

ЛЕКЦИЯ 12

ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные транзисторы

План занятия:

1. Структура и принцип работы биполярных транзисторов
2. Классификация биполярных транзисторов
3. Основные параметры биполярных транзисторов
4. Режимы работы транзистора
5. Три схемы включения транзистора
6. Транзистор как активный линейный четырехполюсник

Транзистором называется полупроводниковый прибор, используемый для усиления мощности.

Принцип работы транзистора основан на изменении своего сопротивления под воздействием слабого сигнала (от англ. transistor – transfer resistor – преобразование резистора).

В зависимости от принципа действия и конструктивных особенностей транзисторы подразделяются на два больших класса: биполярные и полевые.

Структура и принцип работы биполярных транзисторов

Биполярными транзисторами называют полупроводниковые приборы с двумя или более взаимодействующими электрическими $p-n$ переходами и тремя или более выводами. Усилительные свойства биполярных транзисторов обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда обеих полярностей (поэтому транзистор называется *биполярным*).

В зависимости от порядка чередования электропроводности областей различают транзисторы $p-n-p$ и $n-p-n$ типа (рис.12.1).

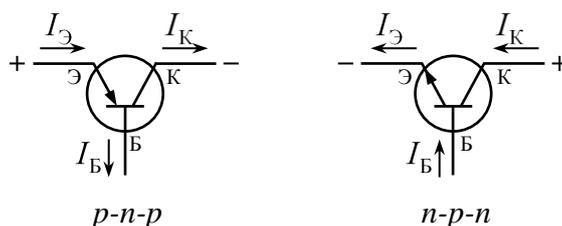


Рис.12.1. Схематическое изображение транзистора

При подключении напряжения к транзистору один $p-n$ переход включают в прямом смещении, другой – в обратном. Переход, смещенный в прямом направлении, называют эмиттерным, а соответствующий наружный слой полупроводника и вывод из него – *эмиттером*.

Переход, смещенный в обратном направлении, называют коллекторным, а соответствующий наружный слой полупроводника и вывод из него – *коллектором*.

Средний слой полупроводника называют *базой*.

Инжекция – нагнетание носителей заряда через *p-n* переход, смещенный в прямом направлении, в область, где они являются неосновными.

Экстракция – извлечение неосновных носителей заряда через *p-n* переход при его обратном смещении.

Для рассмотрения принципа работы биполярного транзистора воспользуемся схемой приведенной на рис.12.2.

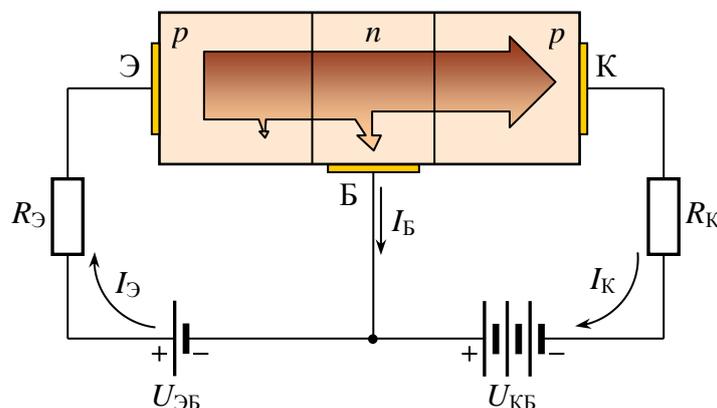


Рис.12.2. Функциональная схема биполярного транзистора

При подключении к транзистору напряжений $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$, причем, как правило, $U_{ЭБ} \ll U_{КБ}$, через эмиттерный переход будет осуществляться инжекция дырок из эмиттера в область базы. Одновременно электроны базы будут проходить в область эмиттера. Следовательно в эмиттерной цепи потечет ток $I_{Э}$ по пути $+U_{ЭБ} \rightarrow R_{Э} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow -U_{ЭБ}$. Этот ток равен сумме дырочной и электронной составляющих

$$I_{Э} = I_{Эp} + I_{Эn}.$$

В транзисторах концентрация носителей заряда в базе значительно меньше, чем в эмиттере. Это приводит к тому, что число дырок инжектированных из эмиттера в базу, во много раз превышает число электронов, движущихся в противоположном направлении, поэтому ток через эмиттерный переход в основном обусловлен дырками.

Эффективность эмиттера оценивается коэффициентом инжекции γ , который для транзисторов типа *p-n-p* равен отношению дырочной составляющей эмиттерного тока к общему току эмиттера

$$\gamma = \frac{I_{Эp}}{I_{Э}} = \frac{I_{Эp}}{I_{Эp} + I_{Эn}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{Эn}}{I_{Эp}}}.$$

В современных транзисторах коэффициент γ мало отличается от единицы

($\gamma \approx 0,999$).

Инжектированные через эмиттерный переход дырки проникают вглубь базы, для которой они являются неосновными носителями. Попав в базу некоторые дырки рекомбинируют с электронами, однако из-за малой концентрации свободных электронов в базе и малой ширины базы абсолютное большинство дырок достигает коллекторного $p-n$ перехода.

