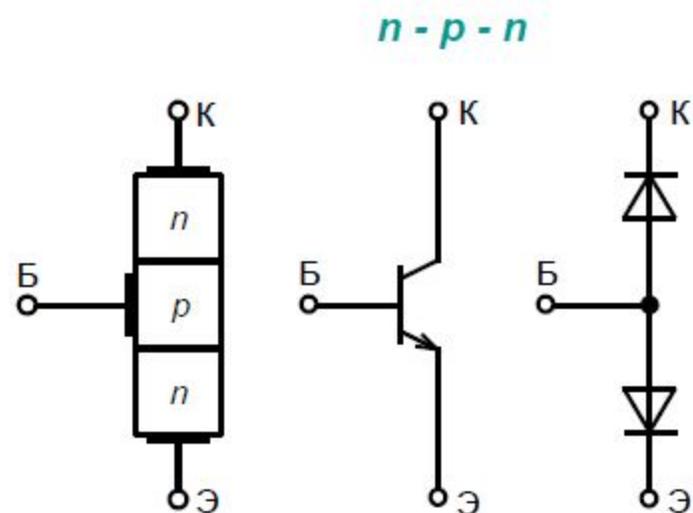
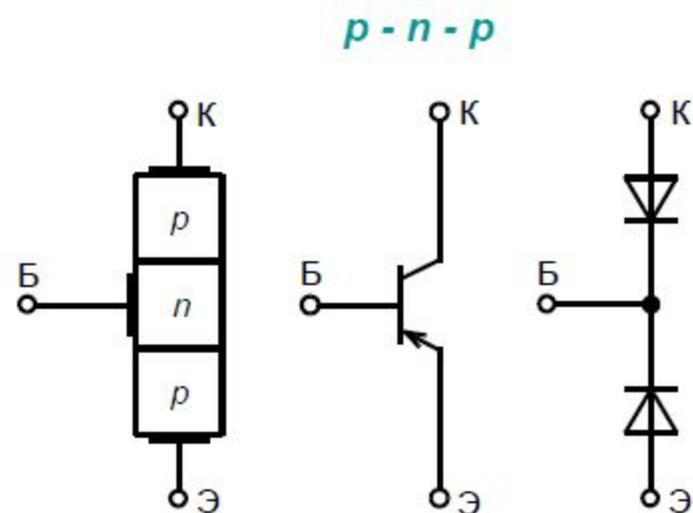


**Биполярные транзисторы** – полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими  $p$ - $n$ -переходами и тремя выводами.

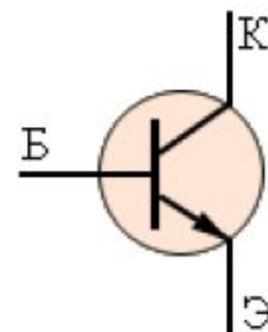
Термин «биполярный» - используются носители обоих знаков: электроны и дырки.



Б – база  
К – коллектор  
Э – эмиттер



ЭП – эмиттерный переход (между Б и Э)  
КП – коллекторный переход (между К и Б)

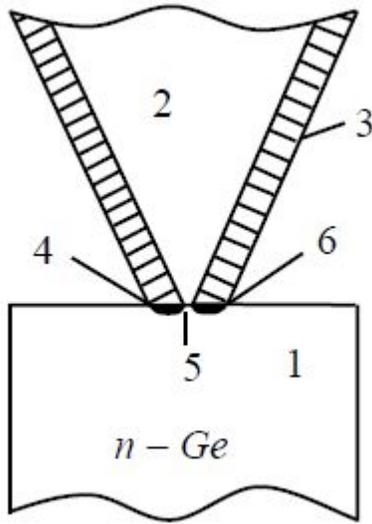


*УГО транзистора.  
Стрелка показывает  
направление тока  
эмиттера при прямом  
смещении эмиттерного  
перехода*

