

6. Транзисторы.

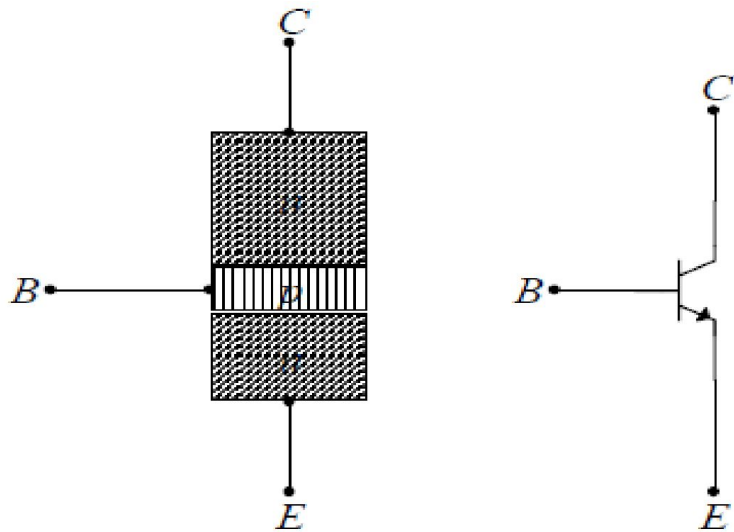
Транзистор (англ. **transistor**), полупроводниковый триод — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналом управлять током в электрической цепи.

Работа **биполярного транзистора**, основана на переносе зарядов одновременно двух типов, носителями которых являются электроны и дырки (от слова «би» — «два»).

Биполярные транзисторы (БТ) (международный термин — **BJT, bipolar junction transistor**).

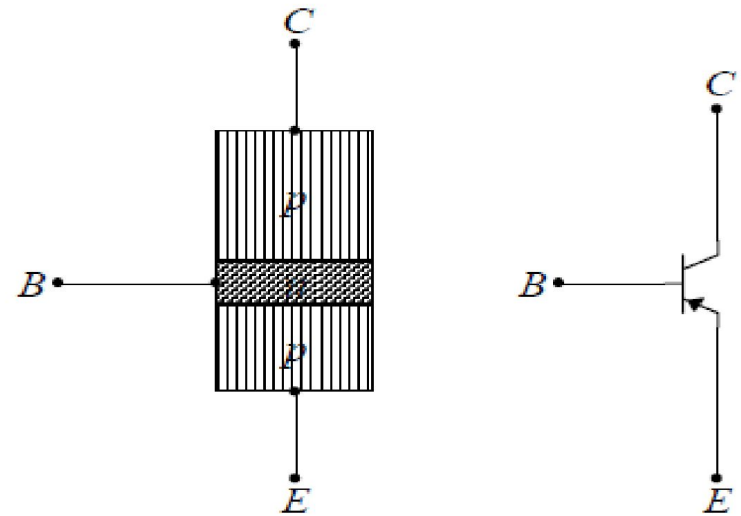
Биполярные транзисторы

$np + pn = npn$

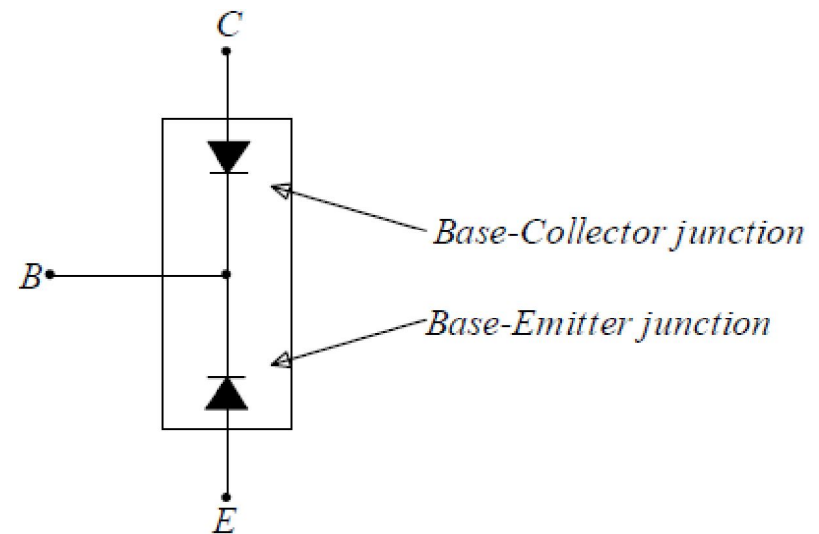
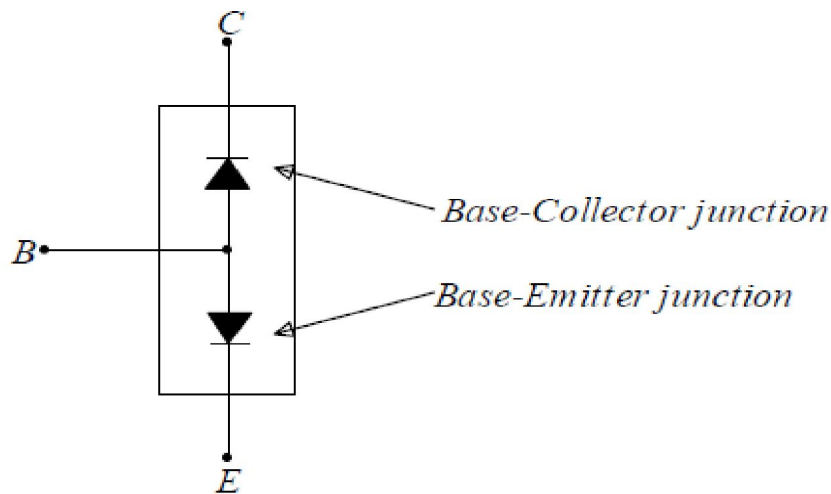


