

MP1-19 17.06.2020 среда 1,2 группа 2-3.4.

Каблуков.С.Г. [kabiukovS@mail.ru](mailto:kabiukovS@mail.ru)

## Лабораторная работа Исследование биполярного транзистора.

Целью работы является изучение особенностей вольтамперных характеристик и параметров биполярных транзисторов в различных схемах включения.

### *Краткие теоретические сведения.*

Биполярным транзистором называется трехэлектродный прибор, основу которого составляет структура из трех слоев полупроводника с чередующимися типами проводимости. В каждом из слоев формируются невыпрямляющие (омические) контакты, посредством которых транзистор включается в электрическую цепь. Вывод от среднего слоя полупроводниковой структуры называется базой транзистора, а выводы от крайних слоев – эмиттером и коллектором.

В зависимости от порядка чередования слоев, различают биполярные транзисторы двух типов – р-п-р и п-р-п. Структура таких транзисторов и их условные обозначения на электрических схемах приведены на рис. 2.1. В биполярном транзисторе имеется два р-п перехода, один из которых (переход эмиттер – база) называется эмиттерным, а другой (переход база – коллектор) – коллекторным.

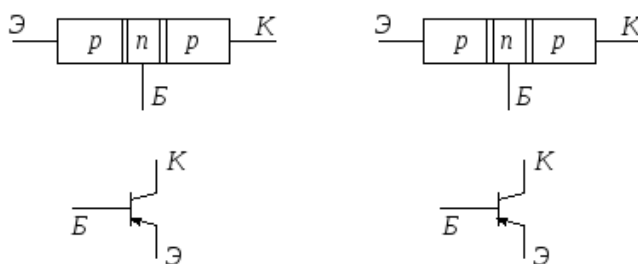


Рис. 2.1. Структура и условные обозначения биполярных транзисторов.

Транзистор является прибором, позволяющим усиливать мощность поступающих в соответствующие цепи сигналов. Для работы в таком режиме эмиттерный переход с помощью источника питания смещается в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном. В этом случае основные носители эмиттерного слоя будут вводиться (инжектироваться) в базовую область. Далее эти носители, которые для базы являются неосновными, начнут вследствие диффузии перемещаться к запертому коллекторному переходу, где концентрация свободных носителей практически равна нулю. Там они втянутся (экстрагируются) электрическим полем в область

коллектора и будут двигаться к коллекторному выводу транзистора и далее по внешней цепи, вызывая протекание в ней тока.

В первом приближении ток, через эмиттерный переход  $I_{\text{Э}}$ , должен быть равен току коллектора  $I_{\text{К}}$ . Так как падение напряжения на открытом эмиттерном переходе составляет доли вольта, а напряжение на запертом коллекторном переходе может достигать десятков и более вольт, то мощность, выделяемая в выходной (коллекторной) цепи  $P_{\text{К}} = I_{\text{К}} \cdot U_{\text{КБ}}$  будет больше мощности  $P_{\text{вх}} = I_{\text{Э}} \cdot U_{\text{БЭ}}$ , затрачиваемой во входной цепи на управление коллекторным током.

В реальных транзисторных структурах часть инжектированных эмиттером носителей в процессе диффузии через область базы успевают рекомбинировать с основными носителями базовой области. В связи с этим ток коллектора будет меньше эмиттерного. Отношение этих величин называется коэффициентом передачи коллекторного тока:

$$\alpha = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}, \quad (2.1),$$

разность  $I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}$  - базовым током.

Усилительные свойства транзистора тем выше, чем ближе  $\alpha$  к единице. Для реализации данного условия толщину базы транзистора, делают маленькой. С этой же целью (для перехвата всех продиффундировавших через базу носителей) площадь коллекторного перехода выполняется большей, чем площадь эмиттерного.

Из-за такой асимметрии, а также по ряду других причин, параметры транзистора в инверсном включении, когда выводы коллектора и эмиттера меняются местами, существенно отличаются от параметров транзистора в нормальном (прямом) включении. В частности,  $\alpha_{\text{инв}} < \alpha_{\text{норм}}$ .

Для работы транзистора требуются источники питания входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой из электродов соединен с общей точкой данных источников, различают три основные схемы включения транзистора (рис. 2.2). Они называются: схема с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Параметры и усилительные свойства транзистора определенным образом связаны со схемой его включения.

