

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра радиофизики и электроники

Т.М.Чмерева, В.М. Налбандян

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 03.03.02 Физика и 03.03.03 Радиофизика

Оренбург
2018

УДК 521.38(076.5)
ББК 32.853я7
Ч74

Рецензент - кандидат физико-математических наук, доцент А.П. Русинов

Ч74 **Чмерева, Т.М.**
Схемы включения биполярного транзистора: методические указания / Т.М. Чмерева, В.М. Налбандян; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 40 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по изучению схем включения биполярных транзисторов в курсе радиоэлектроники обучающимися по направлениям подготовки 03.03.03 Радиофизика и 03.03.02 Физика.

УДК 521.38(076.5)
ББК 32.853я7

© Чмерева Т.М., 2018
© Налбандян В.М., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

1 Свойства и применение полупроводниковых материалов	4
1.1 Собственная и примесная проводимость полупроводников	4
1.2 p-n переход и его свойства	7
1.3 Устройство и принцип работы биполярного транзистора.....	9
2 Усилительные каскады на биполярных транзисторах	13
2.1 Схема с общим эмиттером	14
2.2 Схема с общей базой.....	18
2.3 Схема с общим коллектором.....	21
3 Экспериментальная часть.....	24
3.1 Приборы и оборудование	24
3.2 Исследование схемы с общим эмиттером	25
3.3 Исследование схемы с общей базой.....	30
3.4 Исследование схемы с общим коллектором.....	34
Список использованных источников	39

1 Свойства и применение полупроводниковых материалов

1.1 Собственная и примесная проводимость полупроводников

Полупроводники представляют собой материалы, в которых концентрация свободных носителей заряда намного меньше концентрации атомов. По удельной проводимости полупроводники занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Концентрация носителей заряда в полупроводниках зависит от температуры, освещенности и наличия примесей [1-4].

По химическому составу полупроводники делятся на *элементарные*, которые состоят из атомов одного химического элемента, например, Si или Ge, и *полупроводниковые соединения*, состоящие из атомов двух и более элементов. Полупроводниковые соединения классифицируют по номерам групп периодической системы элементов, например, двойные соединения $A^{III}B^V$ содержат элементы III и V групп. К таким соединениям относятся GaAs, InSb и др.

Рассмотрим элементарный полупроводник IV группы. Кристалл полупроводника имеет атомную кристаллическую решетку. Четыре валентных электрона каждого атома вступают в ковалентные химические связи с электронами соседних атомов в решетке, как показано на рисунке 1 для германия. При близкой к абсолютному нулю температуре все электроны задействованы в ковалентных связях между атомами кристалла. Поэтому свободных электронов при таких условиях нет.

С повышением температуры тепловые колебания кристаллической решетки сообщают электронам дополнительную энергию. И если энергия электрона оказывается больше энергии ковалентной связи, то электрон может разорвать эту связь и перейти в межузельное пространство кристалла, где он будет

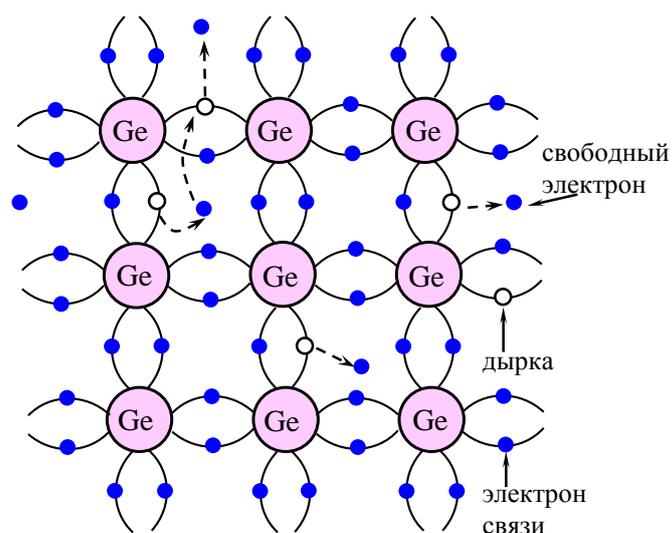


Рисунок 1 – Схематическое изображение кристаллической решетки германия

свободно перемещаться, как показано на рисунке 1. При освобождении электрона из ковалентной связи в последней возникает вакантное место, называемое *дыркой*. Дырка обладает элементарным положительным зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона [1-4]. Дырки тоже могут блуждать по кристаллу, поскольку если один из соседних валентных электронов перейдет на вакантное место, заполнив дырку, то дырка в этом месте исчезнет, и появится там, откуда электрон пришёл (рисунок 1).

В отсутствие внешнего электрического поля имеет место хаотическое перемещение электронов и дырок в кристалле из-за теплового движения. Если же на кристалл действует электрическое поле, движение дырок и электронов становится упорядоченным и в кристалле возникает электрический ток. В химически чистом кристалле полупроводника число дырок всегда равно числу свободных электронов и электрический ток в нем образуется в результате одновременного переноса зарядов обоих знаков. Такая электронно-дырочная проводимость называется *собственной* проводимостью полупроводника [1-4]. При этом ток в полупроводнике всегда равен сумме электронного и дырочного токов.

Если некоторые атомы в чистом полупроводнике заменить атомами другого химического элемента, то возникнет *примесная* проводимость. Рассмотрим кристалл германия с примесью атомов мышьяка. Четыре валентных электрона As образуют ковалентные связи с атомами Ge. Пятый валентный электрон оказывается «лишним»

и может быть легко отщеплен от атома, как показано на рисунке 2. При этом дырки не возникают, так как избыточный положительный заряд связан с атомом примеси и перемещаться по кристаллу не может. Поэтому в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, концентрация свободных электронов – ос-

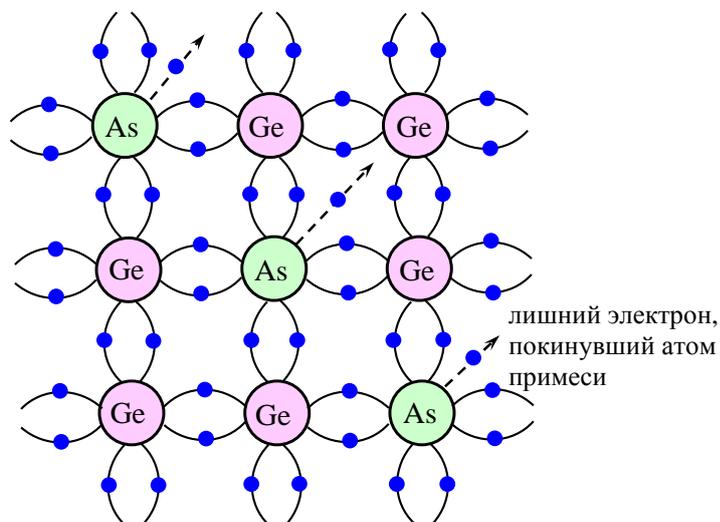


Рисунок 2 – Схематическое изображение решетки германия с примесью мышьяка

новных носителей заряда, будет больше концентрации дырок – неосновных носителей. Такой полупроводник обладает *электронной* проводимостью и называется полупроводником *n*-типа, а атомы примеси, поставляющие электроны, называются *донорами* [1-4].

Если примесь, например индий, содержит три валентных электрона, то их не хватит для образования ковалентных связей со всеми четырьмя соседними атомами Ge. Одна из связей останется незаполненной и может быть обеспечена переходом электрона от одной из соседних пар, образующих ковалентную связь между атомами Ge. Этот переход сопровождается образованием дырки, как показано на рисунке 3. Таким образом, в полупроводнике с

примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, концентрация дырок – основных носителей заряда, будет больше концентрации свободных электронов – неосновных носителей. Такой полупроводник обладает *дырочной* проводимостью и называется полупроводником *p*-типа, а атомы примеси, захватывающие электроны, называются *акцепторами* [1-4].

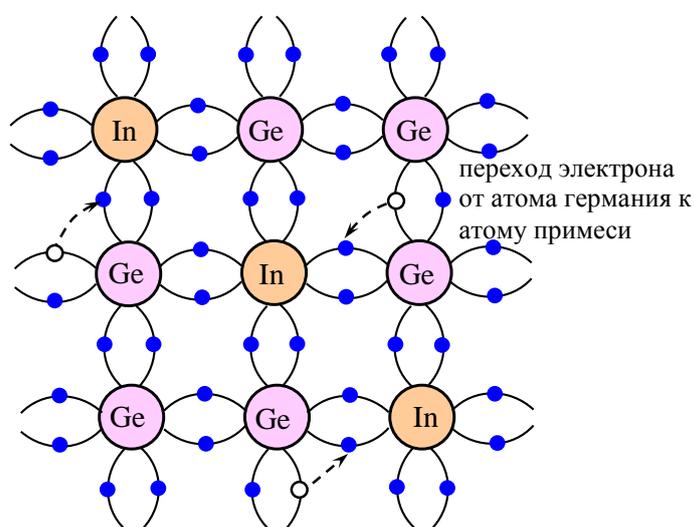


Рисунок 3 – Схематическое изображение решетки германия с примесью индия

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называют полупроводниками?
2. Как подразделяются полупроводники по химическому составу?
3. Какой носитель электрического заряда называется дыркой?
4. Какова природа носителей тока в собственных полупроводниках?
5. Каков механизм возникновения электронной проводимости в полупроводниках *n*-типа?

