

Дисциплина
«Твердотельная электроника»
ТЕМА 4: «Биполярные транзисторы»

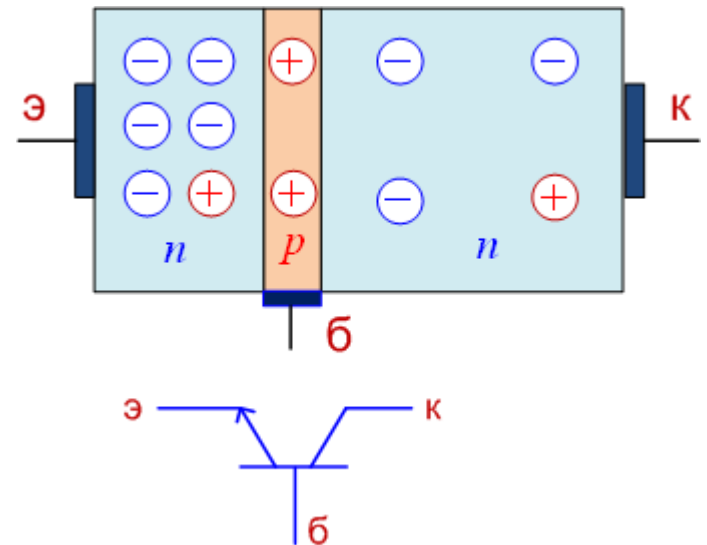
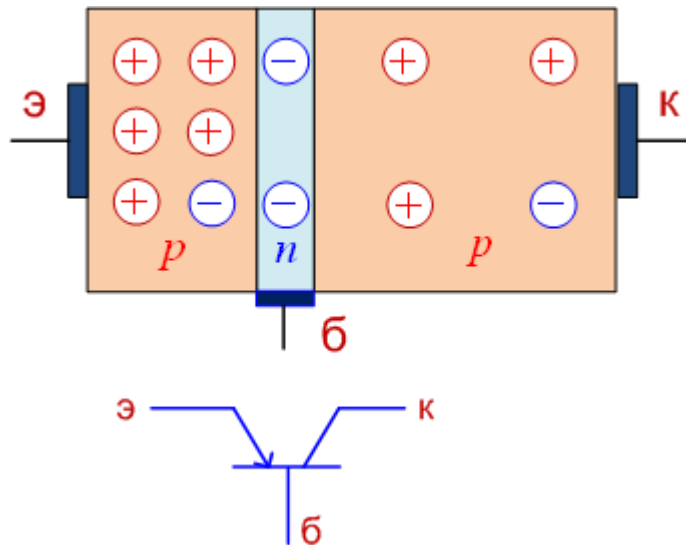


Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

Структура и основные режимы работы.

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя или несколькими взаимодействующими электрическими p-n-переходами и тремя (или более) выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

В настоящее время широко используют биполярные транзисторы с двумя p-n-переходами, к которым чаще всего и относят термин «биполярный транзистор». В зависимости от типа электропроводности наружных слоев различают транзисторы p-n-p и n-p-n типов.

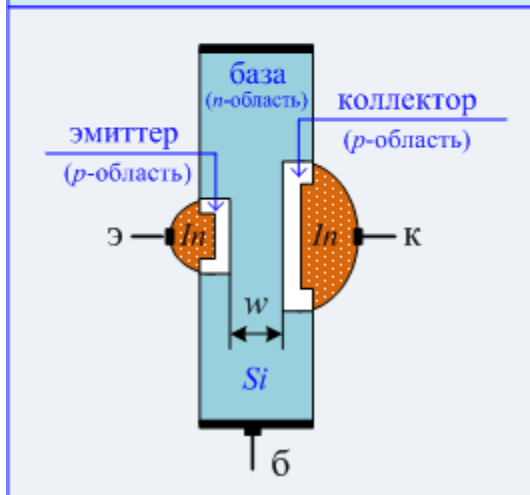


Структура и основные режимы работы.

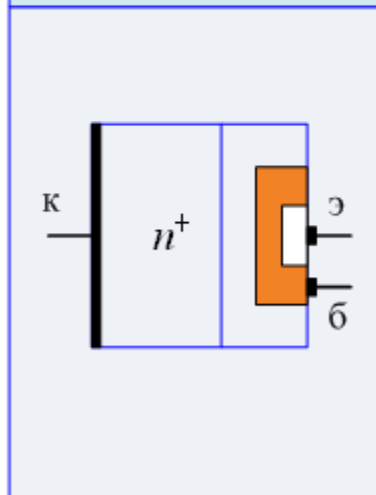
Основным элементом транзистора является кристалл полупроводника с созданными в нем двумя р-п-переходами.

Типовые структуры биполярных транзисторов, изготовленных различными методами.

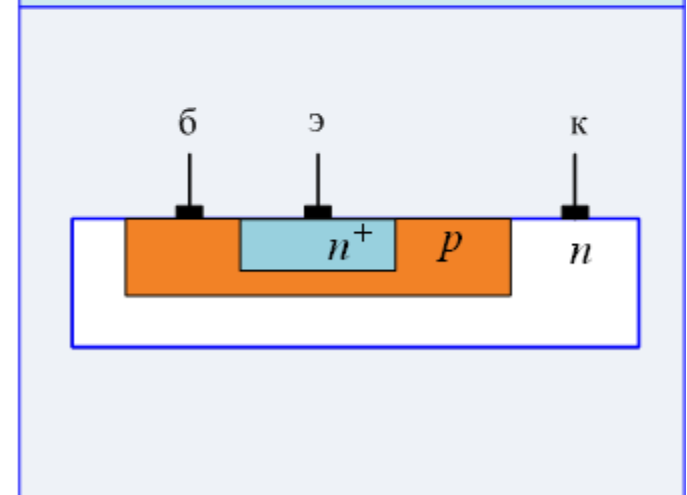
сплавного



эпитаксиально-диффузионного



планарного



Структура и основные режимы работы.

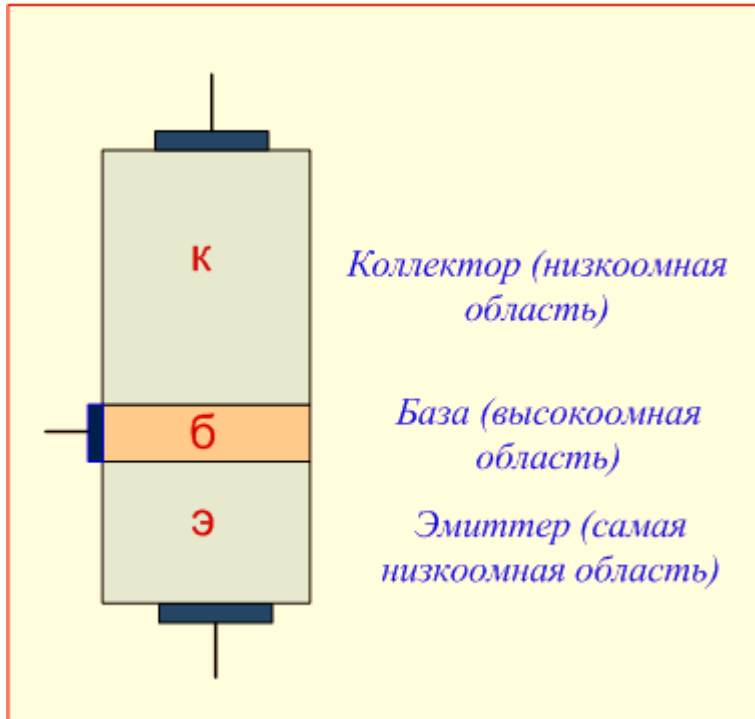
Область транзистора, расположенную между р-п- переходами, называют *базой*. Взаимодействие р-п-переходов биполярного транзистора проявляется в том, что ток одного из переходов может управлять током другого перехода.

Примыкающие к базе области чаще всего формируют неоднородными. Одну из областей изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция носителей заряда в базу, а другую – так, чтобы соответствующий р-п-переход наилучшим образом осуществлял экстракцию носителей из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей заряда в базу, называют *эмиттером*, а соответствующий р-п-переход – *эмиттерным переходом*.

Область транзистора, основным назначением которой является экстракция носителей заряда из базы, называют *коллектором*, а соответствующий р-п-переход – *коллекторным переходом*.

Структура и основные режимы работы.



Концентрация примеси в эмиттере больше, чем в коллекторе, а наименьшей является концентрация примеси в базе. В соответствии с этим база является высокоомной областью, коллектор – низкоомной, а эмиттер – самой низкоомной.

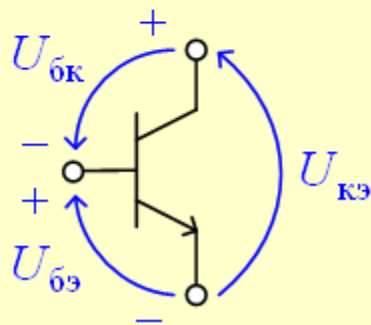
Каждый из p-n-переходов транзистора может быть смещен либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора.

Структура и основные режимы работы.