Вблизи коллектора дырки начинают взаимодействовать с электрическим полем коллекторного перехода. Это поле для дырок является ускоряющим, поэтому они в результате экстракции быстро втягиваются в коллектор и участвуют в создании тока коллектора.

Цепь тока коллектора $+U_{КБ} \rightarrow -U_{ЭБ} \rightarrow +U_{ЭБ} \rightarrow R_{Э} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow К \rightarrow R_{К} \rightarrow -U_{КБ}$. Те дырки которые все же рекомбинируют с электронами в области базы, участвуют в создании тока базы, проходящего по цепи $+U_{ЭБ} \rightarrow R_{Э} \rightarrow Э \rightarrow Б \rightarrow -U_{ЭБ}$.

Таким образом, можно записать

$$I_{Э} = I_{Б} + I_{К}.$$

Для оценки влияния рекомбинации носителей заряда в базе на усилительные свойства транзистора используется коэффициент переноса носителей в базе δ , который показывает, какая часть инжектированных эмиттером дырок достигает коллекторного перехода

$$\delta = \frac{I_{Кр}}{I_{Эр}}.$$

Одним из основных параметров транзистора является коэффициент передачи тока эмиттера, который равен отношению приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера при неизменном напряжении на коллекторном переходе

$$\alpha = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Э}} \quad (\text{обычно } \alpha=0,95 \dots 0,99).$$

Этот коэффициент может быть также выражен через величины γ и δ

$$\alpha = \gamma \cdot \delta.$$

Поскольку в цепи коллектора кроме тока, обусловленного экстракцией дырок из базы в коллектор, протекает собственно обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0}$, то полный ток коллектора

$$I_{К} = \alpha I_{Э} + I_{КБ0} \approx \alpha I_{Э}.$$

Таким образом ток коллектора I_K и напряжение эмиттер-база $U_{ЭБ}$ при определенном значении тока эмиттера $I_Э$ не зависят от напряжения приложенного к коллекторному переходу $U_{КБ}$.

В действительности изменение напряжения $U_{КБ}$ меняет ширину базы из-за изменения размеров коллекторного перехода и соответственно изменяет градиент концентрации неосновных носителей заряда. Так при повышении напряжения $U_{КБ}$ ширина базы сужается, а градиент концентрации дырок в базе и соответственно ток $I_Э$ увеличивается. Кроме этого, вероятность рекомбинации дырок уменьшается и коэффициент α увеличивается.

Классификация биполярных транзисторов

По типу используемого материала:

- германий или его соединения (Г или 1);
- кремний или его соединения (К или 2);
- соединения галлия (А или 3);
- соединения индия (И или 4).

По максимально допустимой рассеиваемой мощности:

- маломощные ($P_{\max} \leq 0,3$ Вт);
- средней мощности ($0,3 < P_{\max} \leq 1,5$ Вт);
- большой мощности ($P_{\max} > 1,5$ Вт).

По граничной частоте:

- низкочастотные ($f_{гр} \leq 3$ МГц);
- средней частоты ($3 < f_{гр} \leq 30$ МГц);
- высокочастотные ($30 < f_{гр} \leq 300$ МГц);
- сверхвысокочастотные (СВЧ) ($f_{гр} > 300$ МГц).

По функциональному назначению:

- усилительные;
- переключательные;
- генераторные;
- импульсные;
- универсальные.

Основные параметры биполярных транзисторов

$P_{к\max}$ – Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора без теплоотвода;

$I_{к\max}$ – Максимально допустимый постоянный ток коллектора;

$U_{кэ\max}$ – Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер;

$U_{кб\max}$ – Максимально допустимое напряжение коллектор-база;

$h_{21э}$ – Статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;

$I_{кб0}$ – Обратный ток коллектора;

$f_{гр}$ – граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим

эмиттером;

$U_{кэн}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер

Маркировка биполярных транзисторов предусматривает шесть символов.

Первый символ - буква (для приборов общего применения) или цифра для приборов специального назначения, указывающая исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен транзистор: Г(1) – германий, К (2) – кремний, А(3) – арсенид галлия.

Второй символ – буква Т, означающая биполярный транзистор.

Третий символ- цифра, указывающая мощность и частотные свойства транзистора (таблица 12.1).

Таблица 12.1

Обозначение транзисторов по мощности и частотному диапазону

Мощность	Частота		
	НЧ	СЧ	ВЧ
Маломощные	КТ1...	КТ2...	КТ3...
Средней мощности	КТ4...	КТ5...	КТ6...
Мощные	КТ7...	КТ8...	КТ9...

Четвертый и пятый символы – двухзначное число, указывающее порядковый номер разработки.

Шестой символ – буква, обозначающая параметрическую группу прибора.

Режимы работы транзистора

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному переходам транзистора, различают четыре режима его работы.

Активный режим. На эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Это режим является основным режимом работы транзистора.

Поскольку напряжение в цепи коллектора значительно превышает напряжение, подведенное к эмиттерному переходу, а ток в цепях эмиттера и коллектора практически равны, следует ожидать, что мощность полезного сигнала на выходе схемы (в коллекторной цепи) может оказаться намного больше, чем во входной (эмиттерной) цепи транзистора.

Режим отсечки. К обоим переходам подводится обратное напряжение. В них протекает лишь незначительный ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда.