6. Каков механизм возникновения дырочной проводимости в полупроводниках р-типа?

1.2 р-n переход и его свойства

Электронно-дырочным или *р-n переходом* называется область, возникающая при соприкосновении двух полупроводников с различными типами проводимости - электронной и дырочной. Так как в полупроводнике n-типа концентрация электронов гораздо выше, чем в полупроводнике р-типа, то электроны из n-области диффундируют в р-область. Дырки, наоборот, диффундируют из р-области в n-область. Вблизи границы разнотипных полупроводников электроны рекомбинируют с дырками, и создается слой, обедненный свободными носителями заряда, в котором в n-области будут находиться положительные ионы донорной примеси, а в р-области - отрицательные ионы акцепторной примеси, как показано на рисунке 4. Нескомпенсированные заряды ионов примесей создают в р-n переходе контактное электрическое поле E , которое препятствует диффузионному движению основных носителей заряда через границу двух полупроводников, но вызывает дрейф неосновных носителей в противоположном направлении. В итоге наступит равновесие, при котором диффузионный и дрейфовый токи компенсируют друг друга [1-4].

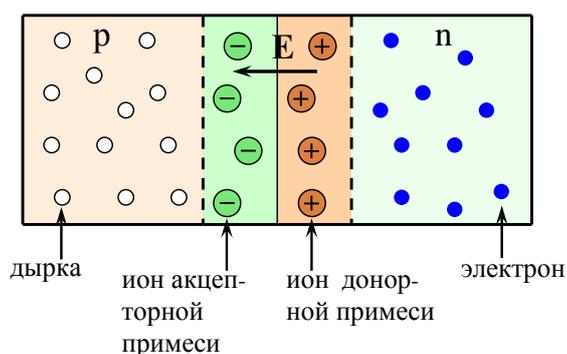


Рисунок 4 – Схематическое изображение р-n перехода

Внешнее напряжение, прикладываемое к р-n переходу, изменяет условия переноса заряда через переход. При прямом включении р-n перехода полупроводник n-типа подключается к отрицательному полюсу источника, а полупроводник р-типа – к положительному. Под действием электрического поля источника $E_{ист}$, которое направлено противоположно контактному полю E и частично компенсирует его, основные носители заряда будут перемещаться к границе раздела полупроводников, и ширина

p-n перехода уменьшится, как показано на рисунке 5. В результате большее количество основных носителей сможет пройти через p-n переход, и диффузионный ток станет преобладать над дрейфовым.

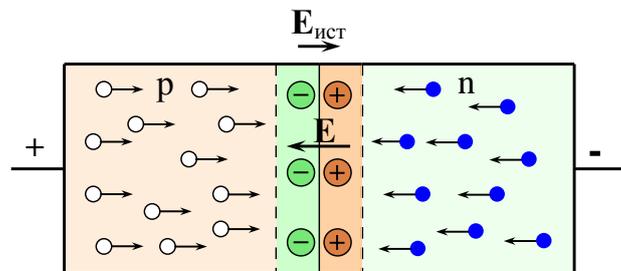


Рисунок 5 – Прямое включение p-n перехода

При обратном включении p-n перехода полупроводник n-типа подключается к положительному полюсу источника, а полупроводник p-типа – к отрицательному. Под действием электрического поля источника $E_{ист}$, направление которого совпадает с направлением контактного поля E , основные носители заряда будут перемещаться от границы раздела полупроводников, и ширина p-n перехода увеличится, как показано на рисунке 6. Результирующее поле $E_{ист}+E$ практически не пропускает основные носители через p-n переход, поэтому диффузионный ток уменьшится настолько, что преобладающим станет слабый дрейфовый ток.

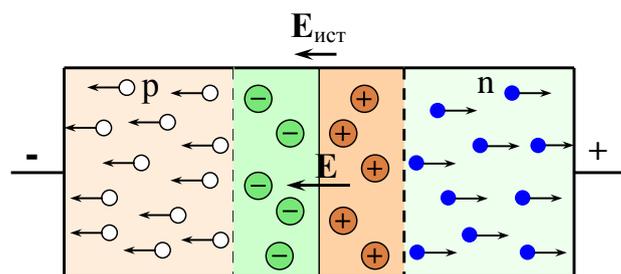


Рисунок 6 – Обратное включение p-n перехода

Вольт-амперная характеристика p-n перехода (зависимость тока от напряжения, приложенного к переходу), изображена на рисунке 7. При прямом включении ток обусловлен основными носителями заряда и быстро нарастает с ростом напряжения (прямая ветвь). При обратном включении наблюдается слабый ток неосновных зарядов (обратная ветвь). Однако с ростом обратного напряжения электроны, движущиеся в создаваемом им поле, приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристаллической решетки. В результате возникает лавинообразное размножение носителей, и обратный ток резко увеличивается (электрический пробой). Электрический пробой обратим. Однако если ток электрического пробоя

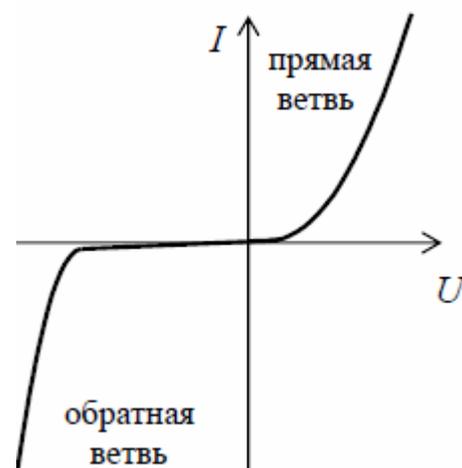


Рисунок 7 – Вольт-амперная характеристика p-n перехода

не ограничен, то переход разогревается и может выйти из строя (тепловой пробой) [1-4].

Контрольные вопросы

1. Что называется р-п переходом?
2. Как на границе полупроводников n- и р-типа формируется двойной электрический слой?
3. Какова природа электрических зарядов на границе р-п перехода?
4. Чему равен ток через р-п переход в условиях равновесия?
5. Как включить р-п переход в прямом направлении? В обратном?
6. Что происходит с шириной р-п перехода при прямом включении? При обратном?
7. Какими носителями обусловлен ток через р-п переход при прямом включении? При обратном?
8. Как выглядит вольт-амперная характеристика р-п перехода?
9. Как возникает электрический пробой р-п перехода?

1.3 Устройство и принцип работы биполярного транзистора

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, состоящий из трех слоев с чередующимся типом примесной проводимости [5]. В зависимости от порядка чередования слоев различают n-р-n (внутренний слой имеет дырочную проводимость, крайние слои - электронную) и р-n-р (внутренний слой имеет электронную проводимость, крайние слои - дырочную) транзисторы. Средний слой называется *базой*, один крайний слой – *эмиттером*, другой – *коллектором*. В транзисторе имеется два р-п перехода: между эмиттером и базой, между базой и коллектором, и три проводящих контакта. Схематическое изображение n-р-n транзистора представлено на рисунке 8. На схемах биполярный транзистор обозначается, как показано на рисунке 9.

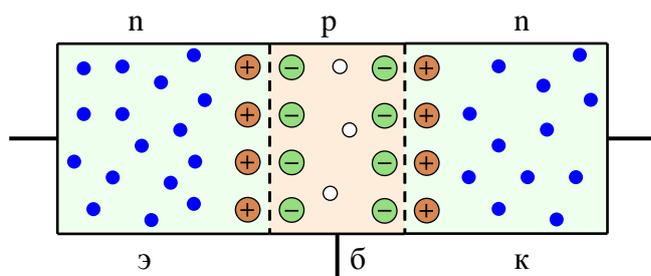


Рисунок 8 – Схематическое изображение биполярного транзистора

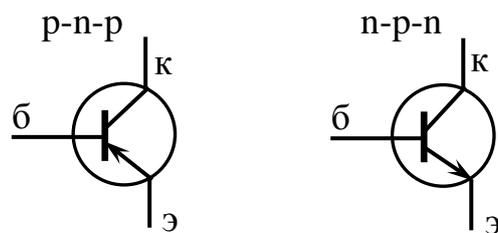


Рисунок 9 – Обозначение биполярных транзисторов на схемах

Тип проводимости эмиттерного и коллекторного слоев одинаков, но эти слои различаются концентрацией основных носителей заряда. Концентрация основных носителей в эмиттере несколько больше, чем их концентрация в коллекторе, и во много раз превышает концентрацию основных носителей в базе. Поэтому проводимость эмиттера несколько выше проводимости коллектора и намного выше проводимости базы. Основным назначением эмиттера является инжекция носителей заряда в базу, а назначением коллектора – извлечение носителей заряда из базы. Общая площадь перехода эмиттер-база делается значительно меньше площади перехода база-коллектор, чтобы повысить вероятность захвата неосновных носителей из базового слоя. Толщину базового слоя делают малой, чтобы практически все носители заряда, инжектированные эмиттером, доходили до коллектора [5-7].

Различают четыре режима работы транзистора: *активный* режим, режим *отсечки*, режим *насыщения*, *инверсный* режим. В активном режиме работы транзистора переход эмиттер-база включен в прямом направлении, а переход база-коллектор в обратном. Данный режим применяется для усиления сигналов. В режиме отсечки оба перехода включены в обратном направлении, и этот режим используется для размыкания цепей передачи сигнала. Режим насыщения, в котором оба перехода включены в прямом направлении, используется для замыкания цепей передачи сигнала. В инверсном режиме переход эмиттер-база включен в обратном направлении, а переход база-коллектор – в прямом. Основным режимом работы биполярных транзисторов в аналоговых устройствах является активный режим. В цифровых схемах транзистор работает в ключевом режиме, т.е. в режиме отсечки или насыщения [5-7].

