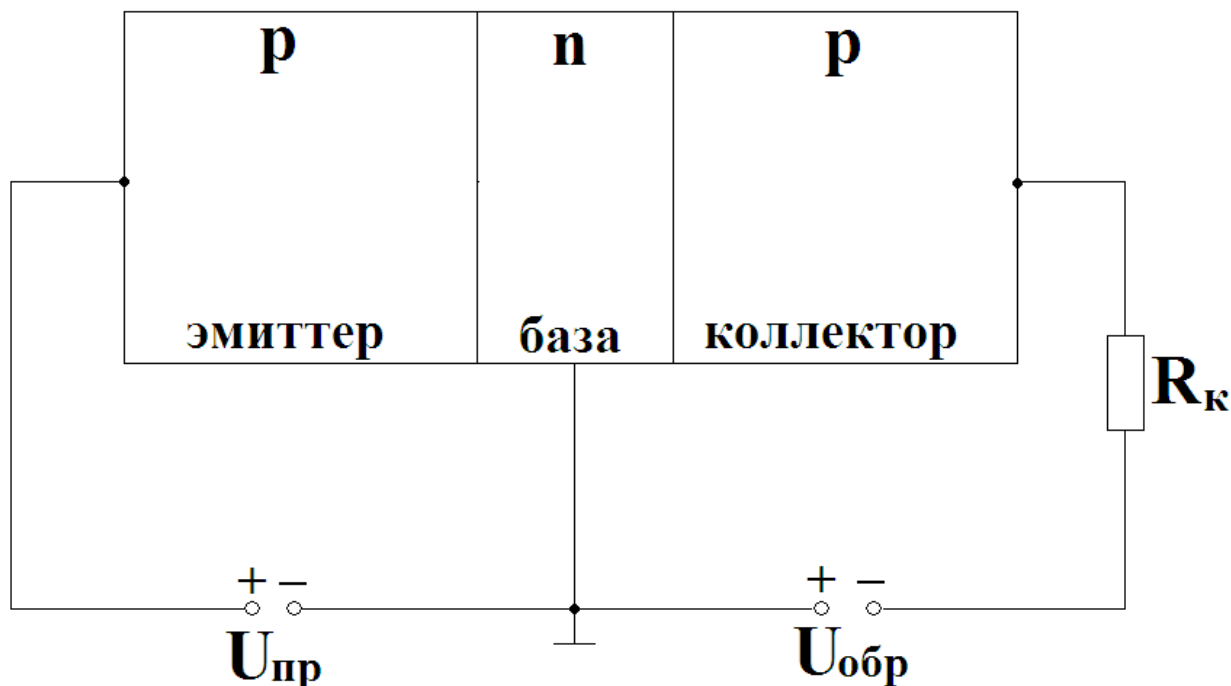


# Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – это система с двумя близко расположенными p-n переходами с тремя внешними выводами (или электродами) : эмиттер (эммитирует или выбрасывает носители), коллектор (собирает эти носители), база (основание транзистора).

Условная плоскостная структура биполярного транзистора приведена на рисунке:



Источник  $E_z$  имеет напряжение порядка 1 В (допустимое прямое напряжение смещения), при этом возникает большой прямой ток через эмиттерный переход  $I_z$ . Источник  $E_k$  имеет напряжение порядка 10-20 вольт. В цепь коллектора, как правило, включают сопротивление нагрузки  $R_k$ . Для того, чтобы сместить коллекторный переход в обратном направлении должно выполняться условие:

$$E_k > I_k \cdot R_k$$

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИСТОТОРА

Необходимо, чтобы проводимость эмиттера была значительно выше, чем базы (при этом концентрация основных носителей в эмиттере выше, чем в базе). Поэтому ток эмиттерного перехода будет иметь только одну эмиттерную составляющую, а базовой, очень маленькой, можно пренебречь. Поэтому учитывается только одна – эмиттерная составляющая (для p-n-p транзистора – дырочная, для n-p-n – электронная) тока эмиттера  $I_z$ .