Режимы работы биполярного транзистора

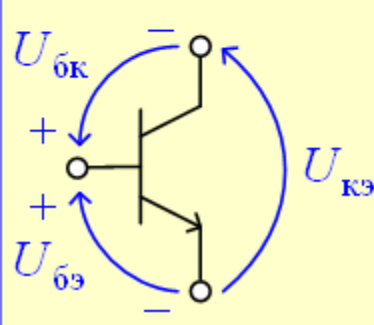
Нормальный активный режим

эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном



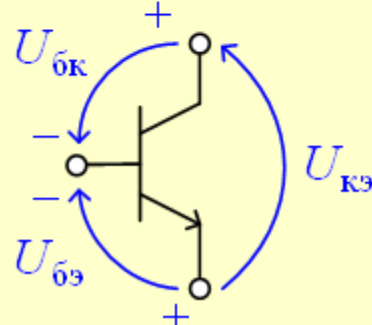
Режим насыщения

оба $p-n$ -перехода смещены в прямом направлении, при этом через транзистор протекают относительно большие токи



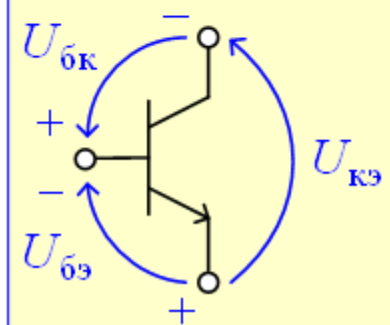
Режим отсечки

оба $p-n$ -перехода смещены в обратном направлении, при этом через транзистор протекают сравнительно малые токи

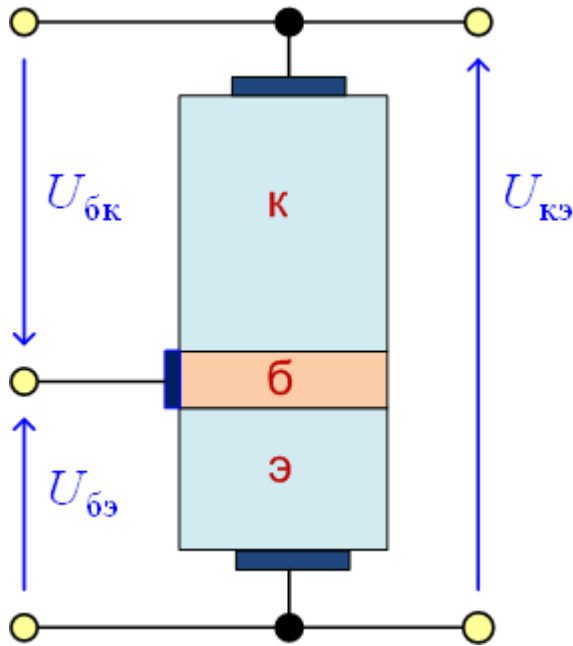


Инверсный активный режим

коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный переход – в обратном



Структура и основные режимы работы.



$$U_{бк} = U_{бэ} - U_{кэ} = U_{б} - U_{э} - U_{к} + U_{э} = U_{бк};$$

$$U_{бэ} = U_{бк} + U_{кэ}.$$

Пример 1: В каком режиме работает биполярный p-n-p-транзистор, если $U_{бэ} = -0,6\text{ В}$, $U_{кэ} = -3\text{ В}$.

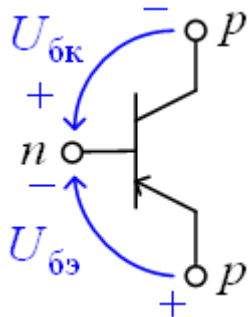
Решение. Напряжение на эмиттерном переходе известно – прямое. Определим напряжение на коллекторном переходе:

$$U_{бк} = U_{бэ} - U_{кэ} = -0,6 - (-3,0) = +2,4\text{ В}.$$

Отсюда следует, что коллекторный переход смещен в обратном направлении.

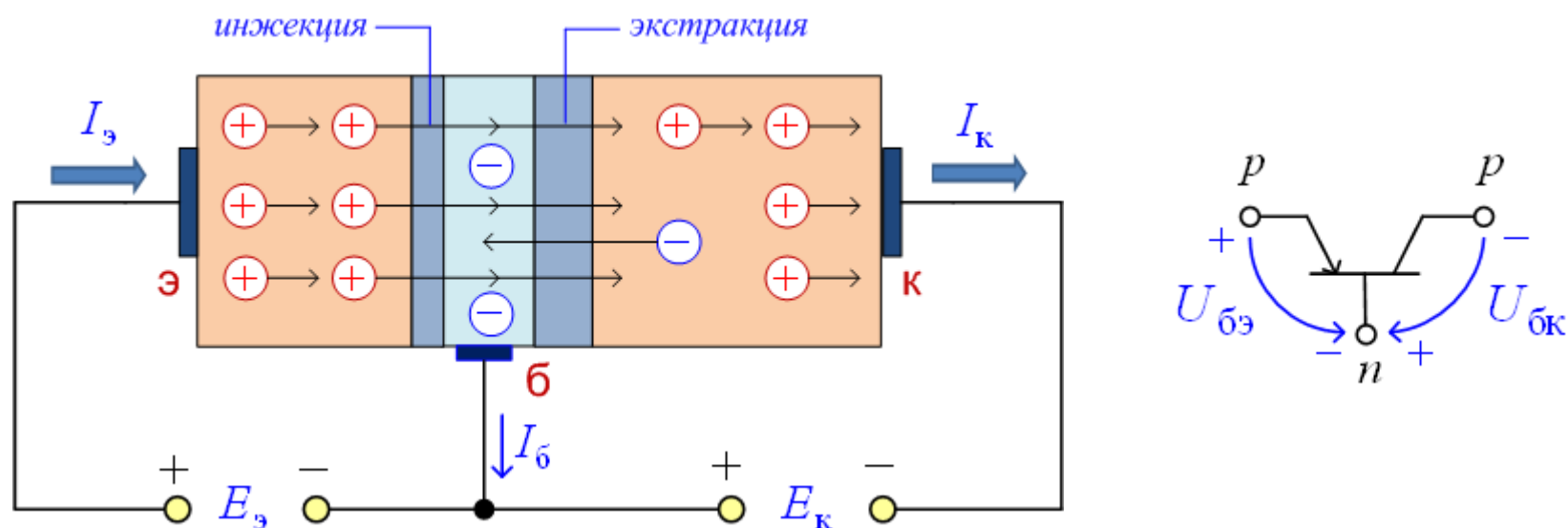
Таким образом, эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном.

Ответ: нормально активный режим работы



Принцип действия биполярного транзистора.

Управление транзистором наиболее эффективно осуществляется в нормальном активном режиме. При этом транзистор выполняет функции активного элемента электрической цепи: усиление, генерирование, переключение и т.д. В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует.



Движение дырок в процессе инжекции через эмиттерный переход создает ток эмиттера $I_э$. Движение дырок в процессе экстракции через коллекторный переход создает ток коллектора $I_к$. Незначительная часть инжектируемых из эмиттера в базу дырок рекомбинирует в области базы с электронами, количество которых пополняется из внешней цепи от источника $E_э$. За счет этого в цепи базы протекает ток базы $I_б$.

Принцип действия биполярного транзистора.

Токи трех электродов биполярного транзистора связаны соотношением:

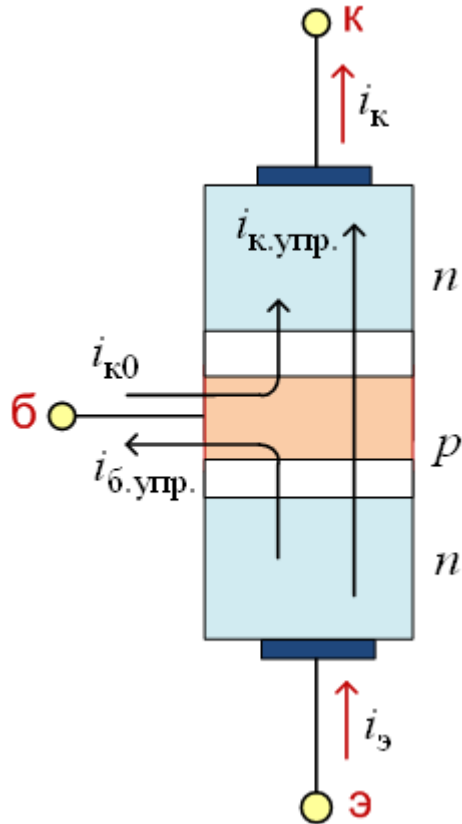
$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}.$$

Ток базы значительно меньше тока коллектора, поэтому для практических расчетов часто полагают ток коллектора приблизительно равны току эмиттера: $I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$.

Отношение $\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} = \alpha$ называют *статическим коэффициентом передачи тока эмиттера*.

Биполярный транзистор как управляемый полупроводниковый прибор действует за счет создания транзитного потока носителей заряда из эмиттера через базу в коллектор и управления током коллектора путем изменения тока эмиттера. Ток эмиттера как прямой ток р-п-перехода значительно изменяется при очень малых изменениях прямого напряжения на эмиттерном переходе и вызывает, соответственно, большие изменения тока коллектора. На этом основаны усилительные свойства биполярного транзистора.

Соотношения между токами в биполярном транзисторе.