В активном режиме работы n-p-n транзистора электроны, являющиеся основными носителями заряда в эмиттере, проходят через переход эмиттер-база. Попадая в базу, некоторые из этих электронов рекомбинируют с дырками, являющимися основными носителями заряда в базе, а некоторые уходят из базы через проводящий контакт. Но так как база тонкая, и концентрация дырок в ней мала, большая часть электронов диффундирует в сторону коллектора. Электрическое поле перехода база-коллектор захватывает эти электроны и переносит в коллекторный слой. Поэтому ток коллектора практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери в базе ($I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$)

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}},$$

где α – коэффициент передачи тока эмиттера, который принимает значения от 0.9 до 0.999.

Заметим, что в малый ток базы дают вклад те электроны, пришедшие из эмиттера, которые затем или уходят через базовый контакт, или объединяются с дырками в базе, тем самым обеспечивая приток такого же количества новых дырок от базового контакта.

Соотношение между токами коллектора и базы в активном состоянии транзистора определяется условиями диффузии и рекомбинации электронов в базе. Эти условия сильно зависят от материалов и конструкции транзистора, но слабо зависят от напряжений, приложенных к переходам эмиттер-база и база-коллектор. Поэтому транзистор представляет собой устройство, распределяющее эмиттерный ток между базой и коллектором. Способность транзистора распределять ток эмиттера в заданном соотношении между базой и коллектором используется для усиления электрических сигналов [5-7].

Контрольные вопросы

1. Какие полупроводниковые приборы называют биполярными транзисторами?
2. Чем различаются между собой p-n-p и n-p-n транзисторы?

3. Как обозначаются биполярные транзисторы на электрических схемах?
4. В чем отличие эмиттерного и коллекторного слоев?
5. Каково основное назначение эмиттера? Коллектора?
6. Почему толщина базового слоя делается малой?
7. Какие существуют режимы работы транзистора?
8. В каком направлении включаются переходы эмиттер-база и база-коллектор в разных режимах работы транзистора?
9. Как формируется ток коллектора в активном режиме работы транзистора?
Ток базы?
10. Какова взаимосвязь между токами базы, эмиттера и коллектора в активном режиме работы биполярного транзистора?

2 Усилительные каскады на биполярных транзисторах

Существует три способа включения транзистора в электрическую цепь: с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором. Схемы для n-p-n транзистора показаны на рисунке 10. Полярность напряжений и направление токов справедливы для активного режима работы транзистора. В схеме с общей базой (ОБ) вывод базы является общим для входной и выходной цепи, в схеме с общим эмиттером (ОЭ) общим является эмиттер, в схеме с общим коллектором (ОК) общим является коллектор [8]. В случае p-n-p транзистора полярности напряжений нужно изменить на противоположные.

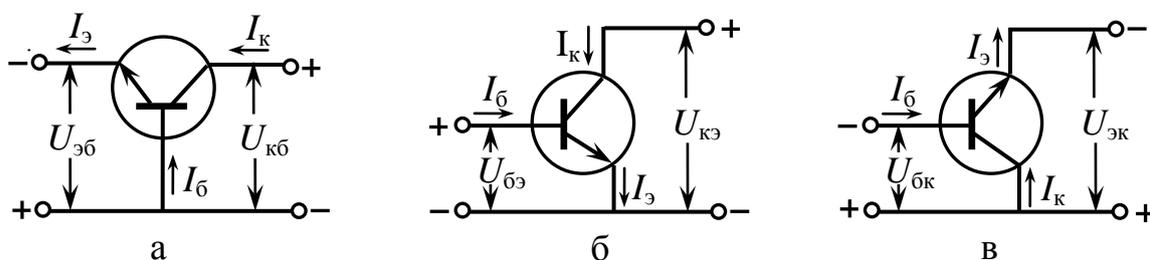


Рисунок 10 – схемы включения транзистора: с общей базой (а), с общим эмиттером (б), с общим коллектором (в)

Зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном напряжении на выходе называется *входной характеристикой* транзистора, а зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе – *выходной характеристикой*. Для каждой схемы включения транзистора смысл входных и выходных токов и напряжений свой.

Для схемы с ОБ: $U_{\text{вх}} = U_{\text{эб}}$, $I_{\text{вх}} = I_{\text{э}}$, $U_{\text{вых}} = U_{\text{кб}}$, $I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$.

Для схемы с ОЭ: $U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}$, $I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$, $U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$, $I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$.

Для схемы с ОК: $U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}$, $I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$, $U_{\text{вых}} = U_{\text{эк}}$, $I_{\text{вых}} = I_{\text{э}}$.

Кроме входных и выходных характеристик, различные схемы включения отличаются значениями коэффициентов усиления по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$, по напряжению $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ и по мощности $K_P = K_I K_U$, а также значениями входного $R_{\text{вх}}$ и выходного сопротивлений $R_{\text{вых}}$ [7, 8].

2.1 Схема с общим эмиттером

Если напряжение между коллектором и эмиттером равно нулю, то процессы в переходе эмиттер-база ничем не отличаются от процессов, происходящих в одиночном p-n переходе, и зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер будет иметь тот же вид, что и вольт-амперная характеристика при прямом включении p-n перехода (рисунок 7), что видно из рисунка 11 [9-11]. При подаче напряжения между коллектором и эмиттером через переход база-коллектор начинает протекать слабый ток неосновных носителей заряда. Он течет навстречу основному току базы, и при малом входном напряжении $U_{бэ}$ является преобладающим. На входной характеристике этому току соответствует отрицательное значение тока базы при $U_{кэ} = 0$, как видно из рисунка 11. При увеличении входного напряжения основной ток базы $I_б$, сначала частично, а при некотором напряжении – полностью компенсирует встречный ток. Обычно в справочниках отрицательный участок тока базы не приводится, и входная характеристика начинается с точки компенсации токов.

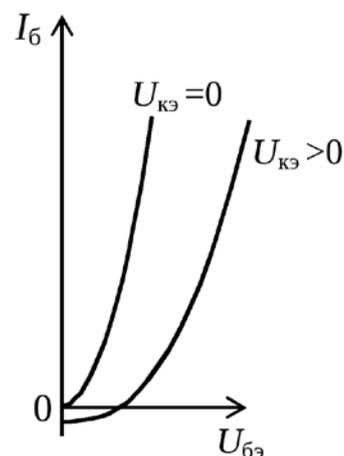


Рисунок 11 – Входные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

Типичные зависимости тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером (выходные характеристики), полученные при разных токах базы, изображены на рисунке 12 [9, 10]. При подаче и увеличении напряжения $U_{кэ}$ между эмиттером и коллектором увеличивается напряжение на переходе база-коллектор и ускоряющее поле, которое переносит электроны из базы в коллектор. Причем, чем больше поле, тем больше носителей переносится в коллек-

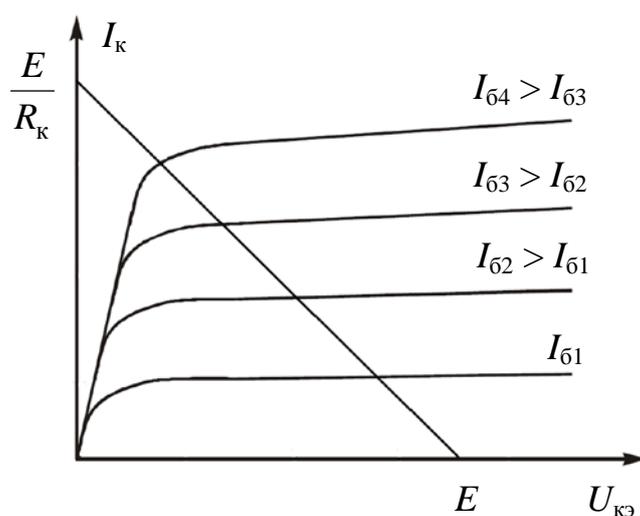


Рисунок 12 – Выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

тор. При фиксированном напряжении база – эмиттер число носителей, переносимых в базу за единицу времени, тоже фиксировано, и им ограничивается максимальное количество электронов, которое может быть перенесено в коллектор. При переносе всех носителей наступает режим насыщения, т.е. все электроны, поступившие из эмиттера в базу, попадают в коллектор, и на выходной характеристике должен быть горизонтальный участок. Однако реальная выходная характеристика транзистора в этой области идет с небольшим подъемом, который обусловлен явлением, называемым *модуляцией базы*. Дело в том, что с увеличением напряжения эмиттер-коллектор ширина коллекторного р-п перехода увеличивается, и поле перехода начинает захватывать и переносить электроны из тех участков базы, из которых раньше они не переносились. В этом случае ток базы транзистора уменьшается, а ток коллектора – увеличивается, и на выходной характеристике появляется участок подъема. Рабочие части выходных характеристик – это почти параллельные линии. Из рисунка 12 видно, что небольшое изменение тока базы вызывает в десятки раз большее изменение коллекторного тока. Это и есть важнейшее свойство биполярного транзистора. Маленький ток базы может управлять большим током коллектора.

