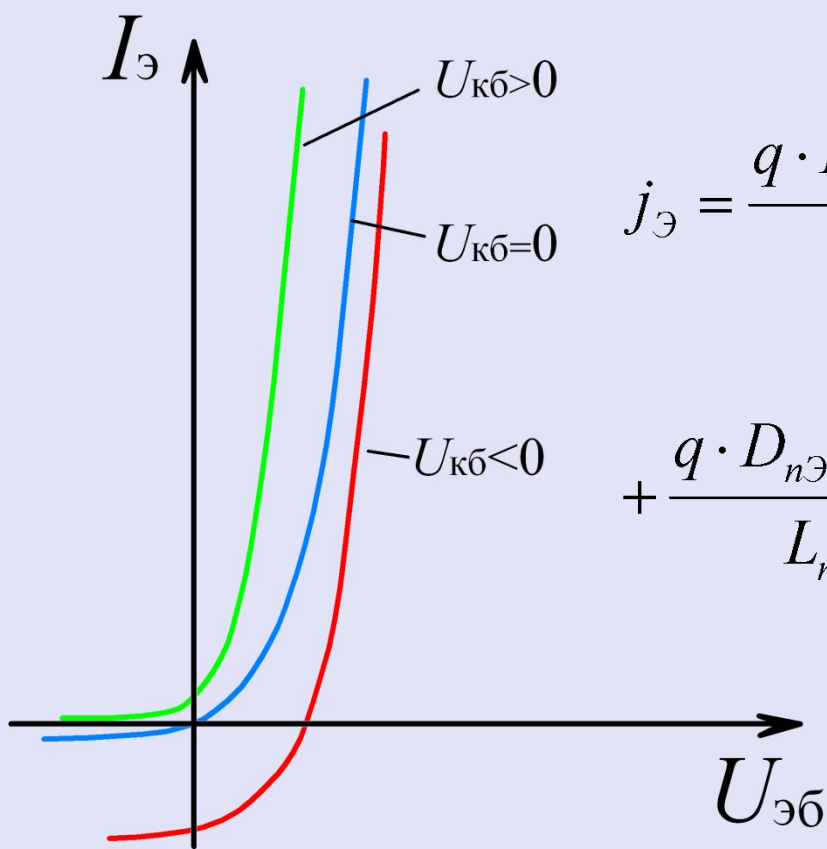
$$I_{КБ0} = I_s + I_g$$

где I_s - тепловой ток, I_g - ток генерации коллекторного pn -перехода. Ток $I_{КБ0}$ - ток обратно смещенного коллекторного перехода.

Таким образом, в биполярном транзисторе реализуются четыре физических процесса:

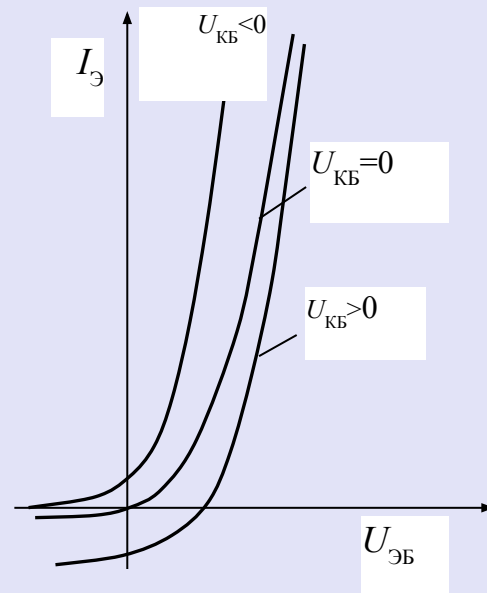
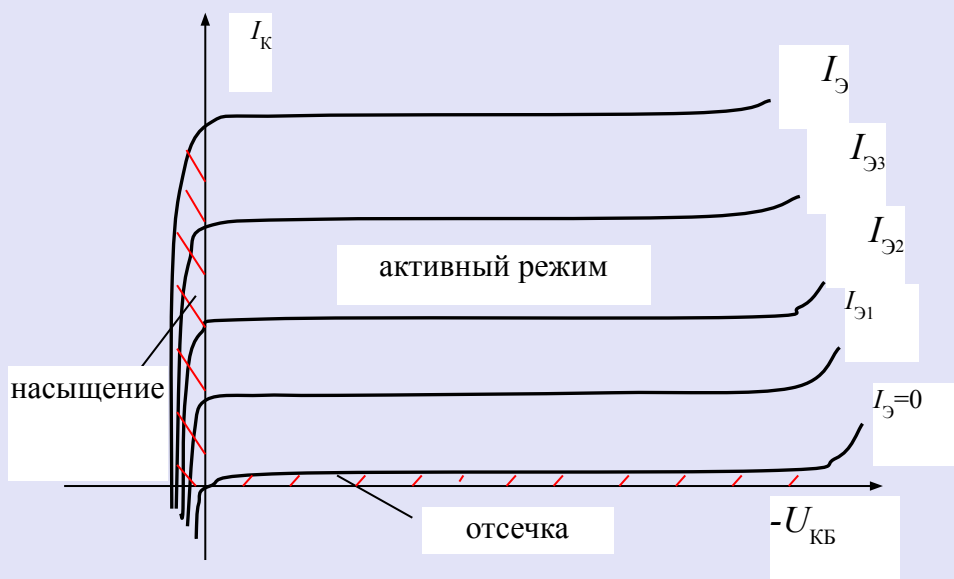
- инжекция из эмиттера в базу;
- диффузия через базу;
- рекомбинация в базе;
- экстракция из базы в коллектор.

Входные ВАХ в схеме ОБ

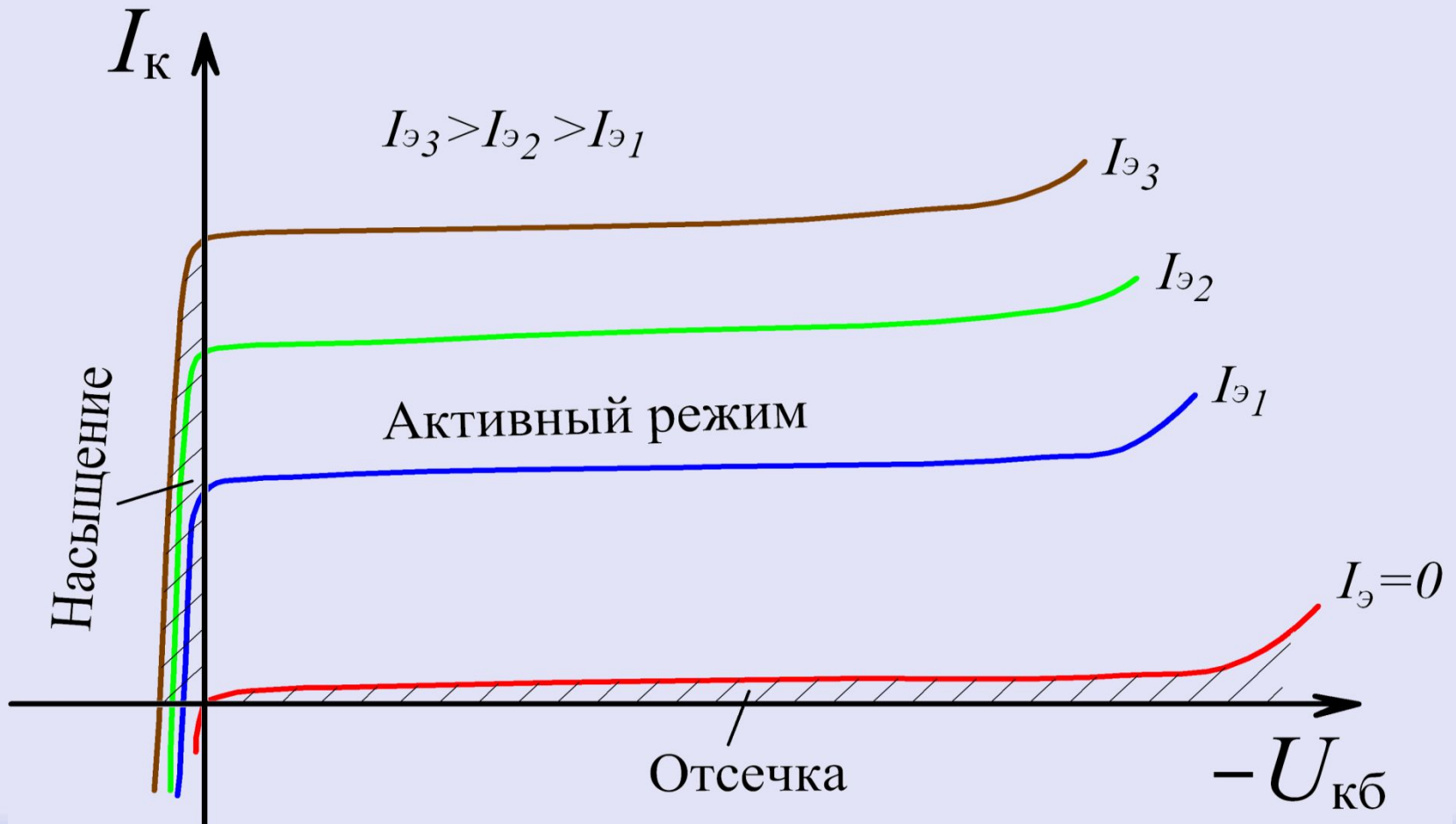


$$j_{\text{э}} = \frac{q \cdot D_{\text{pБ}} \cdot p_{\text{n0Б}}}{L_{\text{pБ}}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{U_{\text{эБ}}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \cdot \text{ch} \frac{W}{L_{\text{pБ}}} + 1}{\text{sh} \frac{W}{L_{\text{pБ}}}} +$$

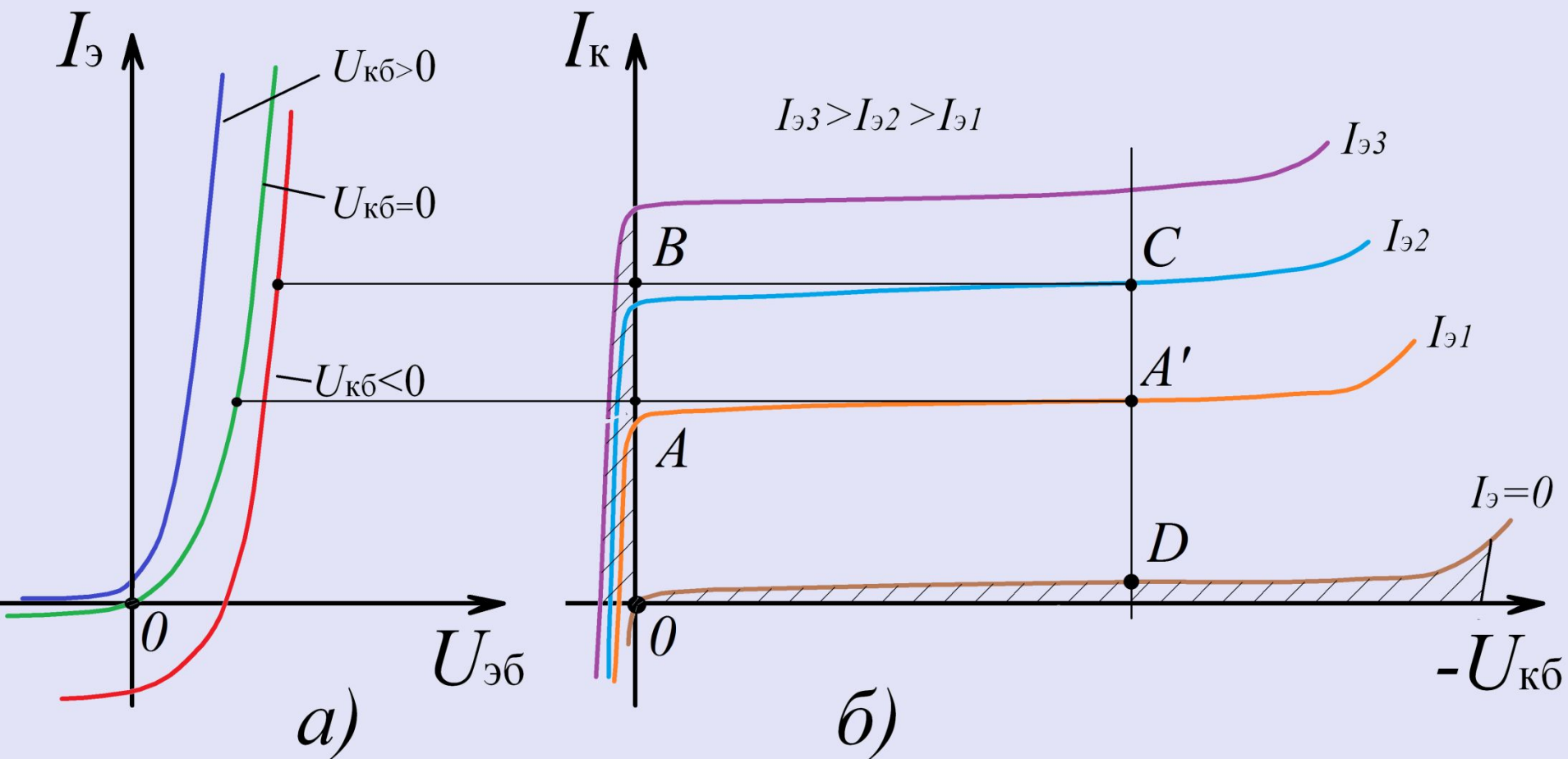
$$+ \frac{q \cdot D_{\text{nЭ}} \cdot n_{\text{p0Э}}}{L_{\text{nЭ}}} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{\text{эБ}}}{\phi_T}\right) - 1 \right]$$