(a) *npn* transistor

$pn + np = pnp$

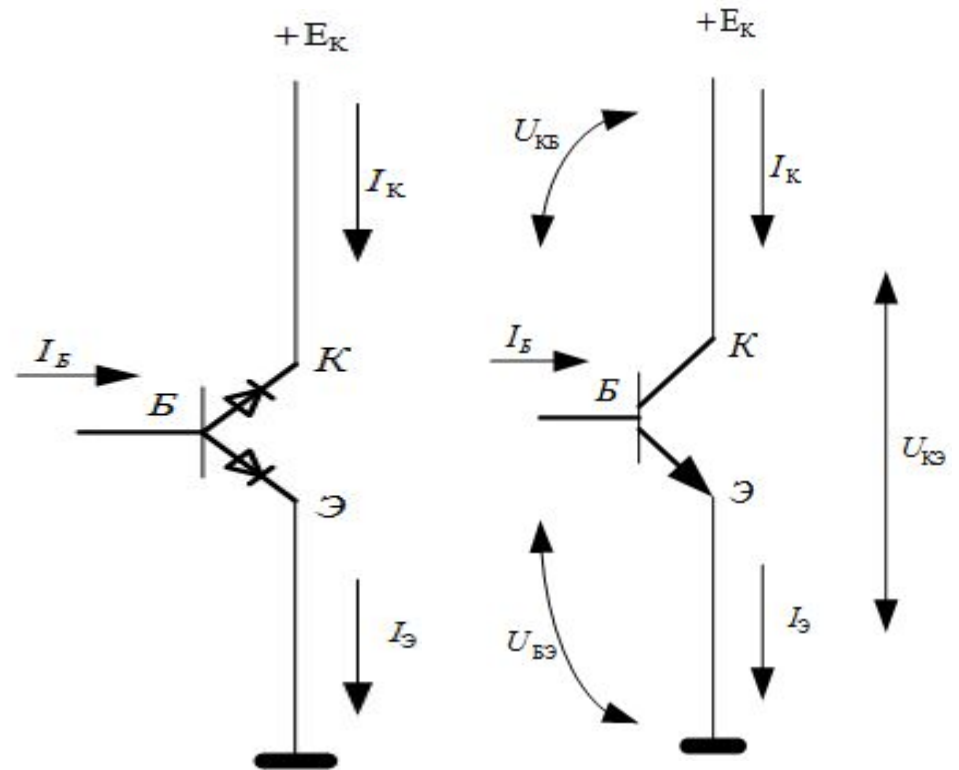
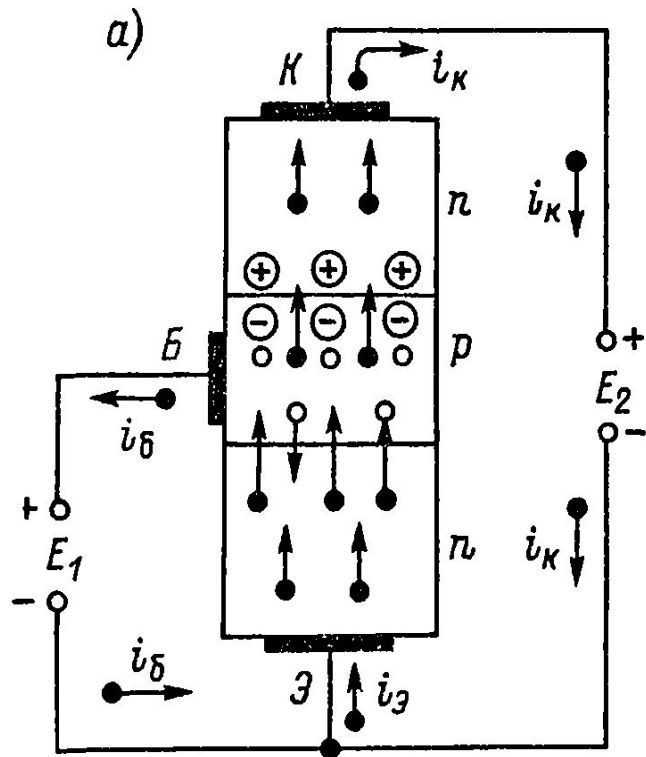


(b) *pnp* transistor



Процессы, протекающие в транзисторе в активном режиме

$$U_{K-Э} = U_{K-Б} + U_{Б-Э}. \quad U_{Б-Э} \ll U_{K-Б} \quad U_{K-Э} \approx U_{K-Б}.$$



$$i_Э = i_K + i_Б. \quad i_Б \ll i_Э, \quad i_K \approx i_Э.$$

$$i_{\mathcal{E}} = i_K + i_B; \quad i_K \approx \alpha i_{\mathcal{E}}; \quad \text{т.к. } i_K < i_{\mathcal{E}}; \quad \alpha < 1$$

$\alpha < 1$ - коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

$$i_K = \alpha(i_K + i_B);$$

$$i_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_B; \quad \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \gg 1$$