Под действием прямого напряжения на эмиттерном переходе, основные носители, движущиеся к контакту, рекомбинируют в приконтактной области лишь частично, а основная часть дырок (для p-n-p

транзистора) и электронов (для n-p-n транзистора) внедряется из эмиттера в базу, где они будут неосновными носителями. Это явление – инжекция неосновных носителей

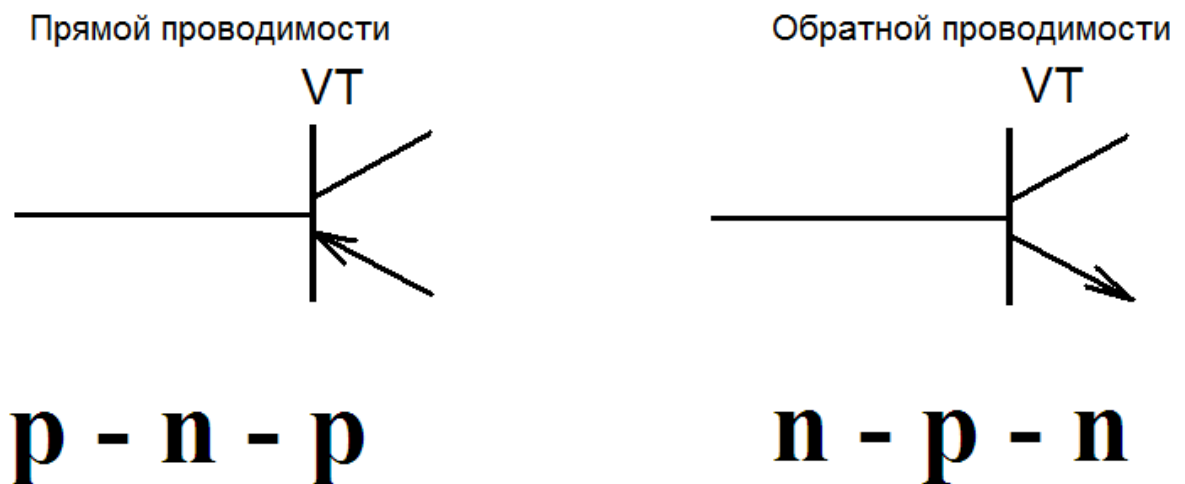
В базе возникает градиент концентраций носителей, вызывающий диффузию электронов (для n-p-n транзистора), дырок (для p-n-p транзистора) в направлении коллекторного перехода. Кроме того, на эти носители – электроны (для n-p-n транзистора), дырки (для p-n-p транзистора), движущиеся в базе, влияет электрическое поле коллектора, ускоряющее их движение.

Инжектированные в базу носители составляют эмиттерный ток  $I_{\text{э}}$ , а рекомбинирующие с основными носителями базы, внедренные из эмиттера носители составляют ток базы –  $I_{\text{б}}$ . Остальная часть носителей дошедших до коллектора определяют ток коллектора –  $I_{\text{к}}$ . Отсюда уравнение всех токов в транзисторе:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}$$

Чтобы время пробега неосновных носителей через базу было значительно меньше времени их жизни (т.е. чтобы большая их часть достигала коллектора) необходимо разместить эмиттерный и коллекторный переходы очень близко друг от друга. Толщина базы составляет, обычно, не более нескольких сотых долей миллиметра.

По типу проводимости транзисторы бывают прямой проводимости или p-n-p и обратной проводимости или n-p-n. На принципиальных электрических схемах их обозначают следующим образом:



Стрелка всегда! ставится у эмиттера и указывает направление прямого тока (или тока основных носителей) через переход.