Режим насыщения. Оба перехода находятся под прямым напряжением. Ток в выходной цепи транзистора максимален и практически не регулируется током входной цепи.

Инверсный режим. К эмиттерному переходу подводится обратное

напряжение, а коллекторному – прямое. Эмиттер и коллектор меняются своими ролями. Этот режим, как правило, не соответствует нормальным условиям эксплуатации транзистора.

Три схемы включения транзистора

В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим для входного и выходного сигнала, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

В этих схемах источники постоянного напряжения E_1 , E_2 и резистор R_H обеспечивают режимы работы транзистора по постоянному току. Входные сигналы переменного тока $U_{вх}$ изменяют ток транзистора, а соответственно, и ток коллектора. Приращение тока коллектора (или тока эмиттера для схемы ОК) создает приращения напряжений на нагрузочных резисторах. Эти напряжения и являются выходными сигналами.

Для схемы с **общей базой** (рис.12.3) входная характеристика – $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$ при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$ (рис.12.4,а) она представляет собой ВАХ эмиттерного перехода в прямом смещении

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{ЭБ0}} \left(e^{\frac{qU_{\text{ЭБ}}}{kT}} - 1 \right).$$

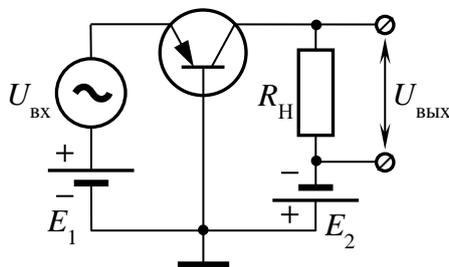


Рис.12.3. Схема включения транзистора с ОБ

Увеличение обратного напряжения $U_{\text{КБ}}$, приложенного к коллекторному переходу, вызывает уменьшение ширины базы, что приводит к возрастанию тока эмиттера при неизменном напряжении $U_{\text{ЭБ}}$. Поскольку увеличивается градиент концентрации неосновных носителей в базе и снижается вероятность их рекомбинации.

Выходная характеристика для схемы с ОБ – $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}})$ при $I_{\text{Э}} = \text{const}$ (рис.12.4,б)

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} - I_{\text{КБ0}} \left(e^{\frac{qU_{\text{КБ}}}{kT}} - 1 \right).$$

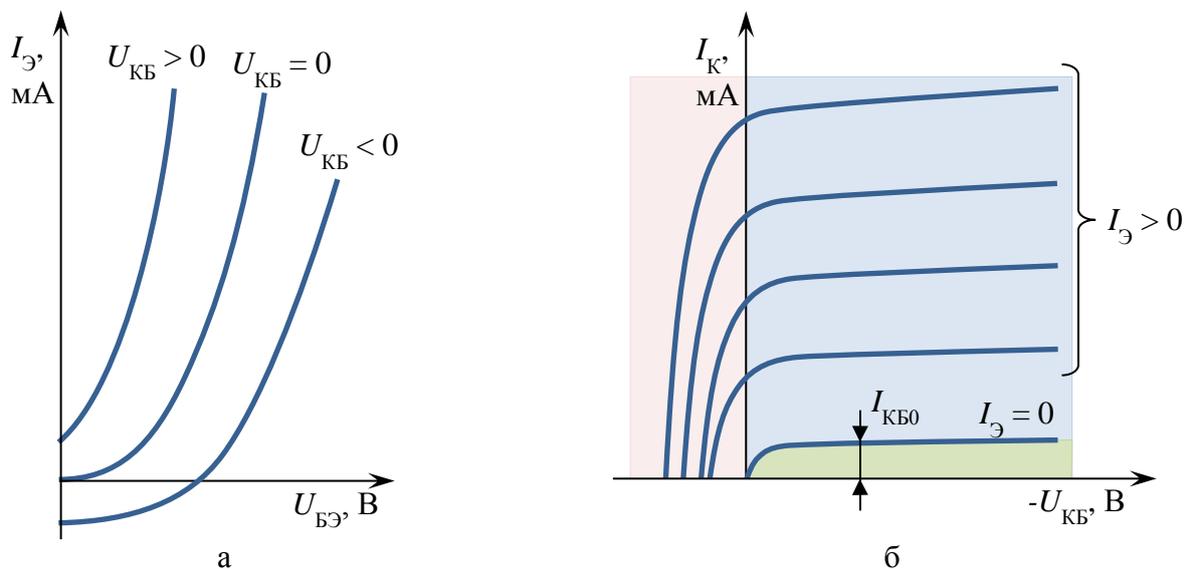


Рис.12.4. Семейство ВАХ для схемы включения с ОБ:
а – входные; б – выходные

В активном режиме работы транзистора (когда коллекторный переход смещен в обратном направлении), вольтамперные характеристики представляют собой почти прямые линии, идущие с очень небольшим наклоном. Это объясняется тем, что коллекторный ток создается за счет диффузии носителей зарядов, проникающих из эмиттера через базу в коллектор и незначительно зависящий от напряжения, приложенного к коллекторному переходу. Даже при $U_{КБ} = 0$, в коллекторной цепи протекает ток $I_K = \alpha I_Э$, т.е. контактной разности потенциалов коллекторного перехода достаточно для экстракции носителей из базы в коллектор.