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

$\beta = \frac{i_K}{i_B} \gg 1$ - коэффициент передачи (усиления) тока базы

Пример

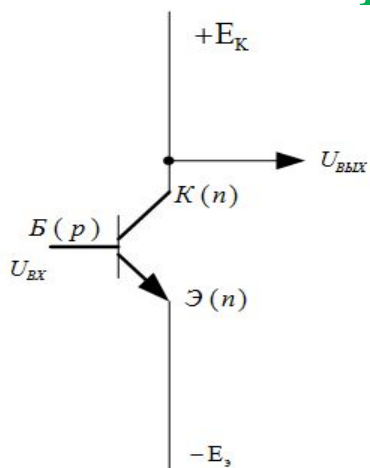
$$\alpha = 0,95 \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,95}{1 - 0,95} = 19$$

$$\alpha = 0,99 \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,99}{1 - 0,99} = 99$$

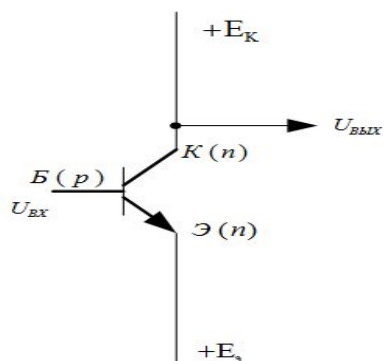
Незначительные изменения α приводят к существенным изменениям β .

$$\beta \approx 100, \alpha \approx 0,97 - 0,99$$

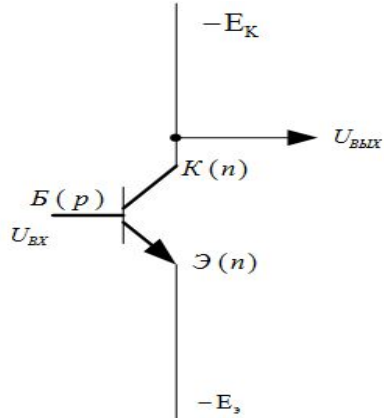
Режимы работы транзистора



Активный режим. На эмитерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный обратное. Основной режим работы транзистора.

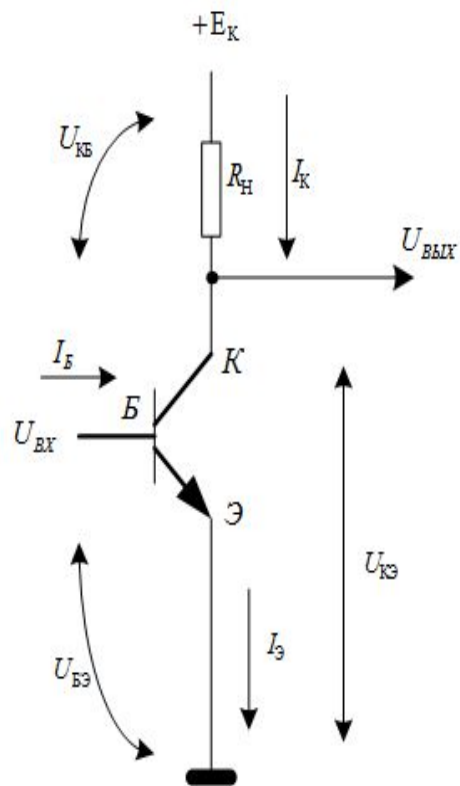


Режим отсечки. К обоим переходам поведены обратные напряжения и через них протекает незначительный ток, обусловленный движением неосновных носителей. Транзистор заперт.

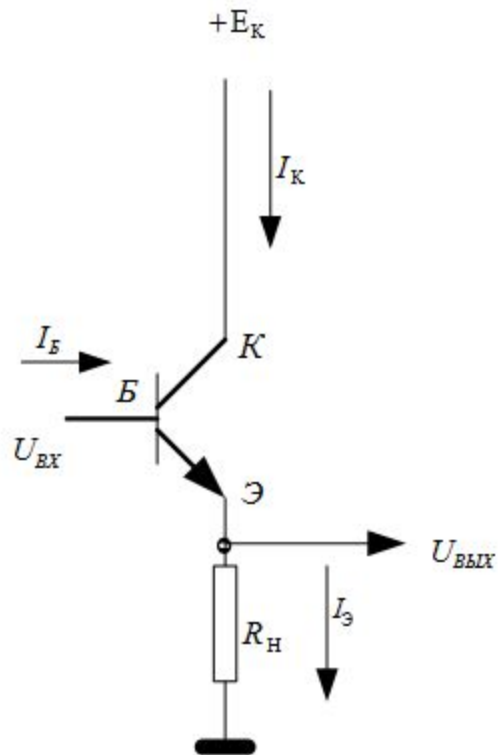


Режим насыщения. Оба перехода находятся под прямым напряжением. Ток в выходной цепи максимален и практически не регулируется током базы. Транзистор полностью открыт.

