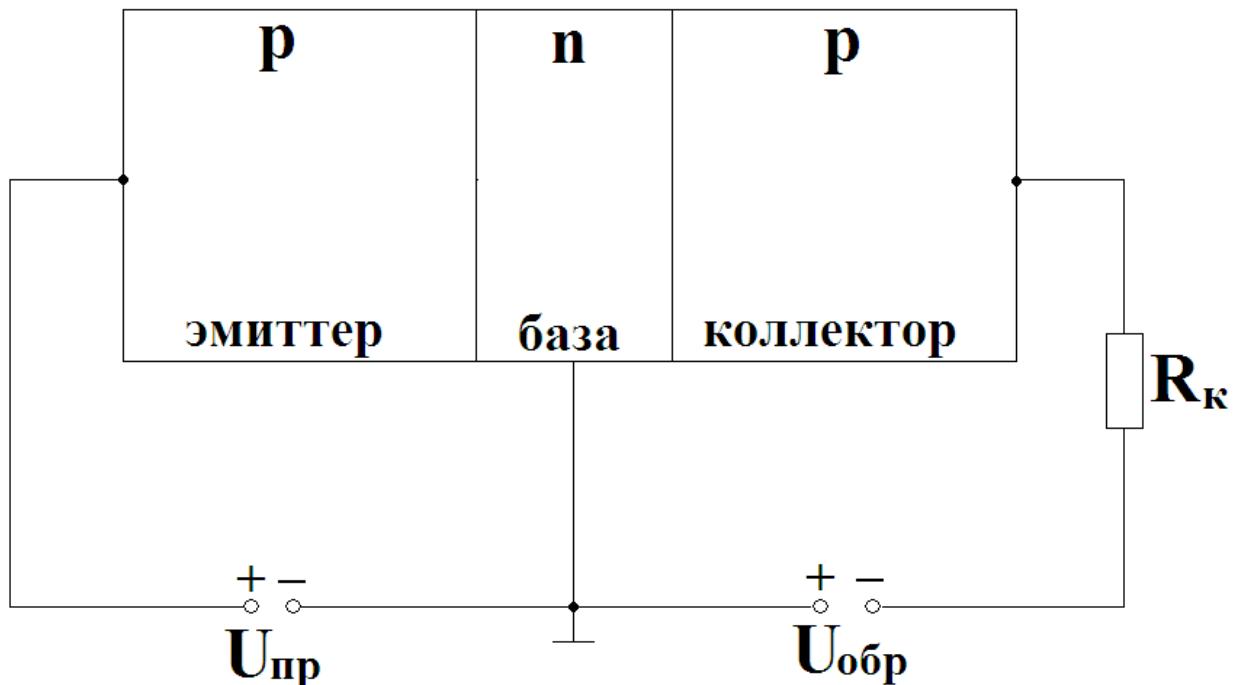


Биполярные транзисторы

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

Условная плоскостная структура биполярного транзистора приведена на рисунке:



Источник E_a имеет напряжение порядка 1 В (допустимое прямое напряжение смещения), при этом возникает большой прямой ток через эмиттерный переход I_a . Источник E_c 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:

$$E_c > I_a \cdot R_k$$

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИСТОРА

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_a .

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.

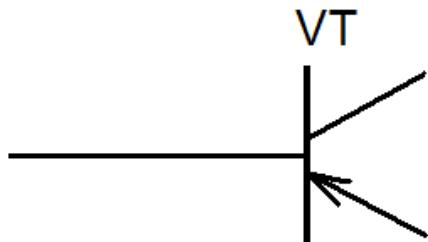
Инжектированные в базу носители составляют эмиттерный ток I_E , а рекомбинирующие с основными носителями базы, внедренные из эмиттера носители составляют ток базы – I_B . Остальная часть носителей дошедших до коллектора определяют ток коллектора – I_C . Отсюда уравнение всех токов в транзисторе:

$$I_E = I_B + I_C$$

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.