При $I_Э = 0$ выходная характеристика представляет собой характеристику обратно смещенного коллекторного перехода. В области расположенной ниже этой характеристики транзистор работает в режиме отсечки.

При прямом смещении коллекторного перехода появляется прямой ток коллектора направленный встречно току $\alpha I_Э$, обусловленному контактной разностью потенциалов коллекторного перехода. Результирующий ток в цепи коллектора уменьшается и при определенном значении напряжения $U_{КБ}$, когда запирающий слой исчезнет вовсе, изменит свой знак на противоположный.

Особенности схемы включения с ОБ:

1. Низкое входное сопротивление (единицы...десятки Ом)

Поскольку ток эмиттера – наибольший из всех токов транзистора, то схема с ОБ, где он является входным, имеет малое входное сопротивление для переменной составляющей тока сигнала

$$R_{\text{вх ОБ}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_Э}$$

Фактически это сопротивление равно сопротивлению эмиттерного перехода

$r_{\text{Э}}$ включенного в прямом направлении. Это сопротивление оказывает шунтирующее действие на предыдущие каскады и резко снижает их усиление по напряжению и по мощности.

2. Температурная стабилизация выше, чем в схеме с ОЭ.

Начальный коллекторный ток в схеме с ОЭ

$$I_{\text{КЭ0}} = \frac{I_{\text{КБ0}}}{1 - \alpha}$$

при $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ в десятки раз больше теплового тока $I_{\text{КБ0}}$. Хотя α с повышением температуры изменяется незначительно но $1/(1-\alpha)$ это оказывает существенное влияние.

3. Низкий коэффициент передачи тока

$$K_{I_{\text{ОБ}}} = \alpha = \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{К}}} \approx 0,95 \dots 0,99$$

схема с ОБ не позволяет получить коэффициент увеличения по току больше 1.

4. Коэффициент передачи по напряжению может быть достаточно большим (десятки – сотни единиц), так как определяется, в основном, соотношением между сопротивлением нагрузки и входным сопротивлением

$$K_{U_{\text{ОБ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{E_1} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{I_{\text{Э}} R_{\text{ВХОБ}}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХОБ}}}$$

5. Коэффициент передачи по мощности

$$K_{P_{\text{ОБ}}} = K_{U_{\text{ОБ}}} K_{I_{\text{ОБ}}} = \alpha^2 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХОБ}}}$$

Для реальных схем коэффициент передачи по мощности равняется десятки – сотни единиц.

Для схемы с **общим эмиттером** (рис.12.5) входной характеристикой является зависимость $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})$ при $U_{\text{КЭ}} = \text{const}$ (рис.12.6,а), а выходной – $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}})$ при $I_{\text{Б}} = \text{const}$ (рис.12.6,б).

При напряжении $U_{\text{КЭ}} = 0$ входная характеристика представляет собой ВАХ двух параллельно включенных переходов в прямом смещении. При повышении напряжения $U_{\text{КЭ}}$ вероятность рекомбинации носителей заряда в базе уменьшается, следовательно, уменьшается и ток базы (почти все носители втягиваются в коллектор), что видно из входных характеристик.