Выходные ВАХ в схеме ОБ



Входная и выходная ВАХ р-п-р транзистора в схеме ОБ



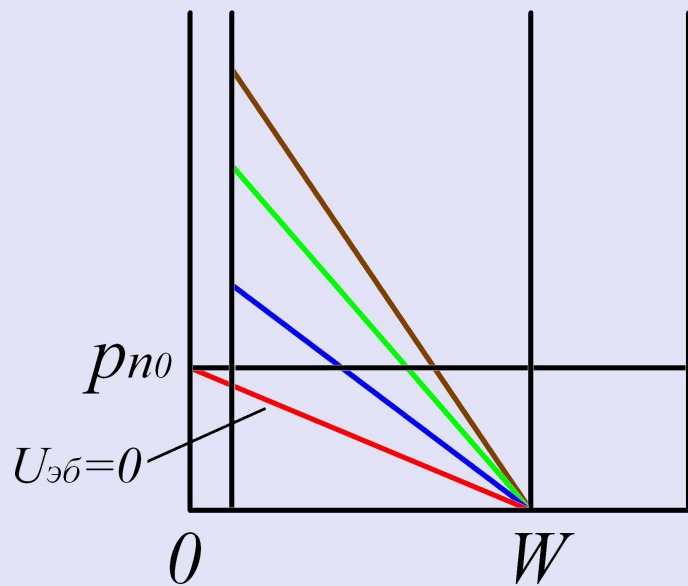
Уравнения транзистора в схеме ОБ

$$\alpha_N = \frac{dI_K}{dI_{\mathcal{E}}} = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}} \cdot L_{p\mathcal{B}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{n\mathcal{E}}} \cdot th \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot n_{p0\mathcal{E}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$
$$\alpha_N = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{E}} \cdot N_{a\mathcal{B}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot N_{d\mathcal{E}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{E}}} \right)^{-1} \quad (5.1)$$

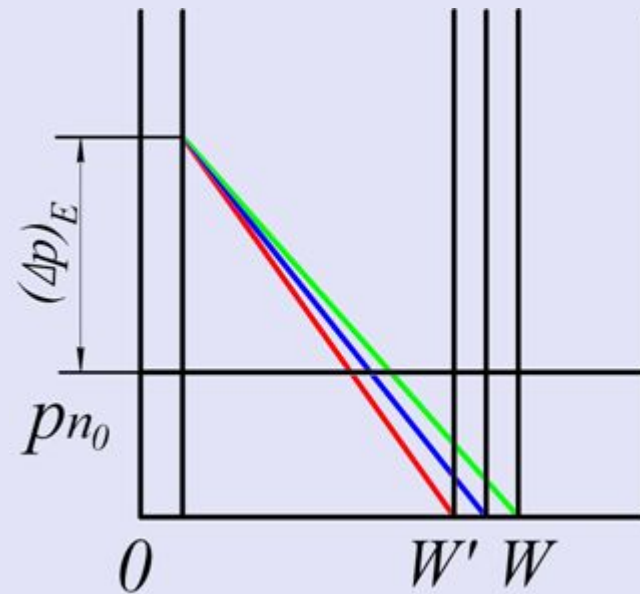
$$\alpha_I = \frac{dI_{\mathcal{E}}}{dI_K} = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{K}} \cdot n_{p0\mathcal{K}} \cdot L_{p\mathcal{B}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}} \cdot L_{n\mathcal{K}}} \cdot th \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\mathcal{B}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{K}} \cdot n_{p0\mathcal{K}}}{D_{p\mathcal{B}} \cdot p_{n0\mathcal{B}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{K}}} \right)^{-1}$$
$$\alpha_I = \left(1 + \frac{D_{n\mathcal{K}} \cdot N_{d\mathcal{B}}}{D_p \cdot N_{a\mathcal{K}}} \cdot \frac{W}{L_{n\mathcal{K}}} \right)^{-1} \quad (5.2)$$

$$I_K = I_{K0} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{KB}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (5.3)$$

Распределение неосновных носителей в базе pnp -транзистора в нормальном режиме

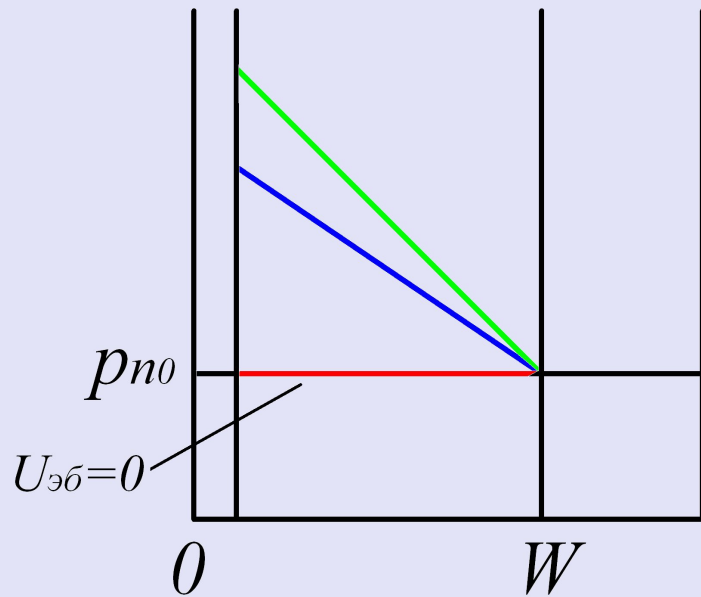


$$U_{КБ} = const, U_{ЭБ} = var$$

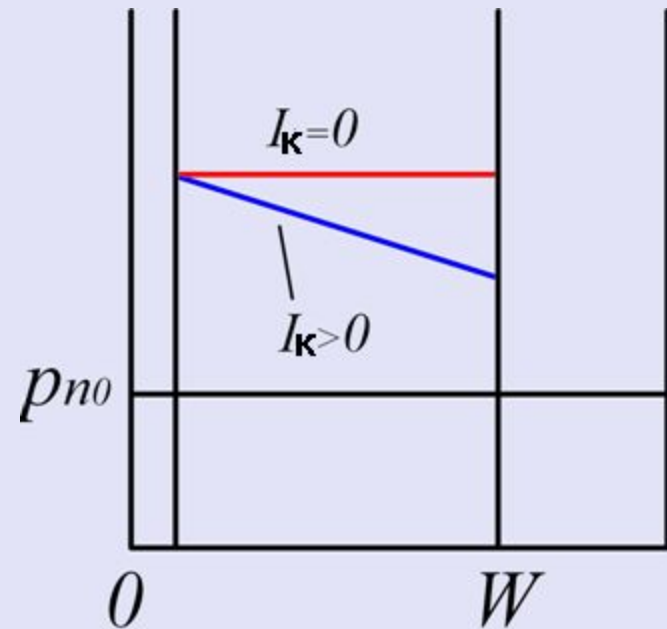


$$U_{КБ} = var, U_{ЭБ} = const$$

Распределение неосновных носителей в базе pnp -транзистора в режиме насыщения

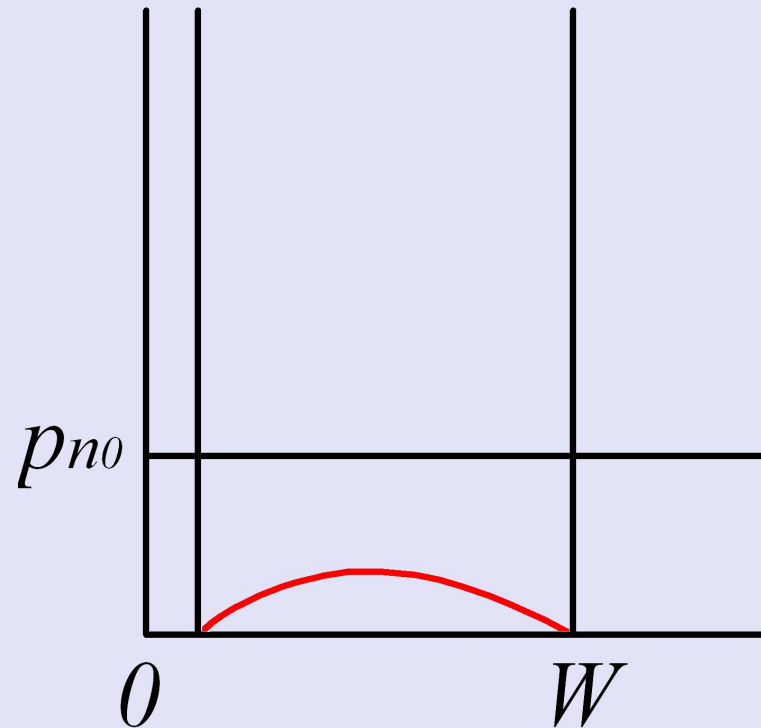


$$U_{KB} = 0, U_{ЭБ} > 0$$



$$U_{KB} > 0, U_{ЭБ} > 0$$

Распределение неосновных носителей в базе pnp -транзистора в режиме отсечки



$$I_B = I_E - I_K = I_E - \alpha I_E = I_E (1 - \alpha)$$

$$r_K = \left. \frac{dU_{KB}}{dI_K} \right|_{I_E = \text{const}}$$

С увеличением напряжения на коллекторе ширина базы уменьшается, вследствие чего уменьшается вероятность рекомбинации дырок в базе, и при постоянном токе эмиттера ток дырок, доходящих до коллектора, должен возрасти с повышением напряжения на КП. Поэтому сопротивление коллектора должно уменьшаться.

Усилитель на транзисторе в схеме ОБ

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\varepsilon} + I_{\kappa 0\text{б}}$$

т.е. в схеме с ОБ *усиление тока отсутствует.*

$$r_{\text{ВХдиф}} = \left(\frac{dI_{\varepsilon}}{dU_{\varepsilon\text{б}}} \right)^{-1} \quad r_{\text{ВЫХдиф}} = \left(\frac{dI_{\kappa}}{dU_{\kappa\text{б}}} \right)^{-1}$$

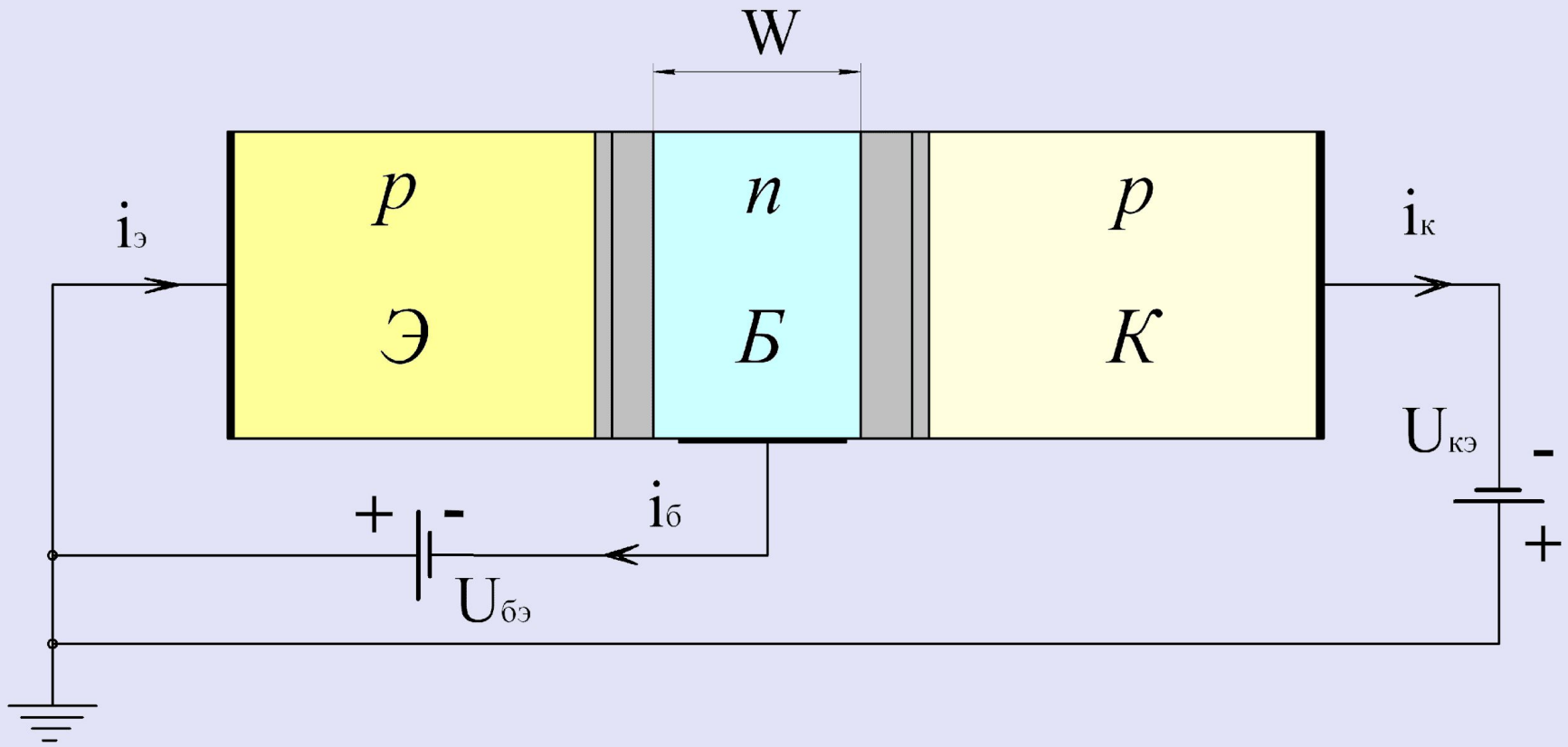
Практически одинаковый ток проходит и через высокое сопротивление и через низкое, вследствие чего в схеме с ОБ имеет место усиление мощности.

Из-за высокого выходного сопротивления в цепи коллектора может быть включено достаточно большое сопротивление нагрузки (R_K) – до 1 МОм.