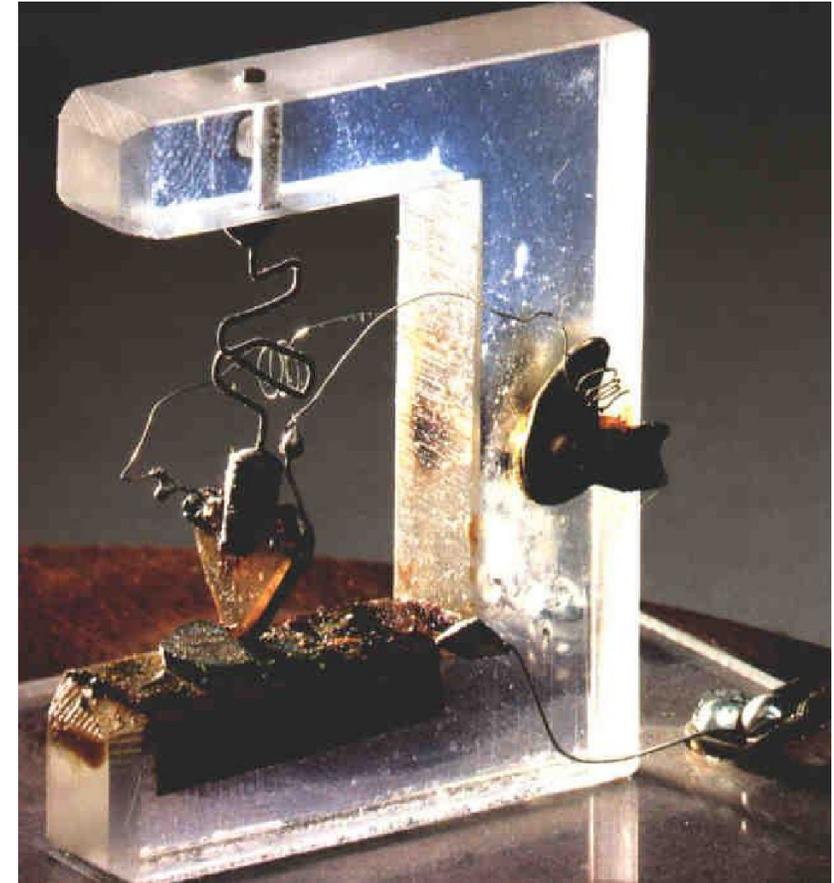
На пластинке полупроводника создаются три области различной электропроводности. В зависимости от порядка расположения областей различают  $n - p - n$  и  $p - n - p$ -транзисторы.

Расстояние между переходами (толщина базового слоя - базы) весьма мало – единицы мкм. Концентрация примесей в коллекторе и эмиттере значительно больше, чем в базе.

# Первый точечный транзистор



В пластинку монокристаллического германия n-типа 1 с силой вдавливался пластмассовый треугольник 2, обернутый золотой фольгой 3. На вершине треугольника фольга разрезалась бритвой. В месте соприкосновения фольги с поверхностью пластины образуются области p-типа: эмиттер 4 и коллектор 6. Между ними располагается база 5.



Изображение первого промышленного образца

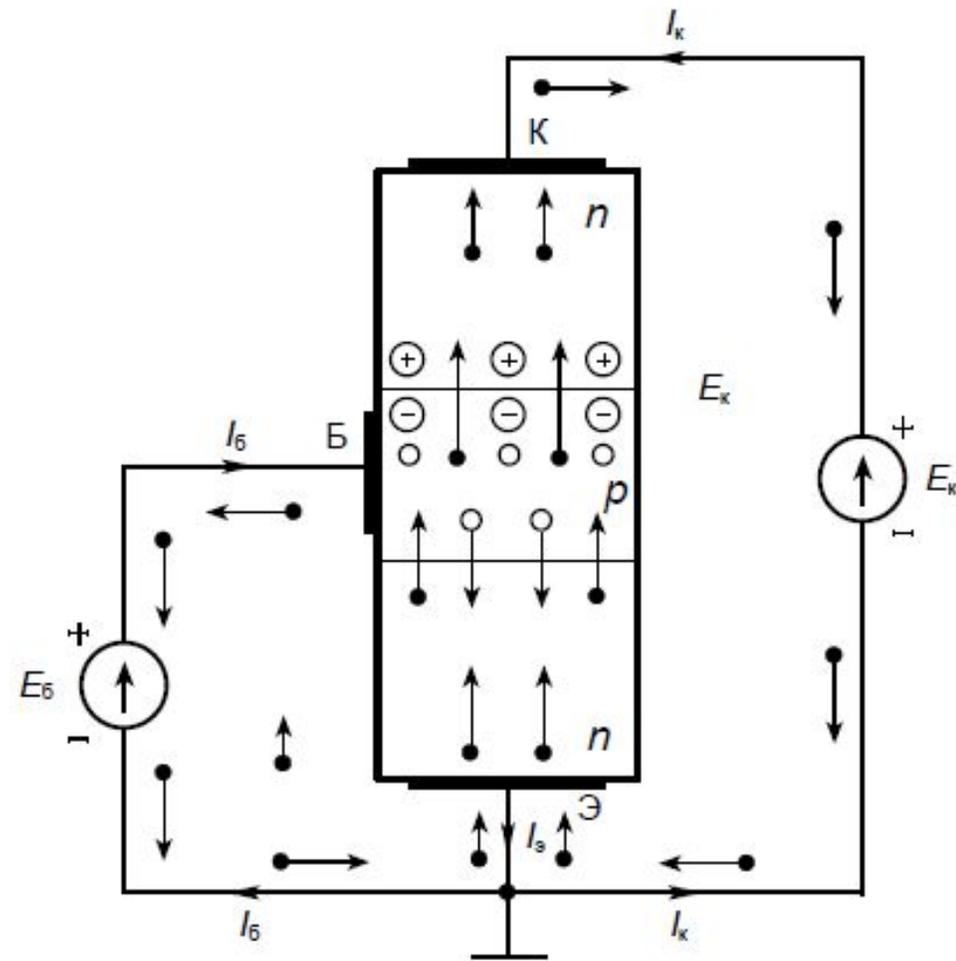
# Принцип действия биполярного транзистора