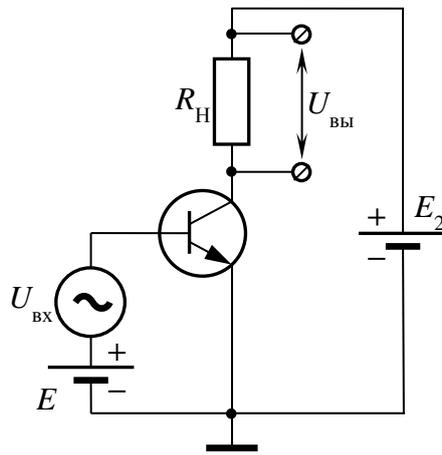


Рис.12.5. Схема включения транзистора с ОЭ

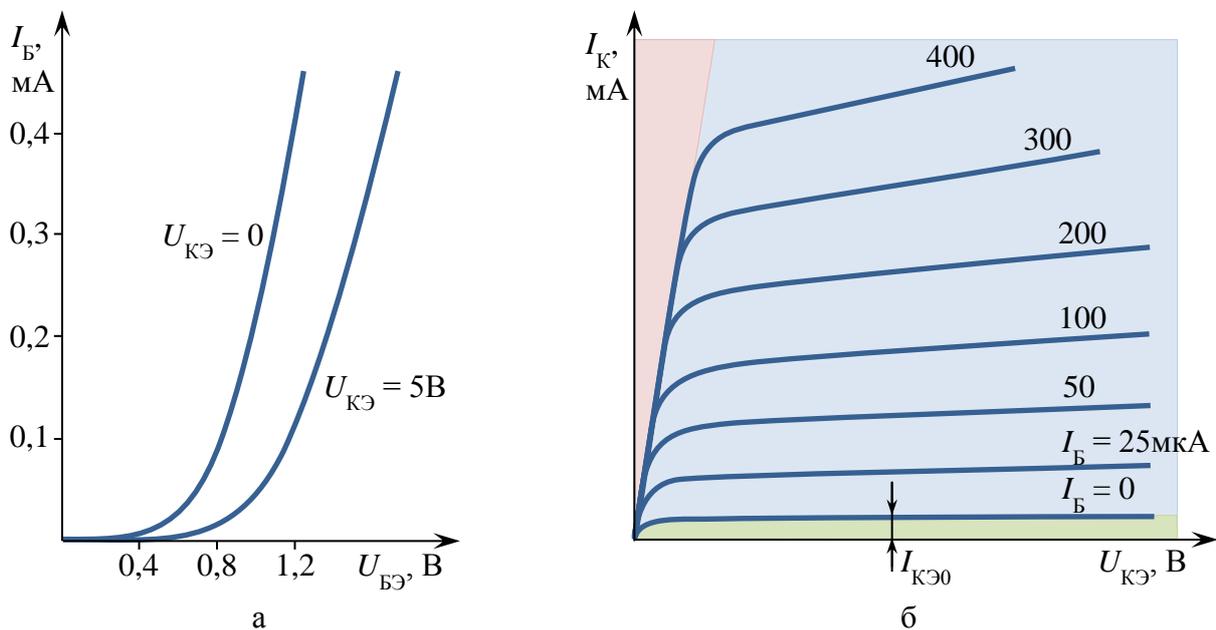


Рис.12.6. Семейство ВАХ для схемы включения с ОЭ:
а – входные; б – выходные

В схеме с ОЭ напряжение приложенное к коллекторному переходу, равно $U_{кэ} - U_{бэ}$, поскольку эти напряжения оказываются включенными встречно между точками коллектор-база. Поэтому при напряжении $|U_{кэ}| < |U_{бэ}|$ коллекторный переход оказывается включенным в прямом направлении, при этом крутизна выходных характеристик велика (транзистор работает в режиме насыщения). На участке где $|U_{кэ}| > |U_{бэ}|$ крутизна характеристик мала и они будут проходить почти параллельно оси абсцисс (активный режим работы транзистора). Небольшой рост тока на пологих участках характеристик обусловлен увеличением напряжения $U_{бэ}$, необходимым для поддержания тока базы на заданном уровне, поскольку при увеличении напряжения $U_{кэ}$ ширина базы уменьшается, и ток базы снижается. А также вследствие ударной ионизации обратного смещенного коллекторного перехода.

Особенности схемы включения с ОЭ

1. Входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ. Поскольку входным током для схемы с ОЭ является не ток эмиттера, а малый по величине ток базы

$$R_{\text{вхОЭ}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}} \left| \times \frac{1}{I_{\text{Э}}} = \frac{\frac{E_1 + U_{\text{вх}}}{I_{\text{Э}}}}{\frac{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}} = \frac{R_{\text{вхОБ}}}{1 - \alpha}.$$

Для схемы с общим эмиттером входное сопротивление лежит в диапазоне сотни Ом – единицы кОм.

2. Возможность получения коэффициента усиления по току порядка нескольких десятков и даже сотен единиц

$$K_{I\text{ОЭ}} = \beta = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}} \left| \times \frac{1}{I_{\text{Э}}} = \frac{\frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}}{\frac{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

3. Коэффициент передачи по напряжению

$$K_{U\text{ОЭ}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{E_1} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}} R_{\text{вхОЭ}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхОЭ}}},$$

подставив значение $R_{\text{вхОЭ}} = \frac{R_{\text{вхОБ}}}{1 - \alpha}$, получим $K_{U\text{ОЭ}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхОБ}}}$, т. е.

коэффициент передачи по напряжению в схеме с ОЭ точно такой же, как и в схеме с ОБ – и составляет десятки – сотни единиц.

4. Коэффициент передачи по мощности

$$K_{P\text{ОЭ}} = K_{U\text{ОЭ}} K_{I\text{ОЭ}} = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{вхОБ}}},$$

что значительно больше, чем в схеме с общей базой (сотни – десятки тысяч единиц).

5. Возможность питания схемы от одного источника напряжения, поскольку на базу и коллектор подается питающее напряжение одного знака.
6. Недостатком схемы с ОЭ является меньшая температурная стабилизация по сравнению со схемой с ОБ.

В схеме с **общим коллектором** (рис.12.7) сопротивление нагрузки R_H включено во входную цепь, входным током является ток базы I_B , а выходным током является ток эмиттера I_E .

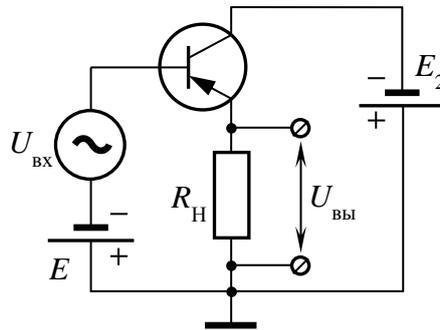


Рис.12.7. Схема включения транзистора с ОК

Схему с ОК часто называют *эмиттерным повторителем*, потому что, во-первых, нагрузка включена здесь в цепь эмиттера, а во-вторых, выходное напряжение в точности повторяет входное и по величине ($K_{U_{OK}} \approx 1$) и по фазе.