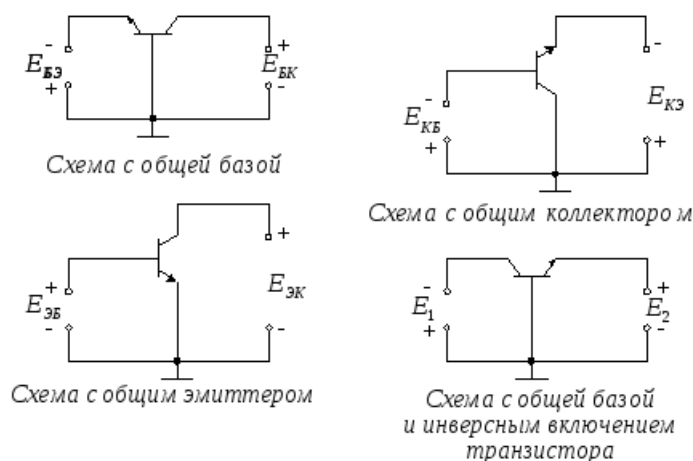


Рис. 2.2. Схемы включения биполярного p-n-p транзистора.

На приведенном рисунке представлены схемы включения транзистора p-n-p типа. При использовании второй разновидности биполярных транзисторов полярность источников питания должна быть изменена на противоположную.

Связь токов и напряжений во входной цепи транзистора при его включении с ОБ, называемая входной характеристикой, представлена на рисунке 2.3. Если выход коллектора отсоединен от соответствующего источника питания, то в этом случае работает лишь переход эмиттер-база, представляющий собой аналог обычного полупроводникового диода. Его вольтамперная характеристика, здесь это зависимость  $I_{Э} = I_{Б}$  от  $U_{БЭ}$  будет иметь стандартный для диода вид.

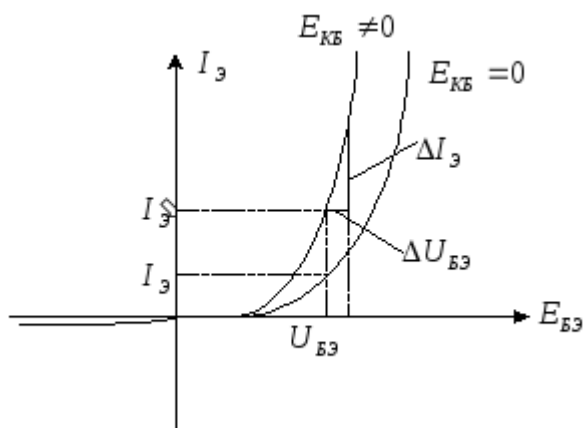


Рис. 2.3. Входные характеристики транзистора при включении по схеме с общей базой.

Когда выводы коллектора и базы замкнуты накоротко, то из-за наличия внутреннего запирающего поля коллекторного p-n перехода, ток через него будет отличен от нуля. Но суммарный ток, потребляемый от источника  $E_{БЭ}$ , останется таким же, как и при разомкнутой коллекторной цепи. Это связано с

тем, что  $I_{\varepsilon} = I_K + I_B$ . Теоретически данная ситуация должна сохраняться и при отличном от нуля напряжении  $E_{BK}$ , так как ток коллектора, протекающий через данный источник, задается тем же самым напряжением  $E_{B\varepsilon}$ . Однако реальная входная характеристика для  $E_{BK} \neq 0$  пойдет левее предыдущей (рис. 2.3), то есть при том же напряжении  $E_{BK}$  ток через эмиттерный переход станет немного больше. Это объясняется тем, что с ростом напряжения питания увеличивается толщина коллекторного перехода обедненного носителями, соответственно уменьшается толщина базы, возрастает градиент концентрации инжектируемых носителей и увеличивается интенсивность диффузии, приводящая к росту эмиттерного тока.

С другой стороны, уменьшение толщины базы приводит к снижению тока рекомбинации и является одной из причин возрастания коэффициента  $\alpha$  с увеличением  $E_{BK}$  (рис. 2.4).