Ток эмиттера управляется напряжением на эмиттерном переходе, но до коллектора доходит несколько меньший ток, который можно назвать *управляемым коллекторным током* $i_{к.упр.}$. Часть инжектированных из эмиттера в базу носителей рекомбинирует. Поэтому $i_{к.упр.} = \alpha \cdot i_э$.

Через коллекторный переход всегда проходит *неуправляемый обратный ток* $i_{к0}$ (неуправляемый потому, что не проходит через эмиттерный переход). Таким образом, полный коллекторный ток

$$i_к = \alpha \cdot i_э + i_{к0}. \quad (4.1)$$

Преобразуем выражение (4.1) так чтобы выразить зависимость тока $i_к$ от тока базы $i_б$:

$$i_к = \alpha \cdot (i_к + i_б) + i_{к0}.$$

Соотношения между токами в биполярном транзисторе.

Откуда
$$i_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_{\bar{b}} + \frac{i_{k0}}{1-\alpha}. \quad \text{Обозначим } \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \quad \text{и} \quad \frac{i_{k0}}{1-\alpha} = i_{k\varepsilon 0}.$$

β – статическим коэффициентом передачи тока базы.

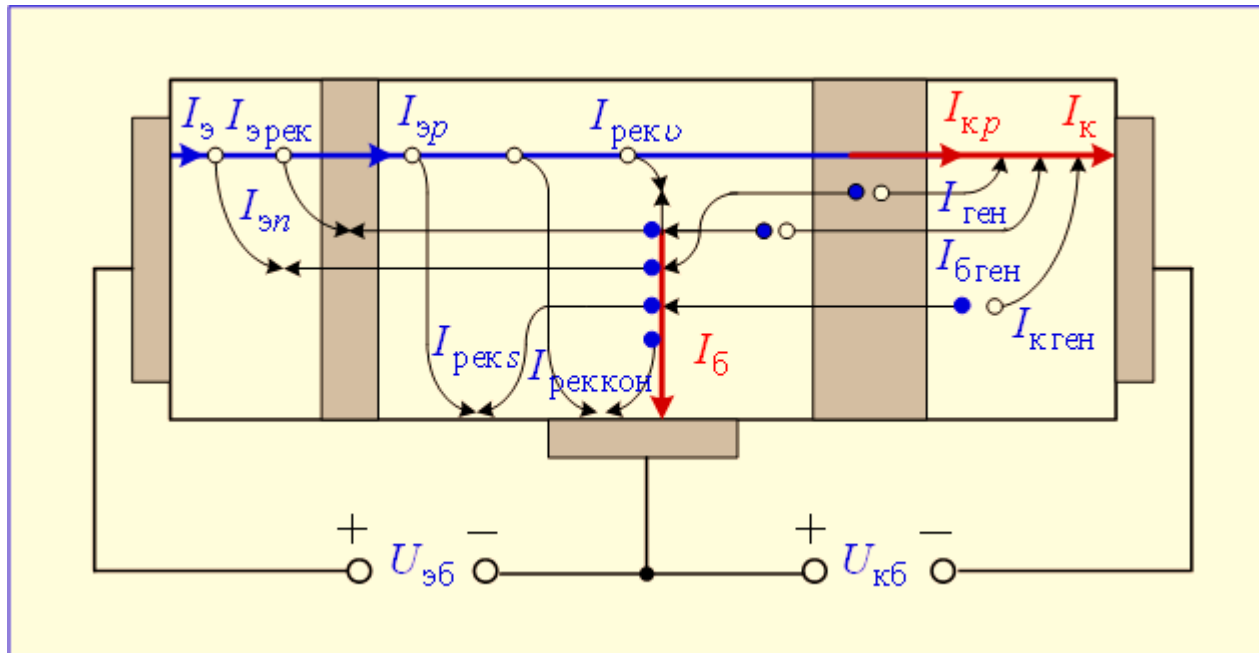
Ток $i_{k\varepsilon 0}$ называют *начальным сквозным током*, так протекает сквозь весь транзистор (через три его области и через оба p-n-перехода) в том случае, если $i_{\bar{b}} = 0$.

Начальный сквозной ток $i_{k\varepsilon 0}$ и неуправляемый обратный ток i_{k0} связаны соотношением:

$$i_{k\varepsilon 0} \approx \beta \cdot i_{k0}.$$

Сравнительно большой ток $i_{k\varepsilon 0}$ объясняется тем, что некоторая часть напряжения $u_{k\varepsilon}$ приложена к эмиттерному переходу в качестве прямого напряжения. Вследствие этого возрастет ток эмиттера, а он в данном случае и является сквозным током.

Соотношения между токами в биполярном транзисторе.



Распределение стационарных потоков носителей заряда в нормальном активном режиме работы биполярного транзистора p-n-p-типа

Схемы включения биполярного транзистора.

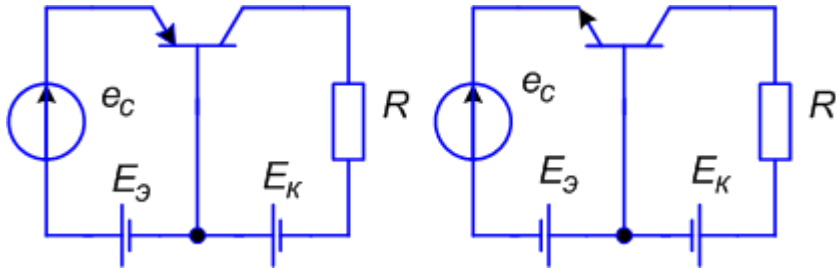


Рисунок 4.1 – Схема с общей базой.

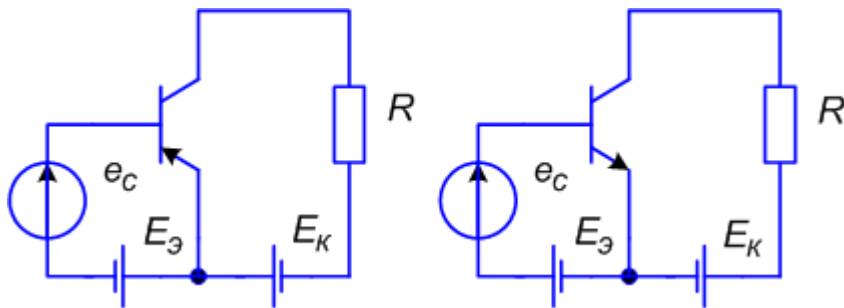


Рисунок 4.2 – Схема с общим эмиттером.

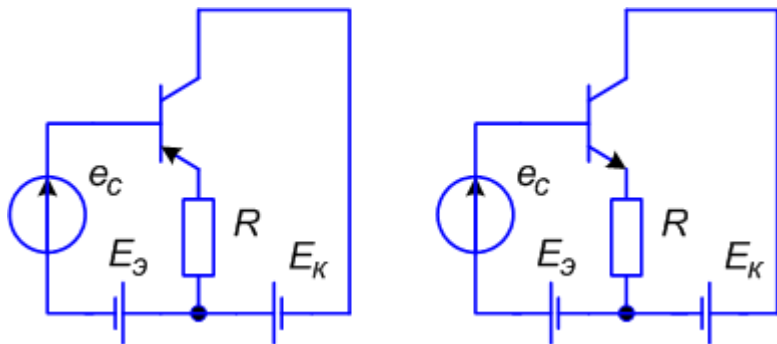
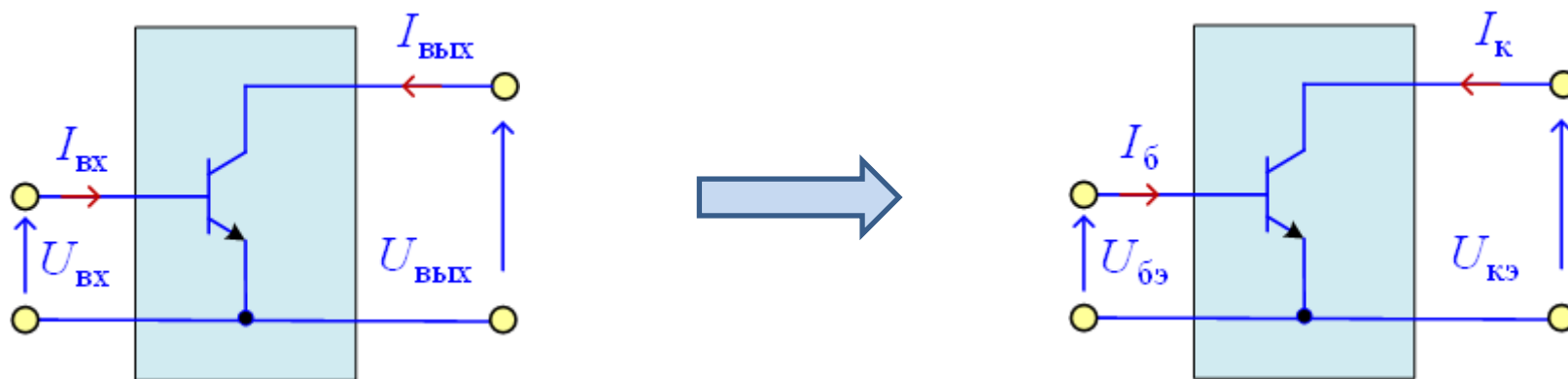


Рисунок 4.3 – Схема с общим коллектором.