Особенности схемы включения с ОК

1. Коэффициент прямой передачи тока для этой схемы достаточно высокий, поскольку входным током схемы с ОК является ток базы, а выходным ток эмиттера

$$K_{I_{OK}} = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_K + I_B}{I_B} = \beta + 1.$$

2. Сравнительно большое значение входного сопротивления.
3. Особенностью схемы с ОК (и ее главным недостатком) является то, что она не позволяет получить усиления по напряжению больше единицы

$$K_{U_{OK}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_E R_H}{I_B R_{\text{ВХ ОК}}},$$

учитывая что $\frac{I_E}{I_B} = \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$, получим $K_{U_{OK}} = \frac{R_H}{1 - \alpha R_{\text{ВХ ОК}}} = \frac{R_H}{R_{\text{ВХ ОБ}} + R_H}$.

Поскольку $R_{\text{ВХ ОБ}}$ представляет собой очень малую величину, то можно считать, что $K_{U_{OK}} \approx 1$, т. е. усиления по напряжению в этой схеме нет.

4. Коэффициент передачи по мощности

$$K_{P_{OK}} = K_{U_{OK}} K_{I_{OK}} = \frac{1}{1 - \alpha} \frac{R_H}{R_{\text{ВХ ОБ}} + R_H},$$

что на практике он составляет десятки – сотни единиц.

Схема с ОК применяется главным образом для согласования сопротивлений между отдельными каскадами многокаскадного усилителя или между выходом усилителя и низкоомной нагрузкой.

Транзистор как активный линейный четырехполюсник

Активными четырехполюсниками называют устройства, имеющие два входных и два выходных зажима и обладающие способностью усиливать мощность подводимых к ним электрических сигналов.

Для большого класса электронных схем, называемых линейными, токи и напряжения складываются из сравнительно больших постоянных составляющих (I, U) и малых переменных составляющих ($\Delta I = i, \Delta U = u$). Переменные составляющие в этих схемах представляют основной интерес. Примером таких схем являются усилители. В пределах малых изменений напряжений и токов статические характеристики транзистора приблизительно являются линейными, поэтому функциональные зависимости переменных составляющих также будут линейными. Для линейных схем характерна работа транзистора в активном режиме.

Когда транзистор работает в линейном режиме, для расчетов удобнее пользоваться не характеристиками, а параметрами. Параметры широко применяются на практике также для контроля качества транзисторов.

Характеристические параметры – величины, определяющие связь между малыми изменениями токов и напряжений в транзисторе. При введении параметров транзистор рассматривают как четырехполюсник, на входе которого действует напряжение U_1 и ток I_1 , а на выходе – напряжение U_2 и ток I_2 .

Если принять в качестве независимых переменных величины I_1 и U_2 , а в качестве зависимых I_2 и U_1 , то можно записать:

$$\begin{cases} U_1 = f(I_1, U_2); \\ I_2 = f(I_1, U_2). \end{cases}$$

Дифференцируя выражения для I_1 и U_2 , по переменным I_2 и U_1 , получим:

$$\begin{cases} dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2; \\ dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2. \end{cases}$$

Будем рассматривать приращения токов и напряжений dI_1, dI_2, dU_1 и dU_2 , входящих в последнее выражение, как амплитуды (или действующие значения) переменных составляющих сигналов i_1, i_2, u_1, u_2 . Введем обозначения:

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} ; \quad h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2} ; \quad h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} ; \quad h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2} .$$

В этом случае можно записать:

$$\begin{cases} u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2 ; \\ i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2 . \end{cases}$$

Коэффициенты h_{11} , h_{12} , h_{21} и h_{22} , входящие в эти уравнения, называются h -параметрами транзистора. Каждый из этих параметров имеет определенный физический смысл:

h_{11} – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока (т.е. при $U_2 = \text{const}$);

h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом входе для переменной составляющей тока (т.е. при $I_1 = \text{const}$);

h_{21} – коэффициент передачи тока при коротком замыкании выхода по переменному току (т.е. при $U_2 = \text{const}$);

h_{22} – выходная проводимость при разомкнутом входе для переменной составляющей тока (т.е. при $I_1 = \text{const}$).

Приведенные выше уравнения позволяют представить транзистор в виде эквивалентной схемы (рис.12.8). Такую схему называют двухгенераторной или формальной.

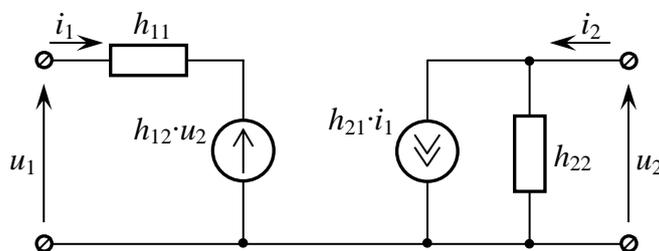


Рис.12.8. Формальная эквивалентная схема транзистора

Значения h -параметров зависят от схемы включения транзистора (ОБ, ОЭ или ОК), от режима работы по постоянному току (задаётся входным током и выходным напряжением), от температуры и от частоты подводимого напряжения.