Относительно малое изменение напряжения на эмиттере будет вызывать большое изменение напряжения на сопротивлении нагрузки.

В результате различия входного и выходного сопротивлений транзистор дает усиление по мощности.

Включение транзистора в схеме ОЭ



Расчет ВАХ в схеме ОЭ

Входные:

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{Э}} = \frac{I_{\text{Э}}}{1 + \beta} \quad (5.4)$$

$$I_{\text{Э}} = I_B + I_K$$

Выходные:

$$\frac{I_K}{\alpha} = I_B + I_K$$

$$I_K = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{KB0} \quad (5.5)$$

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B = \beta I_B$$

$$I_K = \alpha \cdot (I_B + I_K) + I_{KB0}$$

$$(1 - \alpha) \cdot I_K = \alpha \cdot I_B + I_{KB0}$$

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot I_B + \frac{1}{1 - \alpha} \cdot I_{KB0}, \quad \text{т.к. } \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$$

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

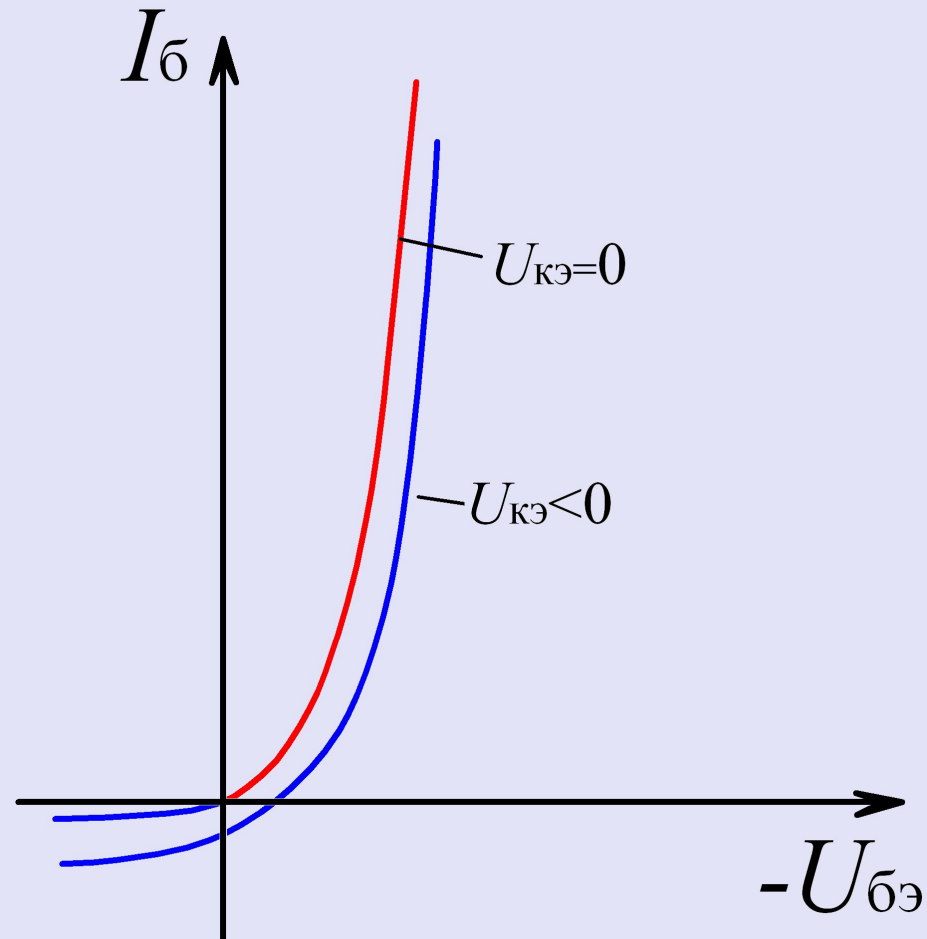
$$I_K = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{KB0} = \beta \cdot I_{\text{б}} + I_{K\text{Э}0}^* \quad (5.7)$$

$$\text{где } I_{K\text{Э}0}^* = (1 + \beta) \cdot I_{KB0} \approx \beta \cdot I_{KB0}$$

Часть дырок $(1-\alpha) \cdot \Delta p$ рекомбинирует в базе с электронами, поступающими из омического контакта базы (ток направлен против движения электронов, т.е. из базы).

При увеличении I_B отрицательный заряд инжектированных электронов уменьшает потенциальный барьер эмиттерного перехода, вызывая дополнительную инжекцию дырок в базу

Входные ВАХ транзистора в схеме ОЭ



При обратных напряжениях на КП и фиксированном напряжении на ЭП $|U_{БЭ}|$ постоянной будет концентрация дырок в базе вблизи ЭП.

Увеличение напряжения $U_{КЭ}$ будет сопровождаться расширением ОПЗ КП и уменьшением ширины базы (эффект Эрли) и, следовательно, уменьшением общего количества дырок, находящихся в базе.

При этом $\partial p_n / \partial x$ в базе будут расти, что приводит к дальнейшему уменьшению их концентрации. Как отмечалось, при термодинамическом равновесии:

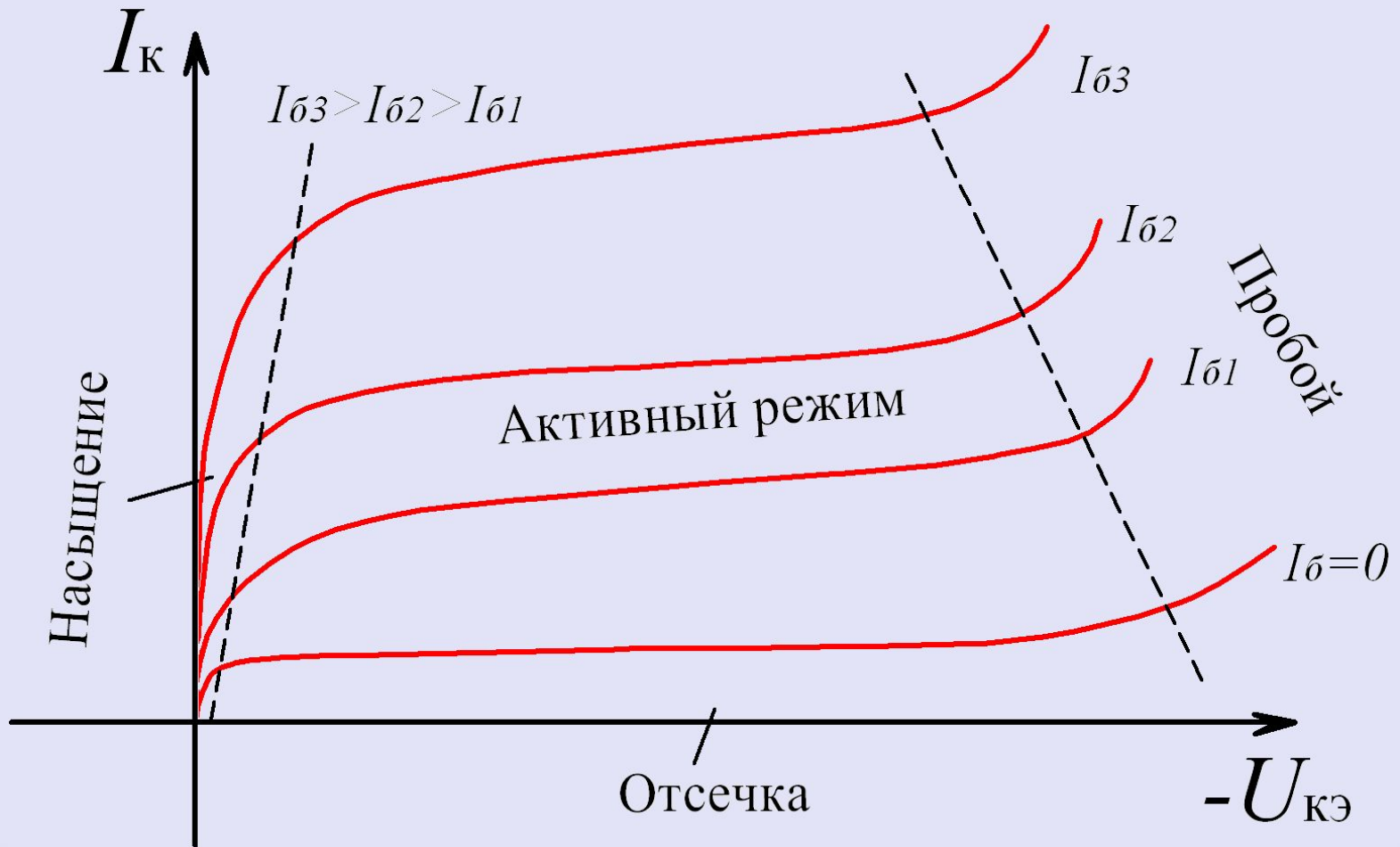
$$G_0 = R_0 = \gamma \cdot n_0 \cdot p_{n0}$$

При $p_n > p_{n0}$ число рекомбинаций электронов и дырок в базе в единицу времени уменьшается (возрастает коэффициент переноса). Так как электроны для рекомбинации приходят через базовый вывод, ток базы уменьшается и **входные ВАХ смещаются вниз**.

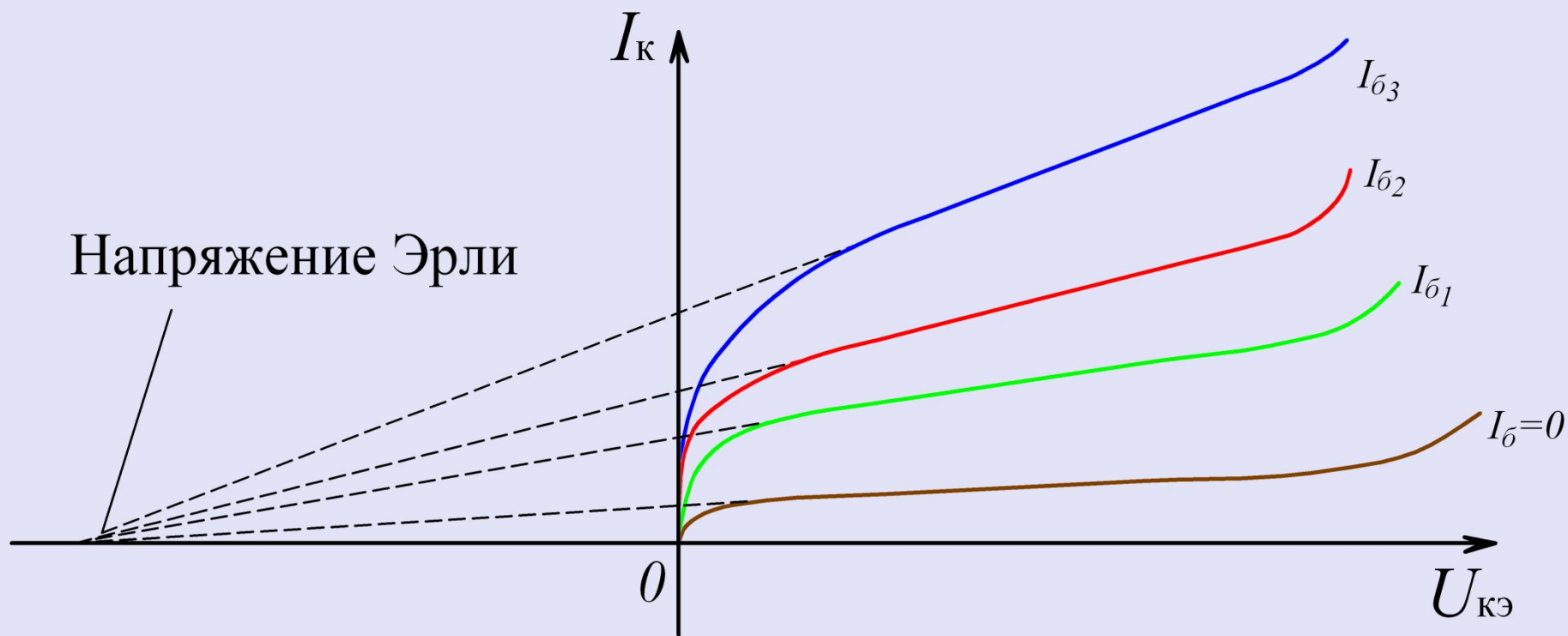
При обратном смещении, процесс тепловой генерации будет преобладать над процессом рекомбинации .

Генерированные электроны уходят из базы через базовый вывод, что означает наличие электрического тока, направленного в базу транзистора. Это – режим отсечки, он характеризуется сменой направления тока базы.