Ток базы, коллектора и эмиттера связаны следующими соотношениями

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}, \quad I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}}, \quad I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}},$$

где $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ – статический коэффициент усиления по току.

Схема простейшего усилительного каскада с общим эмиттером изображена на рисунке 13. Основа каскада выделена на рисунке пунктиром. Для удаления постоянной составляющей входного сигнала источник подключается к входу каскада через разделительную ёмкость C_1 . С той же целью выход каскада подключается к емкостной нагрузке $C_{\text{н}}$ через конденсатор C_2 . Поскольку ёмкости вносят во входную и выходную цепи дополнительное реактивное сопротивление, они искажают сигнал, однако выбором достаточно больших величин ёмкостей эти искажения сводятся к минимуму. Ёмкость конденсатора C_1 выбирается из условия, чтобы его емкостное сопротивление на нижней частоте $f_{\text{н}}$ было много меньше входного сопротивления каскада $(2\pi f_{\text{н}} C_1)^{-1} \ll R_{\text{вх}}$. Обычно считают, что емкостное сопротивление составляет

не больше 10% от входного сопротивления. Аналогично рассчитывается и емкость разделительного конденсатора C_2 . Только расчет ведется с учетом сопротивления нагрузки [9, 12].

Резистор R_k является коллекторной нагрузкой каскада, ограничивающей коллекторный ток, а с помощью R_1 в цепи базы задается базовый ток.

Базовый ток регулируется изменением напряжения источника питания $+U$. Следует отметить, что в реальных усилительных каскадах применяют, конечно, один источник питания, а базовый ток регулируют изменением сопротивления R_1 . Для учебных целей удобнее регулировать напряжение $+U$.

При подаче на вход рассматриваемого каскада положительной полуволны входного сигнала ток эмиттера и ток коллектора будут увеличиваться. Это приводит к увеличению падения напряжения на R_k и уменьшению $U_{кэ}$, что приводит к формированию отрицательной полуволны выходного напряжения $U_{вых}$. Полярности входного и выходного напряжений противоположны, схема инвертирует входной сигнал.

Чтобы проанализировать работу усилительного каскада, на графике с выходными характеристиками проводят нагрузочную прямую. Для этого на оси абсцисс ставят точку с координатой $U_{кэ} = E$, т.к. при отсутствии коллекторного тока напряжение на R_k равно нулю. Величина э.д.с. источника питания E выбирается несколько меньше максимально допустимого напряжения на коллекторе $U_{к\max}$, задаваемого в характеристиках транзистора, в пределах $E = (0.7 - 0.9) U_{к\max}$ [9]. На оси ординат ставят точку с координатой $I_k = E/R_k$, т.к. $U_{кэ} = 0$. Между этими точками проводится прямая, как показано на рисунке 12. Точки пересечения нагрузочной прямой с выходными характеристиками являются *рабочими точками* каскада. Как правило, выбирают ту рабочую точку, которая находится на линейном участке выходной ха-

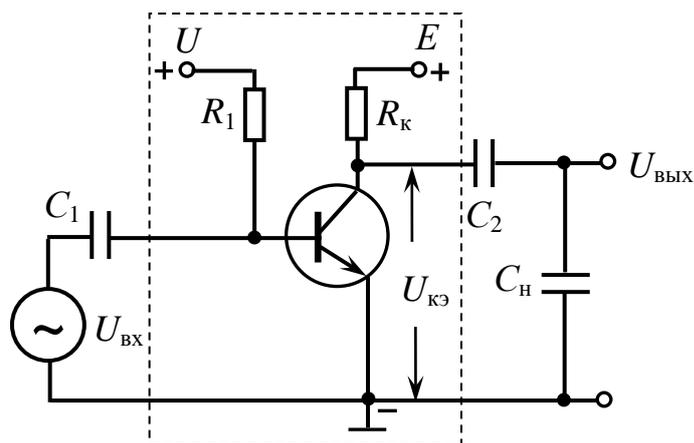


Рисунок 13 – Схема усилительного каскада с ОЭ

рактеристики и в которой напряжение на коллекторе $U_{кэ}$ равно $E/2$. В этом случае коэффициент усиления каскада будет максимален.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя показывает зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала (рисунок 14). Характеристика имеет участок, на котором коэффициент усиления по напряжению не зависит от частоты. Этот участок ограничен в области низких частот нижней граничной частотой f_n , а в области высоких частот – верхней граничной частотой f_v . При этих частотах коэффициент усиления уменьшается по сравнению с максимальным в $\sqrt{2}$ раз. Область частот между f_n и f_v называется *полосой пропускания* усилителя. Частоты меньшие f_n и большие f_v образуют области частотных искажений и в работе усилителя не используются [12].

Амплитудная характеристика усилителя, т.е. зависимость выходного напряжения от входного на средних частотах, показана на рисунке 15. При отсутствии входного сигнала на выходе есть напряжение, обусловленное внутренними шумами усилителя (точка O). Прямолинейный участок AB является рабочим. Участок BE обусловлен нелинейностью элементов усилителя при большой амплитуде входного сигнала [12].

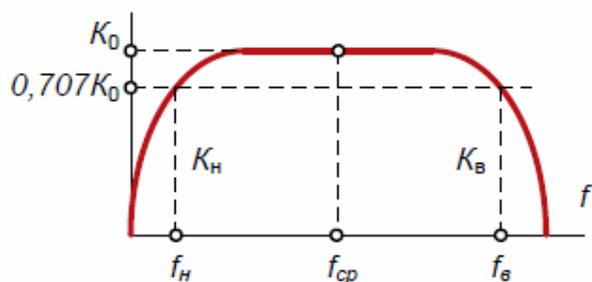


Рисунок 14 – Амплитудно-частотная характеристика усилителя

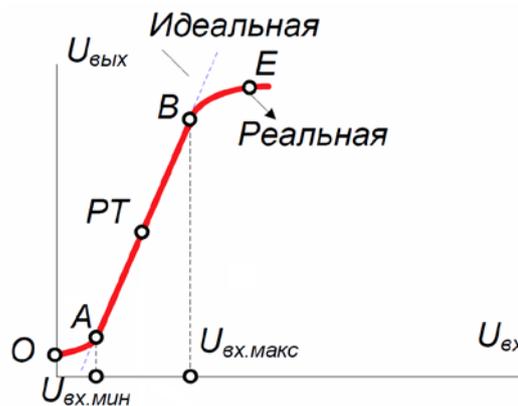


Рисунок 15 – Амплитудная характеристика усилителя

Контрольные вопросы

1. Как выглядит схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером?
2. Каков вид входной характеристики для схемы с ОЭ?
3. Почему на входной характеристике при ненулевом напряжении между коллектором и эмиттером наблюдается отрицательный участок тока базы?
4. Каков вид выходной характеристики для схемы с ОЭ?
5. Почему, начиная с некоторого значения напряжения между коллектором и эмиттером, ток коллектора становится практически постоянным?
6. В чем заключается эффект модуляции базы?
7. Как выглядит схема усилительного каскада с общим эмиттером?
8. Каково назначение конденсаторов и резисторов, входящих в схему усилительного каскада с ОЭ?
9. Почему схема с общим эмиттером инвертирует входной сигнал?
10. Что называют рабочей точкой каскада? Как ее определяют?
11. Каков вид амплитудно-частотной характеристики усилителя?
12. Каков вид амплитудной характеристики усилителя?

2.2 Схема с общей базой

Входной характеристикой для схемы с общей базой (рисунок 10 а) является зависимость напряжения между эмиттером и базой $U_{эб}$ от входного тока $I_э$ при постоянном значении напряжения между коллектором и базой $U_{кб}$. При $U_{кб} = 0$ эта характеристика подобна вольт-амперной характеристике полупроводникового диода, включенного в прямом направлении, как показано на рисунке 16 [13-15]. При увеличении коллек-

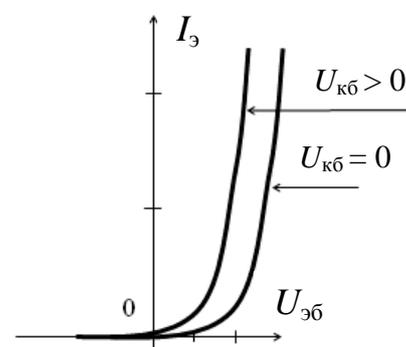


Рисунок 16 – Входные характеристики в схеме с общей базой

торного напряжения ветви характеристик германиевых и кремниевых транзисторов смещаются влево. Это обусловлено уменьшением толщины базы (эффект Эрли), которое приводит к уменьшению ее сопротивления. Поэтому при неизменном напряжении $U_{эб}$ ток $I_э$ увеличивается.

Выходная характеристика для схемы с общей базой представляет собой зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения $U_{кб}$ при постоянном входном токе $I_э$. Как видно из рисунка 17, при $U_{кб} = 0$ ток коллектора $I_к \neq 0$, т.к. основные носители области эмиттера, инжектированные в базу, дрейфуют через коллекторный p-n-переход в область коллектора. Ток коллектора $I_к$ обращается в ноль при некотором напряжении обратной полярности $U_{кб} < 0$ (при прямом смещении коллекторного перехода). При нулевом токе эмиттера $I_э$ ток коллектора $I_к$ представляет собой обратный ток перехода коллектор-база [13-15].

Незначительный наклон выходных характеристик указывает на высокое омическое сопротивление коллекторного перехода, достигающее десятков и даже сотен кОм.