Напряжения на переходах задаются внешними источниками постоянного напряжения  $E_b$  и  $E_k$  :  $E_b$  (десятые доли В)  $<$   $E_k$  (единицы сотни В). Их полярность и величина обеспечивают смещение ЭП в прямом направлении, а КП – в обратном.

Так как ЭП смещен в прямом направлении, то потенциальный барьер (как в обычном  $p$ - $n$ -переходе) в этом переходе понижен, поэтому электроны легко, его преодолевая, инжектируются из эмиттера в базу. Небольшая часть электронов ( $\approx 5\%$ ) в базе рекомбинируют с дырками и в результате возникает сравнительно небольшой базовый ток  $I_b$  (дырок в базе мало, т.к. толщина база мала), а большая оставшаяся часть электронов ( $\approx 95\%$ ) достигает коллекторного перехода. Поскольку КП смещен в обратном направлении, то на этом переходе образуются объемные заряды (подобно обычному  $p$ - $n$ -переходу при обратном напряжении). Между зарядами возникает электрическое поле, которое способствует продвижению (экстракции) через КП электронов из эмиттера. Эти электроны и создают коллекторный ток. Ток коллектора  $I_k$  получается меньше тока эмиттера  $I_\Delta$  на величину тока базы  $I_b$ . В соответствии с 1 законом Кирхгофа между токами всегда справедливо соотношение:

$$I_\Delta = I_k + I_b$$

$$I_b \ll I_k \Rightarrow I_\Delta \approx I_k$$



# Основные параметры биполярного транзистора

Ранее было показано, что  $I_K < I_Э$  из-за тока базы. Поэтому можно записать:

$$I_K = \alpha \cdot I_Э$$

Чем меньше  $I_Б$ , тем ближе  $\alpha \rightarrow 1$ .

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера.

$$\alpha_{\text{тип}} = 0,950 \quad 0,998$$

Выразим  $I_K$ .  $I_K = \alpha \cdot I_Э = \alpha \cdot I_K + \alpha \cdot I_Б \Rightarrow I_K(1 - \alpha) = \alpha \cdot I_Б \Rightarrow$

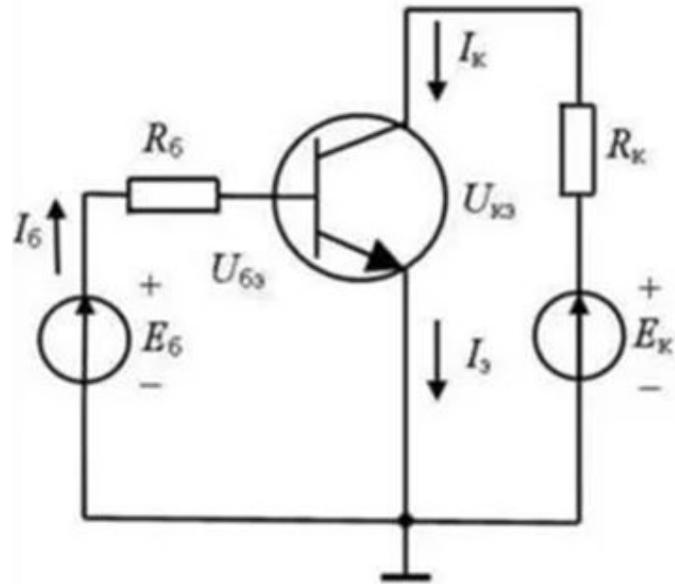
$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_Б = \beta \cdot I_Б$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \text{ - коэффициент передачи тока базы (десятки сотни).}$$