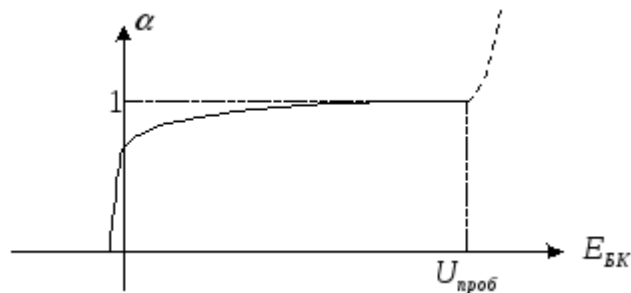


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента передачи эмиттерного тока от напряжения коллектор – база.

Зависимость толщины базы от напряжения на коллекторном переходе называется эффектом Эрли или эффектом модуляции толщины базы.

Теоретически, при некотором, достаточно большом, напряжении  $E_{BK}$  возможно смыкание коллекторного и эмиттерного-*n* переходов – прокол базы и выход транзистора из строя вследствие резкого возрастания протекающих через него токов. Однако пробой по данной причине реально наблюдается только у транзисторов с очень тонкой базой. Для большинства обычных транзисторов пробой происходит в области коллектора и его механизм аналогичен соответствующему механизму у полупроводниковых диодов.

Зависимость тока коллектора транзистора от напряжения между коллектором и базой называется выходной характеристикой. Обычно совместно строится несколько таких зависимостей, снятых при разных значениях тока эмиттера. При этом получают так называемое семейство выходных характеристик, примерный вид которого приведен на рис. 2.5.

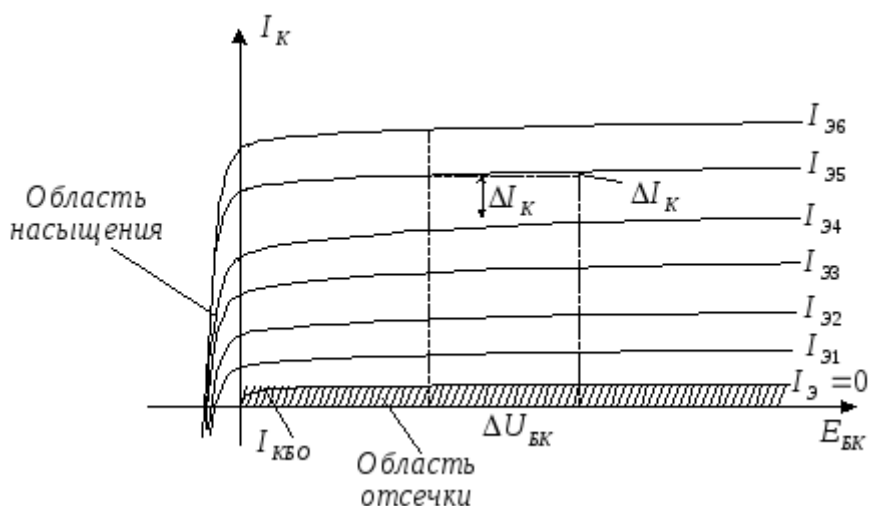


Рис. 2.5. Семейство выходных характеристик транзистора при включении по схеме с общей базой.

Если ток эмиттера равен нулю, то через запертый переход коллектор – база протекает лишь небольшой обратный ток  $I_{КБО}$ . С увеличением эмиттерного тока возрастает и ток коллектора. В связи со слабой зависимостью коэффициента передачи  $\alpha$  от напряжения, ток коллектора также практически не зависит от разности потенциалов между коллектором и базой, поэтому выходные характеристики при  $E_{БК} > 0$  идут практически горизонтально.

В режиме отсечки оба p-n перехода транзистора заперты, и через коллекторную цепь протекает лишь неуправляемый обратный ток  $I_{КБО}$ . В режиме насыщения (область характеристик левее оси  $I_K$ ) переходы база-эмиттер и база-коллектор находятся под прямым напряжением и ток эмиттера сильно зависит от отпирающей разности потенциалов между коллектором и базой. Это связано с тем, что при открывании коллекторного перехода он перестает экстрагировать инжектированные эмиттером носители, а в дальнейшем и сам начинает их инжектировать в область базы. При этом коллекторный ток изменит свое направление на противоположное.

В активном режиме эмиттерный переход открыт, коллекторный заперт, и при слабой зависимости тока коллектора от напряжения действует соотношение

$$I_K = I_{КБО} + \alpha I_{Э}. \quad (2.2)$$

Из него следует, что ток коллектора должен меняться пропорционально изменениям эмиттерного тока. Однако реально это условие не выполняется, что связано с зависимостью от тока эмиттера коэффициента передачи  $\alpha$ . График такой зависимости приведен на рис. 2.6.