Статические характеристики биполярного транзистора.

Биполярный транзистор можно представить как нелинейный четырехполюсник с короткозамкнутой стороной, соответствующей общему электроду.

Электрическое состояние четырехполюсника характеризуется четырьмя величинами, связанными с входной и выходной сторонами: входным напряжением $U_{ВХ}$, входным током $I_{ВХ}$, выходным напряжением $U_{ВЫХ}$ и выходным током $I_{ВЫХ}$.



Статические вольт-амперные характеристики четырехполюсника представляют собой зависимости между постоянными входными и выходными токами и напряжениями при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

Статические характеристики биполярного транзистора.

Семейство входных характеристик связывает ток и напряжение на входе при постоянстве одной из выходных величин:

$$I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) \text{ при } U_{\text{ВЫХ}} = \text{const.}$$

Семейство выходных характеристик связывает ток и напряжение на выходе при постоянстве одной из входных величин:

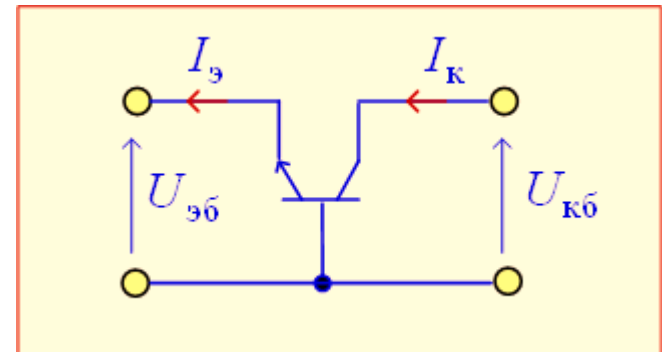
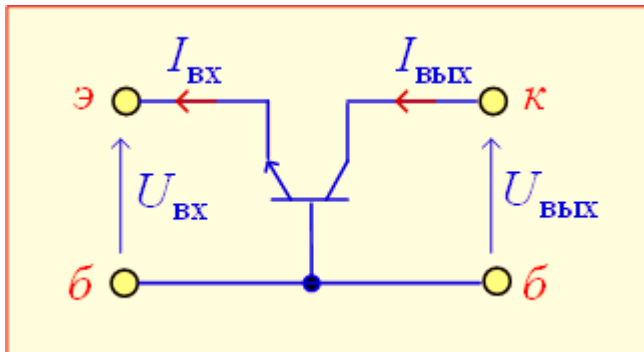
$$I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}}) \text{ при } I_{\text{ВХ}} = \text{const.}$$

Зависимость выходной величины от входной устанавливает семейство характеристик передачи (передаточных характеристик):

$$I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) \text{ при } U_{\text{ВЫХ}} = \text{const.}$$

Зависимость входной величины от выходной величины определяется семейством характеристик обратной связи.

Статические характеристики биполярного транзистора
включенного по схеме с общей базой. Входные характеристики.



При включении транзистора по схеме с общей базой

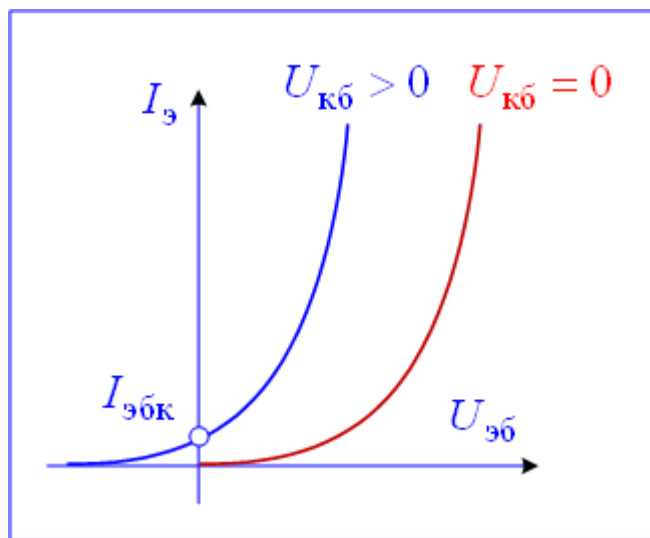
$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Э}}, U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ЭБ}}, I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}, U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КБ}}.$$

Входные характеристики представляют собой зависимости

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \quad \left| \quad U_{\text{КБ}} = \text{const}$$

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общей базой. Входные характеристики.

Общий характер входных характеристик *определяется свойствами эмиттерного перехода, смещенного в прямом направлении, поэтому внешне входные характеристики похожи на прямые ветви вольт-амперной характеристики p-n-перехода.*

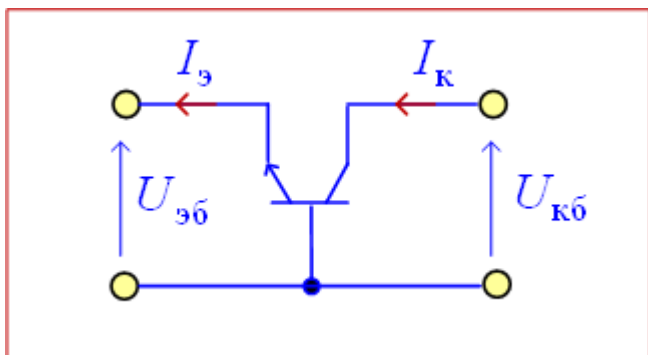


Характерной особенностью этих характеристик является то, что при напряжении на эмиттерном переходе, равном нулю, входной ток отличается от нуля и приблизительно равен току $I_{\text{эбк}}$. Для того чтобы входной ток стал равен нулю, на эмиттерный переход должно быть подано отрицательное напряжение (работа в режиме отсечки).

$I_{\text{эбк}}$ — ток эмиттера транзистора, когда эмиттерный переход находится под обратным напряжением, а коллекторный переход короткозамкнут.

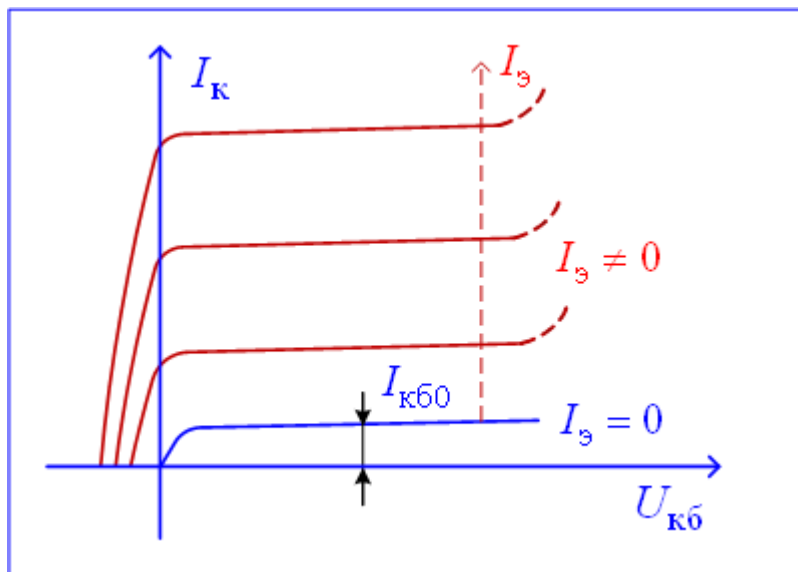
Рисунок 4.4 – Семейство входных характеристик биполярного транзистора при включении с общей базой.

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общей базой. Выходные характеристики.



Выходные характеристики представляют собой зависимости

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}}) \quad \left| \quad I_{\text{э}} = \text{const}$$



Общий вид выходных характеристик определяется обратным смещенным коллекторным переходом, поэтому аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики p-n-перехода.

С ростом тока эмиттера выходные характеристики смещаются вверх и пересекают ось ординат

($U_{\text{кб}} = 0$) в точках $I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}}$.

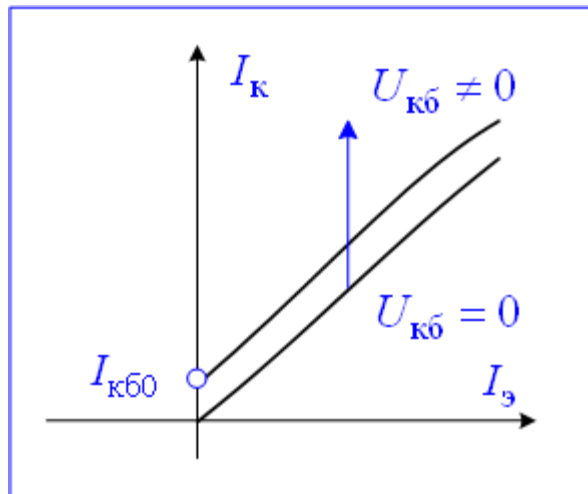
$I_{\text{кб0}}$ – ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общей базой, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток эмиттера равен нулю.

Рисунок 4.5 – Семейство выходных характеристик биполярного транзистора при включении с общей базой.

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общей базой. Характеристики передачи.