Выходные ВАХ транзистора в схеме ОЭ



Влияние напряжения Эрли на выходные ВАХ транзистора



Выводы

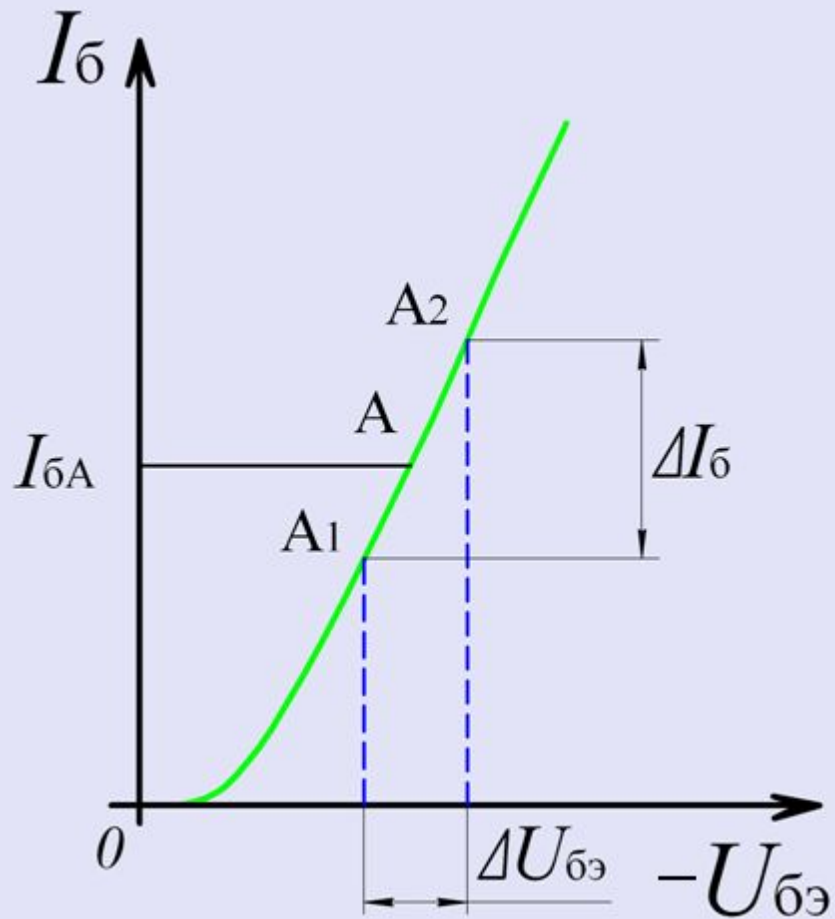
1. Схема с ОЭ обладает высоким усилением как по напряжению, так и по току. У нее самое большое усиление по мощности. Это самая распространенная усилительная схема.

2. Схема с ОБ усиливает напряжение (примерно, как и схема с ОЭ), но не усиливает ток. Схема находит применение в усилителях высоких и сверхвысоких частот.

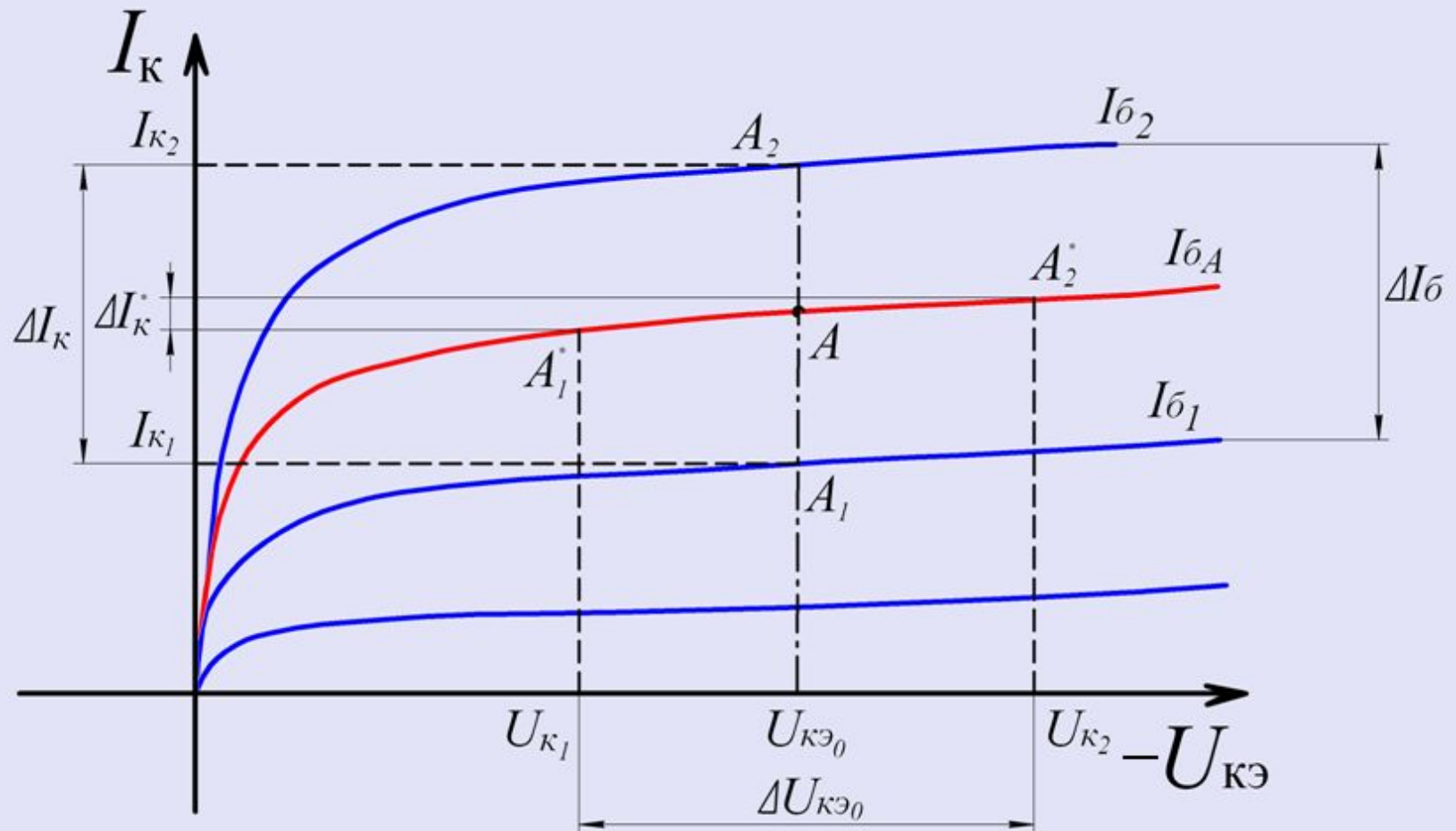
3. Схема с ОК (эмиттерный повторитель) не усиливает напряжение, но усиливает ток. Основное применение данной схемы – согласование сопротивлений источника сигнала и низкоомной нагрузки.

Дифференциальные параметры биполярного транзистора

Линеаризация входных ВАХ в схеме с ОЭ



Линеаризация выходных ВАХ в схеме с ОЭ



Дифференциальные параметры биполярного транзистора

$$\alpha^* = \frac{dI_k}{dI_{\vartheta}} \Big|_{U_k = \text{const}} = \gamma \cdot \alpha \cdot M \quad (5.8)$$

$$r_{\vartheta} = \frac{dU_{\vartheta}}{dI_{\vartheta}} \Big|_{I_k = \text{const}}$$

$$\gamma = \left(1 + \frac{D_{n\vartheta} \cdot n_{p0\vartheta} \cdot W}{D_{pB} \cdot p_{n0B} \cdot L_{n\vartheta}} \right)^{-1} \cong 1 - \frac{D_{n\vartheta} \cdot n_{p0\vartheta} \cdot W}{D_p \cdot p_n \cdot L_{n\vartheta}} \quad (5.9)$$

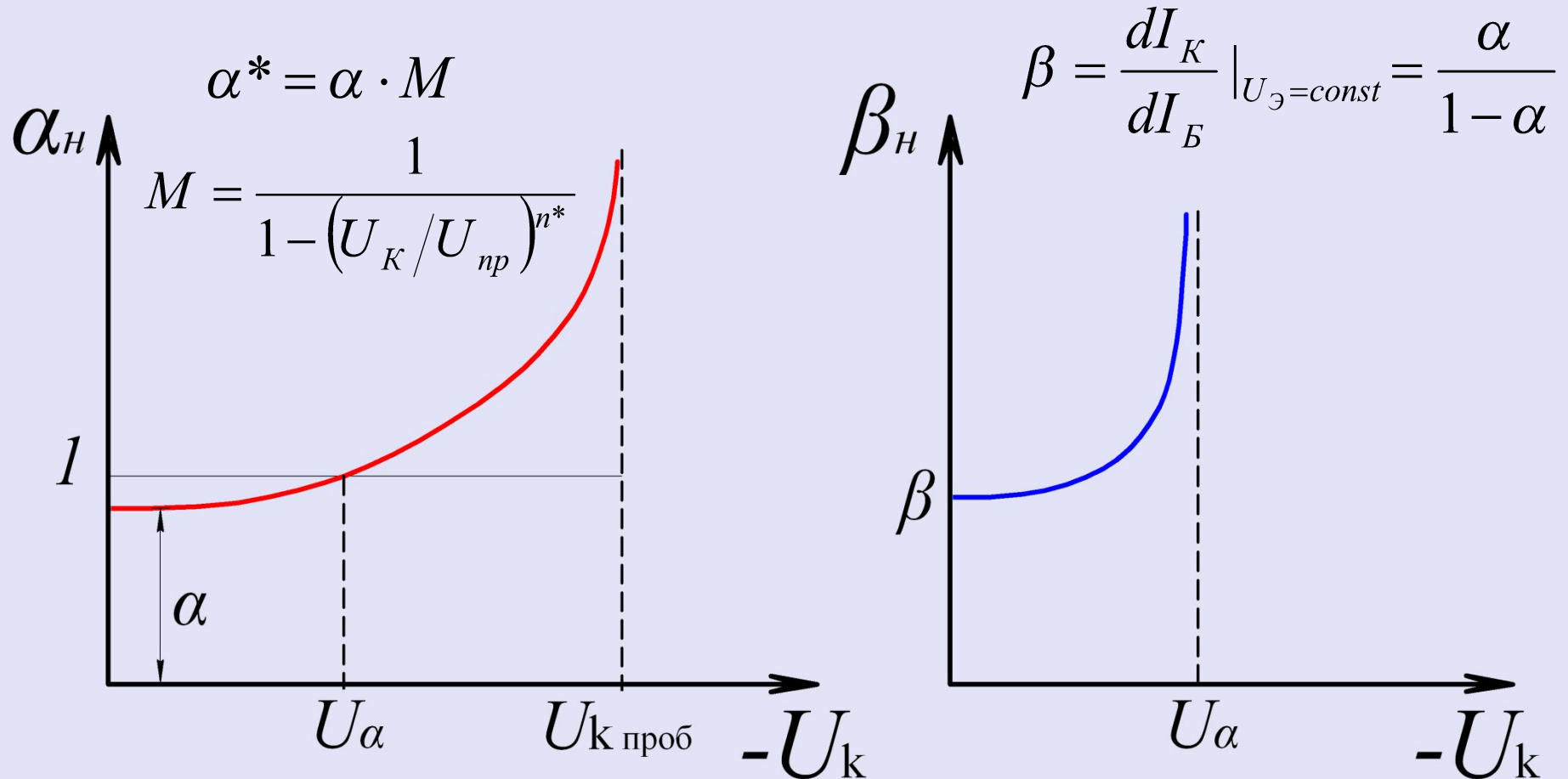
$$r_k = \frac{dU_k}{dI_k} \Big|_{I_{\vartheta} = \text{const}}$$

$$\alpha = \left(ch \frac{W}{L_{pB}} \right)^{-1} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2 \right]^{-1} \cong 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2 \quad (5.10)$$

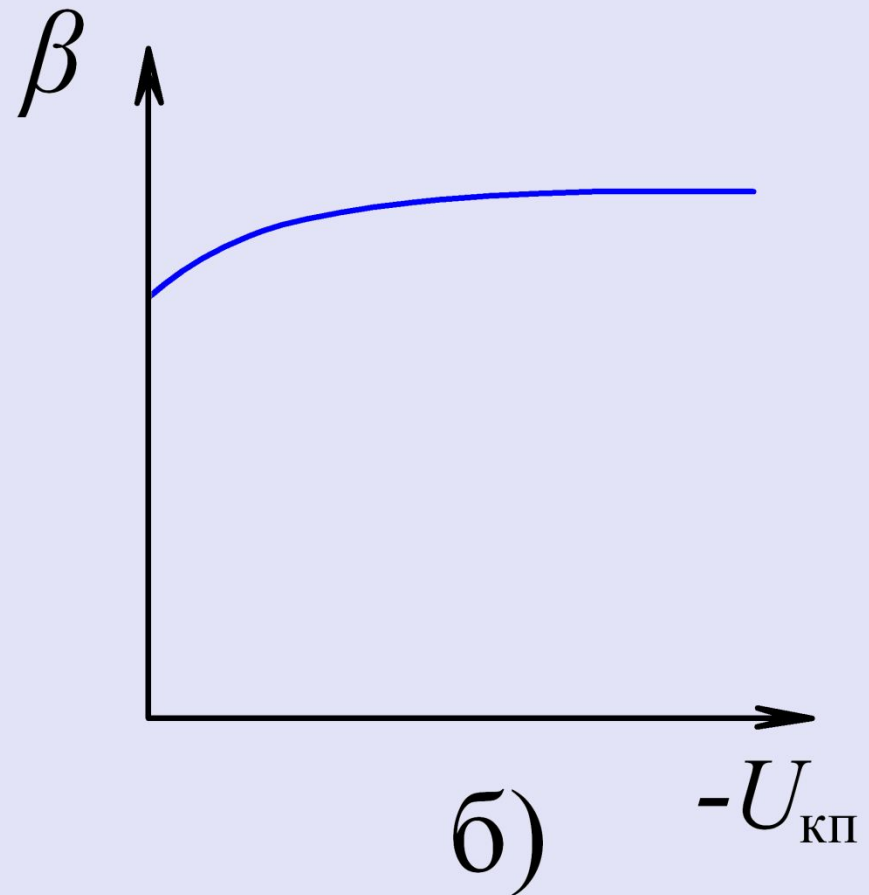
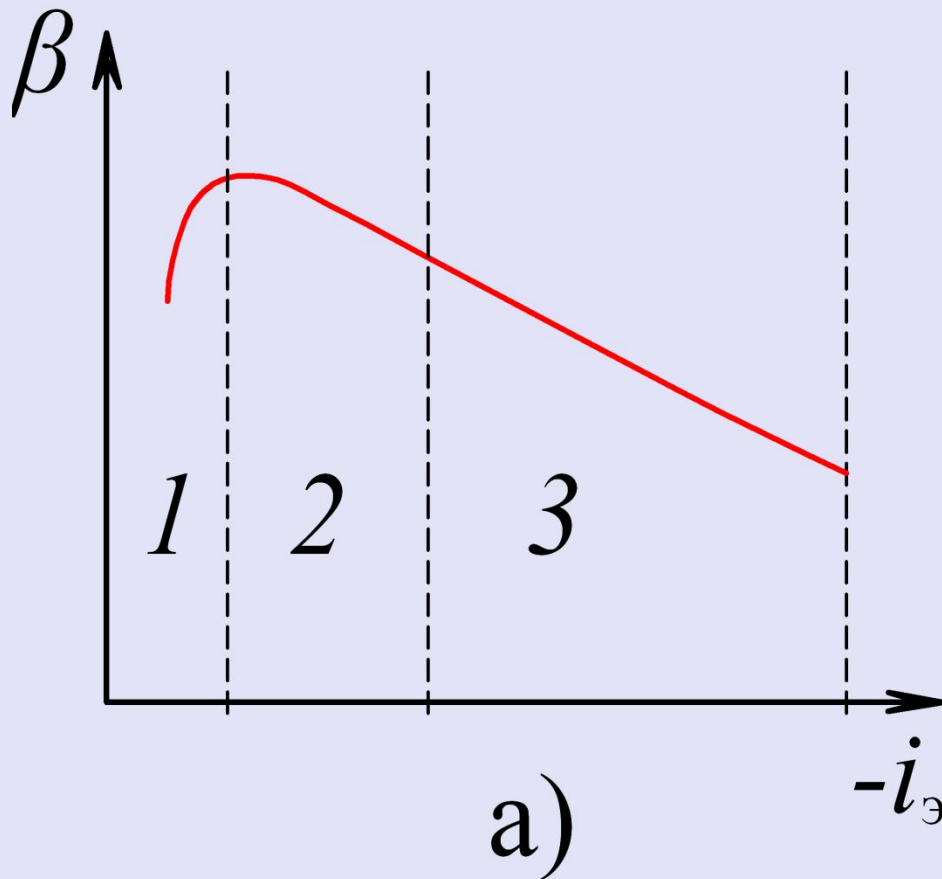
$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B} \Big|_{U_{\vartheta} = \text{const}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \left(ch \frac{W}{L_{pB}} \right)^{-1} \approx \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2 \right]^{-1} \cong 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W}{L_{pB}} \right)^2$$