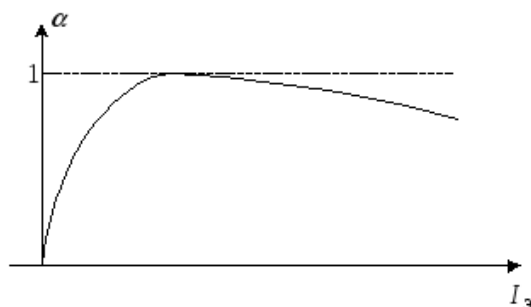


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента передачи тока коллектора  $\alpha$  от эмиттерного тока транзистора в схеме с общей базой.

При малых токах эмиттера (единицы микроампер) разность концентраций носителей вблизи коллекторного и эмиттерного переходов также мала, и нет условий для их быстрого переноса через область базы. Большинство инжектированных эмиттером электронов успевают рекомбинировать с дырками базы и не доходят до коллектора, поэтому в данной ситуации  $I_K \ll I_{\text{э}}$  и  $\alpha \ll 1$ .

При больших токах эмиттера в области базы создается значительная концентрация неосновных носителей, и эффективность эмиттера (коэффициент инжекции) падает, из-за чего будут уменьшаться коэффициент передачи  $\alpha$  и ток коллектора.

Из характеристик транзистора (рис. 2.3, рис. 2.5) следует, что он является нелинейным элементом, то есть зависимости токов от напряжений не описываются линейными функциями, а соответствующие графики не являются отрезками прямых линий. Однако при работе транзистора в активном режиме и малых изменениях токов и напряжений, пропорциональная (линейная) зависимость между входными и выходными воздействиями сохраняется.

В этом случае, в режиме так называемого малого сигнала, когда  $\Delta I_{\text{э}} \ll I_{\text{э}}$ ,  $\Delta U_{\text{БК}} \ll U_{\text{БК}}$ ,  $\Delta U_{\text{БЭ}} \ll U_{\text{БЭ}}$ , транзистор можно представить в виде некоторой эквивалентной схемы, состоящей только из линейных элементов: резисторов, генераторов тока источников э.д.с., конденсаторов и т.п. При соответствующем выборе их параметров такая схема будет достаточно хорошо описывать (имитировать) поведение транзистора при усилении малых сигналов.

Существует несколько разновидностей эквивалентных схем, наиболее употребительной из которых является Т-образная. Ее упрощенный вариант приведен на рис. 2.7. При построении эквивалентных схем постоянные токи и напряжения, задающие режим работы транзистора, не учитываются, но параметры элементов схемы от них зависят. На рис. 2.7 резисторы  $r_{\text{э}}$  и  $r_{\text{б}}$

(дифференциальные сопротивления эмиттера и базы) отражают не только наличие физических сопротивлений слоев полупроводника, а  $r_K$  – не только сопротивление обратно смещенного коллекторного перехода, но и учитывают роль физических процессов при его работе. В частности введение  $r_K$  отражает зависимость  $I_K$  от  $E_{BK}$  вследствие эффекта модуляции толщины базы.

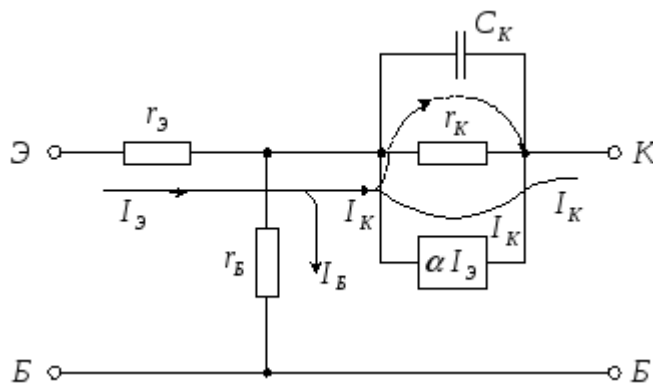


Рис. 2.7. Упрощенная Т-образная схема транзистора при включении с ОБ.

Генератор тока  $I_K = \alpha I_э$  учитывает эффект передачи в коллекторную цепь части входного, эмиттерного тока, а введение конденсатора  $C_K$  позволяет отразить наличие барьерной емкости запертого коллекторного перехода и ее влияние на работу транзистора при высоких частотах входных сигналов.