Характеристики передачи представляют собой зависимости

$$I_{\text{к}} = f(I_{\text{э}}) \quad \left| \quad U_{\text{кб}} = \text{const}$$

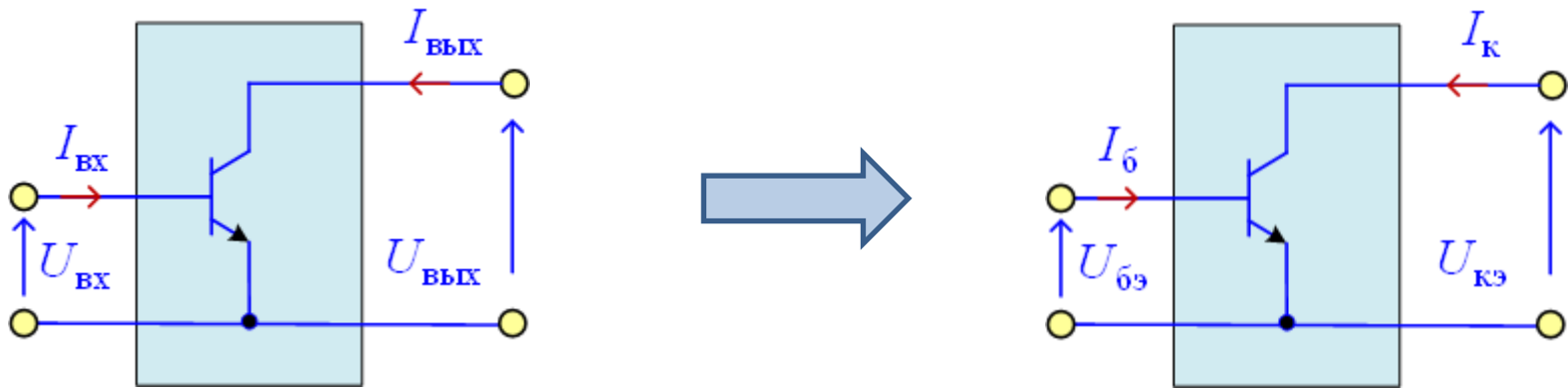


Характеристики передачи в первом приближении можно считать прямыми линиями. В действительности коэффициент передачи тока эмиттера зависит от тока эмиттера, поэтому характеристики незначительно отличаются от линейных.

При $U_{\text{кб}} = 0$ характеристика передачи выходит из начала координат. При обратном напряжении на коллекторном переходе характеристики смещаются вверх и выходят из точек на оси ординат, соответствующих обратному току коллектора $I_{\text{кб0}}$.

Рисунок 4.6 – Семейство характеристик передачи биполярного транзистора при включении с общей базой.

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общим эмиттером. Входные характеристики.



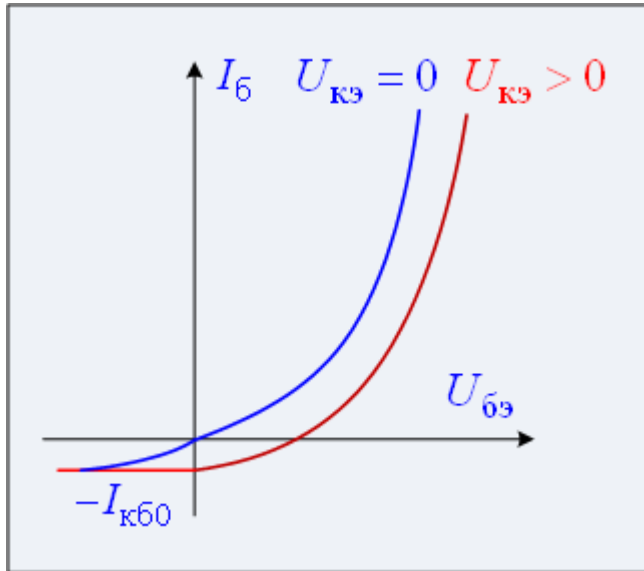
При включении транзистора по схеме с общим эмиттером

$$I_{\text{ВХ}} = I_{\text{б}}, U_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}}, I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{к}}, U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{кэ}}.$$

Входные характеристики представляют собой зависимости

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

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общим эмиттером. Входные характеристики.



При $U_{кэ} = 0$ входная характеристика эквивалентна характеристике $p-n$ -перехода. Если $U_{кэ} < 0$ то ток базы уменьшается и входные характеристики смещаются вниз и не проходят через начало координат. Кроме того, при условии $(-U_{кэ}) \ll \varphi_T$ входные характеристики расположены очень близко друг к другу.

При $U_{бэ} = 0$ и $U_{кэ} > 0$ ток базы равен $-I_{кб0}$.

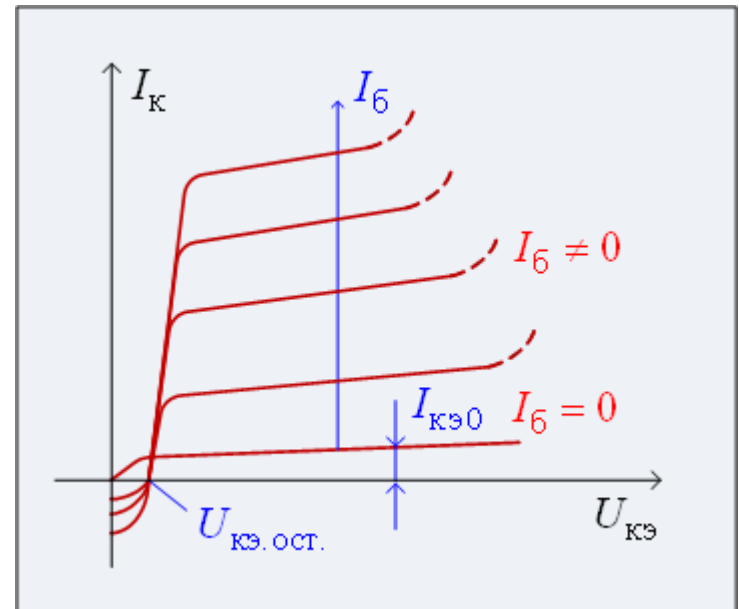
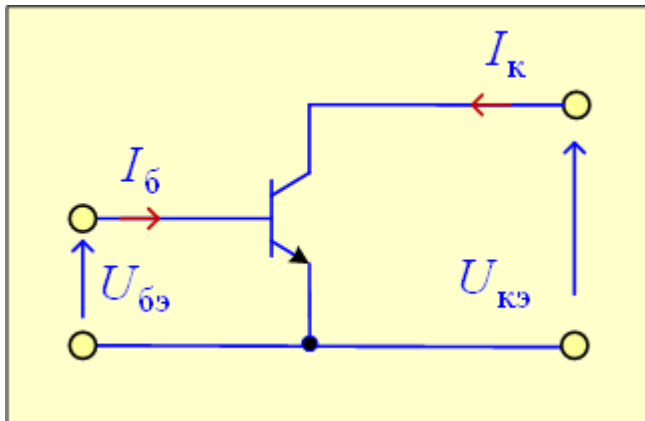
$I_{кб0}$ – ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общей базой, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток эмиттера равен нулю.

Рисунок 4.7 – Семейство входных характеристик биполярного транзистора при включении с общим эмиттером.

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общим эмиттером. Выходные характеристики.

Выходные характеристики представляют собой зависимости

$$I_K = f(U_{KЭ}) \quad \Big| \quad I_Б = \text{const}$$



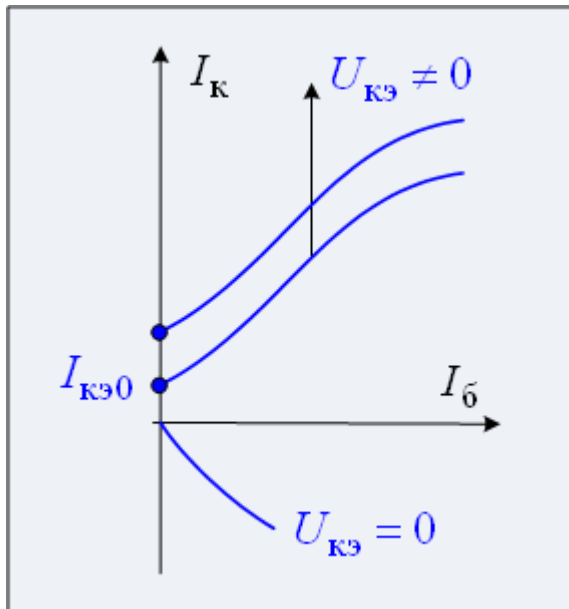
$I_{KЭ0}$ – ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток базы равен нулю.

Рисунок 4.8 – Семейство выходных характеристик биполярного транзистора при включении с общим эмиттером.

Статические характеристики биполярного транзистора включенного по схеме с общим эмиттером. Характеристики передачи.

Характеристики передачи представляют собой зависимости

$$I_K = f(I_{\delta}) \quad \left| \quad U_{KЭ} = \text{const} \right.$$



При $U_{KЭ} = 0$ характеристика передачи выходит из начала координат и расположена в четвертом квадранте.

Если $(-U_{KЭ}) \gg \varphi_T$, то характеристики передачи выходят из точек $I_{KЭ0}$ на оси тока и являются монотонно возрастающими. Рост напряжения $U_{KЭ}$ вызывает смещение характеристик передачи вверх из-за увеличения тока $I_{KЭ0}$.