$$I_{\vartheta} = I_{\vartheta 0} \left(\exp \frac{U_{\vartheta B}}{\phi_N} - 1 \right) \cong I_{\vartheta 0} \exp \frac{U_{\vartheta B}}{\phi_T} \quad (5.11)$$

Зависимость коэффициентов α и β от напряжения на коллекторе



Зависимость коэффициента усиления β от тока эмиттера и напряжения на коллекторе



$$I_{\ominus} = I_{\ominus 0} \left(\exp \frac{U_{\ominus B}}{\phi_N} - 1 \right) \cong I_{\ominus 0} \exp \frac{U_{\ominus B}}{\phi_T}$$

$$\frac{1}{r_{\ominus}} = \frac{dI_{\ominus}}{dU_{\ominus B}} \quad \frac{dI_{\ominus}}{dU_{\ominus B}} = \frac{I_{\ominus}}{\phi_T} \quad r_{\ominus} = \frac{\phi_T}{I_{\ominus}}$$

Пусть $I_{\ominus} = 1$ мА, $T = 300$ К, $\phi_T = 0.026$ В, $r_{\ominus} = 26$ Ом.

$$r_k = \frac{dU_k}{dI_k} \Big|_{I_{\ominus} = \text{const}} \quad r_{kO\ominus}^* = \frac{r_{kOБ}}{1 + \beta} \quad K_{oc} = \frac{dU_k}{dU_{\ominus}} \Big|_{I_{\ominus} = \text{const}}$$

Удобство физических параметров заключается в том, что они позволяют наглядно представить влияние конструктивно-технологических параметров транзистора на его эксплуатационные характеристики.

Так, например, уменьшение степени легирования базы или ее толщины должны приводить к росту r_b и, соответственно, к увеличению обратной связи в транзисторе.

К недостаткам физических параметров следует отнести то, что их нельзя непосредственно измерить и значения для них получают пересчетом из других параметров.

Температурная зависимость параметров биполярных транзисторов

$$\sigma = \sigma_{осн} + \sigma_{np} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) + \sigma'_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$r_{э} = \frac{\phi_T}{I_{э} + I_{э0}}$$

$$I_{э0} = \frac{q \cdot D_{nЭ} \cdot n_{p0Э}}{L_{nЭ}} + \frac{q \cdot D_{pБ} \cdot p_{n0Б}}{W}$$

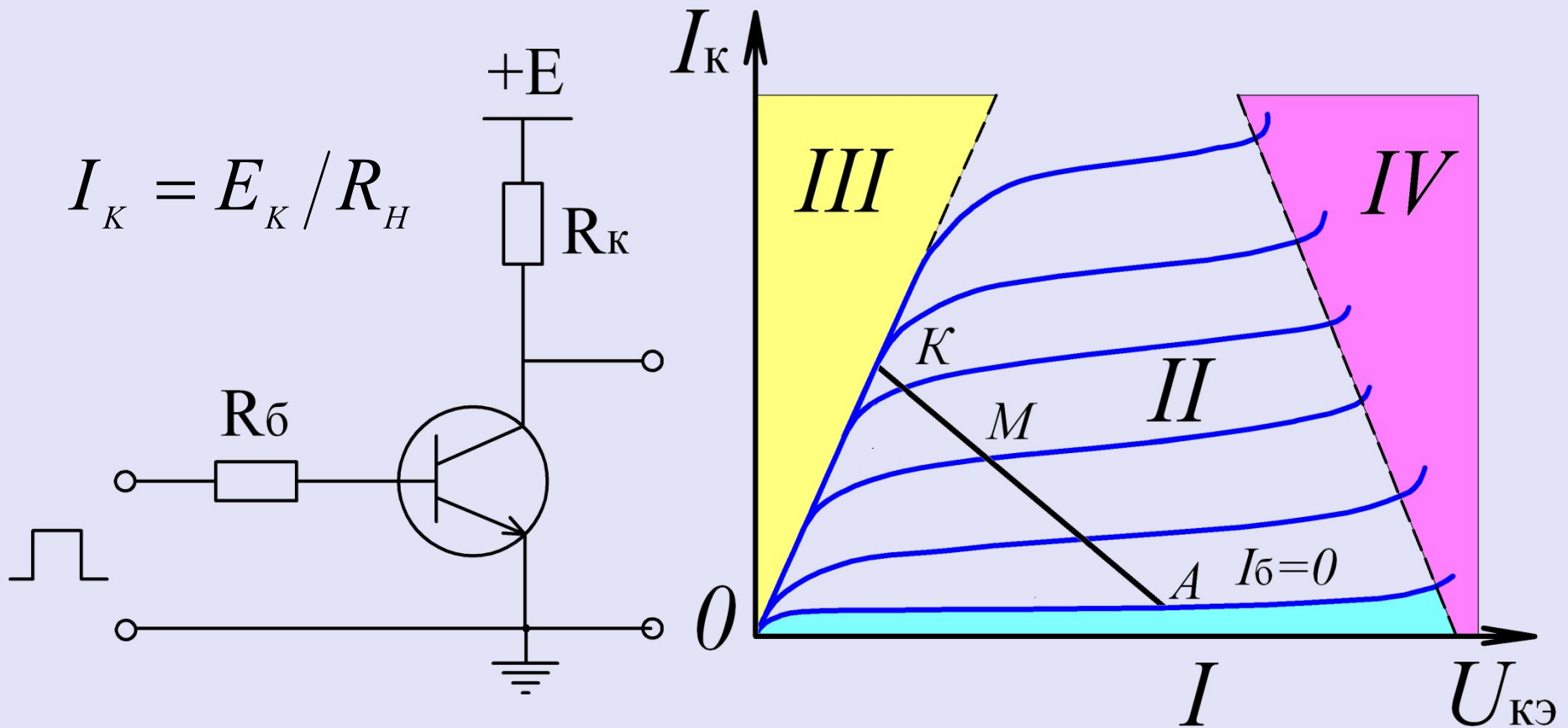
Сопротивление коллектора в диапазоне от -50 до + 50 С растёт, так как для этого диапазона характерно увеличение подвижности носителей (по механизму рассеяния на ионах примеси).

Коэффициент передачи α с ростом температуры увеличивается, что в первую очередь связано с увеличением диффузионной длины дырок.

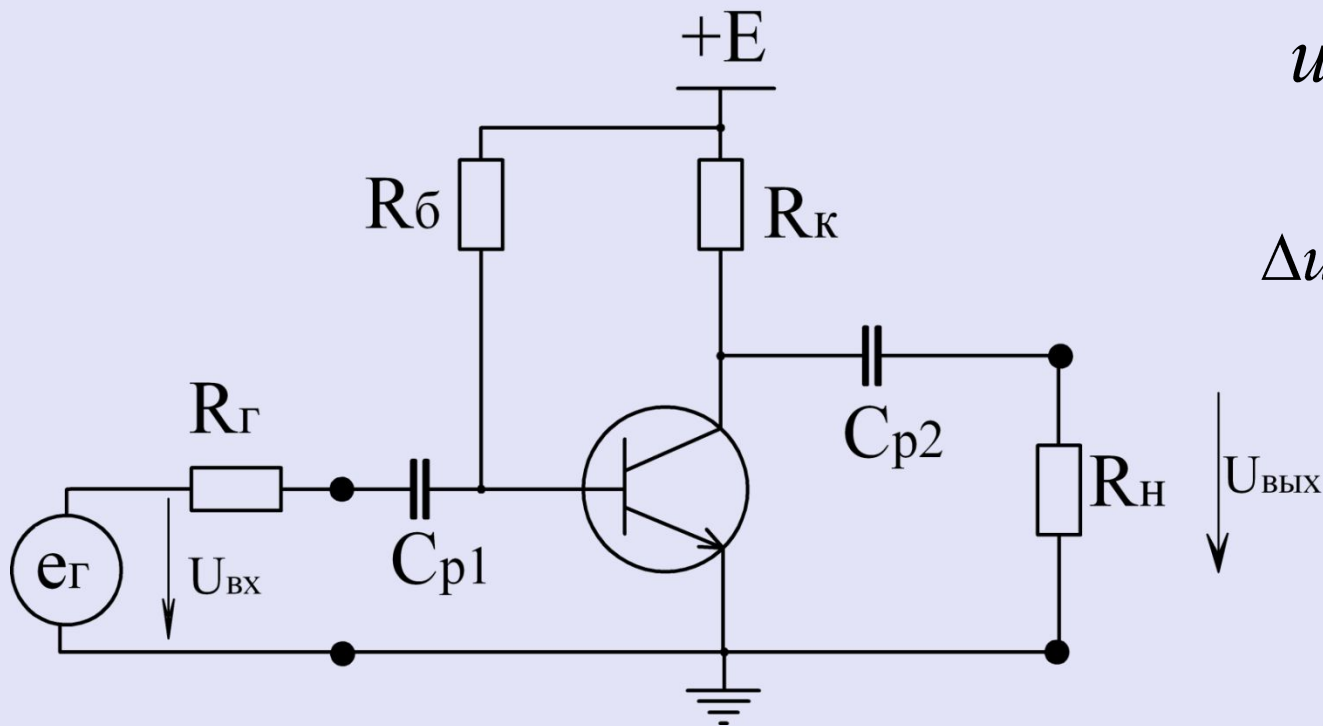
Температурная зависимость *коэффициента передачи* β связана в первую очередь с возрастанием времени жизни неосновных носителей заряда в базе транзистора с ростом температуры.

Для большинства биполярных транзисторов коэффициент β увеличивается по степенному закону .