Параметры эквивалентной схемы транзистора могут быть рассчитаны, исходя из данных о его геометрии, режиме работы и свойствах полупроводниковых материалов, из которых транзистор изготовлен. Однако прямое экспериментальное их определение невозможно, так как границы раздела слоев полупроводника недоступны для подключения измерительных приборов. В связи с этим вводится так называемая система измеряемых параметров транзистора ( $h$  – параметры), которые характеризуют свойства транзистора как некоторого четырехполюсника.



Связь между входными и выходными токами и напряжениями на зажимах такого четырехполюсника определяется в общем случае системой из двух уравнений. Выбрав в качестве независимых переменных изменения входного тока  $\Delta I_э$  и выходного напряжения  $\Delta U_{BK}$ , можно записать:

$$\begin{aligned} DU_{БЭ} &= h_{11ОБ} DI_{Э} + h_{12ОБ} DU_{БК} \\ DI_{К} &= h_{21ОБ} DI_{Э} + h_{22ОБ} DU_{БК} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Коэффициенты этой системы определяются из соотношений (2.4) по результатам экспериментальных измерений соответствующих токов и напряжений в схеме. При этом задаются приращения одной из независимых величин, а вторая сохраняет неизменное значение:

$$\begin{aligned} h_{11ОБ} &= \left. \frac{DU_{БЭ}}{DI_{Э}} \right|_{\substack{U_{ЭК} = U_{ЭК}^0 \\ I_{Э} = I_{Э}^0, DU_{ЭК} = 0}}, & h_{12ОБ} &= \left. \frac{DU_{БЭ}}{DU_{БК}} \right|_{I_{Э} = I_{Э}^0, DI_{Э} = 0} \\ h_{21ОБ} &= \left. \frac{DI_{К}}{DI_{Э}} \right|_{\substack{U_{ЭК} = U_{ЭК}^0 \\ I_{Э} = I_{Э}^0, DU_{ЭК} = 0}}, & h_{22ОБ} &= \left. \frac{DI_{К}}{DU_{БК}} \right|_{\substack{I_{Э} = I_{Э}^0 \\ U_{ЭК} = U_{ЭК}^0, DI_{Э} = 0}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Между  $h$ - параметрами и номиналами элементов Т-образной эквивалентной схемы транзистора существует определенная связь, в частности:

$$\begin{aligned} r_{Э ОБ} &= h_{11ОБ} - (1 - h_{21ОБ}) \frac{h_{12ОБ}}{h_{22ОБ}}, & r_{Б ОБ} &= \frac{h_{12ОБ}}{h_{22ОБ}}, \\ r_{К ОБ} &= \frac{1}{h_{22ОБ}}, & a &= h_{21ОБ}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким образом, экспериментально определив совокупность  $h$  параметров и используя соотношения (2.5), можно рассчитать параметры элементов эквивалентной схемы транзистора, приведенной на рис. 2.7.

При высокой частоте входного сигнала часть тока коллектора будет замыкаться через конденсатор  $C_K$  и не достигнет выходной цепи. Таким образом, с ростом частоты выходной ток схемы будет уменьшаться при неизменной величине входного. Данный факт можно интерпретировать как снижение коэффициента передачи тока  $\alpha$  с частотой.

Реальной причиной снижения  $\alpha$  с увеличением частоты является инерционность физических процессов, протекающих при работе транзистора. В итоге зависимость  $\alpha$  от частоты имеет вид, представленный на рис. 2.8.

Для оценки и сравнения частотных свойств транзисторов при их включении с общей базой используются следующие параметры:  $f_{\alpha}$  – частота, на которой коэффициент передачи тока падает в  $\sqrt{2}$  раз;  $f_{эп}$  – частота, на которой коэффициент передачи  $\alpha$  становится равным 0,5;  $f_e$  – частота, на которой коэффициент усиления по мощности становится равным единице.