Рисунок 4.9 – Семейство характеристик передачи биполярного транзистора при включении с общим эмиттером.

Статические характеристики биполярного транзистора .

Вопрос 1: Представлены математические формы записи статических характеристик биполярного транзистора при включении по схеме с общей базой и по схеме с общим эмиттером.

$1. I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}}) \left \begin{array}{l} U_{\text{кб}} = \text{const} \end{array} \right.$	$2. I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}}) \left \begin{array}{l} I_{\text{э}} = \text{const} \end{array} \right.$
$3. I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \left \begin{array}{l} I_{\text{б}} = \text{const} \end{array} \right.$	$4. I_{\text{к}} = f(I_{\text{э}}) \left \begin{array}{l} U_{\text{кб}} = \text{const} \end{array} \right.$
$5. I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}) \left \begin{array}{l} U_{\text{кэ}} = \text{const} \end{array} \right.$	$6. I_{\text{к}} = f(I_{\text{б}}) \left \begin{array}{l} U_{\text{кэ}} = \text{const} \end{array} \right.$

Какая из представленных форм записи соответствует выходной характеристике биполярного транзистора при включении по схеме с общим эмиттером.

Статические характеристики биполярного транзистора .

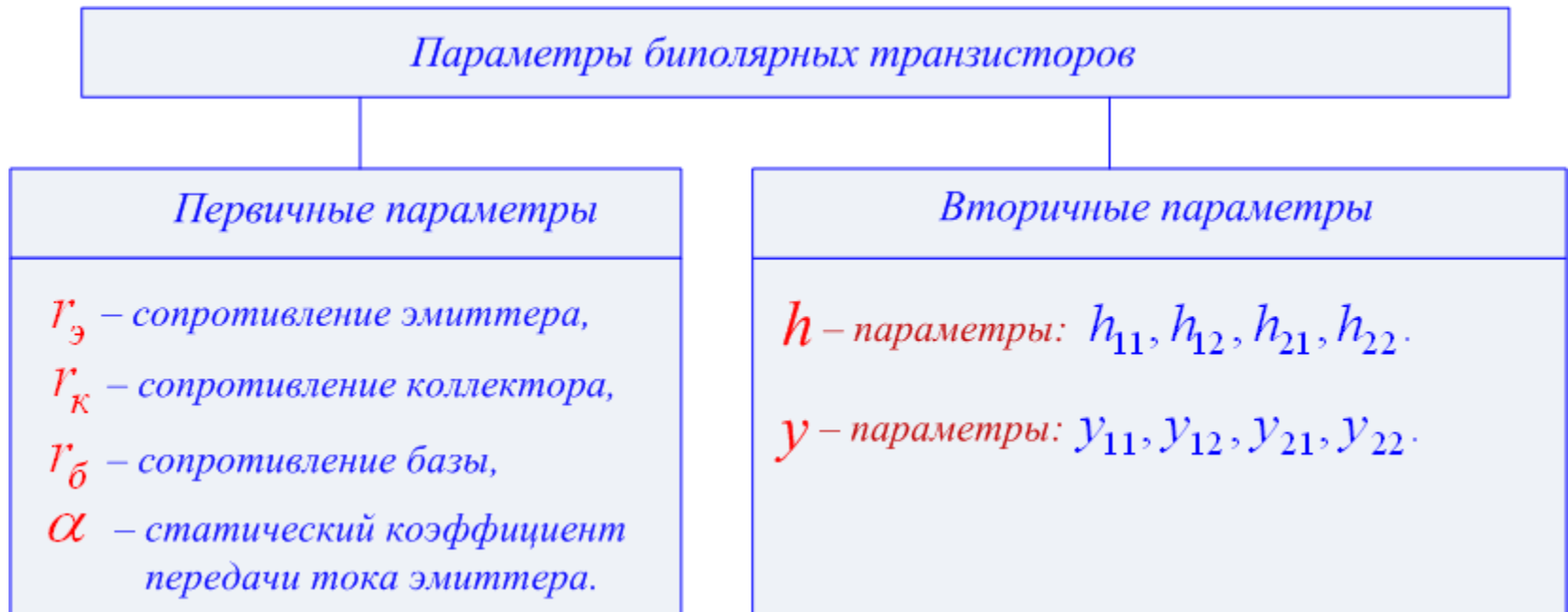
Таблица 4.1 – Важнейшие параметры схем включения биполярного транзистора

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_i	десятки – сотни	$k_i < 1$	десятки – сотни
k_u	десятки – сотни	десятки – сотни	$k_u < 1$
$r_{вх}$	сотни Ом – единицы кОм	единицы – десятки Ом	десятки – сотни кОм
$r_{вых}$	единицы – десятки кОм	сотни кОм – единицы МОм	сотни Ом – единицы кОм

Параметры и эквивалентные схемы биполярного транзистора.

Малые приращения токов и напряжений биполярного транзистора связаны между собой линейными функциями, что позволяет рассматривать транзистор в режиме малого сигнала как линейный четырехполюсник.

Для транзисторов предложено несколько различных систем параметров и эквивалентных схем, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.



Параметры и эквивалентные схемы биполярного транзистора .

Система h -параметров является смешанной (гибридной), так как h -параметры имеют разную размерность: h_{11} имеет размерность сопротивления, h_{22} – размерность проводимости, а параметры h_{12} и h_{21} являются безразмерными.

Параметр h_{11} представляет собой входное сопротивление транзистора, а параметр h_{21} – коэффициент передачи тока. Параметр h_{12} представляет собой коэффициент обратной связи по напряжению, а h_{22} – выходную проводимость транзистора.

Основным достоинством h -параметров является точность измерения, так как необходимые для измерения параметров режимы холостого хода на выходе и короткого замыкания на входе легко осуществимы.

$$h_{11} = \left. \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dI_{\text{ВХ}}} \right|_{dU_{\text{ВЫХ}}=0};$$

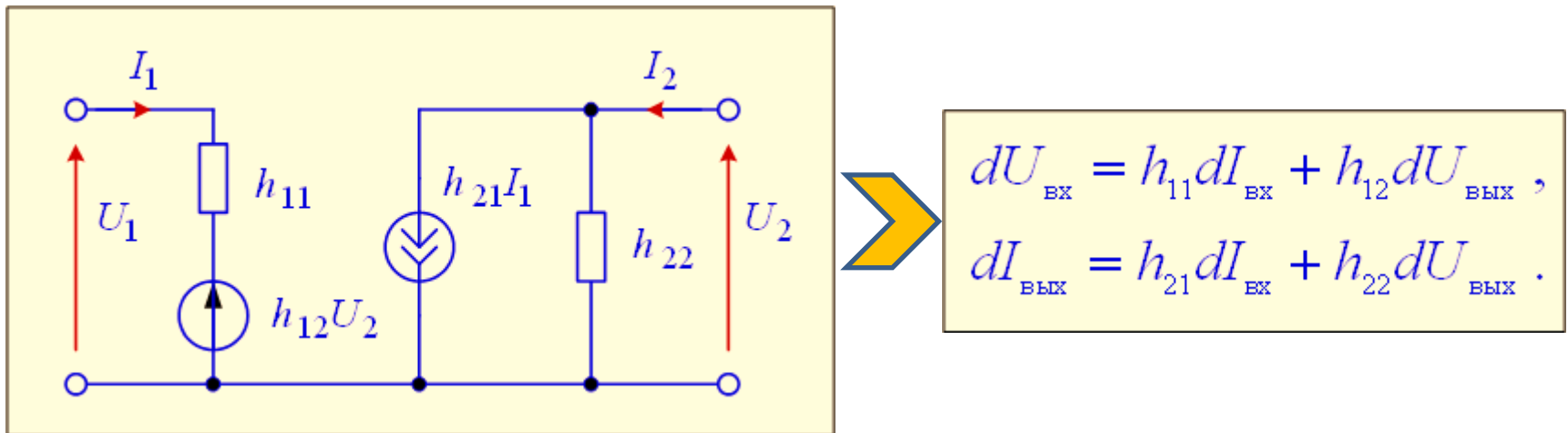
$$h_{21} = \left. \frac{dI_{\text{ВЫХ}}}{dI_{\text{ВХ}}} \right|_{dU_{\text{ВЫХ}}=0};$$

$$h_{12} = \left. \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dU_{\text{ВЫХ}}} \right|_{dI_{\text{ВХ}}=0};$$

$$h_{22} = \left. \frac{dI_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВЫХ}}} \right|_{dI_{\text{ВХ}}=0}.$$

Параметры и эквивалентные схемы биполярного транзистора .

При расчете электронных цепей транзистор может быть представлен эквивалентной цепью, содержащей пассивные двухполюсники (линейные и нелинейные) и зависимые источники тока и напряжения. По способу построения различают *формальные* и *физические эквивалентные схемы*.