Построение нагрузочной прямой и выбор рабочей точки осуществляется аналогично схеме с общим эмиттером. Прямая проводится между точками с координатами $(E, 0)$ и $(0, E/R_к)$. Точка пересечения этой прямой с выходной характеристикой на линейном ее участке может быть выбрана в качестве рабочей точки.

Транзистор, включенный по схеме с общей базой, не дает усиления по току. Коэффициент передачи тока α для каскада с общей базой меньше единицы, т.к. часть эмиттерного тока ответвляется в базу $I_э - I_б = I_к$.

На рисунке 18 изображена принципиальная схема усилительного каскада с общей базой. Резистор $R_к$ является нагрузкой транзистора и определяет его усиленные свойства. Если $R_к = 0$, то усиления напряжения не происходит, т.к. $U_{кб} = E = const$. Назначение разделительных конденсаторов C_1 и C_2 такое же, как и в схеме с общим эмиттером (пункт 2.1).

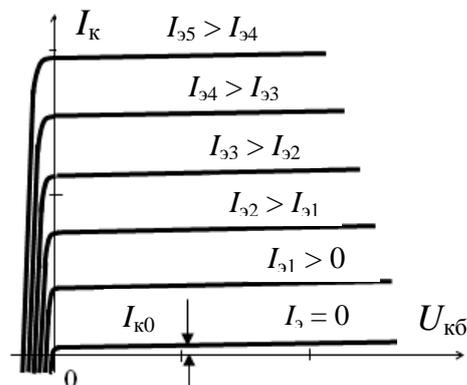


Рисунок 17 – выходные характеристики в схеме с общей базой

При подаче на вход рассматриваемого каскада положительной полуволны входного сигнала ток эмиттера и ток коллектора будут уменьшаться. Это приводит к уменьшению падения напряжения на R_k и увеличению $U_{кб}$, что приводит к формированию положительной полуволны выходного напряжения $U_{вых}$. Полярности входного и выходного напряжений совпадают, схема не инвертирует входной сигнал [13-15].

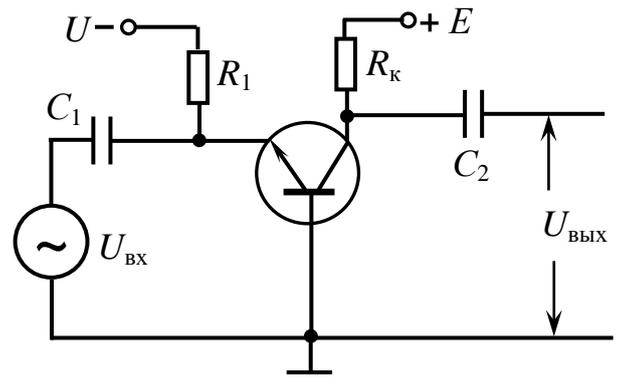


Рисунок 18 – Схема усилительного каскада с общей базой

Контрольные вопросы

1. Как выглядит схема включения биполярного транзистора с ОБ?
2. Каков вид входных характеристик для схемы с ОБ?
3. Почему с ростом напряжения между коллектором и базой входная характеристика смещается влево?
4. Каков вид выходных характеристик для схемы с ОБ? В чем их отличие от выходных характеристик в схеме с ОЭ?
5. Почему, при нулевом напряжении между коллектором и базой ток коллектора отличен от нуля?
6. Как строится нагрузочная прямая и выбирается рабочая точка?
7. Как выглядит схема усилительного каскада с ОБ?
8. Каково назначение конденсаторов и резисторов, входящих в схему усилительного каскада с ОБ?
9. Почему в схеме с ОБ выходной сигнал не инвертируется относительно входного?

2.3 Схема с общим коллектором

Входной характеристикой для схемы с общим коллектором (рисунок 10 в) является зависимость входного тока I_6 от напряжения между базой и коллектором $U_{6к}$ при постоянном значении напряжения между эмиттером и коллектором $U_{эк}$ (рисунок 19). Пусть $U_{эк} = 0$, тогда при $U_{6к} = 0$ источников электрической

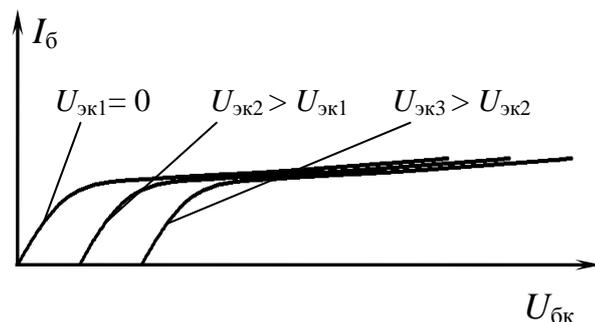


Рисунок 19 – Входные характеристики в схеме с общим коллектором

энергии нет, и $I_6 = 0$. При увеличении $U_{6к}$ переход база-коллектор смещается в обратном направлении, поэтому входная характеристика – это обратная ветвь р-п-перехода. При $U_{эк} \neq 0$ появится поле, которое будет пытаться сместить эмиттерный переход в прямом направлении. Через переход эмиттер–база потечет ток основных носителей, большинство которых попадают затем в коллектор. Малая часть этих носителей попадет в базу и при некотором напряжении $U_{6к}$ компенсирует обратный ток базы. Таким образом, суммарный базовый ток обратится в ноль. С ростом напряжения $U_{6к}$ ток основных носителей, пришедших из эмиттера уже не будет компенсировать обратный ток неосновных носителей. Поэтому при увеличении $U_{эк}$ входная характеристика смещается вправо по оси напряжений. Поскольку ток неосновных носителей очень мал, то входное сопротивление схемы с ОК велико и составляет сотни кОм, что является важным достоинством схемы [15].

Выходной характеристикой служит зависимость эмиттерного тока I_3 от напряжения между эмиттером и коллектором $U_{эк}$ при постоянном токе базы. Выходные характеристики в данной схеме мало отличаются от характеристик в схеме с общим эмиттером, как показано на рисунке 20. Однако при одинаковом значении входного тока I_6 выходной ток I_3 несколько выше в схеме с ОК, т.к. $I_3 = I_к + I_6$.

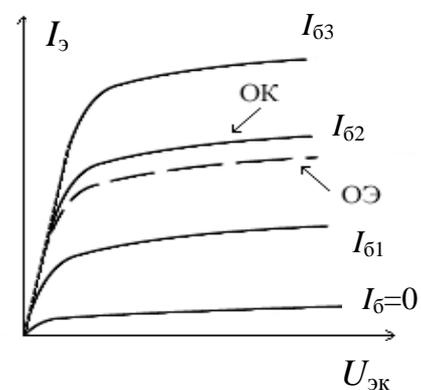


Рисунок 20 – Выходные характеристики в схеме с общим коллектором

Коэффициент усиления по току в этой схеме

равен

$$K_I = \frac{I_э}{I_б} = \frac{I_к + I_б}{I_б} = \beta + 1 \gg 1.$$

Входное напряжение мало отличается от выходного, так как $U_{бк} = U_{эк} - U_{бэ} \approx U_{эк}$. Поэтому схемы с использованием транзистора с ОК называют *повторителями напряжения* или *эмиттерными повторителями*, поскольку нагрузка обычно подключается к эмиттеру.

Выходное сопротивление схемы с ОК является сравнительно небольшим, обычно единицы килоом или сотни ом.

По аналогии со схемой с ОЭ, в схеме с ОК общим для входного и выходного сигналов должен быть коллектор. Как видно из рисунка 21а, в этой схеме к общей шине подключен «+» источника питания E , в то время как в схеме с ОЭ к общей шине подключен «-». Учитывая, что внутреннее сопротивление источника питания E очень мало, можно выполнить эту схему подобно схеме с ОЭ, но в отличие от нее добавочное сопротивление оставить в эмиттерной цепи, как показано на рисунке 21б. Тогда через источник питания коллектор останется общим для входного и выходного сигналов, как и в схеме на рисунке 21а, а общей шиной будет шина «-» источника питания. Такая схема включения практически более удобна.

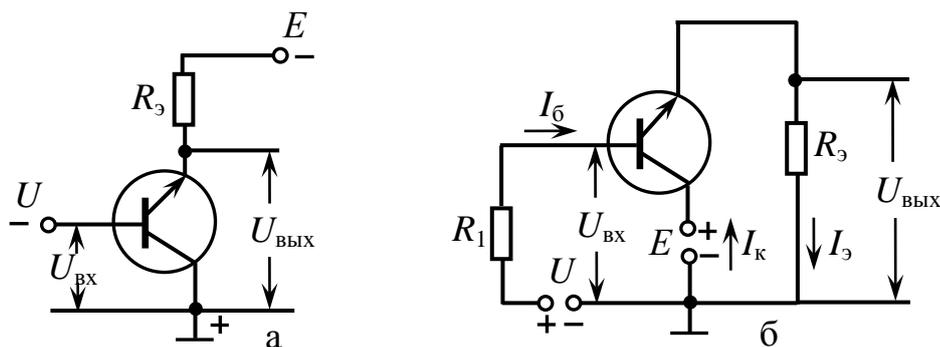


Рисунок 21 – Схема с общим коллектором: а) схема с общим «+»; б) схема с общим «-»

Заметим, что если транзистор включать в схему, как на рисунке 21б, входные характеристики будут подобны характеристикам в схеме с ОЭ.