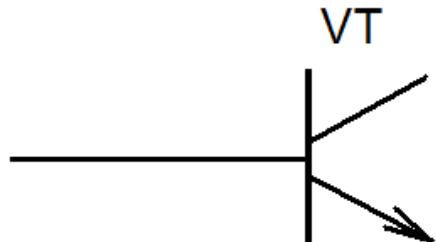
По типу проводимости транзисторы бывают прямой проводимости или p-n-p и обратной проводимости или n-p-n. На принципиальных электрических схемах их обозначают следующим образом:

Прямой проводимости



p - n - p

Обратной проводимости



n - p - n

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

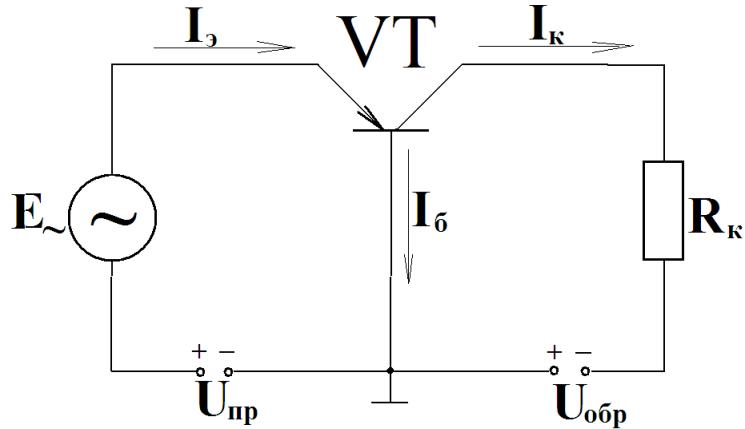
СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

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:

$$R_{exOB} = \frac{U_{ex}}{I_{ex}} = \frac{U_{\beta\beta}}{I_s},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{ex}} = \frac{I_k}{I_s} \leq 1 = \alpha$$

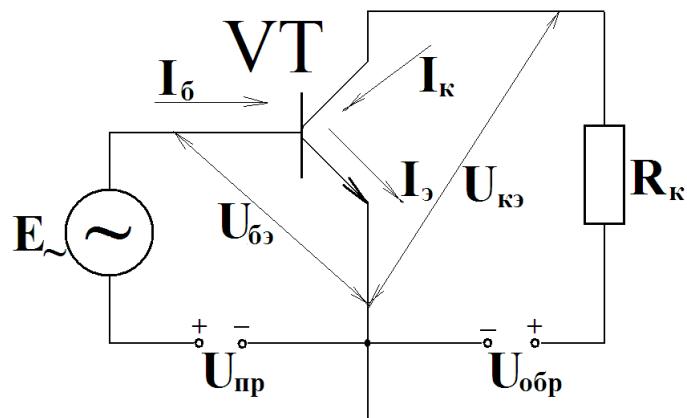
коэффициент передачи по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = \frac{U_{\kappa\beta}}{U_{\beta\beta}} - \text{большая величина.}$$

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:

$$R_{\text{вх}OЭ} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\delta\vartheta}}{I_\delta},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_\kappa}{I_\delta} \geq 100 = \beta$$

коэффициент передачи по напряжению:

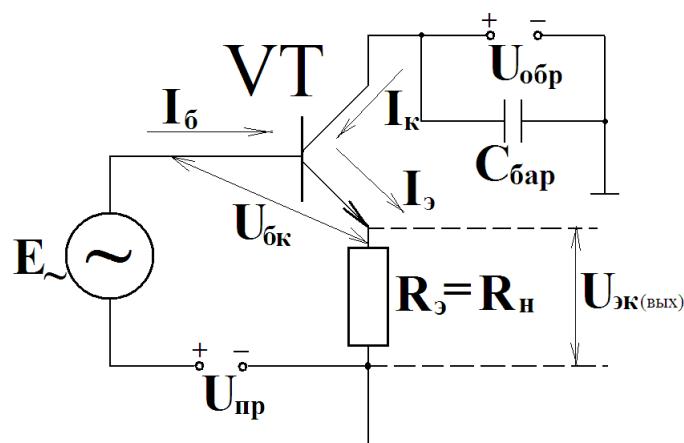
$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\kappa\vartheta}}{U_{\delta\vartheta}} - \text{большая величина.}$$

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:

$$R_{\text{вх}OK} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\delta\kappa}}{I_\delta},$$

коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_\kappa}{I_\delta} \approx 100 = \gamma$$

коэффициент передачи по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\kappa\vartheta}}{U_{\delta\kappa}} \leq 1 - \text{малая величина.}$$

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:

$$R_{\text{вх}OK} > R_{\text{вх}OЭ} > R_{\text{вх}OB}$$

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 управляемся 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_{bx} и I_{bx} будет изменяться I_{yx} , U_{yx} .
- 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:

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

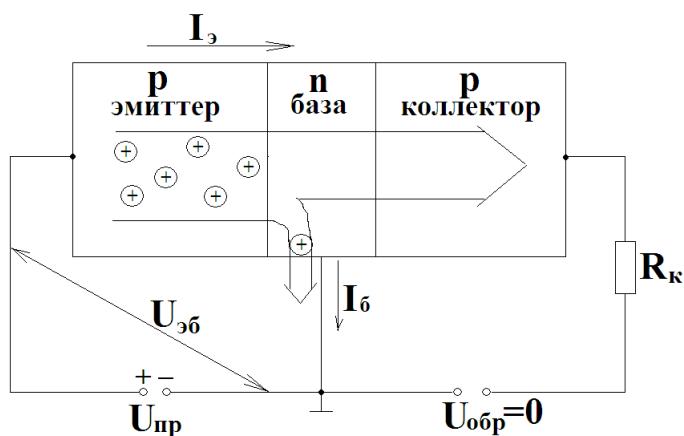
2. Выходные характеристики:

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

Для схемы с общей базой

1. Входная характеристика:

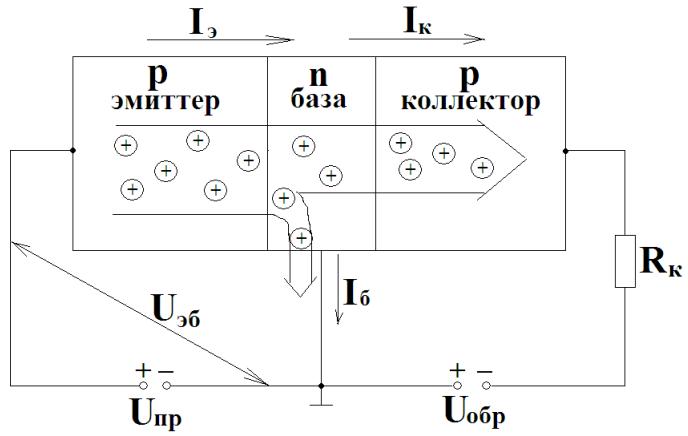
$$I_{\beta} = f(U_{\beta}), \text{ при } U_{кб} = \text{const}$$



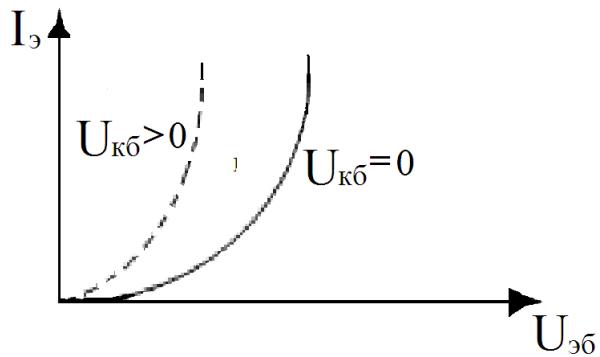
При $U_{кб} = 0$ коллекторное поле не влияет на входной ток I_{β} .

При изменении U_{β} от нуля до максимального значения $U_{\beta\max}$, ток эмиттера, являющийся входным, будет изменяться как прямой ток через переход, следовательно, вид данной характеристики – прямая ветвь ВАХ для р-п перехода.

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



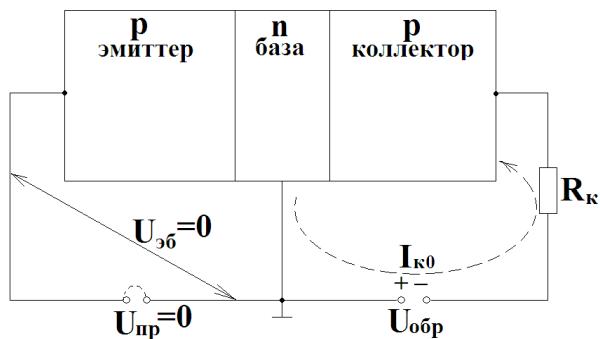
Вид входной ВАХ транзистора с ОБ :



1. Выходная характеристика:

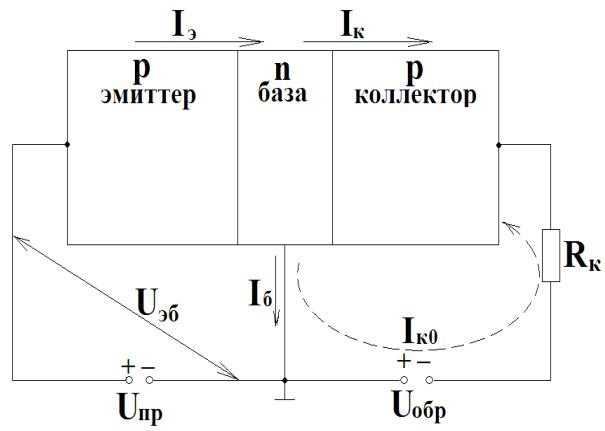
$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}}), \text{ при } I_{\text{э}} = \text{const}$$

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

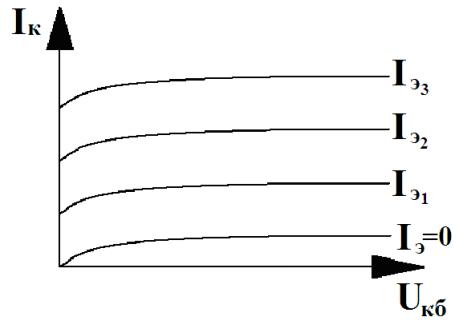


При наличии тока в цепи эмиттера, т.е. $I_{\text{э}} \neq 0$, доля коллекторного тока за счет за счет инжектированных и дошедших до коллектора носителей возрастает. Ток коллектора определяется: $I_{\text{к}} = \alpha \cdot I_{\text{э}} + I_{\text{k}0}$.

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



Вид выходной ВАХ транзистора с ОБ :



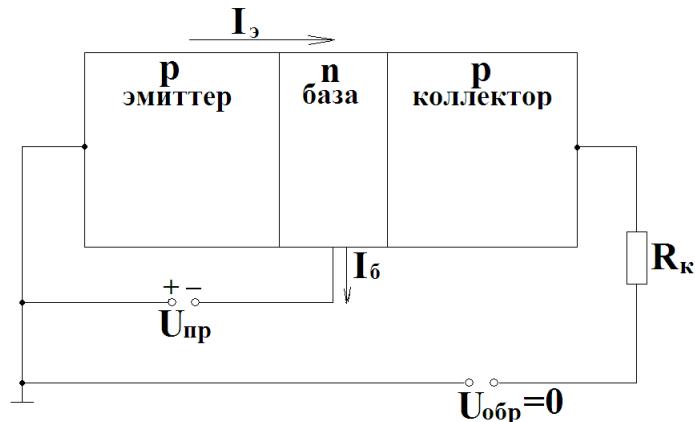
Для схемы с общим эмиттером

1. Входная характеристика:

$$I_B = f(U_{B\bar{E}}), \text{ при } U_{K\bar{E}} = \text{const}$$

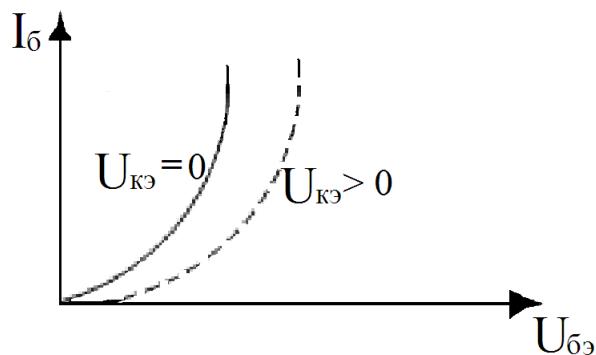
В данной схеме включения входной ток – ток базы, является током рекомбинации в базе.