Определение параметра h_{11E} осуществляется по входной характеристике транзистора для схемы ОЭ: $I_B = f(U_{BЭ}) | U_{КЭ} = \text{const}$ (рис.12.9).

В заданной по постоянному току рабочей точке $A (I_B^A, U_{BЭ}^A)$ при постоянном коллекторном напряжении $U_{КЭ}$ задаём отрицательное и положительное приращения тока базы. При этом получаем точки B и C на входной характеристике. Входное сопротивление транзистора определяется из выражения:

$$h_{11E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{U_{БЭ}^B - U_{БЭ}^A}{I_{БЭ}^B - I_{БЭ}^A} + \frac{U_{БЭ}^A - U_{БЭ}^C}{I_{БЭ}^A - I_{БЭ}^C} \right), \text{ при } U_{КЭ} = \text{const.}$$

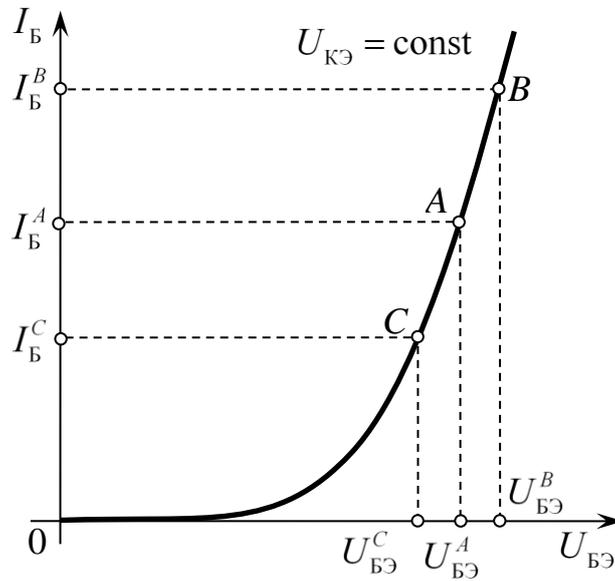


Рис.12.9. Определение h_{11E} -параметра по входным характеристикам транзистора

Для определения коэффициента обратной связи по напряжению h_{12E} необходимо иметь несколько входных характеристик (рис.12.10). В заданной по постоянному току рабочей точке $A (I_{БЭ}^A, U_{БЭ}^A)$ при постоянном токе базы $I_{БЭ}^A$ задаем приращение напряжения коллектора $\Delta U_{КЭ} = U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A$ (переходим на соседнюю входную характеристику, соответствующую $U_{КЭ}^B$).

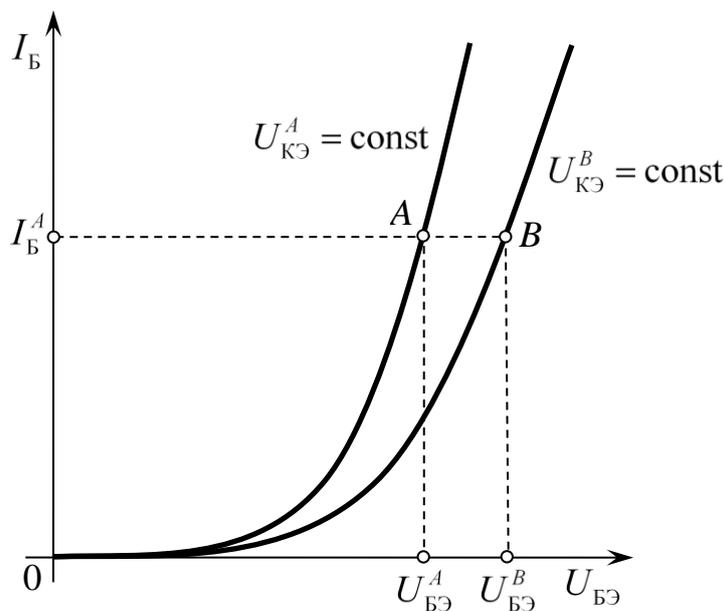


Рис.12.10. Определение h_{12E} -параметра по входным характеристикам транзистора

При этом коэффициент обратной связи может быть получен из выражения:

$$h_{12E} = \frac{U_{БЭ}^B - U_{БЭ}^A}{U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A}, \text{ при } I_B = \text{const.}$$

Коэффициент h_{12E} в режиме холостого хода на выходе по переменному току показывает, какая доля выходного напряжения за счет обратной связи поступает на вход транзистора.

Для определения h_{21E} и h_{22E} воспользуемся выходными характеристиками транзистора $I_K = f U_{КЭ} \mid I_B = \text{const}$ (рис.12.11).