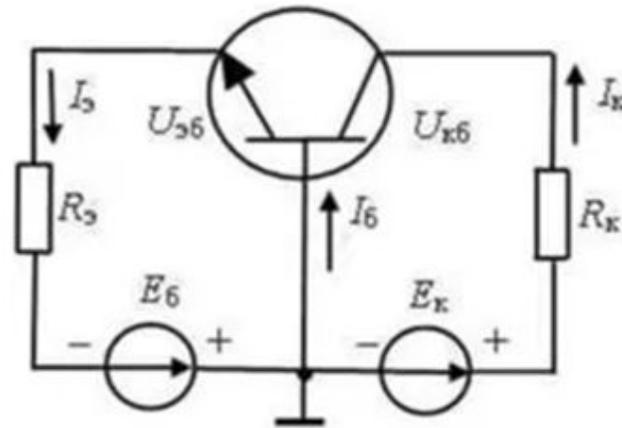
$$I_K = \beta \cdot I_Б$$

Видно, что между током базы и током коллектора существует линейная связь, поэтому говорят, что транзистор управляется током  $I_Б$ .

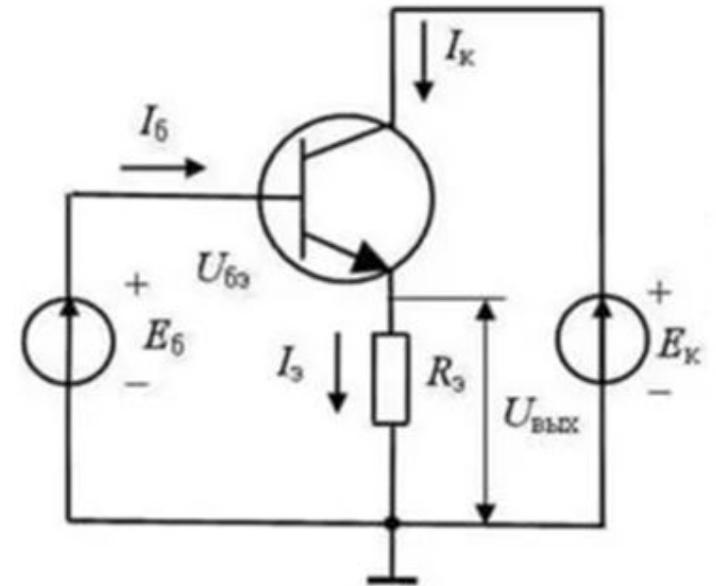
# Схемы включения биполярного транзистора