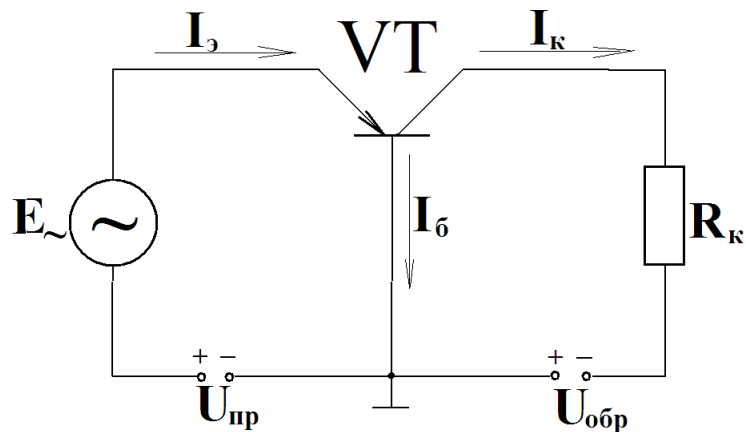
## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Схема включения транзистора будет называться с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) или общим коллектором (ОК) в зависимости от того какой электрод транзистора будет общим, обычно заземленным, для входной

и выходной цепей транзистора и относительно которого измеряется входное и выходное напряжение.

#### Схема с ОБ

Входным током будет являться ток эмиттера.  
Принципиальная рабочая схема имеет вид:



Для выявления основных свойств, у транзисторов определяются следующие характеристики: входное сопротивление:

$$R_{\text{вхОБ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{эб}}}{I_{\text{э}}},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} \leq 1 = \alpha$$

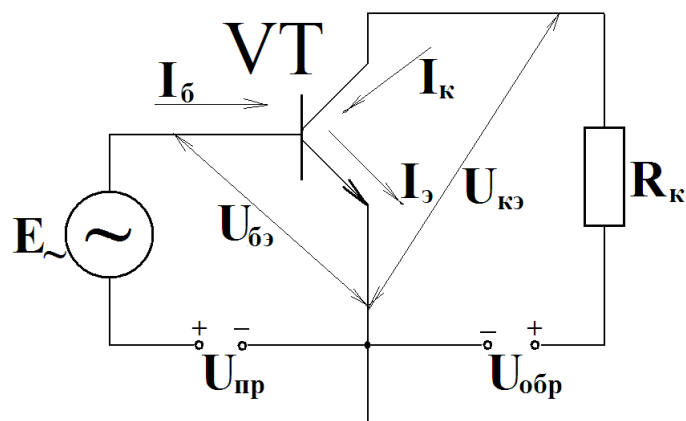
коэффициент передачи по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{кб}}}{U_{\text{эб}}} - \text{большая величина.}$$

Т.о. в транзисторе с ОБ имеет место усиление лишь по напряжению.

#### Схема с ОЭ

Входным током будет являться ток базы.  
Принципиальная рабочая схема имеет вид:



Входное сопротивление:

$$R_{\text{вхОЭ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} \geq 100 = \beta$$

коэффициент передачи по напряжению:

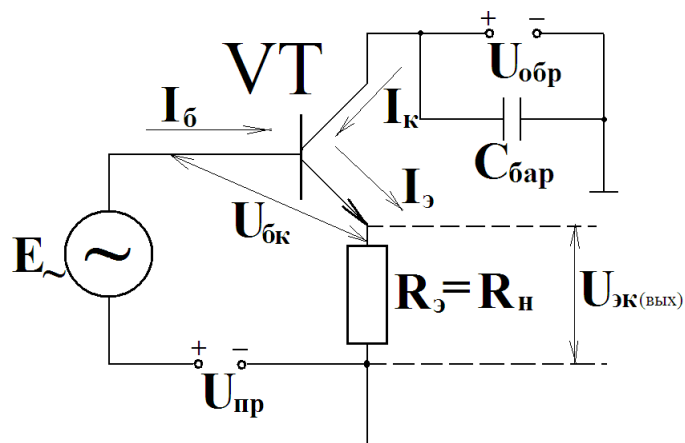
$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{кэ}}}{U_{\text{бэ}}} - \text{большая величина.}$$

Т.о. в транзисторе с ОЭ имеет место усиление и по напряжению и по току.

### Схема с ОК

Входным током будет являться ток базы.

В реальном транзисторе с ОК, коллектор заземлен только по переменной составляющей через сопротивление емкости. Принципиальная рабочая схема имеет вид:



Входное сопротивление:

$$R_{\text{вхОК}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{б}}} \approx 100 = \gamma$$

коэффициент передачи по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{эк}}}{U_{\text{бэ}}} \leq 1 - \text{малая величина.}$$

Т.о. в транзисторе с ОК имеет место усиление лишь по току.