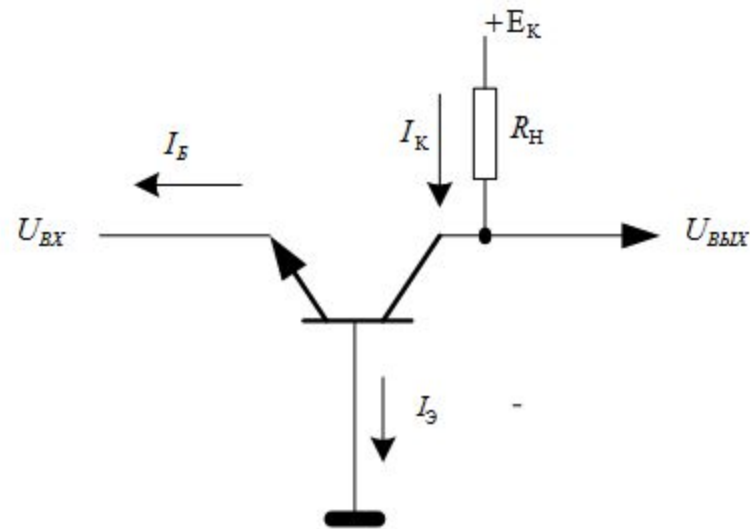
Схемы включения биполярного транзистора



ОЭ



ОК



ОБ

Статические характеристики транзистора

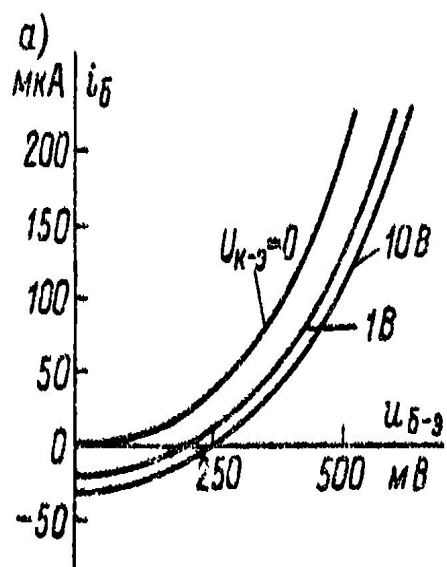


Рис.1. Входная характеристика

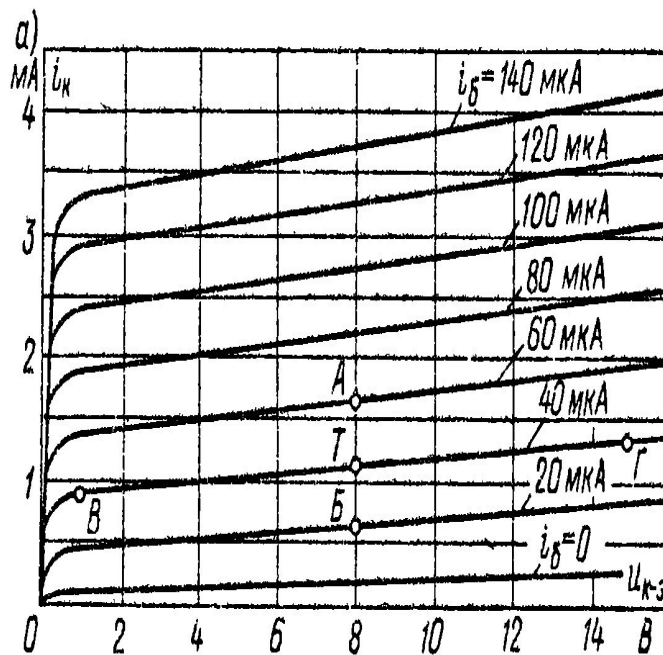


Рис.2. Семейство выходных характеристик

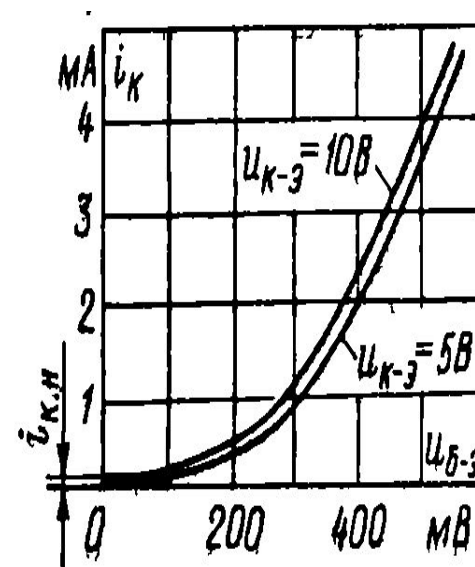
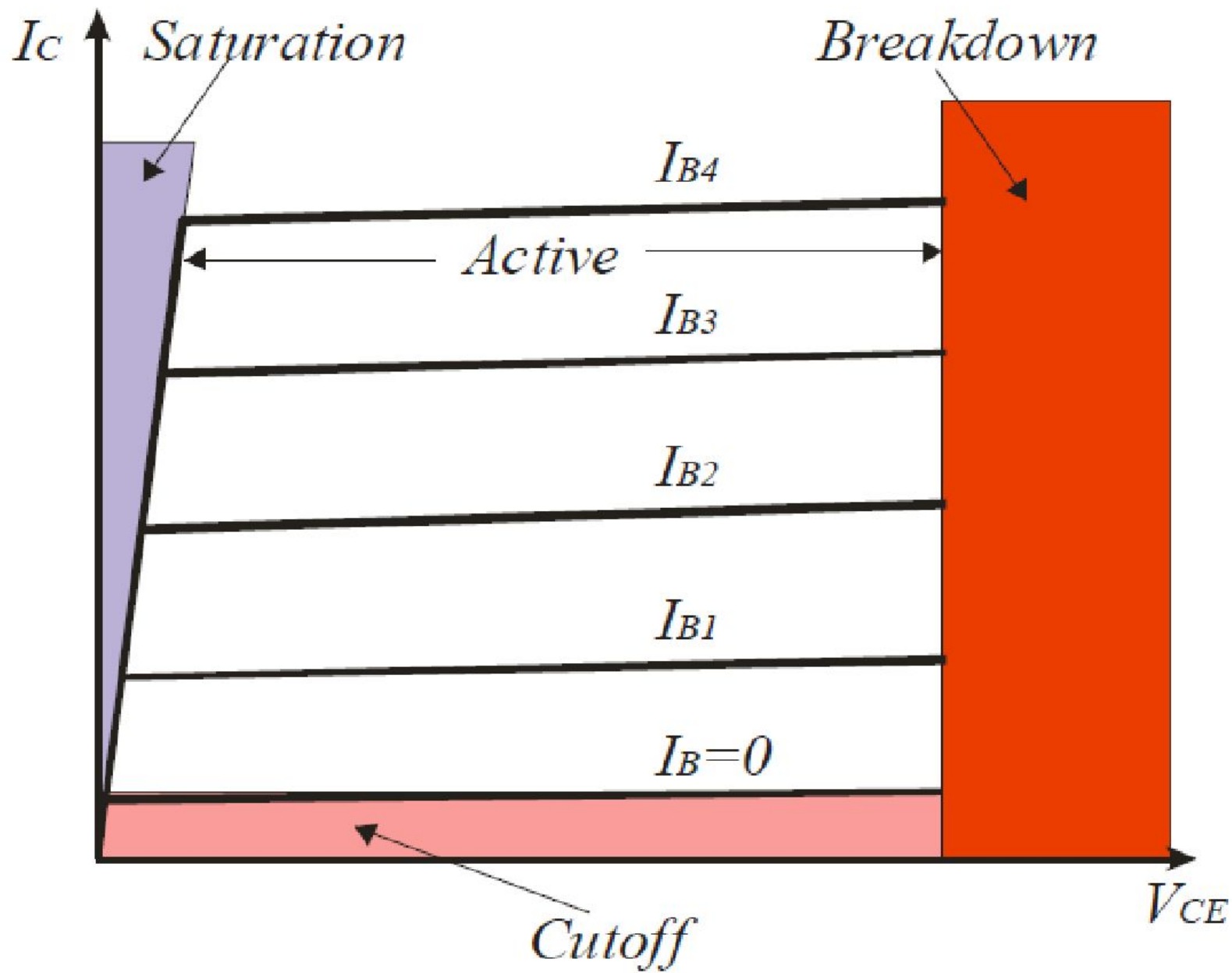