Включение по схеме с ОЭ

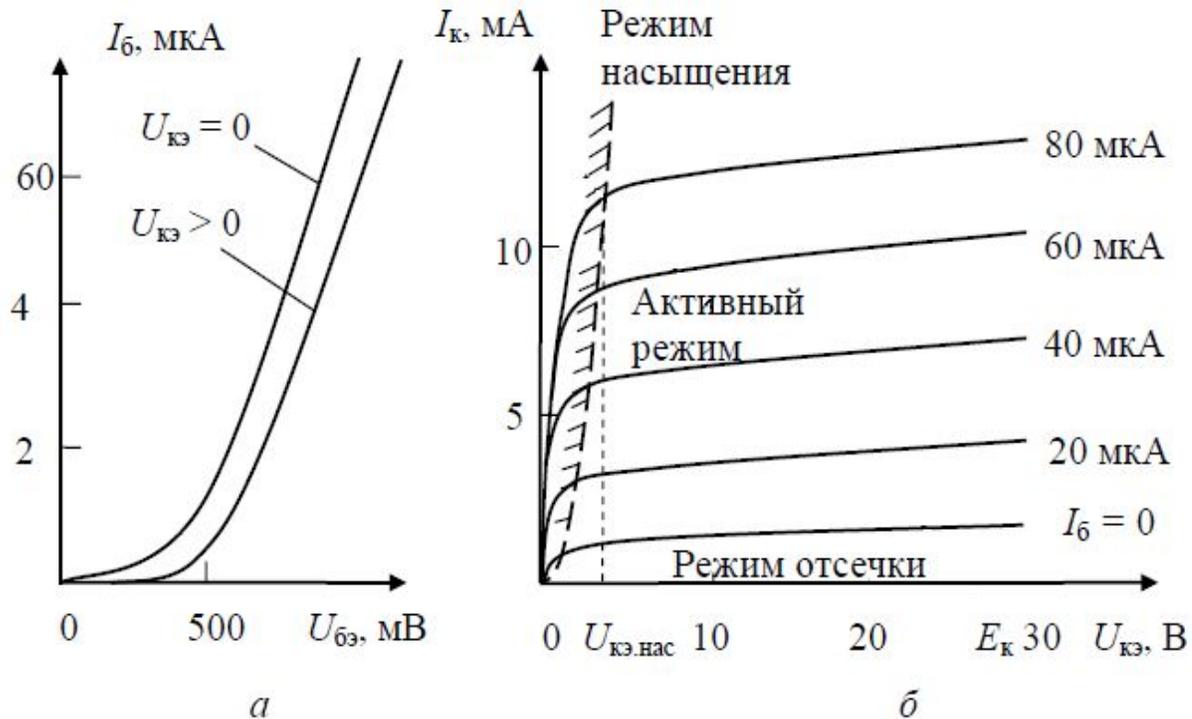


Включение по схеме с ОБ



Включение по схеме с ОК

# Статические вольт-амперные характеристики



Входные (а) и выходные (б) ВАХ биполярного транзистора  $n-p-n$ -типа в схеме с общим эмиттером

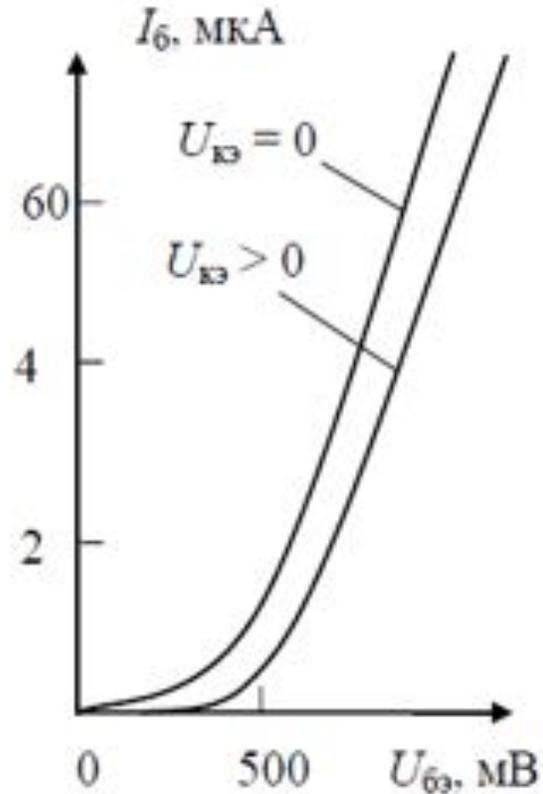
Статические характеристики снимаются на постоянном токе и без нагрузки в выходной цепи. Данные характеристики используются для расчета транзисторных схем. На практике интересны входные и выходные характеристики. Входные ВАХ отражают зависимость напряжения и тока во входной цепи, выходные ВАХ – в выходной цепи.

Входные и выходные ВАХ подобны ВАХ полупроводникового диода. Входные характеристики относятся к прямо смещенному ЭП, поэтому они подобны прямой ветви ВАХ диода. Выходные характеристики отражают свойства обратно смещенного коллекторного перехода и аналогичны обратной ветви ВАХ диода.