Если сравнить схемы включения транзисторов по величине входного сопротивления, то они соотносятся следующим образом:

$$R_{\text{вхОК}} > R_{\text{вхОЭ}} > R_{\text{вхОБ}}$$

На практике, наиболее распространены схемы включения транзисторов с общим эмиттером (ОЭ) – 90 – 95% от общего числа, схемы с общим коллектором составляют 5 – 7% от общего числа, схема с общей базой применяется редко, как правило, в сочетании со схемой транзистора с общим коллектором.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- Активный режим — используется при проявлении усилительных свойств транзистора. В этом режиме прямо смещается (включается) эмиттерный переход, а на коллекторном присутствует обратное напряжение. Именно в активном режиме транзистор наилучшим образом проявляет свои усилительные свойства. Поэтому часто такой режим называют основным или нормальным.
- Инверсный режим — полностью противоположен активному режиму, т.е. обратносмещенным является эмиттерный переход, а прямосмещенным — коллекторный. В таком режиме транзистор также может использоваться для усиления. Однако из-за конструктивных различий между областями коллектора и эмиттера усилительные свойства транзистора в инверсном режиме проявляются гораздо хуже, чем в режиме активном. Поэтому на практике инверсный режим практически не используется.
- Режим насыщения (режим двойной инжекции) — оба перехода транзистора находятся под прямым смещением. В этом случае выходной ток транзистора не может управляться его входным током, т.е. усиление сигналов невозможно. Режим насыщения используется в ключевых схемах, где в задачу транзисторов входит не усиление сигналов, а замыкание/размыкание разнообразных электрических цепей.
- Режим отсечки — к обоим переходам подведены обратные напряжения. Такой режим также используется в ключевых схемах. Поскольку в нем выходной ток транзистора практически равен нулю, то он соответствует размыканию транзисторного ключа.
- Динамическим называется режим, при котором изменение входных электрических величин вызывает изменение всех остальных величин усилительного элемента (биполярного транзистора). Для реализации динамического режима необходимо в цепь выходного тока включить сопротивление  $R \neq 0$ , тогда при изменении  $U_{вх}$  и  $I_{вх}$  будет изменяться  $I_{вых}$ ,  $U_{вых}$ .
- Статическим режимом работы транзистора называется режим при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

## ОСНОВНЫЕ СЕМЕЙСТВА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

Характеристики транзистора определяются соотношениями между токами, проходящими в цепях транзистора и напряжениями на его электродах. У транзисторов связи между токами и напряжениями являются сугубо нелинейными, и выразить их, используя линейные уравнения невозможно. Поэтому указанные связи представляются в виде графиков, которые называются статическими характеристиками транзисторов. За независимые переменные принимаются напряжения на электродах, а функциями являются входной и выходной токи. Одна из независимых переменных, при построении характеристик принимается за константу.

1. Выходные характеристики:

$$I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}}), \text{ при } U_{\text{вых}} = \text{const}$$

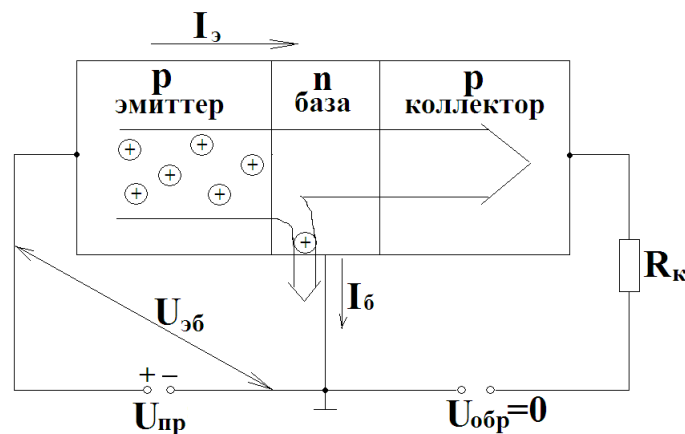
2. Выходные характеристики:

$$I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}}), \text{ при } I_{\text{вх}} = \text{const}$$