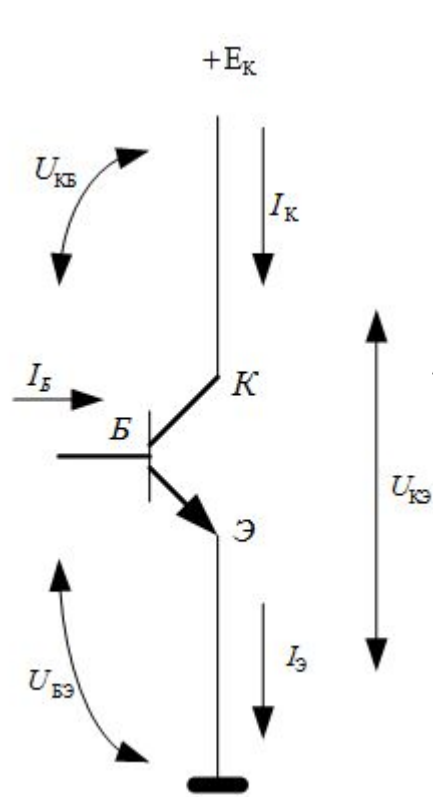


Рис.3. Передаточная х-ка



Основные соотношения токов и напряжений в схеме с общим эмиттером (режим покоя)



$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ} \quad I_{Э} = I_{К} + I_{Б}$$

$$I_{К} = \beta \cdot I_{Б} \quad I_{Э} = \beta I_{Б} + I_{Б} = (1 + \beta) I_{Б}$$

$$\beta = \frac{I_{К}}{I_{Б}} - \text{Коэффициент передачи (усиления) тока базы}$$