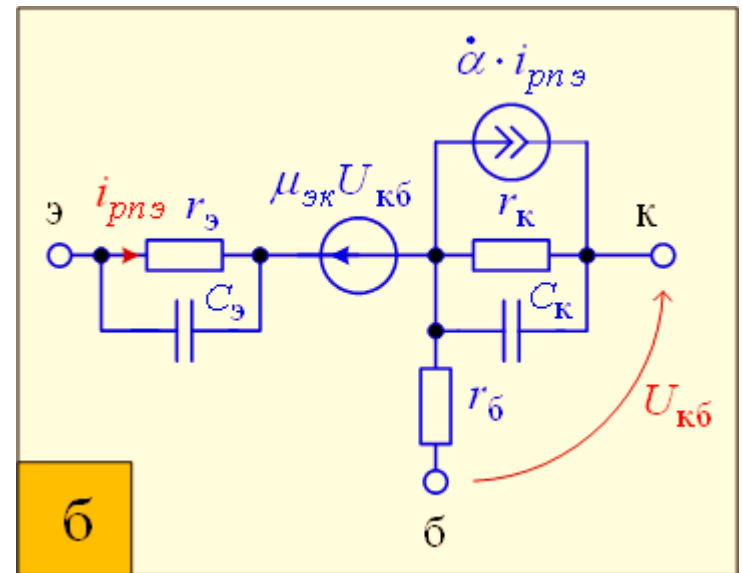
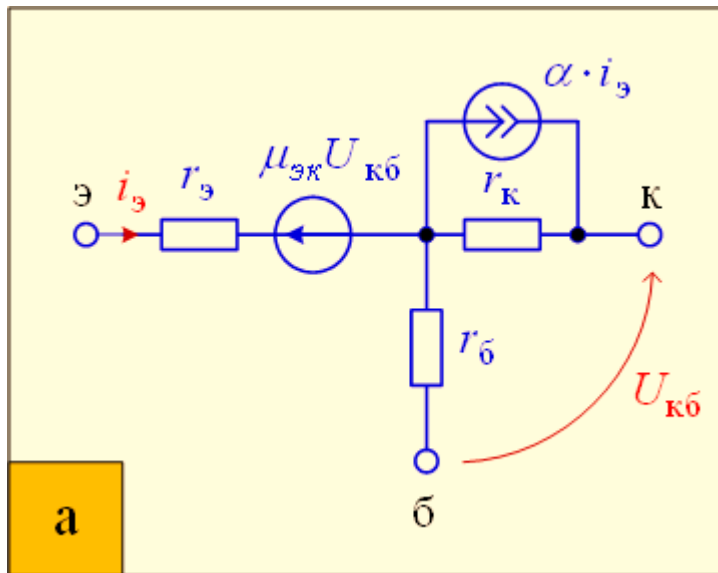


Формальная эквивалентная схема биполярного транзистора в системе h -параметров.

Недостатком формальных эквивалентных схем является то, что их параметры оказываются разными для различных схем включения транзистора, отсутствует связь параметров со структурой и технологией изготовления транзистора, а зависимость параметров от режима работы и температуры сложна.

Параметры и эквивалентные схемы биполярного транзистора .

Этих недостатков лишены физические эквивалентные схемы транзистора, которые формируют на основе математического описания физических процессов в отдельных частях структуры транзистора.

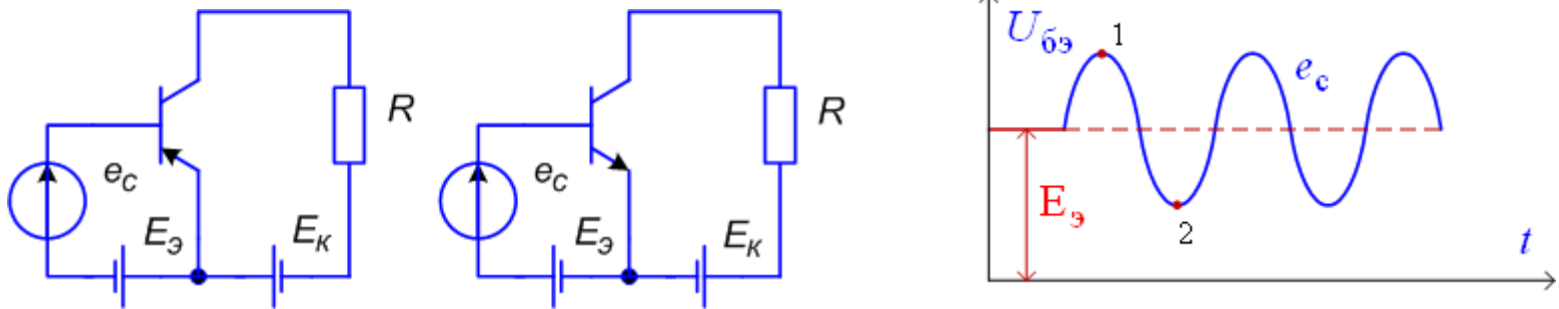


Физические малосигнальные эквивалентные T-образные схемы биполярного транзистора: а – низкочастотная; б – высокочастотная

Усилительные свойства биполярного транзистора .

Линейная связь между входными и выходными токами и напряжениями транзистора существует только при его работе в нормальном активном режиме, поэтому этот режим используют в качестве основного для усиления электрических сигналов.

Для усиления электрических сигналов в нормальном активном режиме необходимо на эмиттерный переход подать постоянное прямое напряжение $E_э$ и переменное напряжение усиливаемого сигнала e_c , на коллекторный переход подать постоянное обратное напряжение $E_к$ и включить в коллекторную цепь нагрузочный резистор R



Прямое напряжение $E_э$ обеспечивает смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а переменное напряжение e_c – изменение во времени высоты потенциального барьера.

Усилительные свойства биполярного транзистора .

Для количественной оценки усилительных свойств биполярного транзистора в малосигнальном режиме работы удобно представить транзистор как четырехполюсник в системе h -параметров.

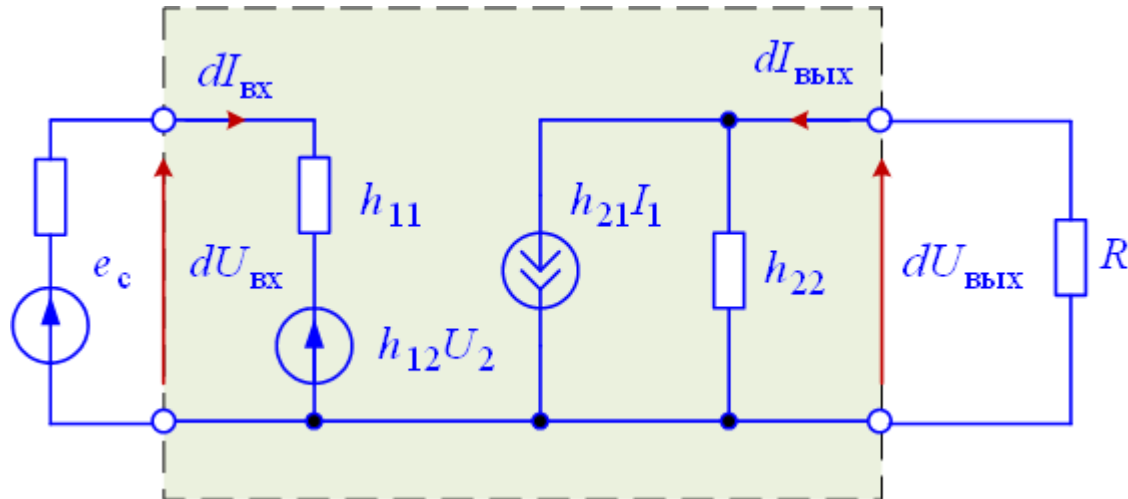
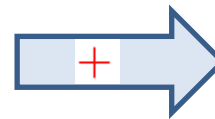


Схема замещения усилительного каскада, содержащая биполярный транзистор как четырехполюсник в системе h -параметров

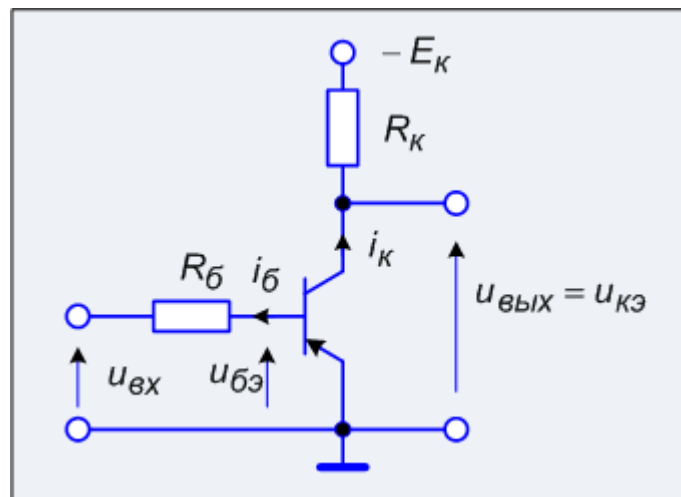
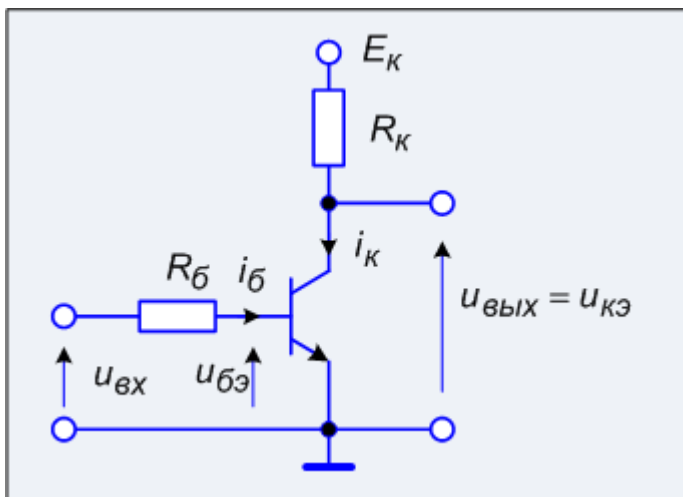
$$\begin{aligned} dU_{\text{ВХ}} &= h_{11} dI_{\text{ВХ}} + h_{12} dU_{\text{ВЫХ}} , \\ dI_{\text{ВЫХ}} &= h_{21} dI_{\text{ВХ}} + h_{22} dU_{\text{ВЫХ}} , \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} dU_{\text{ВХ}} &= e_c - r_c dI_{\text{ВХ}} , \\ dI_{\text{ВЫХ}} &= -\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{R} . \end{aligned}$$