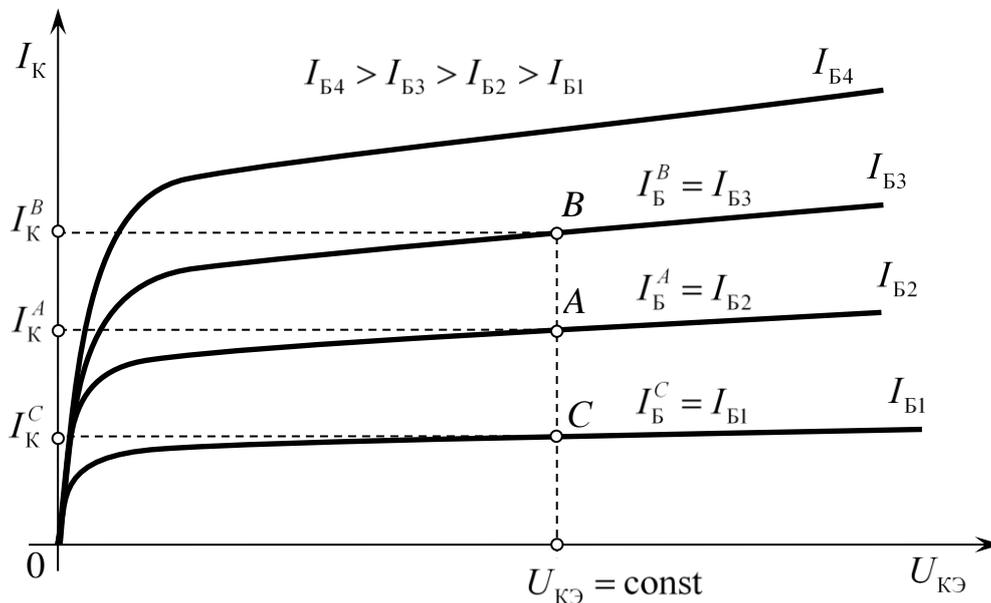


Рис.12.11. Определение параметра h_{21E} по выходным характеристикам транзистора

Проведем через заданную по постоянному току рабочую точку A (I_B^A , $U_{КЭ}^A$) вертикальную прямую до пересечения с соседними характеристиками (точки B и C). Получаем изменения тока коллектора $\Delta I_{K1} = I_K^B - I_K^A$ и $\Delta I_{K2} = I_K^A - I_K^C$, соответствующие изменениям тока базы $\Delta I_{B1} = I_B^B - I_B^A$ и $\Delta I_{B2} = I_B^A - I_B^C$ при $U_{КЭ} = \text{const}$. Коэффициент передачи тока базы h_{21E} может быть получен из выражения:

$$h_{21E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{I_B^B - I_B^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{I_B^A - I_B^C} \right), \text{ при } U_{КЭ} = \text{const.}$$

Для определения выходной проводимости h_{22E} при постоянном токе базы в схеме с общим эмиттером задаём положительное и отрицательное приращения коллекторного напряжения $\Delta U_{КЭ1} = U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A$ и $\Delta U_{КЭ2} = U_{КЭ}^A - U_{КЭ}^C$ (рис.12.12) и находим получающиеся при этом приращения тока коллектора $\Delta I_{К1} = I_K^B - I_K^A$, $\Delta I_{К2} = I_K^A - I_K^C$

$$h_{22E} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{I_K^B - I_K^A}{U_{КЭ}^B - U_{КЭ}^A} + \frac{I_K^A - I_K^C}{U_{КЭ}^A - U_{КЭ}^C} \right), \text{ при } I_B = \text{const.}$$

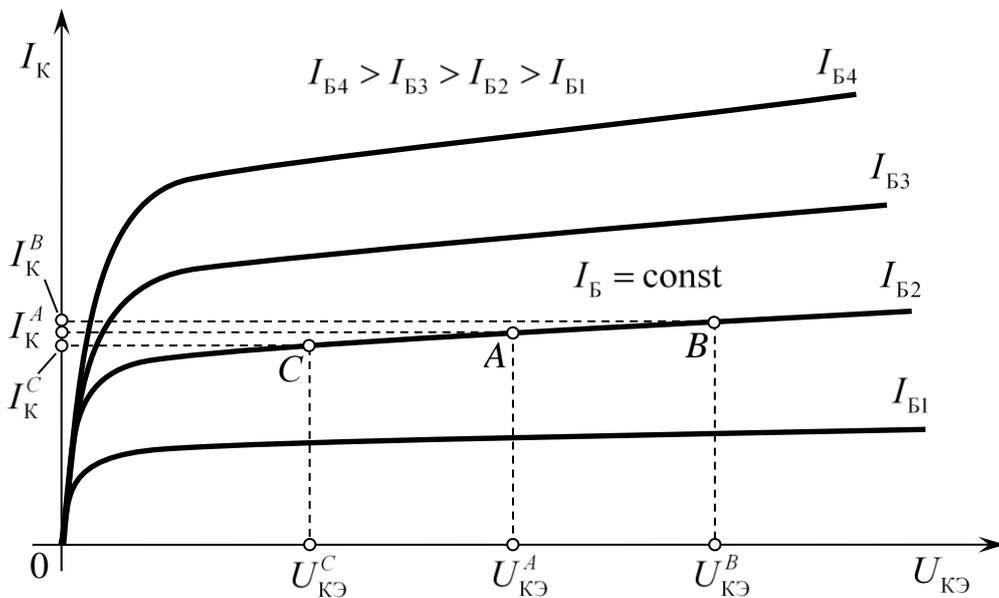


Рис.12.12. Определение параметра h_{22E} по выходным характеристикам транзистора

При определении h -параметров рабочая точка A задается исходя из режима работы транзистора по постоянному току, характерному для конкретной схемы включения.