На рисунке 22 изображена принципиальная схема эмиттерного повторителя. Резистор R_3 является нагрузкой транзистора и определяет его усилительные свойства [15]. Назначение разделительных конденсаторов C_1 и C_2 такое же, как и в схемах с общим эмиттером и общей базой.

Также как и в схеме с ОБ, в данной схеме выходной сигнал не инвертируется относительно входного. Кроме того, также как и в схеме с ОЭ, в реальных усилительных каскадах применяют один источник питания, а базовый ток регулируют изменением сопротивления R_1 .

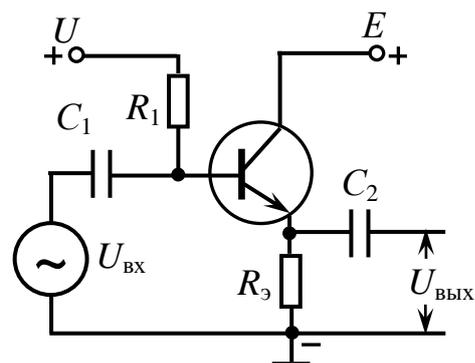


Рисунок 22 – Схема усилительного каскада с общим коллектором

Контрольные вопросы

1. Как выглядит схема включения транзистора с общим коллектором?
2. Каковы входные характеристики данной схемы?
3. Почему у данной схемы включения большое входное сопротивление?
4. Каковы выходные характеристики схемы с ОК?
5. Почему схему с ОК называют эмиттерным повторителем?
6. Каков коэффициент усиления по току в данной схеме?
7. Какими способами можно реализовать схему с ОК?
8. Почему в схеме с ОК не происходит инвертирования входного сигнала?

3 Экспериментальная часть

3.1 Приборы и оборудование

Питание схемы осуществляется источниками постоянного тока Б5-8, предназначенными для использования в процессе разработки, производства и настройки радиоизмерительной аппаратуры. Внешний вид источника показан на рисунке 23. Выходное напряжение прибора регулируется от нуля до максимального значения 50 В десятью ступенями. Рабочий диапазон выходного напряжения от 2 до 50В. Номинальный ток нагрузки 2А.



Рисунок 23 – Источник питания постоянного тока Б5-8

Источником усиливаемого сигнала служит генератор низкой частоты, находящийся в лабораторном комплексе ЛКВ-1. Внешний вид передней панели генератора показан на рисунке 24. Генератор имеет диапазон частоты от 1 до 10000 Гц и диапазон выходного напряжения от 0 до 6 В, выдает синусоидальные и импульсные прямоугольные сигналы. Генератор может работать в двух режимах: как источник напряжения и как источник тока.



Рисунок 24 – Генератор низкой частоты

Для измерения амплитуды сигнала, подаваемого на вход усилителя от генератора низкой частоты и амплитуды усиленного сигнала, а также для контроля формы выходного сигнала, используется двухканальный осциллограф С1-131, внешний вид

которого изображен на рисунке 25. Двухканальный однолучевой осциллограф С1-131 имеет полосу пропускания 0 - 20 МГц и предназначен для исследования формы сигналов и измерения их параметров в диапазоне чувствительности по вертикали от 2 мВ/дел. до 10 В/дел. с шагом 1, 2, 5 и с диапазоном коэффициентов развертки по горизонтали от 0,02 мкс/дел. до 10 с/дел., также с шагом 1, 2, 5.



Рисунок 25 – Осциллограф С1-131

Генератор и осциллограф подключаются с помощью комплекта кабелей лабораторного комплекса ЛКВ-1.

Измерение статических характеристик транзистора осуществляется с помощью мультиметра и амперметра.

3.2 Исследование схемы с общим эмиттером

Задание 1 Построение входных характеристик биполярного транзистора.

1. Для измерения входной характеристики транзистора собрать схему, изображенную на рисунке 26. Для р-п-р транзистора изменить полярности источников. Сопротивление резистора R_1 выбирается из условия, чтобы напряжение, приложенное к переходу база-эмиттер, не превосходило 0,7 В для кремниевых транзисторов и 0,3 В для германиевых.

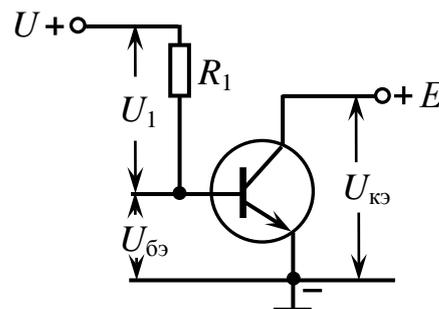


Рисунок 26 – Схема для измерения входной характеристики п-р-п транзистора

При превышении этих входных напряжений токи, проходящие через транзистор, могут стать недопустимо большими, что приведет к пробое транзистора. Как правило, величина этого сопротивления составляет десятки кОм. Подать на схему постоянное напряжение $+U$ от одного из источников питания. Установить напряжение

между коллектором и эмиттером равное 0 В, соединив соответствующие выводы транзистора.

2. Изменяя напряжение питания U так, чтобы напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ}$ изменялось в диапазоне от 0 до 0,3 В (для германиевых транзисторов) или до 0,7 В (для кремниевых транзисторов), для каждого значения U измерить напряжение $U_{бэ}$ и напряжение U_1 на резисторе R_1 . Затем вычислить базовый ток по формуле $I_б = U_1/R_1$. Полученные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

U , В									
U_1 , В									
$U_{бэ}$, В									
$I_б$, мкА									

3. Подать между коллектором и эмиттером напряжение $+E = 5$ В от второго источника питания. Повторить измерения и вычисления пункта 2.

4. По полученным данным построить входные характеристики транзистора (ток базы $I_б$ в зависимости от напряжения $U_{бэ}$ между базой и эмиттером при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером). По входным характеристикам для $U_{кэ} = 0$ В, а также $U_{кэ} = 5$ В определить входное сопротивление транзистора по переменному току $R_{вх\sim} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_б$ и по постоянному току $R_{вх_} = U_{бэ} / I_б$ при токах базы $I_б$, указанных преподавателем. При расчетах интервал изменения базового тока $\Delta I_б$, охватывающий $I_б$, нужно выбирать составляющим единицы процентов от заданной величины $I_б$.

Задание 2 Построение выходных характеристик биполярного транзистора.

1. Для измерения выходной характеристики транзистора подключить к выводу коллектора нагрузку $R_к$, как показано на рисунке 27. Сопротивление этого резистора обычно не рассчитывается, а берется равным от нескольких сот Ом до нескольких кОм. От величины этого резистора зависит коэффициент усиления каскада по пере-

менному току. На схему подать два постоянных напряжения питания $+U$ и $+E$. Установить напряжение питания $E = 10$ В. Регулировкой напряжения $+U$ установить такой ток базы, при котором напряжение на коллекторе $U_{кэ} = E/2 = 5$ В.

2. Так же, как в предыдущем задании, определить ток базы $I_б$. Не меняя тока базы, изменять напряжение E так, чтобы коллекторное напряжение $U_{кэ}$ изменялось в диапазоне от 0 до 10 В. Для каждого значения E измерять напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$ и напряжение $U_к$ на резисторе $R_к$. Затем определить ток коллектора по формуле $I_к = U_к / R_к$. При каждом измерении контролировать и при необходимости восстанавливать ток базы $I_б$. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

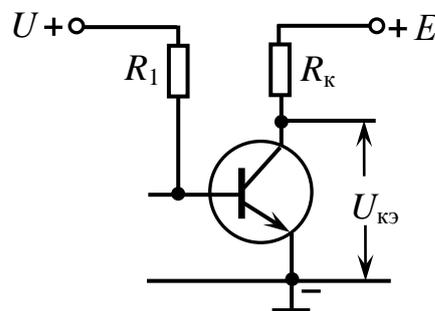


Рисунок 27 – Основа усилительного каскада с общим эмиттером

Таблица 2

$E, \text{ В}$									
$U_{кэ}, \text{ В}$									
$U_к, \text{ В}$									
$I_к, \text{ мА}$									

3. Повторить измерения пункта 2 с токами базы, соответствующими начальным напряжениям на коллекторе $U_{кэ} = 4$ и 6 В.

4. По полученным данным построить выходные характеристики транзистора (зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения $U_{кэ}$ между коллектором и эмиттером при постоянном токе базы). Провести нагрузочную прямую и определить рабочие точки.

5. По графикам выходных характеристик для $U_{кэ} = 5$ В определить выходные сопротивления транзистора по переменному току $R_{вых\sim} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_к$ и по постоянному току $R_{вых_} = U_{кэ} / I_к$ при разных токах базы.

6. По графикам выходных характеристик транзистора определить коэффициент усиления по току $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ при напряжении $U_{кэ} = 5$ В для измеренных значений тока коллектора.

Задание 3 Построение амплитудной характеристики усилителя.

1. Собрать схему усилительного каскада, изображенную на рисунке 13. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 взять по 10 мкФ каждый. Если конденсаторы полярные, то при их подключении соблюдать полярность (например, для конденсатора C_1 «плюс» припаивать к базе n-p-n транзистора и «минус» – к базе p-n-p транзистора). Величину емкостной нагрузки выбрать $C_H \ll C_2$. Установить напряжения и токи, соответствующие рабочей точке.