$$\beta \gg 1, \quad I_{Э} \approx \beta I_{Б}$$

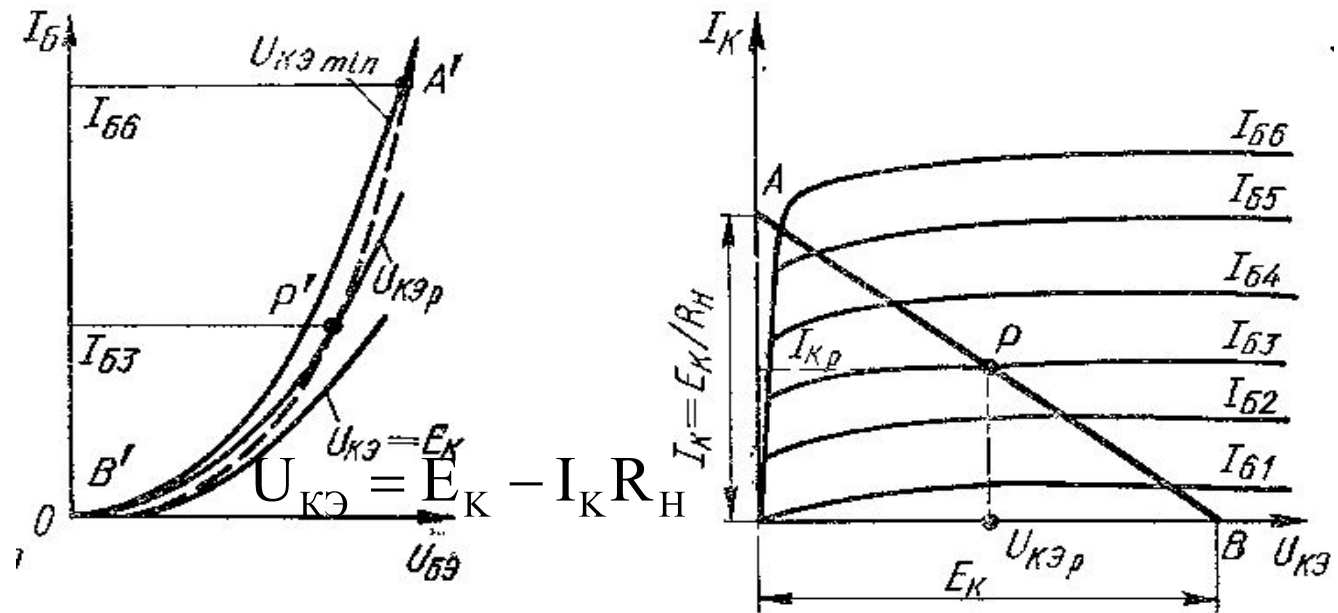
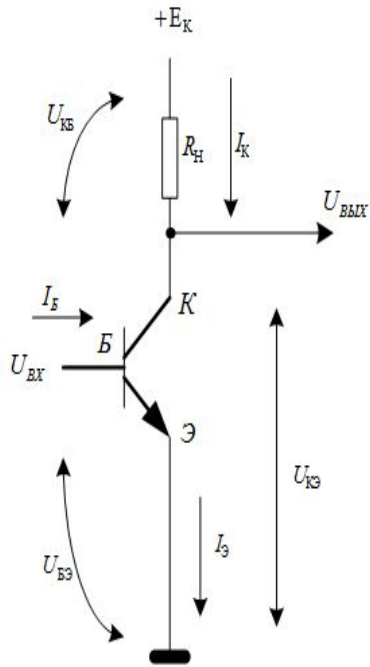
$$I_{К} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{Э} \quad \frac{\beta}{1 + \beta} = \alpha \leq 1 \quad I_{К} = \alpha I_{Э} \quad I_{К} \approx I_{Э}$$

α - Коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К} R_{Н}$$

$$\beta \approx 100, \quad \alpha \approx 0,97 - 0,99$$

Графо-аналитический метод выбора рабочей точки



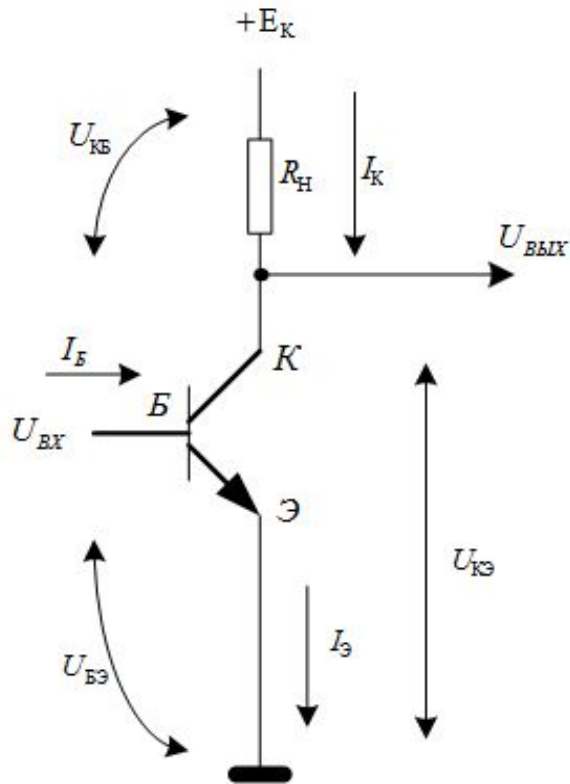
$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_H$$

1. $I_K = 0$, $U_{КЭ} = E_K$ – режим "отсечки"
2. $U_{КЭ} = 0$, $I_K = E_K / R_H$ – режим "насыщения"

Ток коллектора задается величиной сопротивления нагрузки (коллектора). Положение рабочей точки определяется током базы, который можно задать подачей смещения на базу .

Схемы включения биполярных транзисторов.

Схема с общим эмиттером



$r_{BX, OЭ}$ Входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ (приводится в паспорте)

Коэффициент усиления по току (высокий)

$$K_U = \frac{I_{BЫX}}{I_{BX}} = \frac{I_K}{I_B} = \beta \gg 1$$

Коэффициент усиления по напряжению (высокий)

$$K_U = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}} = \frac{I_K R_K}{I_B R_{BX}} = \frac{\beta R_K}{r_{BX, OЭ}} \gg 1$$

Входное сопротивление (высокое)

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{I_B r_{BX, OЭ}}{I_B} = r_{BX, OЭ} \gg 1$$

Выходное сопротивление (высокое)

$$R_{BЫX} \approx R_K$$

Схема с общим коллектором

Коэффициент передачи по току (высокий)

$$K_I = \frac{I_{\mathcal{E}}}{I_B} = \beta + 1 \quad I_{\mathcal{E}} = \beta I_B + I_B = (1 + \beta) I_B$$

Коэффициент усиления по напряжению (низкий)

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} \approx 1$$

Входное сопротивление (высокое)

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_B r_{ВХ,ОЭ}}{I_B} = r_{ВХ,ОЭ} \gg 1$$