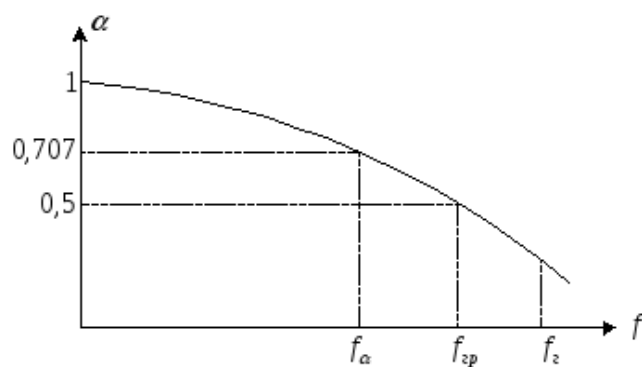


Рис. 2.8. Зависимость коэффициента передачи тока  $\alpha$  от частоты для схемы с общей базой.

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. 2.2) его входные и выходные характеристики имеют вид, приведенный на рис. 2.9 и 2.10.

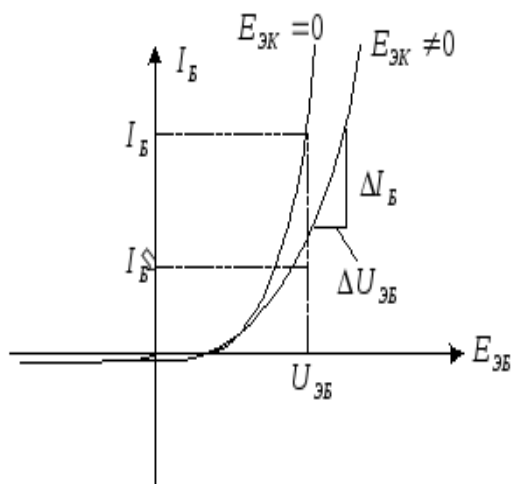


Рис. 2.9. Входные характеристики транзистора при включении по схеме с общим эмиттером.

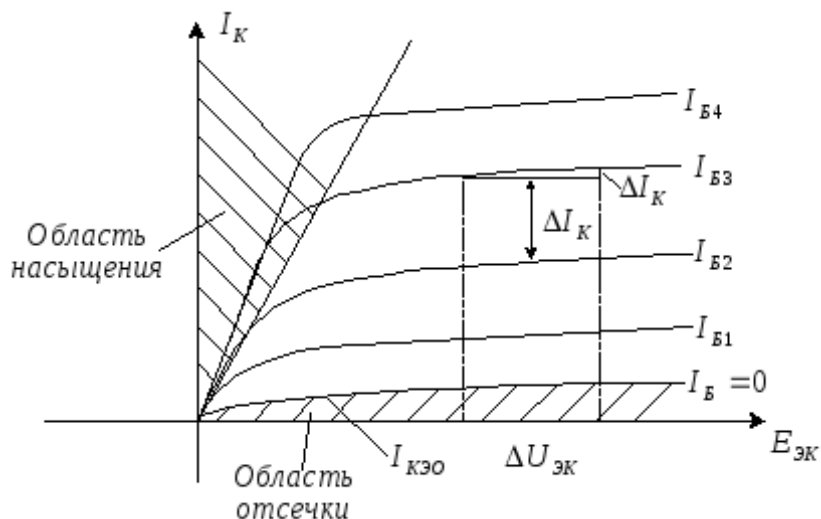


Рис. 2.10. Семейство выходных характеристик транзистора при включении по схеме с общим эмиттером.

В отличие от входной характеристики схемы с общей базой (рис. 2.3), соответствующая характеристика транзистора при включении с общим эмиттером при увеличении напряжения  $E_{ЭК}$  смещается вправо. Выходные характеристики начинаются с нулевого значения напряжения  $E_{ЭК}$  и имеют больший наклон по сравнению с аналогичными характеристиками схемы с ОБ.

При  $E_{ЭК} = 0$  ток коллектора также будет нулевым, а ток базы будет равен току эмиттера (рис. 2.11). Смещение вправо входной характеристики в схеме с ОЭ объясняется тем, что с ростом напряжения  $E_{ЭК}$  часть базового тока ответвляется в коллекторную цепь, то есть при том же потенциале базы ее ток уменьшается.

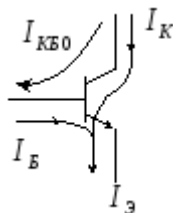


Рис. 2.11. Схема распределения токов в биполярном транзисторе.