Для схемы с общей базой

1. Входная характеристика:

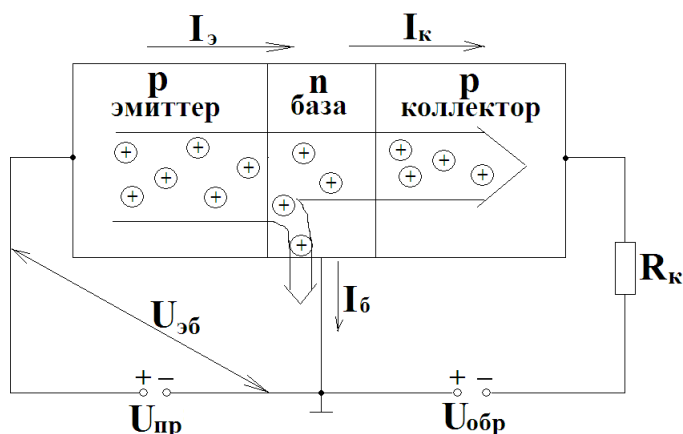
$$I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}}), \text{ при } U_{\text{кб}} = \text{const}$$



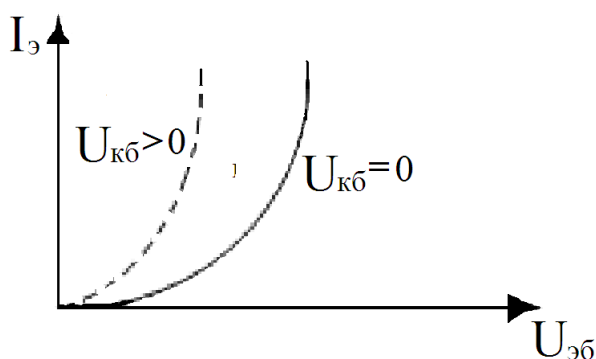
При  $U_{\text{кб}} = 0$  коллекторное поле не влияет на входной ток  $I_{\text{э}}$ .

При изменении  $U_{\text{эб}}$  от нуля до максимального значения  $U_{\text{эбmax}}$ , ток эмиттера, являющийся входным, будет изменяться как прямой ток через переход, следовательно, вид данной характеристики – прямая ветвь ВАХ для p-n перехода.

При  $U_{\text{кб}} \neq 0$ , ускоряющее поле коллектора будет мало влиять на движение инжектированных из эмиттера носителей и поэтому ток эмиттера возрастает незначительно.



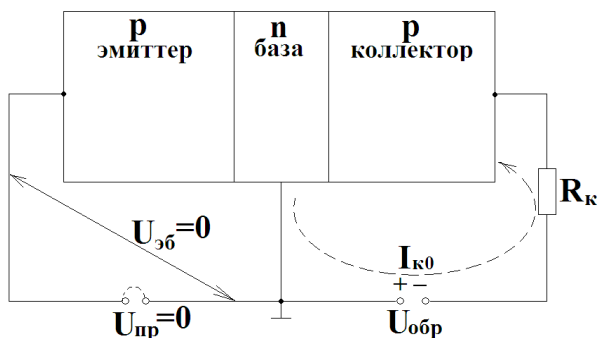
Вид входной ВАХ транзистора с ОБ :



#### 1. Выходная характеристика:

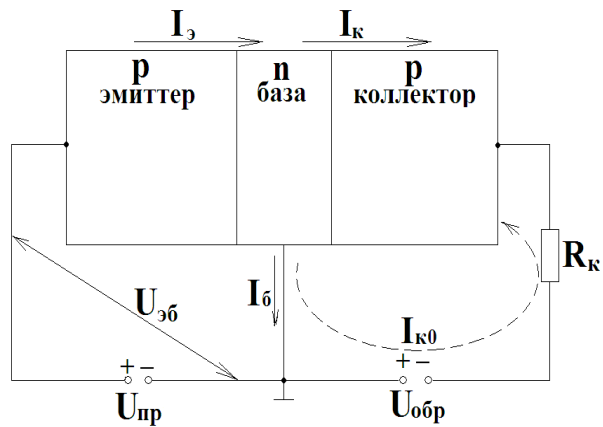
$$I_k = f(U_{кб}), \text{ при } I_э = \text{const}$$