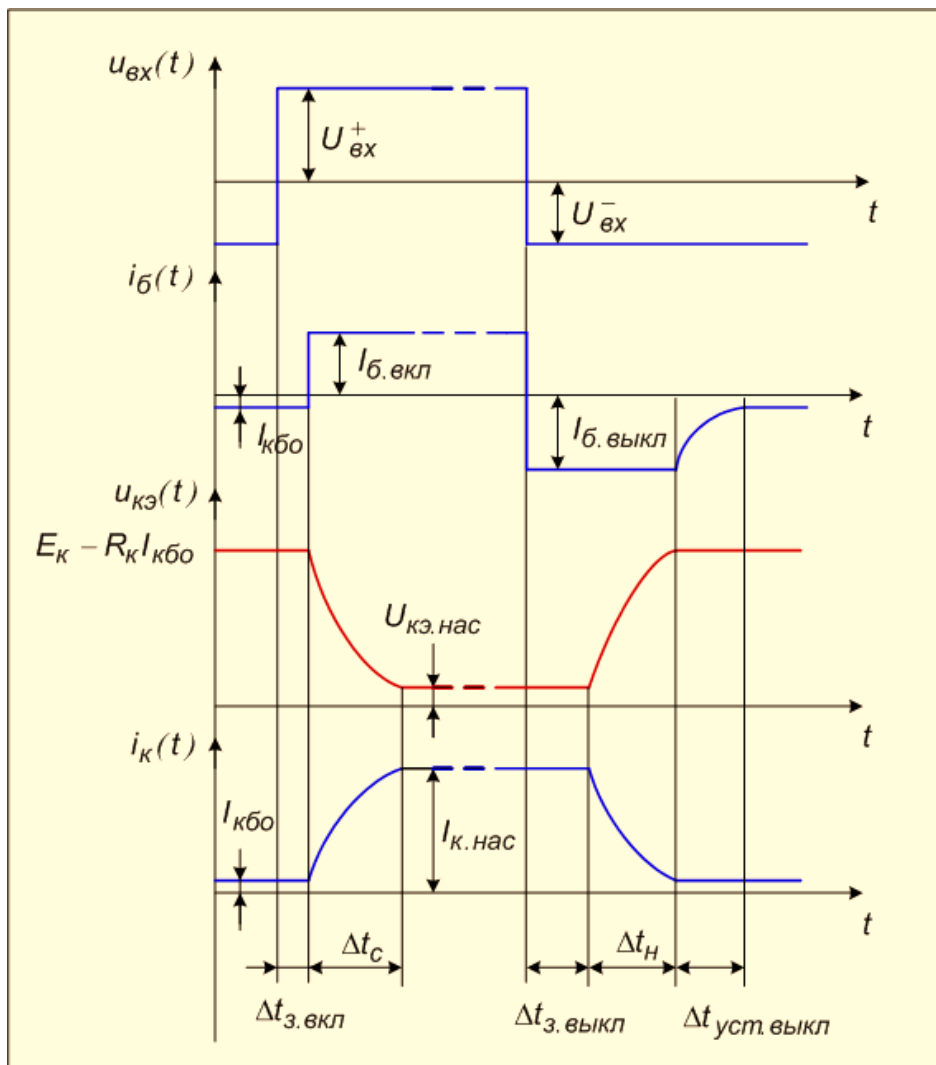
Работа биполярного транзистора в импульсном режиме. Режим переключения в схеме с общим эмиттером.

Работа биполярного транзистора, включенного с общим эмиттером, в режиме переключения используется в схемах электронных транзисторных ключей.



Схемы ключей с общим эмиттером на транзисторах *n-p-n*-типа и *p-n-p*-типа

Режим переключения n-p-n- транзистора в схеме с общим эмиттером при подаче на вход разнополярного управляющего напряжения.



При поступлении на вход схемы управляющего напряжения положительной полярности $U_{вх}^+$ начинается процесс включения, который содержит три стадии: задержки включения, спада выходного потенциала, накопления избыточного заряда в базе.

При поступлении на вход ключа управляющего напряжения отрицательной полярности $U_{вх}^-$ начинается процесс выключения, который содержит три стадии: задержки выключения, нарастания выходного потенциала, установления выключения.

Временные диаграммы работы
биполярного транзистора в импульсном
режиме в схеме с общим эмиттером

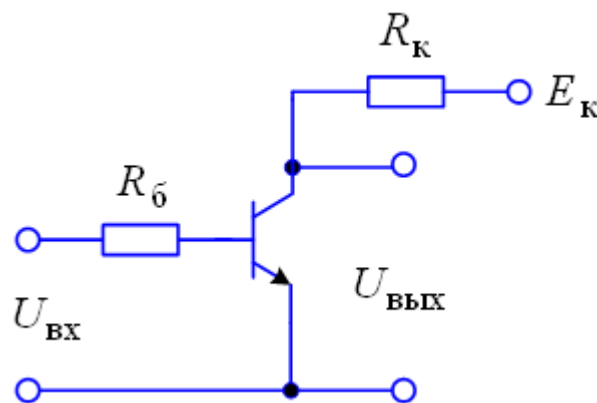
Вопросы для самоконтроля.

1. В каком режиме работает биполярный $p-n-p$ -транзистор, если напряжение база-эмиттер $U_{бэ} = -0,4\text{В}$, напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ} = -5\text{В}$.
2. Транзистор типа $p-n-p$ включен по схеме с общим эмиттером. Напряжение база-эмиттер $U_{бэ} = -0,4\text{В}$, напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ} = -0,3\text{В}$.
Определите режим работы транзистора.
3. Транзистор типа $n-p-n$ включен по схеме с общей базой. Напряжение эмиттер-база равно $U_{эб} = -0,5\text{В}$, напряжение коллектор-база $U_{кб} = 12\text{В}$.
Определите напряжение коллектор-эмиттер.
4. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора равен 1 мА , ток базы 20 мкА , обратный ток коллектора $I_{кб0} = 10^{-8}\text{ А}$.
Определите коэффициент передачи тока эмиттера по постоянному току.
5. Коэффициент передачи тока эмиттера биполярного транзистора равен $0,99$.
Чему равен коэффициент передачи тока базы?

Вопросы для самоконтроля.

6. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора равен 49,05 мА, ток базы 50 мкА. Чему равен коэффициент передачи тока эмиттера ?

7. Определить коэффициент насыщения транзистора в схеме, если $U_{\text{ВХ}} = 8 \text{ В}$, обеспечивающее насыщенное состояние транзистора при $E_{\text{К}} = 10 \text{ В}$, $R_{\text{К}} = 1 \text{ кОм}$, $R_{\text{Б}} = 10 \text{ кОм}$, $\beta = 20$.



8. Статическая выходная характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой представляет собой: а) зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база при фиксированном токе эмиттера; б) зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база при фиксированном токе базы; в) зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база при фиксированном напряжении база-эмиттер; г) зависимость тока коллектора от напряжения эмиттер-база при фиксированном токе эмиттера.

Рекомендуемая литература

- 1. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2011. – 244 с. ISBN 978-5-4332-0021-0
- 2. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: методические указания по изучению дисциплины / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2012. – 52 с. ISBN 978-5-4332-0030-2
- 3. Легостаев Н.С.** Твердотельная электроника: учеб. пособие / Н.С. Легостаев, П.Е. Троян, К.В. Четвергов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 476 с. ISBN 978-5-86889-422-0
- 4. Гуртов В.А.** Твердотельная электроника: учеб. пособие / В.А. Гуртов. – М.: Техносфера, 2008. – 512 с. ISBN 978-5-94836-187-1
- 5. Щука А.А.** Электроника: учеб. пособие / А.А. Щука; под ред. А.С. Сигова. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 752 с. ISBN 978-5-9775-0160-6

Следующее занятие будет посвящено тиристорам.

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 5 учебного пособия (Легостаев Н.С. Твердотельная электроника: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2011. – 244 с. ISBN 978-5-4332-0021-0) на страницах 153-167.

Необходимо изучить принцип действия, классификацию и условные графические обозначения тиристорov, вольт-амперные характеристики и основные параметры. При изучении принципа действия тиристорov полезно использовать двухтранзисторный аналог тиристора. Следует обратить внимание на способы управления тиристорами.

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Спасибо за внимание