Как и для схемы ОБ, при включении транзистора с общим эмиттером справедливо соотношение  $I_{Э} = I_{К} + I_{Б}$ , причем  $I_{Б} \ll I_{К}$ . Вследствие того, что управляющим (входным) при этом является базовый ток, а выходным – коллекторный, их отношение  $I_{К}/I_{Б}$ , называемое  $\beta$ , будет много больше аналогичного отношения для схемы с общей базой, где  $I_{К}/I_{ВХ} = I_{К}/I_{Э} = \alpha < 1$ . Связь между данными коэффициентами для одного и того же транзистора

имеет вид: 
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (2.6)$$

а токи в схеме с общим эмиттером описываются выражениями:

$$\begin{aligned} I_{К} &\approx I_{КЭО} + \beta I_{Б}, \\ I_{Э} &\approx I_{КЭО} + I_{К} + I_{Б} = I_{КЭО} + (\beta + 1)I_{Б}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ток  $I_{КЭО}$  – это ток, протекающий по цепи коллектора при нулевом токе базы. Он связан с аналогичным током  $I_{КЭО}$  (схема с ОБ) следующим образом:

$$I_{КЭО} \approx (\beta + 1)I_{КЭО}. \quad (2.8)$$

Это объясняется тем, что при заземлении вывода базы, через ее электрод и коллекторный переход будет протекать обратный ток коллектора  $I_{КВО}$ . Для обеспечения нулевого базового тока, от внешнего источника потребуются задать ток, равный  $I_{КВО}$ , но протекающий в противоположную сторону, что вызовет появление в коллекторной цепи тока в  $\beta$  раз большего.

Зависимости коэффициента усиления по току  $\beta$  от напряжения  $U_{ЭК}$  и тока  $I_K$  аналогичны соответствующим зависимостям  $\alpha$  (рис. 2.4 и рис. 2.6), но проявляются более существенно.

Эквивалентная Т-образная схема транзистора при его включении с общим эмиттером приведена на рис. 2.12. Параметры эквивалентных схем с ОБ и ОЭ связаны между собой следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{БЭ} &\approx r_{БЭБ}, \quad r_{ЭЭ} \approx r_{ЭЭБ}, \\ r_K^* &\approx \frac{r_K}{1 + \beta} \approx r_K(1 - \alpha), \\ C_K^* &\approx \frac{C_K}{1 + \beta} \approx C_K(1 - \alpha). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Уменьшение  $r_K$  и увеличение  $C_K$  при переходе к схеме с общим эмиттером объясняется действием внутренней обратной связи.

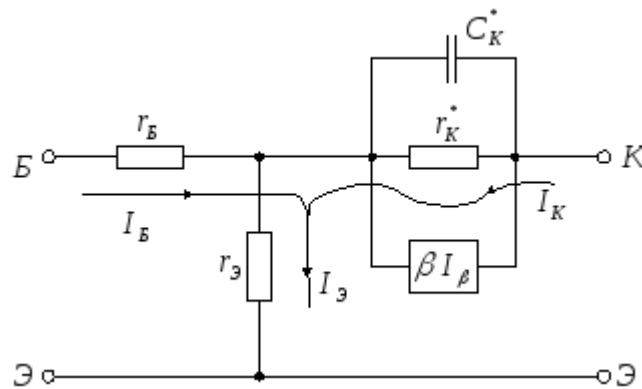


Рис. 2.12. Упрощенная Т-образная эквивалентная схема транзистора при включении с общим эмиттером.

Как и для схемы с ОБ, параметры элементов эквивалентной схемы транзистора при его включении с ОЭ можно экспериментально определить косвенным методом из соотношений, аналогичных (2.5), произведя измерения соответствующих  $h$ -параметров:

$$h_{110Э} = \left. \frac{DU_{ЭБ}}{DI_B} \right|_{\substack{U_{КЭ} = U_{КЭ}^0 \\ I_B = I_B^0, DU_{КЭ} = 0}}, \quad h_{120Э} = \left. \frac{DU_{ЭБ}}{DU_{КЭ}} \right|_{I_B = I_B^0, DI_B = 0},$$

$$h_{210Э} = \left. \frac{DI_K}{DI_B} \right|_{\substack{U_{КЭ} = U_{КЭ}^0 \\ I_B = I_B^0, DU_{КЭ} = 0}}, \quad h_{220Э} = \left. \frac{DI_K}{DU_{КЭ}} \right|_{\substack{I_B = I_B^0 \\ U_{КЭ} = U_{КЭ}^0, DI_B = 0}}. \quad (2.10)$$