Если ток эмиттера равен нулю  $I_э = 0$ , транзистор должен быть закрыт и выходной ток – ток коллектора  $I_k$  должен отсутствовать. В реальной схеме включения, когда  $U_{эб} = 0$ ,  $U_{кб} \neq 0$ , через коллекторный переход, к которому приложено обратное напряжение  $U_{кб}$ , протекает ток неосновных носителей (составляет 1.....10 мкА). Этот ток называется током закрытого транзистора или обратным током коллекторного перехода –  $I_{к0}$ . Данный ток всегда направлен из n-области транзистора в p- область, независимо от типа проводимости.

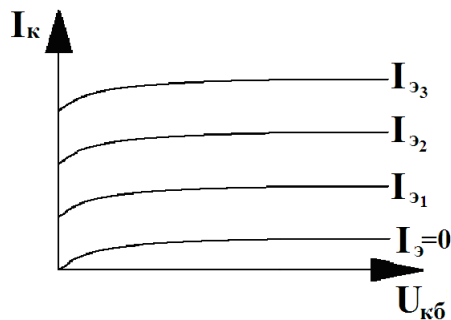


При наличии тока в цепи эмиттера, т.е.  $I_э \neq 0$ , доля коллекторного тока за счет за счет инжектированных и дошедших до коллектора носителей возрастает. Ток коллектора определяется:  $I_k = \alpha \cdot I_э + I_{к0}$ .

Т.о. чем больше ток эмиттера – входной ток, тем больше выходной ток – ток коллектора.



Вид выходной ВАХ транзистора с ОБ :



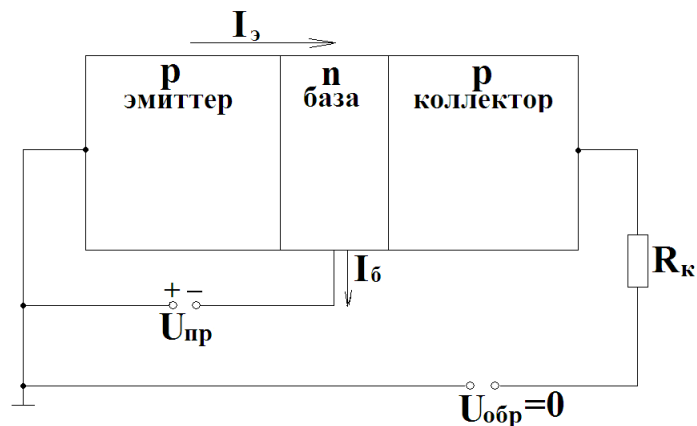
Для схемы с общим эмиттером

#### 1. Входная характеристика:

$$I_б = f(U_{бэ}), \text{ при } U_{кэ} = \text{const}$$

В данной схеме включения входной ток – ток базы, является током рекомбинации в базе.

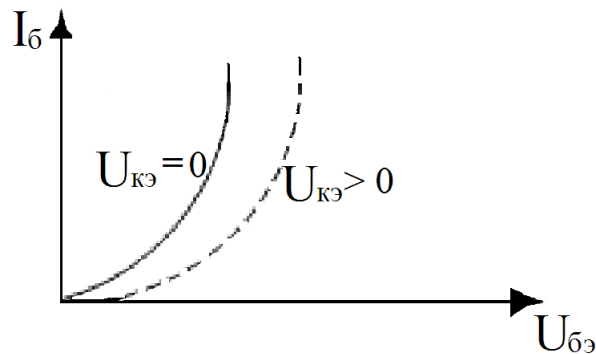
При  $U_{кэ} = 0$  на коллекторном переходе действует внутреннее поле фк, при этом запирающий слой коллекторного перехода распространен на некоторую глубину в сторону базы. Рекомбинация происходит в активной области базы, не занятой запирающим слоем.