# Схема с ОЭ

Входные характеристики

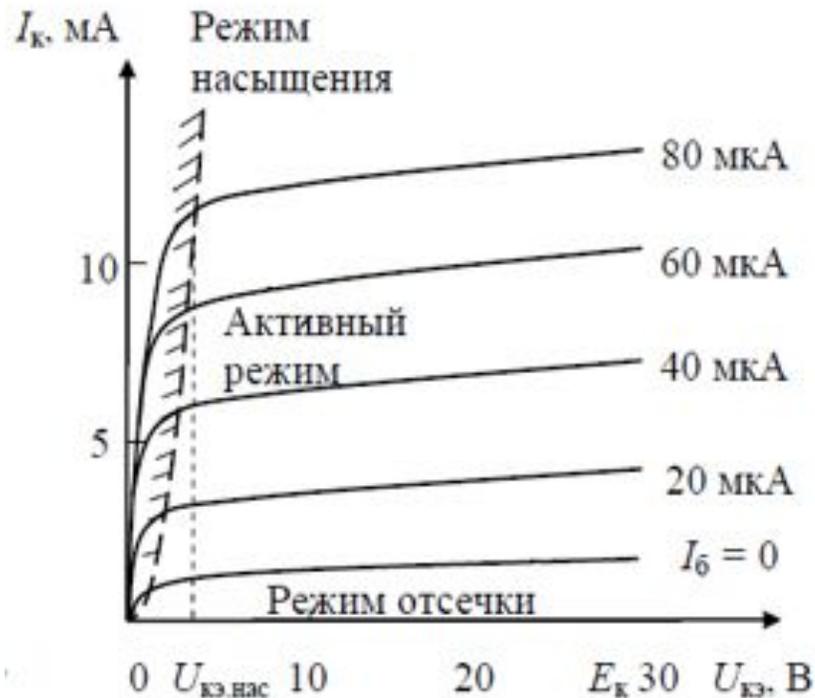
$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}) \Big|_{U_{\text{кэ}} = \text{const}}$$



При  $U_{\text{кэ}}=0$  входная характеристика представляет собой прямую ветвь ВАХ двух параллельно включенных диодов. Смещение характеристик вправо обусловлено эффектом модуляции базы: с ростом  $U_{\text{кэ}}$  растет  $U_{\text{кб}}$   $\Rightarrow$  толщина обратного смещенного КП увеличивается, а толщина базы уменьшается  $\Rightarrow$  в базе рекомбинирует меньше носителей и  $\Rightarrow$  ток  $I_{\text{б}}$  уменьшается.

# Схема с ОЭ

Выходные характеристики  $I_k = f(U_{кэ}) \Big|_{I_b = \text{const}}$



Характеристика при  $I_b = 0$  соответствует режиму отсечки, при этом из Э в К течет ток неосновных носителей заряда  $I_{k0}$ .

На выходных характеристиках можно выделить области.

1. *Нелинейная область* с сильной зависимостью  $I_k$  от  $U_{кэ}$ . При малых  $U_{кэ}$  КП смещен в прямом направлении (режим насыщения).

2. *Линейная область*. КП смещен в обратном направлении (активный режим). Здесь наблюдается слабая зависимость  $I_k$  от  $U_{кэ}$ . Небольшой подъем характеристик объясняется эффектом модуляции базы.

**Эффект модуляции.** При увеличении  $U_{кэ}$  толщина базы уменьшается  $\Rightarrow$  ток  $I_b$  уменьшается (аналогично случаю для входной характеристики), но т.к. ток базы необходимо поддерживать постоянным ( $I_b = \text{const}$ ) приходится увеличивать по модулю  $U_{бэ}$ . За счет этого ток  $I_b$  увеличивается, и ток  $I_k = I_b \cdot \beta$  тоже возрастает.

# Режимы работы БТ

**активный** (усилительный) используется в усилителях и генераторах:

КП смещен в обратном направлении;

ЭП смещен в прямом направлении;

**режим отсечки** (транзистор заперт) используется в ключевых схемах (ключ разомкнут);

КП, ЭП смещены в обратном направлении;

**режим насыщения** (транзистор открыт) используется в ключевых схемах (ключ замкнут);

КП, ЭП смещены в прямом направлении;

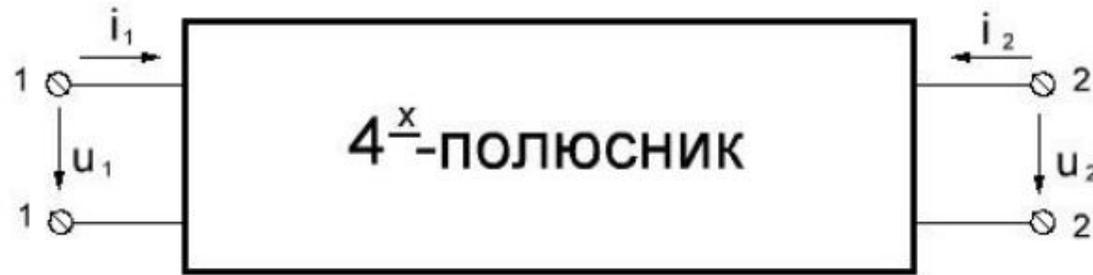
**инверсный режим** (К и Э меняют местами) используется редко, т.к. все параметры падают:

КП смещен в прямом направлении;

ЭП смещен в обратном направлении.