$$r_{ЭОЭ} = \frac{h_{120Э}}{h_{220Э}}, \quad r_{БОЭ} = h_{110Э} - (1 - h_{210Э}) \times \frac{h_{120Э}}{h_{220Э}},$$

$$r_K^* = \frac{1}{h_{220Э}}, \quad b = h_{210Э}. \quad (2.11)$$

Между значениями  $h$ - параметров для рассмотренных способов включения транзистора, имеется определенная взаимосвязь:

$$h_{110Э} \gg \frac{h_{110Б}}{1 - h_{210Б}}, \quad h_{120Э} \gg \frac{h_{110Б} \times h_{220Б}}{1 - h_{210Б}} - h_{120Б},$$

$$h_{210Э} \gg \frac{h_{210Б}}{1 - h_{210Б}}, \quad h_{220Э} \gg \frac{h_{220Б}}{1 - h_{210Б}}. \quad (2.12)$$

С ростом частоты коэффициент усиления по току  $\beta$  будет уменьшаться, как это показано на рис. 2.13.

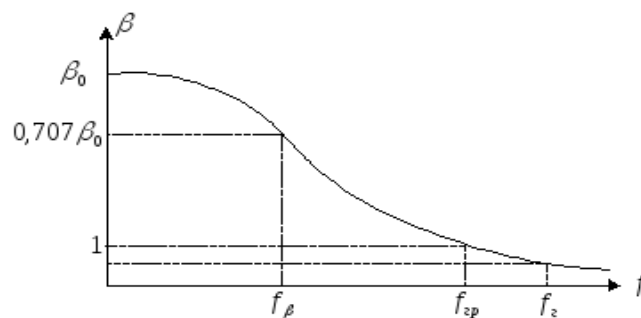


Рис. 2.13. Зависимость коэффициента усиления по току  $\beta$  от частоты для схемы с общим эмиттером.

Для оценки частотных свойств транзистора при включении по схеме с ОЭ используются следующие параметры:  $f_\beta$  – частота, на которой коэффициент усиления  $\beta$  падает в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с его величиной на нулевой частоте,  $f_\beta \approx f_\alpha / \beta$ ;  $f_{zp}$  – частота, на которой  $\beta = 1$ , она совпадает со значением  $f_{zp}$  для схемы с ОБ, так как при  $\beta = 1$   $\alpha = 0,5$ ;  $f_z$  – предельная частота генерации или частота, на которой коэффициент усиления по мощности в схеме с ОЭ превращается в единицу. В справочниках часто приводится значение модуля коэффициента усиления по току  $|\beta|$  или величины  $|h_{210Э}|$  на конкретной

частоте  $f > f_{\beta}$ . В данном диапазоне коэффициент усиления по току с ростом частоты меняется таким образом, что зная эти величины, граничную частоту можно рассчитать по формуле:  $f_{sp} \approx |\beta| \cdot f \approx |h_{2100}| \cdot f$ .

### *Описание лабораторной установки.*

Установка для проведения лабораторной работы № 2 «Исследование биполярного транзистора» состоит из лабораторного и измерительного стендов со встроенными источниками токов и напряжений. Внешний вид передних панелей стендов приведен на рис 2.14. и рис. 1.8. Лабораторный стенд содержит регулируемый источник питания с диапазоном изменения выходного напряжения  $0 \div 30$  В и ограничением выходного тока на уровне 150мА. Тумблер включения источника, ручка регулировки напряжения и выходные гнезда расположены в правой части стенда. В данной лабораторной работе исследуются характеристики транзисторов VT1 и VT2 типа КТ819А.

Для задания токов базы и эмиттера имеются соответствующие дискретно регулируемые источники токов, выходы которых присоединены к гнездам на панели стенда, помеченных символами  $I_B$  и  $I_E$ . Регулировка токов осуществляется переключателями: тока базы в пределах  $0 \div 0,999$  мА с шагом 0,001мА; тока эмиттера – в пределах  $0 \div 99$  мА с шагом 1мА. Общий вывод источников тока соединен с клеммой «←» источника питания. Кроме этого, в состав макета входят цепочки  $R1, C1$  и  $R2, C2$ , используемые при исследовании частотных свойств транзисторов. Включение лабораторного стенда производится тумблером «Вкл.». О функционировании источника питания свидетельствует свечение зеленого светодиода

Дать развернутый ответ

1. Структура и условные обозначения биполярных транзисторов.