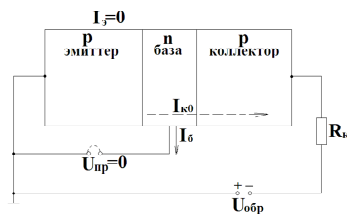
При увеличении  $U_{кэ}$  запирающий слой расширяется на некоторую глубину в сторону базы, при этом активная область базы, где может происходить рекомбинация, сужается. Этот процесс называется модуляцией (изменением) ширины базы. Поэтому уменьшается ток базы, что показано на входной характеристике транзисторной схемы с ОБ.

Вид входной ВАХ транзистора с ОЭ :



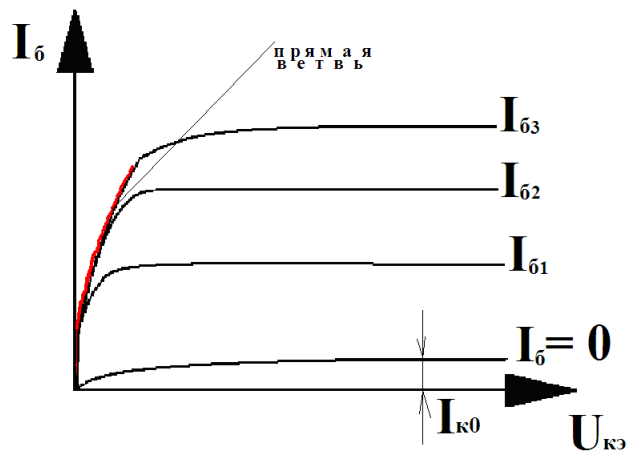
#### 1. Выходная характеристика:

$$I_k = f(U_{кэ}), \text{ при } I_b = \text{const}$$



При входном токе равном нулю ( $I_b = 0$ ) выходным током является  $I_{к0}$  – ток закрытого транзистора. Отличием от схемы включения с общей базой является наличие крутого участка. Наличие этого крутого участка, объясняется тем, что при малых значениях напряжения  $U_{кэ}$  в начальной части (графика) характеристики напряжение  $U_{бэ}$  превышает напряжение  $U_{кэ}$  и коллекторный переход оказывается включенным (смещенным) в прямом направлении и через него течет прямой ток навстречу инжектированным из эмиттера носителям. Т.о. коллекторное напряжение  $U_{кэ}$  оказывается частично приложенным к эмиттерному переходу через сопротивление коллектора  $R_k$ , коллекторного перехода и базы.

Вид выходной ВАХ транзистора с ОЭ :



Выходной ток – ток коллектора ( $I_k$ ) будет определяться следующим образом:  $I_k = \beta \cdot I_b + I_{k0}$ .

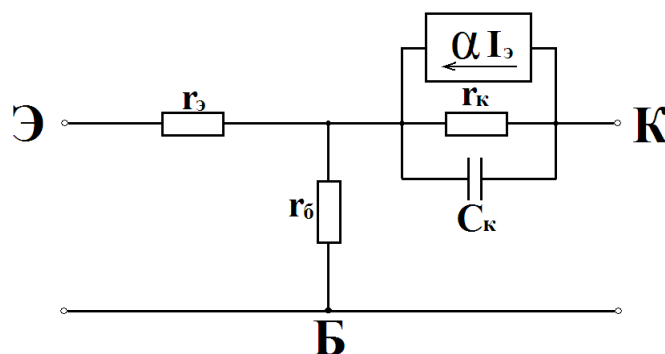
### ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИЛИ Т-ОБРАЗНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

При расчете электронных схем, которые содержат транзисторы, пользуются основными законами и методами электротехники (законы Ома, Кирхгофа). Для этого транзисторы требуется заменить их эквивалентными схемами, составляя которые, необходимо руководствоваться двумя основными правилами:

1. Эквивалентная схема должна содержать только те элементы, которыми оперируют при расчете электрических цепей ( $R$ ,  $C$ ,  $L$ , генераторы тока и напряжения).
2. Эквивалентная схема должна учитывать и отображать основные физические свойства и качественные характеристики транзисторов.