Работа транзистора в импульсном режиме



Простейший усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме ОЭ

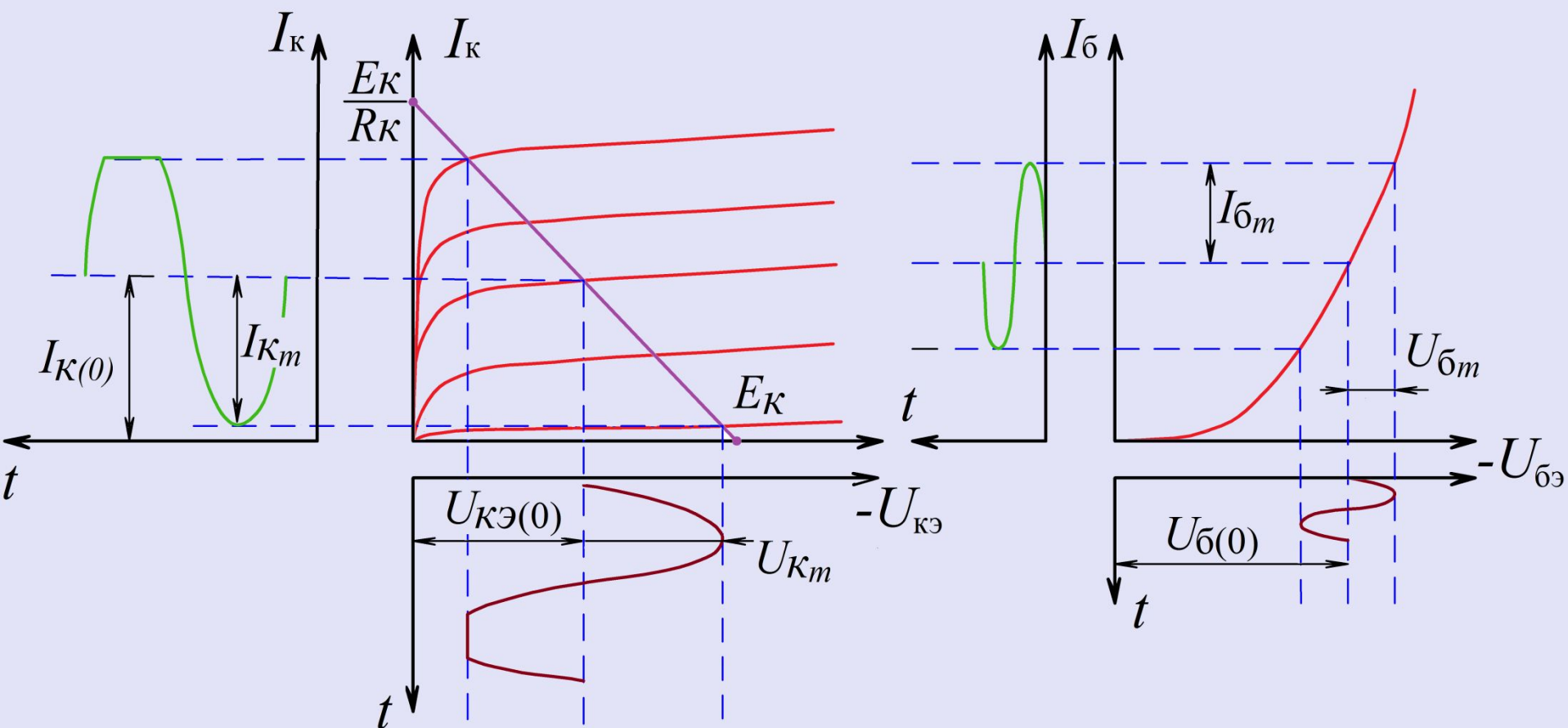


$$u_{\text{вых}} = R_{\text{H}} \cdot i_{\text{K}}$$

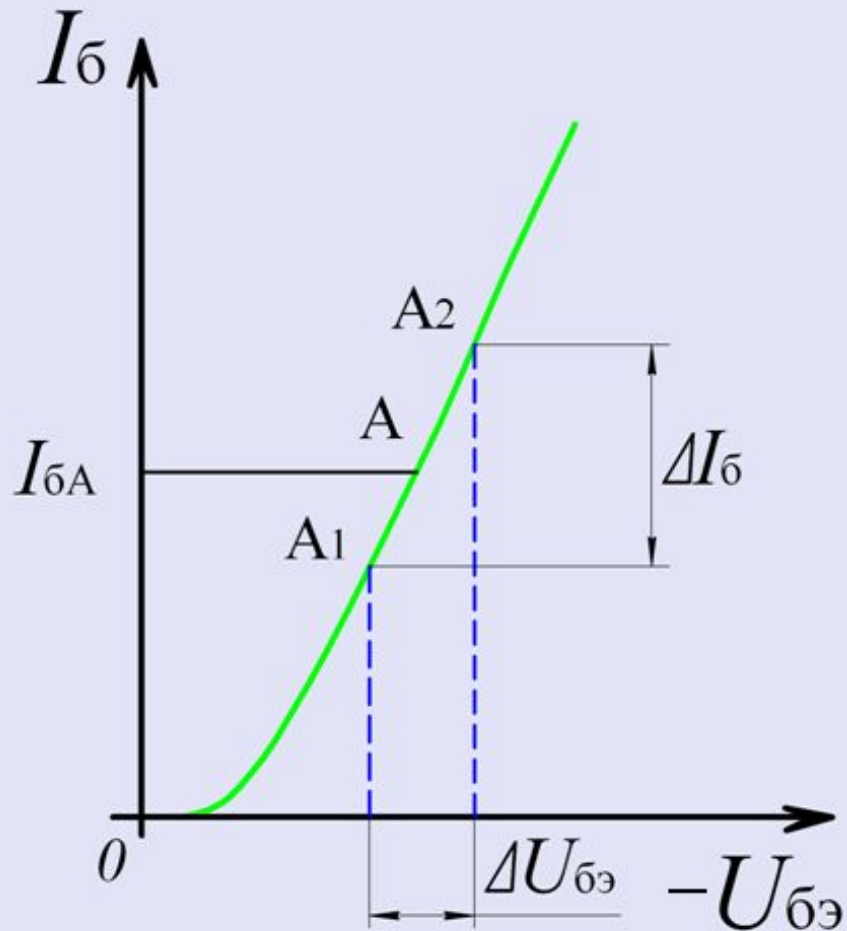
$$\Delta u_{\text{K}} = \frac{R_{\text{K}} \cdot r_{\text{вых}}}{R_{\text{K}} + r_{\text{вых}}} \cdot i_{\text{K}}$$

Схема с ОЭ поворачивает фазу на 180 градусов. Фаза выходного напряжения в схеме с ОБ по отношению к входному не меняется.

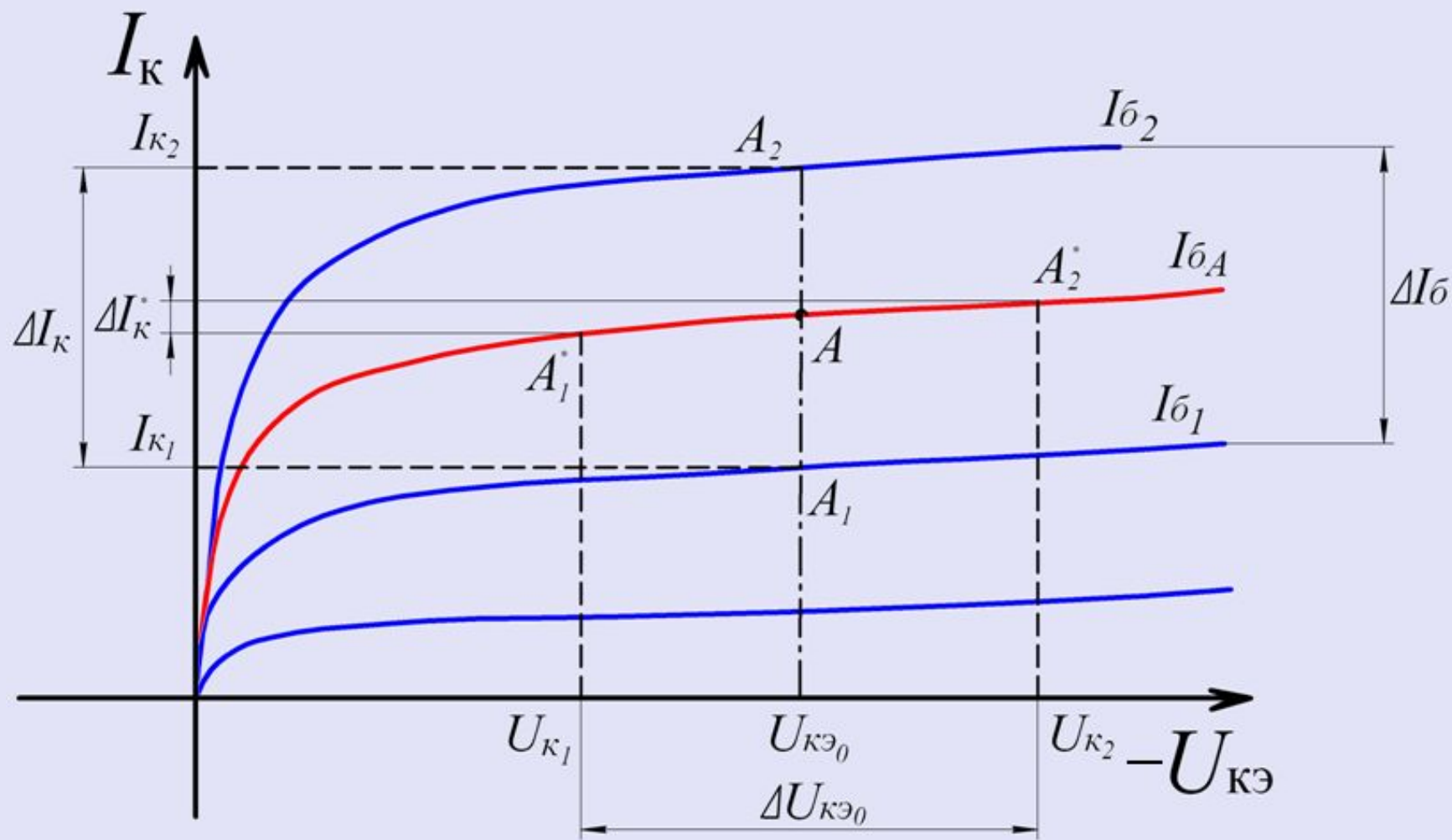
Иллюстрация работы усилительного каскада

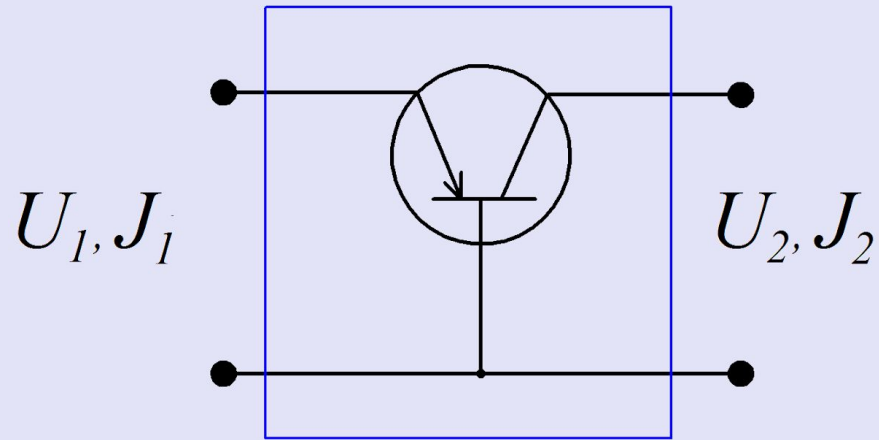


Линеаризация входных ВАХ в схеме с ОЭ

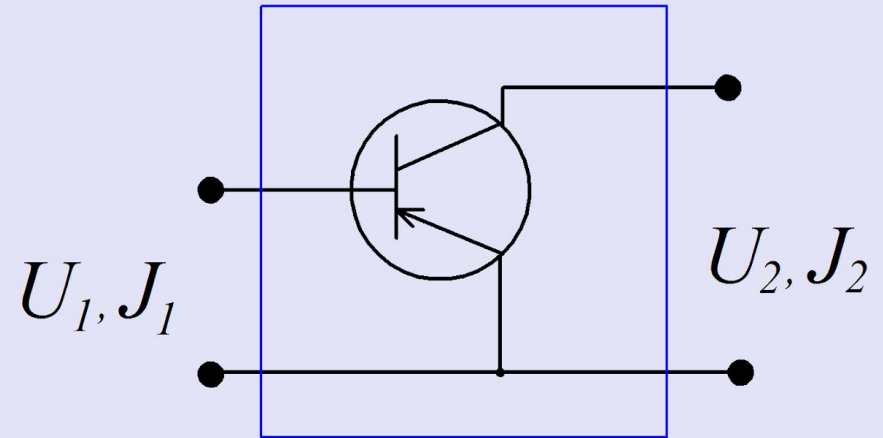


Линеаризация выходных ВАХ в схеме с ОЭ





$$U_1 = f(I_1, I_2)$$



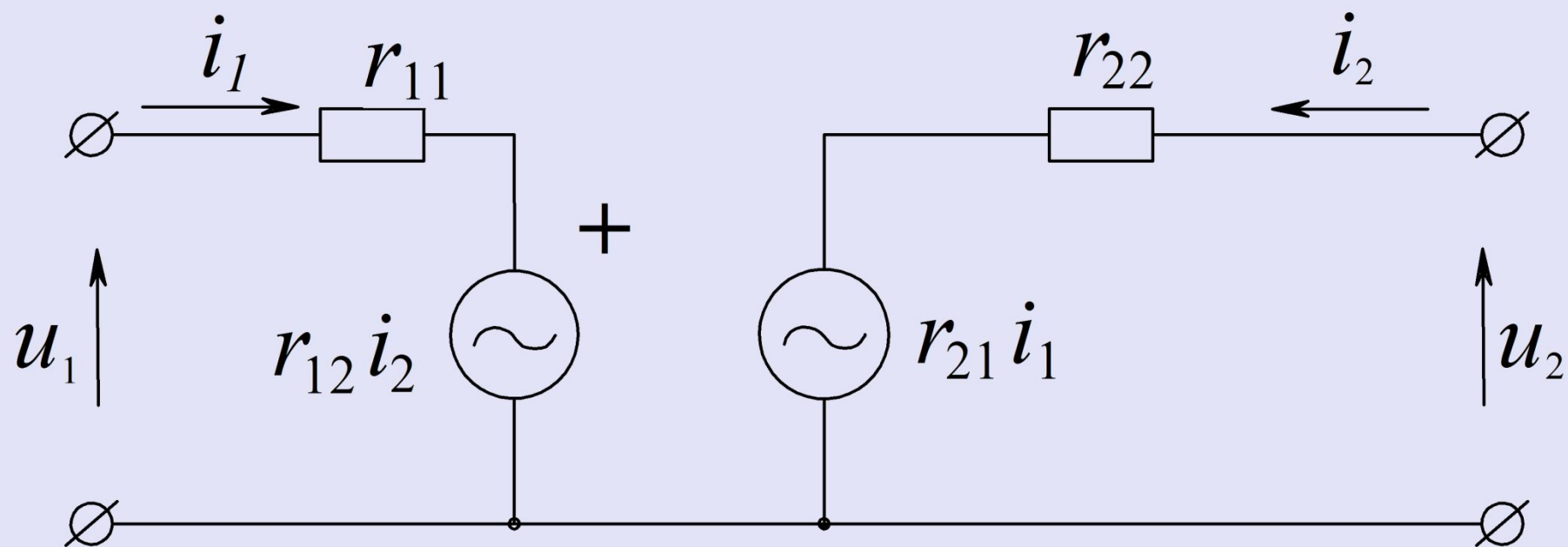
$$U_2 = f(I_1, I_2)$$

Если на постоянные составляющие токов и напряжений наложены достаточно малые сигналы переменного напряжения u или i , то их амплитуды (или действующие значения) можно рассматривать как малые приращения постоянных составляющих.