Выходное сопротивление (низкое)

$$R_{ВЫХ} \approx R_{\mathcal{E}}$$

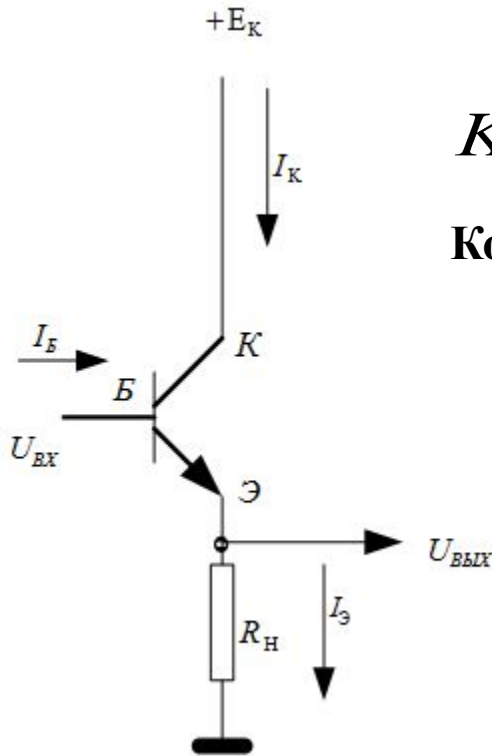


Схема с общей базой

Коэффициент передачи по току (низкий)

$$K_I = \frac{I_K}{I_{\mathcal{E}}} = \alpha < 1$$

Коэффициент усиления по напряжению (высокий)

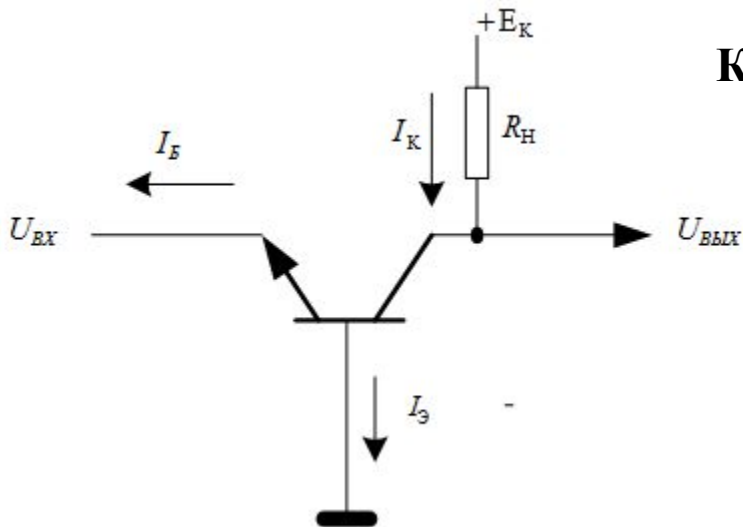
$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} > 1$$

Входное сопротивление (низкое)

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_{\mathcal{E}} r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{I_K r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{\beta}$$

Выходное сопротивление (высокое)