2. Сигнал с генератора подать на вход усилителя и на вход Y1 осциллографа. К выходу усилителя подключить второй вход Y2 осциллографа. Частоту входного сигнала установить примерно равной 1000 Гц. Изменяя амплитуду входного сигнала в диапазоне от 0 до 200 мВ, измерить амплитуду выходного сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3

$U_{вх},$ мВ									
$U_{вых},$ В									

3. По полученным данным построить зависимость выходного напряжения от входного. На линейном участке амплитудной характеристики определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{вых} / U_{вх}$.

Задание 4 Построение амплитудно-частотной характеристики.

1. Подать на вход усилителя сигнал такой амплитуды, чтобы выходной сигнал был неискаженным. Для каждой частоты сигнала, измерять амплитуду сигнала на выходе усилителя и вычислять коэффициент усиления по напряжению. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.

Таблица 4

$f, \text{Гц}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									
K_U									
$K_U/K_{U \text{ max}}$									

2. По полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику в полулогарифмическом масштабе. По оси абсцисс частоту f откладывать в логарифмическом масштабе (не саму частоту, а ее десятичный логарифм), а по оси ординат нормированный коэффициент усиления $K_U/K_{U \text{ max}}$ откладывать в линейном масштабе.

Задание 5 Измерение входного сопротивления усилителя.

1. Добавить в схему резистор переменного сопротивления R_x , как показано на рисунке 28. Пользуясь результатами предыдущего задания, частоту генератора установить такой, чтобы коэффициент усиления был максимальным. Плавно увеличивать сопротивление R_x от 0 до тех пор, пока выходное напряжение не уменьшится вдвое. При этом входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}}$ будет равно R_x . Измерить R_x мультиметром.

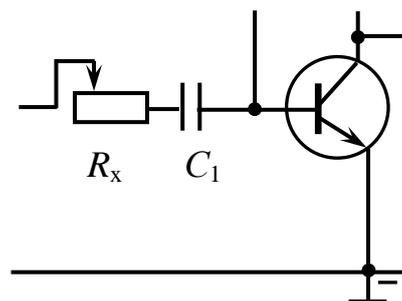


Рисунок 28 – Участок схемы с переменным резистором

2. По измеренным выходным характеристикам транзистора определить коэффициент усиления по напряжению по формуле $K_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / (\Delta I_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}})$. $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и $\Delta I_{\text{Б}}$ находить как разности значений соответствующих величин в точках пересечения нагрузочной прямой с выходными характеристиками. Сравнить вычисленный коэффициент усиления с экспериментальным.

3. Зная входное сопротивление, найти нижнюю граничную частоту полосы пропускания усилителя по формуле $f_{\text{Н}} = (2\pi R_{\text{ВХ}} C_1)^{-1}$. Сравнить вычисленную ча-

стоту с экспериментальной, определенной по амплитудно-частотной характеристике.

Контрольные вопросы

1. Поясните порядок измерения статических характеристик в схеме с ОЭ.
2. Как с помощью статических характеристик транзистора определить его входное и выходное сопротивление по постоянному и переменному току?
3. Как с помощью выходных характеристик определить коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ?
4. Поясните порядок измерения амплитудной и амплитудно-частотной характеристик.
5. Как с помощью амплитудной характеристики найти коэффициент усиления по напряжению?
6. Как с помощью переменного сопротивления определить входное сопротивление усилительного каскада с ОЭ?
7. Сделайте выводы по работе.

3.3 Исследование схемы с общей базой

Задание 1 Построение входных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой.

1. Для измерения входной характеристики транзистора собрать схему, изображенную на рисунке 29. Выбрать величину сопротивления R_1 равной 1-2 кОм. Подать на схему постоянное напряжение $-U$ от одного из источников питания. Установить напряжение между коллектором и базой равное 0 В, соеди-

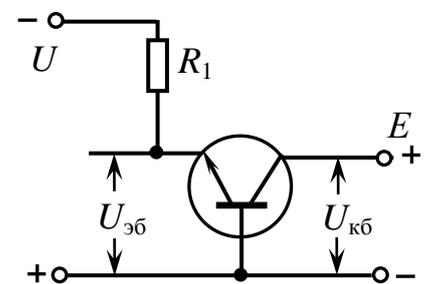


Рисунок 29 – Схема для измерения входной характеристики n-p-n транзистора

нив соответствующие выводы транзистора. Для р-п-р транзистора изменить полярности источников.

2. Изменяя напряжение питания U так, чтобы напряжение $U_{эб}$ изменялось в диапазоне от 0 до 0,3 или до 0,7 В в зависимости от вида транзистора, для каждого значения U измерить напряжение U_1 на резисторе R_1 и напряжение между эмиттером и базой $U_{эб}$. Затем вычислить эмиттерный ток по формуле $I_э = U_1/R_1$. Полученные данные занести в таблицу 5.

Таблица 5

$U, В$									
$U_1, В$									
$U_{эб}, В$									
$I_э, мА$									

3. Подать между коллектором и базой напряжение $E = +5 В$ от второго источника питания. Повторить измерения и вычисления пункта 2.

4. По полученным данным построить входные характеристики транзистора (ток эмиттера $I_э$ в зависимости от напряжения $U_{эб}$ между эмиттером и базой при постоянном напряжении между коллектором и базой). По входным характеристикам для $U_{кб} = 0 В$, а также $U_{кб} = 5 В$ определить входное сопротивление транзистора по переменному току $R_{вх\sim} = \Delta U_{эб}/\Delta I_э$ и по постоянному току $R_{вх_} = U_{эб}/I_э$ при токах эмиттера, заданных преподавателем. При расчетах интервал изменения эмиттерного тока $\Delta I_э$, охватывающий $I_э$, нужно выбирать составляющим единицы процентов от заданной величины $I_э$.

Задание 2 Построение выходных характеристик биполярного транзистора.

1. Для измерения выходной характеристики транзистора подключить к выводу коллектора нагрузку $R_к$, как показано на рисунке 30. От сопротивления этого резистора, которое должно быть больше R_1 и обычно составляет несколько кОм, зависит

коэффициент усиления каскада по напряжению. На схему подать два постоянных напряжения питания $-U$ и $+E$.

2. Регулируя U , установить ток эмиттера $I_э = 1$ мА. Изменять напряжение E в таком диапазоне, чтобы напряжение между коллектором и базой $U_{кб}$ варьировалось от -1 до 10 В. Для каждого значения E измерять коллекторное напряжение $U_{кб}$ и напряжение $U_к$ на резисторе $R_к$, затем определять ток коллектора по формуле $I_к = U_к / R_к$. При каждом измерении контролировать и при необходимости восстанавливать ток эмиттера $I_э$. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.

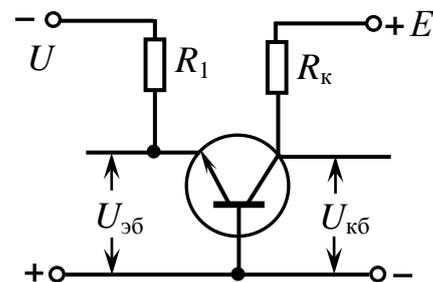


Рисунок 30 – Схема для измерения выходной характеристики

Таблица 6

$E, \text{В}$									
$U_{кб}, \text{В}$									
$U_к, \text{В}$									
$I_к, \text{мА}$									

3. Повторить измерения пункта 2 для токов эмиттера $I_э = 3$ и 5 мА.

4. По полученным данным построить выходные характеристики транзистора (зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения $U_{кб}$ между коллектором и базой при постоянном токе эмиттера). Провести нагрузочную прямую и определить рабочие точки.

5. По построенным характеристикам определить выходные сопротивления транзистора по постоянному току $R_{вых_} = U_{кб} / I_к$ в рабочих точках при разных токах эмиттера.

6. По горизонтальным участкам выходных характеристик транзистора определить коэффициент передачи тока $\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э$.

Задание 3 Построение амплитудной характеристики усилителя.

1. Собрать схему усилительного каскада, изображенную на рисунке 18. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 взять по 10 мкФ каждый. Установить напряжения и токи, соответствующие рабочей точке.

2. Сигнал с генератора подать на вход усилителя и на вход Y1 осциллографа. К выходу усилителя подключить второй вход Y2 осциллографа. Частоту входного сигнала установить равной 3 - 5 кГц. Изменяя амплитуду входного сигнала в диапазоне от 0 до 0.2 В, измерить амплитуду выходного сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 7.

Таблица 7

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$									
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									

3. По полученным данным построить зависимость выходного напряжения от входного. На линейном участке амплитудной характеристики определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$.

Задание 4 Построение амплитудно-частотной характеристики.

1. Подать на вход усилителя сигнал такой амплитуды, чтобы искажения выходного сигнала были слабыми. Для каждой частоты сигнала, измерять амплитуду сигнала на выходе усилителя и вычислять коэффициент усиления по напряжению. Результаты измерений занести в таблицу 8.

Таблица 8

$f, \text{ Гц}$									
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									
K_U									
$K_U / K_{U \text{ max}}$									

2. По полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику. По оси абсцисс частоту откладывать в логарифмическом масштабе (не саму частоту, а ее десятичный логарифм), а по оси ординат нормированный коэффициент усиления откладывать в линейном масштабе. По графику определить граничные частоты полосы пропускания усилителя.

Контрольные вопросы

1. Поясните порядок измерения статических характеристик в схеме с ОБ.
2. Как с помощью статических характеристик транзистора определить его входное и выходное сопротивление по постоянному и переменному току?
3. Как с помощью выходных характеристик определить коэффициент передачи тока в схеме с ОБ?
4. Поясните порядок измерения амплитудной и амплитудно-частотной характеристик.
5. Как с помощью амплитудной характеристики найти коэффициент усиления по напряжению?
6. Сделайте выводы по работе.