В зависимости от того, какие из этих параметров выбраны в качестве входных, а какие в качестве выходных, можно построить три системы формальных параметров транзистора как четырехполюсника.

Это системы r -параметров, g -параметров и h -параметров.

Эквивалентная схема транзистора для системы r -параметров



Система r -параметров

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial I_2} dI_2$$

$$u_1 = r_{11}i_1 + r_{12}i_2$$

$$dU_2 = \frac{\partial U_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_2}{\partial I_2} dI_2$$

$$u_2 = r_{21}i_1 + r_{22}i_2$$

Описание r -параметров

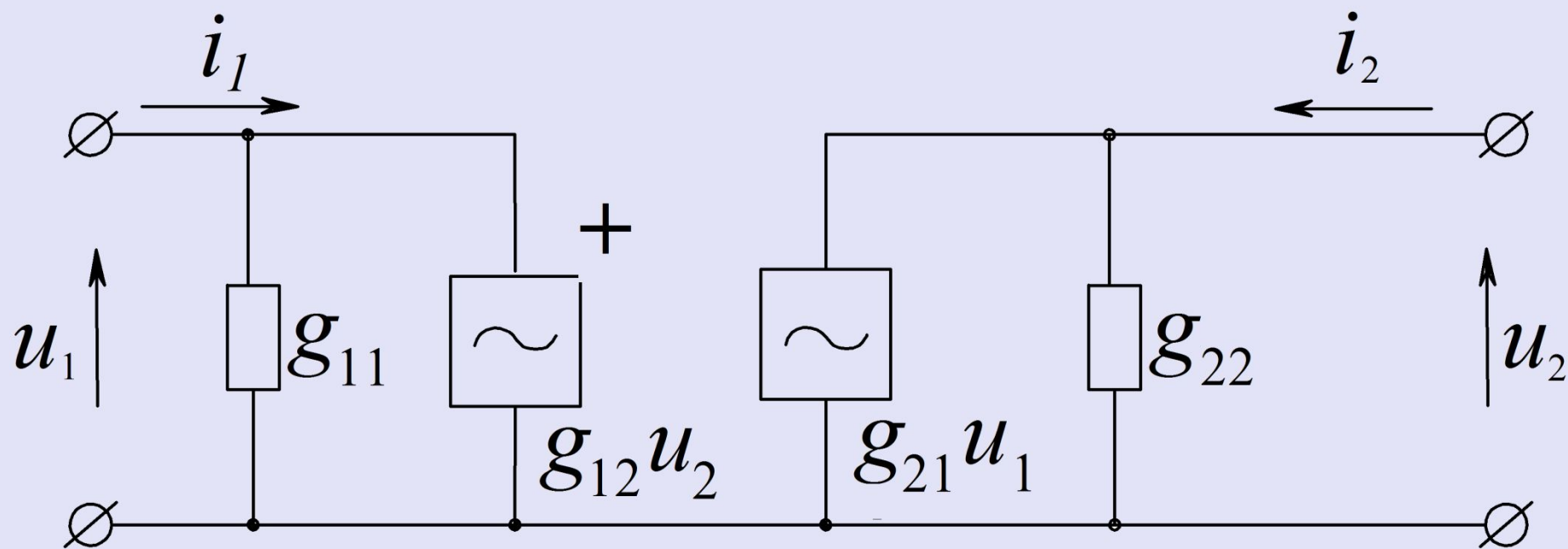
$r_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{i_2=0}$ – входное сопротивление транзистора в режиме ХХ в выходной цепи.

$r_{12} = \frac{u_1}{i_2} \Big|_{i_1=0}$ – сопротивление обратной связи в режиме ХХ во входной цепи.

$r_{21} = \frac{u_2}{i_1} \Big|_{i_2=0}$ – сопротивление прямой передачи сигнала, измеренное в режиме ХХ в выходной цепи.

$r_{22} = \frac{u_2}{i_2} \Big|_{i_1=0}$ – выходное сопротивление транзистора, измеренное в режиме ХХ во входной цепи.

Эквивалентная схема для g -параметров



Система g -параметров

$$I_1 = f(U_1, U_2) \quad I_2 = f(U_1, U_2)$$

$$dI_1 = \frac{\partial I_1}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_1}{\partial U_2} dU_2$$

$$i_1 = g_{11}u_1 + g_{12}u_2$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2$$

$$i_2 = g_{21}u_1 + g_{22}u_2$$

Описание g -параметров

$g_{11} = \frac{i_1}{u_1} \Big|_{u_2=0}$ – входная проводимость транзистора при КЗ на выходе.

$g_{12} = \frac{i_1}{u_2} \Big|_{u_1=0}$ – проводимость обратной передачи при КЗ на входе.

$g_{21} = \frac{i_2}{u_1} \Big|_{u_2=0}$ – проводимость прямой передачи, которая характеризует влияние входного напряжения на выходной ток при КЗ на выходе.

$g_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{u_1=0}$ – выходная проводимость транзистора при КЗ на входе.

Следует особо подчеркнуть, что $r_{ij} \neq \frac{1}{g_{ij}}$, так как r -

параметры измеряются в режиме ХХ, а g -параметры – в режиме КЗ на входе и выходе транзистора.

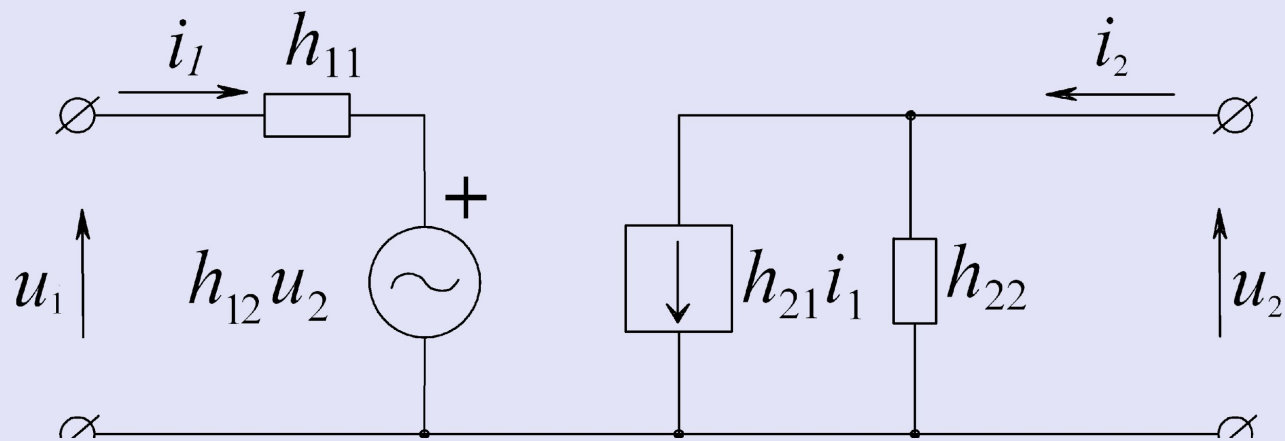
Поскольку при измерениях задаются напряжения, необходимо осуществлять режим генератора напряжения, т.е. сопротивление генератора на частоте сигнала должно быть много меньше входного или выходного сопротивления транзистора.

Система h -параметров

Система h -параметров используется как комбинированная система из двух предыдущих, причем из соображений удобства измерения параметров биполярного транзистора выбирается режим короткого замыкания на в ($u_2=0$) и режим холостого хода на входе ($i_1=0$).

Поэтому для системы h -параметров в качестве входных параметров задаются ток i_1 и напряжение u_2 , а в качестве выходных параметров рассчитываются ток i_2 и напряжение u_1 , $U_1 = f_1(I_1, U_2)$, $I_2 = f_2(I_1, U_2)$.

Эквивалентная схема для h -параметров



$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2 \quad (5.12)$$

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \quad (5.13)$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2 \quad (5.14)$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \quad (5.15)$$

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \quad h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \quad h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{K\Theta}} \Big|_{i_B = \text{const}}$$

$$h_{21} = \beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \Big|_{u_{K\Theta} = \text{const}}$$

$$h_{11\Theta} = \frac{\Delta u_{B\Theta}}{\Delta i_B} \Big|_{u_{K\Theta} = \text{const}}$$

$$h_{12\Theta} = \frac{\Delta u_{B\Theta}}{\Delta u_{K\Theta}} \Big|_{i_B = \text{const}}$$

$$\Delta i_K = I'_K - I_K(0)$$

$$\Delta u_{K\Theta} = U'_{K\Theta} - U_{K\Theta}(0)$$

$$\Delta i_B = I'_B - I_B(0)$$

$$\Delta u_{B\Theta} = U'_{B\Theta} - U_{B\Theta}(0)$$

$$\Delta u_{B\Theta} = U_{B\Theta}(0) - U'_{B\Theta}$$

$$\Delta u_{K\Theta} = U_{K\Theta}(0) - U'_{K\Theta}$$

Описание h -параметров

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

– входное сопротивление при КЗ на выходе.

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

– коэффициент обратной связи при ХХ во входной цепи.

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

– коэффициент прямой передачи тока при КЗ на выходе.

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

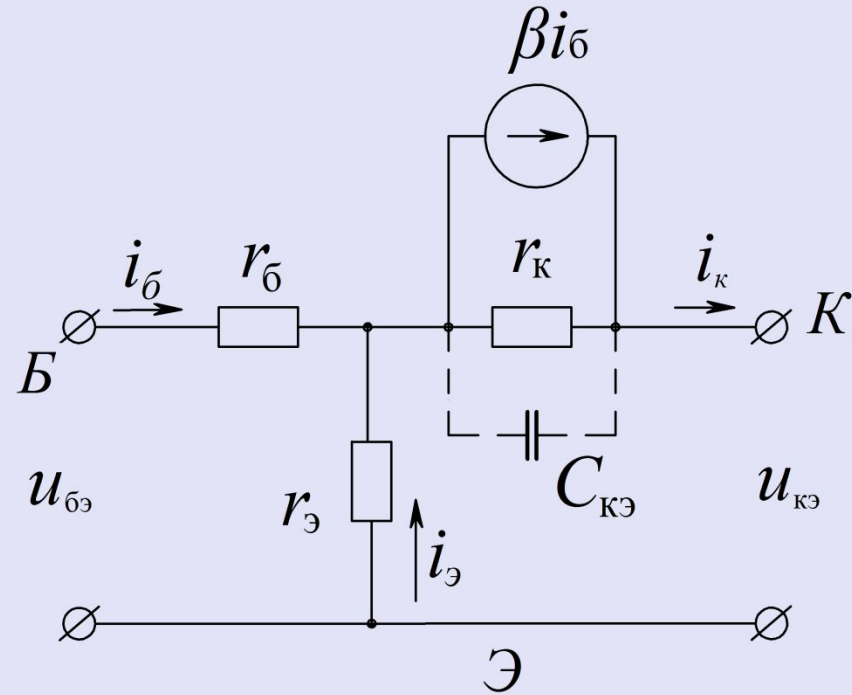
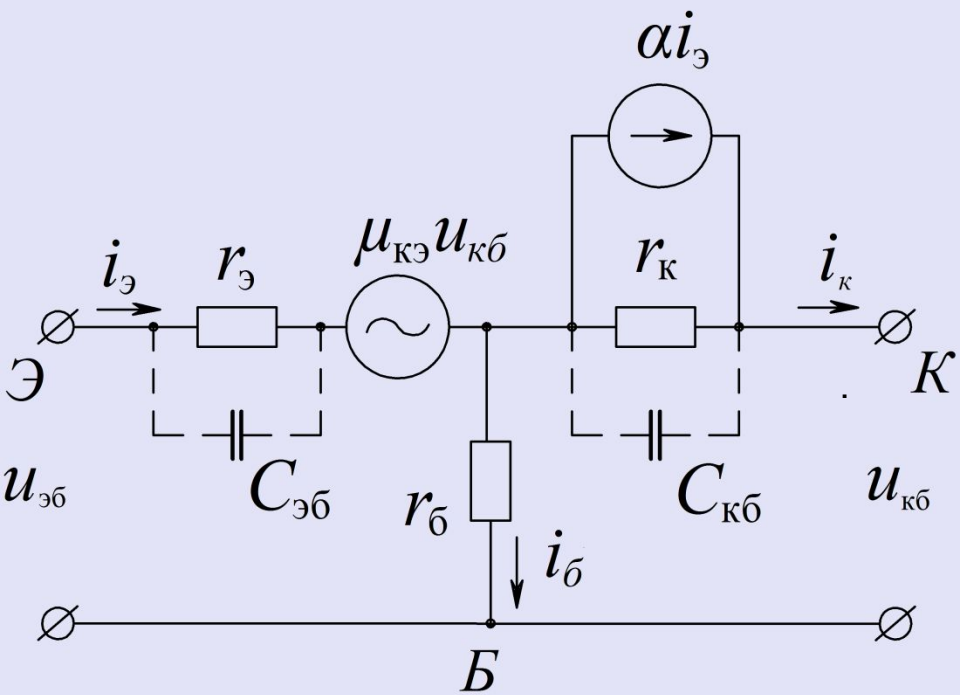
– выходная проводимость при ХХ во входной цепи транзистора.

В качестве примера определим значения $h_{11Э}$, $h_{12Э}$, $h_{21Э}$, $h_{22Э}$ – параметров транзистора в рабочей точке, задаваемой величинами $I_B(0)$, $I_K(0)$, $U_{БЭ}(0)$, $U_{КЭ}(0)$.