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



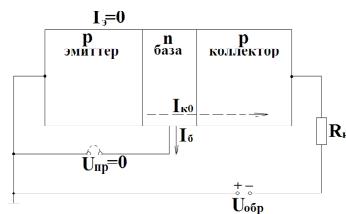
При увеличении $U_{кэ}$ запирающий слой расширяется на некоторую глубину в сторону базы, при этом активная область базы, где может происходить рекомбинация, сужается. Этот процесс называется модуляцией (изменением) ширины базы. Поэтому уменьшается ток базы, что показано на входной характеристики транзисторной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

Вид входной ВАХ транзистора с ОЭ :



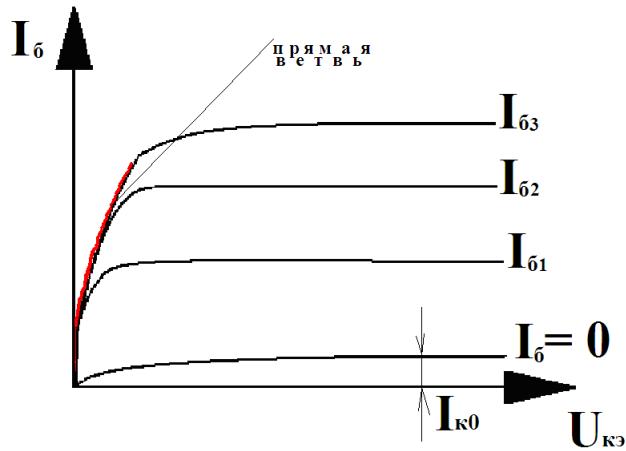
1. Выходная характеристика:

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



При входном токе равном нулю ($I_b = 0$) выходным током является I_{k0} – 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 инжектированных из эмиттера носителей. 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: $I_K = \beta \cdot I_B + I_{K0}$.

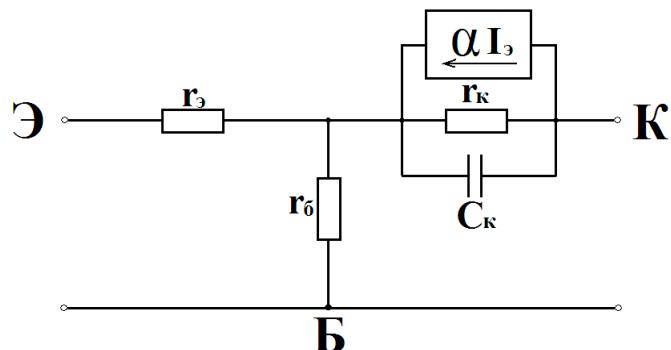
ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИЛИ Т-ОБРАЗНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

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.

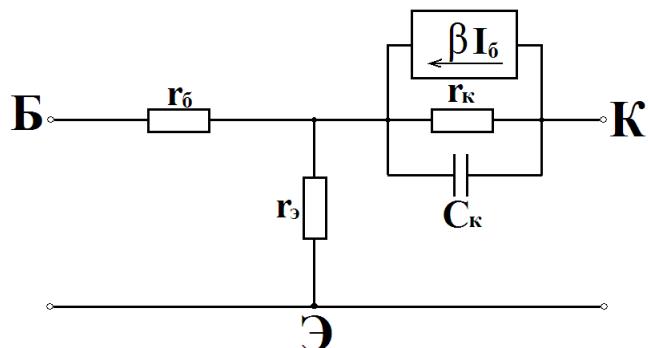
Эквивалентная схема замещения, физическая схема замещения или Т-образная схема замещения транзистора с общей базой



где: r_e – сопротивление открытого эмиттерного перехода;

r_b – объемное сопротивление в области базы;
 r_{ce} – обратное сопротивление закрытого коллекторного перехода;
 C_{ce} – барьерная емкость закрытого коллекторного перехода;
 $\alpha \cdot I_e$ – зависимый генератор тока, где α - коэффициент передачи по току в транзисторе с ОБ.

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



где: $r_{e\beta}$ – сопротивление открытого эмиттерного перехода;
 r_b – объемное сопротивление в области базы;
 r_{ce} – обратное сопротивление закрытого коллекторного перехода;
 C_{ce} – барьерная емкость закрытого коллекторного перехода;
 $\beta \cdot I_b$ – зависимый генератор тока, где β - 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 $I_1 = 0$

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} = K_{oc.noU}$$

- коэффициент обратной связи по напряжению;

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{R_{byx}}$$

- 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} , $h_{21O\Theta}$, h_{21OK}	$K_{iOB} = \alpha$ $K_{iO\Theta} = \beta$ $K_{iOK} = \gamma$
$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = R_{ex}$ - входное сопротивление: h_{11OB} , $h_{11O\Theta}$, h_{11OK}	$R_{bxOB} = r_3 + r_6 \cdot (1 - \alpha)$ $R_{bxO\Theta} = r_6 + r_3 \cdot (1 + \beta)$