# h-параметры транзистора

При любой схеме включения транзистор может быть представлен в виде активного (линейного) четырехполюсника – «черного ящика».



$$U_1 = U_{\text{вх}}; U_2 = U_{\text{вых}}; I_1 = I_{\text{вх}}; I_2 = I_{\text{вых}}.$$

На входе действует переменное напряжение  $U_1$  и протекает переменный ток  $I_1$ , а на выходе действует переменное напряжение  $U_2$  и переменный ток  $I_2$ .

Существуют различные системы параметров, которые связывают переменные токи и напряжения в четырехполюснике. Наиболее удобными для измерения считаются  $h$ -параметры.

« $h$ » от слова «*hybrid*» - гибридное или смешанные. Включают в себя: 2 коэффициента, одно сопротивление, одну проводимость. Приводятся в справочниках.

Система уравнений, связывающая токи и напряжения через  $h$ -параметры:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

$h$ -параметры – соответствующие коэффициенты.

# Физический смысл h-параметров транзистора

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току при неизменном выходном напряжении (по переменной на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е.  $U_2 = \text{const}$ );

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}$$

- коэффициент передачи по току при неизменном выходном напряжении (по переменной на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е.  $U_2 = \text{const}$ );

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}$$

- коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе, показывает какая часть переменного выходного напряжения передается на вход транзистора из-за наличия обратной связи в нем (по переменной входная цепь разрыв, т.е.  $I_1 = \text{const}$ );

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}$$

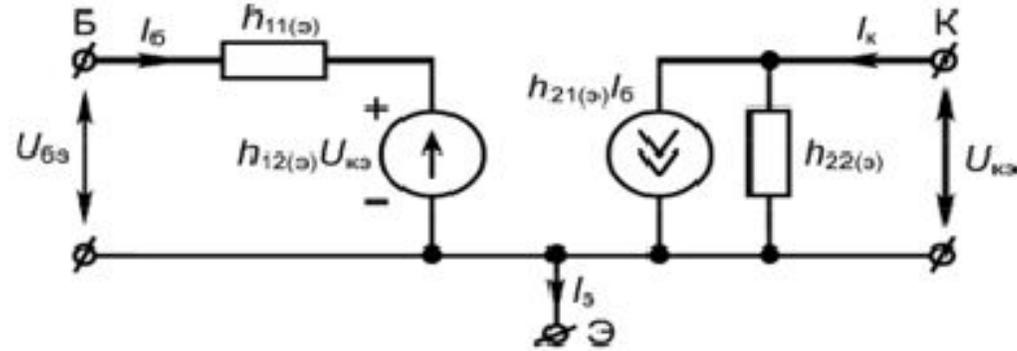
- выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе транзистора (по переменной входная цепь разрыв, т.е.  $I_1 = \text{const}$ ), измеряется в сименсах.

Значения  $h$  – параметров зависят от схемы включения:

Схема ОЭ:  $I_1 = I_{\bar{б}}$ ;  $I_2 = I_{\kappa}$ ;  $U_1 = U_{\bar{бэ}}$ ;  $U_2 = U_{\kappaэ}$ .

# Схема с ОЭ

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$



$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ} = \text{const}} = r_{вх}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току; определяется по входной характеристике;

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ} = \text{const}} = \beta$$

- коэффициент передачи тока базы; определяется по выходным характеристикам;

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б = \text{const}} = \varepsilon$$

- коэффициент обратной связи по напряжению; определяется по входным характеристикам;

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б = \text{const}}$$

- выходная проводимость транзистора; определяется по выходной характеристике.

# Максимально допустимые параметры

$I_{к\ max}$  – максимально допустимый ток коллектора (сотни мА – десятки А);

$U_{кэ\ max}$  – максимально допустимое напряжение К-Э;

$P_{к\ max}$  – максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором (до десятков Вт);

$U_{бэ\ обр\ max}$  – максимально допустимое обратное напряжение ЭП;

$I_{б\ max}$  – максимально допустимый прямой ток базы.