Затем, задавая переменные сигналы тока во входную и выходную цепи, выполнить измерения соответствующих значений напряжений, которые позволят рассчитать малосигнальные параметры транзистора.

Поскольку задаются токи, необходимо осуществлять режим генератора тока, т.е. входное или выходное сопротивление транзистора на частоте сигнала должно быть много меньше сопротивления генератора сигнала.

T-образная эквивалентная схема транзистора



$$i_K = \frac{u_K}{r_K + r_э} + \alpha \cdot i_э$$

При ХХ в базе $i_э = i_к$

При ХХ на входе ($i_Б = 0$)

Расчёт для схемы с ОЭ

При ХХ на входе $i_B = 0$ $i_K = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}} + \alpha \cdot i_{\text{Э}}$ $i_{\text{Э}} = i_K$

$$i_{\text{Э}} = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}} + \alpha \cdot i_{\text{Э}} \qquad i_{\text{Э}}(1 - \alpha) = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}}$$

Учитывая, что $r_{\text{Э}} \ll r_K$,

$$i_{\text{Э}} = \frac{u_K}{r_K \cdot (1 - \alpha)}$$

$$r_{\text{вых}} = \frac{u_K}{i_K} = \frac{u_K}{\alpha i_{\text{Э}}} = r_K(1 - \alpha) \qquad r_{\text{вых}} = r_K^* = r_K(1 - \alpha)$$

Связь h -параметров биполярного транзистора с дифференциальными параметрами на примере схемы с ОБ

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0} \quad - \quad \text{входное сопротивление при коротком замыкании на выходе.}$$

Полагая в эквивалентной схеме выходное напряжение $U_{кб}=0$ и считая заданным входной ток эмиттера найдем напряжение на входе:

$$u_{ЭБ} = i_{Э} \cdot (r_{э} + r_{б}) - \alpha \cdot i_{Э} \cdot \frac{r_{к} \cdot r_{б}}{r_{к} + r_{б}}$$

Учитывая, что $r_k \gg r_6$,

$$u_{ЭБ} = i_{Э} \cdot (r_{Э} + r_6) - \alpha \cdot i_{Э} \cdot r_6$$

Входное сопротивление:

$$h_{11Б} = \frac{u_{Э}}{i_{Э}} = \frac{i_{Э} \cdot (r_{Э} + r_6) - \alpha \cdot i_{Э} \cdot r_6}{i_{Э}} = r_{Э} + r_6 - \alpha \cdot r_6 = r_{Э} + r_6 \cdot (1 - \alpha)$$

Найдем $i_{Э}$ с помощью второго уравнения Кирхгофа для коллекторной цепи, полагая заданным входной ток :

$$u_{КБ} = i_{К} \cdot (r_{К} + r_6) - \alpha \cdot i_{Э} \cdot r_{К}$$

Коэффициент обратной связи по напряжению при ХХ на входе ($i_{\text{Э}} = 0$):

$$h_{12B} \Big|_{i_{\text{Э}}=0} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_{\text{ЭБ}}}{u_{\text{КБ}}} = \frac{i_{\text{К}} \cdot r_{\text{б}}}{i_{\text{К}} \cdot (r_{\text{К}} + r_{\text{б}})} = \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{К}} + r_{\text{б}}} \cong \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{К}}}$$

$$h_{21B} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{\text{К}}}{i_{\text{Э}}} \Big|_{u_{\text{КБ}}=0} \quad i_{\text{К}} = \frac{\alpha \cdot i_{\text{Э}} \cdot r_{\text{К}}}{(r_{\text{К}} + r_{\text{б}})}$$

$$h_{21B} = \frac{-\alpha \cdot i_{\text{Э}} \cdot r_{\text{К}}}{i_{\text{Э}} \cdot (r_{\text{К}} + r_{\text{б}})} = -\alpha \cdot \frac{r_{\text{К}}}{r_{\text{К}} + r_{\text{б}}} \cong -\alpha \quad h_{22B} = \frac{i_{\text{К}}}{u_{\text{К}}} \Big|_{i_{\text{Э}}=0} = \frac{1}{r_{\text{К}} + r_{\text{б}}} \cong \frac{1}{r_{\text{К}}}$$

Сравнение h -параметров для различных схем включения транзистора

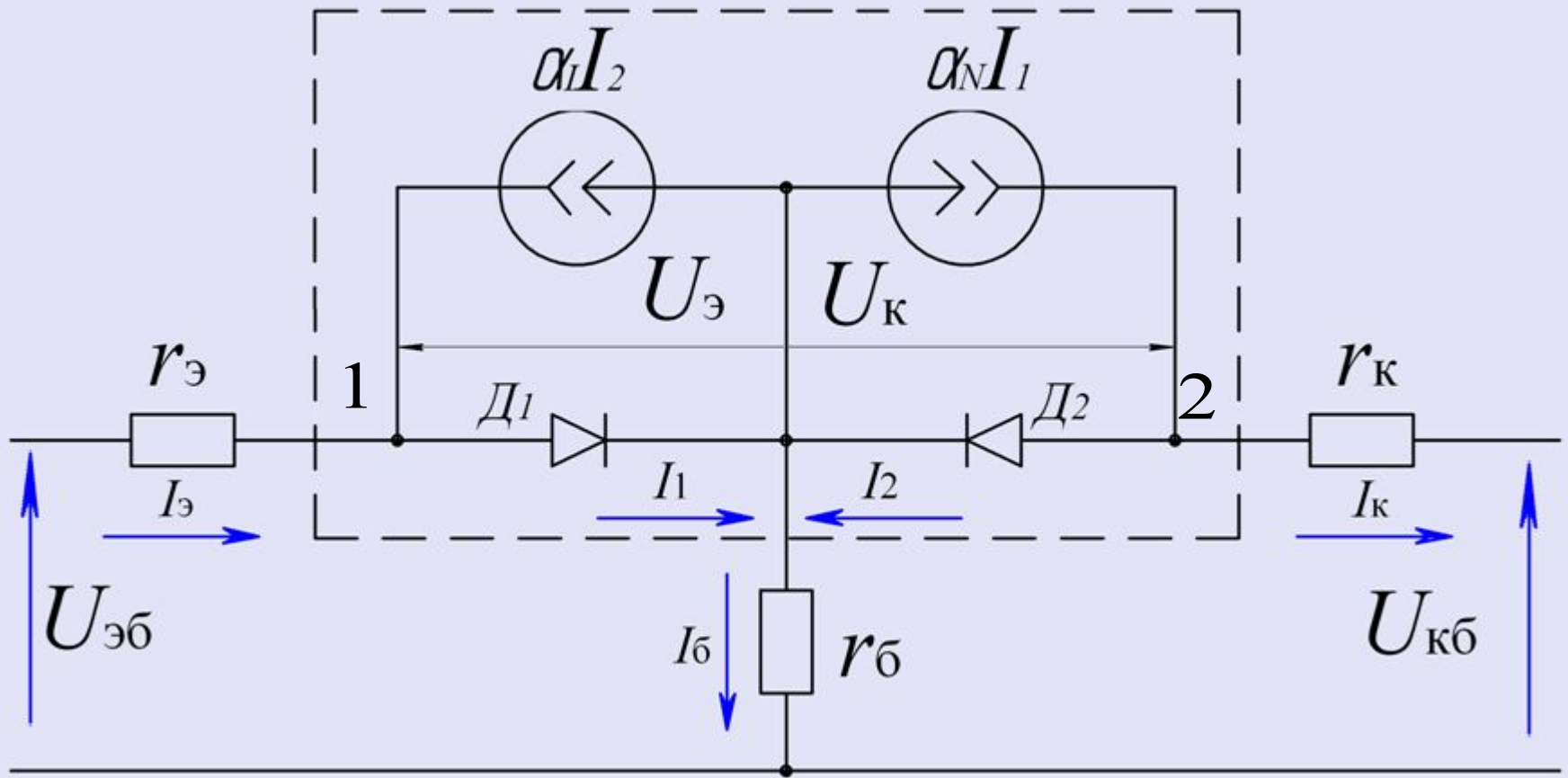
Режим с ОБ	Режим с ОЭ
$h_{11Б} = r_{\vartheta} + r_{\bar{\delta}}(1 - \alpha)$	$h_{11\vartheta} = r_{\bar{\delta}} + r_{\vartheta}(1 + \beta)$
$h_{12Б} = \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa}}$	$h_{12\vartheta} = \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa}^*}$
$h_{21Б} = -\frac{i_{\kappa}}{i_{\vartheta}} \Big _{u_{\kappa}=0} = -\alpha \frac{r_{\kappa}}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong -\alpha$	$h_{21\vartheta} = \beta$
$h_{22Б} = \frac{i_{\kappa}}{u_{\kappa}} \Big _{i_{\vartheta}=0} = \frac{1}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong \frac{1}{r_{\kappa}}$	$h_{22\vartheta} \cong \frac{1}{r_{\kappa}^*}$

Формулы Эберса-Молла

Основной моделью биполярного транзистора считается модель, справедливая для любых токов (как малых, так и больших) и предложенная Дж.Дж. Эберсом и Дж.Л. Моллом в 1954 г., и поэтому носящая их имя.

Эта модель построена на интерпретации работы транзистора как прибора на взаимодействующих *pn*-переходах *для произвольного сигнала*. Для примера рассмотрим *pn*p-транзистор

Схема замещения Эберса-Молла



Расчет модели Эберса-Молла

$$\begin{array}{l} \text{узел1} \\ I_1 = I_{\text{Э}} + \alpha_I \cdot I_2 \\ I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 \end{array} \quad (5.16) \quad \begin{array}{l} \text{узел2} \\ I_K + I_2 = \alpha_N \cdot I_1 \\ I_K = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 \end{array} \quad (5.17)$$

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 - \alpha_N \cdot I_1 + I_2 = I_1 \cdot (1 - \alpha_N) + I_2 \cdot (1 - \alpha_I)$$

$$\text{При } I_{\text{Э}} = 0: I_2 = I'_{K0} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.18)$$

$$\text{При } I_K = 0: I_1 = I'_{\text{Э}0} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.19)$$

$$I_K = \alpha_N \cdot I'_{\text{Э}0} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - I'_{K0} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.20)$$

Продолжение расчета

При $U_K = 0$ $I_2 = 0$

$$I_{\text{Э}} = I_1 = I'_{\text{Э0}} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.21)$$

При $U_{\text{Э}} = 0$ $I_1 = 0$

$$I_K = -I_2 = -I'_{K0} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.22)$$

$$0 = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 \Rightarrow I_2 = \alpha_N \cdot I_1 \Rightarrow I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_I \cdot \alpha_N \cdot I_1 = I_1 \cdot (1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)$$

$$I_1 = \frac{I_{\text{Э}}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} = I'_{\text{Э0}} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.23)$$

$$I_{\text{Э0}} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) = I'_{\text{Э0}} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) \cdot (1 - \alpha_I \cdot \alpha_N) \quad (5.24)$$

$$I'_{\text{Э0}} = \frac{I_{\text{Э0}}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} \quad (5.25)$$

$$I'_{K0} = \frac{I_{K0}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} \quad (5.26)$$

Окончательные формулы

$$I_{\text{Э}} = \frac{I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I \cdot I_{K0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.27)$$

$$I_K = \frac{\alpha_N \cdot I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.28)$$

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = \frac{I_{\text{Э}0} \cdot (1 - \alpha_N)}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0} \cdot (1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left(\exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.29)$$

Где

$$\alpha_N = \frac{dI_K}{dI_{\text{Э}}} = \left(1 + \frac{D_{n\text{Э}} \cdot n_{p0\text{Э}} \cdot L_{p\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} \cdot p_{n0\text{Б}} \cdot L_{n\text{Э}}} \cdot th \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{n\text{Э}} \cdot N_{a\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} \cdot N_{d\text{Э}}} \cdot \frac{W}{L_{n\text{Э}}} \right)^{-1} \quad (5.30)$$

$$\alpha_I = \frac{dI_{\text{Э}}}{dI_K} = \left(1 + \frac{D_{nK} \cdot n_{p0K} \cdot L_{p\text{Б}}}{D_{p\text{Б}} \cdot p_{n0\text{Б}} \cdot L_{nK}} \cdot th \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \cdot \left(ch \frac{W}{L_{p\text{Б}}} \right)^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{nK} \cdot N_{d\text{Б}}}{D_p \cdot N_{aK}} \cdot \frac{W}{L_{nK}} \right)^{-1} \quad (5.31)$$

В *npn*-транзисторе:

$$\alpha_N = \left[\left(1 + \frac{D_{p\text{Э}} \cdot N_{a\text{Б}} \cdot L_{n\text{Б}}}{D_{n\text{Б}} \cdot N_{d\text{Э}} \cdot L_{p\text{Э}}} \operatorname{th} \frac{W}{L_{n\text{Б}}} \right) \cdot \operatorname{ch} \left(\frac{W}{L_{n\text{Б}}} \right) \right]^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{p\text{Э}} N_{a\text{Б}}}{D_{n\text{Б}} N_{d\text{Э}}} \frac{W}{L_{p\text{Э}}} \right)^{-1}$$

$$\alpha_I = \left[\left(1 + \frac{D_{p\text{К}} N_{a\text{Б}} L_{n\text{Б}}}{D_{n\text{Б}} N_{d\text{К}} L_{p\text{К}}} \operatorname{th} \frac{W}{L_{n\text{Б}}} \right) \cdot \operatorname{ch} \left(\frac{W}{L_{n\text{Б}}} \right) \right]^{-1} \approx \left(1 + \frac{D_{p\text{К}} N_{a\text{Б}}}{D_n N_{d\text{К}}} \frac{W}{L_{p\text{К}}} \right)^{-1}$$

Строение интегрального биполярного pnp-транзистора