Получить абсолютно точно отображающую процессы в транзисторе схему невозможно из-за того, что транзистор – нелинейный элемент, а для упрощения расчетов вынуждены использовать линейную модель. Но с определенной степенью точности можно оперировать предложенными эквивалентными схемами.

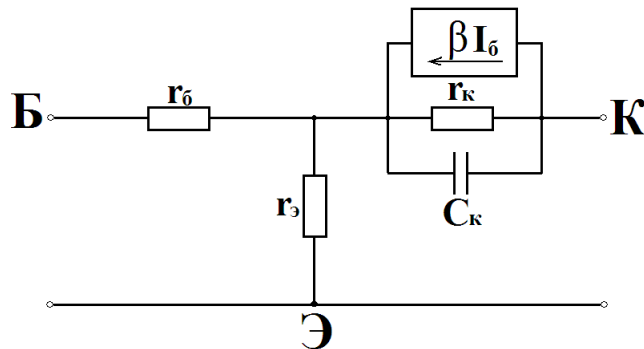
Эквивалентная схема замещения, физическая схема замещения или Т-образная схема замещения транзистора с общей базой



где:  $r_э$  – сопротивление открытого эмиттерного перехода;

$r_b$  – объемное сопротивление в области базы;  
 $r_k$  – обратное сопротивление закрытого коллекторного перехода;  
 $C_k$  – барьерная емкость закрытого коллекторного перехода;  
 $\alpha \cdot I_\epsilon$  – зависимый генератор тока, где  $\alpha$  – коэффициент передачи по току в транзисторе с ОБ.

Эквивалентная схема замещения, физическая схема замещения или Т-образная схема замещения транзистора с общим эмиттером



где:  $r_\epsilon$  – сопротивление открытого эмиттерного перехода;  
 $r_b$  – объемное сопротивление в области базы;  
 $r_k$  – обратное сопротивление закрытого коллекторного перехода;  
 $C_k$  – барьерная емкость закрытого коллекторного перехода;  
 $\beta \cdot I_b$  – зависимый генератор тока, где  $\beta$  – коэффициент передачи по току в транзисторе с ОЭ.

## ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Для описания свойств транзисторов применяются параметры – величины, дающие связь между малыми изменениями токов и напряжений в устройстве. Из-за того, что транзисторы могут использоваться в различных схемах включения – с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором, при введении параметров целесообразно рассматривать транзистор как четырехполюсник, на входе которого действует напряжение  $U_1$ , протекает ток  $I_1$ , а на выходе –  $U_2$  и  $I_2$ .



Виды параметров:

1. Z-параметры (определяют сопротивление);
2. Y-параметры (определяют проводимость);

3. h-параметры (определяют и сопротивление и проводимость и др. параметры).

Рассмотрим h-параметры. Для этого необходимо составить уравнение четырехполюсника:

$$U_1 = h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2$$

### Физический смысл h-параметров

Для определения h-параметров необходимо обеспечение режимов холостого хода в входной цепи и короткого замыкания во выходной.

1. Короткое замыкание на выходе, значит  $U_2 = 0$

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = R_{ex}$$

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} = K_i$$

2. Холостой ход на выходе, значит  $I_2 = 0$

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} = K_{oc.noU} - \text{коэффициент обратной связи по}$$

напряжению;

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{R_{блх}} - \text{проводимость}$$

### Связь между параметрами

Связь между h-параметрами и характеристиками транзистора можно свести в таблицу:

С параметрами	С физическими схемами замещения
$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} = K_i$ - коэффициент передачи по току : $h_{21OB}$ , $h_{21OЭ}$ , $h_{21OK}$	$K_{iOB} = \alpha$ $K_{iOЭ} = \beta$ $K_{iOK} = \gamma$
$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = R_{ex}$ - входное сопротивление: $h_{11OB}$ , $h_{11OЭ}$ , $h_{11OK}$	$R_{вхOB} = r_э + r_б \cdot (1 - \alpha)$ $R_{вхOЭ} = r_б + r_э \cdot (1 + \beta)$