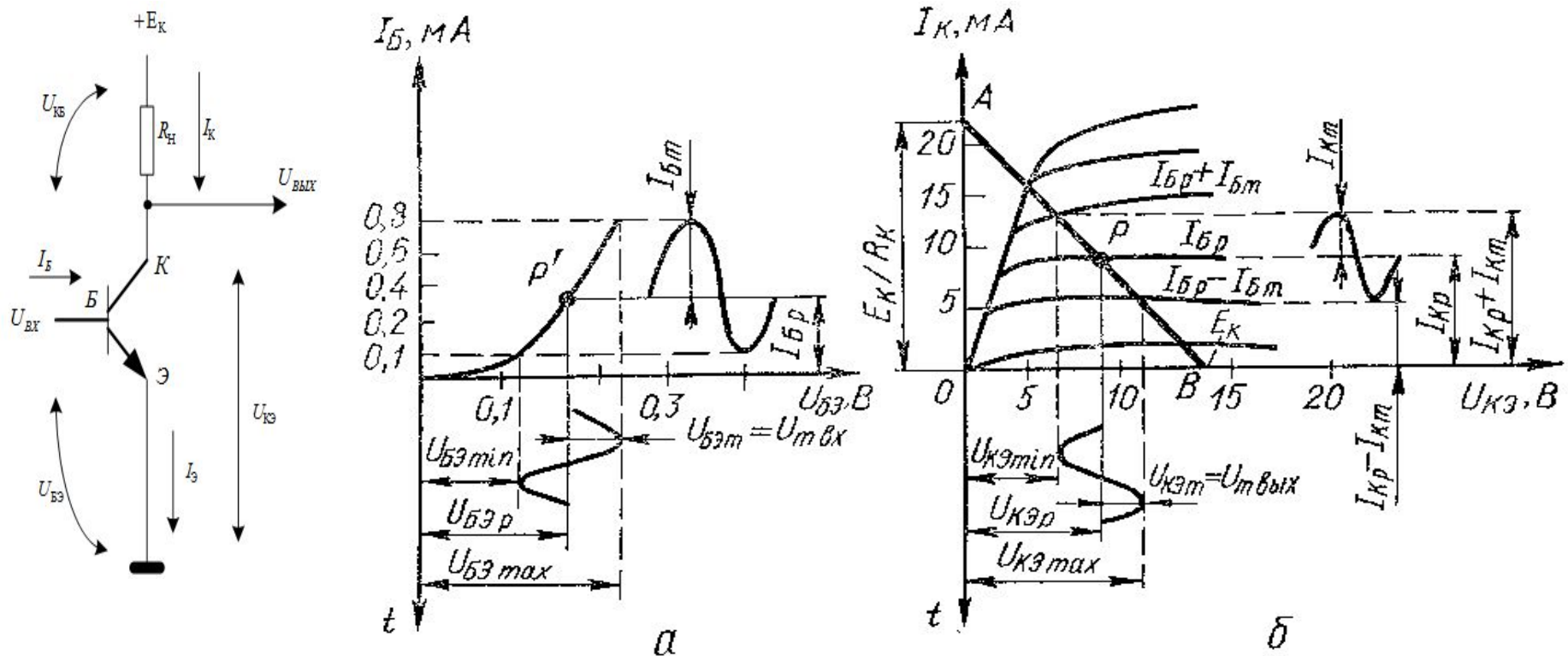
$$R_{ВЫХ} \approx R_K$$



Сравнительные характеристики схем

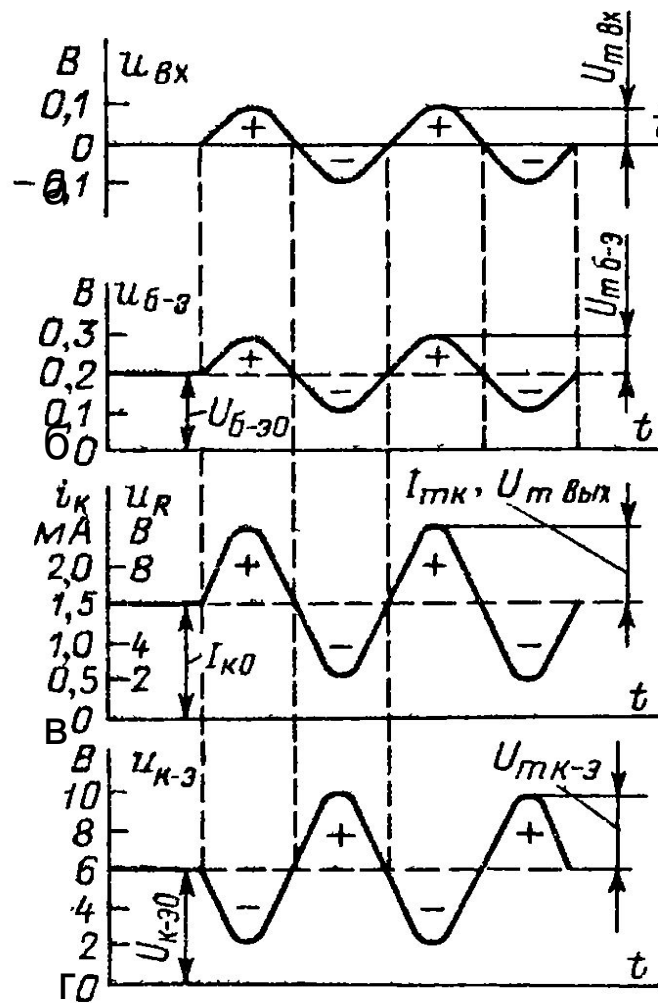
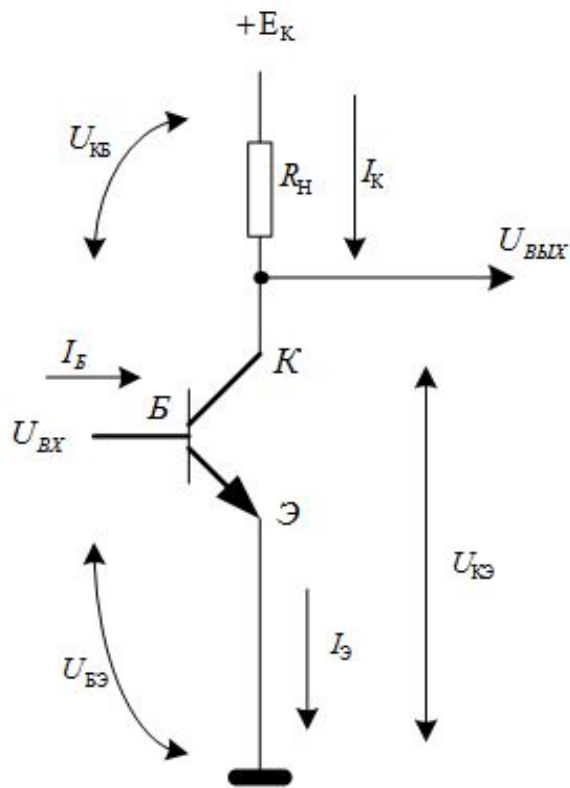
Схема	Кэф. усиления по напряжению	Кэф. усиления по току	Входное сопр.	Выходное сопр.
ОЭ	Выс.	Выс.	Выс.	Выс.
ОБ	Выс.	Низк.	Низк.	Выс.
ОК	Низк.	Выс.	Выс.	Низк.

Режим линейного усиления



$$U_{mBX} \rightarrow I_{Bm} \rightarrow I_{Km} \rightarrow I_{Km} R_H \rightarrow (U_{КЭm} = E_K - I_{Km} R_H) = U_{mBЫ} \gg U_{mBX}$$

Принцип усиления напряжения в схеме с ОЭ в динамическом режиме



$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_H$$

$$I_K R_H \rightarrow \uparrow$$

$$U_{КЭ} \rightarrow \downarrow$$

Работа транзистора с нагрузкой называется динамическим режимом
Каскад с ОЭ инвертирует входной сигнал