3.4 Исследование схемы с общим коллектором

Задание 1 Построение входных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим коллектором.

1. Для измерения входной характеристики транзистора собрать схему, изображенную на рисунке 31. Подать на схему постоянное напряжение $-U$ от одного из источников питания. Установить напряжение между коллектором и эмиттером равное 0 В, соединив соответствующие выводы транзистора.

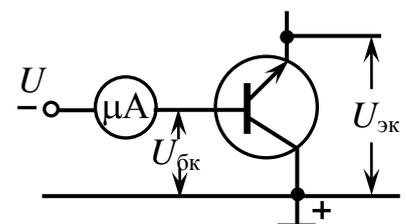


Рисунок 31 – Схема для измерения входной характеристики n-p-n транзистора

2. Изменяя напряжение питания U в диапазоне от 0 до 10 В, для каждого значения $U = U_{кб}$ измерить силу тока базы $I_б$. Полученные данные занести в таблицу 9.

Таблица 9

$U_{кб}$, В									
$I_б$, мкА									

3. Подать между коллектором и эмиттером напряжение $+E = 10$ В от второго источника питания. Повторить измерения пункта 2.

4. По полученным данным построить входные характеристики транзистора (ток базы $I_б$ в зависимости от напряжения $U_{бк}$ между базой и коллектором при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером). По входным характеристикам для $U_{кэ} = 0$ В, а также $U_{кэ} = 5$ В определить входное сопротивление транзистора по переменному току $R_{вх\sim} = \Delta U_{бк} / \Delta I_б$ и по постоянному току $R_{вх_} = U_{бк} / I_б$ при токах базы, указанных преподавателем. При расчетах интервал изменения базового тока $\Delta I_б$, охватывающий $I_б$, нужно выбирать составляющим единицы процентов от заданной величины $I_б$.

Задание 2 Построение выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с ОК.

1. Для измерения выходной характеристики транзистора подключить к выводу эмиттера нагрузку $R_э$, как показано на рисунке 32. Этот резистор ограничивает эмиттерный ток, и его величина обычно составляет 1 - 5 кОм. На схему подать два постоянных напряжения питания $-U$ и $-E$.

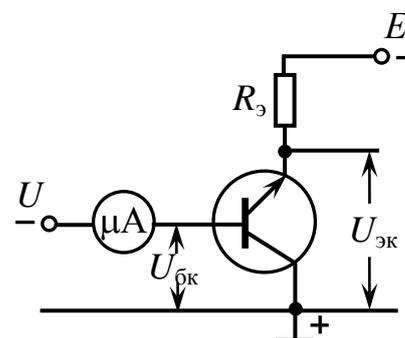


Рисунок 32 – Схема для измерения выходной характеристики

2. Установить ток базы $I_б = 10$ мкА. Изменять напряжение E в таком диапазоне, чтобы напряжение $U_{эк}$ изменялось от 0 до 10 В. Для каждого значения E измерять напряжение между эмиттером и коллектором $U_{эк}$ и напряжение $U_э$ на рези-

сторы R_3 , затем определять ток эмиттера по формуле $I_3 = U_3 / R_3$. При этом следить, чтобы выполнялось неравенство $|U_{эк}| > |U_{бк}|$, и при каждом измерении контролировать и при необходимости восстанавливать ток базы I_6 . Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 10.

Таблица 10

$E, \text{ В}$									
$U_{эк}, \text{ В}$									
$U_3, \text{ В}$									
$I_3, \text{ мА}$									

3. Повторить измерения пункта 2 для токов базы $I_6 = 15$ и 20 мкА.

4. По полученным данным построить выходные характеристики транзистора (зависимость тока эмиттера I_3 от напряжения $U_{эк}$ между эмиттером и коллектором при постоянном токе базы).

5. По графикам выходных характеристик для $U_{эк} = 5$ В определить выходные сопротивления транзистора по переменному току $R_{вых\sim} = \Delta U_{эк} / \Delta I_3$ и по постоянному току $R_{вых_} = U_{эк} / I_3$ при разных токах эмиттера.

6. По графикам выходных характеристик транзистора определить коэффициент передачи тока $\alpha = \Delta I_3 / \Delta I_6$ при напряжении $U_{эк} = 5$ В для измеренных значений тока эмиттера.

Задание 3 Построение амплитудной характеристики эмиттерного повторителя.

1. Собрать схему эмиттерного повторителя, изображенную на рисунке 22. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 взять по 10 мкФ каждый. Сопротивление R_1 выбрать равным от 10 до 40 кОм, сопротивление R_3 – несколько сотен Ом. Установить напряжение $E = 10$ В и напряжение U такое, чтобы напряжение $U_{эк}$ между эмиттером и коллектором было 5 В.

2. Сигнал с генератора подать на вход повторителя и на вход Y1 осциллографа. К выходу повторителя подключить второй вход Y2 осциллографа. Частоту

входного сигнала установить в пределах 3 - 5 кГц. Изменяя амплитуду входного сигнала в диапазоне от 0 до 0.2 В, измерить амплитуду выходного сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 11.

Таблица 11

$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$									

3. По полученным данным построить зависимость выходного напряжения от входного. На линейном участке амплитудной характеристики определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$.

Задание 4 Построение амплитудно-частотной характеристики.

1. Подать на вход повторителя сигнал с амплитудой ~ 50 мВ. Изменять частоту входного сигнала и для каждой частоты измерять амплитуду сигнала на выходе повторителя, затем вычислять коэффициент усиления по напряжению. Результаты измерений занести в таблицу 12.

Таблица 12

$f, \text{ Гц}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$									
K_U									
$K_U / K_{U \text{ max}}$									

2. По полученным данным построить амплитудно-частотную характеристику в полулогарифмическом масштабе. По оси абсцисс частоту откладывать в логарифмическом масштабе (не саму частоту, а ее десятичный логарифм), а по оси ординат нормированный коэффициент усиления откладывать в линейном масштабе. По графику определить граничные частоты полосы пропускания повторителя.

Контрольные вопросы

1. Поясните порядок измерения статических характеристик транзистора в схеме с ОК.
2. Как с помощью статических характеристик транзистора определить его входное и выходное сопротивление по постоянному и переменному току?
3. Как с помощью выходных характеристик определить коэффициент усиления по току в схеме с ОК?
4. Поясните порядок измерения амплитудной и амплитудно-частотной характеристик эмиттерного повторителя.
5. Как с помощью амплитудной характеристики найти коэффициент усиления по напряжению?
6. Сделайте выводы по работе.

Список использованных источников

1. Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова в 5-и т. Т. 4 – М.: Большая российская энциклопедия, – 1994. – С. 35-43. – ISBN 5-85270-034-7.
2. Шалимова, К.В. Физика полупроводников: учебник для вузов / К.В. Шалимова. – СПб.: Лань, – 2010. – 400 с. – ISBN 978-5-8114-0922-8.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 5 кн., кн. 5: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. – М.: АСТ Астрель, – 2002. – 368 с. : ил – ISBN 5-17-004587-5. – ISBN 5-271-01307-3.
4. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, – 1990. – 678 с. – ISBN: 5-02-014032-5. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483346>
5. Молчанов, А.П. Курс электротехники и радиотехники: учеб. пособие / А.П. Молчанов, П.Н. Занадворов. – 4е изд., стереотипн. – СПб.: БХВ Петербург, – 2011. – 608 с.: ил. – ISBN 978-5-9775-0544-4.
6. Троян, П.Е. Твердотельная электроника : учебное пособие / П.Е. Троян. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2006. – 330 с. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208664>
7. Королев, Г.В. Электронные устройства автоматики: учеб. пособие / Г.В. Королев. – М.: Высш. шк, – 1991. – 256 с. – ISBN: 5-06-002034-7.
8. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир. – 1982. – 512 с.
9. Родюков, М.С. Расчёт усилительного каскада с общим эмиттером: методические указания по выполнению домашней работы / М.С. Родюков. – М.: МГУПИ, – 2008. – 49 с.
10. Вятчанин, С.П. Конспект лекций по курсу «Радиофизика» / С.П. Вятчанин. – М.: МГУ, – 2005. – 112 с.

11. Догадин, Н.Б. Биполярные транзисторы: Метод. разраб. по курсу «Радиотехника» / Н.Б. Догадин. – Волгоград: Перемена, – 2004. – 18 с.
12. Артемов, К.С. Усилительные каскады на биполярных транзисторах: метод. указания / К.С. Артемов, Н.Л. Солдатова. – Ярославль: ЯрГУ, – 2007. – 40 с.
13. Быков, Е.В. Практикум по радиоэлектронике: Методическое руководство / Е.В. Быков, Р.В. Воскобойников, А.В. Иванов, Г.И. Кузин, Н.Н. Лебедев, А.Ф. Павлов, О.А. Тенекеджи. – Новосибирск: НГУ, – 2013. – 76 с.
14. Архипов, Е. А. Радиокомпоненты и электроника : метод. указания к лабораторным работам / Е.А. Архипов, О.Р. Никитин, Л.И. Тарарышкина, В. Н. Титов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, – 2005. – 82 с.
15. Лабунский, Л.С. Электроника: Конспект лекций / Л.С. Лабунский. – Самара: СГУПС, – 2012. – 135 с.